



# Gestión de Inundaciones Urbanas

Carlos E. M. Tucci



WMO OMM

Weather • Climate • Water  
Météo • Climat • Eau

Traducción al español: Ana Paula Nespolo

Adaptación de figuras y colaboración en la incorporación de estudios de casos: Carlos Gastón Catalini

Apoyo:

Instituto de Pesquisas Hidráulicas de la Universidade Federal do Rio Grande do Sul, IHP/UFRGS

Associação Brasileira de Recursos Hídricos, ABRH

Universidad Nacional de Córdoba. Instituto Superior de Recursos Hídricos, ISRH/SECyT/UNC.

Comité Permanente de los Congresos Nacionales del Agua, Argentina.

Gestión de Inundaciones Urbanas/ Carlos Eduardo Morelli Tucci

1. Drenaje Urbano. 2. Inundaciones. 3. Urbanización

Mayo de 2007

#### Nota

Las denominaciones empleadas en esta publicación y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, de parte de la Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial, juicio alguno sobre la condición jurídica de ninguno de los países, territorios, ciudades o zonas citados o de sus autoridades, ni respecto de la relimitación de sus fronteras o límites.

Nota editorial: El presente informe se publica sin la revisión editorial de la Secretaría de la OMM. No es una publicación oficial de la Organización y, por lo tanto, su distribución no implica el respaldo de la Organización a las ideas en ella expuestas.

CURSO DE

# Gestión de Inundaciones Urbanas

---

**Carlos E. M. Tucci**

90690-370 Rua Lavradio, 150 cl - Porto Alegre-RS -Brasil  
Tel: (051) 33347604 • [tucci@portoweb.com.br](mailto:tucci@portoweb.com.br)

Revisión general de la versión hispana  
e incorporación de estudios de casos

**Juan Carlos Bertoni**

Marzo de 2006

---

## **PRESENTACIÓN**

**E**ste texto fue preparado como base para un curso del mismo título dirigido a tomadores de decisión, profesionales de distintas áreas y conocimientos, que actúan dentro del medio ambiente urbano como administradores, legisladores, ingenieros, arquitectos, geólogos, biólogos, entre otros. El objetivo del curso es presentar una visión integradora de la gestión de las aguas pluviales urbanas, donde se insertan el drenaje urbano y las inundaciones ribereñas de las ciudades. El curso no aborda los aspectos específicos del proyecto, pero trata de abordar los aspectos estratégicos de la gestión y las interfaces con los distintos aspectos de aguas urbanas y los demás elementos de planeamiento y gestión de las ciudades.

Este curso fue dictado inicialmente en Brasil y después en varias ciudades de América del Sur en cooperación con diversas entidades nacionales e internacionales, intentando cambiar la manera insustentable del desarrollo urbano y sus impactos en el ámbito de las aguas pluviales.

El primer capítulo presenta aspectos generales del desarrollo urbano y la identificación de los dos tipos principales de inundaciones: debido a la urbanización (o por el drenaje urbano) y ribereñas. El segundo capítulo trata de este último tipo de inundaciones, sus evaluaciones, las medidas de control para la mitigación de los impactos y su gestión dentro de las ciudades. En el tercer capítulo se presentan los principales aspectos de la gestión en el drenaje urbano tales como las estrategias de control y sus principios y las medidas de control sustentables para diferentes oportunidades. En el cuarto capítulo se presentan los distintos aspectos de la gestión integradora en el ambiente urbano, sus interrelaciones e interfaces. En el quinto capítulo son presentados los elementos del Plan Urbano de Aguas Pluviales y su relación con los demás elementos de la infraestructura urbana y el Plan de la Cuenca Hidrográfica. En el sexto capítulo son presentados estudios de casos de conflictos y de gestión.

Seguramente el contenido de este texto no abarca todos los aspectos del tema ya que el mismo es muy amplio y abarca diferentes realidades económicas, sociales, ambientales y climáticas, pero muestra cómo incluir soluciones innovadoras basadas en principios fundamentales del desarrollo sustentable.

**Porto Alegre, marzo de 2006**  
**Carlos M. Tucci**



# Índice

<b>1.</b>	<b>AGUAS URBANAS</b>	<b>8</b>
1.1	<b>Desarrollo urbano</b> .....	<b>9</b>
1.1.1	Proceso de urbanización .....	9
1.1.2	Impactos en la infraestructura urbana .....	12
1.1.3	Planeamiento de la infraestructura urbana .....	13
1.2	<b>Sistemas hídricos urbanos</b> .....	<b>15</b>
1.3	<b>Disponibilidad hídrica</b> .....	<b>16</b>
1.4	<b>Evaluación de los componentes hídricos urbanos</b> .....	<b>18</b>
1.4.1	Contaminación de los manantiales .....	18
1.4.2	Abastecimiento de agua y saneamiento .....	21
1.4.3	Residuos sólidos .....	24
1.4.4	Escurrimiento pluvial .....	26
1.4.5	Síntesis del escenario actual .....	31
1.5	<b>Enfermedades de vinculación hídrica</b> .....	<b>32</b>
1.6	<b>Comparación entre países desarrollados y en vías de desarrollo</b> .....	<b>33</b>
<b>2.</b>	<b>GESTIÓN DE INUNDACIONES RIBEREÑAS</b>	<b>40</b>
2.1	<b>Características de las inundaciones ribereñas</b> .....	<b>40</b>
2.2	<b>Ocupación del espacio urbano e impacto de las inundaciones</b> .....	<b>42</b>
2.3	<b>Evaluación de las crecidas</b> .....	<b>48</b>
2.3.1	Pronóstico de crecida en tiempo real .....	49
2.3.2	Probabilidad o riesgo de inundación .....	50
2.4	<b>Medidas de control de las inundaciones ribereñas</b> .....	<b>52</b>
2.5	<b>Medidas estructurales</b> .....	<b>54</b>
2.5.1	Medidas extensivas: .....	54
2.5.2	Medidas intensivas .....	56
2.6	<b>Medidas no estructurales</b> .....	<b>63</b>
2.6.1	Sistema de pronóstico y alerta temprana .....	64
2.6.2	Zonificación de áreas inundables .....	67
2.6.3	Construcción a prueba de crecida .....	77
2.6.4	Seguro de inundación .....	78
2.7	<b>Evaluación de los perjuicios de las crecidas</b> .....	<b>78</b>
2.7.1	Curva nivel-perjuicio .....	78

2.7.2	Método de la curva de perjuicio histórico.....	80
2.7.3	Ecuación del perjuicio agregado.....	81
<b>3.</b>	<b>GESTIÓN DE INUNDACIONES EN EL DRENAJE URBANO</b>	<b>86</b>
3.1	Impacto del desarrollo urbano en el ciclo hidrológico .....	86
3.2	Impacto Ambiental sobre el ecosistema acuático.....	89
3.3	Gestión del macrodrenaje, impactos generados.....	97
3.3.1	Gestión del drenaje urbano.....	97
3.3.2	Gestión inadecuada de áreas ribereñas en combinación con el drenaje urbano .....	99
3.4	Principios de la gestión sustentable.....	101
3.5	Tipos de Medidas de Control.....	103
3.5.1	Medidas de control distribuido .....	104
3.5.2	Medidas de control en el microdrenaje y macrodrenaje ...	116
3.5.3	Compatibilización con los sistemas – escurrimiento sanitario	122
3.5.4	Planeamiento en el control del macrodrenaje .....	123
<b>4.</b>	<b>GESTIÓN INTEGRADA DE AGUAS URBANAS</b>	<b>132</b>
4.1	Fases de la gestión .....	134
4.2	La visión del desarrollo urbano integrado y sustentable.	136
4.2.1	Visión integrada del ambiente urbano.....	136
4.2.2	Aspectos Institucionales:.....	140
4.3	Gestión urbana y de la cuenca hidrográfica.....	143
<b>5.</b>	<b>PLAN DE AGUAS PLUVIALES</b>	<b>150</b>
5.1	Interfaces entre los Planes .....	150
5.1.1	Gestión .....	150
5.1.2	Saneamiento y drenaje urbano.....	151
5.1.3	Drenaje urbano, erosión y residuos sólidos.....	152
5.1.4	Recuperación ambiental.....	152
5.2	Estructura .....	153
5.2.1	Principios .....	154
5.2.2	Objetivos del Plan .....	156
5.2.3	Estrategias.....	157
5.2.4	Escenarios.....	158
5.3	Medidas .....	159
5.3.1	Medidas no-estructurales .....	159

5.3.2	Medidas estructurales.....	160
<b>5.4</b>	<b>Productos .....</b>	<b>176</b>
<b>5.5</b>	<b>Programas .....</b>	<b>177</b>
5.5.1	Programa de Monitoreo .....	177
5.5.2	Estudios complementarios .....	181
<b>6.</b>	<b>ESTUDIOS DE CASOS .....</b>	<b>190</b>
<b>6.1</b>	<b>Inundaciones urbanas en Brasil .....</b>	<b>190</b>
6.1.1	Inundaciones ribereñas en Estrela (RS) Brasil.....	191
6.1.2	Inundaciones ribereñas y generación energética en União da Vitória /Porto União - Brasil.....	192
6.1.3	Gestión de las inundaciones en la Región Metropolitana de Curitiba - Brasil.....	198
6.1.4	Gestión de inundaciones en Porto Alegre.....	202
6.1.5	Plan de aguas pluviales de Brasil .....	207
6.1.6	Regulación del control externo a la ciudad .....	210
<b>6.2</b>	<b>Inundaciones urbanas en Argentina .....</b>	<b>215</b>
6.2.2	Inundaciones en la ciudad de Buenos Aires, Argentina....	216
6.2.3	Inundaciones en la ciudad de Córdoba, Argentina.....	223
6.2.4	Gestión del drenaje pluvial en la Red de Accesos a Córdoba (RAC) .....	230
6.2.5	Inundación ribereña de la ciudad de Santa Fe, Argentina	236
6.2.6	Inundación de la ciudad de Trelew, Argentina.....	247
6.2.7	Inundación repentina en San Carlos Minas, Argentina.....	252
6.2.8	Soluciones encaradas .....	254
6.2.9	Inundación lacustre en Villa Carlos Paz, Argentina.....	258
<b>6.3</b>	<b>Inundaciones urbanas en Centro América.....</b>	<b>266</b>
6.3.1	Inundaciones urbanas en el Área Metropolitana de San Salvador.....	266
6.3.2	Inundaciones urbanas asociada a la tormenta tropical “Stan” (2005).....	267
6.3.3	Ensayo de dispositivos de regulación: caso de la urbanización Residencial Paso Fresco .....	271
6.3.4	Red de Micro Presas de Managua, Nicaragua.....	278
<b>ANEXO A</b>		<b>285</b>
<b>ANEXO B</b>		<b>293</b>
<b>ANEXO C</b>		<b>303</b>
<b>ANEXO D</b>		<b>309</b>

---



# Aguas Urbanas

*Visión integradora de los aspectos de la infraestructura que posee relación con las inundaciones urbanas*

**E**l desarrollo urbano se ha acelerado en la segunda mitad del siglo XX con gran concentración de población en pequeños espacios, impactando en el ecosistema terrestre y acuático y en la propia población a través de inundaciones, enfermedades y pérdida de calidad de vida. Este proceso ocurre debido a la falta de control del espacio urbano que produce efectos directos sobre la infraestructura del agua: abastecimiento, sistema sanitario, drenaje urbano e inundaciones ribereñas y residuos sólidos.

En este capítulo son presentados los principales procesos que integran el conjunto de la sustentabilidad hídrica urbana y las interrelaciones de la gestión de este conjunto de infraestructura. Además son presentados los aspectos principales de la urbanización y ocupación del uso del suelo y se realiza una caracterización de los principales elementos de la infraestructura de aguas urbanas: abastecimiento de agua, sistema sanitario, residuos sólidos y aguas pluviales y los aspectos de la salud.

## 1.1 Desarrollo urbano

### 1.1.1 Proceso de urbanización

El crecimiento urbano en los países en desarrollo ha sido realizado de manera insustentable con deterioro de la calidad de vida y del medio ambiente. Este proceso es todavía más significativo en América Latina donde 77% de la población es urbana (47,2% a nivel mundial). Existen 44 ciudades en América Latina con población superior a 1 millón de habitantes (de un total de 388 ciudades del mundo, UN, 2003). Cerca de 16 megaciudades (superiores a 10 millones de habitantes) se formaron en el fin del Siglo XX, lo que representa 4% de la población mundial, y por lo menos cuatro de estas ciudades están en América Latina (Tabla 1.1), lo cual representa más del 10% de la población de la región.

El crecimiento urbano ocurrido en países en desarrollo ha sido significativo desde la década de los 70. En los países desarrollados el crecimiento de la población se estacionó y tiende a disminuir ya que la tasa de natalidad es inferior a 2,1 hijos por matrimonio, manteniéndose así la población estable. La recuperación o el mantenimiento de la población actual ocurre solamente a través de la migración controlada. En los países en desarrollo el crecimiento es aún muy importante y la proyección de las Naciones Unidas es que la estabilización de la población ocurrirá solamente en el año 2150. La urbanización es un proceso que ocurre a nivel mundial con diferencias entre los continentes. En América Latina la urbanización ha sido alta con la transferencia de la población rural hacia las ciudades. Este proceso tiende a medio plazo estabilizar el crecimiento demográfico. Se presume que cerca del año 2010 existirán 60 ciudades con más de 5 millones de habitantes, y la mayoría de éstas estarán ubicadas en los países en desarrollo. En la tabla 1.1 se puede observar las ciudades más pobladas del mundo y de América Latina.

La tasa de crecimiento de la población de América Latina y el Caribe variaron de 2,1% en los primeros cinco años de la década de los 80 para 1,5% en los primeros cinco años del nuevo milenio y la tendencia es de 1,2 para el año 2015. Esto es el reflejo del proceso de urbanización que tiende a reducir la tasa de crecimiento habitacional.

Tabla 1.1. Mayores ciudades a nivel mundial y de América Latina (UN, 2003)

Mayores a nivel mundial	Mayores ciudades de América
-------------------------	-----------------------------

		<b>Latina</b>	
<b>Ciudad</b>	<b>Población Millones</b>	<b>Ciudad</b>	<b>Población Millones</b>
Tokio	26,44	Ciudad de México	17,8
Ciudad de México	18,07	San Pablo	16,3
San Pablo	17,96	Buenos Aires	12,02
Bombai	16,09	Rio de Janeiro	10,65
Los Angeles	13,21	Lima	7,44
Calcuta	13,06	Bogotá	6,77
Shangai	12,89	Santiago de Chile	5,47
Daka	12,52	Belo Horizonte	4,22
Deli	12,44	Porto Alegre	3,76

En la Figura 1.1 se presenta la proporción del crecimiento de la urbanización observado en los países de América Latina y su proyección. Se puede observar que América del Sur y México se encuentran por encima del 70% de urbanización, mientras que América Central todavía está cerca del 50%.

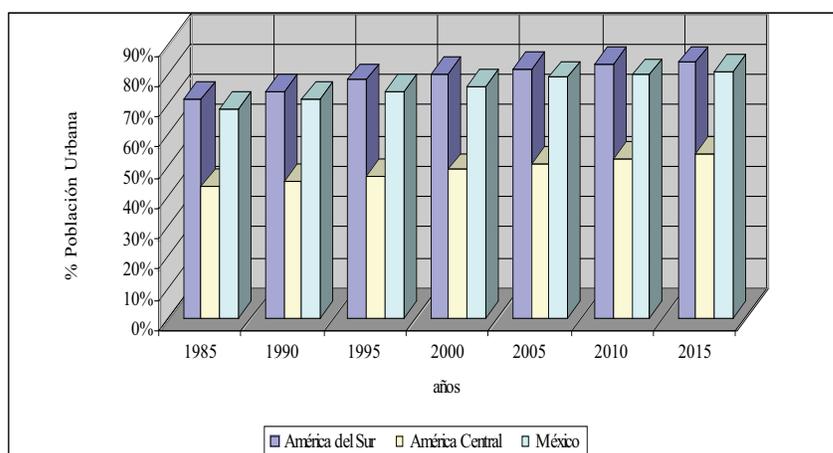


Figura 1.1. Urbanización en países de América Latina

Por lo tanto, es posible que los problemas enfrentados por los países de América del Sur y México puedan reproducirse en América Central a medida que la tendencia de urbanización ocurra. Toda la región a mediados de 2015 tendrá una proporción total de 80,7% de población urbana, principalmente debido a los países más poblados que están con tasas mayores de urbanización.

En la Tabla 1.2 son presentados algunos de los países de América Latina por orden de población y su urbanización en el año 2000. En la Figura 1.2 se puede observar la relación entre la urbanización y la población de estos países. Se observan dos tendencias para los países de menor población, una para los países de mayor renta per capita, que poseen altas tasas de población

urbana y otra de los países de renta menor, que poseen menor población urbana.

Tabla 1.2. Población y urbanización en algunos países de América Latina (Cepal, 2002)

País	Población 1000 habitantes	Población urbana %
Brasil	172.891	79,9
México	98.881	75,4
Colombia	43.070	74,5
Argentina	37.032	89,6
Perú	25.939	72,3
Venezuela	24.170	87,4
Chile	15.402	85,7
Ecuador	12.879	62,7
Guatemala	11.385	39,4
Bolivia	8.516	64,6
Honduras	6.485	48,2
El Salvador	6.397	55,2
Paraguay	5.496	56,1
Nicaragua	5.071	53,9
Costa Rica	4.112	50,4
Uruguay	3.337	92,6
Panamá	2.856	55,7
Total / promedio	483.919	76,14

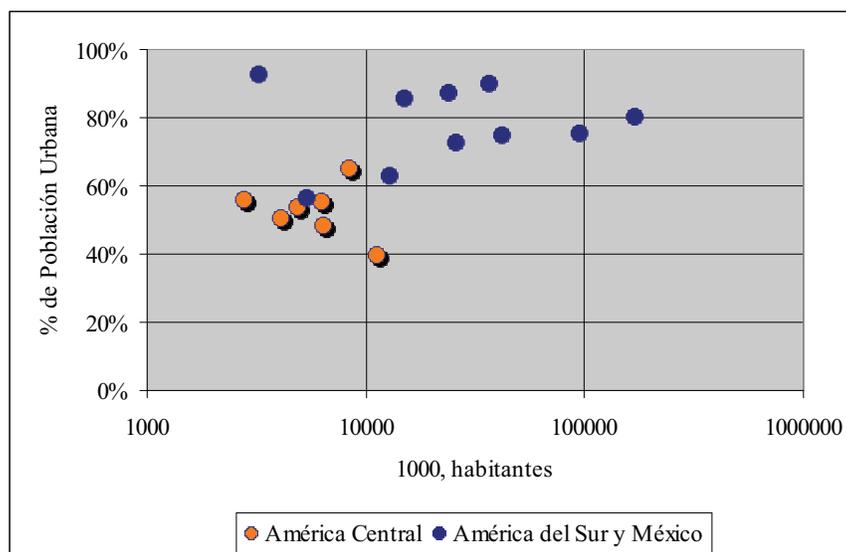


Figura 1.2. Relación entre población y población urbana.

### 1.1.2 Impactos en la infraestructura urbana

Los principales problemas relacionados con la infraestructura y la urbanización en los países en desarrollo, con especial destaque para América Latina son:

- *Gran concentración de población en pequeñas áreas*, con deficiencia en el sistema de transporte, falta de abastecimiento y saneamiento, aire y agua contaminados, además de las inundaciones. Estas condiciones ambientales inadecuadas son las principales limitaciones a su desarrollo porque reducen las condiciones de salud y la calidad de vida de la población y producen serios impactos ambientales;
- *Aumento de la periferia* de las ciudades de manera descontrolada por el éxodo rural que migra hacia las grandes ciudades en búsqueda de empleo. Estos barrios generalmente están desprovistos de seguridad, de infraestructura tradicional de agua, cloacas, drenaje, transporte y colecta de residuos sólidos y son dominados por grupos de delincuentes generalmente ligados al tráfico de drogas.
- *La urbanización es espontánea* y el planeamiento urbano es realizado en la ciudad ocupada por población de renta media y alta. Sin haber un planeamiento del espacio, la ocupación ocurre sobre áreas de riesgo de inundaciones y de deslizamientos, con frecuentes muertes durante el período de lluvias. Sólo en el mes de enero de 2004, 84 personas murieron en Brasil debido a eventos relacionados con inundaciones. Parte importante de la población vive en algún tipo de villa de emergencia. Por lo tanto, existe la *ciudad formal* y la *ciudad informal*. La gestión urbana generalmente abarca sólo la primera, o sea, la ciudad formal.

Los problemas de urbanización ocurren por causa de uno o más factores a lo largo del tiempo y éstos se han incrementado en las últimas décadas. Algunos de los factores son:

- Las poblaciones que migran hacia las ciudades generalmente son de baja renta y no poseen capacidad de inversión y tienden a invadir áreas públicas o comprar áreas precarias sin infraestructura y de urbanización informal. Entre éstas se localizan las áreas de riesgo de inundación

- o deslizamiento;
- el déficit de empleo, de renta y de vivienda es alto;
- legislaciones equivocadas de control del espacio urbano;
- incapacidad del municipio de planificar y anticipar la urbanización y de invertir en planeamiento de espacios seguros y adecuados como base del desarrollo urbano;
- crisis económicas en los países.
- El municipio apenas consigue controlar las áreas de medio y alto valor económico con reglamentación de uso del suelo, donde está la ciudad formal.

### **1.1.3 Planeamiento de la infraestructura urbana**

El planeamiento urbano es realizado para la ciudad formal y para la ciudad informal son apenas analizadas las tendencias de esta ocupación. Los principales problemas relacionados con la infraestructura de agua en el ambiente urbano son los siguientes:

- falta de tratamiento de cloacas: gran parte de las ciudades de la región, no poseen tratamiento de cloacas y lanzan los efluentes en la red pluvial, que escurre por los ríos urbanos (esto ocurre en la mayoría de las ciudades brasileñas);
- redes de escurrimiento sanitario (muchas veces sin tratamiento), sin la implementación de una red de drenaje urbano lo que lleva las ciudades a sufrir frecuentes inundaciones y aumento de la impermeabilización;
- ocupación de las terrazas de inundación, con problema de frecuentes inundaciones;
- impermeabilización y canalización de ríos urbanos con aumento del caudal de crecida (hasta siete veces) y de su frecuencia; aumento de la carga de residuos sólidos y disminución de la calidad del agua pluvial sobre los ríos próximos a las áreas urbanas;
- deterioro de la calidad del agua debido a la falta de tratamiento de los efluentes, lo cual genera riesgos potenciales al abastecimiento de la población en varios escenarios. Uno de los aspectos más crítico ha sido la ocupación de áreas de contribución de los reservorios de abastecimiento urbano, que una vez eutrofizados pueden generar riesgos a la salud de la población.

Existe una visión limitada de lo que es la gestión integradora del suelo urbano y de su infraestructura. Gran parte de los problemas ya mencionados fueron generados por uno o más de los aspectos descritos a continuación:

- *falta de conocimiento*: de la población y de los profesionales de distintas áreas que no poseen informaciones adecuadas sobre los problemas y sus causas. Esta falta de conocimiento de los tomadores de decisiones resulta en altos costos, debido que algunas empresas se aprovechan de esta situación para aumentar sus ganancias. Por ejemplo, el uso de canalización para drenaje es una práctica generalizada, aunque represente costos muy altos y tienda a aumentar los problemas que pretendía resolver. La propia población, cuando posee algún problema de inundación, solicita la ejecución de un canal para el control de ésta. Con el canal construido la inundación es transferida aguas abajo afectando otra parte de la población. Las empresas de ingeniería lucran de manera significativa pues este tipo de obra llega a tener una magnitud 10 veces superior a la de una medida más sustentable;
- *concepción inadecuada de los profesionales de ingeniería para el planeamiento y control de los sistemas*: una parcela importante de los ingenieros que actúan en el medio urbano, están desactualizados con respecto a la visión ambiental y generalmente buscan soluciones estructurales, que alteran el ambiente, con exceso de áreas impermeables y consecuente aumento de temperatura, inundaciones, contaminación, entre otros;
- *visión sectorial del planeamiento urbano*: el planeamiento y el desarrollo de áreas urbanas son realizados sin incorporar los aspectos relacionados con los distintos componentes de la infraestructura del agua. Una parte importante de los profesionales que actúan en esta área posee una visión sectorial limitada;
- *falta de capacidad gerencial*: los municipios no poseen estructura para el planeamiento y gerenciamiento adecuado de los distintos aspectos del agua en el medio urbano.

## 1.2 Sistemas hídricos urbanos

Los principales sistemas relacionados con el agua en el medio ambiente urbano son:

- manantiales de aguas;
- abastecimiento de agua;
- saneamiento de efluentes cloacales;
- control del drenaje urbano;
- control de inundaciones ribereñas.

Los *manantiales* de agua urbana son fuentes de agua para abastecimiento humano, animal e industrial. Estas fuentes pueden ser superficiales y subterráneas. Los manantiales superficiales son los ríos próximos a las comunidades. La disponibilidad de agua en este sistema varía a lo largo de los años; algunas veces la cantidad de agua disponible no es suficiente para atender la demanda, siendo necesario frecuentemente la construcción de un reservorio que garantice la disponibilidad hídrica a la comunidad a lo largo del tiempo. Los manantiales subterráneos son los acuíferos que almacenan agua en el subsuelo y permiten atender la demanda a través del bombeo de esta agua. De esta manera, el agua subterránea es utilizada generalmente en las ciudades de pequeño y medio porte, pues depende del caudal de bombeo que el acuífero permite retirar sin comprometer su balance de entrada y salida del agua.

El *abastecimiento de agua* involucra la utilización del agua disponible en el manantial, que es transportada hasta la estación de tratamiento de agua (ETA) y después distribuida a la población a través de una red. Este sistema involucra importantes inversiones, generalmente públicas, para garantizar el agua en cantidad y calidad adecuada.

El *saneamiento de efluentes cloacales* es el sistema de colecta de los efluentes (residenciales, comerciales e industriales), el transporte de este volumen, su tratamiento en una estación de tratamiento y el vertido del agua tratada nuevamente al cuerpo hídrico.

El *drenaje urbano* involucra la red de colecta del agua (y residuos sólidos), que se originan debido a precipitaciones sobre las superficies urbanas, su tratamiento y retorno a los ríos.

El *control de inundaciones ribereñas* se hace para evitar que la población sea alcanzada por las inundaciones naturales. Los ríos en los períodos de lluvias salen de su lecho menor y ocupan el lecho mayor, dentro de un proceso natural. Como esto ocurre de manera irregular a lo largo del tiempo, la población tiende a

ocupar el lecho mayor, quedando sujeta al impacto de inundaciones.

### 1.3 Disponibilidad hídrica

Todos los componentes de los sistemas hídricos están fuertemente interrelacionados debido a la manera como son gerenciados dentro del ambiente urbano. En los últimos años el hombre está atravesando un escenario en que los elementos esenciales para la vida, aquellos a los cuales sólo es dada la debida importancia cuando faltan (como es el caso del agua y de la energía), pueden estar en riesgo de escasez por un tiempo mayor a aquel que estamos acostumbrados a soportar. ¿Será que estamos volviendo a la época de nuestros abuelos en la cual la infraestructura era todavía precaria? Son dudas que pasan por la cabeza de muchas personas, con la avalancha de informaciones, muchas veces contradictorias, que aparecen en los medios.

En nuestro planeta, el total de agua globalmente extraído de los ríos, acuíferos y otras fuentes aumentó cerca de nueve veces, mientras que el uso por persona ha duplicado y la población se ha triplicado. En 1950 las reservas mundiales representaban 16,8 mil m<sup>3</sup>/persona; actualmente esta reserva se redujo para 7,3 mil m<sup>3</sup>/persona, y se espera que se reduzca todavía más: 4,8 mil m<sup>3</sup>/persona en los próximos 25 años, como resultado del aumento de la población, industrialización, agricultura y la contaminación. Cuando comparamos los usos, la cantidad de agua disponible y la necesidad humana, se puede, erróneamente, concluir que existe agua suficiente. Sin embargo, el agua se encuentra distribuida en el planeta con gran variación temporal y espacial; existen varias regiones vulnerables, donde cerca de 460 millones de personas (aproximadamente 8% de la población mundial) están vulnerables a la falta frecuente de agua y cerca de 25% están yendo por el mismo camino. En la Tabla 1.3 se presenta un resumen de suministro de agua utilizado por organizaciones ligadas a las Naciones Unidas.

El ciclo hidrológico natural es constituido por distintos procesos físicos, químicos y biológicos. Cuando el hombre actúa sobre este sistema y se concentra en el espacio produce grandes alteraciones, que alteran dramáticamente este ciclo, y traen consigo impactos significativos (muchas veces irreversible) en el propio hombre y en la naturaleza.

Tabla 1.3. Proporción aceptable (“improved”<sup>1</sup>) - Abastecimiento y saneamiento de áreas urbanas (WHO y UNICEFJMP, 2002)

Región	Abastecimiento de agua <sup>2</sup>	Saneamiento <sup>3</sup>
África	86	80
Asia	93	74
América Latina y el Caribe	94	86
Oceanía	98	86
Europa	100	99
América del Norte	100	100
<b>Global</b>	<b>95</b>	<b>83</b>

- 1- *es una definición cualitativa genérica para el agua ofrecida y dispuesta sin contaminar la población. No es la misma definición que “safe”, agua segura, que debería basarse en la medida cuantitativa de indicadores;*
- 2- *Abastecimiento de agua es entendido por los autores como el suministro de agua a la población;*
- 3- *Saneamiento es entendido por los autores como la disposición de cloacas en redes o en el suelo, no involucra necesariamente la colecta y el tratamiento.*

Uno de los primeros impactos es el riesgo de escasez cuantitativa del agua. La naturaleza ha mostrado que el agua, que escurre en los ríos y depende de las lluvias, es aleatoria y varía mucho entre las épocas de lluvias y sequías. El hombre, históricamente, intentó controlar esa agua para su beneficio por medio de obras hidráulicas. Esas obras intentaron reducir la escasez a través de la regulación de los caudales, aumentando la disponibilidad a lo largo del tiempo.

En el pasado, cuando las ciudades eran menores, la población retiraba agua del río aguas arriba y volcaba sin tratamiento aguas abajo, dejando para resolución de la naturaleza el impacto ambiental y la función de recuperar la calidad. Los impactos eran menores debido al bajo volumen de cloacas descargado. Con el aumento de la urbanización y con el uso de productos químicos en la agricultura y en el ambiente en general, el agua utilizada en las ciudades, industrias y en la agricultura vuelve a los ríos totalmente contaminada y en gran cantidad. Con el aumento de la población siempre habrá una ciudad aguas arriba y otra aguas abajo y al contaminar el manantial superficial, el río o las aguas que vuelven al río, se contamina las distintas capas del subsuelo de donde se retira el agua.

La consecuencia de la expansión sin una visión ambiental es el deterioro de los manantiales y la reducción del suministro de agua segura para la población, o sea, la escasez cualitativa (ver en la Figura 1.3 el ciclo de contaminación de las ciudades). Este proceso necesita distintas acciones preventivas de planeamiento

urbano y ambiental, que objetiven la minimización de los impactos y proporcionen el desarrollo sustentable.

Los riesgos de inundación y el deterioro de la calidad del agua en los ríos de las ciudades de países en desarrollo y, en países desarrollados, es un proceso dominante del final del siglo XX e inicio del siglo XXI. Esto ocurre debido a:

- la contaminación de los manantiales superficiales y subterráneos con efluentes urbanos como el escurrimiento cloacal, pluvial y los residuos sólidos;
- la disposición inadecuada de los escurrimientos cloacales, pluviales y residuos sólidos en las ciudades;
- las inundaciones en áreas urbanas debido a la urbanización;
- la erosión y sedimentación que genera áreas degradadas;
- la ocupación de áreas ribereñas, con riesgo de inundaciones y de áreas de grandes pendientes, como las laderas urbanas, sujetos a deslizamientos después del período de lluvias.

La mayoría de estos problemas es consecuencia de una visión equivocada del control de las aguas pluviales por parte de la comunidad y de profesionales, que aún priorizan proyectos centralizados, sin una visión de la cuenca y de los aspectos sociales e institucionales de las ciudades. La paradoja es que los países en desarrollo y más pobres, priorizan acciones económicamente insustentables, como son las medidas estructurales; mientras que los países desarrollados buscan prevenir los problemas con medidas no estructurales, más económicas y con un desarrollo sustentable.

## 1.4 Evaluación de los componentes hídricos urbanos

### 1.4.1 Contaminación de los manantiales

El desarrollo urbano ha producido un ciclo de contaminación, generado por los efluentes de la población urbana, que son las cloacas domésticas, industriales y pluviales (figura 1.3). Este proceso ocurre debido a:

- descargas sin tratamiento de los líquidos cloacales en los ríos, contaminándolos ya que poseen capacidad limitada de dilución. Esto ocurre debido a la falta de inversiones en los sistemas sanitarios y estaciones de tratamiento, que cuando existen, presentan baja eficiencia;

- descarga de flujos pluviales, que transportan gran cantidad de contaminación orgánica y de metales que alcanzan los ríos en los períodos de lluvias. Esta es una de las más importantes fuentes de contaminación difusa;
- contaminación de aguas subterráneas por descargas industriales y domésticas, a través de fosas sépticas, pérdidas de los sistemas de líquidos cloacales y pluviales.
- depósitos de residuos sólidos urbanos, que contaminan las aguas superficiales y subterráneas, que funcionan como fuente permanente de contaminación;
- ocupación del suelo urbano sin controlar su impacto sobre el sistema hídrico.

Con el pasar de los años, lugares que poseen abastecimiento tienden a reducir la calidad del agua o exigir mayor tratamiento químico del agua suministrada a la población. Por lo tanto, aún cuando hoy exista un buen suministro de agua, éste puede quedar comprometido si no se hacen medidas de control del ciclo de contaminación.



Figura 1.3. Ciclo de contaminación en las ciudades.

Muchas ciudades utilizan reservorios urbanos para

regularizar la demanda de agua de una comunidad. Como los reservorios se encuentran próximos a las ciudades, existe gran presión de ocupación urbana en la cuenca hidrográfica *aguas arriba* del reservorio. Lamentablemente los municipios poseen poca capacidad de fiscalización y por este motivo, muchas urbanizaciones irregulares o clandestinas se desarrollan en áreas de manantiales. En Brasil, la legislación de protección de áreas de manantiales fue creada para proteger estas áreas, pero incentivó exactamente lo contrario de lo esperado (ver Tabla 1.4).

Como consecuencia de esta ocupación y de la falta de tratamiento de cloacas, la carga contaminante llega directamente al reservorio, aumentando la probabilidad de eutrofización (riqueza en nutrientes). Con el reservorio eutrófico existe la tendencia de producción de algas que consumen los nutrientes. Estas algas pueden producir toxinas que absorbidas por el hombre, actúan de manera cumulativa sobre el hígado, generando enfermedades que pueden llevarlo a la muerte, principalmente en el caso de tratamiento de diálisis (como ocurrió en Caruaru, Brasil, en el cual murieron varias personas en una clínica de diálisis por la utilización de agua contaminada). Las toxinas también se acumulan en el fondo de los lagos y algunos peces se alimentan de éstas. Los tratamientos de agua tradicionales no remueven estas toxinas.

Tabla 1.4. Legislación de Protección de Áreas de Manantiales en Brasil.

<p>La legislación de protección de manantiales aprobada en la mayoría de los Estados brasileños protege la cuenca hidrográfica utilizada para el abastecimiento de las ciudades. En estas áreas es prohibido el uso urbano y otros usos, que puedan comprometer la calidad del agua del abastecimiento. Debido al crecimiento de las ciudades, estas áreas fueron presionadas a la ocupación por el valor inmobiliario de la vecindad y por la falta de interés del propietario en proteger el área, ya que ésta perdió el valor por causa de la legislación. Estas áreas son invadidas por la población de baja renta y la consecuencia inmediata es el aumento de la polución. Muchos propietarios incentivaron la invasión para poder vender la propiedad para el poder público. La principal lección que se puede extraer de este ejemplo es que al ser declarada la cuenca hidrográfica del manantial de utilidad pública, ésta debería ser adquirida por el poder público o crear un valor económico para propiedad a través de la generación de mercados indirectos para el área, o aún otros beneficios para los propietarios, para compensar la prohibición del uso de la misma.</p>
---

Las principales fuentes de contaminación de los acuíferos urbanos son:

- Los rellenos sanitarios que contaminan las aguas subterráneas por el proceso natural de precipitación e infiltración. Se debe evitar que sean construidos rellenos

sanitarios en área de recarga y se debe elegir las áreas con baja permeabilidad. Los efectos de la contaminación de las aguas subterráneas deben ser examinados en el momento de la elección del lugar del relleno;

- Gran parte de las ciudades brasileñas utiliza fosas sépticas como destino final de las cloacas. Este sistema tiende a contaminar la parte superior del acuífero. Esta contaminación puede comprometer el abastecimiento de agua urbana cuando existe comunicación entre diferentes capas de los acuíferos a través de percolación y de perforación inadecuada de los pozos artesianos;
- La red de drenaje pluvial puede contaminar el suelo a través de pérdidas del volumen en su transporte y también por obstrucciones de tramos de la red que presionan el agua contaminada hacia afuera del sistema de conductos.

#### **1.4.2 Abastecimiento de agua y saneamiento**

El acceso al agua y al saneamiento reduce, en media, 55% de la mortalidad infantil (WRI, 1992). La implementación adecuada de infraestructura de abastecimiento y saneamiento es esencial para un adecuado desarrollo urbano.

En 1990, los países en desarrollo poseían un abastecimiento de agua que cubría cerca del 80% de la población y apenas 10% de esta población era atendida por el sistema de saneamiento. Aún con la cobertura del 80% de la población, existía 1.000 millones de personas que no tenían acceso al agua limpia. En este período, 453 millones de personas no tenían acceso al saneamiento (entendido aquí simplemente como colecta y no necesariamente colecta y tratamiento) representando cerca de 33% de la población. En cuatro años, 70 millones recibieron saneamiento, pero la población creció velozmente, aumentando la proporción de personas sin acceso al saneamiento a 37% (Wright, 1997).

En muchas ciudades de América del Sur los servicios de agua poseen problemas crónicos, con pérdidas de agua en la distribución y falta de racionalización del uso del agua a nivel doméstico e industrial. Las ciudades pierden de 30 a 65% del agua puesta en el sistema de distribución. En la Tabla 1.5 se puede observar la diferencia de pérdidas en la red de las ciudades de los países desarrollados y de las ciudades de América del Sur, a pesar del consumo *per capita* mayor. Cuando hay falta de agua, la tendencia es la búsqueda de nuevos manantiales sin que sean reducidas las pérdidas y sin desarrollar una concientización con respecto a la racionalización del agua.

En la Tabla 1.6 se muestra un ejemplo de racionalización del uso del agua en New York. La ciudad de Las Vegas está dando subsidios a la población para que cambien el tipo de vegetación de sus casas para uno que necesite menos agua. La ciudad de Denver no consiguió aprobación para la construcción de nuevas presas para atender el aumento de la demanda del agua, por esta razón se vio obligada a racionalizar el uso del agua y comprar los derechos de uso de los agricultores.

El desarrollo de varias ciudades de América del Sur ha sido realizado con moderada cobertura de redes de colecta de cloacas, y prácticamente no se realiza el tratamiento de ésta (Tabla 1.7). Inicialmente, cuando la ciudad tiene una pequeña densidad, es utilizada la fosa séptica para el depósito de la cloaca. A medida que la ciudad crece y el poder público no invierte en el sistema, los líquidos cloacales de las ciudades son ligados a redes de escurrimiento pluvial sin ningún tratamiento. Este escurrimiento converge hacia los ríos urbanos y al sistema fluvial *aguas abajo* generando los ya conocidos impactos en la calidad del agua. Vea los datos de la Tabla 1.8 de cobertura en Brasil.

Tabla 1.5. Valores de consumo y pérdidas en la red (World Bank, 1996)

Lugar	Año	Consumo litros / persona / día	Pérdidas en la red %
Brasil (promedio)	1989	151	39
Brasília	1989	211	19
São Paulo	1988/1992	237	40
S. Catarina	1990	143	25
Minas Gerais	1990	154	25
Santiago	1994	204	28
Bogotá	1992/1991	167	40
Costa Rica	1994	197	25
Canadá (promedio)	1984	431	15
USA (promedio)	1990	666	12
Tokio	1990	355	15

Incluso en los países donde existe la colecta y el tratamiento de las cloacas, poco se conoce de la eficiencia de éste y el grado de contaminación aguas abajo. Este proceso se puede agravar con la privatización, a medida que el poder concedente no tenga capacidad de fiscalización adecuada.

Tabla 1.6. Racionalización del Uso del Agua (Scientific American, 2001)

La ciudad de New York en el inicio de los años 90 tuvo una gran crisis de abastecimiento de agua y estaba a punto de entrar en un escenario caótico, con el crecimiento de la población. La ciudad necesitaba más de 90 millones de galones de agua por día (340 millones de m<sup>3</sup>), cerca del 7% del uso total de la ciudad. La alternativa era gastar más de mil millones de dólares para bombear agua del río Hudson, pero la ciudad optó por la reducción de la demanda. En 1994, fue iniciado un programa de racionalización, con inversión de US\$ 295 millones, para sustituir 1/3 de todas las instalaciones de los baños de la ciudad. Cada baño utilizaba un dispositivo que consumía cerca de 5 galones para descarga, y estos fueron reemplazados por un dispositivo de 1,6 galones. En 1997, cuando el programa terminó 1,33 millones de dispositivos fueron sustituidos en 110.000 edificios con 29% de reducción del consumo de agua por edificio, reduciendo el consumo de 70 a 90 millones de galones por día.

Tabla 1.7. Acceso al saneamiento\* en % (World Bank, 1999)

<b>País</b>	<b>1982 (%)</b>	<b>1995 (%)</b>
Argentina	76	80
Bolivia	51	77
Brasil	33	74
Chile	79	95
Colombia	96	70
Ecuador	79	70
Paraguay	66	20
Perú	67	78
Uruguay	59	56
Venezuela	57	74

\* acceso al saneamiento indica la parcela de la población que tenía colecta de cloaca sea por la red pública o por la disposición local.

Tabla 1.8. Situación brasileña con relación al abastecimiento de agua y escurrimiento sanitario (IBGE, 1997)

<b>Tipo de servicio</b>	<b>Población atendida (%)</b>		
	<b>Brasil</b>	<b>Urbana</b>	<b>Rural</b>
Abastecimiento de agua:			
Red general	75,93	90,56	19,91
Otros	24,07	9,44	80,09
Escurrecimiento sanitario:			
Red colectora	37,83	46,79	3,50
Fosa séptica	23,03	25,45	13,75
Otros	27,70	23,59	43,48
No tenían	11,43	4,17	39,26

En Brasil, en los últimos años las empresas de saneamiento han invertido en redes de colecta de cloacas y estaciones de tratamiento, pero la parcela del volumen generado por las ciudades que efectivamente es tratado antes de llegar al río es aún muy pequeña. Algunas de las cuestiones son las siguientes:

- Cuando las redes de cloacas son implementadas o

proyectadas, muchas veces no se prevé la conexión de la salida de las viviendas o edificios a las mismas. De esta manera las redes no colectan el flujo cloacal proyectado y las estaciones no reciben el flujo cloacal de acuerdo a su capacidad. En este caso, o el proyecto fue elaborado de manera inadecuada o no fue ejecutado como debería.

- Como la cloaca implica la continuación del escurrimiento del sistema pluvial para el sistema fluvial el impacto ambiental continúa alto. La conclusión es que las inversiones públicas son realizadas de manera inadecuada, atendiendo apenas a las empresas que ejecutan las obras y no a la sociedad que aporta los recursos, y tampoco se tiene en cuenta el medio ambiente que necesita ser conservado;
- Como una parte importante de las empresas cobra por el servicio de colecta y tratamiento, mismo sin que el tratamiento sea realizado, ¿cuál será el interés de estas empresas en completar la cobertura de colecta y el tratamiento de los flujos cloacales? Otro escenario frecuente es el aumento de la colecta sin tratamiento, agravando el problema a medida que se concentra la contaminación en los ríos;
- Cuando sea implementado el sistema de cobranza por la contaminación ¿quién pagará las penas previstas para la contaminación generada?
- Existe actualmente una discusión sobre la concesión de los servicios de agua y cloaca en Brasil que ha inmovilizado el financiamiento y la privatización del sector. La Constitución Federal dicta que la concesión de los servicios de agua y cloacas pertenecerá a los municipios, mientras que las empresas de agua y saneamiento generalmente quedarían a cargo de órganos provinciales. Como éstas no detentan la concesión, su valor económico queda reducido en el mercado de privatización.

Recientemente, el gobierno federal envió un proyecto de ley al Congreso de la Nación sobre este tema, reavivando la polémica que involucra enormes conflictos de intereses.

### 1.4.3 Residuos sólidos

La producción de residuos es la suma del total colectado en las residencias, industrias y comercio, más el total colectado en las calles y lo que llega en el drenaje.

$$TR = Tc + T1 + Tdr \quad (1.1)$$

donde TR es el total producido por la sociedad y por el ambiente; Tc es el total colectado; TI es el total de la limpieza urbana y Tdr es el total que llega en el drenaje. Los dos primeros volúmenes pueden ser reciclados, disminuyendo el volumen a ser depositado en el ambiente. A medida que los sistemas de colecta y limpieza urbana son ineficientes el volumen de Tdr aumenta, aumentando el costo de retirada, obstrucción al escurrimiento y el subsidio ambiental recibido por la sociedad que contamina.

En el desarrollo urbano son observadas algunas etapas distintas de la producción de material sólido en el drenaje urbano (Tdr), que son las siguientes:

*En la etapa inicial:* cuando ocurre una modificación de la cobertura de la cuenca, por la retirada de su protección natural, el suelo queda desprotegido y la erosión aumenta en el período de lluvias, aumentando también la producción de sedimentos. Ejemplos de esta situación son: mientras un loteo (o lotificación) es implementado el suelo queda desprotegido; en la construcción de grandes áreas o en lotes ocurre gran movimentación de tierra, que es transportada por el escurrimiento superficial. En esta fase, existe predominancia de los sedimentos y pequeña producción de basura;

*En la etapa intermedia:* en esta etapa parte de la población está establecida, pero aún existe importante movimiento de tierra debido a nuevas construcciones. La producción de basura de la población se suma al proceso de producción de sedimentos;

*En la etapa final:* en esta etapa prácticamente todas las superficies urbanas están consolidadas y apenas resulta producción de basura urbana, con menor parcela de sedimentos de algunas áreas de construcción o sin cobertura consolidada.

El volumen total de basura que llega en el drenaje depende de la eficiencia de los servicios urbanos y de factores como: frecuencia y cobertura de la colecta de basura, frecuencia de la limpieza de las calles, reciclaje, forma de disposición de la basura por la población y la frecuencia de precipitación.

La producción de basura colectada en Brasil es del orden de 0,5 a 0,8kg / persona / día, pero no existen informaciones sobre la cantidad de basura que queda retenida en el drenaje. Internacionalmente las informaciones son reducidas. En San José,

California, la basura que llega en el drenaje fue estimado en 1,8kg / persona / año. Después de la limpieza de las calles resultan 0,8kg / persona / años en la red (Larger *et al.*, 1977). En Brasil este volumen debe de ser mayor, considerando que muchas veces el drenaje es utilizado como destino final de residuos sólidos.

En la última década hubo un visible incremento de basura urbana debido a los embalajes plásticos que poseen bajo reciclaje. Los ríos y todo el sistema de drenaje quedan llenos de botejas, además de embalajes de plásticos de todos tipos.

Las principales consecuencias ambientales de la producción de sedimentos son las siguientes:

- colmatación de las secciones de canalizaciones del drenaje, con reducción de la capacidad de escurrimiento de conductos, ríos y lagos urbanos. Por ejemplo, la laguna de Pampulha (en Belo Horizonte) es un ejemplo de un lago urbano que ha sido colmatado. El arroyo Diluvio en Porto Alegre, debido su gran ancho y pequeña profundidad, durante las sequías ha depositado en el canal la producción de sedimentos de la cuenca, creado así vegetación y reduciendo la capacidad de escurrimiento durante las inundaciones;
- transporte de contaminantes agregados al sedimento, que contaminan las aguas pluviales.

#### **1.4.4 Escurrimiento pluvial**

El escurrimiento pluvial puede producir inundaciones e impactos en áreas urbanas debido a dos procesos, que ocurren aisladamente o combinados:

*Inundaciones de áreas ribereñas:* son inundaciones naturales que ocurren en el lecho mayor de los ríos debido a la variabilidad temporal y espacial de la precipitación y del escurrimiento en la cuenca hidrográfica;

*Inundaciones debido a la urbanización:* son las inundaciones que ocurren en el drenaje urbano debido al efecto de la impermeabilización del suelo, canalización del escurrimiento u obstrucciones al escurrimiento.

#### **Inundaciones de áreas ribereñas**

Los ríos generalmente poseen dos lechos: el lecho menor, donde el agua escurre en la mayoría del tiempo. El lecho mayor es limitado por el riesgo de 1,5 a 2 años. Tucci y Genz (1994) obtuvieron un valor medio de 1,87 años para los ríos del Alto Paraguay. Las inundaciones ocurren cuando el

escurrimiento alcanza niveles superiores al lecho menor, afectando el lecho mayor. Las cotas del lecho mayor identifican la magnitud de la inundación y su riesgo. Los impactos debido a la inundación ocurren cuando esta área de riesgo es ocupada por la población (Figura 1.4). Este tipo de inundación generalmente ocurre en cuencas medianas y grandes (> 100 km<sup>2</sup>).

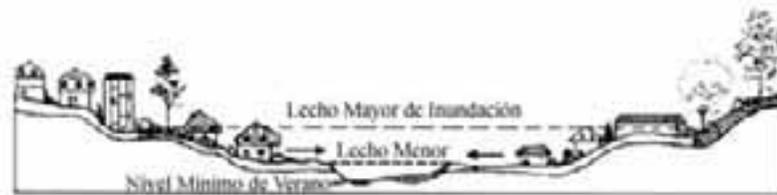


Figura 1.4. Características de los lechos del río

La inundación del lecho mayor de los ríos es un proceso natural, como *consecuencia del ciclo hidrológico de las aguas*. Cuando la población ocupa el lecho mayor, que son áreas de riesgo, los impactos son frecuentes. Esas condiciones ocurren debido a las siguientes acciones:

- en el Plan Director de Desarrollo Urbano de las ciudades generalmente no existe ninguna restricción con respecto a la ocupación de áreas de riesgo de inundación, la secuencia de años sin inundaciones es razón suficiente para que empresarios desmiembren estas áreas para ocupación urbana;
- invasión de áreas cercanas a los ríos, que pertenecen al poder público, por población de baja renta;
- ocupación de áreas de medio riesgo, que son alcanzadas con frecuencias menores, pero que cuando lo son, sufren perjuicios significativos.

Los principales impactos sobre la población son:

- perjuicios de pérdidas materiales y humanas;
- interrupción de la actividad económica de las áreas inundadas;
- contaminación por enfermedades de vinculación hídrica como leptospirosis, cólera, entre otras;
- contaminación del agua por la inundación de depósitos de material tóxico, estaciones de tratamientos, entre otros.

El gerenciamiento actual no incentiva la prevención de estos problemas, ya que a medida que ocurre una inundación el municipio declara calamidad pública y recibe recursos que no son

fiscalizados ya que no precisa realizar licitaciones públicas para gastarlos. Como la mayoría de las soluciones sustentables pasan por medidas no estructurales, que involucran restricciones a la población, difícilmente un intendente buscará este tipo de solución, porque generalmente la población espera que él realice una obra. Para implementar las medidas no estructurales, el gobierno tendría que interferir en intereses de propietarios de áreas de riesgo, lo que políticamente es complejo en el ámbito local.

Para modificar este escenario es necesario un programa en el ámbito provincial (departamental), con vistas a la educación de la población, además de una acción junto a los bancos que financian obras en áreas de riesgo.

### **Inundaciones debido a la urbanización:**

Las inundaciones aumentan su frecuencia y magnitud debido a la impermeabilización del suelo y la construcción de redes de conductos pluviales. El desarrollo urbano puede también producir obstrucciones al escurrimiento, como rellenos sanitarios, puentes, drenajes inadecuados, obstrucciones al escurrimiento junto a conductos y colmatación. Generalmente estas inundaciones son vistas como locales porque involucran cuencas pequeñas ( $< 100 \text{ km}^2$ , y muy frecuentemente cuencas  $< 10 \text{ km}^2$ ).

A medida que la ciudad se urbaniza, en general, ocurren los siguientes impactos:

- aumento de los caudales máximos (hasta 7 veces, Figura 1.5) y de su frecuencia debido al aumento de la capacidad de escurrimiento a través de conductos y canales e impermeabilización de las superficies;
- aumento de la producción de sedimentos debido a falta de protección de las superficies y la producción de residuos sólidos (basura);
- deterioro de la calidad del agua superficial y subterránea, debido al lavado de las calles, transporte de material sólido y de las ligaciones clandestinas de flujos cloacales y pluviales;

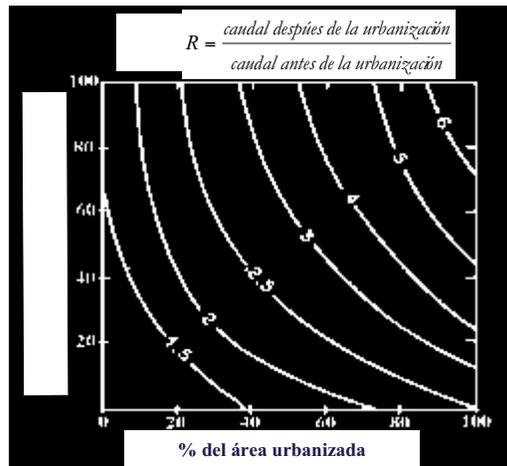


Figura 1.5. Curvas del valor de R: aumento del caudal medio de inundación en función del área impermeable y de la canalización del sistema de drenaje (Leopold, 1968).

- desorganización del implemento de la infraestructura urbana, tales como: (a) puentes y taludes de calles que obstruyen el escurrimiento; (b) reducción de sección del escurrimiento por rellenos en los puentes y para construcciones en general; (c) deposición y obstrucción de ríos; canales y conductos por basuras y sedimentos; (d) proyectos y obras de drenaje inadecuados, con diámetros que disminuyen hacia aguas abajo, drenaje sin escurrimiento, entre otros.

### Calidad del agua pluvial

La cantidad de material suspendido en el drenaje pluvial presenta una carga muy alta debido a los caudales involucrados. Este volumen es más significativo en el inicio de las inundaciones. Los primeros 25 mm de escurrimiento superficial generalmente transportan gran parte de la carga contaminante de origen pluvial (Schueller, 1987).

Unas de las maneras de evaluar la calidad del agua urbana es a través de parámetros que caracterizan la contaminación orgánica y la cantidad de metales. En la Tabla 1.9 son presentados algunos valores de concentración descriptos en la literatura. Schueller (1987) cita que la concentración media de los eventos no se altera en función del volumen del evento, siendo característico de cada área drenada.

Las cloacas pueden ser combinados (flujos cloacales y pluviales en un mismo conducto) o separados (red pluvial y sanitaria separadas). La legislación establece el sistema separador, pero en la práctica esto no ocurre debido a las

conexiones clandestinas y a la falta de red cloacal. Debido a la falta de capacidad financiera para la construcción de la red cloacal, algunos municipios han permitido el uso de la red pluvial para el transporte de las cloacas, lo que puede ser una solución inadecuada a medida que este flujo no es tratado. Cuando el sistema cloacal es implementado, la gran dificultad que se presenta es la retirada de las conexiones existentes de la red pluvial, lo que en la práctica resulta en dos sistemas mezclados con diferentes niveles de carga.

Tabla 1.9. Valores medios de parámetros de calidad del agua de pluviales (mg/l) de algunas ciudades

Parámetro	Durham <sup>1</sup>	Cincinnati <sup>2</sup>	Tulsa <sup>3</sup>	Porto Alegre <sup>4</sup>	APWA <sup>5</sup> Min. Max.
DBO		19	11,8	31,8	1 700
Sólidos totales	1440		545	1523	450 14.600
PH		7,5	7,4	7,2	
Coliformes (NMP/100ml)	23.000		18.000	1,5x10 <sup>7</sup>	55 11,2x10 <sup>7</sup>
Hierro	12			30,3	
Plomo	0,46			0,19	
Amonio		0,4		1,0	

1- Colson (1974); 2- Weibel et al (1964); 3- AVCO (1970); 4- Ide (1984); 5- APWA (1969)

Las ventajas y desventajas de los dos sistemas han generado largas discusiones sobre el asunto en todo el mundo. Considerando la *interrelación con el drenaje, el sistema unitario generalmente amplía el costo del control cuantitativo del escurrimiento del drenaje pluvial* a medida que exige que las detenciones sean enterradas. Este tipo de construcción tiene un costo unitario 7 veces superior a la detención abierta (IPH, 2000). Las otras desventajas son: en la sequía en áreas urbanas el olor puede ser significativo; durante las inundaciones, cuando ocurre desbordamiento, existe un gran potencial de proliferación de enfermedades. Este escenario es más grave cuando los desbordamientos son frecuentes.

Por otro lado, las ciudades que priorizan la red de escurrimiento sanitario y no consideran los pluviales sufren frecuentes inundaciones con el aumento de la urbanización, como ha ocurrido en Barranquilla en Colombia y en algunas áreas de Santiago.

No existen soluciones únicas y milagrosas, sino soluciones adecuadas y racionales para cada realidad. El ideal es conciliar la colecta y el tratamiento del escurrimiento sanitario sumado a la

retención y tratamiento del escurrimiento pluvial, dentro de una visión integrada, de tal manera que tanto los aspectos higiénicos como los ambientales sean atendidos.

La calidad del agua de la red pluvial depende de varios factores: de la limpieza urbana y su frecuencia; de la intensidad de la precipitación y su distribución temporal y espacial, de la época del año y del tipo de uso del área urbana.

#### **1.4.5 Síntesis del escenario actual**

Actualmente uno de los principales, quizás el principal problema de recursos hídricos en Brasil, es el impacto resultante del desarrollo urbano, tanto en el ámbito interno de los municipios como en el ámbito externo, exportando contaminación e inundaciones hacia *aguas abajo*.

Las regiones metropolitanas dejaron de crecer en su núcleo, pero se expanden en la periferia, justamente donde se concentran los manantiales agravando este problema. La tendencia es de que las ciudades continúen buscando nuevos manantiales, siempre más distantes y con alto costo. La ineficiencia pública se observa en:

- La gran pérdida de agua tratada en las redes de distribución urbana. No es racional el uso de nuevos manantiales cuando las pérdidas continúan en niveles tan altos. Las pérdidas pueden ser económicas y físicas, las primeras están relacionadas con la medición y cobranza y las segundas debido a las pérdidas en la red;
- Cuando existen pérdidas, las redes de tratamiento no colectan las cloacas suficientemente, de la misma manera que las estaciones de tratamiento continúan funcionando debajo de su capacidad instalada. La inversión en la ampliación de la cobertura no lleva a la atención de las Metas del Milenio aprobado en los foros internacionales;
- La red de drenaje pluvial presenta dos problemas: (a) además de transportar las cloacas que no son colectadas por la red sanitaria, también transporta la contaminación del escurrimiento pluvial (carga orgánica, y metales); (b) la construcción excesiva de canales y conductos, apenas transfieren las inundaciones de un lugar para otro dentro de la ciudad, a costos insustentables para los municipios.

## 1.5 Enfermedades de vinculación hídrica

Existen muchas enfermedades que se transmiten a través del agua. Con relación a la transmisión a través del agua, las enfermedades pueden ser clasificadas de acuerdo con el concepto de White *et al.* (1972) y presentado por Prost (1993):

*Enfermedades con fuente en el agua (water borne diseases):* dependen del agua para su transmisión como el cólera, la salmonella, la diarrea, la leptospirosis (desarrolladas durante las inundaciones por la mezcla de la orina del ratón), etc. El agua reacciona como un vehículo pasivo para el agente de infección.

*Enfermedades debido a la falta de higiene (water-washed diseases):* dependen de la educación de la población y de la disponibilidad de agua segura.

Estas enfermedades están relacionadas con infección del oído, de la piel y de los ojos.

*Relacionado con el agua (water-related):* el agente utiliza el agua para desarrollarse, como es el caso de la malaria y de la esquistosomosis.

Muchas de estas enfermedades están relacionadas con la baja cobertura de agua tratada y saneamiento, como la diarrea y el cólera; otras están relacionadas con la inundación, como la leptospirosis, la malaria y el dengue. En la Tabla 1.10 se presenta el índice de mortalidad infantil y las enfermedades transmitidas por el agua en Brasil. En la Tabla 1.11 se presenta la proporción de cobertura de servicios de agua y saneamiento en Brasil de acuerdo con el grupo de renta. La tabla muestra claramente la pequeña proporción de atención para la población de menor renta. En la Tabla 1.12 son presentados valores de Brasil.

Tabla 1.10. Mortalidad debido a enfermedades transmitidas por el agua en Brasil (Mota e Rezende, 1999).

Edad	Infección intestinal		Otras *	
	1981	1989	1981	1989
< 1 año	28.606	13.508	87	19
1 y 14 años	3.908	3.963	44	21
> 14 años	2.439	3.330	793	608

\*cólera, fiebre tifoidea, poliomiелitis, diarrea, esquistosomosis, etc.

Tabla 1.11. Proporción de cobertura de servicios, por grupo de renta de Brasil en % (Mota y Rezende, 1999).

Domicilios	Agua tratada	Colecta de cloacas	Tratamiento de
------------	--------------	--------------------	----------------

(SM)*					cloacas	
	1981	1989	1981	1989	1981	1989
0 - 2	59,3	76,0	15	24,2	0,6	4,7
2 - 5	76,3	87,8	29,7	39,7	1,3	8,2
> 5	90,7	95,2	54,8	61,2	2,5	13,1
Todos	78,4	89,4	36,7	47,8	1,6	10,1

- SM = salario mínimo

Tabla 1.12. Número de ocurrencia totales en Brasil en 1996 (MS, 1999).

Tipo	Cantidad
Cólera	1.017
Malaria	444.049
Dengue	180.392
Tasa de mortalidad por enfermedades infecciosas y parasitarias por 100.000 habitantes (1995)	24,81

Las enfermedades transmitidas a través del consumo del agua preocupan, debido principalmente a lo siguiente:

*Cargas domésticas:* el exceso de nutrientes ha producido eutrofización de los lagos, aumentando las algas, que generan toxicidad. Esta toxicidad puede quedar soluble en el agua o depositarse en el fondo de los ríos y lagos. La acción de la toxicidad es de atacar el hígado de las personas generando enfermedades degenerativas como el cáncer y la cirrosis.

*Cargas industriales:* los efluentes industriales presentan los más distintos compuestos y, con la evolución de la industria, nuevos componentes son producidos diariamente. Difícilmente los equipos de fiscalización poseen condiciones de acompañar este proceso;

*Cargas difusas:* las cargas difusas provenientes de áreas agrícolas traen compuestos de pesticidas, que presentan nuevos compuestos anualmente. La carga difusa de área urbana fue mencionada anteriormente y pueden actuar de manera acumulativa sobre el organismo de las personas.

## 1.6 Comparación entre países desarrollados y en vías de desarrollo

La Tabla 1.13 presenta una comparación de los escenarios de infraestructura urbana relacionada con el agua en países desarrollados y en países en vías de desarrollo.

Tabla 1.13. Comparación de los aspectos del agua en el medio urbano

Infraestructura urbana	Países desarrollados	Países en vías de desarrollo

Abastecimiento de agua	Resuelto, cobertura total	Gran cobertura; tendencia de reducción de la disponibilidad debido a la contaminación de las fuentes; gran cantidades de pérdidas en la red
Saneamiento	Gran cobertura en la colecta y tratamiento de los efluentes	Falta de red y estaciones de tratamiento; las que existen no consiguen coleccionar las cloacas proyectadas;
Drenaje Urbano	Los aspectos cuantitativos están controlados; Gestión de la calidad del agua	Impactos cuantitativos sin solución; Impactos debido a la calidad del agua no fueron identificados.
Inundaciones Ribereñas	Medidas de control no estructurales como seguro y zoneamiento de inundación	Grandes perjuicios por la falta de política de control

Se puede observar que en los países desarrollados gran parte de los problemas de abastecimiento de agua, tratamiento de cloacas y control cuantitativo del escurrimiento en el drenaje urbano fueron resueltos. En este último caso, fue priorizado el control a través de medidas no estructurales que obligan a la población a controlar en la fuente los impactos debido a la urbanización. El principal problema en los países desarrollados es el control de la polución difusa debido a las aguas pluviales. Ya en los países en desarrollo el problema aún está en la etapa del tratamiento de las cloacas.

En algunos países, como Brasil, el abastecimiento de agua, que podría estar resuelto, debido a la gran cobertura de abastecimiento, vuelve a ser un problema debido a la fuerte contaminación de los manantiales. Este problema es una consecuencia de la baja cobertura de colecta de flujos cloacales tratados. En realidad existen muchas redes y estaciones de tratamiento, pero la parcela de cloaca sin tratamiento aún es muy grande. Debido al ciclo de contaminación, producido por el aumento del volumen de cloaca no tratada para la misma capacidad de dilución, los objetivos también son de salud pública, pues la población pasa a ser contaminada por el conjunto de flujos cloacales producido por la ciudad lo que aquí se denomina *ciclo de contaminación urbana* (Figura 1.3).

Un ejemplo de este escenario es la ciudad de São Paulo, Brasil, que se encuentra en la cuenca hidrográfica del río Tiete y posee una demanda total de abastecimiento de agua del orden de  $64 \text{ m}^3/\text{s}$ . La mitad del agua es importada ( $33 \text{ m}^3/\text{s}$ ) de la cuenca del río Piracicaba (cabeceras en la sierra de la Cantareira). Esto ocurre

porque parte de los manantiales vecinos a la ciudad están contaminados por los flujos cloacales sin tratamiento. Los manantiales de Billings y de Guarapiranga tienen su calidad comprometida.

El control cuantitativo del agua del drenaje urbano aún es limitado en los países en desarrollo. La etapa de control de calidad del agua resultante del drenaje está aún más distante en estos países. En América del Sur, como en gran parte de los países en desarrollo, se busca el control de los impactos cuantitativos del drenaje pluvial, que aún no están controlados. Por ejemplo, los sistemas de detención construidos en las ciudades brasileñas poseen como foco apenas el control del impacto de las inundaciones sin el componente del control de la calidad del agua.

## Problemas

1. ¿Cuáles son los principales manantiales de aguas urbanas? ¿Cuándo son utilizados y en qué condiciones?
2. ¿Cuáles son las principales causas de contaminación de los manantiales?
3. ¿Cuáles son los principales problemas de la colecta y tratamiento de los desechos cloacales?
4. Describa el ciclo de contaminación.
5. ¿Cuál es la diferencia entre las inundaciones ribereñas y las inundaciones debido a la urbanización?
6. ¿Cuáles son las fuentes de los problemas de estos tipos de inundación?
7. ¿En qué se diferencian las cargas contaminantes del drenaje urbano y del desecho cloacal?
8. ¿Cuáles son los tipos de residuos sólidos urbanos? ¿Cuándo ocurren?
9. ¿Por qué el caudal aumenta en una cuenca urbana con relación a las condiciones rurales?
10. ¿Este aumento es uniforme o varía con la magnitud de la creciente? ¿Por qué?
11. Analice la cadena causal en el deterioro de la calidad del agua de los ríos *aguas abajo* de las ciudades.
12. ¿Cuáles son los períodos críticos en que ocurren los escenarios más desfavorables?
13. ¿Cuál es el origen de la contaminación de la calidad del agua pluvial?
14. ¿Por qué los sólidos totales aumentan con la urbanización? ¿Cómo varían a lo largo del tiempo de la urbanización?
15. ¿Cuál es la importancia del monitoreo de la calidad del agua, sedimentos y calidad del agua en el planeamiento de la cuenca urbana? Si no es posible monitorear todas las cuencas, ¿por qué entonces se invierte en esto? ¿Cuáles son las dificultades de este tipo de acción?
16. Considerando que las causas de los impactos debido a las inundaciones y de la calidad del agua son consecuencia de la urbanización ¿cómo se realiza hoy? y ¿cómo entonces podrían ser las estrategias para evitar esto?
17. Considere una subcuenca urbana, con 50 km<sup>2</sup> de área, población densificada del orden de 120hab/ha. Estime el total anual de basura que es transportado para el

drenaje. Admita que 1,5 y 10% del total de la basura colectada llega en el drenaje. Admita un costo de 5 centavos de dólar/kg para colectar y disponer de este volumen. Calcule el valor anual por persona. Este es el subsidio que la población está recibiendo del medio ambiente.

## Referencias

- APWA, 1969. *Water pollution aspects of urban runoff*. Water Quality Administration (Water Pollution Control) Research Series, Report N. WP-20-15).
- ASCE, 1992. *Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems*. American Society of Civil Engineers, 753p.
- AWCO, 1970. *Stormwater pollution from urban activity*. Water Quality Administration. (Water Pollution Control Research Series, Report n. H031FKL).
- COLLESCIONN, W. TUCCI, C. ILM, 1998. *Drenagem urbana e Controle de Enxurradas*. VI Simpósio nacional de controle da erosão, 29/3 a 3/4/1998, Presidente Prudente, São Paulo.
- COLSON, N.V., 1974. *Characterization and treatment of urban land runoff*. EPA. 670/274-976.
- GUARULHOS, 2000. *Edição de Obras do Município de Guarulhos Lei 5617 de 9 de novembro de 2000*. Município de Guarulhos.
- IBGE, 1998. "Anuário Estatístico do Brasil – 1997", Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, 1998 (CD-ROM)
- ILHA, C., 1981. *Qualidade da drenagem pluvial urbana*. Porto Alegre: UFRGS-Curso de Pós-Graduação em recursos Hídricos e Saneamento 137L. Dissertação(mestrado).
- IPH 2000. *Plano Diretor de Drenagem Urbana de Porto Alegre 1ª fase*. Prefeitura Municipal de Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 5 vols.
- LARGIER, J.; SMITH, W.G.; LYNARD, W.G.; FINN, R.M.; FENNEMORE, E.J. 1977. *Urban Stormwater management and technology update and user's guide*. US EPA. Report – 600/8-77-014 NTIS N. PB 273654.
- LICOPOLIS, I.B., 1968. *Hydrology for Urban Planning – A Guide Book on the Hydrologic Effects on Urban Land Use*. USGS circ. 554, 18p.

- LORET RAMOS, C.; HELOU, G. C. N.; BRIGHELLI, G. 1993. Dinâmica do transporte sólido nos rios Tietê e Pinheiros na região metropolitana de São Paulo. *Anais X Simpósio brasileiro de recursos hídricos*, Gramado.
- MOTA, R.; RIZZENDE, I. 1999. The impact of sanitation on waterborne diseases in Brazil in Peter H. May (org.) *Natural Resource Valuation and Policy in Brazil: Methods and Cases* pp.174-187 New York Columbia University Press.
- MS, 1999 "Ministério da Saúde", Home Page
- NAKAI, T.; BRIGHELLI, G. 1993. Dragagem a longa distância aplicada ao desassoreamento da calha do rio Tietê. *Anais X Simpósio brasileiro de recursos hídricos*, Gramado.
- OLIVEIRA, M. G. R.; BAPTISTA, M. B. 1997. Análise da evolução temporal da produção de sedimentos na bacia hidrográfica da Pampulha e avaliação do assoreamento do reservatório. *Anais XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - ABRH*, Vitória.
- PMBH, 1996. Plano Diretor Urbano. Prefeitura Municipal de Belo Horizonte.
- PMPA, 2000. Segundo Plano de Desenvolvimento Urbano e Ambiental de Porto Alegre. Prefeitura Municipal de Porto Alegre.
- PROST, A. (1992) 'The Management of Water Resources, Development and Human health in the Humid Tropics' In: *Hydrology and Water Management in Humid Tropics*. Cambridge University Press p.437-453.
- RAMOS, M.M.G. 1998. *Dragagem Urbana: Aspectos urbanísticos, legais e metodológicos em Belo Horizonte*. Dissertação de Mestrado Escola de Engenharia Universidade Federal de Minas Gerais.
- ROESSNER, I. A.; TRAINA, P. 1994. Overview of federal law and USEPA regulations for urban runoff. *Water Science & Technology* V29 n 1-2 p445-454
- SCHUELLER, T. 1987. Controlling Urban Runoff 1: *A Practical Manual for Planning and Designing Urban BMPs*.
- SCIENTIFIC AMERICAN, 2003. How we can do it. *Scientific American* fevereiro p52-55.
- SILVEIRA, A.L.L., 1999. Impactos Hidrológicos da urbanização em Porto Alegre. 4o Seminário de Hidrologia Urbana e Dragagem, *Belo Horizonte - ABRH*.
- TUCCI, C.E.M. 1995. Hidrologia: Ciência e Aplicações. LUDUN, Editora da UFRGS, ABRH, 952p.
- TUCCI, C.E.M. 2000 a. Plano Diretor de Dragagem Urbana da Região Metropolitana de Curitiba Memorando n. 8. CIMHILL / SUDIBERSA.
- TUCCI, C.E.M., GENZ, F., 1994. Medidas de controle de inundações em Estados Hidrosedimentológicos do Alto Paraguai, IPH/MMA.
- TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. 2000. Storm hydrology and urban drainage. In: Tucci, C. *Humid Tropics Urban Drainage*, capítulo 4. UNESCO.
- WETZEL, S.R., ANDERSON, R.J.; WOODWARD, R.L., 1964. Urban Land Runoff as a factor in stream pollution. *Journal Water Pollution Control Federation*, Washington, V. 36, n.7, 914-924.
- WILKIN, P., 1978. *Engenharia de drenagem superficial*. São paulo: CITEPSA
- WHO, 1999 "World Health Report - 1999 - Statistical Annex", World Health Organization, Home Page.
- WORD BANK, 1999. World Development indicators, Urbanization, Wood Bank.
- WRI, 1992. *World Resources 1992/1993*, New York Oxford University Press, 385p.
- WRIGHT, A.M. 1997 'Toward a Strategic Sanitation Approach: Improving the sustainability of urban Sanitation in Developing Countries'. UNDP - World Bank 36p.





# Gestión de inundaciones ribereñas

*El control de las áreas de riesgo del lecho mayor de los ríos es fundamental para la gestión de las áreas ribereñas.*

## 2.1 Características de las inundaciones ribereñas

La inundación ocurre cuando las aguas de los ríos, riachos y galerías pluviales salen del lecho del escurrimiento debido a la falta de capacidad de transporte de uno de estos sistemas y pasa a ocupar el espacio que la población utiliza para vivienda, transporte (calles, autopistas y paseos públicos) recreación, comercio, industria, entre otros.

Cuando la precipitación es intensa y el suelo no tiene la capacidad de infiltración, gran parte del volumen escurre para el sistema de drenaje superando su capacidad natural de escurrimiento. El exceso del volumen que no consigue ser drenado ocupa la terraza de inundación, inundando de acuerdo con la topografía de las áreas que están próximas a los ríos. Estos eventos ocurren de manera aleatoria en función de los procesos climáticos locales y regionales. Este tipo de inundación es denominado en este libro de *inundación ribereña*.

Las condiciones meteorológicas y hidrológicas propician la ocurrencia de inundaciones. El conocimiento del comportamiento meteorológico a largo plazo es muy pequeño debido al gran número de factores involucrados en los fenómenos meteorológicos y la interdependencia de los procesos físicos a

que la atmósfera terrestre está sujeta. Las condiciones hidrológicas que producen la inundación pueden ser naturales o artificiales. Las condiciones naturales son aquellas cuya ocurrencia es propiciada por la cuenca en su estado natural. Algunas de esas condiciones son: relieve, tipo de precipitación, cobertura vegetal, capacidad de drenaje.

Los ríos normalmente drenan en sus cabeceras áreas con gran desnivel produciendo escurrimiento de alta velocidad. La variación de nivel durante la creciente puede ser de varios metros en pocas horas. Cuando el relieve es accidentado las áreas más propicias a la ocupación del hombre son las planas y más bajas, justamente aquellas que presentan alto riesgo de inundación. La terraza de inundación de un río crece significativamente en sus cursos medio y bajo, donde el desnivel se reduce y aumenta la incidencia de área planas. Las precipitaciones más intensas alcanzan áreas localizadas y son en general de tipos convectivo y orográfico. Estas formas de precipitación actúan, en general, sobre pequeñas áreas. La precipitación ocurrida en Porto Alegre el 13 de febrero de 1981, con cerca de 100 mm en 1 hora es un ejemplo. Las precipitaciones frontales actúan sobre grandes áreas provocando mayores inundaciones en grandes ríos.

La cobertura vegetal tiene como efecto la interceptación de parte de la precipitación que puede generar escurrimiento y la protección del suelo contra la erosión. La pérdida de esta cobertura para uso agrícola ha producido como consecuencia el aumento de la frecuencia de inundaciones debido a la falta de interceptación de la precipitación y a la colmatación de los ríos.

Las condiciones artificiales de la cuenca son aquellas provocadas por la acción del hombre. Algunos ejemplos son: obras hidráulicas, urbanización, deforestación, reforestación y uso agrícola. La cuenca rural posee mayor interceptación vegetal, mayores áreas permeables (infiltración del suelo), menor escurrimiento en la superficie del suelo y drenaje más lento. La cuenca urbana posee superficies impermeables, tales como tejados, calles y pisos, y produce aceleración en el escurrimiento, a través de la canalización y del drenaje superficial. Los resultados de la urbanización sobre el escurrimiento son: aumento del caudal máximo y del escurrimiento superficial, reducción del tiempo de pico y disminución del tiempo de base. La urbanización y la deforestación producen un aumento de la frecuencia de inundaciones en las crecientes pequeñas y medianas. En las grandes crecientes su efecto es menor, pues la capacidad de saturación y almacenamiento del suelo son alcanzadas y el efecto final difiere poco.

## 2.2 Ocupación del espacio urbano e impacto de las inundaciones

Las inundaciones son más antiguas que la existencia del hombre en la tierra. El hombre siempre intentó ubicarse cerca de los ríos para emplearlos como transporte, obtener agua para su consumo y para lanzar sus desechos. Las áreas próximas a los ríos generalmente son planas, propicias para el asentamiento humano, hecho que motivó su ocupación.

El desarrollo histórico de la utilización de áreas libres explica los condicionamientos urbanos existentes en nuestros días. Debido a la gran dificultad de medios de transporte en el pasado, el río era utilizado como vía principal. Las ciudades se desarrollan a las orillas de los ríos o en el litoral. Por la propia experiencia de los antiguos moradores, la población siempre intentó habitar las zonas más altas donde el río difícilmente llegaría. Con el crecimiento desordenado y acelerado de las ciudades, principalmente en la segunda mitad de este siglo, las áreas de riesgo considerables como lo son las terrazas inundables, fueron ocupadas, trayendo muchos perjuicios humanos y materiales.

Los perjuicios ocurren debido a la falta de planeamiento del espacio y de conocimiento del riesgo de las áreas de inundaciones. La experiencia de gestión de inundaciones ya ocurría hace millares de años. En el histórico de la Tabla 2.1 se observa que a 3.000 años atrás las personas ya planeaban la ocupación del espacio de inundación, pero hoy todavía no es una práctica corriente.

Tabla 2.1. Histórico de ocupación de áreas de inundación.

La ciudad de El-Amarna en Egipto, que Akhenaton (1.340 a.C) eligiera para ser una nueva capital, fue planeada considerando las áreas de inundación; vea en relato: “Corriendo del este para el oeste dos lechos secos del río, <i>en los cuales nada se construyó por miedo de las crecidas repentinas</i> , dividían la ciudad en tres partes: el centro y los barrios residenciales del norte y del sur”, Brier (1998).
---

La historia muestra en distintas partes del globo que el hombre ha intentado convivir con las inundaciones, desde las más frecuentes a las más raras. Una experiencia histórica es de la iglesia católica, pues siempre que ocurre una inundación en una ciudad el edificio de la iglesia, pese ser una de las obras más antiguas, está ubicada en un sitio seguro.

La gestión de inundación involucra la minimización de los impactos, pero difícilmente los elimina, debido a las limitaciones

económicas y del conocimiento de la naturaleza. En Tabla 2.2 se presenta el prefacio de Hoyt y Langbein (1959) que caracteriza la limitación que tiene el hombre de controlar las inundaciones.

Las inundaciones representan 50% de los desastres naturales relacionados con el agua, de los cuales 20% ocurren en América. En la Figura 2.1 se presenta la curva de los perjuicios anuales de los Estados Unidos debido a las inundaciones ribereñas. Se puede observar que los valores varían de 0,02 a 0,48 del PBI, con valor medio de 0,081% (cerca de U\$ 8,1 mil millones de dólares).

Tabla 2.2. Histórico y suposiciones que demuestran la limitación de la gestión de las inundaciones (prefacio del libro “floods” de Hoyt y Langbein, 1959)

“Tierra de Canaan, 2.957 a.C, en una gran inundación, probablemente centrada cerca del UR en el Eufrates, Noe y su familia se salvaron. Un diluvio resultante de 40 días y 40 noches de continua precipitación ocurrió en la región. Tierras quedaron inundadas por 150 días. Todas las criaturas vivas se ahogaron con excepción de Noe, su familia y animales, que de dos a dos fueron salvados en una arca y finalmente descansaron en el Monte Ararat” (pasaje de la Biblia sobre el Diluvio, citada en el referido prefacio). Este texto caracteriza un evento de riesgo de ocurrencia muy baja.

“Egipto XXIII, Dinastía, 747 a.C. A las crecidas les suceden las sequías. El Faraón anunció que todo el valle del río Nilo fue inundado, los templos están llenos de agua y el hombre parece una planta del agua. Aparentemente los pólderes no son suficientemente altos o fuertes para confinar las crecidas en la sección normal. La presente catástrofe describe bien los caprichos de la naturaleza. Otro faraón reclamó que por siete años el Nilo no subió”. Este texto que también puede ser encontrado en relatos en la Biblia también enfatiza la incapacidad de prever el clima y sus impactos cuando ocurren.

“En algún lugar en los Estados Unidos en el futuro (el autor mencionaba año 2000, muy distante en la época), la naturaleza toma su inexorable precio. Crecidas de 1.000 años causaron indestructibles daños y pérdidas de vidas. Ingenieros y Meteorologistas creen que la presente tormenta resultó de la combinación de condiciones meteorológicas e hidrológicas que ocurrirían una vez en mil años. Reservorios, diques y otras obras de control que fueron consideradas efectivas por un siglo y son efectivas por su capacidad de proyecto son incapaces de controlar los grandes volúmenes de agua involucrados. Esta catástrofe trae una lección que la protección contra las inundaciones es relativa y eventualmente la naturaleza cobra un precio muy alto a aquellos que ocupan la terraza de inundación”.

Las inundaciones ribereñas ocurren principalmente debido a la ocupación del suelo de las áreas ribereñas del lecho mayor. En los períodos de pequeña inundación existe la tendencia de ocupar las áreas de riesgo y cuando ocurren las mayores inundaciones los perjuicios son significativos. A continuación son presentados algunos casos sobre impactos debido a este tipo de escenario:

- a. En el río Itajaí en Santa Catarina, Brasil, existe una serie de niveles máximos de inundaciones desde 1852.

De este histórico se puede observar que las tres mayores inundaciones en Blumenau (Santa Catarina, Brasil) ocurrieron entre 1852 y 1911, siendo que la mayor sucedió en 1880 con 17,10 m (Figura 2.2). Entre 1911 y 1982 no ocurrió ninguna inundación con cota superior a 12,90 m, lo que hizo con que la población se olvidara de los eventos críticos y ocupara el valle de inundación. En 1983, cuando la ciudad se encontraba ya desarrollada con población de cerca de 500 mil habitantes ocurrió una inundación (la quinta en magnitud de los últimos 150 años) con cota máxima de 15,34 m. Los perjuicios resultantes en todo el Valle del Itajaí representaron cerca de 8% del PBI de Santa Catarina. La lección que nos da este ejemplo es que la memoria sobre las inundaciones se disipa con lo pasar del tiempo y la población deja de considerar el riesgo. Como no hay planeamiento del espacio de riesgo la ocupación ocurre y los perjuicios son significativos. Sin embargo, la Cia Hering<sup>2</sup> en Blumenau (fundada en 1880, año en que ocurrió la mayor inundación) mantuvo en la memoria el valor de 17,10 m y desarrolló sus instalaciones en cota superior a ésta. Sin planeamiento los relatos históricos son las únicas informaciones disponibles para orientar las personas.

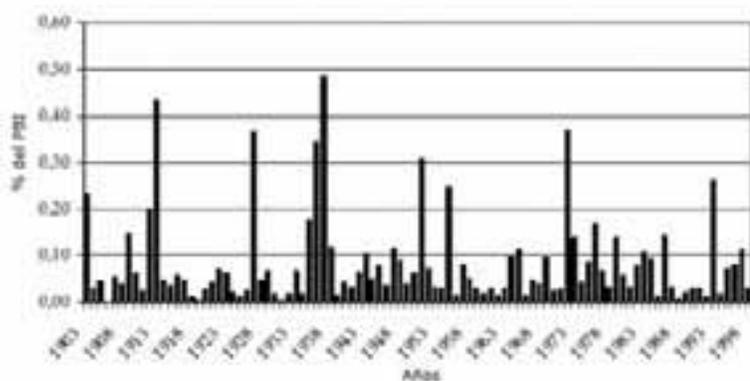


Figura 2.1. Serie histórica del perjuicio anual debido a las inundaciones en los Estados Unidos en % del PBI (Priscoli, 2001).

- b. En la Figura 2.3 se puede observar los niveles de crecientes en el río Iguazu en União da Vitoria, Brasil.

<sup>2</sup> N. T: Importante industria textil del Estado de Santa Catarina, Brasil.

Entre 1959 y 1982 ocurrió apenas una inundación con riesgo superior a 5 años. Este período fue justamente el de mayor crecimiento económico y expansión de las ciudades brasileñas. Las crecidas después de 1982 produjeron perjuicios significativos en la comunidad (Tabla 2.3).

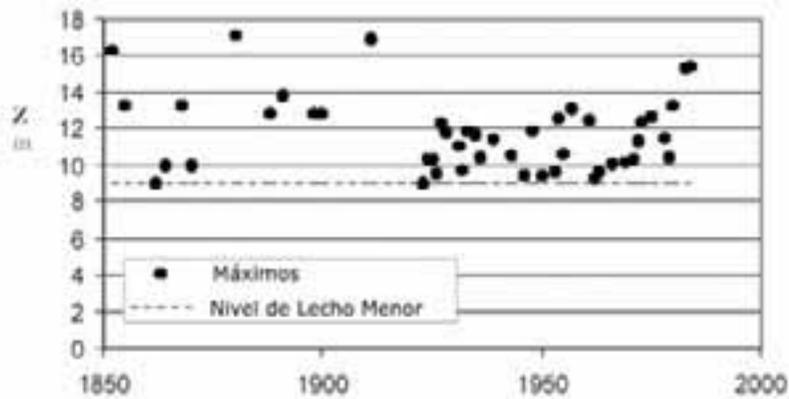


Figura 2.2. Niveles de inundaciones en Blumenau, Santa Catarina, Brasil.

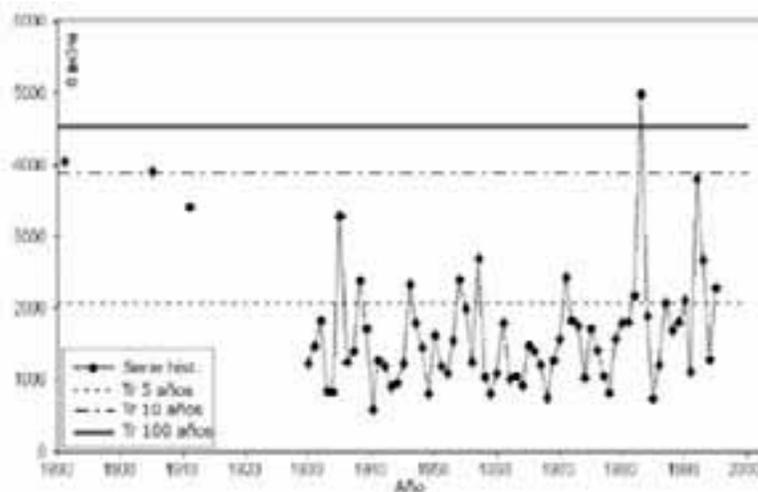


Figura 2.3. Niveles máximos de crecidas en el río Iguazu en União da Vitoria, Brasil (cuenca de cerca de 25.000 km<sup>2</sup>). (Tucci y Villanueva, 1997).

- c. En el alto río Paraguay (Brasil) existe uno de los mayores bañados del mundo, denominado Pantanal. En esta región siempre hubo una convivencia pacífica entre el medio ambiente y la población. En la figura 2.4, se puede observar los niveles máximos de crecidas en Ladário desde el inicio del siglo. En la Tabla 2.4, son presentados valores del nivel máximo medio de inundación y de las áreas inundadas del Pantanal en

tres períodos distintos. Se puede observar la gran diferencia de la década del 60 con relación a las demás. En este período hubo ocupación de las planicies de inundación por períodos largos y no apenas gradualmente. La población fue retirada de esta zona en las décadas siguientes en función del aumento de la frecuencia de los niveles de inundación. La pérdida económica del valor de las propiedades y la falta de sustentación económica fue la consecuencia inmediata. Esta población pasó a vivir en la periferia de las ciudades de la región en un estado de pobreza. Una propiedad que se inundaba 20% del tiempo en la década del 60, actualmente queda 97% inundada.

Tabla 2.3. Pérdidas por inundaciones en União da Vitoria y Porto União (ICA, 1995).

<b>Año</b>	<b>Perjuicios US\$ millones</b>
1982	10.365
1983	78.121
1992	54.582
1993	25.933

- d. En Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, existen datos de niveles de inundación desde 1899, cuando se observaron varios eventos en un período que se extendió hasta 1967 (Figura 2.5). En 1970 fue construido un dique lateral de protección para la ciudad y desde el año 1967 no ocurrió ninguna inundación con tiempo de retorno superior a 10 años (2,94 m). En los últimos años hubo un movimiento en la ciudad para la retirada del dique de inundación, considerando que no había ocurrido eventos en los últimos 38 años. Esta percepción equivocada del riesgo de inundación llevó a los Concejales a aprobar la demolición del dique, que felizmente no fue ejecutada por el municipio.

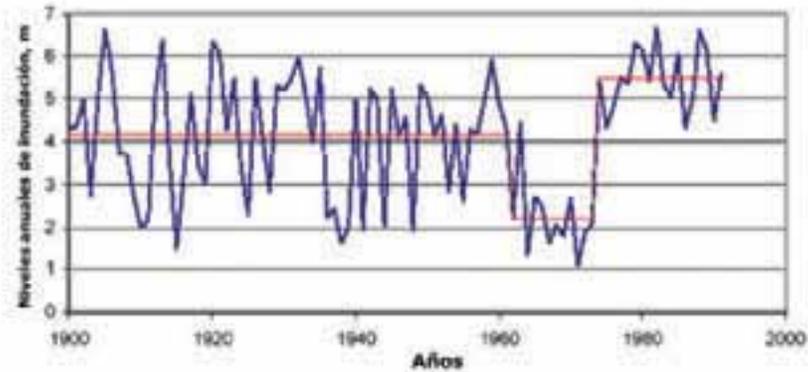


Figura 2.4. Niveles máximos anuales en Ladario en el Río Paraguay y la media de los periodos: (a) 1900-1961; (b) 1961-1973; (c) 1973-1991

El ambiente institucional de control de inundaciones en los países en desarrollo generalmente no lleva a una solución sustentable. Existen solamente pocas acciones aisladas de algunos pocos profesionales. En general, la atención a las crecidas solamente es realizada después de su ocurrencia. La tendencia es que el problema quede en el olvido después de cada crecida, volviendo en la siguiente. Esto se debe a varios factores, entre los cuales cabe citar:

Tabla 2.4. Valores estimados de niveles y áreas inundadas en el Pantanal (valores aproximados)

Periodo	Nivel máximo medio (m)	Área media inundada en el Pantanal* 1.000 km <sup>2</sup>
1900-1959	4,16	35
1960-1972	2,21	15
1973-1992	5,49	50

\* valores aproximados obtenidos de Hamilton (1995).

- falta de conocimiento sobre control de crecidas por parte de los que planifican las ciudades;
- desorganización a niveles federal, provincial (o departamental), sobre el gerenciamiento de crecientes;
- insuficiente información técnica sobre el asunto a nivel de graduación en la Ingeniería;
- desgaste político para los administradores públicos derivado de la implementación del control no estructural (zonificación), ya que la población está siempre esperando una obra hidráulica;
- falta de conocimiento de la población sobre el control de las crecidas;
- en algunos lugares no existe interés en la prevención de las

inundaciones, pues cuando ocurren, los recursos son dados gratuitamente.

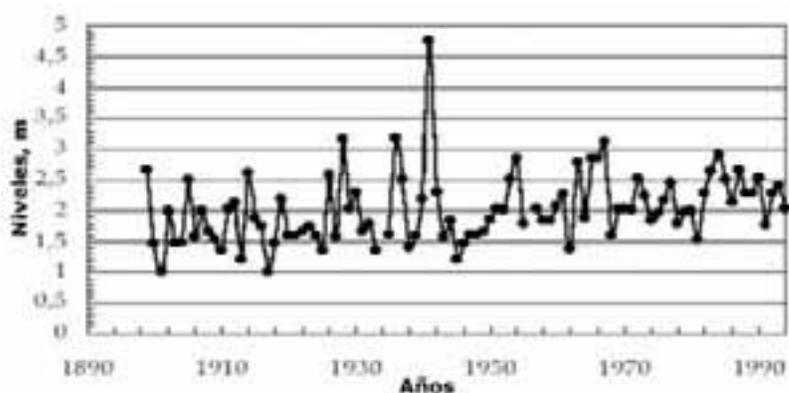


Figura 2.5. Niveles de inundación en Porto Alegre 1899-1994.

## 2.3 Evaluación de las crecidas

La variación del nivel o del caudal de un río depende de las características climatológicas y físicas de la cuenca hidrográfica. Las distribuciones temporal y espacial de la precipitación son las principales condiciones climatológicas. Éstas sólo pueden ser previstas con antelación de pocos días u horas, lo que no permite la previsión de los niveles de crecida con gran anticipación. El tiempo máximo posible de previsión de la crecida, a partir de la ocurrencia de la precipitación, es limitado por el tiempo medio de desplazamiento del agua en la cuenca hasta la sección de interés.

La previsión de los niveles en un río puede ser realizada a corto o a largo plazos. La previsión de crecidas a corto plazo o en tiempo actual, también llamada de pronóstico en tiempo real, permite establecer el nivel y su tiempo de ocurrencia para la sección de un río con una anticipación que depende del pronóstico de la precipitación y de los desplazamientos de la crecida en la cuenca. Este tipo de previsión es utilizado para alertar a la población ribereña y operadores de obras hidráulicas.

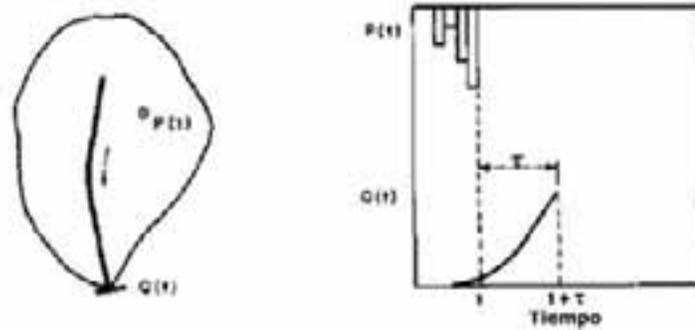
La previsión de crecida a largo plazo cuantifica las chances de ocurrencia de la inundación en términos estadísticos, sin diagnosticar cuando ocurrirá la crecida. La previsión a largo plazo se basa en la estadística de ocurrencia de niveles en el pasado y permite establecer los niveles de crecida para algunos riesgos elegidos.

### 2.3.1 Pronóstico de crecida en tiempo real

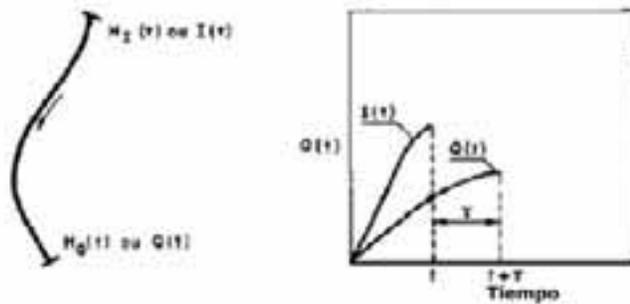
Para efectuar el pronóstico de crecida a corto plazo son necesarios: sistemas de colecta y de transmisión de datos y una metodología de estimación. Los sistemas son utilizados para transmitir los datos de precipitación, nivel y caudal durante la ocurrencia del evento. El proceso de estimación es realizado a través del uso de modelos matemáticos que representan el comportamiento de las distintas fases del ciclo hidrológico. Cuando la crecida alcanza un área habitada es necesario complementar con un Plan de Defensa Civil, y en el caso de la operación de reservorios es necesario un sistema de emergencia y operación.

El pronóstico de niveles de crecidas puede ser realizado con base en la Figura 2.6: (a) pronóstico de la precipitación; (b) conocida la precipitación; (c) caudal de aguas arriba; (d) combinación de los dos últimos. En el primer caso es necesario estimar la precipitación que caerá sobre la cuenca a través del uso de equipos como el radar o el uso de sensores remotos. A continuación, conocida la precipitación sobre la cuenca, es posible estimar el caudal y el nivel por medio de un modelo matemático que simule la transformación de precipitación en caudal.

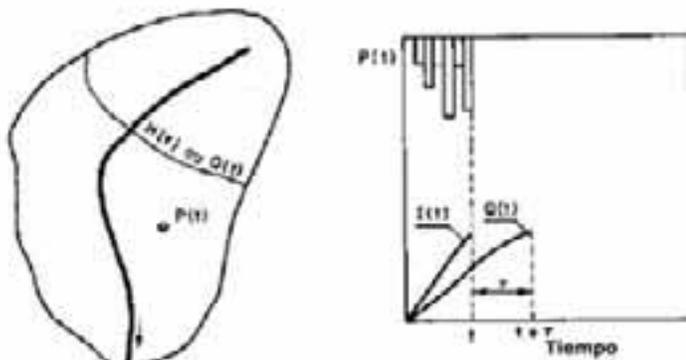
El pronóstico, cuando es conocida la precipitación en la cuenca, utiliza una red telemétrica de colecta y transmisión de datos (cabe consignar que en el caso anterior esta red no es dispensable) y el ya citado modelo matemático de transformación de precipitación en caudal. La antecedencia del pronóstico es menor en este caso y está limitada al tiempo medio de desplazamiento de la crecida (Figura 2.6 a). El pronóstico a corto plazo con base en un puesto de aguas arriba de la sección de interés depende de las características del río, o sea, del área controlada de la cuenca. En este caso, el tiempo de antecedencia es menor que los anteriores (Figura 2.6 b). Cuando la cuenca intermedia entre los puestos presenta una contribución significativa, la combinación de los dos procesos anteriores es utilizada en el pronóstico en tiempo actual (Figura 2.6 c). La presentación de los modelos de pronóstico en tiempo actual está fuera del alcance de este libro y puede ser encontrado en la literatura especializada.



a) Pronóstico con base en la precipitación



b) Pronóstico con base en el nivel o el caudal



c) Pronóstico con base en la precipitación o el caudal

Figura 2.6. Pronóstico en tiempo real

### 2.3.2 Probabilidad o riesgo de inundación

El riesgo de un caudal o precipitación es entendido en este texto como la probabilidad ( $p$ ) de ocurrencia de un valor igual o superior en un año cualquier. El tiempo de retorno ( $T$ ) es el inverso de la probabilidad ( $p$ ) y representa el tiempo, *en media*, que este evento tiene chances de repetirse.

$$T = \frac{1}{P} \quad (2.1)$$

Para ejemplificar, considere un *dado*, que tiene seis caras (números 1 a 6). En una jugada cualquier la probabilidad de salir el número 4 es  $p = 1/6$  (1 chance en seis posibilidades). El tiempo de retorno es, *en media*, el número de jugadas que el número deseado se repite. En ese caso, usando la ecuación 2.1, queda  $T = 1 / (1/6) = 6$ . Por lo tanto, *en media*, el número 4 se repite a cada seis jugadas. Se sabe que este número no ocurre exactamente a cada seis jugadas, pero si se juega millares de veces y se obtiene el promedio, ciertamente ello ocurrirá. Siendo así, el número 4 puede ocurrir dos veces seguidas y pasar muchas sin ocurrir, pero en la media se repetirá en seis jugadas. Haciendo una analogía, cada jugada del *dado* es un año para que ocurren las crecidas. El tiempo de retorno de 10 años significa que, en media, la crecida puede repetirse a cada 10 años o en cada año esta crecida tiene 10% de chance de ocurrir.

Las estimaciones de inundación de un determinado lugar pueden ser realizadas con base a: (a) serie observada de caudales; (b) regionalización de caudales; (c) en la precipitación y uso de modelo lluvia-caudal. Estas metodologías estiman el riesgo de inundación en el lugar con base en los históricos y consideran que las series históricas de caudales son:

- *Homogéneas o estacionarias*, o sea, sus estadísticas no se alteran con el tiempo. Esto significa que la media de los caudales o su desvío estándar no se deberían alterar a lo largo del tiempo. Por ejemplo, al ser construida una presa *aguas arriba* de una sección de un río, con volumen importante para amortiguación de inundación, el riesgo de la inundación debe cambiar porque la serie no es más homogénea.
- Las series registradas de niveles de inundación *son representativas* de la ocurrencia en el lugar: Pocos años de datos pueden no ser representativos del riesgo real de un lugar. En el ejemplo de Blumenau, en el caso de que fuesen utilizadas series solamente a partir de 1935, en 1982 el riesgo de una inundación como la que ocurrió en 1983 habría tenido un riesgo superior a 100 años; sin embargo, si se consideraran los niveles obtenidos en el siglo XIX y, aún mismo las crecidas de 1983 y 1984, se observaría que su riesgo era, en realidad, del orden de 30 años;
- Los valores son independientes entre sí. Generalmente una crecida máxima de un año no guarda dependencia con el año siguiente si fuera elegida dentro del llamado “año hidrológico”, que es el período del inicio del mes

lluvioso al final del mes seco.

Los dos primeros puntos presentan mayor cantidad de incertidumbres y la utilización de marcas de inundaciones es esencial para un ajuste confiable de la curva de probabilidad de caudales en los lugares de interés. Las metodologías para determinación de la curva de probabilidad son descritas en los libros de hidrología (Tucci, 1993).

## 2.4 Medidas de control de las inundaciones ribereñas

Las medidas para el control de inundaciones pueden ser del tipo estructural y no estructural. Las medidas estructurales son aquellas que modifican el sistema fluvial a través de obras en la cuenca (medidas extensivas) o en el río (medidas intensivas) para evitar el desborde hacia el lecho mayor del escurrimiento proveniente de las crecidas.

Las medidas no estructurales son aquellas en que los perjuicios son reducidos por la mejor convivencia de la población con las crecidas, a través de medidas preventivas como la alerta de inundación, la zonificación de las áreas de riesgo, el seguro contra inundaciones, y las medidas de protección individual (“flood proofing”).

Es ingenuidad del hombre imaginar que podrá controlar totalmente las inundaciones; las medidas siempre objetivan minimizar sus consecuencias, aún las estructurales. Por ejemplo, en la década del 30, el proyecto de control de crecidas y uso de la tierra para la agricultura del río Pó, Italia, era un ejemplo de proyecto de recursos hídricos bien sucedido. En 1951, una combinación de precipitaciones intensas y altos niveles de la marea, destruyeron los pólderes, causaron 100 muertes y la pérdida de 30.000 cabezas de ganado, además de pérdidas agrícolas (Hoyt y Langbein, 1955). Este ejemplo, refuerza la visión limitada de la gestión de control de las inundaciones ribereñas expresada en la tabla 2.2.

El control de la inundación es obtenido por una combinación de medidas estructurales y no estructurales que permite a la población ribereña minimizar sus pérdidas y mantener una convivencia armónica con el río. Las acciones incluyen medidas de ingeniería y de cuño social, económico y administrativo. La investigación para la combinación óptima de estas acciones constituye el planeamiento de la protección contra la inundación y sus efectos.

Un ejemplo de política de gestión de inundaciones ocurrió en los Estados Unidos. En 1936 fue aprobada una ley en el ámbito federal, sobre el control de crecidas, que identificaba la naturaleza pública de los programas de reducción de crecidas y caracterizaba la implantación de medidas físicas o estructurales como un medio de reducir estos daños. De esta manera, no era necesario verificar las relaciones de costo/beneficio para justificar la protección de las áreas sujetas a inundaciones. Con esto, se aceleró el desarrollo y la ocupación de las terrazas de inundación, lo cual resultó en el aumento de los daños ocasionados por las crecidas. Las pérdidas de los fondos públicos fue insuficiente para atender a esta tendencia. En 1966, el gobierno reconoció que las medidas anteriores no eran adecuadas y dio énfasis a medidas no estructurales, que permitían a la población convivir con la crecida. El comité creado por la American Society of Civil Engineers sobre el control de crecidas, relató en 1962 lo siguiente (Task, 1962): “Las limitaciones de la presente (en 1962) Política Nacional de Control de Crecidas, la cual se basa principalmente en la construcción de obras de control de inundación, son reconocidas en este informe, lo cual enfatiza la necesidad de regulación de las terrazas de inundación como una parte esencial de un plan racional de reducción de las pérdidas de las crecidas”.

En 1973, fue aprobada una ley sobre protección contra desastres de crecidas, dando énfasis a medidas no estructurales, enfatizando y exigiendo el seguro para crecidas y regulación del uso de la tierra y protección de las nuevas construcciones para crecidas de 100 años del tiempo de retorno. En 1974 fueron aprobados, dentro de la Legislación de Desarrollo de Recursos Hídricos, artículos específicos sobre crecidas que preveían medidas no estructurales y la distribución de costos, como en el artículo 73 de la Ley de 1974: “en investigación, planeamiento o proyecto de cualquier Agencia Federal, o de cualquier proyecto involucrando la protección contra inundaciones, debe ser dada prioridad a las alternativas no estructurales para reducción de perjuicios de inundación, incluyendo, pero no limitando las construcciones a prueba de crecidas, reglamentación de las áreas de inundación, utilización de las áreas de inundación para usos recreativos, pesca, vida animal y otras finalidades públicas y la transferencia con el objetivo de dar una solución económica, social y del medio ambiente más aceptable para reducción de los daños de crecidas”.

En la Figura 2.7 se presenta la evolución de los beneficios anuales, los beneficios acumulados y las inversiones en la gestión de inundación hasta 1999 (con valores ajustados al dólar de 1999).

Se puede observar en esta figura que los beneficios acumulados superaron en mucho las inversiones en la gestión de las inundaciones.

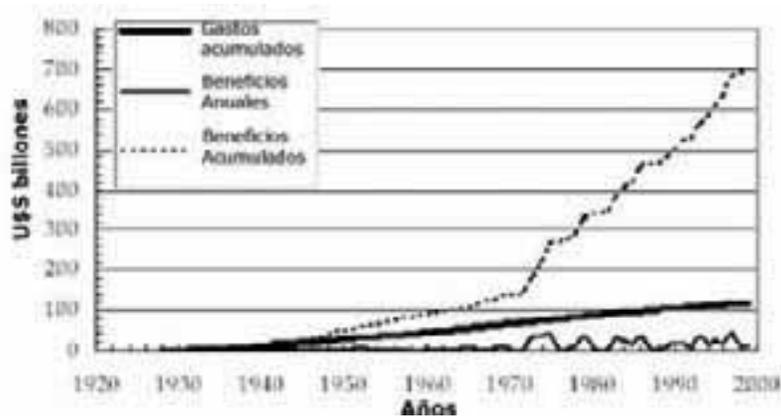


Figura 2.7. Evolución de los beneficios anuales y acumulados y de los gastos en la gestión de inundación en los Estados Unidos (Priscoli, 2001).

## 2.5 Medidas estructurales

Las medidas estructurales son obras de ingeniería implementadas para reducir el riesgo de crecidas. Estas medidas pueden ser extensivas o intensivas. Las medidas extensivas son aquellas que actúan en la cuenca, intentando modificar las relaciones entre precipitación y caudal, como la alteración de la cobertura vegetal del suelo, que reduce y retarda los picos de crecidas y controla la erosión de la cuenca. Las medidas intensivas son aquella que reaccionan en el río y pueden ser de tres tipos (Simons *et.al.*, 1977): (a) *aceleran el escurrimiento*: construcción de diques y pólderes, aumento de la capacidad de descarga de los ríos y corte de meandros; (b) *retardan el escurrimiento*: reservorios y cuencas de amortiguamiento; c) *desvío del escurrimiento*: obras como canales de desvíos. En la Tabla 2.5 están resumidas las principales características de las medidas estructurales.

### 2.5.1 Medidas extensivas:

Las medidas extensivas son:

**Cobertura vegetal:** la cobertura vegetal tiene la capacidad de almacenar parte del volumen de agua precipitado por la interceptación vegetal y de aumentar la evapotranspiración y de reducir la velocidad del escurrimiento superficial por la cuenca hidrográfica. Cuando se retira la cobertura vegetal la tendencia es

el aumento del volumen escurrido, de las crecidas y la reducción de las sequías, aumentando la variabilidad de los caudales. El aumento de la cobertura es una medida extensiva para la reducción de las inundaciones, pero aplicable a pequeñas cuencas, donde tiene más efecto ( $< 10 \text{ km}^2$ ). El mayor efecto de este tipo de medida se da sobre los eventos más frecuentes de alto riesgo de ocurrencia. Para eventos raros de bajo riesgo el efecto de la cobertura vegetal tiende a ser pequeño.

Tabla 2.5. Medidas estructurales (Simons *et al.* 1977).

Medida	Principal ventaja	Principal desventaja	Aplicación
<i>Medidas extensivas</i>			
Alteración de la Cobertura vegetal	Reducción del pico de crecida	Impracticable para grandes áreas	Pequeñas cuencas
Control de la pérdida del suelo	Reduce la sedimentación	Similar al ítem anterior	Pequeñas cuencas
<i>Medidas intensivas</i>			
Diques y pólderes	Alto grado de protección de un área	Daños significativos en el caso que falle	Grandes ríos y en la planicie.
<i>Mejorías del canal:</i>			
Reducción de la rugosidad por desobstrucción	Aumento del caudal con poca inversión	Efecto localizado	Pequeños ríos
Corte de meandro	Amplía el área protegida y acelera el escurrimiento	Impacto negativo en ríos con fondo aluvional	Área de inundación estrecha
<i>Reservorio:</i>			
Todos los reservorios	Control aguas abajo	Ubicación difícil debido a expropiación	Cuencas intermediarias
Reservorios con compuertas	Más eficiente con el mismo volumen	Vulnerable a errores humanos	Proyectos de usos múltiples
Reservorios para crecidas	Operación con un mínimo de piedras	Costo no compartido	Restringido al control de crecidas
<i>Cambio de canal:</i>			
Sobre el curso de la crecida	Amortiguación del volumen	Depende de la topografía	Grandes cuencas
Desvíos	Reduce el caudal del canal principal	Similar al ítem anterior	Cuencas medias y grandes

**Control de la erosión del suelo:** el aumento de la erosión tiene implicaciones ambientales por el transporte de sedimentos y sus agregados, pudiendo contaminar los ríos aguas abajo, disminuir su sección y alterar el balance de carga y transporte de los ríos. Uno de los factores es la reducción de la sección de los ríos y el aumento de la frecuencia de las inundaciones en lugares

de mayor sedimentación. El control de la erosión del suelo puede ser realizado por la reforestación, pequeños reservorios, estabilización de las orillas y prácticas agrícolas correctas. Esta medida contribuye para la reducción de los impactos de las inundaciones.

### 2.5.2 Medidas intensivas

Las medidas intensivas son:

**Reservorio:** El reservorio de control de crecidas funciona reteniendo el volumen del hidrograma durante las crecidas, reduciendo el pico y el impacto *aguas abajo* de la presa. En la Figura 2.8 se observa el hidrograma natural de un río. Considerando un volumen  $V$  del hidrograma capaz de ser retenido por un reservorio, se puede observar la reducción del caudal máximo y el hidrograma resultante.

Los reservorios para control de inundaciones pueden ser de uso exclusivo a esta finalidad o pueden tener usos múltiples. El primero tiene como objetivo sólo minimizar las inundaciones, mientras que el segundo tiene más de un objetivo, que son muchas veces conflictivos.

Un reservorio sin control de operación es aquel que no dispone de compuertas de vertedor o de fondo y la crecida es regulada por las condiciones del vertedor libre. Cuando existen compuertas es posible utilizar con más frecuencia el volumen disponible para el control de las crecidas. En el período lluvioso los primeros hidrogramas tienden ser de menor porte hasta que las pérdidas sean atendidas y el suelo saturado. Estos hidrogramas pueden ocupar el volumen disponible en el reservorio, resultando poco espacio para reducir el pico de las crecidas más grandes subsecuentes (Figura 2.9 a).

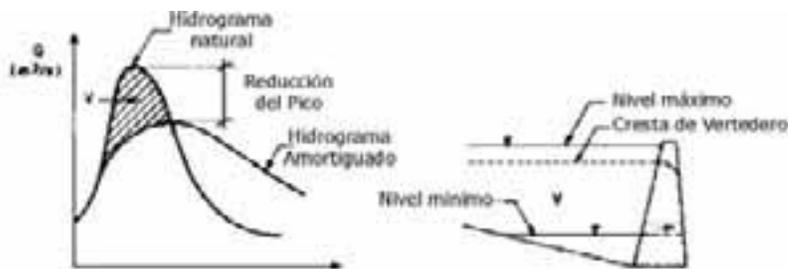


Figura 2.8. Efecto del reservorio.

La regla operacional puede ser la siguiente: (a) el reservorio debe operar de tal forma que escurra el caudal natural

hasta que aguas abajo sea alcanzada la cota límite ( $Q_{crit}$ ); (b) a partir de este momento utilizar el volumen del reservorio para mantener o reducir el caudal (Figura 2.9 b). Estas condiciones operacionales dependen del proyecto del reservorio y de sus dispositivos de evacuación. Para la búsqueda de las mejores condiciones de proyecto y operación es necesario simular el escurrimiento en el reservorio, identificando cuál es la operación más eficiente.

Las presas proyectadas deben considerar los impactos que pueden producir hacia *aguas abajo* y *aguas arriba* del emprendimiento.

*Aguas abajo:* Generalmente, existen áreas sujetas a inundación *aguas abajo* de una presa. Con la construcción de la presa la tendencia es que el reservorio produzca amortiguamiento de las crecidas en estas áreas ribereñas, caso no haya problemas operacionales de la presa. Sin embargo, si el área de aguas abajo no está ocupada acabará siendo habitada por la proximidad con la obra, pasando así a estar sujeta a las crecidas. Si la obra no logra amortiguar las crecidas, la tendencia de la sociedad es que la obra produzca la reducción de los impactos de aguas abajo. De esta manera, la restricción de aguas abajo pasa a ser el caudal máximo  $Q_{crit}$  a partir de lo cual el río inunda sus orillas. En los períodos de crecidas existirán eventos en que la presa no tendrá condiciones de amortiguar el caudal y ocurrirán inundaciones. La percepción pública de esta situación, generalmente, es de culpar la presa por el ocurrido, por lo tanto, es necesario que el emprendimiento tenga un eficiente sistema operacional y un sistema de observación confiable de los datos hidrológicos necesarios a la demostración de las condiciones operacionales para la defensa de sus acciones.

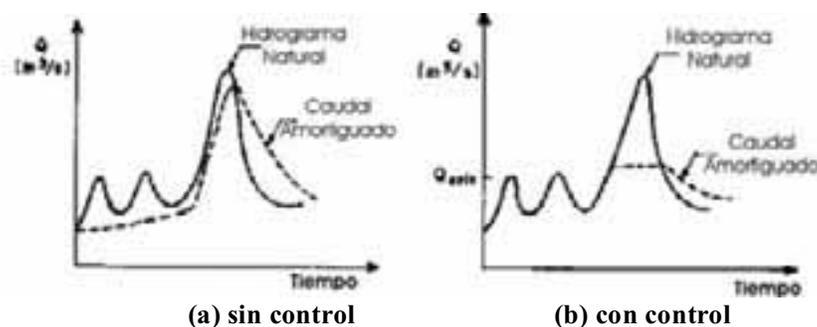


Figura 2.9. Operaciones del reservorio

*Aguas arriba:* La construcción de un reservorio puede producir los siguientes impactos *aguas arriba*:

- a. De acuerdo con el caudal afluente, la regla operacional y la capacidad de escurrimiento, la línea de agua de remanso puede inundar o provocar represamientos *aguas arriba*;
- b. las condiciones del ítem anterior pueden alterarse con el tiempo debido a la colmatación del reservorio, que ocurre inicialmente en su tramo de *aguas arriba*. Debido a esto, los niveles de inundación anteriormente proyectados pueden aumentar, alcanzando áreas fuera del límite desapropiado.

Un ejemplo de sistema de presas para el control de crecidas son los de la cuenca del río Itajaí-Açu en Santa Catarina, Brasil (Figura 2.10): la presa Oeste ubicada en el río Itajaí-Oeste *aguas arriba* de la ciudad de Taió (concluida en 1973), la presa Sur en el Itajaí do Sul (concluida en 1975) *aguas arriba* de la ciudad de Ituporanga; la presa de Ibirama en el río Hercílio (concluida en el final de los años 80). Esta última no existía durante las crecidas de 1983 y 1984. El proyecto de estas presas utiliza descargadores de fondo con capacidad que tiende a retener mucho volumen dentro de los reservorios, utilizando un tiempo muy largo para descargar. La contribución de las dos primeras presas para el control de la inundación del año 1983 fue insignificante debido al gran volumen de precipitación que ocurrió durante 7 días. En el caso de la inundación de 1984, que tuvo duración de apenas 2 días, la contribución fue mayor. Examinadas las series de caudales máximos antes y después de la construcción de las presas se observó un resultado inesperado que fue el aumento de la media y del desvío estándar de las crecidas para una de las secciones aguas abajo de una de las presas. Sin embargo, el resultado de este aumento fue debido también al aumento de precipitaciones en la cuenca justamente entre los dos períodos. En la Tabla 2.6, son presentadas algunas estadísticas de esta comparación. La presa Oeste que no produjo aumento se mostró más eficiente en la contención de las inundaciones, mientras que la presa Sur aparentemente no posee volumen y proyecto adecuado para la reducción significativa de las inundaciones.

Tabla 2.6. Estadísticas antes y después de la construcción de la presa en el río Itajaí

Estadística	Presa Oeste m <sup>3</sup> /s	Presa Sur m <sup>3</sup> /s	Precipitación Anual mm	Precipitación <sup>1</sup> mm
Media				
Antes de la presa	292,2	488,5	1309	224,1
Después de la presa	274,5	513,3	1658	291,7
Desvío patrón				
Antes	73,2	267,1		
Después	56,2	356,6		
Período				
Antes	1934-1972	1935-1974	1942-1972	1942-1972
Después	1973-1983	1975-1984	1973-1984	1973-1984

1 – precipitación del mes en el cual ocurre la crecida máxima anual.

*Reservorio de uso múltiple:* Cuando existe una presa proyectada para abastecimiento de agua, irrigación o energía eléctrica, generalmente el objetivo es mantener el volumen del reservorio lo más alto posible. En estas condiciones la capacidad de amortiguación de las inundaciones es mínima. Existe un conflicto natural entre estos usos.

La metodología generalmente utilizada para atender a los objetivos conflictivos se basa en la reserva de un volumen de espera en el reservorio que minimice los impactos de la inundación *aguas arriba* y *aguas abajo* de la presa (Figura 2.11). Este volumen es mantenido libre para recibir los volúmenes de inundación y reducir el caudal para aguas abajo, intentando atender las restricciones de aguas arriba y aguas abajo.

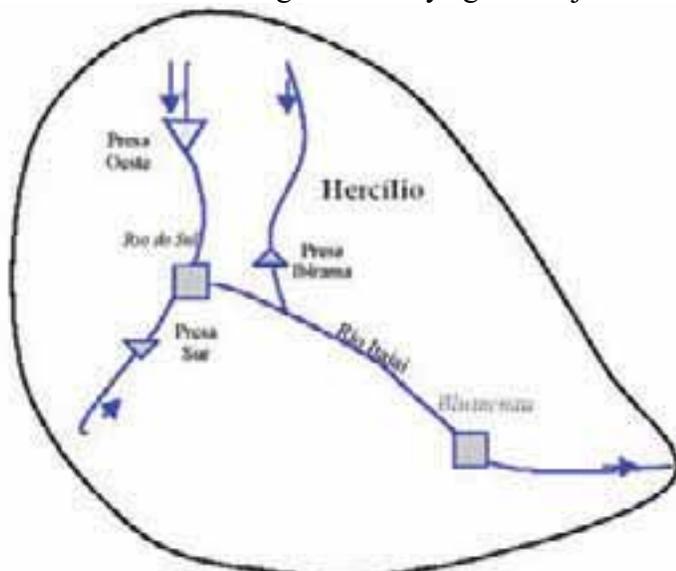


Figura 2.10. Cuenca del río Itajaí y presas de control de crecidas.



Figura 2.11. Niveles operacionales de una presa.

Existen varias metodologías para estimación de este volumen con base en las estadísticas de las series históricas de caudal de la presa. Los métodos utilizados en el sector eléctrico brasileño han sido: el método de la Curva Volumen x duración (adaptaciones de la metodología presentada por Beard, 1963) o el método de las trayectorias críticas (Kelman *et al.*, 1983). El primero utiliza la serie histórica observada y el segundo utiliza series de caudales generada por un modelo estocástico. Los dos métodos determinan estadísticamente el volumen de espera que debe ser mantenido por el reservorio en cada día del período lluvioso para un determinado riesgo de análisis.

Estos procedimientos no consideran la información existente en la cuenca en el período de la inundación. Para cuencas donde la estacionalidad no es bien definida el modelo puede sobrestimar el volumen de espera con perjuicios importantes. Por un lado están los perjuicios debido a la inundación y por otro lado los debidos a la pérdida de energía generada.

**Diques o pólderes:** Son muros laterales de tierra o concreto, inclinados o rectos, construidos a una cierta distancia de las orillas, que protegen las áreas ribereñas contra el desbordamiento. Los efectos de reducción del ancho del escurrimiento y de confinamiento del flujo son el aumento del nivel de agua en la sección para el mismo caudal, aumento de la velocidad y de la erosión de las orillas y de la sección en general y reducción del tiempo de viaje de la onda de crecida, agravando la situación de los demás lugares *aguas abajo*. El riesgo mayor existente en la

construcción de un dique es la definición correcta de la crecida máxima probable, pues existirá siempre un riesgo de colapso, y este caso los daños serán peores que si no existiera el dique.

El dique permite la protección localizada para una región ribereña. Se debe evitar diques de grandes alturas, pues existe siempre el riesgo de ruptura en el caso que ocurra una crecida mayor de aquella proyectada, y de este modo, el impacto podría más grande que si éste no existiera.

Hidráulicamente, el dique reduce la sección de escurrimiento y puede provocar el aumento tanto de la velocidad como de los niveles de inundación (Figura 2.12). Para que esto no ocurra, las condiciones de flujo no deben ser alteradas después de la construcción del dique. Estas condiciones pueden ser simuladas en condición de régimen permanente para los caudales de proyecto. Esta metodología no debe ser usada para escurrimiento sujeto al efecto de la marea, pues resultará en una cota sobredimensionada. Para tanto, se debe utilizar un modelo hidrodinámico.

Los diques son normalmente construidos de tierra con enrocamiento y de concreto, dependiendo de las condiciones del lugar.

En la construcción de diques para la protección de áreas agrícolas, el riesgo de colapso adoptado puede ser más alto que en las áreas urbanas, siempre que los daños potenciales sean sólo económicos. Cuando el colapso puede producir daños humanos el riesgo debe ser menor y la obra complementada por un sistema de previsión y alerta en tiempo actual. Tanto para cuencas rurales como para cuencas urbanas es necesario planificar el bombeo de las áreas laterales contribuyentes al dique. En caso contrario las lluvias que caen sobre estas cuencas laterales quedarán represadas por la mayor cota del río principal, acumulándose en su interior de no existir drenes con compuertas (Figura 2.13).



Figura 2.12. Impacto de las construcciones del dique.

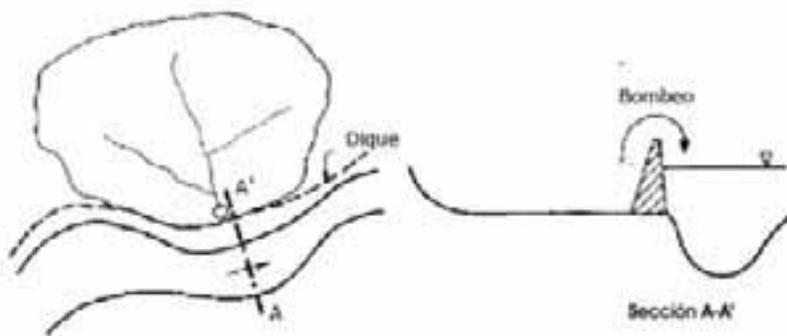


Figura 2.13. Dique – drenaje de la cuenca lateral.

**Modificaciones del río:** Las modificaciones en la morfología del río objetivan aumentar el caudal para un mismo nivel, reduciendo su frecuencia de ocurrencia. Esto puede ser obtenido por el aumento de la sección transversal o por el aumento de la velocidad. Para aumentar la velocidad es necesario reducir la rugosidad, retirando las obstrucciones al escurrimiento, dragando el río, aumentando el desnivel por el corte de meandros o profundizando el río. Estas medidas, en general, presentan costos elevados.

Para la sección de un río que escurra un caudal  $Q$ , la cota resultante depende del área de la sección, de la rugosidad, del radio hidráulico y del desnivel. Para reducir la cota debido a un caudal se puede actuar sobre las variables mencionadas. Para que la modificación sea efectiva es necesario modificar estas condiciones para el tramo que actúa hidráulicamente sobre el área de interés. Profundizando el canal, la línea de agua es rebajada evitando inundación, pero las obras podrán involucrar un trecho

muy extenso para ser efectiva, lo que aumenta el costo (Figura 2.14 a). La ampliación de la sección de medición produce reducción del desnivel de la línea de agua y reducción de los niveles aguas arriba (Figura 2.14 b). Estas obras deben ser examinadas en lo que respecta a la alteración que pueden provocar en la energía del río y en la estabilidad del lecho. Los tramos de aguas arriba y aguas abajo de las obras pueden sufrir sedimentación o erosión de acuerdo con la alteración producida.

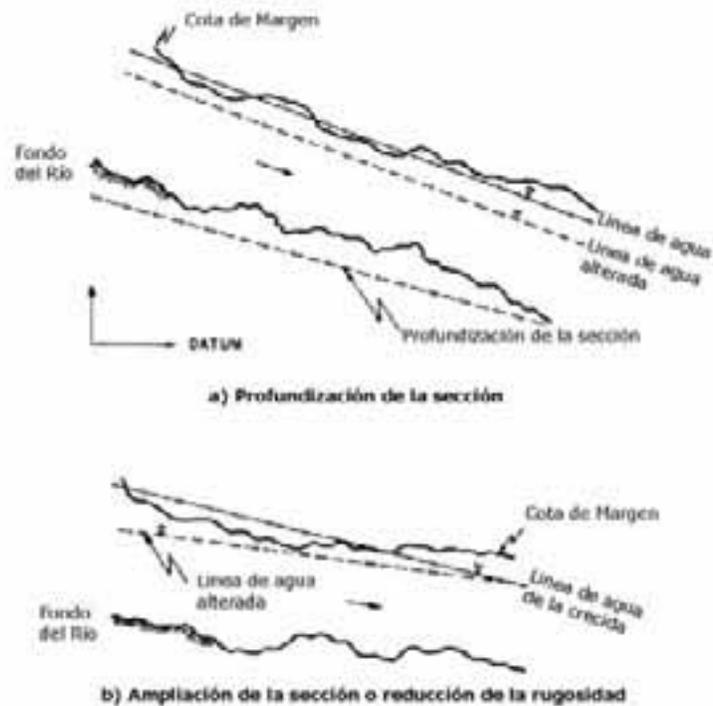


Figura 2.14. Modificaciones en el río.

## 2.6 Medidas no estructurales

Las medidas estructurales no son proyectadas para dar una protección completa. Esto exigiría la protección contra la mayor crecida posible. Esta protección es físicamente y económicamente inviable en la mayoría de las situaciones. La medida estructural puede crear una falsa sensación de seguridad, permitiendo la ampliación de la ocupación de las áreas inundables, que en el futuro pueden resultar en daños significativos. Las medidas no estructurales, en conjunto con las anteriores o sin éstas, pueden minimizar significativamente los perjuicios con un costo menor. El costo de protección de un área

inundable por medidas estructurales, en general, es superior a aquel correspondiente a las medidas no estructurales. En Denver (Estados Unidos), en 1972, el costo de protección por medidas estructurales de un cuarto del área era equivalente al necesario para implementar medidas no estructurales para proteger los otros tres cuartos del área inundable.

Las principales medidas no estructurales son del tipo preventiva como: previsión y alerta de inundación, zonificación de las áreas de riesgo de inundación, seguro y protección individual contra inundación. El pronóstico de crecidas fue presentado en el ítem anterior.

### **2.6.1 Sistema de pronóstico y alerta temprana**

El sistema de pronóstico y alerta temprana tiene la finalidad de anticiparse a la ocurrencia de la inundación, avisando a la población y tomando las medidas necesarias para reducir los perjuicios resultantes de la inundación.

- Un sistema de alerta de pronóstico en tiempo real involucra los siguientes aspectos (Figura 2.15):
- Sistema de colecta y transmisión de informaciones de tiempo e hidrológicas; sistema de monitoreo por red telemétrica, satélite o radar y transmisión de estas informaciones para el centro de pronóstico;
- Centro de pronóstico: recepción y procesamiento de informaciones; modelo de previsión (vea en el ítem anterior), evaluación y alerta;
- Defensa Civil: programas de prevención: educación, mapa de alerta, locales críticos, etc.; alerta a los sistemas públicos: escuelas, hospitales, infraestructura, etc.; alerta a la población de riesgo, remoción y protección a la población alcanzada durante la emergencia o en las inundaciones.

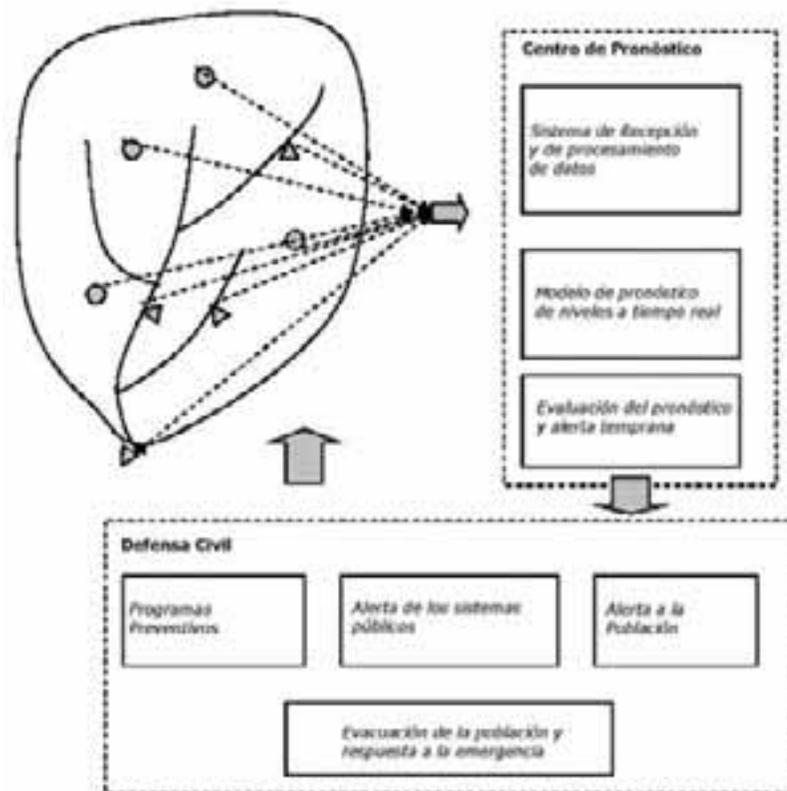


Figura 2.15. Sistema de previsión y alerta.

Este sistema posee tres fases distintas que son: prevención, alerta y mitigación. En la prevención son desarrolladas las actividades preventivas para minimizar las inundaciones cuando éstas ocurren. Esto involucra el entrenamiento del equipo de la Defensa Civil, de la población a través de informaciones, el mapa de alerta que identifique las áreas inundadas durante su ocurrencia, el planeamiento de las áreas para recibir la población afectada, entre otros.

El alerta trata de la fase propiamente dicha de acompañamiento de la ocurrencia de los eventos lluviosos con base en lo siguiente:

1. *niveles de acompañamiento*: nivel a partir del cual existe un acompañamiento por parte de los técnicos, de la evolución de la crecida. En este momento, se da un alerta a la Defensa Civil de la eventualidad de la llegada de una crecida. Se inicia en este momento el pronóstico de niveles en tiempo real;
2. *niveles de alerta*: es el nivel a partir del cual las entidades pronostican que la cota que puede producir

perjuicios será alcanzada dentro de un horizonte de tiempo de la previsión. La Defensa Civil y las administraciones municipales pasan a recibir regularmente los pronósticos para la ciudad;

3. *niveles de emergencia*: nivel en el cual ocurren perjuicios materiales y humanos. La población pasa a recibir las informaciones. Estas informaciones que recibe la población son el nivel actual y pronosticado con anticipación y el intervalo probable de errores obtenidos a través de los modelos;

La fase de *mitigación* trata de las acciones que deben ser realizadas para disminuir el perjuicio de la población cuando la inundación ocurre. Incluye acciones tales como aislar calles y áreas de riesgo, remoción de la población, de animales y la protección de lugares de interés público.

El *mapa de alerta* es preparado con valores de cotas para cada esquina del área de riesgo. Con base en la cota absoluta de las esquinas, se debe transformar este valor en la cota referente a la regla limnimétrica. Esto significa que, cuando un determinado valor de nivel de agua esté ocurriendo en la regla, la población sabrá cuanto falta para inundar cada esquina. Esto auxilia la convivencia con la inundación durante su ocurrencia.

Para que este mapa pueda ser determinado, es necesario obtener todas las cotas de cada esquina y realizar lo siguiente:

1. Para cada cota de esquina, hay que trazar una perpendicular de su punto de ubicación con relación al eje del río.
2. Considerar la cota de la referida esquina como siendo la misma en esta sección del río;
3. Obtener el desnivel de la línea del agua. Elegir el tiempo de retorno aproximadamente por la faja (mapa de planeamiento) en el que se encuentra la esquina;
4. La cota de la regla de la esquina será:

$$CR = CT \pm D \times Dist \quad (2.2)$$

donde CR es la cota de la regla; CT es la cota topográfica de la esquina; D es el desnivel a lo largo del río; Dist es la distancia a lo largo del río entre la sección de la regla. La señal será negativa si la esquina está *aguas arriba* de la sección de la regla, mientras que será positiva si está *aguas abajo*. El valor a ser puesto en el mapa es CR. Sin embargo, en el caso que la población esté más acostumbrada con el valor de la regla y no de su cota absoluta se

debe utilizar el nivel de la regla, que es:

$$NR = CR - ZR \quad (2.3)$$

donde NR es el nivel de la regla; CR es la cota de la regla y ZR es la cota del cero de la regla.

### **2.6.2 Zonificación de áreas inundables**

La zonificación de las áreas de inundación engloba las siguientes etapas: a) determinación del riesgo de las crecidas; b) mapeamiento de las áreas de inundación; c) zoneamiento. La estimación del riesgo fue mencionada en el ítem 2.2. A continuación serán descritos los aspectos del mapeamiento y de la zonificación.

#### **Mapa de inundación de la ciudad**

Los mapas de *inundación pueden ser de dos tipos: mapas de planeamiento y mapas de alerta. El mapa de planeamiento* define las áreas alcanzadas por crecidas de tiempos de retorno elegidos. El *mapa de alerta* fue descrito en el ítem anterior.

Para la elaboración de estos mapas son necesarios los siguientes datos: a) nivelación de la regla a un cero absoluto; b) topografía de la ciudad en el mismo referente absoluto de la regla limnimétrica. Cota de calle en el medio de cada esquina de las áreas de riesgo; c) estudio de probabilidad de inundaciones de niveles para una sección en la cercanía de la ciudad; d) niveles de crecidas, o marcas a lo largo de la ciudad que permita la definición de la línea de agua; e) secciones batimétricas a lo largo del río en el perímetro urbano. En el caso que la ubicación de la sección de observación se encuentre fuera del perímetro urbano, la batimetría debe ir hasta la referida sección. El espaciamiento de las secciones depende de las modificaciones del lecho y del desnivel de la línea de agua, pero espaciamientos entre 500 y 1.000 m son suficientes; f) catastro de las obstrucciones al escurrimiento a lo largo del tramo urbano como son los puentes, edificios y calles, entre otros.

Cuando el desnivel de la línea de agua a lo largo de la ciudad es muy pequeña y no existe arroyos significativos en el perímetro urbano los puntos d, e y f son desnecesarios. En el caso que tenga obstrucciones, éstas pueden ser importantes si reducen significativamente la sección transversal.

En la práctica, es muy complicada la obtención de todas las informaciones relacionadas anteriormente, por lo que es conveniente dividir el estudio en dos fases. En la primera fase,

denominada preliminar, serían delimitadas con baja precisión las áreas de inundación con base en mapas topográficos existentes y marcas de crecidas. En la segunda fase, con la delimitación aproximada de las áreas de inundación, sería determinada la topografía más detallada para esta área, juntamente con la batimetría del río.

**Mapeamiento preliminar:** En las ciudades de porte superior a 10.000 habitantes existen proyectos de abastecimiento de agua. Para estos proyectos es necesario obtener la topografía con espaciamiento mínimo de 5 m en 5 m (1:10.000). Estos mapas no poseen la precisión deseada para este tipo de estudio, pero pueden ser utilizados preliminarmente. Los errores pueden ser minimizados con visitas “in situ”, fotografías aéreas y verificación de puntos característicos del relevamiento. No siempre estos mapas se refieren a la cota absoluta deseada; en este caso es necesario obtener el plano de comparación (RN) deseado y establecer la referencia con el mapa disponible. A continuación se puede establecer la relación entre el cero de la regla limnimétrica y el RN elegido, utilizado en la elaboración del mapa topográfico.

Considerando que los niveles de crecidas son conocidos en la sección de la regla, para transportarlo a las secciones a lo largo del tramo urbano es necesario conocer el desnivel de la línea de agua. Este desnivel puede ser obtenido a través de las marcas de crecidas o midiendo la misma durante la sequía. Este último procedimiento puede presentar errores, ya que si existen obstrucciones al escurrimiento durante las crecidas, el desnivel puede modificarse significativamente.

Para la determinación del desnivel de la línea de agua se debe recomendar al topógrafo lo siguiente: a) nivelar todas las marcas de crecida existentes en la ciudad; b) medir el nivel de agua con espaciamiento entre 500 m y 1.000 m a lo largo del tramo urbano, anotando la cota de la regla para el momento del relevamiento.

Para verificar el trabajo del topógrafo se puede utilizar lo siguiente: a) verificar si el desnivel es decreciente en la dirección del flujo; b) para verificar la nivelación de las marcas en la vecindad de la sección de la regla limnimétrica sume al cero de la regla los valores observados en el limnógrafo y verifique si corresponden a las marcas niveladas. Se debe considerar que la marca de la crecida no corresponde al nivel máximo ocurrido, ya que el río mancha la pared cuando el nivel se mantiene por algún tiempo. En el caso que el río quede muy poco tiempo en el pico, la marca debe aparecer para niveles menores.

Los criterios para determinación de la línea de agua y los niveles de crecida a lo largo de la ciudad son los siguientes:

- a. conocida la curva de frecuencia de niveles de inundación en la sección de la regla limnimétrica, obtenga los niveles absolutos correspondientes a los tiempos de retorno deseados;
- b. defina las secciones a lo largo del río; Estas secciones son elegidas con base en las marcas existentes y/o en los niveles medidos a cada 500 m y 1.000 m;
- c. calcule el desnivel de la línea de agua para los distintos tramos definidos por las secciones referenciadas. El desnivel es calculado con la distancia medida a lo largo del río. Se debe tener cuidado cuando existen puentes y/o calles que obstruyen el escurrimiento;
- d. para los niveles calculados en las secciones del puesto, obtenga las cotas correspondientes para las demás secciones, utilizando el desnivel de la línea de agua obtenida.

**Mapeamiento definitivo:** En este caso es necesario un relevamiento detallado de la topografía de las áreas de riesgo con el tiempo de retorno menor o igual a 100 años. La elección del tiempo de retorno es arbitraria y depende de la definición de la futura zonificación. En el caso que haya ocurrido una crecida con tiempo de retorno superior a los 100 años, se debe elegir el mayor valor ocurrido.

El relevamiento detallado engloba la determinación de las curvas de nivel con espaciamiento de 0,5 m o 1,0 m, dependiendo de las condiciones del terreno. En algunas ciudades el espaciamiento puede ser muy detallado. En este relevamiento debe constar el nivel del medio de la calle de cada esquina de las áreas de riesgo.

Además de la topografía es necesario el relevamiento de las obstrucciones al escurrimiento, como pilares y márgenes de puentes, calles con taludes, edificios, caracterizando en planta y, en sección, el tipo de cobertura y obstrucción.

Con la batimetría a lo largo de la ciudad es posible determinar las cotas de inundación, de acuerdo con el siguiente procedimiento:

- a. debe ser utilizado un modelo de escurrimiento permanente para el cálculo de la línea de agua. El método es utilizado, inicialmente, para el ajuste de las rugosidades, con base a las marcas de crecidas y en la curva de descarga del puesto fluviométrico.

Para esto, la línea de agua es determinada para el caudal registrado en el puesto fluviométrico y el nivel correspondiente en el sentido de *aguas abajo* hacia *aguas arriba*. La rugosidad correcta será aquella cuya línea de agua se aproxime de las marcas de crecida;

- b. conocidas las rugosidades se puede establecer la línea de agua para los caudales correspondientes a los distintos tiempos de retorno y, en consecuencia, elaborar el mapeamiento de las áreas alcanzadas.

## **Zonificación**

La zonificación propiamente dicha es la definición de un conjunto de reglas para la ocupación de las áreas de mayor riesgo de inundación, previendo la minimización futura de las pérdidas materiales y humanas en función de las grandes crecidas. Se concluye de esto, que la zonificación urbana permitirá un desarrollo racional de las áreas ribereñas.

La reglamentación del uso de las zonas de inundación se apoya en mapas con demarcación de áreas de distintos riesgos y en los criterios de ocupación de éstas, cuanto al uso y a los aspectos constructivos. Para que esta reglamentación sea utilizada, beneficiando las comunidades, ésta debe ser integrada a la legislación municipal sobre loteos (o lotificaciones), construcciones y habitaciones, a fin de garantizar su observancia. De este modo, el contenido de este capítulo tiene la finalidad de servir como base para la reglamentación de la terraza de inundación, a través de los planes directores urbanos, permitiendo a los municipios realizar un control efectivo. El Departamento de Aguas y Energía Eléctrica del Estado de San Pablo (DAEE), presentó una propuesta para los artículos de la sección de Recursos Hídricos de las Leyes Orgánicas Municipales del referido Estado, donde la zonificación era recomendada en los siguientes términos: “Art. 2º. Cabrá al municipio, en el campo de los recursos hídricos: IV – proceder a la zonificación de las áreas sujetas a riesgos de inundaciones, erosión y deslizamientos de suelo, estableciendo restricciones y prohibiciones al uso, parcelamiento y la edificación, en las áreas impropias o críticas de manera a preservar la seguridad y la salud pública”.

El Water Resources Council (1971) definió a la zonificación como “aquella que involucra la división de unidades gubernamentales en distritos y la reglamentación dentro de estos distritos de: a) usos de estructuras y de la tierra; b) altura y volumen de las estructuras; c) el tamaño de los terrenos

y la densidad de uso”. Las características de la zonificación, que la distingue de otros controles es que la reglamentación varía de distrito a distrito. Por esta razón, la zonificación puede ser usada para establecer patrones especiales para uso de la tierra en áreas sujetas a la inundación. La división en distritos de tierras, a través de la comunidad es usualmente basada en planes globales de uso, que orientan el crecimiento de la comunidad.

**Condiciones técnicas de la zonificación:** El riesgo de ocurrencia de inundación varía con la respectiva cota de la terraza. Las áreas más bajas obviamente están sujetas a mayor frecuencia de ocurrencia de crecidas. Así siendo, la delimitación de las áreas de la zonificación depende de las cotas altimétricas de las áreas urbanas.

El río posee normalmente uno o más lechos. El lecho menor corresponde a la sección de escurrimiento en régimen de sequía, o de niveles medianos. El lecho mayor puede tener distintas ramificaciones de acuerdo con la sección transversal considerada y de acuerdo con la topografía de la terraza inundable. El río acostumbra ocupar durante las crecidas este lecho. Cuando el tiempo de retorno de desbordamiento del lecho menor es superior a 2 años, existe la tendencia de la población en ocupar la terraza en las más diversas y significativas maneras socioeconómicas. Esta ocupación genera, por las crecidas, daños importantes a los ocupantes de estas áreas y, también, a las poblaciones *aguas arriba*, que son afectadas por las elevaciones de niveles a consecuencia de la obstrucción del escurrimiento natural causado por los primeros ocupantes (Figura 2.16).

La sección de escurrimiento del río puede ser dividida en tres partes principales (Figura 2.17), descriptas a continuación:

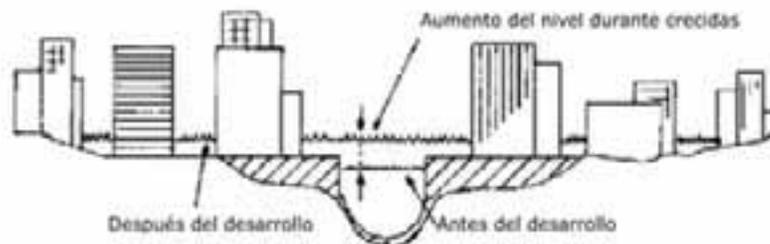


Figura 2.16. Invasiones de las terrazas de inundación

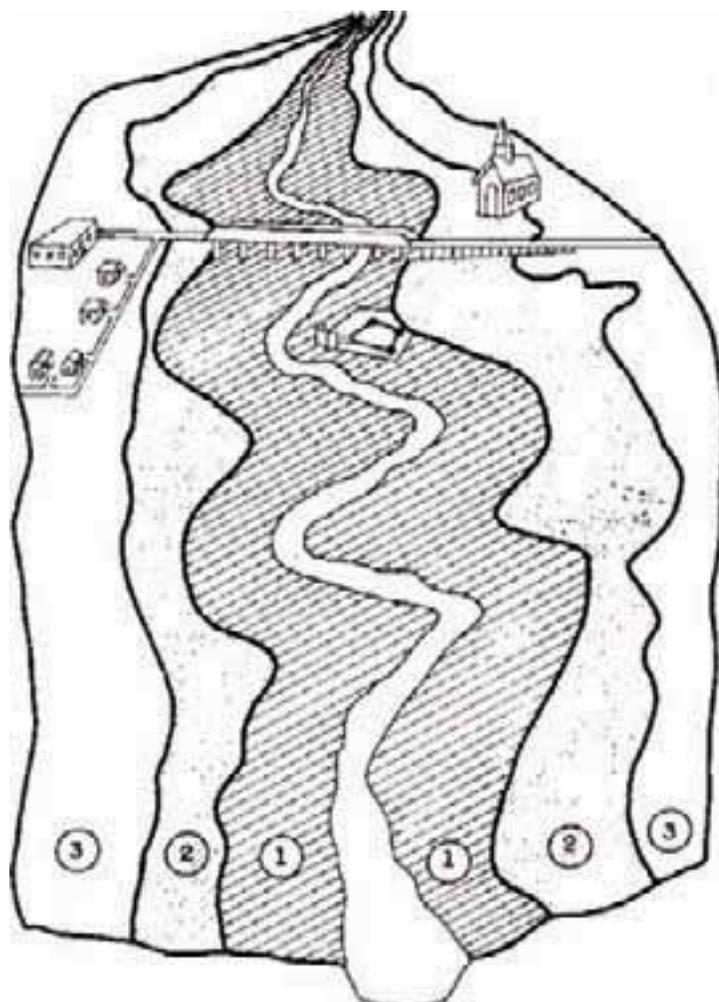


Figura 2.17. Reglamentación de la zona inundable (U.S. Water Resources Council, 1971).

Zona de pasaje de la crecida (faja 1). Esta parte de la sección funciona hidráulicamente y permite el escurrimiento de la crecida. Cualquier construcción en esta área reducirá el área de escurrimiento, elevando los niveles aguas arriba de esta sección (**Figura 2.18**). Por lo tanto, en cualquier planeamiento urbano, se debe mantener esta zona desobstruida.

Los criterios técnicos generalmente utilizados son los siguientes:

- a. Determinar la crecida de 100 años de tiempo de retorno o la que determina los límites del área de inundación;
- b. La sección de pasaje de la crecida será la que evita el aumento de los niveles para el lecho principal y para

el valle de inundación. Como este valor difícilmente es nulo, se adopta un aumento mínimo aceptado para el lecho principal. En los Estados Unidos se adoptó como aumento mínimo igual a un pié o 30,45 cm. Vea la Figura 2.18 para la definición de esta faja de la terraza.



Figura 2.18. Definición de la zona de pasaje de la crecida.

Esta faja del río debe quedar desobstruida para evitar daños importantes y represamientos. En esta faja no se debe permitir ninguna nueva construcción y la intendencia podrá, paulatinamente, transferir las construcciones existentes.

En la construcción de obras como rutas y puentes se debe verificar si las mismas producen obstrucciones al escurrimiento. En aquellas ya existentes se debe calcular el efecto de la obstrucción y verificar las medidas que pueden ser tomadas para la corrección. No se debe permitir la construcción de rellenos que obstruyan al escurrimiento. Esta área podría ser usada para la agricultura u otro uso similar a las condiciones de la naturaleza. Adicionalmente, sería permitido la instalación de líneas de transmisión y conductos hidráulicos o cualquier tipo de obra que no produzca obstrucción al escurrimiento, como por ejemplo, estacionamientos, campos de deportes, entre otros.

En algunas ciudades podrán ser necesarias construcciones próximas a los ríos. En estas circunstancias, se debe evaluar el efecto de la obstrucción y las obras deben estar estructuralmente protegidas contra inundaciones.

Zona con restricciones (faja 2). Es el área restante de la superficie inundable que debe ser reglamentada. Esta zona queda inundada, pero debido a las pequeñas profundidades y bajas velocidades, no contribuyen mucho para el drenaje de la crecida.

Esta zona puede ser subdividida en subáreas, pero esencialmente sus usos pueden ser:

- a. parques y actividades de recreación o deportivas

cuyo mantenimiento, después de cada crecida, sea simple y de bajo costo. Normalmente una simple limpieza va a recomponer su condición de uso, en corto espacio de tiempo;

- b. uso agrícola;
- c. habitación con más de un piso, donde el piso superior quedará por lo menos en el nivel del límite de la crecida y estructuralmente protegida contra crecidas;
- d. industrial, comercial, como áreas de cargas, estacionamiento, áreas de almacenamiento de equipos o maquinaria fácilmente removible o que no estén sujetos a los daños que genera una crecida. En este caso, no se debe permitir el almacenamiento de artículos perecederos y principalmente tóxicos;
- e. servicios básicos; líneas de transmisión, calles y puentes, desde que correctamente proyectados.

Zona de bajo riesgo (faja 3). Esta zona posee pequeña probabilidad de ocurrencia de inundaciones, siendo alcanzada en años excepcionales por pequeñas láminas de agua y bajas velocidades. La definición de esta área es útil para informar a la población sobre la magnitud del riesgo al que está sujeta. Esta área no necesita reglamentación con respecto a las crecidas.

En esta área, delimitada por crecida de baja frecuencia, se puede dispensar de medidas individuales de protección para las habitaciones, pero se debe orientar a la población para la eventual posibilidad de crecida y de los medios de protección de las pérdidas resultantes, recomendando el uso de obras con, por lo menos, dos pisos, donde el segundo puede ser usado en los períodos críticos.

**Reglamentación de las zonas de inundación:** Usualmente, en las ciudades de países en desarrollo, la población de menor poder adquisitivo y marginada ocupa las áreas ribereñas de mayor riesgo. La reglamentación de la ocupación de áreas urbanas es un proceso iterativo, que pasa por una propuesta técnica que es discutida por la comunidad antes de ser incorporada al Plan Director de la ciudad. Por lo tanto, no existen criterios rígidos aplicables a todas las ciudades, pero existen recomendaciones básicas que pueden ser seguidas de acuerdo con cada caso.

Water Resources Council (1971) orienta la reglamentación con base a distritos, definiendo en cada uno lo siguiente: (a) un

texto que presente los reglamentos que se aplican a cada distrito, junto con las providencias administrativas; (b) un mapa delineando los límites de los varios usos en los distritos.

El zoneamiento es complementado con la subdivisión de las reglamentaciones, donde son orientadas las divisiones de grandes parcelas de tierra en pequeños lotes, con el objetivo de desarrollo y venta de edificios. Por lo tanto, esta es la fase de control sobre los loteos (o lotificaciones). El Código de Construcción orienta la construcción de edificios cuanto a los aspectos estructurales, hidráulicos, de material y sellado. La reglamentación de las construcciones permite evitar futuros daños. A continuación relacionamos algunos de los indicadores generales que pueden ser usados en la zonificación.

La protección de las habitaciones con relación a las crecidas depende de la capacidad económica del propietario para realizarlas. Con la implementación de un plan, la municipalidad podrá permitir las construcciones en estas áreas, desde que atiendan las siguientes condiciones (Tucci y Simões Lopes, 1985):

- a. establecimiento de, por lo menos, un piso con nivel superior a la crecida que limita la zona de bajo riesgo;
- b. uso de materiales resistentes a la sumersión o contacto con el agua;
- c. prohibiciones de almacenamiento o manipulación y procesamiento de materiales inflamables, que puedan poner en riesgo la vida humana o animal durante las crecidas. Los aparatos eléctricos deben quedar en lugares seguros;
- d. protección de los rellenos contra erosiones a través de cobertura vegetal, gaviones u otros dispositivos;
- e. prever los efectos de las crecidas en los proyectos de sistemas pluvial y cloacal;
- f. estructuralmente, las construcciones deben ser proyectadas para resistir la presión hidrostática, que puede causar problemas de derrames, entre otros, a los empujes y momentos que pueden exigir anclaje, bien como las erosiones que pueden destruir las fundaciones;
- g. cierre de aperturas como puertas, ventanas y dispositivos de ventilación;
- h. estanqueidad y refuerzo de las paredes de los sótanos;
- i. refuerzo o drenaje de la losa del piso;
- j. válvulas en conducto;

- k. protección de equipos fijos;
- l. anclaje de paredes contra deslizamientos.

La decisión sobre la obligatoriedad de protección de las nuevas construcciones en la zona de inundación es un proceso que debe pasar por una discusión amplia de la comunidad involucrada. Por lo tanto, se debe tener presente que, luego de las últimas crecidas, hubo desvalorización inmobiliaria de las áreas de riesgo. Con el pasar del tiempo, estas áreas adquirirán gradualmente valor inmobiliario, debido al natural espaciamiento en el tiempo de las crecidas y de esta manera, la implementación de un plan de zonificación podrá traer costos mayores de expropiaciones (si son necesarias) o dificultades en el proceso de obediencia a la reglamentación. Esta situación sólo sufrirá modificación con la ocurrencia de nueva crecida, con más daños. Estas condiciones son más graves en la zona de pasaje de la crecida, en la cual la municipalidad necesita gradualmente remover las obras que obstruyen el escurrimiento.

Para mantener el recuerdo de las inundaciones en las calles se puede utilizar la pintura de los postes de luz con distintos colores. Esto democratiza la información sobre la inundación y evita problemas inmobiliarios de compra y venta en las áreas de riesgo.

Cuanto a las construcciones ya existentes en las áreas de inundación, deberá ser realizado un catastro completo de las mismas y establecido un plan para reducir las pérdidas en el lugar, y también aquellas que son provocadas por el remanso resultante de la obstrucción del escurrimiento. Varias son las condiciones existentes que deberán ser analizadas caso a caso. Algunas situaciones pueden ser: (a) para las obras públicas como escuelas, hospitales y edificios administrativos se debe verificar la viabilidad de protegerlos o removerlos para áreas seguras, a mediano plazo; (b) las subhabitaciones como villas de emergencias y habitaciones de población de baja renta, deben tener su transferencia negociada para áreas más seguras; (c) para áreas industriales y comerciales se puede incentivar las medidas de protección a las construcciones y, caso sea necesario, de toda el área a expensas de los beneficiados.

Cuando ocurren remociones o transferencias, el poder público debe estar preparado con planes urbanos para destinar estas áreas para otros usos o finalidades de recreación, como por ejemplo, parques, evitando que vengan a ser nuevamente ocupadas por subhabitaciones.

Algunas acciones públicas son esenciales en este proceso tales como:

- a. evitar construcción de cualquier obra pública en las áreas de riesgo como escuelas, hospitales y edificios en general. Las existentes deben poseer un plan de remoción a ser ejecutado a lo largo del tiempo;
- b. planificar la ciudad para gradualmente desplazar su eje principal para los lugares de bajo riesgo;
- c. las entidades financieras deberían evitar financiar obras en áreas de riesgo;
- d. utilizar mecanismos económicos para el proceso de incentivo y control de las áreas de riesgo: (1) retirar el impuesto predial a los propietarios que mantengan sin construcción las áreas de riesgo y que las utilicen por ejemplo, para la agricultura, recreación, etc; (2) intentar crear un mercado para las áreas de riesgo de tal manera que las mismas se vuelvan públicas con el pasar del tiempo;
- e. prever la inmediata ocupación de las áreas públicas de riesgo cuando éstas sean desocupadas con algún plan que demarque la presencia del municipio o del Estado.

### **2.6.3 Construcción a prueba de crecida**

La construcción a prueba de crecida es definida como el conjunto de medidas que son proyectadas para reducir las pérdidas de edificios ubicados en las terrazas o planicies de inundación durante la ocurrencia de las crecidas. Estas medidas son:

- sellado temporario o permanente en las aberturas de las estructuras;
- elevación de estructuras existentes;
- construcción de nuevas estructuras sobre pilotes;
- construcción de pequeñas paredes o diques circundando la estructura; transferencia o protección de artículos que puedan ser dañados dentro de la estructura existente,
- transferencia de la estructura hacia afuera del área de inundación;
- uso de material resistente al agua o nuevas estructuras;
- reglamentación de la ocupación del área de inundación por cercado;
- reglamentación de subdivisión y código de construcción, compra de áreas de inundación, seguro de inundación, instalación de servicio de previsión y de alerta de crecida con plan de evacuación, adopción de incentivos fiscales para el uso prudente del área de inundación; instalación de avisos de alerta en el área y adopción de políticas de desarrollo. Las medidas no estructurales de inundación

pueden ser agrupadas en: reglamentación del uso de la tierra, construcciones a prueba de crecidas, seguro de crecida, previsión y alerta de inundación.

#### **2.6.4 Seguro de inundación**

El seguro de inundación es un procedimiento preventivo viable para emprendimientos con valor agregado importante y en el cual los propietarios poseen capacidad económica para pagar el costo del seguro. Además de esto, no todas las compañías están dispuestas a afrontar el seguro de inundaciones si no hay un sistema de reseguros para distribución del riesgo. Cuando la población que ocupa el área de inundación es de baja renta este tipo de solución se vuelve inviable.

### **2.7 Evaluación de los perjuicios de las crecidas**

Según el U.S Army Corps of Engineers (1976), los perjuicios por inundación pueden ser clasificados en tangibles e intangibles. Los perjuicios tangibles son clasificados en daños físicos, costos de emergencia y perjuicios financieros.

Los daños físicos incluyen los costos de separación y limpieza de los edificios, las pérdidas de objetos, muebles, equipos, elementos decorativos, material almacenado y material en elaboración. Los costos de emergencia se refieren a la evacuación, reocupación, habitación provisoria como campamentos, alertas, entre otros. Los costos financieros son aquellos debidos a la interrupción del comercio, de la fabricación de productos industriales y las ganancias cesantes. Los costos intangibles se refieren a los daños de crecida que no tienen valor de mercado o valor monetario, como la pérdida de vidas u obras y edificios históricos.

Los métodos utilizados para la evaluación de los daños causados por la crecidas son (Simons *et al.*, 1977): a) curva nivel-perjuicio; b) método de la curva de perjuicio histórico; c) ecuación de daño-agregado.

#### **2.7.1 Curva nivel-perjuicio**

El desarrollo de este método es citado en U.S Army Corps of Engineers (1976). Consiste en la determinación de la curva que relaciona los perjuicios y las probabilidad o tiempo de retorno. Para determinar esta curva es necesario obtener las siguientes relaciones: a) curva de descarga; b) curva de probabilidad de

caudales máximos; c) curva de nivel versus perjuicio.

La curva de descarga es la relación entre el caudal y el nivel de agua en la sección de medición. La curva de frecuencia de probabilidad de caudales relaciona el riesgo de ocurrencia de las inundaciones. Para obtener la relación entre el nivel en la sección de la regla y la probabilidad basta efectuar la combinación de las dos curvas.

La gran dificultad está en la determinación de la relación ente nivel y perjuicio. Por lo tanto es necesario un catastro de ocupación de la terraza y la estimación del perjuicio para los distintos componentes de esta ocupación. Esta estimación puede ser realizada para construcciones patrones como residencias, ocupación industrial y comercial, cuando sea el caso, además del uso agro-pastoril. En los Estados Unidos las entidades como Soil Conservation Service, Corps of Engineers y Administración Federal de Seguros intentan relacionar, para cada tipo básico de construcción, la altura a partir del piso con el porcentaje del daño del valor total del edificio. En las Figura 2.19 y Figura 2.20 son presentados, respectivamente, ejemplos de la comparación de las curvas propuestas por las tres organizaciones para los casos de una casa de uno y de dos pisos, ambas sin sótano. La composición de los costos por áreas de la ciudad, a través de muestreo, permite una evaluación global de los daños involucrados. Individualmente, una industria o un establecimiento comercial pueden inventariar sus perjuicios potenciales de acuerdo con el nivel de agua.

Conocida la relación entre la profundidad y el perjuicio es posible establecer la relación entre perjuicio y probabilidad, por el uso de las dos últimas curvas (Figura 2.21). La curva perjuicio-probabilidad permite la estimación del costo medio de inundación para una ciudad o, individualmente, para una industria, sin establecimiento comercial o residencial. Adicionalmente, ésta permite informar los riesgos económicos involucrados en la instalación en áreas sujetas a inundaciones. El costo medio de inundación es obtenido por la integración de la curva perjuicio versus probabilidad.

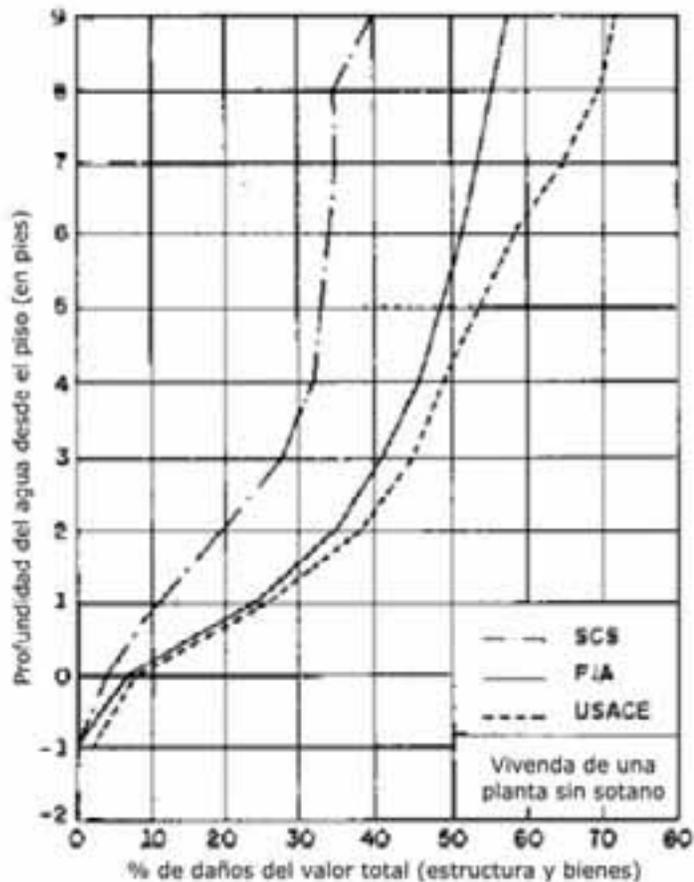


Figura 2.19. Curvas de profundidad-daño para una casa de uno sólo pavimento sin sótano (Simons *et al.*, 1977).

## 2.7.2 Método de la curva de perjuicio histórico

Este tipo de metodología fue propuesta por Echstein (1958) y se basa en la determinación de los perjuicios de crecidas ocurridas en los últimos años. Graficando este perjuicio con relación a los niveles, se permite el trazado de la curva, relacionando niveles versus daño. Las limitaciones de este procedimiento son: a) el método considera que en los últimos años, el crecimiento de la región haya sido prácticamente nulo en el área de inundación y que no hayan existido transferencias; b) admite que los perjuicios provocados por las crecidas hayan sido repuestos; c) que los valores de los perjuicios deben ser uniformes, o sea, debe considerar la inflación de los períodos; d) que el procedimiento de evaluación de los perjuicios debe ser el mismo en las diferentes crecidas, para que no haya tendenciosidad de evaluación.

### 2.7.3 Ecuación del perjuicio agregado

James (1972) presentó la ecuación de daño agregado, que se basa en el crecimiento lineal entre el daño y el nivel medio de inundación de la terraza de inundación. La ecuación es la siguiente:

$$C_D = K_D \cdot h \cdot M \cdot U \cdot A \quad (2.4)$$

donde  $C_D$  es el daño total, debido a la crecida para un evento;  $K_D$  es el índice del daño de la crecida, en unidades monetarias por unidades de profundidad de inundación;  $h$  = profundidad media de inundación;  $M$  = índice de valor de mercado de desarrollo del área de inundación, en unidades monetarias por unidades de desarrollo;  $U$  = proporción de ocupación, o sea, proporción del área de inundación desarrollada por el área total inundada;  $A$  = área total de inundación.

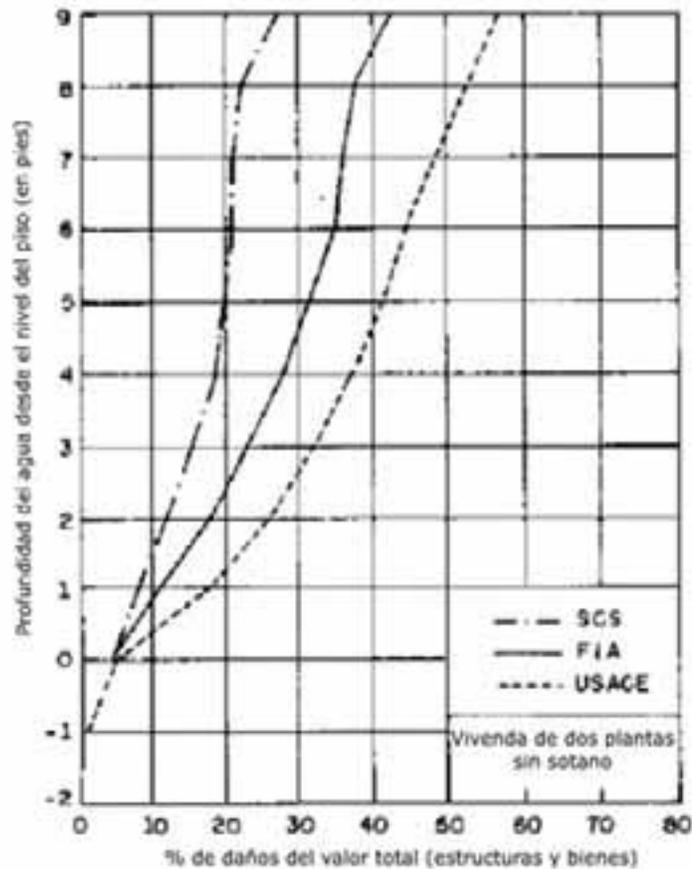


Figura 2.20. Curvas de profundidad-daño para una casa de dos pavimentos sin sótano (Simons *et al.*, 1977).

El índice  $K_D$  es definido por:

$$K_D = \frac{dD}{dy} \quad (2.5)$$

donde  $dD$  es el daño y  $dy$  es la profundidad. Esta derivada es obtenida con base en la relación entre el daño y la profundidad. Homan y Waybur (1960) determinaron este valor para crecidas de cerca de 5 pies de profundidad (1,5 m) y obtuvieron  $K_D = 0,052$ . James (1964) presentó un valor medio de 0,044. Cuando en la crecida existe gran cantidad de sedimentos o alta velocidad, el valor de  $K_D$  crece. El nivel medio de la crecida y el índice del valor de mercado son obtenidos para cada lugar. El factor  $U$  también es obtenido por datos locales.



Figura 2.21. Método Nivel-Perjuicio.

Kates (1965) presentó una secuencia de procedimientos para la evaluación de los perjuicios de las áreas de inundación con crecimiento, o modificaciones de daños potenciales que se dan con el tiempo. La secuencia es la siguiente: a) utilice un modelo regional de economía para proyectar el crecimiento urbano regional a través del período de análisis; b) defina estos límites de las áreas de inundación con base en el análisis hidrológico y aloque el crecimiento urbano en esta área; c) especifique cada estructura en el área de inundación por ubicación, tipo, contenido y valor económico, como función del tiempo; d) desarrolle curvas apropiadas, relacionando daños en la estructura con el nivel como función del tiempo; e) agregue las curvas individuales de daño para permitir la evaluación de toda la crecida, reflejando los cambios en el tiempo.

## Problemas

1. ¿Por qué se inunda?
2. ¿Cuáles son las fuentes de los problemas en la inundación ribereña?
3. ¿Cuál es la diferencia entre las medidas estructurales y no estructurales?  
¿Cuándo se debe utilizar cada tipo de medida?
4. ¿Cuáles son las medidas estructurales? ¿Cuáles son las limitaciones extensivas?
5. ¿Cuándo se utilizan las medidas intensivas?
6. ¿Cuáles son las medidas no estructurales? ¿Cuáles son las dificultades de implementarlas?
7. ¿Cómo usted determinaría el mapeo de inundación en una ciudad?
8. ¿Si no hay datos históricos es posible mapear?
9. ¿Cómo el mapa preparado puede ser utilizado para el planeamiento de ocupación de la ciudad? Caso usted fuera orientar al intendente de la ciudad, ¿cuáles serían sus recomendaciones?
10. Usted fue invitado para hacer un estudio de alternativa de una industria que se encuentra en el área de inundación. ¿Cuáles son las alternativas de evaluación económica?
11. ¿Cuáles son las alternativas de control de inundación en una cuenca de 100.000 km<sup>2</sup>? Analice las alternativas.
12. ¿Cuáles son los criterios para determinar el área que debe quedar desobstruida en la zonificación del área de inundación?
13. ¿Cuáles son los criterios de zonificación de las áreas de inundación en asociación con el Plan Director urbano?
14. ¿Por qué las medidas estructurales son más caras que las medidas no estructurales?
15. ¿Cuáles son los principales impactos que involucra el corte de meandros para control de inundación de un tramo de río?
16. ¿Cuándo es viable la canalización de un río para el control de la crecida?  
¿Cuáles son los beneficios?
17. ¿Cómo usted definiría un plan de determinación de los niveles de inundación para un lugar sin datos?
18. ¿Cuáles son las medidas complementarias a la zonificación de la planicie de inundación?

## Referencias

- FEKSTEIN, O. 1958. Water resources development, the economics of project damage in urban areas. *Water Resources Bulletin*, Minneapolis, v. 11, n.2, Apr.
- HOMAN, G.A., WAYBUR, B. 1960. *A study of procedure in estimating flood damage to residential, commercial and industrial properties in California*. Stanford Research Institute.
- HOYT, W.G., LANGHEIN, W.B. 1953. *Floods*. Princeton: Princeton University Press, Princeton, 469p.
- JAMES, L.D. 1964. *A time dependent planning process for combining structural measures, land use and flood proofing to minimize the economic cost of flood*. Stanford University, Institute in Engineering Economic Systems.
- JAMES, L.D. 1972. Role of economics in planning flood plain land use. *Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers*, New York, v. 98, n.6, p. 981-92.
- JOHNSON, W. 1978. *Physical and economic feasibility of structural flood plain management measures*, Davis Hydrologic Engineer Center.
- KAHN, R.W. 1965. *Industrial flood losses damage estimation in the Lahigh Valley*. University of Chicago, Department of Geography. (Research Paper 98).
- PRISCILLA, J. 2001. Flood Management experiences in USA. Apresentação em workshop em Santiago do Chile, Janeiro de 2001. SAMTAC.
- RIZZINI, B. e TUCCI, C.H. M., 1979. *Análise hidrográfica e hidrologia dos problemas de inundação urbana no estado de São Paulo*. R. Relatório Técnico, p.29.
- SIMONS, D.B. et al. 1977. *Flood flows, stages and damages*. Fort Collins: Colorado State University.
- TASK, 1962. Guide for the development of flood plain regulation. *Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers*, New York, v.88, n.5, p.73419,8pp.
- TUCCI, C. e SIMÕES LOPES, M. 1985. Zonamento das áreas de inundação: rio Uruguai. *Revista Brasileira de Engenharia e Recursos Hídricos*, Rio de Janeiro, v.3, n. 1, p.19-43, 1985.
- U.S. ARMY, CORPS OF ENGINEERS. 1976. *Guidelines for flood damage reduction*. Sacramento.
- WATER RESOURCES COUNCIL, 1974. *Regulation of flood hazard areas to reduce flood losses*. Washington. Não paginado.





## Gestión de inundaciones en el drenaje urbano

*El control del drenaje urbano involucra la gestión del espacio urbano para controlar el impacto de la impermeabilización y evitar la canalización*

### 3.1 Impacto del desarrollo urbano en el ciclo hidrológico

**E**l desarrollo urbano altera la cobertura vegetal provocando varios efectos que afectan los componentes del ciclo hidrológico natural. Con la impermeabilización del suelo a través de tejados, calles, veredas y patios, el agua que previamente era infiltrada, pasa a escurrir por los conductos de desagüe aumentando el escurrimiento superficial. El volumen que escurría lentamente por la superficie del suelo y quedaba retenido por la plantas, con la urbanización, pasa a escurrir en los canales, exigiendo mayor capacidad de escurrimiento de las secciones.

En la Figura 3.1, se presentada el efecto sobre las variables del ciclo hidrológico debido a la urbanización. El hidrograma típico de una cuenca natural es aquél resultante de la urbanización (Figura 3.2).

Con la urbanización son introducidas las siguientes alteraciones en el referido ciclo hidrológico:

- Reducción de la infiltración en el suelo;
- El volumen que deja de ser infiltrado queda en la superficie, aumentando el escurrimiento superficial. Además de esto, como fueron construidos conductos pluviales para el escurrimiento superficial, acelerando y provocando una reducción del tiempo de desplazamiento. Los caudales máximos también aumentan sus picos en el

tiempo (Figura 3.2). El caudal máximo medio de inundación puede aumentar de seis a siete veces. En la cuenca del río Belém en Curitiba-Brasil, con un área de drenaje de 42 km<sup>3</sup> y áreas impermeables del orden del 60%, se obtuvo un aumento de 6 veces en el caudal medio de crecida entre las condiciones rurales y la actual condición de urbanización. En la Figura 3.3, se presenta el caudal de crecida en función del área de drenaje para cuencas rurales y para la cuenca del río Belém. La tendencia de los valores de las cuencas rurales permitió estimar el caudal medio de crecida para la situación de predesarrollo y compararlo con el valor actual (ver Figura 3.1).

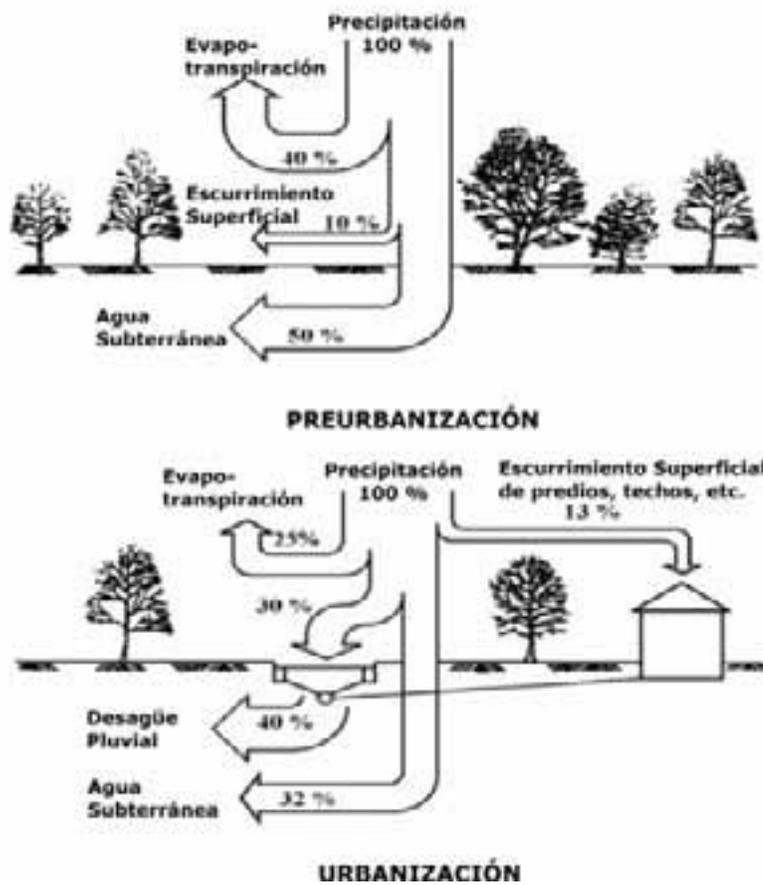
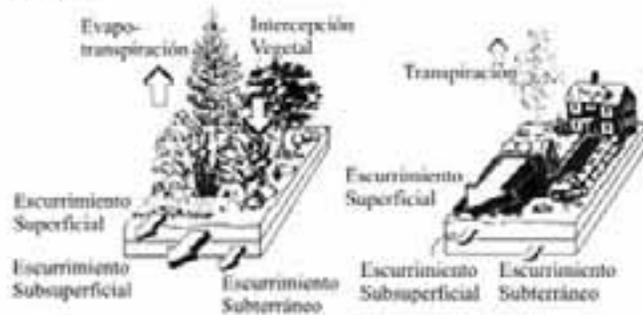
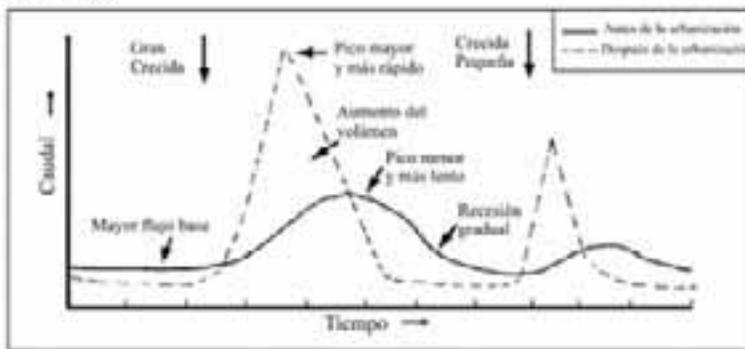


Figura 3.1. Características del balance hídrico en una cuenca urbana (OECD, 1986)

a- Balance Hídrico



b- Escurrimiento



c- Respuesta de la geometría del curso ante el escurrimiento



Figura 3.2. Impacto debido a la urbanización (Schueler, 1987)

- Con la reducción de la infiltración, el acuífero tiende a disminuir el nivel de la capa freática por falta de alimentación (principalmente cuando el área urbana es muy extensa), reduciendo así el escurrimiento subterráneo. Las redes de abastecimiento y cloacal poseen pérdidas que pueden alimentar el acuífero, teniendo un efecto inverso al mencionado;
- Debido a la sustitución de la cobertura natural ocurre una

reducción de la evapotranspiración, ya que la superficie urbana no retiene agua como lo hace cobertura vegetal y no permite la evapotranspiración de los follajes y del suelo. A pesar de esto, las superficies urbanas generadas por las ciudades sufren calentamiento y cuando ocurre precipitaciones de baja intensidad puede generar una mayor evaporación.

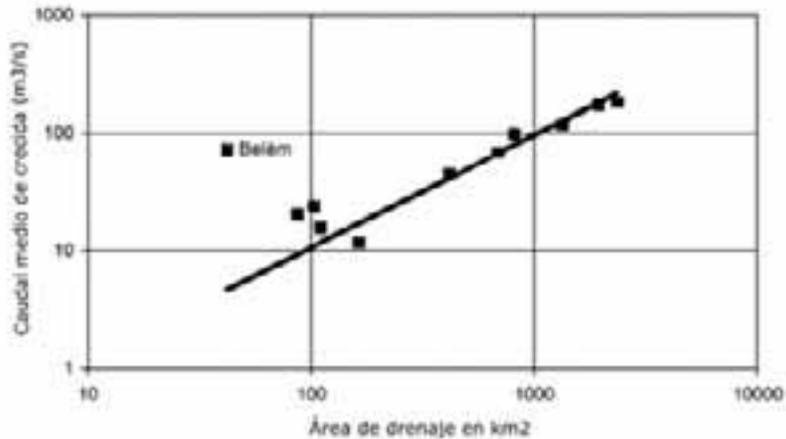


Figura 3.3. Caudal medio de crecida en función del área de drenaje en la Región Metropolitana de Curitiba

### 3.2 Impacto Ambiental sobre el ecosistema acuático

Con el desarrollo urbano, varios elementos antrópicos son introducidos en la cuenca hidrográfica los cuales actúan sobre el ambiente. Algunos de los principales problemas son discutidos a la continuación.

**Aumento de la temperatura:** Las superficies impermeables absorben parte de la energía solar aumentando la temperatura ambiente, produciendo islas de calor en la parte central de los centros urbanos, donde predomina el concreto y el asfalto. El asfalto, debido a su color, absorbe más calor que las superficies naturales y el concreto. A medida que su superficie envejece se oscurece y aumentando así la cantidad de radiación solar absorbida. Este aumento por parte de la superficie incrementa la emisión de radiación térmica que vuelve al ambiente, generando más calor. El aumento de temperatura también crea condiciones de movimiento de aire ascendente que puede originar un aumento de las precipitaciones. Silvera (1997) muestra que la parte central de Porto Alegre presenta mayor índice pluviométrico que en la

periferia, atribuyendo esta tendencia a la urbanización.

**Aumento de sedimento y material sólido:** Durante el desarrollo urbano, el aumento de los sedimentos producidos por la cuenca hidrográfica es significativo, debido a las construcciones, limpieza de terrenos para nuevos loteos, construcción de calles, avenidas y autopistas entre otras causas. En la Figura 3.4, se puede observar la tendencia de producción de sedimentos de una cuenca en sus distintas etapas de desarrollo.

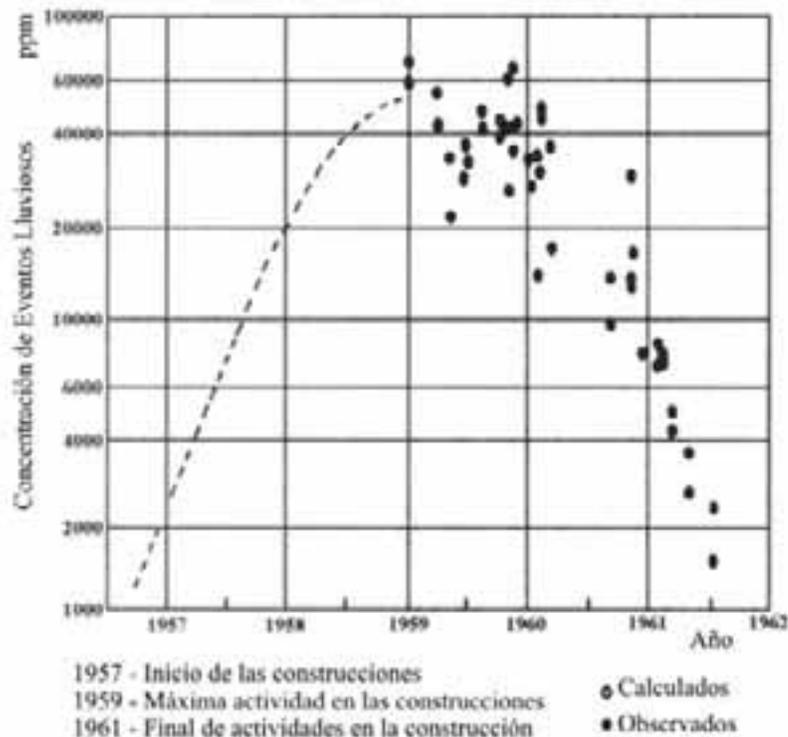


Figura 3.4. Variación de la producción de sedimentos en debido al desarrollo urbano (Dawdy, 1967)

Las principales consecuencias ambientales de la producción de sedimentos son las siguientes:

- Erosión de las superficies generando fuertes áreas degradadas. En la Figura 3.5 y Figura 3.6 se puede observar el efecto de la erosión sobre las superficies urbanas desprotegidas. En la fotografía, se observa la erosión generada por el aumento del escurrimiento del drenaje de *aguas arriba*. El aumento de energía y la calidad del escurrimiento pueden producir verdaderas “quebradas” que pueden llegar a 30m de profundidad y 50m de ancho en suelos débiles.

- colmatación de las secciones de canales de drenaje, con reducción de la capacidad de escurrimiento en conductos, ríos y lagos urbanos. La laguna de Pampulha es un ejemplo de un lago urbano que ha sido colmatado. El arroyo Diluvio en Porto Alegre, debido a su ancho y pequeña profundidad, durante las sequías, se ha depositado en el canal los sedimentos producidos por la cuenca y creciendo vegetación, esto ha reduciendo la capacidad de escurrimiento durante las crecidas.
- transporte de contaminantes incorporados en el sedimento, que contaminan las aguas pluviales.



Figura 3.5. Erosión urbana de superficies desprotegidas (Campana, 2004)



Figura 3.6. Erosión urbana de superficies desprotegidas (Campana, 2004)

**Obstrucciones al escurrimiento:** Obstrucciones al escurrimiento como pueden ser rellenos y pilas de puentes, drenajes inadecuados y obstrucciones de todo tipo sumado a conductos colmatados.

Algunos de los ejemplos de obstrucción del escurrimiento son documentados a continuación:

- a. *producción de residuo sólido que obstruye el escurrimiento:* la producción de material sólido que además de reducir la capacidad de escurrimiento, obstruye los sistemas de retención urbanas para el control local del escurrimiento. En la Figura 3.7 son presentados los sistemas obstruidos por material sólido y por canalización que atraviesa el drenaje.
- b. *residuo sólido en el sistema de detención:* A medida que la cuenca es urbanizada, y la densificación consolidada, la producción de sedimentos puede reducirse (Figura 3.4), pero otro problema surge, la producción de basura. La basura obstruye aún más el drenaje y con esto crea pésimas condiciones ambientales. Este problema sólo se minimiza con una adecuada frecuencia de la recolección de residuos y de la adecuada educación de la población con la aplicación de altas multas. En la Figura 3.8, se puede observar la cantidad de residuos urbanos en el sistema de drenaje. Como se observa gran parte de estos son plásticos, con gran concentración de botellas y de bolsas de supermercado.
- c. *problemas de mantenimiento en el sistema de drenaje:* En el

sistema de drenaje pueden ocurrir varios problemas en el escurrimiento normal de las aguas, en función de la falta de mantenimiento del sistema de drenaje y de proyectos inadecuados los cuales no consideran la colmatación de aquellas secciones muy anchas y con sección única (Figura 3.9)

- d. *obstrucción del escurrimiento por construcciones y riesgo*: El desarrollo urbano tiende a ocupar los espacios naturales de escurrimiento de los excedentes pluviales dejando poco espacio para éste, y con esto, se generan riesgos para su propia habitabilidad y también para la de *aguas arriba* (Figura 3.10).



Figura 3.7. Obstrucción y residuos en el drenaje (Belo Horizonte y São Paulo – ciudades de Brasil)



Figura 3.8. Basura retenida en el drenaje (São Paulo - Brasil)

**Áreas de riesgo en laderas:** La ocupación de las laderas en las ciudades es una de las principales causas de muerte durante el período de lluvias debido a los deslizamientos de tierra causados por el escurrimiento de los excedentes pluviales en suelos de baja sustentabilidad, los cuales presenta su estructura natural alterada debido a la urbanización descontrolada (Figura 3.11).



Figura 3.9. Obstrucciones al escurrimiento en canales (Porto Alegre- Brasil).



Figura 3.10. Construcciones en el drenaje (Caxias do Sul- Brasil)



Figura 3.11. Ocupación en áreas de riesgo

**Calidad del agua pluvial:** La calidad del agua pluvial no es mejor que la proveniente de un efluente con tratamiento secundario. La cantidad de material en suspensión los excedentes pluviales es superior a aquel encontrado en una cloaca *in natura*. El volumen de este material en suspensión es más significativo en el inicio de las crecidas. En la Figura 3.12 se puede observar una muestra de agua pluvial la cual, es representada como un reloj. Al comienzo de la precipitación existe pequeña concentración de material en suspensión, luego, la concentración va aumentando y después de instantes la concentración se reduce sustancialmente. En los primeros 25 mm de lluvia, generalmente, se concentra el 95% de la carga en suspensión. El polutograma generado por un área urbana después de un período seco muestra un pico de concentración antes del pico del hidrograma, indicando que la concentración al inicio es alta, aunque con un pequeño caudal.



Figura 3.12. Muestrario de la calidad del agua pluvial. En el inicio de la precipitación botella marrón (posición del reloj a 45min).

Los flujos pueden ser combinados (cloacal y pluvial en un mismo conducto) o separados (red pluvial y sanitaria separadas). En Brasil, la mayoría de las redes son del segundo tipo; sólo en áreas antiguas de algunas ciudades existen sistemas combinados. Actualmente, debido la falta de capacidad financiera para la ampliación de la red cloacal, algunos municipios han permitido el uso de la red pluvial para transporte de efluentes cloacales, lo que puede ser una solución inadecuada a medida que este flujo no sea tratado, además de imposibilitar algunas soluciones de control cuantitativo del pluvial.

Los contaminantes que se generan en el área urbana varían

mucho, desde compuestos orgánicos hasta metales altamente tóxicos. Algunos contaminantes son utilizados para diferentes funciones dentro del ambiente urbano como son los insecticidas, los fertilizantes, el plomo proveniente de las emisiones de los automóviles y la pérdida de aceite por parte de camiones, ómnibus y autos, todos resultados de actividades normales dentro del medio urbano. El hollín resultante de las emisiones generadas dentro del ambiente urbano por parte de vehículos, industrias y la quema de residuos se depositan en las superficies y son lavados por la lluvia. El agua resultante de este lavado llega a los ríos contaminada.

Los principales contaminantes encontrados en el escurrimiento superficial urbano son: sedimentos, nutrientes, sustancias que consumen oxígeno, metales pesados, hidrocarburos, bacterias y virus patogénicos. Los valores medios establecidos para Norteamérica son presentados en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Concentración para escurrimiento medio para algunos usos de la tierra urbana basado en el Programa Nacional de Escurrimiento Urbano (americano) de Whalen y Cullum (1989).

Parámetro	Residencial	Comercial	Industrial
TKN (mg/l)	0,23	1,5	1,6
No3 + No2 (mg/l)	1,8	0,8	0,93
Total P (mg/l)	0,62	2,29	0,42
Cobre ( mg/l)	56	50	32
Zinc( mg/l)	254	416	1.063
Plomo (mg/l)	293	203	115
COD (mg/l)	102	84	62
TSS (mg/l)	228	168	106
DBO (mg/l)	13	14	62

La calidad del agua de la red pluvial depende de varios factores, a saber: la limpieza urbana y su frecuencia; de la intensidad de la precipitación y su distribución temporal y espacial, de la época del año y del tipo de uso del área urbana. Los principales indicadores de la calidad del agua son los parámetros que caracterizan la polución orgánica y la cantidad de metales.

**Contaminación de acuíferos:** Las principales condiciones de contaminación de los acuíferos urbanos se debe a los siguientes factores:

- Rellenos sanitarios que contaminan las aguas subterráneas por el proceso natural de precipitación e infiltración. Se debe evitar construir estos rellenos en áreas de recarga y de ser posible debe seleccionar áreas con baja

permeabilidad. Los efectos de la contaminación de las aguas subterráneas deben ser examinados al momento de la selección de la localización del relleno;

- Gran parte de las ciudades brasileñas utilizan fosas sépticas como destino final de las cloacas. Este conjunto tiende a contaminar la parte superior del acuífero. Esta contaminación puede comprometer el abastecimiento de agua potable, cuando existe comunicación entre diferentes capas de los acuíferos a través de percolación y de perforaciones inadecuadas de pozos artesianos;
- La red de conductos pluviales puede contaminar el suelo a través de pérdidas en volumen durante su transporte y también por obstrucciones de los tramos de la red que expulsan el agua contaminada hacia afuera del sistema de conductos.

### 3.3 Gestión del macrodrenaje, impactos generados

#### 3.3.1 Gestión del drenaje urbano

Actualmente el control del escurrimiento urbano ha sido planteado de manera equivocada ocasionando importantes perjuicios a la población. El origen de estos impactos negativos han sido causados principalmente por dos tipos de errores:

- Principio de proyecto de drenaje:* El drenaje urbano ha sido desarrollado con base a un principio erróneo que plantea: “*el mejor sistema de drenaje es aquel que retira el agua excedente de la manera más rápida posible de su lugar de origen*”.
- Evaluación y control por tramos:* En el microdrenaje los proyectos aumentan el caudal y transfieren todo su volumen hacia *aguas abajo*. En el macrodrenaje la tendencia de control del drenaje urbano es a través de la canalización de los tramos críticos. Este tipo de solución sigue la visión particular de un tramo de la cuenca, sin que las consecuencias sean previstas para los restantes tramos de la misma o dentro de diferentes horizontes de ocupación urbana. La canalización de los puntos críticos apenas transfiere la inundación de un lugar a otro en la cuenca.

La combinación de estos dos tipos de errores en la gestión del microdrenaje tiene impactos en el macrodrenaje de las ciudades los cuales ocurren de acuerdo a la siguiente secuencia:

- **Etapa 1:** la cuenca comienza a ser urbanizada de manera distribuida, con mayor densificación aguas abajo, apareciendo, en el lecho natural, los lugares de inundación debido a los estrangulamientos naturales a lo largo de su curso (Figura 3.13);
- **Etapa 2:** las primeras canalizaciones son ejecutadas aguas abajo, con base a la urbanización actual; con esto, el hidrograma aguas abajo aumenta, pero es aún contenido por las áreas que inundan aguas arriba y porque la cuenca no está totalmente edificada. (Figura 3.13);
- **Etapa 3:** con una densificación mayor, la presión pública hace que los administradores continúen el proceso de canalización hacia aguas arriba. Cuando el proceso se completa, incluso antes de su conclusión, las inundaciones vuelven aguas abajo, debido al aumento del caudal máximo, cuando ésta no tiene más condiciones de ser ampliada. Las áreas aguas arriba funcionaban como reservorios de amortiguamiento. En esta etapa, la canalización simplemente transfiere la inundación aguas abajo (Figura 3.13). Ya no existen espacios laterales para ampliar los canales aguas abajo, y las soluciones derivan de profundizar el canal, con costos extremadamente altos (pudiendo llegar a US\$ 50 millones / Km., dependiendo del subsuelo, anchura, revestimiento, etc).

Este proceso es perjudicial a los intereses públicos y representa un perjuicio extremadamente alto para toda la sociedad a lo largo del tiempo. La sociedad pierde dos veces y paga cerca de 1000% o más por la canalización, contra una solución de amortiguamiento, y aún así se aumentan dramáticamente las inundaciones para la población que viven *aguas abajo*. Infelizmente, esta visión desfasada de conocimiento técnico o por interés en el mayor costo de las obras, perdura en un gran número de ingenieros que usan como excusa la siguiente frase: “*no existe espacio para el amortiguamiento*”. El espacio necesario para el amortiguamiento es del orden de 1% de la cuenca, y puede ser distribuido en diferentes zonas, las cuales, que pueden ser expropiadas y, que no siempre son fácilmente identificables, pero basta tener la *voluntad técnica* para posibilitar la identificación de las combinaciones de transferencia de escurrimiento y

amortiguamiento sin transferir impactos hacia *aguas abajo*. El principal concepto a tener en cuenta es no atarse a una solución preconcebida, sino buscar una solución combinada, que tenga como meta fundamental la idea de que ningún proyecto puede transferir su impacto a otro punto de la cuenca.

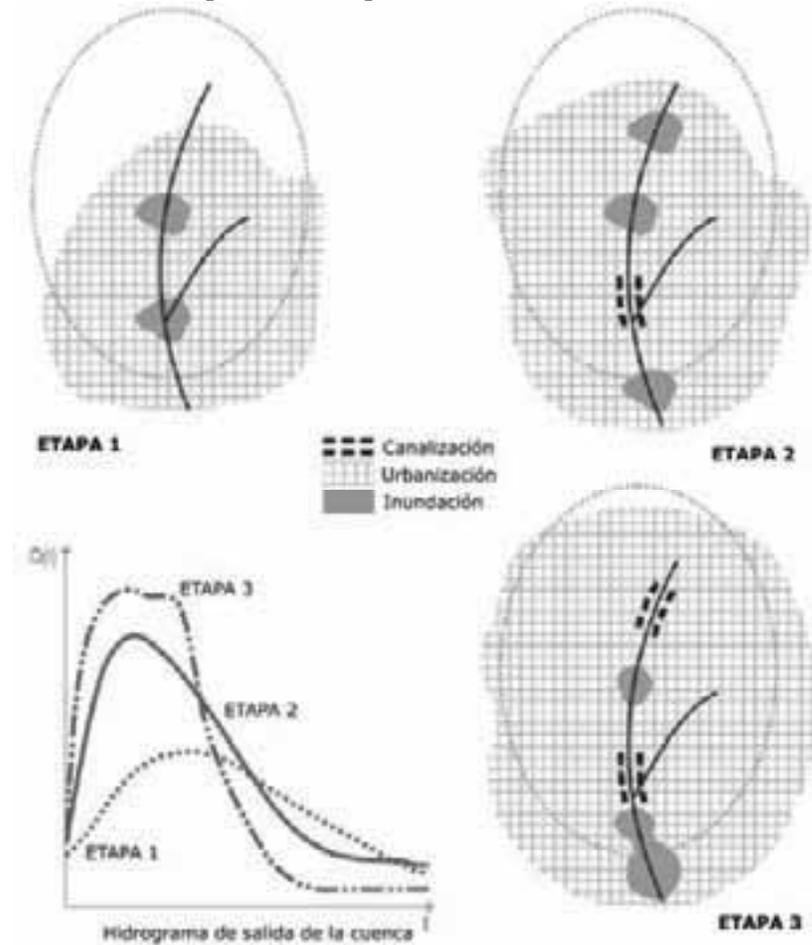


Figura 3.13. Etapas del desarrollo urbano

### 3.3.2 Gestión inadecuada de áreas ribereñas en combinación con el drenaje urbano

La tendencia del desarrollo urbano es presionar la ocupación de las áreas ribereñas, como fue destacada en el capítulo anterior. La gestión se ha inclinado a aumentar la capacidad del río, permitiendo que la población ocupe el lecho mayor de los cursos de agua (primera etapa de la gestión inadecuada, caracterizada en la Figura 3.14). Con el tiempo, la cuenca hidrográfica se desarrolla hacia *aguas arriba* ampliando el pico de la crecida y incrementando la frecuencia, debido al

aumento de la impermeabilización, la canalización y los conductos. El proyecto de incrementar la capacidad de escurrimiento del tramo de aguas abajo apenas tuvo en cuenta el estudio del escenario urbano existente al momento de realizarlo, y no ha evaluado los posibles futuros impactos, la urbanización aguas arriba vuelve a producir anegamiento en la terraza de inundación ahora ocupada por zonas residenciales, quedando como solución obras de alto costo como pueden ser la profundización del curso de agua, una disminución de la rugosidad, túneles de desvíos, entre otros. Estas obras son económicamente inviables, reduciendo el valor de las propiedades y aumentando los perjuicios. Este fue el escenario observado en el río Tietê en São Paulo- Brasil (Figura 3.15).

En la Figura 3.16, se puede observar el conjunto de procesos que se originan con el uso del suelo (ocupación del área de inundación ribereña e impermeabilización y canalización del escurrimiento) el drenaje y los consecuentes impactos.

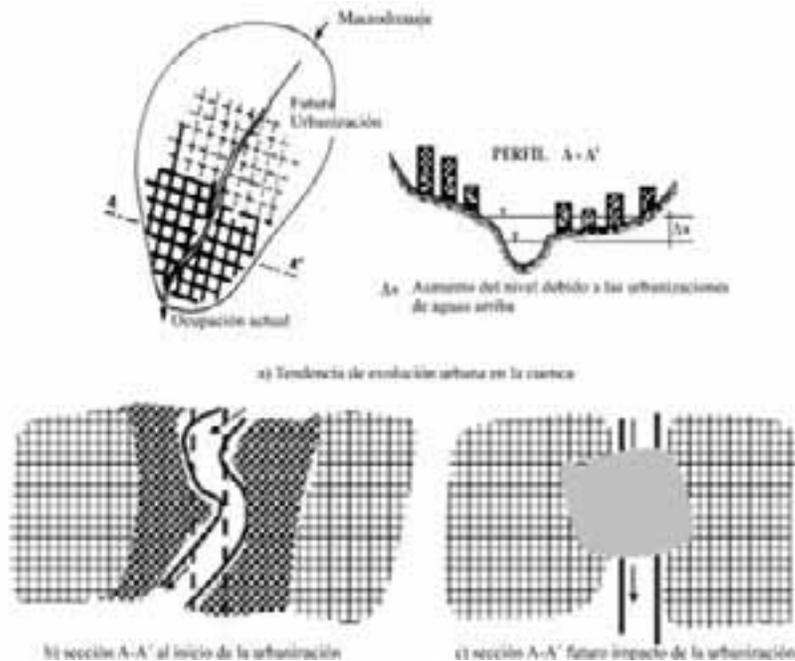


Figura 3.14. Aumento de la urbanización, ocupación de las áreas ribereñas y aumento de la frecuencia de inundaciones



Figura 3.15. Inundación del río Tietê en el puente de Bandeiras debido a la urbanización de la ciudad de São Paulo.



Figura 3.16. Proceso de impacto del drenaje urbano (Sudersha, 2002)

### 3.4 Principios de la gestión sustentable

Los principios básicos de control del escurrimiento pluvial debido a las crecidas naturales en la terraza de inundación y a la urbanización son los siguientes:

**La cuenca como sistema:** Un Plan de Control de aguas pluviales de una ciudad o región metropolitana debe contemplar las cuencas hidrográficas sobre las cuales la urbanización se desarrolla. Las medidas no pueden reducir un impacto de un área en detrimento de otra, o sea, los impactos no deben ser transferidos.

**Las medidas de control en el conjunto de la cuenca:** El control de crecidas involucra medidas estructurales y no estructurales que difícilmente están desasociadas. Las medidas estructurales involucran costos que la mayoría de las ciudades no pueden afrontar. Además, sólo se resuelven problemas específicos, si no se crea un programa para toda la cuenca o región urbana de interés. Esto no significa que este tipo de medida sea totalmente descartable. La política de control de crecida podrá llegar a soluciones estructurales para algunos lugares, pero con una visión de conjunto para toda la cuenca, donde ésta sea racionalmente integrada con otras medidas preventivas (no estructurales) y compatibilizada con el desarrollo urbano.

**Los medios:** Los medios de implantación para el control de las crecidas son: el Plan Director Urbano, la Legislación Municipal / Provincial y el Manual de Drenaje. El primero establece las líneas principales, el segundo controla y el tercero orienta.

**El horizonte de expansión:** Después que la cuenca o parte de ésta esté ocupada, difícilmente el poder público conseguirá responsabilizar aquellos que están ampliando el escurrimiento, por lo tanto, si la acción pública no es realizada preventivamente, a través del gerenciamiento, las consecuencias futuras económicas y sociales serán mayores para todo el municipio. El Plan Director Urbano debe contemplar el planeamiento de las áreas a ser desarrolladas y la densificación de las áreas actualmente loteadas.

**Los criterios sustentables:** (a) El escurrimiento natural no debe ser ampliada por los que ocupan la cuenca, sea a través de un simple loteo o en obras existentes en el ambiente urbano. Esto se aplica a un simple relleno urbano, la construcción de puentes, autopistas, y fundamentalmente, la impermeabilización de las nuevas urbanizaciones. El principio es que cada usuario urbano, no debe ampliar la crecida natural, (b) las ocupaciones del espacio urbano y el drenaje de las aguas pluviales deben priorizar los mecanismos naturales de escurrimiento como puede ser la infiltración;

**El control permanente:** El control de las crecidas es un proceso permanente, no basta establecer reglamentos y construir obras de protección, es necesario estar atento a las potenciales violaciones de la legislación y la expansión de la ocupación del suelo de las áreas en riesgo. Por lo tanto, se recomienda que: (a) ningún espacio de riesgo debe ser desalojado si no hay una inmediata ocupación pública que evite su invasión; (b) la comunidad debe tener una participación en los planes, en la ejecución y en la continua obediencia de las medidas de control de crecidas.

**La educación:** Es esencial la educación de ingenieros, arquitectos, agrónomos, geólogos entre otras profesiones, de la población y de los administradores públicos para que las decisiones públicas sean tomadas con conciencia por todos.

**La administración:** La administración del mantenimiento y control es un proceso local y depende de los municipios, a través de la aprobación de proyectos de loteos, obras públicas y drenajes. Los aspectos ambientales son también evaluados en la implantación de la red de drenaje.

### 3.5 Tipos de Medidas de Control

Las medidas de control del escurrimiento pueden ser clasificadas de acuerdo con su acción sobre la cuenca hidrográfica, de la siguiente manera:

- ***distribuida o en la fuente***, es el tipo de control que actúa sobre el lote, plazas y paseos públicos;
- ***en el microdrenaje***, es el control que acciona sobre el hidrograma resultante de uno o más urbanizaciones;
- ***en el macrodrenaje***, es el control sobre los principales cursos de agua urbanos.

Las medidas de control pueden ser organizadas de acuerdo con su acción sobre el hidrograma en cada una de las partes de las cuencas mencionadas anteriormente, de la siguiente manera:

**Infiltración y percolación:** normalmente, crea espacio para que el agua tenga mayor infiltración y percolación en el suelo, utilizando el almacenamiento y el flujo subterráneo para retardar el escurrimiento superficial;

**Almacenamiento:** a través de reservorios que pueden ocupar

espacios abiertos o cerrados. El efecto del reservorio es de retener parte del volumen del escurrimiento superficial, reduciendo su pico y distribuyendo el caudal en el tiempo;

**Aumento de la eficiencia del escurrimiento:** a través de conductos y canales, drenando áreas inundadas. Este tipo de solución tiende a transferir crecidas de un área hacia otra, pero puede ser benéfico cuando se utiliza en conjunto con reservorios de retención;

**Diques y estaciones de bombeo:** solución tradicional de control localizado de crecidas en áreas urbanas que no poseen espacio para amortiguamiento de la inundación.

### 3.5.1 Medidas de control distribuido

Las principales medidas de control localizadas en lotes, estacionamientos, parques y paseos públicos son denominadas, normalmente, de control en la fuente “*source control*”. Las principales medidas son las siguientes:

- el aumento de áreas de infiltración y percolación;
- el almacenamiento temporario en reservorios residenciales o tejados.

Las principales características del control local del escurrimiento son las siguientes (Urbonas y Stanhre, 1993):

- aumento de la eficiencia del sistema de drenaje *aguas abajo* de los lugares controlados;
- aumento de la capacidad de control de crecidas de los sistemas;
- dificultad de controlar, proyectar y hacer mantenimiento de un gran número de sistemas;
- los costos de operación y mantenimiento pueden ser altos.

Este tipo de sistema ha sido adoptado en muchos países a través de una legislación apropiada, o a través de un programa global de control de crecidas, como lo descrito por Yoshimoto y Suetsugi (1990) para la cuenca del río Tsurumi, donde fueron construidos cerca de 500 reservorios de retención de 1,3 m<sup>3</sup>.

Uno de los principales criterios adoptados por muchas ciudades (Seattle, Denver, Porto Alegre, entre otras) es de un caudal máximo que puede entrar en el sistema público de drenaje proveniente de los loteos, instalaciones comerciales e industriales.

Este límite corresponde generalmente al caudal natural del lote para un tiempo de retorno (generalmente de 10 años de tiempo de retorno y 1 hora de duración). Este caudal es restrictivo y obliga al emprendedor a utilizar los dispositivos citados dentro del área de desarrollo para mantener este caudal aguas abajo.

A continuación son mencionados los tipos de dispositivos que pueden ser utilizados y sus características:

### **Infiltración y percolación:**

Los sistemas urbanos, de acuerdo con lo antes mencionado, crean superficies impermeables que no existían en la cuenca hidrográfica, generando impactos de aumento del escurrimiento, que es transportado a través de conductos y canales. Estos dispositivos hidráulicos presentan costos directamente relacionados con los caudales máximos, aumentando con la impermeabilización. Para reducir estos costos y minimizar los impactos aguas abajo, una de las acciones es permitir una mayor infiltración de la precipitación, creando una condición, que sea lo más próxima posible, a las condiciones naturales.

Las ventajas y desventajas de los dispositivos que permiten mayor infiltración y percolación son las siguientes (Urbanas y Stahre, 1993):

- aumento de la recarga; reducción de ocupación en áreas con capa freática baja; preservación de la vegetación natural; reducción de la polución transportada a los ríos; reducción de los caudales máximos *aguas abajo*; reducción del tamaño de los conductos;
- los suelos de algunas áreas pueden quedar impermeables con el tiempo; falta de mantenimiento; aumento del nivel de la capa freática, alcanzando construcciones en subsuelo.

La *infiltración* es el proceso de transferencia del flujo de la superficie hacia el interior del suelo. La *capacidad de infiltración* depende de las características del suelo y del estado de humedad de la capa superior del suelo, denominada también como zona no saturada. La velocidad del escurrimiento a través de esta capa no saturada hasta la capa freática (zona saturada) es denominada *percolación*. La percolación también depende del estado de humedad de la capa superior del suelo y del tipo de suelo. Determinados tipos de suelos presentan mayores dificultades de percolación y pequeño volumen de almacenamiento, lo que vuelve inviable su uso, ya que podrán: (a) mantener niveles de agua altos por mucho tiempo en la superficie; (b) tener poco efecto en la

reducción del volumen final del hidrograma.

Los principales dispositivos para crear mayor infiltración son discutidos a continuación:

**Superficies de infiltración:** existen varios tipos, de acuerdo con su disposición local. En general, el área de infiltración es un lugar con césped que recibe la precipitación de un área impermeable, como es el caso de residencias o edificios (Figura 3.17). Durante precipitaciones intensas, éstas pueden quedar sumergidas, si su capacidad es muy inferior a la intensidad de la precipitación. En el caso que el drenaje transporte mucho material fino, la capacidad de infiltración puede ser reducida, necesitando limpieza de la superficie para mantener su capacidad de funcionamiento.

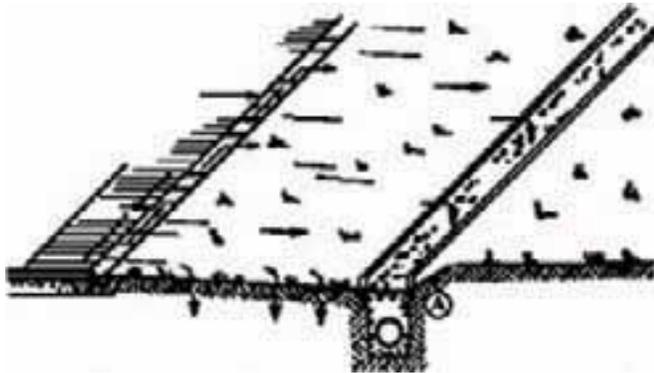


Figura 3.17. Superficie de infiltración con trincheras

**Trincheras de infiltración:** son dispositivos de drenaje lateral, muchas veces utilizados paralelos a las calles, autopistas, estacionamientos y conjuntos habitacionales, entre otros (Figura 3.18). Estas trincheras concentran el flujo de las áreas adyacentes y crean condiciones para una infiltración a lo largo de su longitud. Después de una precipitación intensa, el nivel sube, y como la infiltración es lenta, se mantienen con agua durante algún tiempo. Por lo tanto, su volumen debe ser suficiente para no ocurrir inundación. Este dispositivo funciona, en realidad, como un reservorio de detención, a medida que el drenaje que escurre hacia la trinchera es superior a la capacidad de infiltración. En los períodos con poca precipitación o de sequía, éste se mantiene seco. Este dispositivo permite, también, la reducción de la cantidad de polución transportada aguas abajo.

**Cuencas de percolación:** dispositivos de percolación dentro de lotes permiten, también, aumentar la recarga y reducir el escurrimiento superficial. El almacenamiento es realizado en la

camada superior del suelo y depende de la porosidad y de la percolación. Por lo tanto, la capa freática debe ser baja, creando espacio para el almacenamiento. Para áreas de capa freática alta, este tipo de dispositivo no es recomendado. Las cuencas son construidas para recoger el agua del tejado y crear condiciones de escurrimiento a través del suelo. Estas cuencas son construidas removiendo el suelo y llenándolo con pedregullo, que crea el espacio para el almacenamiento (Figura 3.19). De acuerdo con el tipo de suelo, es necesario crear mayores condiciones de drenaje. Para el suelo arcilloso con menor percolación, es necesario drenar el dispositivo de salida. La principal dificultad encontrada con el uso de este tipo de dispositivo es la obstrucción de los espacios entre los elementos por el material fino transportado, por lo tanto, se recomienda el uso de un filtro de material geotextil. De cualquier manera, es necesario su limpieza después de algún tiempo (Urbonas y Stahre, 1993).

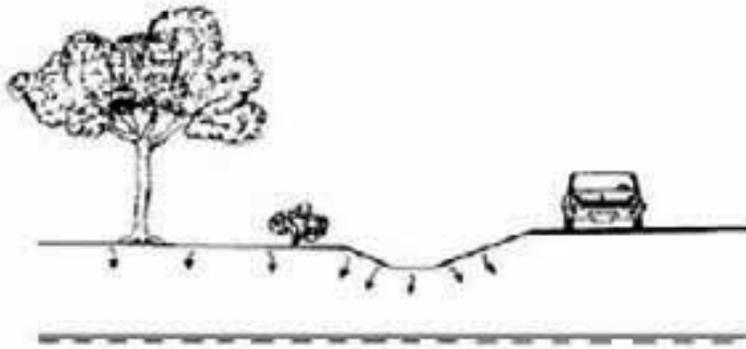


Figura 3.18. Trincheras de infiltración (Urbonas y Stahre, 1993)

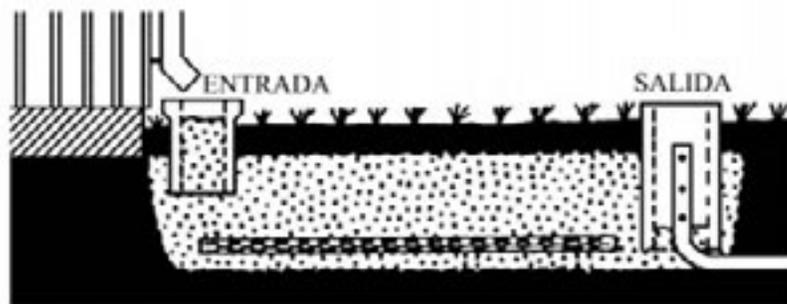


Figura 3.19. Ejemplo de cuenca de percolación (Holmstrand, 1984)

**Dispositivos hidráulicos permeables:** existen diferentes tipos de dispositivos que drenan el escurrimiento y pueden ser construidos de manera que permita la infiltración. Algunos de estos dispositivos son:

- *entradas permeables en la red de drenaje*: En la Figura 3.20 a, se observa un filtro en la parte superior de la caja, para evitar la obstrucción;
- *trinchera permeable*: es un caso especial de cuenca de percolación y consiste en una caja con pedregullo y filtro por donde pasa un conducto poroso o perforado (Figura 3.20 b);
- *cordón permeable*: este dispositivo es utilizado fuera del lote o dentro de condominios, industrias o áreas comerciales (Figura 3.20 c).

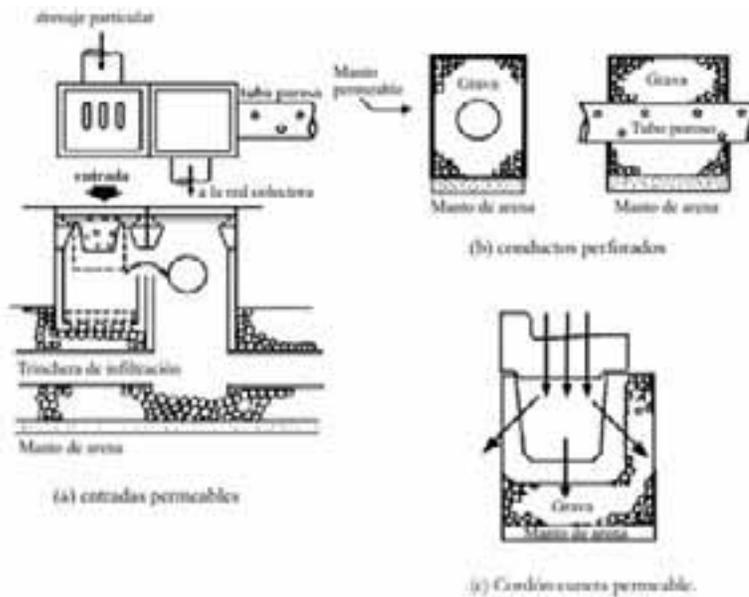


Figura 3.20. Dispositivos hidráulicos permeables

**Pavimentos permeables:** el pavimento permeable puede ser utilizado en paseos públicos, estacionamientos, predios deportivos y calles de poco tráfico. En calles con mucho tráfico, este pavimento se puede deformar y obstruir, volviéndose impermeable.

Este tipo de pavimento puede ser de bloque perforado, concreto o de asfalto (Figura 3.21). El concreto y el asfalto son construidos de la misma manera que los pavimentos tradicionales, con la diferencia que el material fino es retirado de la mezcla.

Cuando estos pavimentos son construidos para retener parte del drenaje, es necesario que su base sea, por lo menos de 1,2m arriba de la capa freática durante el período lluvioso. La base es drenada con caños perforados espaciados de 3 a 8 m. El sistema de drenaje debe prever el agotamiento del volumen

existente en la capa del suelo en un período de 6 a 12 horas (Urbonas y Stahre, 1993). Este sistema es viable cuando el suelo tiene la capacidad de infiltración superior a 7mm/h. Para suelos con un porcentaje superior a 30% de arcilla o 40% de sílice y arcilla combinados no son recomendables para uso. Las ventajas de este tipo de control pueden ser las siguientes: reducción del escurrimiento superficial previsto con relación a superficie impermeable; reducción de los conductos de drenaje pluvial; reducción de costos del sistema de drenaje pluvial y de la lámina de agua en estacionamientos y paseos públicos. Las desventajas son: el mantenimiento del sistema para evitar que sea colmatado con el tiempo; mayor costo directo de construcción (sin considerar el beneficio de reducción de los conductos); contaminación de los acuíferos.

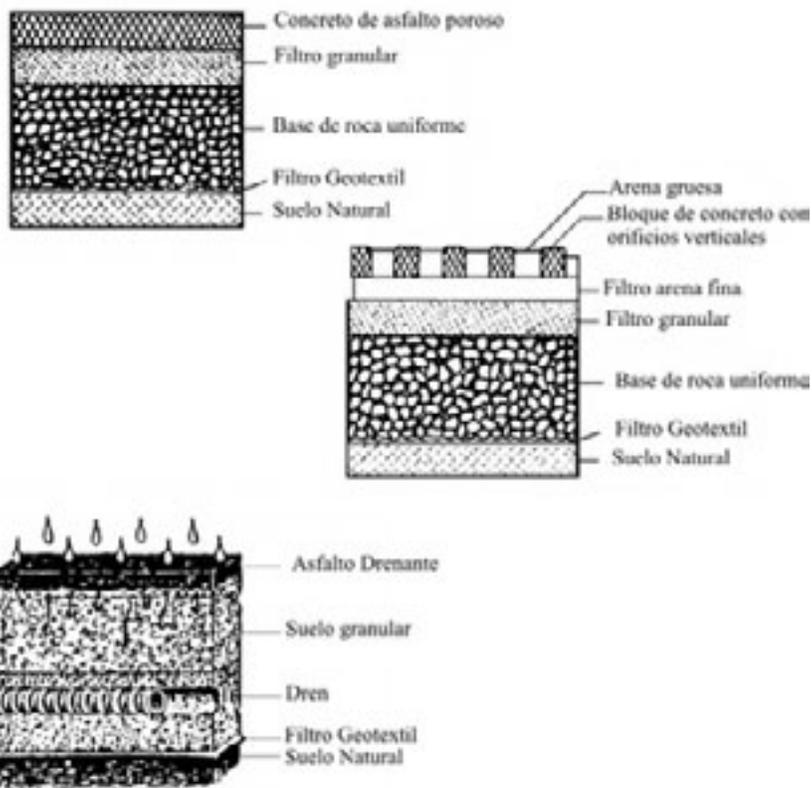


Figura 3.21. Pavimentos permeables.

Araújo et al (2001) realizaron experimentos con distintas superficies: (a) *Suelo compactado* con pendiente de 1 a 3 %; (b) *Pavimentos impermeables*: una parcela de concreto convencional de cemento, arena y pedregullo, con pendiente del 4%; (c) *Pavimentos semipermeables*: una parcela de superficie con

pedras regulares de granito con juntas de arena, conocidas por paralelepípedos, con desnivel de 4%; y otra parcela revestida con pedras de concreto industrializado tipo “pavi S<sup>1</sup>”, igualmente con juntas de arena, conocida por blocket, con desnivel de 2%; (d) *Pavimentos permeables*: una parcela de bloques de concreto con orificios verticales llenados con material granular (arena) con desnivel de 2% y una parcela de concreto poroso con desnivel de 2%. Los experimentos fueron realizados con precipitación de 110mm / h, equivalente a un tiempo de retorno de 5 años para una duración de 10 minutos. Los resultados de los experimentos son presentados en la Tabla 3.2 donde se observa que los paralelepípedos absorben parte de la precipitación para una intensidad muy alta y los pavimentos permeables prácticamente no generan escurrimiento. Se debe considerar que el experimento fue realizado con un simulador de lluvia en una superficie de 1m<sup>2</sup>, donde el efecto de almacenamiento en la superficie y en el reservorio de los pavimentos permeables tiene más efecto. El costo del pavimento permeable puede ser del orden de 30% más que el pavimento común debido a la base necesaria para su implantación. Se puede observar en los valores de la Tabla 3.2 que los paralelepípedos o bloques, cuando no poseen juntas con cemento pueden permitir almacenar e infiltrar una parte importante de las precipitaciones frecuentes. Por lo tanto, calles con este tipo de dispositivo deberían ser preservadas para evitar el agravamiento de los problemas de drenaje localizados en las ciudades. En el caso que se asfalte o se pavimente, por lo menos en el medio de estas estructuras, se debería mantener una faja sin asfalto, lo que permitiría la infiltración y acumulación de parte del volumen.

Tabla 3.2. Coeficiente de escurrimiento para simulación de lluvia en distintas superficies para una intensidad de 110mm / h

<b>Superficie</b>	<b>C</b>
Suelo compactado	0,66
Concreto	0,95
Bloque de concreto	0,78
Paralelepípedo	0,60
Bloque perforado	0,03
Concreto permeable	0,03

En las Figura 3.22 a Figura 3.25, son presentadas fotografías de distintos dispositivos que procuran priorizar la infiltración del escurrimiento, además de tener su función

<sup>1</sup> “pavi S” – Nombre comercial que se da en Brasil a un tipo de piedra de concreto industrializado.

urbanística en el contexto de los emprendimientos. Las ventajas y desventajas de los dispositivos de infiltración utilizados para el control distribuido del escurrimiento son presentadas en la Tabla 3.3.



Figura 3.22. Uso de dispositivos para retener el agua de áreas impermeables (a) la foto a la izquierda muestra las áreas drenadas de pavimentos para el césped y de los techos para los reservorios de piedra: (b) veredas con céspedes en las laterales para aumentar la infiltración.



Figura 3.23. La foto a la izquierda muestra un ejemplo de trincheras de infiltración y la foto a la derecha muestra pavimento permeable con bloques perforados en estacionamientos.



Figura 3.24. La foto a la izquierda muestra calle sin cordón que permite la infiltración de parte del escurrimiento en las laterales con césped. En la foto a la derecha se presenta un área de infiltración en un cantero.



Figura 3.25. Dos áreas experimentales en el estacionamiento del Instituto de Pesquisas Hidráulicas (Porto Alegre – Brasil) con bloque perforado y asfalto poroso.

### **Almacenamiento:**

El almacenamiento puede ser efectuado en tejados, en pequeños reservorios residenciales, en estacionamientos, en área deportivas, entre otros, a continuación se presentan las principales características de algunos sistemas de almacenamiento:

**Tejados:** el almacenamiento en tejados presenta algunas dificultades, que son el mantenimiento y el refuerzo de las estructuras. Debido a las características del clima brasileño y al tipo de material usualmente utilizado en las coberturas, este tipo de control difícilmente sería aplicable a nuestra realidad.

**Lotes urbanos:** el almacenamiento en el lote puede ser utilizado para amortiguar el escurrimiento, en conjunto con otros usos, como abastecimiento de agua, irrigación de césped y lavado de superficies o de autos. En la Figura 3.26, se presenta un reservorio de este tipo.

En regiones con pequeña capacidad de distribución de agua, la precipitación en los tejados es escurrida directamente hacia un pozo subterráneo y, después, clorada para el uso doméstico. El agua colectada en tejados de centros deportivos puede ser colectada directamente para uso de limpieza. Considerando una superficie de  $120 \text{ m}^2$ , con una precipitación

anual de 1500mm, es posible obtener 360m<sup>3</sup> por año, que, distribuidos, representan cerca de 15m<sup>3</sup> por mes, valor más que suficiente para abastecer una residencia. Evidentemente que, a medida que el reservorio es mantenido con agua, se reduce su capacidad de amortiguamiento.

Tabla 3.3. Dispositivos de infiltración

Dispositivo	Características	Ventajas	Desventajas
Superficies y trincheras de infiltración con drenaje	Césped, áreas con canto rodado o otro material que permita la infiltración natural	Permite infiltración de parte del agua para el subsuelo	Superficies con desnivel > 0,1% no deben ser usados; el transporte de material sólido para el área de infiltración puede reducir su capacidad de infiltración.
Superficies y trincheras de infiltración sin drenaje	Césped, áreas con canto rodado o otro material que permita la infiltración natural	Permite infiltración del agua para el subsuelo	La acumulación de agua en la superficie durante el período de lluvias no permite el tránsito sobre el área. Superficies con desnivel que permitan escurrimiento hacia afuera de éstas.
Pavimentos permeables	concreto, asfalto o bloque perforado con alta capacidad de infiltración	Permite infiltración del agua.	No debe ser utilizado para calles con tráfico intenso y / o de carga pesada, pues su eficiencia puede disminuir.
Pozos de infiltración, trincheras de infiltración y cuencas de percolación	Volumen generado en el interior del suelo que permite almacenar el agua e infiltrar	Reducción del escurrimiento superficial y amortiguamiento en función del almacenamiento	Puede reducir la eficiencia con el tiempo, dependiendo de la cantidad de material sólido que drena hacia el área

(1) Condicionantes físicos: Profundidad de la capa freática en el período de lluvias > 1,20m. La camada impermeable debe > 1,20m de profundidad. La tasa de infiltración del suelo saturado > 7,60mm/h. Cuencas de percolación la conductividad hidráulica saturada > 2.10-5m/s.

Existen varias configuraciones posibles para la introducción del reservorio dentro de lotes y emprendimientos urbanos, como muestra la Figura 3.27 y Figura 3.28. La estimación del volumen generalmente es realizada con base en las condiciones establecidas por el poder público cuanto la entrada en la red pluvial. En Porto Alegre el límite es de 20,8 l / (s.ha) lo que lleva a un reservorio obtenido a través de la siguiente ecuación:

$$V = 4,15 \cdot AI \cdot A \quad (3.1)$$

donde:  $AI$  es el área impermeable en %,  $A$  es el área del lote o del emprendimiento en hectáreas y  $V$  es el volumen necesario en  $m^3$ . Para un edificio que urbaniza un lote de  $1000m^2$ , con área total impermeable de 80% el volumen necesario será de  $33m^3$ . Considerando una profundidad de 1,5m sería necesario un área de  $22m^2$ . La legislación prevé que si el agua de las superficies permeables son drenadas hacia superficies que infiltran y éstas no tienen drenaje, el área impermeable en el cálculo puede ser disminuida en 80%, resultando  $AI = 16\%$  y  $V = 6,8m^3$  y  $4,5m^2$ . Este tipo de gestión induce a cada emprendedor desarrollar las medidas distribuidas de infiltración.

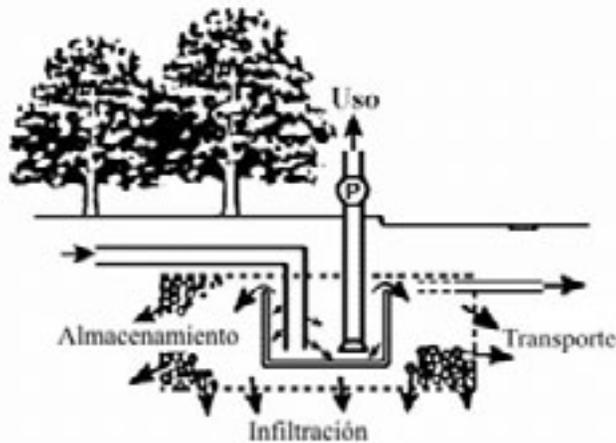


Figura 3.26. Reservorios con usos variados (Fujita, 1993)

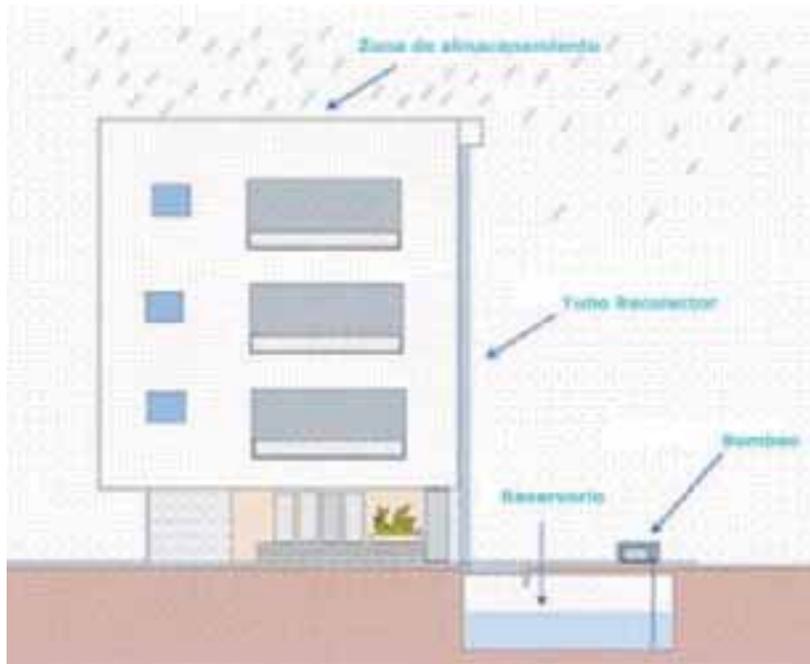


Figura 3.27. Reservorios en edificio (Campana, 2004).

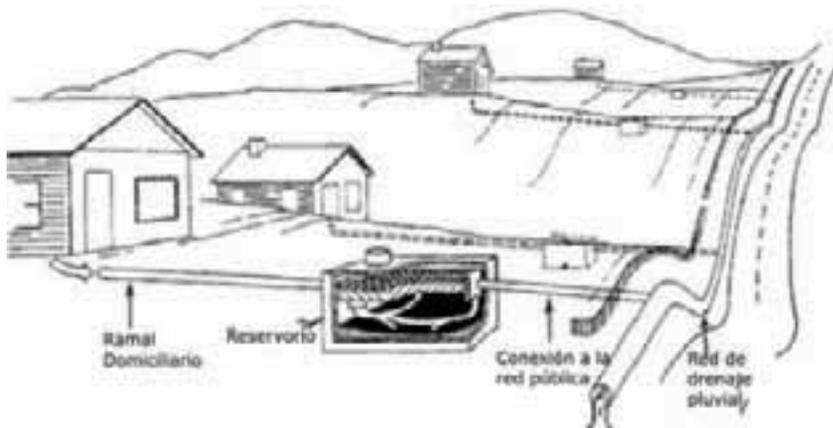


Figura 3.28. Reservorio en área residencial (Campana, 2004)



Figura 3.29. Almacenamiento en un condominio (a la izquierda) y en el estacionamiento de un área comercial (a la derecha).

### 3.5.2 Medidas de control en el microdrenaje y macrodrenaje

La medida de control de escurrimiento en el microdrenaje, tradicionalmente utilizada, consiste en drenar el área urbanizada a través de conductos pluviales hacia un colector principal o río urbano. Este tipo de solución acaba transfiriendo hacia aguas abajo el aumento en el escurrimiento superficial con una mayor velocidad, ya que el tiempo de desplazamiento del escurrimiento es menor que en las condiciones preexistentes. De esta manera, se provocan inundaciones en los ramales principales o en el mismo macrodrenaje.

Como se presentara oportunamente, la impermeabilización y la canalización producen un aumento en el caudal máximo y en el escurrimiento superficial. Para que este aumento de caudal no sea transferido hacia aguas abajo se utiliza el amortiguamiento del volumen generado, a través de dispositivos de retención como pueden ser: tanques, lagos y pequeños reservorios a cielo abierto o enterrados, entre otros dispositivos. Estas medidas son denominadas de control aguas abajo (*downstream control*).

El objetivo de los reservorios de detención es minimizar el impacto hidrológico de la urbanización, amortiguando la reducción de la capacidad de almacenamiento natural de la cuenca hidrográfica.

Este tipo de control tiene las siguientes ventajas y desventajas (Urbonas y Stahre, 1993): costos reducidos, si se lo compara a un gran número de dispositivos de control distribuidos; menor costo de operación y mantenimiento; facilidad de administración de la construcción; dificultad de encontrar lugares adecuados; costo de adquisición del área a utilizar; reservorios de dimensiones importantes tienen oposición por parte de la población.

Este control ha sido utilizado cuando existen restricciones por parte de la administración municipal al aumento del caudal máximo debido al desarrollo urbano, y así, ya fue implantado en muchas ciudades de diferentes países. El criterio normalmente utilizado es que *el caudal máximo del área, con el desarrollo urbano, debe ser menor o igual al caudal máximo de las condiciones preexistentes para un tiempo de retorno predeterminado.*

## Características y funciones de los reservorios

Los reservorios de retención son utilizados de acuerdo al objetivo del control deseado. Este dispositivo puede ser utilizado para:

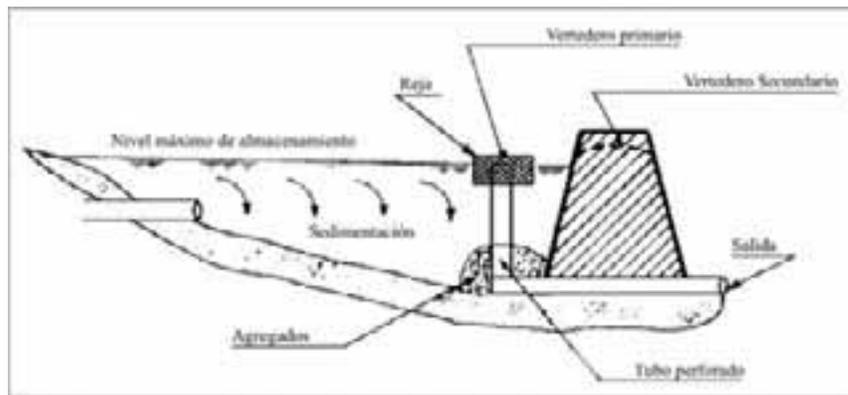
**Control del caudal máximo:** Este es el caso típico de control de los efectos de anegamiento sobre áreas urbanas. El reservorio es utilizado para amortiguar el pico aguas abajo, reduciendo la sección hidráulica de los conductos y manteniendo las condiciones de caudal preexistentes en el área desarrollada.

**Control del volumen:** normalmente, este tipo de control es utilizado cuando el escurrimiento cloacal y pluvial son transportados por conductos combinados o cuando recibe el agua de un área sujeta a la contaminación. Como la capacidad de una estación de tratamiento es limitada, es necesario almacenar el volumen para que pueda ser tratado. El reservorio también es utilizado para la deposición de sedimentos y depuración de la calidad del agua, manteniendo su volumen por más tiempo dentro del reservorio. El tiempo de detención, que es la diferencia entre el centro de gravedad del hidrograma de entrada y el de salida, es uno de los indicadores utilizados para evaluar la capacidad de depuración del reservorio.

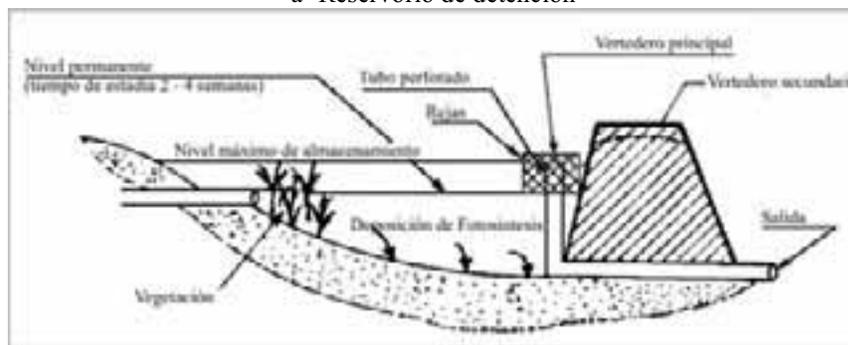
**Control de material sólido:** cuando la cantidad de sedimentos producida es significativa, este tipo de dispositivo puede retener parte de los sedimentos para que sean retirados del sistema de drenaje.

## Tipos de reservorios

Los reservorios pueden ser dimensionados para que mantengan una lámina permanente de agua, denominados de *retención*, o para que se sequen después de su uso, durante una lluvia intensa y después utilizados para otras finalidades. Este tipo de reservorio es llamado *detención* (Figura 3.30 a).



a- Reservoirio de detención



b- Reservoirio de retención

Figura 3.30. Reservorios para el control de material sólido (Maidment, 1993)

La Retención que mantiene la lámina de agua sirve para evitar el crecimiento de vegetación indeseable en el fondo y para la reducción de la polución hacia aguas abajo, volviendo el reservorio más eficiente para el control de la calidad del agua. Su uso integrado, juntamente con parques, puede permitir un buen ambiente recreativo. La ventaja de la utilización de este dispositivo seco es que se puede utilizarlo para otras finalidades. Una práctica común consiste en dimensionar un área con lámina de agua para escurrir una crecida frecuente, como la de dos años, y plantear el área de desbordamiento con paisajismo y campos de deporte para las crecidas arriba de la cota referente al riesgo mencionado. Cuando ésta ocurre, será necesario realizar apenas la limpieza del área alcanzada, sin mayores daños aguas arriba o aguas abajo. La principal desventaja de la retención es la necesidad de mayor volumen del reservorio y el control de su calidad del agua.

En la Figura 3.30, son presentados, de manera esquemática, el reservorio mantenido seco y el reservorio con lámina de agua. Los reservorios o cuencas de detención

mantenidas secas son los más utilizados en los Estados Unidos, Canadá y Australia. Cuando son proyectados para el control del caudal, su vaciamiento es rápido de hasta seis horas y con poco efecto sobre la remoción de contaminantes. Si aumentada la detención entre las 24 a 60hs, se podrá obtener mejoras en la remoción de contaminantes (Urbonas y Roesner, 1994). Este tipo de dispositivo retiene una parte importante del material sólido.

Cuando el drenaje utiliza la capacidad extra de volumen del sistema para el amortiguamiento, y están ligados directamente a la red de drenaje éste es llamado *sistema on-line* (Figura 3.31). Cuando el escurrimiento es transferido para el área de amortiguamiento, después de alcanzar un cierto caudal, y recibe sólo lo excedente de la red de drenaje el sistema es denominado *off-line* (Figura 3.32 y Figura 3.34).

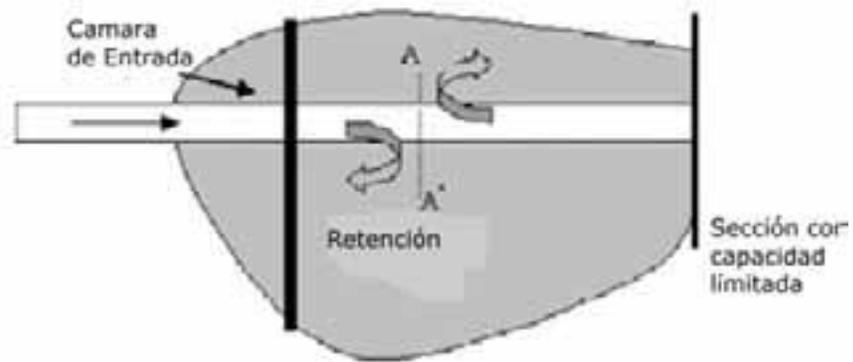


Figura 3.31. Detención on-line

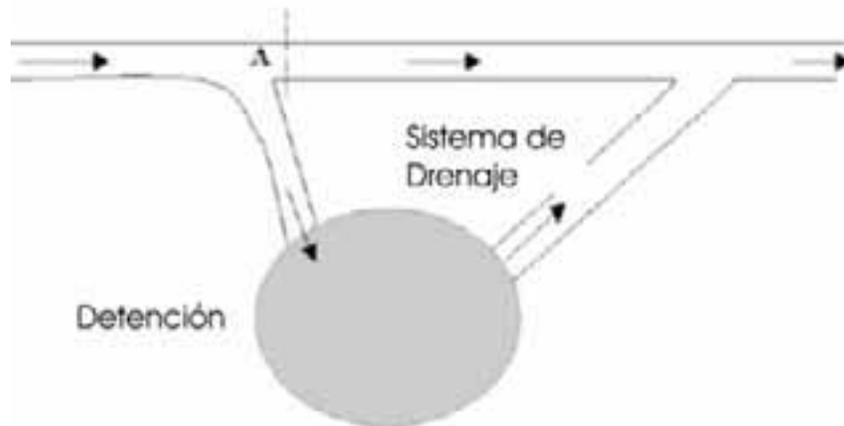


Figura 3.32. Detención off-line (a la izquierda) conectado por conductos y on-line (a la derecha).

En las detenciones “on-line” existen problemas para el drenaje con flujos pluviales mixtos sobre todo cuando existe una gran cantidad de conexiones clandestina a la red de drenaje, debido a la gran contaminación que se origina en el reservorio, principalmente en el período de sequía. En este caso, es conveniente que el fondo de este sea de concreto para facilitar la limpieza.

Este tipo de reservorio puede tener un fondo natural, excavado o de concreto. Los reservorios en concreto son más caros, pero permiten paredes verticales, con aumento del volumen. Esto es útil donde el espacio tiene un costo elevado.

Los reservorios pueden ser abiertos o cerrados. Los primeros generalmente poseen costo menores y mayor facilidad de mantenimiento. Los segundos tienen mayores costo (pueden llegar hasta 7 veces más que los primeros) y gran dificultad de mantenimiento. Generalmente, son utilizados cuando se desea utilizar el espacio superior, debido a la topografía o la presión de la población vecina que temen a la basura y la calidad del sistema.

Los reservorios “off-line” pueden funcionar automáticamente por gravedad (Figura 3.33), o mediante sistemas de bombas cuando sea necesario obteniendo más volumen para un espacio definido (Figura 3.34). La diferencia es que en el primero caso el caudal inunda el área lateral y vuelve al sistema de drenaje por gravedad, sin operación. Mientras que en el segundo caso, debido a la necesidad de aumento del volumen es necesario excavar debajo de la cota del sistema de drenaje y para extraer todo el volumen es necesario recurrir al bombeo.



Figura 3.33. Detención off-line con volumen lateral (DAEE)



Figura 3.34. Detención cerrada (DAEE).



Figura 3.35. Detenciones con uso deportivo en Curitiba (a la izquierda) y Porto Alegre (a la derecha).

ASCE (1985) menciona que las instalaciones de detención de este tipo que tuvieron mayor suceso fueron las que se integraron a otros usos, como la recreación, ya que la comunidad, en su cotidiano, usará este espacio de recreación. Por lo tanto, es deseable que el proyecto de este sistema esté integrado a la planificación del uso del área.

### Ubicación

Como fue mencionado anteriormente, los reservorios pueden ser abiertos o enterrados (Figura 3.33), de acuerdo con las condiciones de su ubicación. En lugares donde el espacio es reducido o que sea necesario mantener una superficie superior integrada con otros usos, se pueden utilizar reservorios subterráneos; sin embargo, el costo de este tipo de solución es superior a de los reservorios abiertos.

La ubicación depende de los siguientes factores:

- en zonas muy urbanizadas, la ubicación depende de la disponibilidad de espacio y de la capacidad de intervenir en el amortiguamiento. Si existe espacio sólo aguas arriba,

- que drena poco volumen, el efecto será reducido;
- en zonas a desarrollar, se debe ubicar el reservorio en las partes de poco valor, aprovechando las depresiones naturales o parques existentes. Un buen indicador de ubicación son las áreas naturales que forman pequeños lagos o estanques antes de su desarrollo.

### **3.5.3 Compatibilización con los sistemas – escurrimiento sanitario**

Existen escenarios en que la red de drenaje es mixta, recibe líquidos cloacales y pluviales; sistema separador, cuando el escurrimiento es casi totalmente debido al drenaje pluvial.

**Sistema mixto:** Existe una red de drenaje con cloacas y el sistema es llevado a una estación de tratamiento: este es el escenario utilizado en ciudades antiguas de Europa y Estados Unidos. La detención es del tipo “*off-line*”. En este caso los líquidos cloacales y parte del caudal pluvial son colectados y llevados a la estación de tratamiento de cloacas. Cuando el caudal es superior al proyectado durante las crecidas el excedente escurre hacia el sistema de drenaje y detenciones. En este caso se utiliza apenas una red (sistema mixto), pero tiene la desventaja del mal olor en climas calientes, durante el verano, y el riesgo de proliferación de enfermedades durante las crecidas superiores a la capacidad del sistema conjunto.

**Sistema separador:** Este sistema tiene una red de colecta de cloacas independiente de la red de drenaje (Figura 3.36). Se utiliza detenciones “*on-line*” con control del residuo sólido y manejo de la carga de contaminantes. Ventajas: manejo adecuado de las detenciones y retenciones urbanas con mayor tiempo de residencia, permite el control de la calidad del agua; se evitan aguas contaminadas en las crecidas superiores a la de proyecto; se evita el olor en el período seco; se evita el colapso de sistemas de drenaje por corrosión. Desventajas: el alto costo inicial en el escenario de transición de la implantación de la red de cloaca separadora.

**Sistema de transición:** Cuando la ciudad tiene una red extensa de pluviales, pero pequeña de sanitario. Los costos para salir de un sistema mixto para un sistema separador pueden ser altos. Para graduación en el tiempo es posible por el macrodrenaje la estrategia de sistemas mixtos (Figura 3.37). Posteriormente, el proyecto podrá desarrollar la red de cloacas por los sistemas

secundarios, cubriendo con el tiempo toda la ciudad. Cuando la ciudad esté cubierta por el sistema separador es posible eliminar las conexiones.

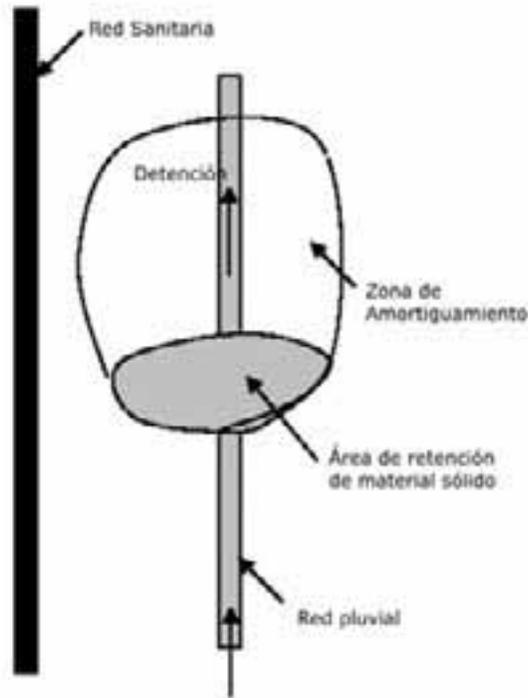


Figura 3.36. Características del sistema separador

### 3.5.4 Planeamiento en el control del macrodrenaje

El control del impacto del aumento del escurrimiento debido a la urbanización, en el macrodrenaje, ha sido realizado, en la realidad brasileña, a través de la canalización. El canal es dimensionado para escurrir un caudal de proyecto para tiempos de retorno que varían de 10 a 100 años. Para evitar las inundaciones sólo con drenaje la ciudad en su conjunto debería tener sus conductos ampliados para la eventual urbanización de toda la cuenca, lo que sería insustentable económicamente. La solución de control en una cuenca urbana involucra la combinación de medidas distribuidas, pero en especial la combinación del aumento de la capacidad por medio del amortiguamiento.

Existen los siguientes escenarios de desarrollo: (a) cuenca desarrollada con varios lugares de inundación; (b) cuenca con pequeña área ocupada y con tendencia a la urbanización.

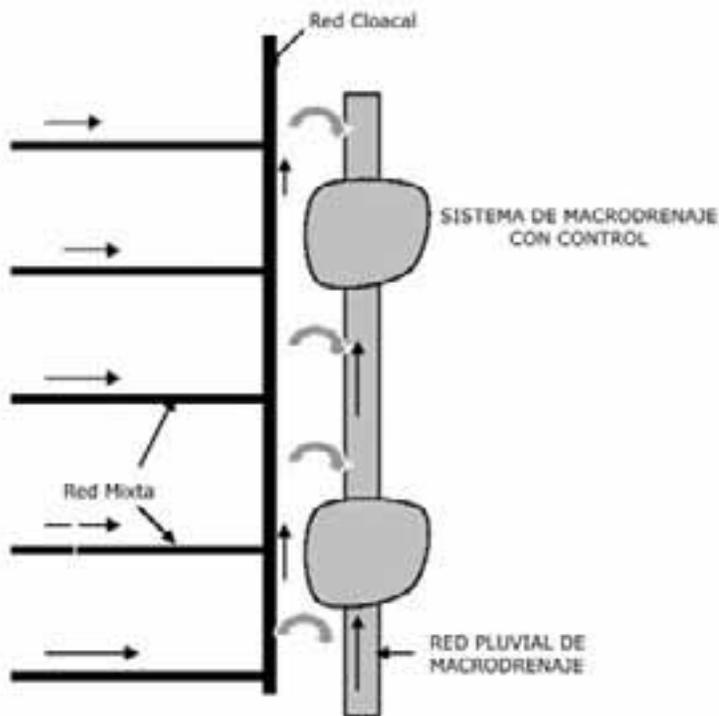


Figura 3.37. Sistema de transición

### Cuenca desarrollada

En este escenario se debe procurar identificar las zonas de inundación y buscar áreas propicias para amortiguar el escurrimiento y no transferirlo hacia aguas abajo para cada uno de los puntos críticos detectados. La combinación óptima será aquella que tenga reservorios con el menor costo y ampliación del escurrimiento que mejor se adapte al área urbana, o sea, menor costo y ambientalmente adecuado.

Wisner y Cheung (1982) presentaron, conforme Tabla 3.4, una comparación entre otras alternativas y el uso de parques para amortiguamiento.

En la Figura 3.38, son presentados el parque y los flujos en un área urbana.

Tabla 3.4. Comparación entre almacenamiento en parque y otras alternativas (Wisner y Cheung, 1982).

Tipo	Almacenamiento del valle	Detención con agua	Detención seca	Almacenamiento en parque
Almacenamiento	Continuo	continuo	frecuente	raro
Estética	sin importancia	Muy importante	Muy importante	menos importante
Mantenimiento	Pequeña	alta	moderada	Muy pequeña
Probabilidad de accidente	Pequeña	moderada	pequeña	Muy pequeña
Costo	Alto	moderado	moderado	bajo
Costo de la tierra	Ningún	alto	alto	ningún
Costo del paisajismo	Bajo	alto	medio	medio
Planeamiento	poco importante	Muy importante	Muy importante	muy importante

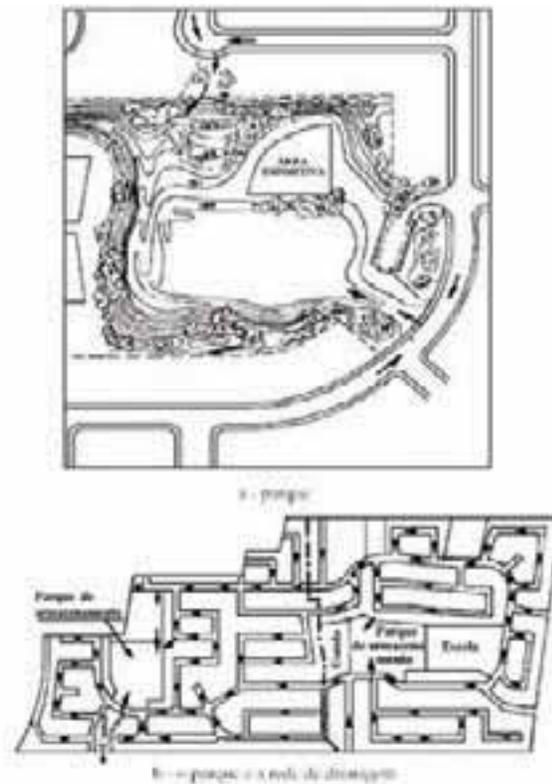


Figura 3.38. Parque de almacenamiento (Wisner y Cheung, 1982)

### Cuenca en desarrollo

Considere la cuenca de la Figura 3.39. En la primera etapa la cuenca no está totalmente urbanizada, y las inundaciones ocurren en el tramo urbanizado, donde algunas áreas no están ocupadas, porque se inundan con frecuencia. Cuando la cuenca se encuentra en una etapa avanzada de desarrollo, la tendencia es que las medidas estructurales predominen, con costos altos. Sin embargo, se puede minimizar estos costos a través del aumento de la capacidad de amortiguamiento en la cuenca urbana, buscando recuperar, el máximo posible, el amortiguamiento natural por la explotación de todas las áreas posibles. Yoshimoto y Suetsugi (1990) describieron las medidas tomadas para reducir la frecuencia de inundaciones en el río Tsurumi, dentro del área de la ciudad de Tokio. La cuenca fue subdividida en tres: retención, retardo y áreas inferiores, y definido el caudal de control. En el área de retención, fueron obtenidos 2,2 millones de m<sup>3</sup> para amortiguamiento a través de acción municipal, además de otras medidas de retardo. Estas acciones redujeron los perjuicios para crecidas recientes.

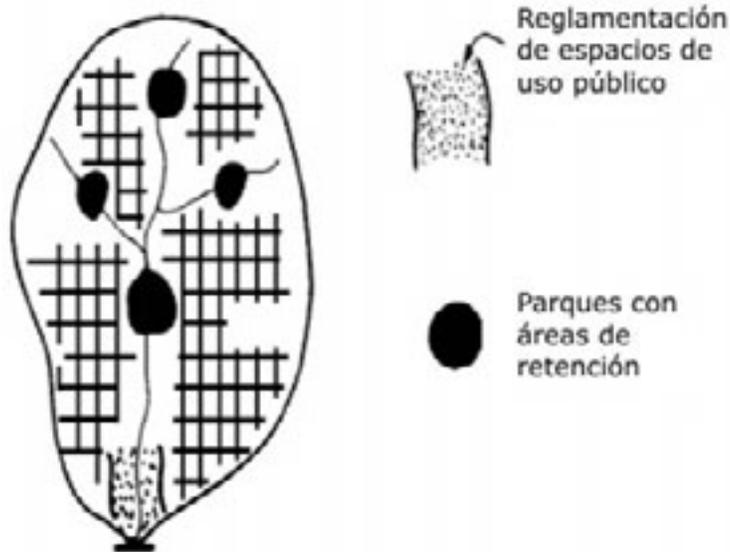


Figura 3.39. Planeamiento de control de la cuenca en la primera etapa de urbanización

## Problemas

1. Analice los tipos de medidas de control del escurrimiento en la fuente para el drenaje urbano y presente sus usos, ventajas y desventajas.
2. ¿Cuál es la utilización de pavimento permeables en un proyecto de drenaje? Sus ventajas y desventajas.
3. ¿Cuál es la diferencia entre detención y retención en el control de las inundaciones decurrentes del proceso de urbanización? ¿Cuáles son los impactos que estos dispositivos promueven con relación a las inundaciones?
4. ¿Cuáles son los tipos de inundaciones y cuáles son los impactos relacionados?
5. Identifique también para la cuestión anterior cuándo ocurre la transferencia de impactos.
6. ¿Cuáles son las principales estrategias de gestión del drenaje urbano para ciudad implantada y para el futuro desarrollo?
7. ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de los controles en la fuente? ¿Cuáles son más sustentables?
8. ¿Cuáles son las relaciones que deben existir entre un Plan Director Urbano y el Plan de Drenaje y éste con del escurrimiento sanitario y residuo sólido?
9. Muchas ciudades utilizan el control sobre las áreas impermeables, pero no consiguen evitar el impacto sobre el drenaje. ¿Por qué? ¿Cuál es el problema y cómo resolver a través de medidas no estructurales?
10. ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de las medidas de control en el microdrenaje y en el macrodrenaje?
11. Describa las etapas de un Plan Director de Drenaje Urbano. ¿Cuáles son las medidas no estructurales?
12. Identifique los principios de un Plan Director de Drenaje Urbano.
13. ¿En la evaluación económica de los perjuicios de inundación cómo los costos deberían ser distribuidos entre la población?
14. ¿Cuáles son los tipos de inundaciones y cuáles son los impactos relacionados?
15. Identifique también para la cuestión anterior cuándo ocurre la transferencia de impactos.
16. ¿Cuáles son las principales estrategias de gestión del drenaje urbano para ciudad implantada y para el futuro desarrollo?
17. ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de los controles en la fuente? ¿Cuáles son más sustentables?

18. ¿Cuáles son las relaciones que deben existir entre un Plan Director Urbano y el Plan de Drenaje y éste con el escurrimiento sanitario y residuo sólido?
19. Muchas ciudades utilizan el control sobre las áreas impermeables, pero no consiguen evitar el impacto sobre el drenaje. ¿Por qué? ¿Cuál es el problema y cómo resolver a través de medidas no estructurales?
20. ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de las medidas de control en el microdrenaje y en el macrodrenaje?
21. Describa las etapas de un Plan Director de Drenaje Urbano. ¿Cuáles son las medidas no estructurales?
22. Identifique los principios de un Plan Director de Drenaje Urbano.
23. En la evaluación económica de los perjuicios de inundación ¿cómo los costos deberían ser distribuidos entre la población?

## Referencias

- APWA, 1969. *Water pollution aspects of urban runoff*. Water Quality Administration, (Water Pollution Control Research Series, Report N. WP-20-15).
- ASCE, 1985. *Stormwater Detention Outlet Control Structures*. Task Committee on the Design of Outlet Structures. American Society of Civil Engineers, New York.
- ASCE, 1992. *Design and construction of stormwater management systems*. The urban water resources research council of the American Society of Civil Engineers (ASCE) and the Water Environmental Federation, New York, NY.
- AWCO, 1970. *Stormwater pollution from urban activity*. Water Quality Administration, (Water Pollution Control Research Series, Report n. 410M-180).
- BOYD, M.J., 1984. Preliminary Design Procedures for Detention Basins. in: *Second International Conference on Urban Drainage*, Urbana, pp. 370 - 378 (Water Resources Publications).
- BRAS, R. L.; MURKINS, F.J., 1975. Effects of urbanization on catchment responses. *J. Hydr. Div., ASCE*, 101(1153), 451-466.
- COLLISCHONN, W. TUCCI, C. I.M. 1998. *Drenagem urbana e Controle de Inundação*. VI Simpósio nacional de controle de enchentes. 29/3 a 1/4 1998, Presidente Prudente, São Paulo.
- COLSON, N.V., 1974. *Characterization and treatment of urban land runoff*. EPA-670/273-096.
- EPA, 1985. *Methodology for analysis of detention basins for control of urban runoff quality*. Washington. (Environmental Protection Agency 480/5-87401).
- ESTADOS UNIDOS, Department of transportation, 1979. *Design of urban highway drainage*. Washington: Federal Highway Administration.

- FUJITA, S., 1984. Experimental Sewer Systems for Reduction of Urban Storm Runoff. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN STORM DRAINAGE, 3, 1984, Göteborg, *Proceedings*, Göteborg: Chalmers University of Technology, 4v, vA, p. 1211-1220.
- FUJITA, S., 1993. Stormwater goes to ground as Japan chooses infiltration. *Water Quality International*, London, v.3, p. 18-19.
- GUARULHOS, 2000. *Guia de Obras de Manutenção e Conservação Lei 5617 de 9 de novembro de 2000*, Município de Guarulhos.
- HOGLAND, W.; NIEMCZYŃOWICZ, J., 1986. The unit Superstructure - A New Construction to prevent groundwater depletion. In: BUDAPEST SYMPOSIUM, 1986, *Confinitive Water Use Proceedings*, Wallingford: IAHR, 347p, 312-322 (International Association of Hydrological Sciences, Publication n. 156)
- HOLMSTRAND, O., 1984. Infiltration of Stormwater: research at Chalmers University of Technology. Results and examples of Application. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN STORM DRAINAGE, 3, 1984, Göteborg, *Proceedings*, Göteborg: Chalmers University of Technology, 4v, vA, p.1057-1066.
- HOYT, W.G., LANGHEIN, W.B., 1955. *Floods*, Princeton: Princeton University Press, Princeton, 409p.
- IBGE, 1998 "Anuário Estatístico do Brasil - 1997", Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, 1998 (CDROM)
- IDR, C., 1984. *Qualidade da drenagem pluvial urbana*, Porto Alegre:UERGS/Curso de Pós Graduação em recursos Hídricos e Saneamento 157L, Dissertação(mestrado).
- JACOBSEN, P., HARRIMON, P., 1981. Significance of Semi Permeous Surfaces in Urban Hydrology. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN STORM DRAINAGE, 2, 1981, Urbana, *Proceedings*, Urbana: University of Illinois, v.1, p.424-433.
- JOHNSON, W., 1978. *Physical and economic feasibility of institutional flood plain management measures*, Davis: Hydrologic Engineering Center.
- LARGUR, J.; SMITH, W.G.; LYNARD, W.G.; FINN, R.M.; FENNEMORE, E.J., 1977. *Urban Stormwater management and technology update and user's guide*. US EPA Report - 600/8-77-014 NTIS N. PB 275654.
- LIXVOLD, L.B., 1968. *Hydrology for Urban Planning - A Guide Book on the Hydrologic Effects on Urban Land Use*. USGS circ. 554, 18p.
- HEJOUR RAMOS, G.; HEJOUR, G. C. N.; BRIGHETTI, G., 1993. Dinâmica do transporte sólido nos rios Tietê e Pinheiros na região metropolitana de São Paulo. *Anais X Simpósio brasileiro de recursos hídricos*, Gramado.
- MAIDMENT, D.R. (ed), 1993. *Handbook of Hydrology*, New York: McGraw-Hill.
- NAKAI, T.; BRIGHETTI, G., 1993. Dragagem a longa distância aplicada ao desassoreamento da calha do rio Tietê. *Anais X Simpósio brasileiro de recursos hídricos*, Gramado.
- OLIVEIRA, M. G. B.; BAPTISTA, M. B., 1997. Análise da evolução temporal da produção de sedimentos na bacia hidrográfica da Pampulha e avaliação do assoreamento da reservatório. *Anais XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - ABRH*, Vitória.
- PMBH, 1996. *Plano Diretor*. Urbana: Prefeitura Municipal de Belo Horizonte.
- PMPA, 2000. *Segundo Plano de Desenvolvimento Urbano e Ambiental de Porto Alegre*. Prefeitura Municipal de Porto Alegre.

- RAMOS, M.M.G., 1998. *Drenagem Urbana: Aspectos urbanísticos, legais e morfológicos em Belo Horizonte*. Dissertação de Mestrado Escola de Engenharia Universidade Federal de Minas Gerais.
- REZENDI, B. e TUCCI, C.E. M., 1979. *Análise hidrológica e hidrológica dos problemas de inundação urbana na cidade de Curitiba, RS*. Relatório Técnico, p.28.
- ROESSNER, L.A; TRAINA, P., 1994. Overview of federal law and USFPA regulations for urban runoff. *Water Science & Technology*, V29 n. 1-2, p445-454.
- SCHUELLER, T., 1987. *Controlling Urban Runoff: A Practical Manual for Planning and Designing Urban BMPs*.
- SHAPIRO, A.L. L., 1999. Impactos Hidrológicos da urbanização em Porto Alegre. *7º Seminário de Hidrologia Urbana e Drenagem*. Belo Horizonte. ABRH.
- SIMONS, D.B. et al., 1977. *Flood flow, stage and damage*. Fort Collins, Colorado State University.
- SUDHERSA, 2002. Medidas micro-cotratadas. Plano Diretor de Drenagem Urbana da Região Metropolitana de Curitiba. CH2MHILL, Engenharia do Brasil Ltda.
- TASK, 1982. Guide for the development of flood plain regulations. *Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers*, New York, v.88, n.3, p.73-119, Sept.
- TUCCI, C.E.M., 1995. Hidrologia: Ciência e Aplicação. LIDUP, Editora da UFRGS, ABRH, 952p.
- TUCCI, C.E.M., 1998. *Medidas Hidrológicas*. ABRH/Editora da Universidade, 652p.
- TUCCI, C.E.M., 2009 a. Plano Diretor de Drenagem Urbana da Região Metropolitana de Curitiba. Memorando n. R.CH2MHILL / SUDHERSA.
- TUCCI, C.E.M., GENZ, F., 1994. Medidas de controle de inundações in: *Estudos Hidrosedimentológicos do Alto Paranaíba*. IPH/MMA.
- TUCCI, C. E. M., PORTO, R. L., 2000. System hydrology and urban drainage. In: Tucci, C. *Humid Tropics Urban Drainage*, capítulo 4. UNESCO.
- TUCCI, C. e SIMONS LOFFIS, M., 1985. Zonamento das áreas de inundação rio Uruguay. *Revista Brasileira de Engenharia Civil de Recursos Hídricos*. Rio de Janeiro, v.3, n. 1, p.19-45, maio.
- URBONAS, B.; ROESSNER, L.A., 1993. Hydrologic Design for Urban Drainage and Flood Control. In: *Handbook of Hydrology*. D.R. Maidment (ed.), Cap. 26.
- URBONAS, B.; STAHRE, P., 1993. *Alternative Best Management Practices and Detention*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 450p.
- U. S. Army, Corps of Engineers., 1976. *Guidelines for flood damage reduction*. Sacramento.
- VENJ,H.M., 1996. Water Balance of Urban Areas. in: DUISBERG SYMPOSIUM, 1996. *Hydrological Processes and Water Management in Urban Areas*, IAHS - p.21-32 International Association of Hydrological Sciences Publication 196.
- YOSHIMOTO, T.; SUITSUGI, T., 1990. Comprehensive Flood Disaster Prevention Measures in Japan. in: DUISBERG SYMPOSIUM, 1988. *Hydrological Processes and Water Management in Urban Areas*, IAHS - p.175-183 International Association of Hydrological Sciences Publication 196.
- WATER RESOURCES COUNCIL., 1971. *Regulation of flood hazard areas to reduce flood losses*. Washington.
- WEHR, S.R., ANDERSON, R.J; WOODWARD,R.L.,1964. Urban Land Runoff as a Factor in stream pollution. *Journal Water Pollution Control Federation*. Washington, V. 36, n.7, 914-924.
- WILKEN, P., 1975. *Experiências de drenagem superficial*. São paulo: CETESB.
- WRI, 1992. *World Resources 1992-1993*. New York: Oxford University Press. 385p.
- WIGGILL, I.M.1967. *Yacarta Urban Land Use and Drainage*.





## Gestión integrada de aguas urbanas

*La gestión integrada, entendida como interdisciplinaria e intersectorial de los componentes de las aguas urbanas, es una condición necesaria para que los resultados atiendan las condiciones del desarrollo sustentable urbano.*

**E**l desarrollo urbano en las últimas décadas ha cambiado la mayoría de los conceptos utilizados en ingeniería para la infraestructura de agua en las ciudades. La visión del desarrollo de estos tópicos dentro de la ingeniería ha sido basada en la participación disciplinar del conocimiento sin una solución integradora.

El planificador urbano desarrolla la ocupación consciente de que el ingeniero de transportes, de saneamiento y de otras infraestructuras encontrará una solución para el uso del suelo planificado o espontáneo que ocurre en las ciudades. En este sentido el agua es retirada del manantial aguas arriba (que se espera que no esté contaminado) y entregue aguas abajo sin tratamiento, el drenaje es proyectado para retirar el agua lo más rápido posible de cada lugar, transfiriendo hacia aguas abajo los excedentes. El residuo sólido es depositado en algún lugar remoto para no molestar a las personas que habiten las ciudades. Este conjunto de soluciones locales puede ser justificado dentro de un proyecto local con todas las ecuaciones que fueron desarrolladas a lo largo de los años por los ingenieros hidráulicos, hidrólogos y sanitarios para resolver un “problema dado”.

¿Cuál es la consecuencia de estos proyectos para la sociedad? Infelizmente este planteo ha sido un gran desastre. Si se hace una analogía con la medicina, sería como varios especialistas recetando medicamentos para distintos síntomas en una persona sin que sean observados los efectos colaterales combinados que el

cuerpo humano sufre.

Los problemas de hoy se reflejan en la salud de la población, en las inundaciones frecuentes, en la pérdida del medio ambiente rico y diversificado en muchas regiones. Con la transformación de un ambiente rural a un urbano, este problema cada vez se agrava más y por cuanto más tiempo perdure esta situación, mayor será la herencia de incompetencia para las próximas generaciones, las cuales recibirán un pasivo muy alto.

¿Qué es lo equivocado y qué puede ser hecho para remediar esta situación?:

- *El desarrollo urbano* no puede ocurrir sin la búsqueda de la sustentabilidad del espacio luego de la ocupación de la población. Para esto se deben definir reglas de uso y ocupación que preserven los condicionantes de la naturaleza y que permitan que el sistema pueda recibir transporte, abastecimiento de agua, sistemas sanitarios, tratamiento de efluentes, drenaje urbano, colecta, procesamiento y reciclaje de los residuos;
- El *abastecimiento de agua* debe ser realizado desde fuentes confiables que no estén contaminadas a partir de otras fuentes aguas arriba;
- Los excedentes cloacales deben ser tratados para que el agua utilizada no esté contaminada y el sistema hídrico tenga condiciones de recuperación;
- El *drenaje urbano* debe preservar las condiciones naturales de infiltración para evitar la transferencia hacia aguas abajo del aumento de caudal, volumen y carga de contaminantes del escurrimiento pluvial y de la erosión del suelo;
- Los *residuos sólidos* deben ser reciclados para intentar la sustentabilidad, la renta económica de esta riqueza y la disposición del material restante debe ser minimizada.

La búsqueda de estos objetivos no puede ser realizada individualmente, pero debe ser un trabajo colectivo que se inicia con la educación. Infelizmente, los conceptos inadecuados aún son enseñados en las universidades y la población todavía posee una percepción equivocada de las soluciones. Por lo tanto, es necesario cambiar e intentar una visión más sustentable del hombre en el espacio.

## 4.1 Fases de la gestión

A fines del siglo XIX y mediados del siglo XX, el concepto de *agua urbana* se resumía al abastecimiento, o sea, entregar agua a la población y retirar los desechos cloacales lo más lejos posible depositándolos en la naturaleza sin ningún tipo de tratamiento. Esta es la fase que se puede llamar *higienicista* (o *sanitarista*), en función de la preocupación de los sanitaristas de evitar la proliferación de enfermedades y reducir las enfermedades que se contraían a través de la vinculación hídrica. En este período la solución siempre fue recolectar el agua desde aguas arriba y depositar las cloacas aguas abajo de las urbes. Los excedentes pluviales eran planificados para escurrir libremente por las calles hacia los ríos. Este escenario fue aceptable mientras las ciudades tenían poblaciones de hasta 20 mil habitantes y se encontraban distantes una de la otra para que los desechos cloacales de una ciudad no contaminaran la otra.

Las ciudades crecieron, quedando más próximas una de las otras y la estrategia de desarrollo se mantuvo en la fase *higienicista*, generando lo que llamamos ciclo de contaminación (vea capítulo 1, Tucci, 2003), donde la ciudad aguas arriba contamina la de aguas abajo y ésta deberá contaminar la siguiente.

Muchas ciudades, por medio de sus tomadores de decisiones consideraron que las inversiones necesarias para el tratamiento de los desechos cloacales eran muy elevadas y optaron por inversiones en sectores considerados más importantes, sin comprender que estaban dejando de combatir el “*cáncer*” en su origen. Hoy la contaminación está tomando al sistema y el costo para solucionar esto es extremadamente alto.

Los países desarrollados salieron de la fase llamada aquí de higienicista (Tabla 4.1) hacia una nueva fase, la *correctiva* con el tratamiento de los desechos cloacales domésticos y el control de las inundaciones urbanas con detenciones (amortiguamiento). La cloaca domiciliar fue implementada casi en su totalidad, de esta manera el ambiente urbano mejoró, pero no recuperó su condición natural. Se observó que además del flujo cloacal existía la carga del flujo pluvial y la inadecuada distribución de los residuos sólidos, procesos totalmente interrelacionados en el día a día. Los residuos que no son recolectados, acaban dentro del sistema de drenaje. Los países desarrollados están actuando para resolver este tipo de problema. Este impacto presenta un costo aún mayor, pues es difuso y distribuido en toda la ciudad. En esta búsqueda de soluciones se descubrió que no bastaba actuar sobre el problema en el “*end of pipe*”, o sea, después que ocurrió y está

en los conductos, pero es necesario trabajar preventivamente en el origen del desarrollo urbano. De la misma manera que la medicina moderna está transformándose en una acción preventiva y no curativa.

Para la búsqueda de una solución ambientalmente sustentable es necesario el gerenciamiento integrado de la infraestructura urbana, comenzando por la definición de la ocupación del espacio teniendo en cuenta la preservación de las funciones naturales como es la infiltración y la red natural de drenaje. Este tipo de desarrollo ha recibido la denominación de LID (Low Impact Development) en los Estados Unidos (U.S. Department of Housing and Urban Development, 2003 y NAHB Research Center, 2004 y U.S. Environmental Protection Agency, 2000) o Water Sensitive Urban Design (WSUD) en Australia.

Pese a representar la manera moderna y ambiental de ocupación en los países desarrollados, en Brasil esta visión de ocupación del espacio no es nueva, pues Saturnino de Brito a comienzos del siglo XX planificó algunas ciudades según esta concepción la cual estaba adelantada a su tiempo. Infelizmente, no todas las ciudades adoptaron esta visión.

Los países en desarrollo están intentando salir de la primera fase hacia una acción correctiva y no poseen prácticamente ningún desarrollo dentro de la fase sustentable. La tercera fase involucra la integración entre el proyecto de implantación y el espacio, el proyecto arquitectónico y las funciones de la infraestructura de agua dentro del ambiente urbanizado y no apenas la búsqueda de espacio de infiltración dentro del diseño de un proyecto.

Tabla 4.1. Etapas del desarrollo sustentable urbano en los países desarrollados

<b>Años</b>	<b>Período</b>	<b>Características</b>
Hasta 1970	Higienicista	Abastecimiento de agua sin tratamiento de cloacas, transferencia hacia aguas abajo del escurrimiento pluvial por canalización
1970-1990	Correctivo	Tratamiento de cloacas, amortiguamiento cuantitativo del drenaje y control del impacto existente de la calidad del agua pluvial. Involucra, principalmente, la actuación sobre los impactos.
1990* -?	Sustentable	Planeamiento de la ocupación del espacio urbano, obedeciendo a los mecanismos Naturales del escurrimiento; Control de los microcontaminantes, de la polución difusa y el desarrollo sustentable del escurrimiento pluvial a través de la recuperación de la infiltración.

\* periodo que se inició este tipo de visión

## 4.2 La visión del desarrollo urbano integrado y sustentable

### 4.2.1 Visión integrada del ambiente urbano

Es importante caracterizar el desarrollo sustentable urbano el cual involucra la minimización del impacto ante la alteración natural del medio ambiente formado por el clima, el suelo, el aire, el agua, la biota, entre otros. Para alcanzar este objetivo es necesario comprender primero los impactos que producen cada una de las intervenciones y buscar soluciones en que este impacto quede restringido a un universo mínimo local a través de un proyecto de intervención sustentable a lo largo del tiempo.

El ambiente urbano es muy complejo para ser tratado en un texto introductorio como éste, por lo tanto se examina aquí el ambiente relacionado con las aguas pluviales que han sido la base de la nueva concepción de intervención para la ocupación del espacio.

En este escenario, la ocupación tradicional no intenta comprender como el suelo, el agua y las plantas están integradas en la naturaleza para intentar mitigar los efectos adversos de la introducción de superficies impermeables de tejados, paseos públicos, calles, entre otros. En la naturaleza la precipitación que no se infiltra tiende a formar escurrimientos naturales de acuerdo con la intensidad y frecuencia de la precipitación, cobertura y resistencia del suelo. El agua que infiltra, escurre por el subsuelo y en el acuífero hasta llegar a los ríos. Con la destrucción que ocasiona el drenaje urbano, el nuevo sistema es formado por calles, boca de tormenta, conductos y canales que aceleran el escurrimiento y aumentan los caudales máximos en varias veces, además de lavar las superficies transportando los contaminantes generados por las emisiones de autos, camiones, ómnibus, industrias y hospitales.

Entonces ¿cuál es la receta? Al comienzo se busco recuperar la capacidad de amortiguamiento a través de detenciones, pero aún así, el volumen superficial aumentó debido a las áreas impermeables y la zona utilizada para la detención fue retirada por la población debido a la polución generada y los conflictos para el uso de este espacio. Por lo tanto, se ha buscado recuperar la capacidad de infiltración perdida a través de acciones locales en las residencias, edificios y mediante el uso de trincheras de infiltración, pero aun dentro de una visión localizada y del tipo “*end of pipe*”, quiere decir, tratando de remediar un proyecto específico o un impacto.

La visión integrada en este caso, se inicia en la planificación del desmembramiento y ocupación del espacio en la fase del loteo, momento en el cual el proyecto debe estar ajustado para la preservación del escurrimiento natural existente. Este proyecto debe ser el contrario de lo que se proyecta actualmente, pues los de hoy apenas se basan en la maximización de la explotación del espacio independiente de la red de drenaje natural. El proyecto sustentable preserva el sistema natural y distribuye la ocupación en lotes menores, conserva una gran área verde común, retira el cordón de las calles de menor movimiento, integrando el asfalto con el césped u otros sistemas naturales vegetales, para que toda el agua se infiltre. Un proyecto de esta naturaleza retira las divisiones de las propiedades (como en las propiedades rurales en el proyecto de pequeñas cuencas y conservación del suelo). De esta manera, se reduce el escurrimiento a las condiciones preexistentes para las lluvias frecuentes, el agua se infiltra y no transfiere cantidad y calidad hacia aguas abajo. Esta es la característica de un proyecto residencial, mientras que las áreas industriales y comerciales exigen proyectos específicos de control, pero aún dentro de una integración conceptual de los proyectistas.

El costo de una infraestructura sustentable tiende a ser menor que el costo de un sistema correctivo, y éste aún menor que la infraestructura tradicional debido a la retirada de varios sistemas, como la eliminación de redes de conductos de drenaje, cordón cuneta, entre otros, que son remplazados por céspedes que infiltran, canaletas de césped y sistemas naturales protegidos.

El lector puede imaginar que esto es una utopía dentro de nuestra realidad, sin embargo, el emprendedor es sensible con respecto al costo y con respecto a la población que desea comprar un ambiente más adecuado y está buscando calidad de vida. Estos factores citados son muy importantes en la toma de decisión.

Difícilmente, los países en desarrollo podrán saltar etapas debido al gran pasivo existente en las ciudades en cuanto al escurrimiento pluvial (sin hablar de todo los demás que están pendientes). Por lo tanto, es necesario desarrollar estrategias dentro de dos plataformas principales:

- a. controlar los impactos existentes a través del escenario de acciones correctivas estructurales que tratan de la gestión por subcuencas urbanas;
- b. medidas no estructurales que lleven a los nuevos emprendimientos a utilizar un desarrollo con menor impacto y más sustentable.

Estas dos medidas pueden ser implementadas a través del Plan Director de Aguas Pluviales (o como algunos denominan de Drenaje Urbana), o mejor aún, por un Plan Director Urbano que incluya estos elementos más el escurrimiento sanitario, residuo sólido, transporte y uso del suelo (Figura 4.1).

En la Figura 4.2 se pueden observar como los diferentes Planes de la ciudad se integran y buscan identificar los componentes de integración visando la solución de estos aspectos de manera integrada.



Figura 4.1. Visión integrada (Tucci, 2003)

La acción preventiva en el desarrollo urbano reduce el costo de la solución de los problemas relacionados con el agua. Planeando la ciudad con áreas de ocupación y con control de la fuente del drenaje, la distribución del espacio de riesgo y el desarrollo de los sistemas de abastecimiento y agotamiento, los costos serán menores que los de una crisis, donde el remedio pasa a tener costos inviables para el municipio.

El desarrollo del planeamiento de las áreas urbanas involucra principalmente:

- planeamiento del desarrollo urbano;
- transporte;
- abastecimiento de agua y saneamiento;

- drenaje urbano, control de inundaciones y de la erosión;
- residuo sólido;
- control ambiental.



Figura 4.2. Interfaz entre los Planes de la Ciudad y el Plan Director de Aguas Pluviales o del Drenaje Urbano.

El planeamiento urbano debe considerar los aspectos relacionados con el agua, el uso del suelo y la definición de las tendencias de los vectores de expansión de la ciudad. Considerando los aspectos relacionados con el agua, existe una fuerte interrelación entre los mismos. Algunas de estas interrelaciones son las siguientes:

- el abastecimiento de agua es realizado a partir de manantiales que pueden ser contaminados por los flujos cloacales, pluviales o por depósitos de residuos sólidos;
- la solución del control del escurrimiento del drenaje urbano depende de la existencia de red de cloacas y de tratamiento de ésta, además de la eliminación de las conexiones entre las redes;
- la erosión del suelo produce colmatación e interfiere en la ocupación del suelo, en las calles, sistemas de cloacas, entre otros;
- la limpieza de las calles, la recolección y disposición de residuos sólidos interfieren en la cantidad y en la calidad los excedentes pluviales.

La mayor dificultad para la implementación del planeamiento integrado proviene de una limitada capacidad institucional de los municipios para afrontar problemas complejos e interdisciplinarios y la forma sectorial como la gestión municipal se encuentra organizada.

#### **4.2.2 Aspectos Institucionales:**

La estructura institucional es la base del gerenciamiento de los recursos hídricos urbanos y de su política de control. La definición institucional depende de los espacios de atribución en la organización del país, su interrelación legal y de gestión en cuanto al agua, el uso del suelo y el medio ambiente. Para establecer el mecanismo de gerenciamiento de estos elementos es necesario definir los espacios geográficos relacionados con el problema.

#### **Espacio geográfico del gerenciamiento**

El impacto de los efluentes cloacales y del drenaje urbano pueden ser analizados dentro de dos contextos espaciales diferentes, discutidos a continuación:

**Impactos que extrapolan el municipio:** ampliando las crecidas y contaminando las hacia aguas abajo los cuerpos hídricos como ríos, lagos y reservorios. Esta contaminación es denominada *polución puntual o difusa urbana*. Este tipo de impacto es resultante de las acciones dentro de la ciudad que son transferidas hacia el resto de la cuenca. Para su control pueden ser establecidos objetivos a ser alcanzados y generalmente son regulados por medio de la legislación ambiental y de recursos hídricos federal o provincial;

**Impacto dentro de las ciudades:** estos impactos son diseminados dentro de la ciudad, alcanzando a su propia población. El control en este caso es establecido a través de medidas desarrolladas dentro del municipio a través de la legislación municipal y por medio de acciones estructurales específicas.

#### **Experiencias**

La experiencia americana en el proceso ha sido aplicada a través de un programa nacional desarrollado por la EPA (Environmental Protection Agency) que obliga a todas las ciudades con más de 100 mil habitantes a establecer un programa de BMP (Best Management Practices). Recientemente se inició la

segunda fase del programa para ciudades con población inferior a la mencionada (Roesner y Traina, 1994). Las BMP's involucran el control de la calidad y cantidad de agua por parte del municipio a través de medidas estructurales y no estructurales. El municipio debe demostrar que está avanzando e intentando alcanzar estos objetivos a través de un Plan. Este proceso contribuye para reducir la polución difusa de los ríos en las proximidades de las ciudades. La penalidad que puede ser impuesta es la acción judicial de la EPA contra el municipio.

La experiencia francesa involucra el gerenciamiento de los impactos y controles a través del comité de cuenca, que es el Foro básico para la toma de decisiones. Las metas que los municipios y otros actores deben ser alcanzados son decididas en este comité.

### Legislaciones

Las legislaciones que involucran las aguas urbanas están relacionadas con: recursos hídricos, uso del suelo y licencia ambiental. A continuación se presenta un análisis dentro del escenario brasileño donde existen los niveles: Federal (país), Estatal (Estado o Provincia) y Municipal (Figura 4.3).

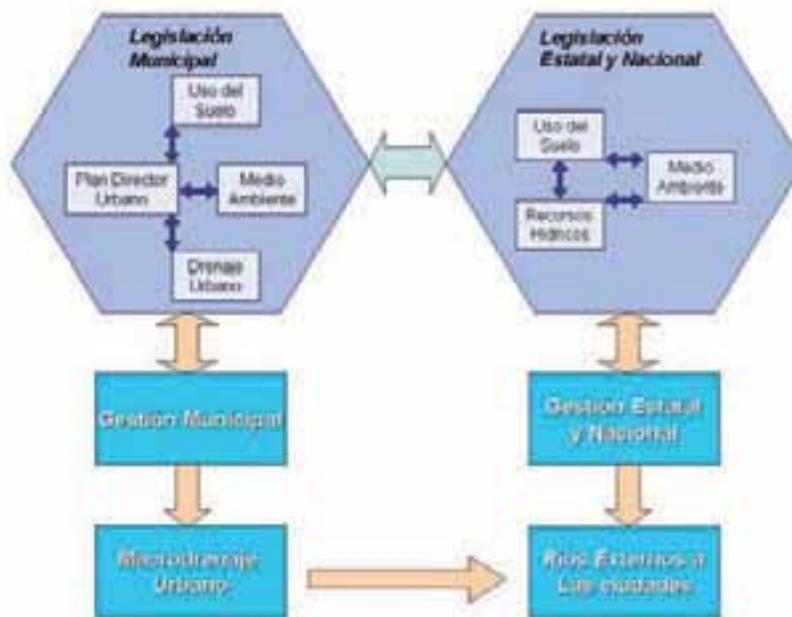


Figura 4.3. Espacios del gerenciamiento (Tucci, 2003).

**En relación a los Recursos Hídricos** La Constitución Federal define el dominio de los ríos y la legislación de recursos hídricos a nivel federal establece los principios básicos de la gestión a través de cuencas hidrográficas. Las cuencas pueden ser de dominio provincial o federal.

Algunas legislaciones provinciales de recursos hídricos se establecen criterios para regular el uso del agua, pero no legislan sobre el control relativo a la descarga de efluentes del drenaje. La legislación ambiental establece normas y patrones de calidad del agua de los ríos a través de clases, pero no define restricciones con relación a los efluentes urbanos lanzados en los ríos. La acción de los órganos provinciales de control ambiental es limitada debido a la falta de capacidad de los municipios los cuales deben realizar inversiones para realizar estos controles. Por lo tanto, no existe exigencia y no existe presión para inversiones en el sector.

Dentro de este contexto el escurrimiento pluvial resultante de las ciudades debe ser objeto de regulación o de control a ser previstos en la Planificación de la Cuenca. Como estos procedimientos aún no están siendo cobrados por los Estados, no existe en el momento una presión directa para la reducción de los impactos resultantes de la urbanización.

**En relación al uso del suelo:** En la Constitución Federal de Brasil, artículo 30, se define que el uso del suelo es municipal. Pero, las Provincias y la Unión pueden establecer normas para la disciplina del uso del suelo visando la protección ambiental, control de la polución, salud pública y de la seguridad. De esta manera, se observa que en el caso del drenaje urbano, que involucra el medio ambiente y el control de la polución, la materia es de competencia concurrente entre Municipio, Provincia y Nación. La tendencia es que los municipios introduzcan directrices de macrozonificación urbana en los Planes Directores de Desarrollo Urbano, incentivados por las Provincias.

Se observa que en la zonificación relativa al uso del suelo, los aspectos de aguas urbanas como los desechos cloacales, los residuos sólidos, el drenaje y anegamiento no han sido contemplados por los municipios. Lo que ha sido observado son legislaciones restrictivas en cuanto a la protección de manantiales y ocupación de áreas ambientales. La legislación muy restrictiva sólo produce reacciones negativas y desobediencia. Por lo tanto, no alcanzan los objetivos de control ambiental deseados. Esto ocurre en la forma de invasión de las áreas protegidas, loteos irregulares, entre otros.

Al introducir restricciones del uso del suelo es necesario que la legislación dé alternativas económicas al propietario de la tierra, o que el municipio compre la propiedad. En una sociedad democrática el impedimento del uso del espacio privado para el bien público debe ser compensado, siendo este espacio estructurado para uso de la sociedad, caso contrario se vuelve una

confiscación. Actualmente, las legislaciones del uso del suelo se apropian de la propiedad privada y aún exigen el pago de impuestos por el propietario, que no posee alternativa económica. La consecuencia inmediata en la mayoría de las situaciones es la desobediencia legal.

**En relación a la licencia ambiental:** esta licencia establece los límites para construcción y operación de canales de drenaje, regulado por la Ley 6938/81 y resolución CONAMA no. 237/97. De la misma manera, la resolución CONAMA 1/86 art. 2º, VII establece la necesidad de licencia ambiental para “*obras hidráulicas de drenaje*”.

### 4.3 Gestión urbana y de la cuenca hidrográfica

La gestión de las acciones dentro del ambiente urbano puede ser definida de acuerdo con la relación de dependencia del agua a través de la cuenca hidrográfica o de la jurisdicción administrativa del municipio, Provincia o Nación. La tendencia de la gestión de los recursos hídricos ha sido realizada por medio de la cuenca hidrográfica, sin embargo, la gestión del uso del suelo es realizada por el municipio o grupo de municipios en una región Metropolitana. La gestión puede ser realizada de acuerdo con la definición del espacio geográfico externo e interno de la ciudad.

Las Planificaciones en las cuencas hidrográficas han sido desarrollados para cuencas grandes (>3.000km<sup>2</sup>). En este escenario existen varias ciudades que interfieren una en las otras transfiriendo impactos. El Plan de la cuenca difícilmente podrá involucrar todas las medidas necesarias en cada una de las ciudades, pero se deben establecer los condicionamientos externos a las ciudades como la calidad de sus efluentes, las alteraciones de su cantidad, que permitan la transferencia de los impactos.

El ambiente interno de las ciudades son las gestiones dentro del municipio para atender los condicionamientos externos previstos en el Plan de la Cuenca para evitar los impactos y buscar la mejora de la cantidad y calidad del agua en el conjunto de la cuenca, además de los condicionamientos internos que tratan de evitar los impactos a la población de la propia ciudad.

Estos dos espacios principales definen los gestores, los instrumentos y las metas de gestión de estos instrumentos como es descrito en la Tabla 4.2. La construcción global de esta

estructura de gestión se origina con algunas dificultades:

- Limitada capacidad de los municipios para desarrollar la gestión;
- El sistema de gestión de las cuencas aún no es una realidad consolidada en la mayoría de los países de América del Sur;
- Reducida capacidad de financiamiento de las acciones por parte de los municipios y el alto nivel de endeudamiento de los mismos.

En el primer caso, la solución pasa por el apoyo provincial y federal a través de oficinas técnicas que apoyen las ciudades de menor porte en el desarrollo de sus acciones de planeamiento e implementación. El segundo dependerá de la transición y evolución del desarrollo de la gestión en el país. El tercero dependerá fundamentalmente del desarrollo de un programa a nivel federal y provincial con un fondo de financiamiento para posibilitar la concreción de las acciones planteadas.

Tabla 4.2. Espacio de gestión de aguas urbanas

Espacio	Dominio	Gestores	Instrumento	Característica
Cuenca hidrográfica <sup>1</sup>	Provincia o Gobierno Federal	Comité y Agencias	Plan de la cuenca	Gestión de la cantidad y calidad del agua en el sistema de ríos que formaron la cuenca hidrográfica, evitando la transferencia de impactos
Municipio <sup>2</sup>	Municipios o Región Metropolitana	Municipio	Plan director urbano y Plan integrado de escurrimiento, drenaje urbano y residuo sólido	Minimizar los impactos de cantidad y calidad dentro de la ciudad, en las pequeñas cuencas urbanas y no transferir impactos hacia el sistema de ríos.

1 – cuencas de gran porte (>1000 km<sup>2</sup>); 2 – área de alcance del municipio y sus pequeñas subcuencas del macrodrenaje (<50 km<sup>2</sup>). Los valores de las áreas son indicativos y pueden ser alterados para ciudades de gran porte.

**Gerenciamiento de cuencas urbanas compartidas entre dos o más municipios:** Gran parte de las ciudades posee cuencas hidrográficas comunes con otros municipios. Generalmente existen los siguientes escenarios: (a) un municipio está *aguas arriba* de otro; (b) el río divide los municipios.

El control institucional de las aguas urbanas, que involucra por lo menos dos municipios, puede ser realizado de la siguiente:

- a través de una legislación municipal adecuada para cada municipio;
- a través de una legislación provincial que establezca los patrones a ser mantenidos en los municipios de tal manera que no se transfiera los impactos;
- uso de los dos procedimientos anteriores.

Estos pueden ser realizados dentro del comité de la cuenca y cuando los Planes Provinciales desarrollen la reglamentación sectorial. Por lo tanto, cuando sean desarrolladas las Planificaciones de las Cuencas que involucran más de un municipio, se debe intentar acordar acciones conjuntas con estos municipios para obtener la planificación integral la cuenca.

**Potenciales medidas de control externo a las áreas urbanas:** El mecanismo previsto en la legislación brasileña para el gerenciamiento externo de las ciudades es el Plan de Recursos Hídricos de la Cuenca. Sin embargo, en el referido Plan difícilmente será posible elaborar los Planes de Drenaje, Esguerrimiento Sanitario y Residuo Sólido de cada ciudad contenida en la cuenca. El Plan debería establecer las metas que las ciudades deben alcanzar para que el río principal y sus afluentes alcancen niveles ambientalmente adecuados de calidad del agua. El Plan Integrado de Drenaje Urbano, Esguerrimientos Sanitarios y Residuos Sólidos deben obedecer a los controles establecidos en el Plan de la Cuenca en el cual esté insertado.

Los mecanismos de inducción básicos para este proceso son: (a) institucional y (b) económicos financieros.

*La legislación:* Actualmente la legislación prevé el otorgamiento para efluentes. De esta manera, podrían ser establecidos dos mecanismos básicos:

*(a) definición de normas y criterios para la regulación de efluentes que alteren la calidad y cantidad de aguas provenientes de áreas urbanas; por ejemplo:*

*“Art. (¿?) Es de responsabilidad de (...) la definición de*

*critérios y normas cuanto las alteraciones en la cantidad y calidad del agua pluvial proveniente de áreas urbanas.*

El segundo componente se refiere al mecanismo para alcanzar estos objetivos. Este mecanismo debe ser un Plan Integrado de Esgurrimiento Sanitario, Drenaje Urbano y Residuo Sólido. No es posible imaginar un planeamiento sectorial ya que los aspectos citados están íntimamente ligados. Por ejemplo:

*Art (¿?) La regulación de los flujos cloacales, pluviales y disposición de los residuos sólidos de los municipios debe ser precedido por los Planes Integrados de Esgurrimiento Sanitario, Residuos Sólidos y Drenaje Urbano del Municipio buscando la atención de las exigencias del artículo (¿?) de este decreto.*

*Párrafo 1º - Para las ciudades con más de 200.000 ( a ser mejor definido) habitantes el plan deberá ser concluido en el máximo de 5 años. Para las demás ciudades el plan deberá ser concluido en 10 años.*

*Párrafo 2º – El acompañamiento de la implementación de los planes quedará a cargo del comité de las cuencas hidrográficas.*

El texto citado en los párrafos mencionados no ha pasado por una revisión jurídica adecuada y debe servir apenas como orientación del contenido técnico.

*Financiamiento:* En la Figura 4.4, se presenta un ejemplo de la configuración de interacción entre los agentes de la cuenca y de los municipios previsto en el plan director de drenaje urbano de la región metropolitana de Curitiba (Brasil).

Los potenciales elementos de inducción para los municipios serían los siguientes:

- El comité de cuenca subsidiaria empieza a partir de los recursos para elaboración de los Planes;
- Crear un fondo económico para financiar las acciones del Plan previsto para las ciudades. El resarcimiento de las inversiones serían a través de las tasas municipales específicas para el esgurrimiento sanitario, residuo sólido y drenaje urbano, este último basado en el área impermeable de las propiedades. El Plan debería inducir la transparencia

de estos mecanismos dentro del municipio visando la sustentabilidad a largo período del sistema de cobro, con la debida fiscalización.



Figura 4.4 Ejemplo de la interacción técnico financiera (SUDHERSA, 2002)

**Potenciales medidas de control interno a las áreas urbanas:**

Las medidas adoptadas para la gestión de las aguas urbanas es el Plan Integrado de Saneamiento Ambiental. Este plan puede ser desarrollado totalmente integrado para ciudades menores y de acuerdo con sus componentes, observadas las interfaces en los municipios mayores. En el capítulo siguiente serán destacados los elementos del Plan de Aguas Pluviales y sus interfaces dentro del Plan de Saneamiento Ambiental.

## Referencias

- CRUZ, M. 2004. Otimização do controle do escoamento na bacia hidrográfica urbana. Tese de doutorado. IPH – UFRGS.
- NAHB RESEARCH CENTER. 2004. Municipal Guide to Low Impact Development. Maryland. Disponível online em <http://www.lowimpactdevelopment.org>
- ROSSNER, L.A; TRAINA, P. 1994. Overview of federal law and USEPA regulations for urban runoff. *Water Science & Technology* V29 n 1-2 p445-454
- SUDERSHA, 2002. Medidas microestruturais. Plano Diretor de Drenagem Urbana da Região Metropolitana de Curitiba. GIZMILLI, Engenharia do Brasil Ltda.
- TUCCI, C. E. M. (2002). Gerenciamento da Drenagem Urbana. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Volume 7, n.1 Jan/Mar, 5-27
- TUCCI, C. E. M. (2003). Águas urbanas. In: Inundações urbanas da América do Sul GWP ABRH.
- U.S. DEPARTMENT OF HOUSING AND URBAN DEVELOPMENT. 2003. The practice of Low Impact Development. 119p, Washington, D.C.. Disponível online em <http://www.lowimpactdevelopment.org/>
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 2000. Low Impact Development (LID): A Literature Review. 33p, Washington, D.C.. Disponível online em <http://lowimpactdevelopment.org/pub/>





## Plan de Aguas Pluviales

*La gestión de aguas pluviales dentro del municipio es realizada dentro del Plan de Aguas Pluviales y debe estar subordinado al Plan Director Urbano de las ciudades.*

**E**l Plan de Aguas Pluviales es el mecanismo de gerenciamiento de las inundaciones ribereñas y del drenaje urbano en las ciudades. Este plan debe estar integrado a los distintos planes de infraestructura de la ciudad, principalmente los relacionados al Saneamiento Ambiental: aguas, cloacas, residuos sólidos y medio ambiente, y subordinado al Plan Director Urbano que integra el conjunto de planeamiento de la ciudad.

### 5.1 Interfaces entre los Planes

Los principales aspectos relacionados con las interfaces de los Planes de Saneamiento y Residuos Sólidos son los siguientes:

#### 5.1.1 Gestión

La gestión de los servicios de aguas urbanas, o sea, de agua y saneamiento básico, drenaje urbano y residuos sólidos deberían ser implementados por una única estructura municipal en función de la sinergia y economía de escala de los servicios.

En algunos países como Brasil, los servicios de agua y saneamiento fueron desarrollados a lo largo del tiempo por empresas provinciales, mientras que todos los demás servicios quedaron a nivel municipal. En los municipios donde esto ocurre difícilmente esta configuración podrá cambiar a corto plazo, a pesar de ser de atribución del municipio la concesión de los servicios de agua y saneamiento. En este caso, es necesario que

los demás servicios sean agregados en una única institución y que sean definidos mecanismos institucionales de gestión.

### **5.1.2 Saneamiento y drenaje urbano**

Los escenarios de gestión de estos servicios varían de acuerdo con el escenario de cada ciudad. En América del Sur la tradición es el desarrollo de sistemas separadores de escurrimiento sanitario y drenaje urbano; sin embargo, la realidad es muy distinta de este tipo de planeamiento en función de la desorganización institucional. Los principales escenarios son los siguientes:

- a. *sin drenaje o escurrimiento sanitario*: este es el caso de países más pobres o ciudades pobres en países de la región. Cuando la ciudad es pequeña y el suelo tiene la capacidad de absorción para el uso de fosas sépticas, los principales problemas estarán en el drenaje urbano, con aumento de las inundaciones y de erosión del suelo (por ejemplo, algunas ciudades de Paraguay y barrios de ciudades pobres en Brasil y otros países de la región). Cuando el suelo es poco permeable la situación se retrotrae a un escenario similar al del siglo IXX, donde la cloaca escurría por las calles, junto con el drenaje, creando condiciones inadecuadas para la salud.
- b. *con escurrimiento sanitario y sin drenaje*: La capacidad de un sistema de cloacas es insuficiente para recibir el flujo pluvial que escurre por las calles. El mayor problema es el aumento de las inundaciones, volviendo insustentable las ciudades en los días de lluvia. En Barranquilla, Colombia, cuando llueve las personas no pueden salir a la calle debido al riesgo de muerte. Sin embargo, la ciudad tiene cobertura completa de agua y saneamiento.
- c. *sin escurrimiento sanitario y con drenaje*: Este es el caso más frecuente en Brasil; donde el drenaje presenta mayor capacidad de transporte, escurre en forma conjunta los sistemas cloacaes y pluviales. Este escenario permite llevar las aguas negras lejos de la población, pero el impacto ambiental sobre el sistema fluvial es alto. En los días de lluvia el riesgo de proliferación de enfermedades es alto y, en contrapartida, en el período seco existe el problema del pésimo olor en la ciudad. En este caso la gestión debe ser realizada de manera integrada ya que existe una fuerte integración entre los sistemas. En ciudades donde prácticamente no existe red de cloacas difícilmente la ciudad conseguirá desarrollar el sistema

separado para toda la ciudad en su primer planeamiento. Deberá ocurrir un período de transición entre el sistema mixto y el sistema separado.

Ejemplo de esto último es el caso de Caxias do Sul (RS, Brasil), (IPH, 2003). La estrategia fue en una primera fase del sistema implementar colectores de cloacas junto al sistema de macrodrenaje para coleccionar la cloaca doméstica que llega por el drenaje secundario y primario, juntamente con el escurrimiento de estiaje. Este volumen es transportado para la Estación de Tratamiento. El excedente escurre para el macrodrenaje y es amortiguado y escurrido por los controles del drenaje urbano. De esta manera se obtiene una solución para la calidad y cantidad de agua hacia aguas abajo de la ciudad. A lo largo del tiempo y de acuerdo con la capacidad de inversión, la ciudad puede introducir el sistema separado por el sistema secundario y primario (vea capítulo 4).

### **5.1.3 Drenaje urbano, erosión y residuos sólidos**

Esta interfaz tiene los siguientes componentes:

- a. *Erosión* El desarrollo urbano acelera el escurrimiento generando erosión en suelos frágiles, generando impactos significativos en el ambiente urbano. La gestión de este problema está en el entrenamiento de profesionales y en la regulación de los nuevos emprendimientos para disminuir la energía del escurrimiento aguas abajo de los emprendimientos.
- b. *Producción de residuos sólidos:* los residuos sólidos que llegan al drenaje producen impactos ambientales aguas abajo y reducen la capacidad del escurrimiento, aumentando la frecuencia de las inundaciones. Cuanto más ineficiente es el sistema de colecta de residuos de una ciudad, mayor es la carga para el sistema de drenaje. Por lo tanto, es necesario desarrollar un sistema eficiente que integre el drenaje y la colecta de los residuos y la limpieza urbana. La gran producción de residuos en el drenaje ocurre principalmente después de algunos días sin lluvia. Cuando la lluvia ocurre la carga es muy alta. Por lo tanto, el planeamiento de la limpieza urbana antes de los días de lluvias es una práctica fundamental para reducir la cantidad de material sólido en el drenaje.

### **5.1.4 Recuperación ambiental**

Todos los elementos del Plan de Saneamiento Ambiental

poseen relación directa con la conservación ambiental urbana. Los efluentes y residuos urbanos contaminan el agua y el suelo, además de generar degradación distribuida en toda la ciudad. El Plan ambiental de la ciudad está principalmente conectado al Plan de Saneamiento Ambiental en los siguientes aspectos:

- calidad del agua de los ríos urbanos;
- área de degradación debido a la erosión;
- control de las áreas de deposición de residuos sólidos;
- contaminación de los acuíferos urbanos.

## 5.2 Estructura

La estructura del Plan Director de Drenaje Urbano se presenta en la Figura 5.1 (Tucci, 2001). Los grandes grupos son:

- Política de Aguas Pluviales
- Medidas: no estructurales y estructurales
- Productos
- Programas
- Informaciones.

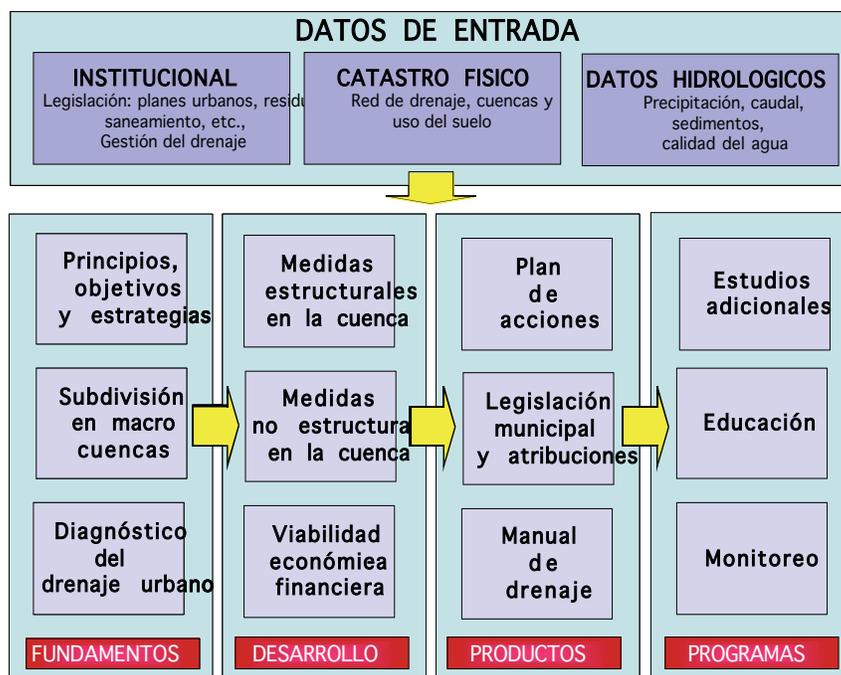


Figura 5.1. Estructura del Plan de Aguas Pluviales (adaptado de Tucci, 2001)

Se puede observar en esta estructura que existen un grupo

de entradas al Plan que son las informaciones básicas para su desarrollo y éstas son: catastro de la red pluvial (cuencas hidrográficas y sus características físicas), datos hidrológicos (precipitación, caudal y sedimentos), Plan Director Urbano y Ambiental, Plan de Cloacas y Residuos Sólidos y la Gestión Urbana actual.

La política del Plan se basa en lo siguiente:

- Principios y objetivos del control de las aguas pluviales;
- Estrategias de desarrollo del plan como es la compatibilidad entre los Planes preparados para la ciudad;
- Definición de escenarios de desarrollo urbano y riesgos de inundaciones.

### 5.2.1 Principios

Los principios a continuación caracterizados tienen como objetivo evitar los problemas descritos en el capítulo anterior. Estos principios son esenciales para el buen desarrollo de un programa de aguas pluviales sustentable:

1. *El Plan Director de Drenaje Urbano es parte del Plan de Desarrollo Urbano y Ambiental de la ciudad. El drenaje es parte de la infraestructura urbana, por lo tanto, debe ser planeado en conjunto con los demás sistemas, principalmente el plan de control ambiental, escurrimiento sanitario, disposición de material sólido y tránsito;*
2. El escurrimiento durante los eventos de lluvia no puede ser ampliado por la ocupación de la cuenca, sea en un simple loteo (o lotificación), sea en las obras de macrodrenaje existentes en el ambiente urbano. Esto se aplica a un simple relleno urbano, la construcción de puentes, autopistas y a la implementación de los espacios urbanos. *El principio es que cada usuario urbano no amplíe la crecida natural;*
3. El Plan de control del drenaje urbano debe contemplar las cuencas hidrográficas sobre las cuales la urbanización se desarrolle. Las medidas no pueden reducir el impacto de un área en detrimento de otra, o sea, *los impactos no deben ser transferidos*. En el caso que esto ocurra, se debe prever una medida que mitigue los efectos.
4. El Plan debe prever *la minimización del impacto ambiental debido al escurrimiento pluvial* a través de la compatibilización con el planeamiento del saneamiento

- ambiental, control del material sólido y la reducción de la carga contaminante en las aguas pluviales que escurran para el sistema fluvial interno y externo de la ciudad;
5. El Plan Director de Drenaje Urbano, *en su reglamentación, debe contemplar el planeamiento de las áreas a ser desarrolladas y la densificación de las áreas actualmente loteadas*. Después de que la cuenca, o parte de ella, esté ocupada, difícilmente el poder público tendrá condiciones de responsabilizar aquellos que estén ampliando la crecida. Por lo tanto, si la acción pública no es realizada preventivamente a través del gerenciamiento, las consecuencias económicas y sociales futuras serán mayores para todo el municipio;
  6. En las áreas ribereñas, el control de crecidas es realizado a través de medidas estructurales y no estructurales, que difícilmente están dissociadas. Las medidas estructurales involucran gran cantidad de recursos y resuelven sólo problemas específicos y localizados. Esto no significa que este tipo de medida sea totalmente descartable. La política de control de crecidas, ciertamente, podrá llegar a soluciones estructurales para algunos lugares, pero dentro de la visión de conjunto de toda la cuenca, donde la misma está racionalmente integrada con otras medidas preventivas (no estructurales) y compatibilizadas con el desarrollo urbano.
  7. El control debe ser realizado considerando la cuenca como un todo y no en tramos aislados;
  8. *Los medios de implantación de control de crecidas son el PDDUA, las Legislaciones Municipal/Provincial y el Manual de Drenaje*. El primero establece las líneas principales, el segundo ejecuta los controles y el tercer tiene como finalidad la orientación.
  9. El control permanente: *El control de crecidas es un proceso permanente*; no basta con que se establezcan reglamentos y que se construyan obras de protección; es necesario estar atento a las potenciales violaciones de la legislación y en la expansión de la ocupación del suelo de las áreas de riesgo. Por lo tanto, se recomienda que:
    - Ningún espacio de riesgo sea expropiado si no hay una inmediata ocupación pública que evite nuevamente su invasión;
    - La comunidad tenga una participación en los planes, en su ejecución y en la continua obediencia

de las medidas de control de crecidas.

10. La educación: La educación de ingenieros, arquitectos, agrónomos, y geólogos, entre otros profesionales, de la población y de los administradores públicos es esencial para que *las decisiones públicas sean tomadas con conciencia por todos*.
11. El costo de la implantación de las medidas estructurales y de la operación y mantenimiento del drenaje urbano debe ser transferido a los propietarios de los lotes, calculados de acuerdo con el área impermeable, que es la que genera el volumen adicional con relación a las condiciones naturales;
12. El conjunto de estos principios trata *el control del escurrimiento urbano en la fuente* distribuyendo las medidas para aquellos que producen el aumento del escurrimiento y la contaminación de las aguas pluviales;
13. Es esencial una gestión eficiente en el mantenimiento del drenaje y en la fiscalización de la reglamentación.

### **5.2.2 Objetivos del Plan**

El Plan Director de Drenaje Urbano tiene como objetivo crear mecanismos de gestión de la infraestructura urbana relacionado con el escurrimiento de las aguas pluviales y de los ríos en el área urbana. Este planeamiento pretende evitar pérdidas económicas, mejorar las condiciones de salud y del medio ambiente de la ciudad, dentro de principios económicos, sociales y ambientales definidos por el Plan Director de Desarrollo Urbano y Ambiental de la ciudad.

El Plan Director de Drenaje Urbano tiene como metas:

- Planificar la distribución del agua pluvial en el tiempo y en el espacio, con base en la tendencia de ocupación urbana compatibilizando este desarrollo con la infraestructura para evitar perjuicios económicos y ambientales;
- Controlar la ocupación de áreas de riesgo de inundación a través de reglamentación;
- Convivencia con las crecidas en las áreas de bajo riesgo.

Los condicionamientos urbanos son el resultado de varios factores que no serán discutidos en este texto, pues se parte del principio que los mismos fueron definidos dentro del ámbito del Plan Director de Desarrollo Urbano y Ambiental. Sin embargo, debido a la interferencia que la ocupación del suelo tiene sobre el

drenaje, existen elementos del Plan de Drenaje que son utilizados para reglamentar los artículos del Plan Director de Desarrollo Urbano y Ambiental.

### **5.2.3 Estrategias**

Las estrategias pueden ser establecidas considerando el desarrollo del Plan y del control ambiental:

#### **Cuanto al desarrollo del Plan**

El Plan Director de Drenaje Urbano puede ser desarrollado según dos estrategias básicas:

**Para las áreas no ocupadas:** desarrollo de medidas no estructurales relacionadas con la reglamentación del drenaje urbano y la ocupación de los espacios de riesgo, intentando contener los impactos de futuros desarrollos. Estas medidas buscan transferir el costo del control de las alteraciones hidrológicas debida a la urbanización para quien efectivamente produce las alteraciones;

**Para las áreas que están ocupadas:** el Plan desarrolla estudios específicos por macrocuencas urbanas con el objetivo de planificar las medidas necesarias para el control de los impactos dentro de estas cuencas, sin que las mismas transfieran hacia aguas abajo los impactos ya existentes. En este planeamiento se da prioridad a usos de almacenamiento temporario a través de detenciones.

#### **Cuanto al control ambiental**

Con relación a los controles ambientales, caracterizados por la calidad del agua del escurrimiento pluvial, material sólido transportado y la contaminación del agua subterránea, las estrategias son las siguientes:

1. Para las áreas donde no existe red de cloacas o existe gran cantidad de conexiones de efluentes en la red pluvial, las medidas de control priorizan el control cuantitativo. Este tipo de medida utiliza la detención solamente para el volumen excedente de la capacidad de drenaje actual, evitando que el escurrimiento en las épocas de sequía y el volumen de la primera parte del hidrograma contamine las detenciones. Estas áreas de almacenamiento son mantenidas secas durante el año y sólo en los eventos con tiempo de retorno superior a los 2 años son utilizadas. En

- algunos casos es necesario utilizarlas para riesgos menores debido a la baja capacidad de la red existente.
2. Cuando la red cloacal esté implementada, el Plan puede ser implementado en su segunda etapa, modificándose el sistema de escurrimiento junto a las detenciones para que éstas puedan también contribuir para el control de la calidad del agua pluvial.
  3. Para el control de la contaminación de los acuíferos y el control de material sólido deberán ser creados programas a medio plazo objetivando la reducción de esa contaminación a través de medidas distribuidas en la ciudad.

#### **5.2.4 Escenarios**

Se deben considerar dos aspectos en los escenarios de desarrollo del plan: (a) escenario de desarrollo urbano; (b) medidas de control adoptadas en los escenarios. Los principales escenarios identificados cuanto al desarrollo urbano en este estudio son los siguientes:

- i. *Actual*: Condiciones de urbanización actual, obtenida de acuerdo con estimaciones demográficas e imágenes de satélite;
- ii. *Escenario actual + PDDUA*: Este escenario involucra la ocupación actual para las partes de la cuenca donde el Plan fue superado en su previsión, junto a las pautas del Plan para las áreas en que el Plan no fue superado;
- iii. *Escenario de ocupación máxima*: Este escenario involucra la ocupación máxima de acuerdo con lo que viene siendo observado en diferentes partes de la ciudad que se encuentran en esta etapa. Este escenario representa la situación que ocurrirá si el uso disciplinado del suelo no es obedecido.

El primer escenario representa la etapa próxima del actual, el segundo es el escenario previsto por el PDUA de la ciudad. El segundo escenario representa la situación más realista, pues acepta el desarrollo realizado fuera del Plan Director y para las partes aún en desarrollo las pautas del Plan previsto. El tercer escenario es aquel asociado a la inexistencia de medidas de control, es decir, si nada se realiza para cambiar la tendencia.

En cuanto a las medidas de control adoptadas en cada escenario del Plan se debe considerar lo siguiente:

1. El planeamiento para el escenario actual con las medidas no estructurales presupone que las mismas pasan a funcionar en la fecha en que son realizados los relevamientos de la cuenca. Ello no es verdad, ya que habrá un tiempo entre la finalización de estos estudios y la aprobación de la reglamentación;
2. Es posible adoptar el escenario futuro como nivel superior de intervenciones, pues presupone que las medidas de reglamentación podrán demorar a ser adoptadas; cuando la reglamentación propuesta sea aprobada las dimensiones de las alternativas deberán ser revisadas a nivel de proyecto.

Generalmente, la segunda alternativa es la elegida. El riesgo de 10 años de tiempo de retorno puede ser elegido para el dimensionamiento del macrodrenaje, porque generalmente a partir de este riesgo las medidas de control estructurales no son económicamente viables. Los mayores costos de los perjuicios de las inundaciones se encuentran en las inundaciones con alto riesgo (bajo tiempo de retorno), debido a la frecuencia con que ocurren. De esta manera, el beneficio de uso de medidas de control para riesgos bajos (alto tiempo de retorno) pueden representar gran costos y no presentan un beneficio medio alto. El riesgo debe ser evaluado en función del riesgo de vida y de los perjuicios económicos. El uso del riesgo de 10 años es frecuente, pero debe ser evaluado en cada caso.

## 5.3 Medidas

### 5.3.1 Medidas no-estructurales

Las principales medidas no estructurales son las siguientes:

- legislación y reglamentación sobre el aumento del caudal debido a la urbanización y a la ocupación del área de riesgo de áreas ribereñas;
- gestión de los servicios urbanos relacionados con las aguas pluviales.

### Legislación y reglamentación

**Reglamentación del drenaje urbano:** uso de reglamentación para el control del drenaje urbano para los lugares a ser desarrollados tanto a nivel de nuevos loteos como en la

densificación, que involucra la aprobación de obras en áreas ya loteadas. La evaluación del Plan Director de Porto Alegre y el Decreto presentado en el anexo A es un ejemplo de reglamentación que puede ser utilizada en el Plan Director Urbano.

**Reglamentación de las áreas ribereñas:** este componente trata de la definición de las zonas de pasaje de la inundación y de las zonas de reglamentación y el uso de definiciones discutidas en el capítulo 2, con el objetivo de evitar la densificación de la población en áreas de riesgo de inundación ribereña.

### **Gestión de Aguas Pluviales**

La gestión trata de las instituciones dentro del municipio que deberán implementar el Plan Director de Aguas Pluviales en sus diferentes aspectos. Esta implementación involucra: el desarrollo del Plan de Acciones, fiscalización de los servicios, evaluación y fiscalización de la implementación de loteos (o lotificaciones) y obras relacionadas con la legislación y reglamentación, además de la implementación de los programas previstos.

El escenario ideal es que la gestión de aguas pluviales, alcantarillado cloacal y residuos sólidos estén dentro de la misma entidad, pues existe economía de escala y jerarquía definida en los servicios de interfaz entre estos componentes. Sin embargo, la realidad es que muchas veces agua y cloaca son administradas por una entidad y aguas pluviales y residuos sólidos por otras dos entidades independientes, además de la propia ocupación del suelo. Esto tiende a generar conflictos dentro de la ciudad en la medida que no hay una coordinación técnica y política.

#### **5.3.2 Medidas estructurales**

Como descripto en la estrategia, las medidas estructurales involucran el Plan de cada subcuenca destacada de su geografía de flujo, además de medidas estructurales de protección contra inundaciones ribereñas, cuando sea el caso. En la Figura 5.2 son presentadas las etapas del Plan de cada cuenca.

La definición de las cuencas urbanas es la primera acción del Plan en cuanto a las medidas estructurales. Esta definición se basa en una subdivisión de ríos que escurren para un sistema mayor (lago, río, reservorio o estuario), escurriéndolos hacia afuera de los límites de las ciudades. Considerando que para cada subcuenca será elaborado un Plan, se admite que las mismas no deberán exportar impactos, pero pueden presentar características

de interferencias entre sí a través del escurrimiento. Una misma macrocuenca urbana puede ser subdividida cuando ello sea necesario en función de su desarrollo y tamaño.

### Plan de la Cuenca

La estructura del estudio de alternativa del Plan se presenta en la Figura 5.3. Se observa que existen tres grandes grupos: Datos de Entrada, Planes de las Cuencas y Elaboración de los Productos. Luego de desarrollado el Plan las acciones apuntan a la implementación de las obras.



Figura 5.2. Medidas Estructurales.

**Datos de Entrada:** El conjunto de los datos de entrada, necesario al estudio de alternativas estructurales del Plan son: (a) Características físicas urbanas actuales como geología, tipo de suelo y topografía; (c) Hidrología: datos de precipitación para el establecimiento de las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia y eventos con datos de precipitación y caudal para ajuste de los modelos hidrológicos; (d) topografía, de preferencia con escala 1:2.000; catastro de la red pluvial construida: secciones de conductos o galerías, posicionamiento en planta y cota del tope o fondo de las galerías y condiciones de las galerías cuanto a la colmatación u obstrucciones; secciones naturales representativas

de los ríos del área urbana de interés; (e) ubicación de la red cloacal, caso exista, e informaciones sobre el sistema de colecta de basura y limpieza urbana.

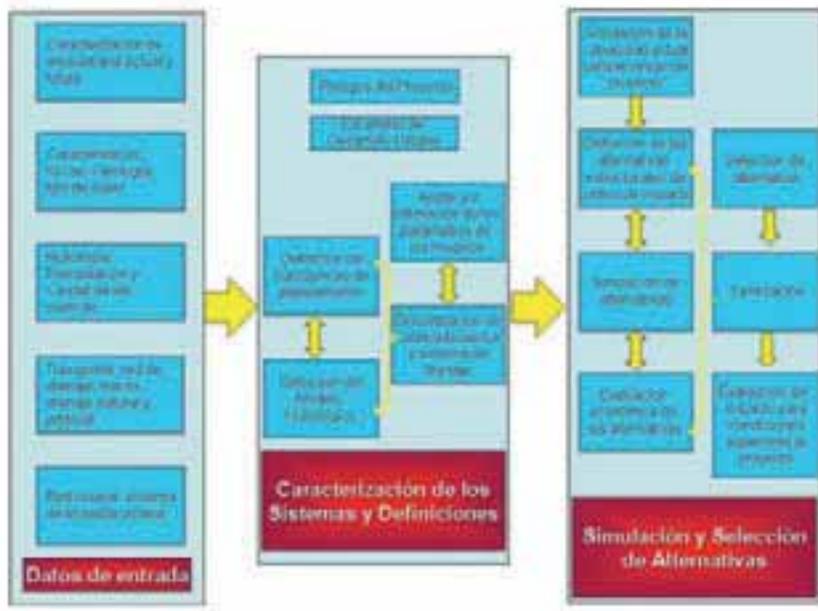


Figura 5.3. Etapas del Plan por Cuenca.

**Caracterización de los sistemas y definiciones:** Este módulo involucra las definiciones de proyecto relacionados con: (a) los escenarios de análisis: actual y futuro; (b) riesgo de proyecto: tiempo de retorno elegido para el proyecto; (c) subdivisión de las cuencas de las ciudades donde serán realizados los Planes y la subdivisión interna de éstas para simulación; (d) ajuste del modelo o definición de los parámetros de simulación (mayores detalles en el ítem siguiente).

Los escenarios de análisis cuantitativos de una cuenca urbana son:

*Escenario actual* (capacidad del sistema existente): este es el escenario en que el sistema existente es analizado para crecidas con riesgo similar al contemplado en el planeamiento, fundamentalmente, para los escenarios de ocupación actual y de corto plazo y, eventualmente, para la futura ocupación del Plan Director Urbano;

*Escenario futuro* (estudio de alternativas de control): en este escenario son investigadas las condiciones combinadas de control del sistema para los horizontes de planeamiento, con base en las medidas de control y de aumento de capacidad de escurrimiento.

**Simulación y elección de las alternativas:** Las etapas de este análisis involucran:

*Capacidad de escurrimiento existente:* análisis de las condiciones de escurrimiento en la red, determinando la capacidad de escurrimiento en cada sección definida para la red de drenaje discretizada en la cuenca. En esta fase es posible identificar los lugares críticos debido a la variabilidad de la capacidad de escurrimiento que generalmente ocurre en las áreas urbanas. Es común que existan secciones con menor capacidad de escurrimiento aguas abajo que aguas arriba de un tramo.

*Simulación de las condiciones actuales de urbanización y futura* de la red de escurrimiento pluvial para los escenarios actuales y futuros. En esta simulación es posible identificar las secciones o tramos críticos donde la capacidad existente no permite escurrir el caudal simulado. Generalmente, esta simulación es realizada con un modelo en superficie libre, despreciándose los procesos que ocurren bajo presión.

*Definición de las alternativas de control:* formulación de las posibles medidas de control a través de lo siguiente: (a) identificación en campo de los posibles lugares para los reservorios de detención; (b) evaluación de los volúmenes disponibles en función de las cotas; (c) tramos que pueden ser ampliados y sus condicionantes.

Para determinar la combinación óptima el planificador podrá verificar las alternativas disponibles: (a) reducción del escurrimiento superficial a través de medidas en la fuente (generalmente para futuros escenarios); (b) detenciones en lugares en que existen áreas disponibles o mismo en lugares enterrados cuando no se encuentren áreas abiertas; (c) ampliación de la capacidad de escurrimiento del sistema.

*Simulación de las alternativas:* simulación de las alternativas seleccionadas, verificando su eficiencia para los distintos escenarios. Son definidos varios “lay-out” con las modificaciones físicas que controlen las inundaciones existentes. La mejor solución económica es la que produce el menor costo de implantación. Esto puede ser realizado a través de tentativas, variando algunas combinaciones o a través de un modelo de optimización en combinación con un modelo hidrológico.

*Evaluación económica de las alternativas:* relevamiento de los

costos de implementación de las alternativas y elección de la alternativa de proyecto y del plan de acción para implementación de las medidas.

*Verificación del proyecto* con un modelo hidrodinámico que considere el escurrimiento bajo presión. Verificación para condiciones del riesgo mayor que el adoptado en el proyecto: Considerando que haya sido elegido, por ejemplo, el tiempo de retorno de 10 años para el proyecto, es necesario que el Plan evalúe los impactos que ocurrirá en el drenaje para riesgos mayores a 10 años, proponiendo medidas preventivas para los distintos lugares más críticos.

**Características de los modelos:** Los modelos utilizados en cuencas urbanas generalmente poseen dos módulos: (a) módulo cuenca: que calcula a partir de la precipitación el caudal resultante que entran en las galerías y canales; (b) módulos de ríos, canales, galerías y reservorios: que transporta el escurrimiento a través de canales, galerías y detenciones.

Generalmente, los algoritmos utilizados varían con el grado de detalle con que se desea representar la cuenca y sus características, y con los efectos del escurrimiento que deben ser llevados en cuenta. Dos tipos de modelos pueden ser utilizados:

- a. *modelo hidrológico:* en este caso sólo se dispone del módulo de cuenca o también el módulo canal (galería). El módulo cuenca es representado por funciones hidrológicas de determinación del escurrimiento que llega en los conductos del macrodrenaje a través de algoritmos como: pérdidas iniciales, infiltración y la propagación del escurrimiento superficial. Algunos ejemplos de modelos que tratan sólo este módulo son IPH-II (Tucci et al., 1981) y SCS (SCS, 1975). El modelo IPHS1 (Tucci et al. 1988), incluye algoritmos de cuenca y de canal.

En el módulo galería el flujo es transportado por ecuaciones de almacenamiento como Muskingum, o modificaciones de éste, como el Muskingum-Cunge. En las detenciones es utilizado el método de Puls.

Este tipo de modelo identifica los lugares de inundación por caudales superiores a la capacidad de escurrimiento, o por las cotas, con auxilio de curvas altura-caudal de las secciones.

- b. *modelo hidrológico-hidráulico:* Generalmente este tipo de modelo es utilizado sólo cuando existen condiciones de

remanso y escurrimiento bajo presión, produciendo inundaciones en diferentes puntos que necesitan de soluciones específicas, o cuando la interacción en la red es muy grande. En este caso, el módulo galería es representado por las ecuaciones dinámicas (de Saint Venant) para superficie libre o para escurrimiento bajo presión con adaptación según el concepto de la “ranura de Preissmann”. Este modelo también es utilizado en la verificación de proyecto y para evaluar el impacto para riesgos superiores al del proyecto.

**Elementos de la simulación:** La simulación de alternativas es una de las principales etapas en la elaboración de un Plan Director de Drenaje Urbano. Las simulaciones a ser realizadas alcanzan situaciones como:

- diferentes fenómenos, como transformaciones lluvia-caudal y escurrimiento en canales;
- en el escurrimiento en canales pueden aparecer diferentes regímenes de escurrimiento: libre, bajo presión, subcrítico, supercrítico; así como combinaciones y transiciones entre ellos;
- simulación de estructuras especiales como reservorios de detención o casas de bombas;
- diferentes escenarios de ocupación de la cuenca, referidos a la urbanización presente y futura; o distintos patrones de ocupación de la cuenca.

A esta variedad de condiciones se suman otros condicionantes:

- la necesidad de representar interacciones en la red de conductos (ejemplo: efectos de remanso);
- los parámetros de los métodos deben poder ser estimados con base en características físicas de la cuenca o de la red de drenaje, sea por ausencia de datos para ajuste o bien para simular situaciones futuras;
- como los Planes Directores de Drenaje Urbano generalmente sólo analizan el macrodrenaje, los proyectos de detalle y el de microdrenaje son desarrollados separadamente. Hay, por lo tanto, necesidad de que los parámetros y criterios adoptados en estos proyectos sean coherentes con los utilizados en el plan. Esto implica emplear métodos y criterios accesibles y de fácil generalización, contemplando hasta su inclusión en

- productos tales como manuales de drenaje.
- para poder generalizar los criterios, parámetros y metodologías utilizadas, es conveniente evitar el uso de metodologías específicas de software, sobre las cuales no es fácil encontrar referencias, ejemplos o otros tipos de auxilio para la aplicación (los métodos no deberían ser “software-dependientes”).
  - el volumen de simulaciones a ser realizadas es muy grande. Considerando la red de macrodrenaje a partir de los conductos de 1 m de diámetro o equivalentes, el tamaño medio de las “cuencas elementares” generalmente es de 0,5 a 1 km<sup>2</sup>. Las metodologías adoptadas no deben ser excesivamente trabajosas, particularmente en cuanto a la determinación de sus parámetros.

En la elección de las metodologías de simulación y de estimación de parámetros es fundamental respetar las condiciones de aplicabilidad de cada una de ellas, tanto en términos generales como en las condiciones específicas de utilización. La mayoría de las técnicas comunes de simulación lluvia-caudal, y de parámetros de esta transformación, han sido desarrolladas para áreas rurales. El uso de estas técnicas debe ser evitado, o utilizadas cuando puedan ser introducidas correcciones que lleven en cuenta condiciones de cuencas urbanas. Por ejemplo, la fórmula de Kirpich para tiempo de concentración debe ser aplicada con las correcciones debido a la urbanización (Tucci, 1993).

El uso de parámetros de la literatura no constituye una validación, aunque con frecuencia sea inevitable por falta de datos de lluvia, y particularmente de caudal. Una alternativa sería calibrar los modelos para alguna cuenca similar, y realizar la transposición de parámetros. Tanto en este caso, como en el caso de ausencia de cualquier dato, se debe usar la calibración cualitativa (Cunge, 1980). Esta técnica consiste en comparar los resultados de las simulaciones con la ubicación y magnitud aparente de las inundaciones que ocurren en la cuenca, así como otros fenómenos tales como: condiciones de escurrimiento en canales abiertos, agua saliendo de pozos de visita o bocas de tormenta, etc. Este procedimiento es más fácil de usar con tormentas de baja recurrencia, 1 o 2 años, ya que estas son recordadas con más facilidad por la población. Otra alternativa es el uso de las crecidas históricas de gran impacto, que son mejor identificadas por la población, desde que se disponga de los registros de lluvia.

Las informaciones que posee la municipalidad sobre

problemas causados por las inundaciones son muy valiosas en este sentido; usualmente los profesionales del área de drenaje pluvial son capaces de hacer un mapeamiento por lo menos razonable de los lugares y frecuencia de las inundaciones. Otra fuente interesante de informaciones son las autoridades de tránsito, ya que la circulación de vehículos es afectada por las inundaciones.

**Lluvia de proyecto:** El método más común es el de bloques alternados, a partir de curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Las otras alternativas son el hietograma triangular del SCS, muy similar al anterior, o métodos basados en la distribución temporal de las lluvias de la región en estudio, como los de Huff o de Pilgrim y Cordery. En cuanto a la duración de la lluvia, se debe adoptar como referencia el tiempo de concentración de toda la cuenca y no de las subcuencas en que ésta fue dividida. Una duración entre 1,5 y 2 veces el tiempo de concentración es aconsejable. Hay que recordar que las medidas de control como reservorios de detención son usualmente previstas; y para su cálculo el volumen escurrido es tan importante como el caudal de pico. Incluso en el cálculo de medidas en pequeña escala (ejemplo: reservorios de lote), debe, por lo menos, ser realizada un análisis para lluvias de larga duración.

Se debe destacar que utilizando la lluvia de proyecto y un modelo lluvia-caudal (situación usual por falta de datos de caudal), el riesgo del caudal obtenido no es, necesariamente, el mismo de la precipitación. Por lo tanto, el riesgo relacionado es el de la precipitación y no el del caudal.

**Lluvia efectiva:** La transformación lluvia-caudal tiene dos componentes, la determinación de la precipitación efectiva (parcela de la lluvia que se transforma en escurrimiento); y la propagación de este volumen hasta la entrada en la red de macrodrenaje. Para la representación del primer fenómeno las alternativas más frecuentes son:

- método de la curva número del SCS (CN): es un parámetro extensamente tabulado, lo que facilita la estimación, y pueden ser construidas relaciones con el área impermeable;
- curva de infiltración (Horton, Philips, etc) combinada con estimaciones del área impermeable.

El coeficiente de escurrimiento, aunque muy común y extensamente tabulado en la literatura, tiene el inconveniente de

no llevar en cuenta la variación temporal de la lluvia, no siendo adecuado para el cálculo de volúmenes. Además de ello, el coeficiente de escurrimiento (y el método racional) son aplicables a áreas pequeñas; aunque las cuencas elementales utilizadas en la elaboración del plan sean del orden de 0,5 a 1 km<sup>2</sup>, las cuencas sobre las cuales se trabaja son generalmente mayores.

Las metodologías de separación de escurrimiento toman como referencia, para determinación de los parámetros, el tipo del suelo. En áreas urbanizadas o en proceso de urbanización, la camada superior del suelo es removida, cubierta o muy alterada. Por lo tanto, se debe tener mucho cuidado al utilizar mapas de suelos, que normalmente describen sólo la situación natural de preurbanización. En este caso, la estimación del área impermeable es fundamental.

Campana y Tucci (1999) presentaron una curva que relaciona la densidad habitacional y el área impermeable de una cuenca con base a los datos de Curitiba, Sao Paulo y Porto Alegre. Esta curva permite estudiar escenarios futuros de ocupación urbana, ya que la densidad habitacional es utilizada como indicativo del Planeamiento Urbano.

**Escurrimiento Superficial:** Una vez calculado (lluvia que se transforma en escurrimiento) debe ser propagado hasta su entrada en la red de macrodrenaje. Existen en la literatura diversos métodos para este cálculo. Los métodos pueden depender de la disponibilidad de datos. Entre otros métodos conceptuales lineales y no lineales se destacan Clark, Nash, Onda Cinemática y los métodos lineales basados en el hidrograma unitario (HU) sintético (Tucci, 1998).

Los hidrogramas unitarios sintéticos, como Snyder o el triangular del SCS fueron desarrollados en general para áreas rurales, condición muy distinta de la aplicación en un área urbana. El SCS (1975) fue adaptado para áreas urbanas. La regionalización de parámetro de estos modelos ha sido presentada para varios lugares, destacándose el trabajo de Díaz y Tucci (1989) que regionalizaron el HU para cuencas urbanas brasileñas.

Los métodos como Clark y Nash son más adecuados para áreas urbanas, ya que sus parámetros pueden ser estimados llevando en cuenta las características del área simulada. Germano et al. (1998) regionalizó los parámetros del modelo Clark utilizado en el modelo IPH-II para cuencas urbanas brasileñas.

El uso de la onda cinemática depende de la realización de un análisis detallado del sistema físico que no siempre es posible establecer. Además de ello, la representatividad depende de las

reales condiciones del escurrimiento y de la escala de aplicación. Por ejemplo, un cordón de cuneta podría ser considerado como un canal triangular; pero en realidad en este lugar hay autos estacionados, así como bolsas de basura y otros objetos similares, que hacen con que el escurrimiento parezca más una cascada de reservorios que un canal. Por otro lado, cuando la unidad de representación es una manzana o más, la definición de la “rugosidad” o el “desnivel” de un conjunto de tejado, patios, césped, etc., considerados en conjunto requieren de un ajuste con datos observados.

**Escurrecimiento en la red de macrodrenaje:** En el escurrimiento de una red de macrodrenaje y de las alternativas de control, la interacción (tanto física como operacional) entre los componentes de la red es fundamental. El desarrollo de alternativas eficientes de solución, y la garantía de su adecuado funcionamiento dependen de llevar en consideración las interacciones existentes. Generalmente, existen dos clases de modelos como los citados anteriormente: modelos hidrológicos e hidrodinámicos. El primer tipo de modelo es utilizado para la fase de estudio de alternativas y el segundo para verificación de la alternativa elegida y para escenarios superiores al del proyecto. Algunos de los principales aspectos relacionados con los modelos de escurrimiento son destacados a continuación:

- Con el objetivo de representar más fielmente el funcionamiento de la red de drenaje, los modelos de red usualmente limitan la entrada del escurrimiento superficial en los conductos de la red, en función de la capacidad del conducto y de las condiciones de escurrimiento, tal cual ocurre en la realidad. La mayoría de los modelos almacena el escurrimiento excedente, usualmente en el punto en que éste llega a la red, para eventualmente liberarlo después, a medida que las condiciones en los conductos permiten el escurrimiento. El agua que escurre para fuera de la red por exceso de presión es tratada de manera similar, siendo acumulada usualmente en el punto de salida. En realidad esta es sólo una de las posibilidades, aunque existen varios comportamientos posibles. El agua podría escurrir por las calles hasta algún otro punto y entrar en la red, o acumularse, o continuar escurriendo hacia aguas abajo, dependiendo de la topografía y de las condiciones de los conductos en cada punto, en cada instante de tiempo. Este problema no es crítico en las

simulaciones de proyecto, ya que la red debe ser capaz de absorber en cada punto el agua que llega. Ya en las simulaciones para calibración, cuantitativa o cualitativa, y simulaciones de diagnóstico en general, es importante no confundir los puntos de insuficiencia de la red con los puntos donde ocurrirán inundaciones.

- Hay una suposición implícita de que todo el escurrimiento generado en la cuenca llega hasta la red de macrodrenaje, o sea, el microdrenaje funciona perfectamente. Este tipo de consideración puede resultar en lugares críticos que no registran inundaciones. Esto no es un error ya que la insuficiencia de la red realmente ocurre, pero está siendo enmascarada por los condicionantes del microdrenaje.

Los casos mencionados anteriormente muestran que el análisis de la simulación no puede limitarse a los resultados del modelo de la red de drenaje. Es indispensable contemplar en el análisis el comportamiento del agua en la superficie de la cuenca, hasta que ésta llegue al macrodrenaje, y qué haría el agua en el caso que no consiguiera entrar en la red.

**Análisis de alternativas:** En la búsqueda de alternativas de solución es fundamental el análisis integrado de la cuenca. Esto permite llevar en cuenta interacciones entre los componentes de la red de macrodrenaje y facilita la optimización de la solución. Las limitaciones de las medidas de control en una región pueden ser compensadas en otra, o medidas de control caras en una región pueden ser descartadas a favor de medidas más baratas en otra región.

El criterio de no ampliación de la crecida natural para las medidas de control es el principio fundamental de un PDDU. Sin embargo, como en Brasil y en la mayoría de América Latina estos planes son desarrollados a posteriori a la ocupación urbana, generalmente ocurre que la ampliación ya se verificó en gran parte de la red, siendo posible establecer el control a través de la legislación municipal solamente en nuevos emprendimientos inmobiliarios. De esta manera, en el análisis de alternativas el control pasa a ser de no transferir hacia aguas abajo los condicionantes ya existentes, utilizándose la capacidad instalada del drenaje, que de alguna manera es superior a la capacidad de la cuenca natural. Por lo tanto, en el estudio de alternativas lo más importante es la evaluación del conjunto de una cuenca donde las soluciones internas evitan las inundaciones internas, y mantienen

el caudal de proyecto menor o igual a las condiciones existentes al proyecto.

**Medidas de control en la fuente:** En la definición de las medidas de control y evaluación de sus impactos, un caso que merece atención especial es el de las medidas de control en la fuente, aplicadas a escala del lote, como microreservorios de detención o superficies de infiltración. Las cuestiones que pueden dificultar esta evaluación son: (a) incertidumbre en cuanto a su implantación y operación y mantenimiento; (b) incertidumbre acerca de cuál es su impacto real sobre el escurrimiento y cuál es la sustentabilidad temporal de este impacto.

La efectiva implementación de medidas de control a la escala del lote depende de la instalación y también de un adecuado funcionamiento de un gran número de componentes individuales. Estos componentes, frecuentemente, dependen de los moradores, y no del poder público, que queda limitado a exigir la instalación y fiscalizar el funcionamiento. En el caso de medidas de control que operan a escalas mayores (reservorios en loteos, barrios, etc.), la implantación depende de decisiones administrativas del poder público. Por lo tanto, ello puede viabilizar más la ejecución del proyecto ya que responsabilidad por la operación y el mantenimiento de las obras es bien definida.

En relación a las medidas de control en la fuente, a la incertidumbre sobre su implementación y funcionamiento se le debe sumar la incertidumbre con relación al impacto efectivo. En otras palabras, si éstas son implementadas y operadas adecuadamente, existe cierta dificultad para cuantificar su impacto real sobre la generación de escurrimiento ya que no existe un monitoreo adecuado que permita evaluar este impacto a nivel de la cuenca hidrográfica. Parece poco probable que se consiga anular completamente el impacto de la urbanización, ya que, difícilmente, el control en la fuente consiga alcanzar 100% de la superficie de la cuenca (por ejemplo, calles y paseos públicos). Además de esto, algunas medidas, como las orientadas a la infiltración pueden ser bastante vulnerables con el tiempo.

Las dudas mencionadas no deben impedir la adopción de este tipo de medidas. Sugieren, en cambio, dos enfoques: (a) no depender exclusivamente de estas medidas para gerenciamiento del drenaje urbano; y (b) iniciar programas de monitoreo de medio y largo plazo, para obtener datos que permitan adoptar este tipo de enfoque en las situaciones adecuadas.

**Reservorios de detención:** Por tratarse de una visión de planeamiento, no es indispensable presentar el estudio técnico completo del proyecto de estas propuestas; sin embargo, esto no significa que sea suficiente definir la ubicación y estimar el volumen necesario, excepto cuando las informaciones no permitan una mayor profundización, o el estudio sea muy preliminar. Además de la estimación del volumen necesario, es imprescindible verificar la viabilidad del funcionamiento. Esto significa verificar especialmente las condiciones de entrada y salida del reservorio, las cotas de operación y las estructuras hidráulicas. Puede suceder una situación en que un reservorio tenga un volumen adecuado, pero no existe una estructura hidráulica que consiga el efecto deseado de amortiguamiento del hidrograma; o existe el volumen y las estructuras hidráulicas, pero las cotas no permitan el funcionamiento adecuado.

**Dimensionamiento de conductos y canales:** La práctica usual en Brasil es utilizar un coeficiente de rugosidad de Manning de 0,013 para el cálculo de los conductos y galerías. Este valor es adecuado para tubos de concreto nuevos, pero no es representativo de las reales condiciones de funcionamiento de conductos reales. Después de pocos años de funcionamiento, las condiciones del tubo y de las juntas comienzan a deteriorarse. Incluso en redes con buenas condiciones de mantenimiento es inevitable la presencia de sedimentos y otros materiales que aumentan la resistencia al escurrimiento. En función de esto, un  $n$  de Manning de 0,015 o 0,016 es más adecuado para simular las condiciones de funcionamiento de la red de drenaje durante su vida útil.

Otra cuestión a ser destacada es que, contra lo recomendado en todos los manuales de drenaje urbano, las pérdidas de cargas singulares (pozos de visita, curvas, etc.) son por costumbre ignoradas. En la simulación de una red de macrodrenaje esto puede ser justificado en función de la escala de trabajo, pero debe ser compensado usando técnicas como el largo equivalente o el aumento del  $n$  de Manning a valores del orden de 0,02. En cálculos de mayor grado de detalle, o en proyectos localizados, las pérdidas singulares deben ser obligatoriamente contempladas, y la línea de energía verificada. Otra cuestión importante es que no siempre es posible o eficiente adoptar el criterio de escurrimiento de superficie libre.

Un fenómeno importante, cuando son analizadas situaciones en el cual el escurrimiento pasa a ser sobre presión, es la disminución en la conductancia hidráulica. Esto ocurre cuando el agua alcanza el tope de un conducto, especialmente, en

conductos rectangulares.

### **Evaluación económica de alternativas**

Uno de los principales elementos involucrados en la comparación de alternativas es el costo de implementación. Como se trata de la etapa de planeamiento, no son elaborados proyectos detallados de los componentes de cada alternativa. Las estimaciones de costo deben entonces ser elaboradas a partir de definiciones esquemáticas de las soluciones. En el caso de las ampliaciones, dos son las situaciones más frecuentes: (a) es posible definir en el plan cuál es el conducto que va a ser trazado y las características de la ampliación (tamaño y forma); (b) se puede evaluar que la ampliación es viable, pero la elección del trazado y de las características requiere trabajos fuera del objetivo del planeamiento.

En el primer caso, el costo puede ser estimado mediante un cálculo que lleve en consideración las condiciones específicas de construcción de la ampliación; o se puede adoptar un costo por unidad del largo, a partir de tablas, generalmente disponibles en las municipalidades, de costo medio de construcción en función del tamaño y del tipo de conducto.

En la situación en que no es posible (o justificado) definir el trazado y características de la ampliación, una posibilidad es elaborar, a partir de la tabla de costo por unidad de largo, una curva de costo en función de la capacidad  $K$  (conductancia hidráulica) adicional necesaria. En la Figura 5.4, se presenta una de estas curvas utilizadas en el PDDRU de Caxias do Sul, Brasil (IPH, 2001). Con esta metodología, el trabajo en la simulación de alternativas es simple, ya que la ampliación es definida a partir del aumento de la capacidad del conducto existente. Algunos condicionantes adicionales para la ampliación, como niveles de agua máximos para evitar efectos de remanso, o condicionantes específicos en ciertos tramos o lugares, también pueden, y en la medida del posible deben, ser contemplados.

En la elección de una metodología de cálculo de costo a utilizar, se debe tener en cuenta la importancia de la obra considerada dentro del plan, y su costo total.

Una cuestión adicional que debe ser llevada en cuenta en la evaluación de los costos de cada alternativa es la transferencia de impactos hacia aguas abajo del sistema que está siendo estudiado. Solucionar los problemas causados por esta transferencia genera costos, que deben ser sumados a los costos generados dentro del sistema objeto del planeamiento.



inundaciones de las áreas urbanas abarcan:

- Costos de implementación de las obras de macrodrenaje y otras medidas estructurales para control de los impactos existentes en la ciudad. Estos costos están distribuidos por las cuencas hidrográficas a través del Plan de cada cuenca. Además de esto, este costo ocurre en su implementación;
- Costos de operación del sistema de drenaje existente en la red pluvial, que involucra la limpieza, mantenimiento de los conductos y solución de problemas localizados. Este costo debe ser distribuido por los usuarios de la red de drenaje.

El principio básico de la financiación de las acciones del drenaje urbano es distribuir los costos de acuerdo con las áreas impermeables no controladas de la propiedad. En el drenaje urbano, quien aumenta el volumen de escurrimiento superficial es responsable por las inundaciones y debería pagar por el aumento del impacto. El factor fundamental del aumento del volumen es el área impermeable. La distribución de los costos de la implantación del drenaje propuesta en este Plan es basada en lo siguiente:

Obras de control: Para las obras de control planeadas en cada cuenca, los costos de su implantación deben ser distribuidos dentro de cada cuenca de acuerdo con el área impermeable de cada propiedad, a partir de una tasa total cobrada por el período estimado de implantación de la misma o a través de financiación. De esta manera, la población de las cuencas donde la impermeabilización es mayor y, por lo tanto, con condiciones más críticas de drenaje, deberán pagar cantidades mayores.

**Operación y mantenimiento:** El costo referente a la operación y mantenimiento de la red de drenaje urbano puede ser cobrado: (a) como parte del presupuesto general del municipio, sin un cobro específico de los usuarios; (b) a través de una tasa fija para cada propiedad, sin distinción de área impermeable; (c) con base en el área impermeable de cada propiedad. Esta última alternativa es la más justa bajo varios aspectos, pues quien utiliza más el sistema debe pagar, proporcionalmente, al volumen que genera escurrimiento.

La principal dificultad en el proceso de cobro está en la estimación real del área impermeable de cada propiedad. En este sentido, puede ser utilizado los siguientes procedimientos:

1. Utilizar el área construida de cada propiedad proyectada para el plan del área del terreno como el área impermeable. Este valor no es lo real, pues el espacio impermeabilizado tiende a ser mayor en función de los pavimentos.
2. Establecer un programa de evaluación del área impermeable con base a imágenes de satélite y verificación por muestreo a través de visita local.

La división de los costos debe considerar:

1. Para cada cuenca y para la ciudad, la estimación del área total impermeabilizada y el costo total de la intervención o de la operación y mantenimiento;
2. El cálculo del costo de operación y mantenimiento calculado con base en el costo de operación total de la ciudad, pues las diferencias geográficas no son significativas y la separación de costo operacional por cuenca es más complejo. En el anexo B se presenta la metodología de división de costo para las áreas no controladas basada en el volumen de escurrimiento generado en cada superficie.

## 5.4 Productos

Los productos del Plan son:

- Reglamentación del Plan Director de Desarrollo Urbano y Ambiental en los artículos relacionados con el drenaje urbano;
- Plan de Acción: control de las cuencas hidrográficas urbanas de la ciudad;
- Propuesta de gestión para la ciudad;
- Manual de Drenaje.

El primer ítem fue discutido anteriormente. Las actividades del Plan de Acción son destacadas a continuación. La propuesta de gestión involucra la evaluación de la administración actual y una propuesta de funcionamiento considerando: implementación del Plan, fiscalización de las obras, aprobación de proyectos considerando la nueva reglamentación, operación y mantenimiento de la red de drenaje y áreas de riesgo y fiscalización del conjunto de las actividades.

En el plan de acción son definidos los siguientes puntos:

- Gestión de implementación del plan: involucra la

definición de las entidades que complementan las acciones previstas;

- Financiación: es el mecanismo de financiación propuesto para las acciones del plan y recuperación de costos;
- Desarrollo: corresponde a la secuencia de acciones en el tiempo y espacio relacionadas con el plan de cada subcuenca.

El manual de drenaje es el documento que deberá orientar las actividades de los planificadores y proyectistas en la ciudad con respecto al desarrollo del drenaje y las inundaciones ribereñas. El manual debe ser un documento de apoyo.

## 5.5 Programas

Los programas son los estudios complementarios de medio y largo plazo que son recomendados por el Plan que propicia la mejoría de las deficiencias encontradas en la elaboración del Plan desarrollado. Los programas identificados en esta fase del Plan están presentados en el capítulo 4 de este libro y se destacan en los siguientes aspectos:

- Programa de monitoreo;
- Estudios complementares necesarios para mejorar el Plan;
- Mantenimiento;
- Fiscalización;
- Educación.

Los programas dentro del PDDU fueron previstos como actividades de medio y largo plazo necesarios para mejorar el planeamiento del drenaje urbano de cada ciudad.

Dentro de este contexto, pueden ser previstos programas relacionados con el monitoreo de datos necesarios al planeamiento, estudios complementarios, mantenimiento y educación. La fiscalización debe ser incorporada en la gestión. A continuación serán presentados algunos ejemplos de programas.

### 5.5.1 Programa de Monitoreo

La planificación del control cuantitativo y cualitativo del drenaje urbano pasa por el conocimiento del comportamiento de los procesos relacionados con el drenaje pluvial.

La cantidad de datos hidrológicos y ambientales es reducida y la planificación en esta etapa es realizada con base en informaciones secundarias, lo que tiende a presentar mayores

incertidumbres con respecto a la toma de decisión en la elección de alternativas.

El programa de Sistema de Informaciones debe intentar dejar disponibles informaciones para la gestión del desarrollo urbano, articulando productores y usuarios y estableciendo criterios que garantizan la calidad de las informaciones producidas.

El programa de monitoreo propuesto en este plan tiene los siguientes componentes:

- Monitoreo de cuencas representativas de la ciudad;
- Monitoreo de áreas impermeables;
- Monitoreo de material sólido en el drenaje.

### **Monitoreo de cuencas representativas de la ciudad**

Evaluar la red hidrológica establecida. Las informaciones existentes generalmente son dispersas y limitadas, y no obedecen necesariamente a los intereses de la planificación del drenaje urbano en la ciudad.

**Justificación:** Para la determinación de los caudales en las cuencas urbanas son utilizados modelos hidrológicos que poseen parámetros que son estimados con base en datos observados de precipitación y caudal o estimados a través de informaciones encontradas en la literatura. Los estudios realizados utilizan algunas de las informaciones preexistentes en la ciudad. Sin embargo, se suele observar la necesidad de una muestra más representativa, con un período de observación más prolongado. En todas las ciudades brasileñas no existen datos de calidad del agua de los desagües pluviales. Estas informaciones son importantes para conocer el nivel de contaminación resultante de este escurrimiento, las cargas de los diferentes componentes y para establecer medidas de control adecuadas.

**Objetivos:** Los objetivos del programa consisten en aumentar la información de precipitación, caudal, parámetros de calidad del agua de algunas cuencas representativas del desarrollo urbano de la ciudad y acompañar cualquier alteración de su comportamiento frente al planeamiento previsto.

**Metodología:** Para el desarrollo de este programa se recomienda:

Relevamiento y revisión de las informaciones existentes

sobre variables hidrológicas y de parámetros de calidad del agua;

Para los mismos lugares identificación de los principales indicadores de ocupación urbana para los mismos períodos de los datos colectados;

Preparar un plan de complementación de la red existente;

Crear un banco de datos para recibir las informaciones existentes y colectadas;

Implementar la red prevista y volverla operacional.

### **Monitoreo de áreas impermeables**

El desarrollo urbano de la ciudad es dinámico y el monitoreo de la densificación urbana tiene como objetivo la evaluación de este proceso sobre el impacto en la infraestructura de la ciudad. En estudios hidrológicos desarrollados en los últimos años con datos de ciudades brasileñas Campana y Tucci (1994) presentaron una relación bien definida entre la densificación urbana y las áreas impermeables (vea Manual de Drenaje Urbano). Por lo tanto, el aumento de la densificación tiene relación directa con el aumento de la impermeabilización del suelo, que es la causa principal del aumento de los caudales del drenaje pluvial.

**Justificación:** Durante la realización del Plan son utilizados para un escenario de futuro desarrollo la previsión de densificación prevista en el Plan Director Urbano y, a través de la relación citada anteriormente, las áreas impermeables previstas para distintos escenarios. Considerando que estos últimos se pueden apartar de la previsión, es necesario acompañar la alteración efectiva de la impermeabilización en las cuencas planificadas.

**Objetivo:** Acompañar la variación de las áreas impermeables de las cuencas hidrográficas en la ciudad, verificando alteraciones de las condiciones de planificación.

**Metodología:** Este programa puede ser establecido con base en lo siguiente:

- Obtener anualmente la imagen de satélite de la ciudad;
- Determinación sistemática de las áreas impermeables para cada una de las cuencas de la ciudad;
- Verificar si están dentro de los escenarios previstos en el PDDUA;

Siempre que haya nuevos relevamientos poblacionales, actualizar la relación densidad vs. área impermeable. Ajustar esta

relación para áreas comerciales e industriales.

### **Monitoreo de material sólido en el drenaje.**

Existen grandes incertidumbres en cuanto a la cantidad de material sólido que llega al sistema de drenaje. La evaluación de estas informaciones es muy limitada en Brasil. Generalmente se conoce la cantidad de material sólido colectado en cada área de colecta, pero no se conoce la cantidad efectiva que llega al drenaje. Los números pueden llegar a diferencias de magnitud significativas.

**Justificación:** Los estudios de drenaje urbano parten de los principios que un conducto tiene capacidad de transportar el caudal que llega en su tramo aguas arriba y no es posible estimar cuanto de este conducto estará obstruido en función de la producción de material sólido. De esta manera, muchas inundaciones que ocurren son debidas, no a la falta de capacidad proyectada del conducto hidráulico, sino por causa de obstrucciones provocadas por el material sólido. Para que sea posible actuar sobre este problema es necesario conocer mejor cómo los componentes de la producción y transporte de este material ocurren en cuencas urbanas.

**Objetivo:** Cuantificar la cantidad de material sólido que llega al drenaje pluvial, como base para la implantación de medidas mitigadoras.

**Metodología:** Para cuantificar los componentes que involucran la producción y el transporte del material sólido es necesario definir una o más áreas de muestreo. La metodología prevista es la siguiente:

- Definir las metas de un programa de estimación de los componentes del proceso de generación y transporte de material sólido para el drenaje;
- Elegir una o más áreas representativas para el muestreo;
- Definir los componentes;
- Cuantificar los componentes para las áreas relevadas por un período suficientemente representativo;
- Proponer medidas mitigadoras para la reducción de las obstrucciones.

**Revisión del Catastro del sistema de drenaje:** El sistema de drenaje actual es catastrado basado en la determinación de la profundidad del conducto y su diámetro. La cota normalmente es

obtenida con base en la topografía disponible del lugar catastrado en plantas existentes en la ciudad. Debido a la variabilidad de relevamientos existentes en la ciudad se suelen observar incompatibilidades en el uso conjunto de las informaciones, hecho que debe ser adecuadamente analizado.

**Justificación:** El error existente puede comprometer el dimensionamiento de las obras y el estudio de alternativas. En la fase de proyecto es esencial que el catastro esté adecuadamente determinado.

**Objetivo:** Revisar el catastro de conductos pluviales de la ciudad.

**Metodología:** El relevamiento debe intentar establecer la topografía a través de un mismo referencial a través del uso de GPS, verificando la cota actual con la cota obtenida en campo. La base del análisis deben ser los lugares identificados con problemas en los estudios de simulación realizados.

### **5.5.2 Estudios complementarios**

Durante el desarrollo de los estudios generalmente son identificadas necesidades de estudios complementarios para mejorar la planificación del drenaje urbano en la ciudad. Estos estudios buscan crear informaciones para la mejoría del futuro planeamiento y el proyecto de las aguas pluviales en la ciudad.

Típicamente, estos estudios son:

- Evaluación económica de los riesgos;
- Revisión de los parámetros hidrológicos;
- Metodología para estimación de la calidad del agua pluvial;
- Dispositivos para retención del material sólido en las detenciones;
- Verificación de las condiciones de proyecto de los dispositivos de control de la fuente.

### **Evaluación económica de los riesgos**

El proyecto del drenaje urbano ha sido realizado con base en riesgos adoptados en la literatura, que no siempre se justifican de acuerdo con los elementos del lugar. El riesgo de un proyecto (tiempo de retorno) puede ser elegido con base en elementos sociales y/o económicos. El método económico tradicional da especial atención a la relación entre el beneficio obtenido por la obra (reducción de los perjuicios de las inundaciones) y el costo

de la construcción de las obras de protección. Este procedimiento no siempre retrata la verdad local, en la medida que en ciertas áreas el beneficio será mínimas cuando la población es de baja renta. De esta manera, existen otros métodos económicos como la valoración de la propiedad con base en la reducción de la ocurrencia de la inundación o la voluntad de pagar del propietario.

**Justificación:** Difícilmente estos métodos son aplicados a cada proyecto en una ciudad; generalmente son adoptados riesgos patrones de planificación y de proyecto, ya que estos estudios requieren el relevamiento de un conjunto de datos para cada lugar, representando un costo significativo dentro de un proyecto. Se vuelve necesario por lo tanto, verificar si el riesgo adoptado de 10 años para el control del macrodrenaje de la ciudad representa adecuadamente los escenarios económicos.

**Objetivo:** El objetivo de este estudio es de evaluar a través de métodos económicos disponibles el riesgo adoptado para el proyecto en la ciudad.

**Metodología:** La metodología prevista es la siguiente:

- Definición de los procedimientos económicos a ser adoptados y metodología específica de muestreo;
- Definición de criterios para muestreo de las áreas que serán utilizadas en el estudio;
- Elección de las áreas en estudio, de preferencia cuencas hidrográficas de la ciudad;
- Desarrollo de estudio económico para cada área de la ciudad;
- Análisis de la variabilidad de los resultados y el impacto del planeamiento desarrollado con base a los resultados obtenidos.

### **Revisión de los parámetros hidrológicos**

La planificación y el proyecto de las áreas estudiadas fueron elaborados con la utilización del modelo SCS (Soil Conservation Service), que posee dos parámetros básicos relacionados con: (i) la separación del escurrimiento y las áreas impermeables y (ii) con el desplazamiento del escurrimiento en la cuenca. Estos parámetros caracterizan el caudal máximo de un determinado lugar en función de las características físicas del suelo, cobertura y áreas impermeables.

**Justificación:** La estimación de estos parámetros es realizada con base en datos existentes, generalmente limitados. Con la colecta de datos hidrológicos de las cuencas previstos en el programa de monitoreo y con aquellos que pueden ser implementados en nuevos programas, es posible verificar la relación entre los parámetros y las características de las cuencas, reduciendo las incertidumbres de las estimaciones.

**Objetivo:** El objetivo de este estudio es actualizar la relación entre los parámetros del modelo utilizado y los tipos de suelo, cobertura, características del drenaje y área impermeable.

**Metodología:** Las etapas de la metodología previstas son:

- Selección de los eventos para las cuencas, con datos disponibles en la ciudad y según el programa de monitoreo previsto;
- Determinación para la misma época de las características físicas de la cuenca;
- Determinación de los parámetros con base a los datos observados de precipitación y caudal;
- Verificación de las relaciones existentes y su adaptación, caso sea necesario.

### **Metodología para estimación de la calidad del agua pluvial**

No existe ninguna metodología de estimación desarrollada para la estimación de la calidad del agua pluvial con base en datos de la realidad urbana brasileña. Las estimaciones son realizadas con base en datos de parámetros de calidad del agua de ciudades americanas o europeas con realidad de desarrollo diferente de los condicionamientos brasileños.

**Justificación:** Considerando las limitaciones destacadas en el ítem anterior, se observa que para obtener estimaciones consistentes de la calidad del agua del drenaje pluvial son necesarios métodos que se basan en datos de la realidad de las cuencas, dentro de sus condicionantes urbanos.

**Objetivos:** Desarrollar una metodología para la estimación de la calidad de agua pluvial con base en datos de cuencas. Los datos serían los obtenidos dentro del programa de monitoreo destacado en el ítem anterior.

**Metodología:** La metodología propuesta consiste en lo siguiente:

- Análisis y selección de los datos de calidad del agua analizados según el programa presentado en el ítem anterior y otros obtenidos dentro de la ciudad;
- Evaluación de la variabilidad temporal y espacial de los parámetros de calidad del agua asociados a las prácticas de limpieza urbana, sistema de saneamiento y otros factores que influyen los parámetros;
- Definición del modelo y metodología adecuada para la estimación en diferentes niveles de calidad del agua.

### **Dispositivos de retención de residuos sólidos en detenciones**

El plan desarrollado puede prever el uso de detenciones para la amortiguación del escurrimiento en áreas urbanas, con el objetivo de contener la ampliación de las inundaciones. Las detenciones serán lugares donde podrán quedar retenidos los volúmenes de material sólido de las cuencas drenadas. En el proyecto de estos dispositivos es necesario definir estrategias de retención de la basura, sin obstruir el escurrimiento y producir inundaciones en la vecindad.

**Justificación:** Existen varias alternativas para el proyecto de detenciones; muchas veces, debido a las condiciones de alta producción de material sólido, gran parte del mismo debe ser colectado antes de obstruir el escurrimiento del macrodrenaje. En este sentido, es importante utilizar las detenciones como lugares concentrados de retiro de la basura. Para esto, es necesario proyectar dispositivos que trabajen con la máxima eficiencia en este sentido.

**Objetivos:** Estudiar dispositivos de retención de material sólido asociado a los proyectos de detención.

**Metodología:** Los procedimientos propuestos son los siguientes:

- Identificación y análisis de los dispositivos existentes para retención de material sólido;
- Selección de un grupo de alternativas preexistentes y propuestas para estudio experimental;
- Desarrollo de un modelo reducido para ensayar la deficiencia de los dispositivos seleccionados;
- Preparación de un manual de apoyo al proyecto con base

en la evaluación del funcionamiento experimental de los dispositivos.

### **Verificación de los dispositivos de control**

En la literatura existen varios dispositivos de control. La experiencia de funcionamiento de estos dispositivos fue documentada en varios países. Sin embargo, en Brasil no existe experiencia sobre el asunto. Estos elementos pueden presentar variaciones de comportamiento de acuerdo con las características de uso, producción de material sólido, clima, entre otros factores.

**Justificación:** En la búsqueda de mayor eficiencia cuantitativa y ambiental del funcionamiento de los dispositivos de control del drenaje urbano es necesario que una muestra de los mismos sea evaluada a lo largo del tiempo, para identificar su funcionamiento y las correcciones potenciales de futuros proyectos.

**Objetivos:** Evaluar el funcionamiento de los dispositivos de control implantados en la ciudad con el desarrollo de este Plan.

**Metodología:** Las etapas de la metodología previstas son:

- Catastrar todos los dispositivos de control tales como: pavimentos permeables, detenciones y retenciones y áreas de infiltración. Para este catastro deben ser definidas las informaciones básicas para un banco de datos;
- Por muestreo de dispositivos existentes y por el acompañamiento de los profesionales de fiscalización, realizar anualmente una evaluación de la eficiencia de los dispositivos. En este caso, serán definidos los criterios de evaluación y los elementos a ser obtenidos de los dispositivos seleccionados.
- Con base en por lo menos una muestra representativa y en el funcionamiento de un período de 3 a 5 años, serán revisadas recomendaciones preparadas en el Manual de Drenaje Urbano con relación a construcciones de los dispositivos. Estas evaluaciones deben ser mantenidas por un buen período hasta que el proyecto identifique que fueron agotadas las mejorías.

### **Programa de mantenimiento**

El programa de mantenimiento es esencial para permitir que las obras previstas se vuelvan efectivas a lo largo del tiempo.

En este sentido, como fue recomendado en el capítulo anterior, la Municipalidad debería crear un grupo gerencial y de mantenimiento de las detenciones construidas, teniendo en cuenta estos aspectos:

- Drenaje urbano;
- Control de los residuos sólidos;
- Protección ambiental;
- Paisajismo y recreación urbana.

A lo largo del tiempo podrían ser construidas también detenciones privadas, que en este caso serán operadas por sus propietarios. La experiencia de los Estados Unidos y Francia han mostrado que con el pasar del tiempo el emprendedor privado no realiza el mantenimiento y la tendencia es que la pase a realizar el poder público. En esta situación, el costo es pagado por el emprendedor con el aumento de la tasa operacional ya citada.

**Justificación:** La falta de mantenimiento y retirada de los materiales sólidos de las detenciones puede implicar en: pérdida de la eficiencia, propagación de enfermedades y deterioro ambiental.

**Objetivo:** Mantener el sistema de drenaje operando de acuerdo con su capacidad proyectada a lo largo del tiempo.

**Metodología:**

- Crear un grupo gerencial para mantenimiento de los sistemas en construcción en el municipio;
- Entrenar equipos de mantenimiento;
- Establecer un programa preventivo de apoyo relacionado con residuos sólidos, y con apoyo comunitario;
- Programación de las acciones de limpieza de las detenciones en los períodos de lluvia;
- Sistematizar la cuantificación del volumen generado y su relación con programas preventivos.

**Programa de Educación**

La falta de conocimiento en cuanto a los impactos de la urbanización en el drenaje es muy grande, tanto en el ambiente técnico como en la población en general. Esto dificulta la toma de decisión, máxime en ambientes donde la población participa

directamente de las decisiones de inversión de la ciudad.

**Justificación:** La viabilidad de este Plan depende de la aceptación por parte de la población y técnicos, independientemente de la reglamentación. Por lo tanto, es necesario que todos tengan las informaciones adecuadas para que la gestión sea viable.

**Objetivos:**

- Transmitir conceptos sobre el impacto de la urbanización en el drenaje urbano para la población, ingenieros y arquitectos;
- Entrenar técnicos de la Municipalidad y de la iniciativa privada en el proyecto de técnicas de control del drenaje urbano.

**Metodología:**

- Campaña de divulgación para la población a través de los medios (diarios y televisión);
- Conversaciones en las entidades de clase –arquitectos, ingenieros, constructores, etc;
- Conversaciones en las asambleas del presupuesto participativo; (asamblea en que la población decide las obras a ser ejecutadas en la ciudad, si es que ellas ya están implementadas);
- Cursos de entrenamiento de corta duración para proyectistas y técnicos de la Municipalidad sobre el drenaje urbano.

**Referencias**

- IPH, 2000. Plano Diretor de Drenagem Urbana de Porto Alegre. Volume III – Dacia do Arroio do Anta. Porto Alegre, RS.
- IPH, 2001. Plano Diretor de Drenagem Urbana de Castro do Sul.
- SCS, 1975. *Urban hydrology for Small Watersheds*. Washington, U.S. Dept. Agg. Technical Release n.55.
- TUCCI, C.E.M.; ORDONIZ, J.S.; SIMÕES, M.J., 1991. Modelo Matemático Precipitação-Vazão IPH II. Alguns Resultados. – Anais IV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH Fortaleza.
- TUCCI, C.E.M.; 1997. Plano Diretor de Drenagem Urbana: Princípios e Concepções. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. ABRH, Vol. 2, nº 2.
- TUCCI, C.E.M., Zemanillo, E.A, Pinheiro, H.D., 1991. *Sistema de Simulação Precipitação Vazão IPH I*. Porto Alegre: UFRGS – Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.
- TUCCI, C. E. M., 1993. *Hidrologia Cálculo e Aplicações*. Porto Alegre Ed. da Universidade ABRH/EDUSP, 913p.
- TUCCI, C.E.M. 1998. *Abacdo Hidrologia*. Ed. da Universidade/UFRGS/ABRH. Porto Alegre. 609p.
- TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. 2001. Storm hydrology and urban drainage. In: Tucci, C., Humid Tropics Urban Drainage, capítulo 4. UNESCO.
- URBONAS, B., STAHLER, P., 1993. *Sustainable Best Management Practices and Debatins*. Englewood Cliffs, New Jersey, 440p.





## Estudios de Casos

Carlos E. M. Tucci y Juan Carlos Bertoni

*Los ejemplos permiten entender los problemas y las soluciones adaptadas a cada realidad*

**En** este capítulo se presenta una muestra de estudios de casos que ilustran los aspectos de inundación y los estudios relacionados con estos. Permiten evaluar la complejidad y las alternativas de solución encontrada dentro de estas realidades. Los casos presentados corresponden a diversas ciudades de Brasil y Argentina, en América del Sur, y de El Salvador y Nicaragua, en América Central. Otros casos correspondientes a diversos países de América del Sur han sido colectados por Tucci y Bertoni (2004).

### 6.1 Inundaciones urbanas en Brasil

La población total de Brasil supera actualmente 170 millones de habitantes. Las ciudades brasileñas albergaban hace menos de un siglo al 10 % de la población del país; actualmente el 82 % de la población se encuentra reunida en ciudades, varias de las cuales son de gran porte. Dentro de ellas se observa una diversidad de casos asociados al drenaje y las inundaciones urbanas. A su vez, el país es uno de los más avanzados de América Latina en el análisis y tratamiento de la problemática del drenaje urbano.

Los problemas socioeconómicos, típicos de América Latina, hacen de los ejemplos brasileños una materia de interés para todo el continente. A continuación se presentan los casos de las ciudades de Estrela, União da Vitoria/Porto União, Curitiba y Porto Alegre. A su vez, se analiza el Plan de Desagües Pluviales

de Brasil

### **6.1.1 Inundaciones ribereñas en Estrela (RS) Brasil**

La ciudad de Estrela (Estado de Rio Grande do Sul, Brasil; 28,3 mil habitantes) se ubica en las orillas del río Taquari, en una cuenca del orden de 25.000 km<sup>2</sup>, con variaciones de niveles de inundación que llegan en casos extremos hasta 18 m en un único día. Una parte del área próxima de la ciudad y las orillas del río no son ocupadas debido al referido riesgo, pero áreas donde el riesgo tiene frecuencia menor se encuentran ocupadas. En 1979, cuando estaba en elaboración el Plan Director Urbano de la ciudad, fue verificada la necesidad de preparar una zonificación de áreas de inundaciones para que fuera incluido en el referido Plan. Rezende y Tucci (1979) desarrollaron un estudio técnico considerando la probabilidad de inundación en la ciudad y propusieron límites para la ocupación urbana en la ciudad. Fueron definidas las siguientes áreas: (a) límite del área de reglamentación de inundación: 26,00 m; (b) entre 24 y 26 m: área que puede ser construida, condicionada a pilotes superiores a la cota de 26 m; (b) área debajo de 24 m: reserva permanente (establecido en 1981).

Para evitar la invasión y la recuperación de las áreas de inundaciones ya ocupadas, por la Ley municipal n°. 1970 de 1983 la Municipalidad estableció que el área de inundación podría ser cambiada por un mayor índice urbanístico. Los términos de la Ley municipal son los siguientes (PME, 1983):

“....

*art. 1º* - Autoriza el Poder Ejecutivo Municipal a facultar la construcción de edificios con finalidad comercial, residencial o mixta, arriba de los índices urbanísticos permitidos por la ley del Plan Director, desde que:

Párrafo 1: Sea transferida al uso público para el área verde o de uso institucional, un área de terrenos en la misma zona y con superficie equivalente a 4/10 del área construida excedente a la permitida en el lugar.

Párrafo 2 – Cuando el área de terreno ubicado en la áreas de preservación permanente, o de preservación paisajística, sea transferida al uso público, el valor será equivalente al del área construida excedente a la permitida en el lugar y esta área deberá estar en la misma zona, y si no hay, en la zona lindera más próxima del lugar.”

La reglamentación indica que las áreas de inundaciones son parte de las áreas de preservación permanente, como especificado en el Plan Director y abajo de 24 m.

Este tipo de política permite mantener un valor económico para las áreas de restricción y permite una gestión de las áreas de riesgo. El resultado de este tipo de planeamiento ha mostrado una reducción de los perjuicios de inundaciones a lo largo del tiempo. En los últimos 26 años ocurrieron 7 inundaciones superiores a los 24 m y 3 superiores a los 26 m.

### **6.1.2 Inundaciones ribereñas y generación energética en União da Vitória /Porto União - Brasil**

El municipio de União da Vitória, polo socioeconómico de la región sur del Estado do Paraná (Brasil), tiene 52.000 habitantes y forma frontera con el municipio de Porto União - SC, con 36.000 habitantes. Sus fronteras son delimitadas apenas por la malla de la Red Ferroviaria Federal, siendo conocidas como las “Ciudades Gemelas del Valle del Iguaçu”.

En los documentos de 1842 (Figura 6.1), las expediciones exploradoras de los Campos de Guarapuava, a partir de los Campos Generales, acabaron por descubrir los campos de Palmas. Para acortar el camino hacia Curitiba, fue abierta una picada, utilizada por las tropas de ganado para llegar al Valle do Iguaçu. A lo largo de ésta y con el tiempo, fueron surgiendo núcleos de poblaciones, a ejemplo de lo que ocurría en las orillas del río. En 1982, con el vapor Cruzero, el pueblo tuvo gran impulso. En 1909, una ferrovía unió la ciudad de Porto União da Vitória con el resto del país, lo que impulsó el crecimiento, por lo que la red ferroviaria se volvió más importante.

Hasta 1917, la ciudad era una sola, pero como consecuencia de la Guerra del Contestado fue dividida en dos: Porto União pasó a pertenecer al Estado de Santa Catarina y União da Vitória continuó estando en el Estado do Paraná.

En el inicio de la década de los 80 fue construida la Usina de Foz do Areia, 100 km *aguas abajo* de las ciudades. Con la construcción de la presa fue creado un lago que influenciaba los niveles del río por un largo tramo de *aguas arriba*.

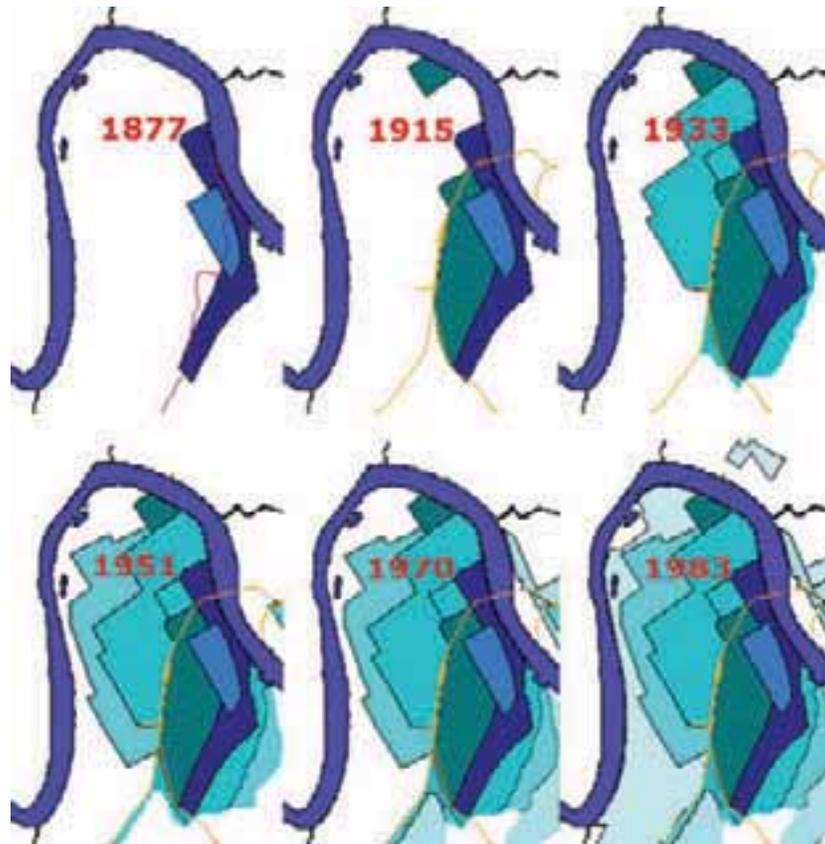


Figura 6.1. Evolución de las ciudades y ocupación de la terraza de inundación.

### Inundaciones

Las ciudades de União da Vitória y Porto União se desarrollaron en las orillas del río Iguazu, donde sólo sucedieron crecidas pequeñas o medianas por un período razonablemente largo (1953 a 1982). Esta baja frecuencia, que también ocurrió en cuencas vecinas como del río Itajaí-Açu, llevó a la población a ocupar el área de riesgo de la *terrazza de inundación*.

En 1983 las ciudades sufrieron una inundación de significativo impacto, con perjuicios económicos (figura 2.3), que provocaron grandes dificultades para la población y para las empresas industriales y comerciales, algunas de las cuales nunca se han recuperado, y otras aún hoy se resienten de aquellas pérdidas, incapacitadas de realizar inversiones indispensables a su modernización. Esta crecida tuvo la mayor cota de inundación en 107 años (riesgo estimado de 170 años y 62 días de duración) y el perjuicio estimado en U\$S 78,1 millones. En esta época, apenas con los datos de registros continuos (1930-1983), fue estimada que la crecida podría tener un tiempo de retorno del orden de 1.000 años. Sin embargo, estos resultados no consideraron las

marcas históricas, y sobrestimaron el tiempo de retorno. En 1982 ocurrió otra crecida, menor que la de 1983, pero de magnitud e impactos similares (riesgo estimado de 50 años, duración de 65 días y perjuicios de U\$S 54,6 millones). Cabe destacar que la parte de las ciudades afectadas por las crecidas es una región en general valorizada, próxima al centro y con buena infraestructura. Esto es particularmente así en el caso de União da Vitória, que además de esto enfrenta dificultades de expansión, limitada por el río y por Porto União.

En las Figura 6.2 y Figura 6.3, se puede tener una idea de hasta donde llegaron las inundaciones, las características de las áreas inundadas; y por lo tanto, de la magnitud del impacto que éstas tuvieron sobre la población y sobre las ciudades, cuantificado en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Perdidas estimadas (mil U\$S) en União da Vitória y Porto União (JICA, 1995)

	1982	1993	1992	1983
Niveles	746,06	746,86	748,51	750,03
Pérdidas directas	6.910	17.289	36.388	52.081
Pérdidas indirectas (50%)	3.455	8.644	18.194	26.040
<b>PÉRDIDAS TOTALES 1.000 U\$S</b>	10.365	25.933	54.582	78.121



Figura 6.2. União da Vitória y Porto União en el periodo normal



Figura 6.3. União da Vitória y Porto União en la inundación de 1983

### **Conflicto**

En 1983 la población hizo un deducción simple: “antes de la presa no había crecidas, y después de la presa nos inundamos, por causa de la presa”, y pasó a considerar a la Usina de Foz de Areia y a la COPEL (empresa provincial encargada de la generación eléctrica) como los grandes culpables por la crecida. Fue así que se generó un conflicto, agraviado por la difícil comunicación entre las partes. Con el tiempo, este conflicto fue perdiendo fuerza, hasta la crecida de 1992. Como la población había comprendido que el riesgo era muy pequeño y nuevamente, en menos de 10 años, había ocurrido una segunda crecida, el conflicto retornó con mayor intensidad.

El largo período (1935 a 1982) sin crecidas importantes había creado una falsa seguridad entre la población, que fue ocupando las áreas ribereñas. Esto también incentivó a la no ejecución del planeamiento y la prevención contra inundaciones. La crecida de 1983 levantó un alerta sobre el riesgo, pero este fue despreciado con base en estudios estadísticos aparentemente confiables (50 años de datos), que sin embargo, no tuvieron en cuenta informaciones existentes y valiosas (las marcas históricas de inundación). Cuando en 1992, ocurrió una nueva crecida, menor que la de 1983, pero de magnitud e impactos similares, se generó entre la población un clima de revuelta y desconfianza con relación a los estudios técnicos. Estas condiciones motivó la creación en 1993 de una Organización No Gubernamental (ONG),

la SEC-CORPRERI (Sociedad de Estudios Contemporáneos – Comisión Regional Permanente de Prevención Contra Crecidas del Río Iguaçu). Esta ONG se ha transformado en el principal agente de concientización y movilización de la sociedad, así como en un interlocutor válido frente a todos los organismos (municipales, provinciales y federales) con jurisdicción sobre el problema. Entre las acciones desarrolladas por la SEC-CORPRERI están: (a) campañas educativas y charlas; (b) contratación de estudios y asesoría técnica para orientar la ciudad; (c) Plan de Acción SEC-CORPRERI: un conjunto de actividades y de propuestas con el objetivo específico de minimizar los impactos de las crecidas en la región; (d) apoyar la actualización del Plan Director.

Estudios realizados por el CEHPAR por solicitud de la COPEL indicaban que ni la presa de Foz do Areia ni su operación durante las crecidas tuvieron influencia sobre los niveles alcanzados en União da Vitoria y Porto União. La población, sin embargo, no creyó en los resultados de los estudios. Estudios independientes (Tucci y Villanueva, 1997) contratados por la CORPRERI confirmaron que la presa Foz do Areia no tuvo influencia sobre las crecidas recientes en las ciudades.

### **Medidas de Control**

Jica (1995) analizó la alternativa de construcción del dique de protección contra inundación para las dos ciudades y recomendó un estudio de viabilidad. Los estudios independientes (Tucci, 1993 y Tucci y Villanueva, 1997) y la discusión con la comunidad eliminó la alternativa estructural debido a lo siguiente: (a) financiación de las obras; (b) alteración de la convivencia de la ciudad con el río, que representa un elemento turístico fundamental. De esta manera las alternativas recomendadas fueron las siguientes: (a) zonificación de las áreas de inundación de las ciudades e implementación en el Plan Director de las mismas; (b) pronóstico y alerta de inundaciones.

La propuesta de zonificación (Tucci y Villanueva, 1997) fue de evitar las construcciones en la cota inferior a 10 años y disciplinar la ocupación hasta la cota de la crecida de 1983. En la Figura 6.4 son presentadas las áreas de riesgo en el cual se basó la zonificación de las ciudades. La ciudad de Porto União incluyó las medidas por legislación y en União da Vitoria aún existe mucha resistencia. El sistema de pronóstico en tiempo real es operado por la COPEL, que transmite para la Defensa Civil de la ciudad cuando los niveles de alerta son alcanzados.

Algunas de las medidas relacionadas: (a) las

recomendaciones fueron de poner marcas en los postes del alumbrado público para identificar las inundaciones y tornar así público los riesgos, evitando la especulación inmobiliaria por falta de informaciones; (b) ejecución de casas de tipo lacustre para convivir con las crecidas. Actualmente es frecuente ver casas a 2 o 3 m del suelo, como en la Figura 6.5 (generalmente al lado de otras al nivel de suelo). Sin embargo, la simple observación de muchas de estas casas impone dudas sobre la resistencia estructural de los pilares frente al embate de las aguas. Otros mecanismos de convivencia con las crecidas que las ciudades están adoptando es la ocupación de las áreas de inundación con actividades como áreas de recreación y parques, para impedir la ocupación de las áreas de inundación (Figura 6.5).

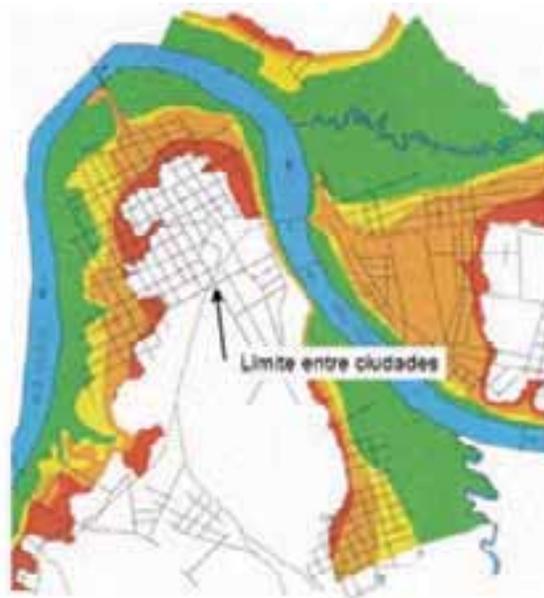


Figura 6.4. Áreas de riesgo en las ciudades de União da Vitória y Porto União



Figura 6.5. Casas de tipo lacustre para convivir con las crecidas.  
Aprovechamiento de la terraza de inundación para parque.



## Alternativas de control

Tucci (1996) estudió las alternativas de control de las inundaciones ribereñas en el río Iguazu:

- a. *Sin acción*: Esta es la alternativa en que no sería realizada ninguna acción, por lo tanto, se trata de una solución descartada, pues los perjuicios potenciales, actuales y futuros son significativos como para que ninguna acción sea ejecutada;
- b. *Zonificación de las áreas de inundación*: Esta alternativa involucra definir las cotas de riesgo de inundación para el área involucrada, utilizar ese mapa de crecidas para definir las reglas de construcción y ocupación para las áreas de alto riesgo e implementarlas en el Plan Director y Código de Obras de los Municipios.
- c. *Reservorios*: Los reservorios previstos para abastecimiento de agua en la cabecera del río Irai y en el río Piraquara deberán amortiguar parte de las crecidas. Se debe considerar que las cuencas de influencia de estos reservorios representan una parcela pequeña del área de drenaje, por lo tanto tiene un efecto limitado, principalmente si consideramos que los caudales máximos son más influenciados por las cuencas más urbanizadas. La construcción de reservorios en los ríos Palmital, Belém y Atuba, difícilmente, podrían amortiguar las crecidas de la urbanización ya existente. Los espacios vacíos podrán permitir la creación de parques para la amortiguación distribuida a lo largo de estas cuencas. El uso de reservorios en parques y del abastecimiento de agua podrá minimizar las crecidas en las cuencas que aún están en estado rural, como es el caso de los ríos Piraquara, Irai y Pequeño. Estas acciones se insertan dentro de los planes de largo plazo.
- d. *Confinamiento del escurrimiento con diques*: Esta solución involucra la transferencia del volumen de agua del lecho mayor al lecho menor o para un ancho predefinido. Esta alternativa seguramente involucra también la mejoría del escurrimiento en el lecho menor y tiende a crear remanso para los tramos superiores. Este tipo de sistema debe contemplar lo siguiente: (1) drenaje del escurrimiento urbano de las cuencas de contribución lateral; (2) sistema de bombas para el drenaje forzado de las áreas laterales. En este caso es necesario prever áreas de amortiguación para reducir la capacidad de las bombas; (3) sistema de mantenimiento y operación por los municipios. Este tipo

de sistema tiene limitaciones de seguridad para los diques, exigiendo también un sistema de alerta de crecidas.

- e. *Ampliación de la capacidad de escurrimiento:* Esta alternativa involucra la modificación del lecho natural del río Iguazu a través del aumento de la sección y/o desnivel del lecho o la construcción de un canal paralelo que aumente la capacidad de escurrimiento total del sistema. Este mismo sistema puede aún combinar el aumento de la capacidad de escurrimiento con la construcción de diques laterales en algunos tramos.

La solución consistente en solamente confinar el escurrimiento dentro del lecho menor, o aún en dos canales, implicará que la población tenga confianza y ocupe paulatinamente el lecho mayor de inundación, ya que habrá reducción de la frecuencia de la inundación. Para las crecidas de baja frecuencia aún habrá un riesgo de inundación. Con el desarrollo urbano habrá ocupación de las cuencas *aguas arriba* y la densificación en las áreas ya loteadas lo que provocará el aumento en los caudales de crecida y el aumento de la frecuencia de las inundaciones. Cuando esto ocurra, no habrá más espacio para ampliación de las secciones.

### **Concepción de las medidas de control**

La solución propuesta involucra la ampliación del canal natural del río Iguazu a lo largo de la RMC y en el tramo de *aguas abajo* que retiene el escurrimiento en el tramo más ocupado, la construcción de un canal paralelo sobre la margen izquierda que se inicia *aguas abajo* de la confluencia del río Irai con el río Piraquara, hasta la vecindad del puente del Contorno Sur. Este canal debe crear un área interna con un ancho que varíe entre 300 m y 1 km, donde fue creado un Parque público.

Esta condición aumenta la capacidad del lecho menor para contener las crecidas de los afluentes de la margen derecha y utiliza un canal paralelo abierto para escurrir el caudal de los afluentes de la margen izquierda y la contribución de *aguas arriba* del río Irai. Como los afluentes de la margen derecha son los que contribuyen con el caudal máximo, el canal actual debe también ser ampliado para soportar esta contribución. El canal paralelo tiene doble función, aumentar la capacidad de escurrimiento y confinar el área de preservación creando una barrera natural.

Esta filosofía debe ser desarrollada también en los

afluentes para que las crecidas no se amplíen *aguas abajo* a medida que ocurre la urbanización. Las áreas ribereñas deben ser áreas preservadas para mantener las condiciones de escurrimiento natural. En algunos tramos, podrá ser necesario crear pequeños diques y drenaje lateral debido a las características urbanas ya existentes que no permiten económicamente la desapropiación y definición hidráulica del perfil de fondo del canal. En la Figura 6.7, se presenta de manera esquemática la característica de la concepción del sistema.

La expropiación del área interna del parque fue (y está siendo) realizada simultáneamente a la construcción del canal paralelo, porque después de construido el canal las áreas quedaron revalorizadas y podrían volver inviable la expropiación, lo que acarrearía la ocupación interna entre los canales, volviendo sin efecto una de sus principales funciones: la de funcionar como una barrera a la ocupación urbana clandestina. Además de esto, se vuelve imprescindible la implementación del Parque por el poder público, evitando de esta manera la ocupación clandestina.



Figura 6.7. Concepción del control de crecidas.

Por lo tanto, la concepción de control de crecidas de la RMC involucra las siguientes acciones:

- Control de crecidas en el río Iguazu/Irai a través de un canal paralelo y obras complementares de escurrimiento;
- Desarrollo del Parque del Iguazu a lo largo de todo el tramo del canal paralelo;
- Definición de la implementación de áreas de amortiguamiento en parques lineales y urbanos a lo largo de los afluentes para evitar la ampliación de crecidas con la urbanización;

Plan Director de Drenaje Urbano para la RMC, que

contemple la legislación sobre la construcción de nuevos loteos, buscando evitar la ocupación de áreas inadecuadas y la ampliación de las crecidas naturales.

En la Figura 6.8, se presenta el área de inundación, la expansión urbana y los dos lechos de los ríos. En la Figura 6.9, son presentadas fotos generales con el área de inundación del parque que fue implementado y un área ya implementada.



Figura 6.8. Características de las áreas de inundación.

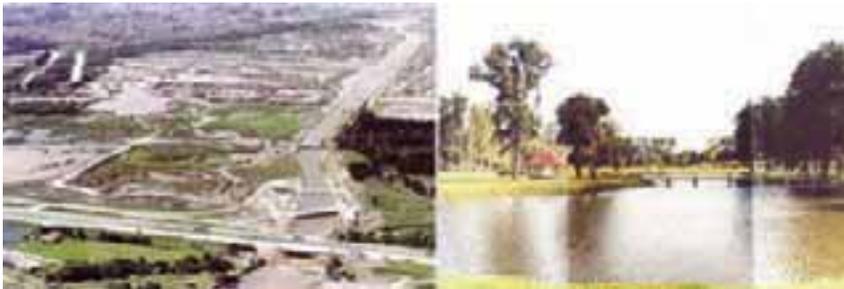


Figura 6.9. Área de inundación, canal paralelo y parque (foto a la derecha).

#### **6.1.4 Gestión de inundaciones en Porto Alegre**

##### **Descripción**

La Región Metropolitana de Porto Alegre (Estado de Rio Grande do Sul, Brasil; 3 millones de habitantes) se encuentra en el Delta del río Jacuí y el Lago Guaíba, que posee una cuenca hidrográfica del orden de 80 mil km<sup>2</sup> y cuatro ríos que convergen en el Delta y, posteriormente, en el Lago. La ciudad de Porto Alegre, localizada en las márgenes de este sistema, tiene su área central junto al puerto, dentro del Delta y en el Lago.

Existen registros de los niveles máximos de inundación en Porto Alegre (Figura 2.5) desde 1899, mostrando que ocurrieron grandes inundaciones ribereñas como la del año 1941 (Figura 6.10). En 1970, fue construido un dique para proteger la ciudad contra las inundaciones. Este sistema de diques posee varias subcuencas que drenan para estaciones de bombas. Cuando el río está con cota arriba de la cota de las calles el escurrimiento drenado es bombeado hacia el río. Este sistema es ejecutado y controlado por el Departamento de Desagües Pluviales de la Municipalidad de Porto Alegre.

El IPH (2001) presentó la primera fase del Plan Director de Drenaje Urbano de la ciudad de Porto Alegre, dirigido principalmente al control de las inundaciones en el drenaje urbano. Fueron desarrollados los siguientes productos: (a) Medidas no estructurales: aspectos legales y de gestión; (b) Plan Director de 3 cuencas (recientemente fueron desarrolladas otras 3 cuencas más); (c) Revisión del Sistema de Diques con la evaluación de las cuencas que drenan hacia los diques; (d) Manual de Drenaje Urbano para la ciudad.



Figura 6.10. Inundación de 1941 en Porto Alegre.

Las medidas no estructurales establecieron el caudal máximo de salida de cada emprendimiento y la estimación de los volúmenes para lotes y loteos (o lotificaciones). Fue también propuesto un decreto para el control de los lotes. Estos elementos se presentan en los anexos B y D. También fue analizada la recuperación de costos para el drenaje urbano, introduciendo una formulación para su cobranza, descripta en el anexo C.

El Plan de cada cuenca siguió la metodología descrita en el capítulo 5, o sea: (a) evaluación de la capacidad de escurrimiento de la red de drenaje; (b) identificación de los lugares de inundación; (c) combinación de detención y aumento de la capacidad de escurrimiento, intentando mantener el caudal de salida igual a la capacidad existente para el escenario futuro; (d) verificación de los escenarios superiores al del proyecto. La ciudad disponía de un catastro detallado del drenaje: cota, diámetro y largo de cada conducto en planta 1:2000, juntamente con la topografía de la ciudad. De esta manera, fue posible detallar todo el sistema en las subcuencas.

En la Figura 6.11, son presentadas las cuencas (en verde) que tienen su escurrimiento bombeado para los ríos de la vecindad y las cuencas que escurren por gravedad (marrón). Las cuencas que convergen para las estaciones de bombeo fueron simuladas y también fue verificada la capacidad de las bombas para escurrir todo el volumen durante las inundaciones. A continuación son presentados los resultados de la cuenca do Areia que fue estudiada en el Plan (IPH, 2001), y su reciente actualización por Cruz (2004).



Figura 6.11. Ciudad de Porto Alegre junto al Delta de Jacuí y del Lago Guaíba. El escurrimiento de las áreas verdes es bombeado hacia el Guaíba cuando el dique las protege contra las inundaciones. Las áreas marrones escurren por gravedad y por conductos bajo presión.

## Cuenca del Areia – Porto Alegre - Brasil

La cuenca posee dos partes, la superior que drena por conducto bajo presión encima de la cota de 9 m directo para el río Gravataí (12 km<sup>2</sup>), y una segunda parte que es drenada por bombeo con un área similar a la anterior (donde se encuentra el aeropuerto). En la Figura 6.12, se presenta una imagen de las dos partes de la cuenca y en la misma figura son presentadas la división de la cuenca (11 subcuencas) y el sistema de drenaje representado. La simulación de los escenarios de Proyecto indicó los lugares de inundación para diferentes riesgos. El estudio de alternativa fue inicialmente realizado por prueba y error con base en los lugares disponibles y en la ampliación de la capacidad de drenaje. Recientemente, Cruz (2004) revisó el estudio y obtuvo un nuevo dimensionamiento con base en el modelo de optimización.

En la Figura 6.13, se puede observar las detenciones elegidas, y en la figura 6.14 los hidrogramas, comparando las siguientes soluciones: (a) canalización del sistema sin considerar el costo de ampliación del conducto que pasa por el aeropuerto; (b) combinación de detenciones y ampliación manteniendo el caudal *aguas abajo*. En este caso fueron utilizadas dos alternativas: optimización de toda la cuenca y optimización por subcuencas. Se puede observar que el mejor resultado fue obtenido simulando toda la cuenca.

En la Tabla 6.2, se presenta la comparación entre la dos principales alternativas, mostrando que la alternativa con detención cuesta menos y no amplía el caudal hacia *aguas abajo*. Se observó que en esta cuenca se utilizaron 77 m<sup>3</sup>/ha y cerca de 74 % del área de la cuenca con amortiguación. Junto con la detención se utilizó la ampliación de los conductos para transportar el escurrimiento hasta las detenciones. La distribución del costo fue del 79% para aumentar los conductos, 17,7% para las detenciones y 3,3% para expropiación.

**Tabla 6.2. Análisis comparativa entre las alternativas**

Variable	Canalización	Detención y ampliación
Caudal máximo (m <sup>3</sup> /s)	99	48
Volumen de almacenamiento (m <sup>3</sup> )	0	73.552
Costo de implementación (R\$ millones)	60,3	39,6
Costo por habitante (R\$)	364,8	239,8

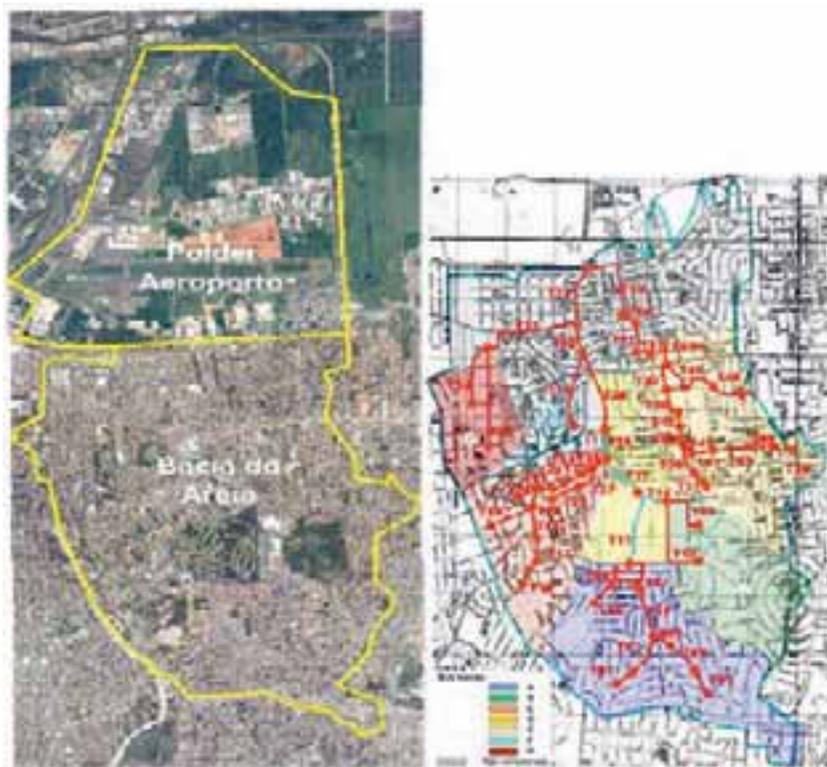


Figura 6.12. Imagen (a la izquierda) del conjunto de la cuenca de Areia y Polder del Aeropuerto e imagen a la derecha de las subcuencas con el sistema de drenaje simulado (Cruz, 2004).

### Escenario de drenaje en la ciudad

Cruz (2004) analizó los escenarios del desarrollo del drenaje urbano considerando lo siguiente: (a) Control previo: para un escenario de planeamiento integrado, o sea, implementación de una superficie urbanizada concomitantemente al sistema de drenaje controlado; (b) control posterior: para un escenario de urbanización consolidada.

Partiendo de los valores medios obtenidos para los escenarios “a priori” y “a posteriori” fue realizada una aplicación en el municipio de Porto Alegre como forma de análisis del planeamiento ejecutado y futuro en un horizonte de 20 años, a través de la comparación de los costos involucrados. La ciudad posee 27 subcuencas y 430,27 km<sup>2</sup> y una población prevista para el municipio de 1,8 millones en 2025. Analizando el desarrollo ocurrido se obtuvo el dato de que el escenario de control posterior es 6,4 veces superior al del control previo. Considerando también el futuro desarrollo urbano de la ciudad se estimó que utilizando canalización, los costos serían de R\$ 790 millones (reales), mientras que si el control fuera realizado con amortiguación el

costo quedaría en R\$ 303 millones para el valor presente de un proyecto de 20 años.

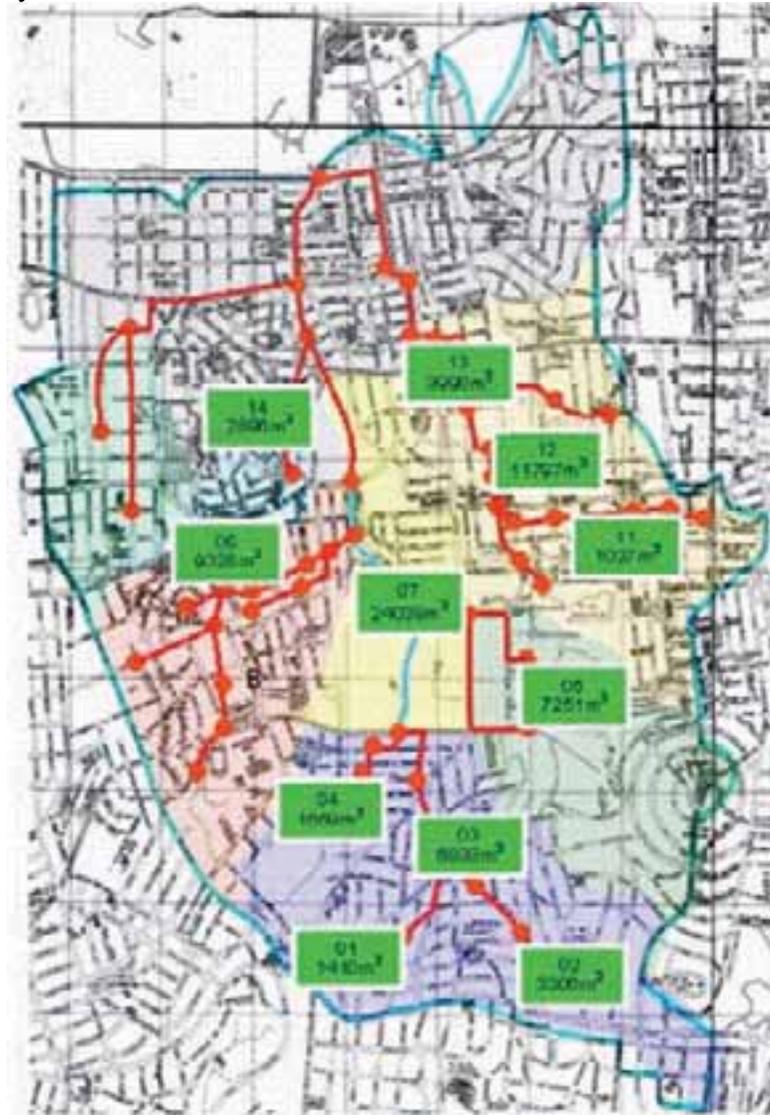


Figura 6.13. Detenciones planificadas para la cuenca de Areia (Cruz, 2004).

### 6.1.5 Plan de aguas pluviales de Brasil

El Ministerio de las ciudades de Brasil está desarrollando un programa nacional de aguas pluviales (Tucci, 2005) donde los principales aspectos son descriptos a continuación. Estos elementos pueden ser alterados en función de futuras discusiones dentro del gobierno. Para mayores detalles consulte la referencia citada anteriormente.

## Objetivos y principios

El Programa de Aguas Pluviales propuesto tiene como objetivo reducir la vulnerabilidad de la población a las inundaciones ribereñas, las que ocurren en el drenaje urbano, la minimización de los impactos ambientales a través de una política institucional, económica y técnica y un plan de acción para la gestión de las aguas pluviales en conjunto con los otros elementos del desarrollo urbano de las ciudades brasileñas. Los principios son los mismos destacados en el capítulo 5.

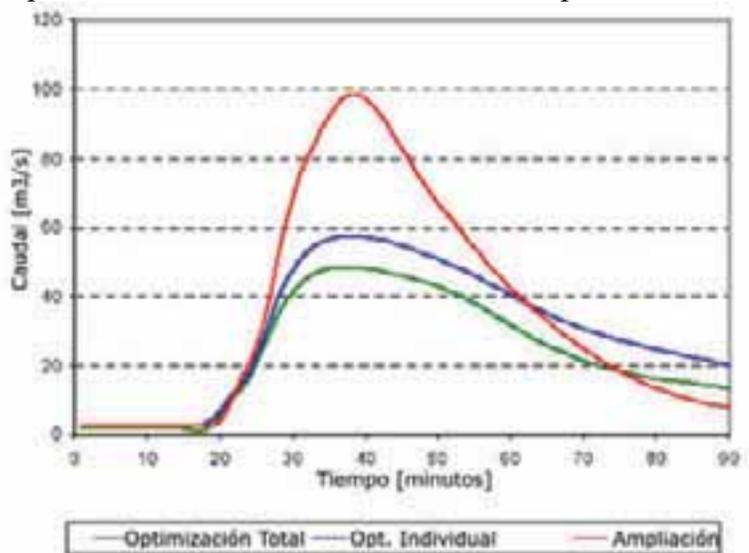


Figura 6.14. Comparación de los hidrograma para las alternativas de la cuenca de Areia (Cruz, 2004).

El programa presentado es basado en los siguientes elementos:

- **Institucional:** trata de los elementos legales, de gestión, capacitación, ciencia y tecnología y datos;
- **Tecnológico:** con destaque de los elementos de cantidad y calidad, trata de los elementos técnicos necesario al desarrollo de una gestión sustentable.
- **Económico-Financiero:** trata de los elementos de viabilidad económica y financiera de la gestión de aguas pluviales.
- **Participación pública:** trata de los mecanismos potenciales para mayor participación pública en el desarrollo del Programa
- **Plan de Acciones:** utilizando la base propuesta en los otros planes, desarrolla el plan de acción para el Ministerio de las Ciudades proporcionando la implementación del programa.

## **Estructura**

El programa propuesto tiene los siguientes niveles fundamentales para el desarrollo de las acciones entre los elementos citados, de acuerdo con la legislación presente en la realidad brasileña: (a) Nivel Federal o Provincial; (b) nivel municipal.

A nivel Federal (cuencas hidrográficas federales) son establecidos los controles externos a la ciudad a través de la legislación. Esta legislación incentivará las entidades provinciales a reglamentar de la misma manera a nivel de las cuencas provinciales. La gestión puede ser dividida con relación: (a) fiscalización del otorgamiento del uso; (b) desarrollo del programa de apoyo para áreas ribereñas a través de la prevención y del alerta; (c) financiación; (d) apoyo técnico; (e) capacitación y; (e) ciencia y tecnología.

La legislación llevará a que los municipios desarrollen un Plan de Saneamiento Ambiental donde están incluidas las aguas pluviales, asociados a los Planes Directores de las ciudades y a su implementación a lo largo del tiempo. Dentro del nivel municipal el Plan deberá incorporar en la legislación los elementos de uso del suelo y drenaje urbano, preparación de los Planes de Acción por cuenca urbana para solución de los problemas actuales y los programas de corto, medio y largo plazo. La gestión involucrará la fiscalización y la implementación del plan con la financiación del Programa Nacional.

## **Institucional**

Los elementos institucionales son la base para conformar la estructura del desarrollo del programa. Estos elementos se dividen en: legales, gestión, capacitación y ciencia y tecnología. Los elementos legales establecen la propuesta de realizar una legislación que oriente al programa; la gestión establece una base para que actúen las entidades involucradas en la implementación del programa; la capacitación y ciencia y tecnología desarrollan el soporte de personal y desarrollo del conocimiento.

La política de control del drenaje urbano involucra dos ambientes: externo a la ciudad e interno a la ciudad (ver capítulo 4). Existe una gran interrelación entre los elementos de uso del suelo, control ambiental y recursos hídricos, tanto internamente en la ciudad como en el Plan de Cuenca Hidrográfica. El gerenciamiento de la ciudad es controlado con el monitoreo de lo que la ciudad exporta para el resto de la cuenca, induciendo ésta a su control interno, utilizándose los medios legales y financieros. El proceso interno dentro de las ciudades es una atribución

esencialmente del municipio o de los consorcios de municipios, dependiendo de las características de las cuencas urbanas y su desarrollo.

#### **6.1.6 Regulación del control externo a la ciudad**

**Mecanismo de Regulación:** La ley de recursos hídricos n°. 9433, en la sección de otorgamiento para el uso, artículo 12, establece que está sujeta a otorgamiento:

*“III – lanzamiento en cuerpo de agua de cloacas y demás residuos...”*

y

*“V – otros cursos que alteren la cantidad y calidad del agua en cuerpos de agua”.*

La reglamentación de la ley de otorgamiento compete al Consejo Nacional de Recursos Hídricos de acuerdo al artículo 13° ley n° 9433 del 8 de enero de 1997 y por el artículo 1° del Decreto n° 2612 del 3 de junio de 1998. En la resolución n° 16 del 8 de mayo de 2001 el referido Consejo definió las bases del otorgamiento. En el artículo 12° establece que el otorgamiento debe observar los Planes de Recursos Hídricos. En el artículo 15° establece que el otorgamiento

*“para lanzamiento de efluentes será dado en cantidad de agua necesaria para la dilución de carga contaminantes, que puede variar a lo largo del plazo de otorgamiento, con base en los patrones de calidad del agua correspondiente a la clase de encuadramiento del cuerpo receptor y/o criterios específicos definidos en el correspondiente Plan de Recursos Hídricos o por los órganos competentes”.*

En el artículo 12° V de la Ley 9.433 y en la resolución del Consejo artículo 4° V es explicitado que el otorgamiento es necesario para:

*“otros usos y/o interferencias, que alteren el régimen, la cantidad o la calidad de agua existente en un cuerpo de agua”.*

De esta manera, se observa que la legislación de recursos hídricos permite la introducción de la regulación del control de los efluentes de áreas urbanas a través del otorgamiento, en la medida que el escurrimiento de estas áreas comprobadamente alteren la cantidad y la calidad (ver capítulos anteriores). De esta manera esta regulación puede ser realizada a través de una resolución del Consejo Nacional de Recursos Hídricos.

**Justificación de la regulación a través del otorgamiento:** Los objetivos del control externo a la ciudad son:

- mantener la calidad del agua de los ríos aguas abajo dentro de la clase del río;
- evitar impactos debido a la inundación del drenaje urbano y de las áreas ribereñas.

El primero de los objetivos está claramente definido dentro de los condicionantes de otorgamiento, en la medida que las áreas urbanas producen alteraciones en la calidad del agua; por lo tanto, la ciudad que contribuye para el(los) río(s) de *aguas abajo* necesita de otorgamiento. En cuanto a los impactos cuantitativos como consecuencia de la urbanización (alteración del pico y del volumen) también están dentro de las atribuciones del otorgamiento en la medida que las áreas urbanas “alteran la cantidad y calidad del agua”. Sin embargo, no quedaría claro el uso del mecanismo de otorgamiento como inducción al proceso de control de las inundaciones urbanas ribereñas. Considerando los siguientes aspectos:

- que la Constitución prevé que el gobierno federal debe actuar en la prevención de crecidas y sequías, como también establece como atribución en la ley n°. 9984 de 17 de julio de 2000, artículo 3° X:

*“planear y promover acciones destinadas a prevenir o minimizar los efectos de sequías e inundaciones, en el ámbito del Sistema Nacional de Gerenciamiento de Recursos Hídricos, en articulación con el órgano central del Sistema Nacional de Defensa Civil, en apoyo a las Provincias y Municipios”.*

- que las inundaciones ribereñas también pueden ocurrir debido a alteraciones en el lecho mayor por construcciones a lo largo de la ciudad, el mecanismo de otorgamiento también es justificado.

**Elementos para la regulación:** Es posible establecer las normas del otorgamiento a través del Consejo Nacional de Recursos Hídricos, como mecanismo de control externo a la ciudad para inducir a los municipios al desarrollo de las acciones dentro de su territorio de competencia.

Algunos de los elementos fundamentales para definición de esta reglamentación son:

- La propuesta de resolución debe contener los parámetros básicos necesarios al otorgamiento de los efluentes urbanos como un todo y no sólo del drenaje urbano, ya que los impactos debido al escurrimiento sanitario, drenaje urbano y residuos sólidos no son separables;
- No es posible exigir el permiso de todas las ciudades del

país a corto plazo, pues no sería viable a todas las acciones efectivas y no existirían recursos para el financiamiento del desarrollo del planeamiento y el control simultáneo;

- Las reglas de otorgamiento deben establecer procedimientos y metas de resultado en el Planeamiento de las acciones de acuerdo con la clase del río que se esté planificando.

Para resolver el primer ítem expuesto, la resolución debe solicitar un Plan de Saneamiento Ambiental Municipal: Abastecimiento de agua, Escurrimiento Sanitario, Drenaje Urbano y Residuos Sólidos (de acuerdo con el proyecto de ley en elaboración) y definir las normas a las cuales los municipios deben atender para obtener su otorgamiento. Estas normas deben ser establecidas y serán la base para el desarrollo de los Planes de Saneamiento Ambiental. Para resolver el segundo ítem es propuesto el uso de plazos de acuerdo con el tamaño de las ciudades. Son dados otorgamientos provisorios y renovables de acuerdo con los plazos y cumplimiento de los mismos. El tercer ítem es resuelto estableciéndose metas asociadas al otorgamiento de los efluentes de acuerdo con metas del Programa.

La propuesta fue preparada considerando la distribución de ciudades en el país y la carga asociada a la población. No fue evaluada la capacidad del gobierno en financiar el programa, que es una decisión más política. Por lo tanto esta propuesta debe ser utilizada para discusión. Lo importante de un programa de esta naturaleza es desarrollarlo con metas que permitan tener una “luz al final del túnel” con respecto a la contaminación de las ciudades.

En la Tabla 6.3, son presentadas 4 clases de municipios de acuerdo con la población de la ciudad. De acuerdo con lo presentado en los capítulos anteriores, los principales problemas se encuentran en las ciudades de mayor porte. Se puede observar que el número de municipios con por los menos 500 mil habitantes son 30, representando 27,25 % de la población brasileña. Para los municipios entre 100 y 500 mil habitantes son 190 municipios y 23,68 % de la población. Por lo tanto, son 212 los municipios con población superior a 100 mil habitantes, resultando un total de 51,13 % de la población. Es en este universo del país donde se encuentran los mayores problemas relacionados con los efluentes urbanos.

Siendo así, es propuesto el escalonamiento temporal para las acciones junto a los municipios basadas en las etapas definidas en la Tabla 6.4. La etapa de elaboración de las medidas no estructurales involucra la aprobación dentro del municipio de los

reglamentos para el control de los impactos de los nuevos desarrollos en cuanto a los distintos elementos relacionados con el Saneamiento Ambiental. La fase de conclusión del Plan involucra la finalización y aprobación por los poderes municipales. La conclusión es definida como la fase en que el municipio alcanza las metas previstas en el Plan. El otorgamiento será dado por plazo definido, siempre sujeto a los resultados de operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento y del control de los impactos ambientales. Esta fase posterior involucra la fiscalización del cumplimiento de la operación y mantenimiento de los sistemas a lo largo del tiempo.

Para el desarrollo del Programa los otorgamientos serían dados de acuerdo con las metas arriba mencionadas y renovadas de acuerdo con el cumplimiento de éstas. El Programa debería introducir un bono fiscal para los municipios que cumplan con las metas antes del plazo y una penalización relacionada a la remisión de recursos federales para los municipios que no consigan los otorgamientos.

La norma involucra lo siguiente:

1. Preparación de la resolución a ser propuesta al Consejo Nacional de Recursos Hídricos con base en las mismas fases descriptas anteriormente;
2. Establecimiento de patrones a ser seguidos en los Planes Integrados de los Municipios que atiendan la resolución. Deberá ser desarrollado un manual a ser obedecido en la elaboración de los Planes, resultados de la implementación de las obras y procedimientos para el monitoreo del funcionamiento de los sistemas de tratamiento y control externo a las ciudades.

Tabla 6.3. Distribución de la población según el censo de 2000, de acuerdo con datos del IBGE.

Cat.	Clasificación de los municipios P = población	Número de municipios	Proporción del total %	Población en millones	% de la población
A	P > 500 mil	30	0,54	45,257	27,25
B	100 < P < 500 mil	192	3,49	39,337	23,68
C	20 < P > 100	1224	22,23	48,155	28,99
D	P < 20 mil	3061	73,74	33,363	20,08
	Total	5507	100	166,112	100

Tabla 6.4. Fases y criterios para el otorgamiento de los efluentes.

Fase	Categoría del	Período del	Período	Condicionante
------	---------------	-------------	---------	---------------

	<b>municipio</b>	<b>otorgamiento(*) Años</b>	<b>acumulado a partir del inicio</b>	<b>para renovación</b>
I	A	2	2	Iniciar el Plan de Saneamiento Ambiental
	B	3	3	
	C	5	5	
	C	7	7	
II	A	1	3	Implementación de las medidas no estructurales
	B	2	5	
	C	2	7	
	C	2	9	
III	A	2	5	Conclusión del Plan de Saneamiento Ambiental y el inicio de las obras
	B	2	7	
	C	3	10	
	D	5	14	
IV	A	6	11	Conclusión de las obras y metas alcanzadas
	B	6	13	
	C	7	17	
	D	10	24	
V	Todos	3	11 a 24	Revisión del otorgamiento a cada cinco de acuerdo con indicadores de las ciudades

(\*) el número de años de cada actividad debe estar condicionado a la capacidad de financiación del gobierno federal.

## **Inversiones**

Las estimaciones de costo se basan en la población y en el área de las cuencas urbanas. En esta etapa no se dispone de las áreas de las cuencas urbanas de todas las ciudades para este análisis y la estimación fue realizada con base en un valor unitario basado en la población. Este valor varía con las condiciones de urbanización de las ciudades. Para cuencas urbanas centrales con gran dificultad de espacio y alta cantidad de obras de transporte del escurrimiento el valor es del orden de R\$ 235,00/hab., mientras que en cuencas con densidad media y con más espacio los costos son del orden de R\$ 125,00/hab. Para ciudades menores fue adoptado el valor de R\$ 80,00/hab. En las ciudades de la faja A fueron adoptados para el 35% de la población el costo de áreas centrales y para 65% de la población el costo de áreas de mediana densidad. En las ciudades de la Faja B la proporción adoptada fue del 20 y 80% respectivamente. En las ciudades de la Faja C se adoptó sólo el valor de densidad media y en las ciudades de la Faja D se adoptó el valor de baja densidad. En la Tabla 6.5, son

presentados los totales estimados para las obras, resultando cerca de R\$ 20,36 billones para todo el programa de obras.

Tabla 6.5. Costos de los Planes y de las obras de control para riesgo de 10 años.

<b>Categoría</b>	<b>Clasificación de los municipios P = población en mil</b>	<b>Población en millones</b>	<b>Costos estimados de las obras R\$ millones</b>	<b>Costo de los Planes R\$ millones</b>	<b>Costos totales R\$ millones</b>
A	P>500	45,257	7252,4	362,6	7.615,1
B	100 < P < 500	39,337	5.6215,2	281,25	5.906,5
C	20 < P >100	48,155	4.815,5	240,8	5.056,3
D	P <20	33,363	2.669,0	133,5	2.802,5
	Total	166,112	20362,2	1018,1	21.380,3

## 6.2 Inundaciones urbanas en Argentina

### Introducción

En la Argentina la frecuencia de inundaciones con series consecuencias es muy importante. Las estadísticas indican, en término medio, un acontecimiento importante a cada diez. El Banco Mundial (2000, *apud* Bertoni, 2004), ha clasificado las inundaciones en la Argentina según cuatro tipos básicos, dependiendo de las regiones geográficas: a) en los valle de los grandes ríos, (b) en el piedemonte de la Cordillera de Los Andes, (c) en ciudades y zonas rurales asociadas a las tormentas severas ("flash flood") y d) en las zonas de llanura, asociadas a la inadecuada gestión de los recursos naturales, particularmente el suelo y la vegetación. Las inundaciones del primer tipo son importantes por su duración y por su grado de afectación. Normalmente estas se asocian a los grandes ríos de la cuenca del Plata, la quinta en importancia en el mundo. Esta importante región produce más del 76% del PBI del país y alojada al 70% de la población argentina.

Argentina posee aproximadamente el 90% de su población localizada en áreas urbanas, hecho que la ubica entre los países que detentan la concentración urbana más alta de América del Sur. A continuación se presentan casos de inundaciones urbanas ocurridos en las ciudades de Buenos Aires, Córdoba, Santa Fe y Trelew, como así también inundaciones particulares ocurridas sobre las localidades serranas de San Carlos Minas y Villa Carlos Paz.

## 6.2.2 Inundaciones en la ciudad de Buenos Aires, Argentina

Buenos Aires y su conurbano (17 partidos que conforman el denominado “Conurbano Bonaerense”) concentra una población que se aproxima a 12,5 millones de habitantes, diez veces superior a las poblaciones de Rosario y de Córdoba (las dos ciudades que le siguen en términos de concentración urbana). El área metropolitana de Buenos Aires cubre aproximadamente 700 km<sup>2</sup>. La región de más alta densidad alberga a casi 15.000 hab/km<sup>2</sup> (Maza *et al.*, 2004).

El Conurbano Bonaerense reúne al 24,5% de la población del país y al 63,3% de la provincia de Buenos Aires. Si se lo considera en conjunto con la ciudad de Buenos Aires, concentra el 41% de la población total del país, con una densidad media de población de 2.165,6 hab/km<sup>2</sup>, conformando la tercera aglomeración urbana de Latinoamérica. La misma posee un efecto dominante sobre todo el país. El fenómeno supera incluso la concentración observada en otras regiones del mundo (

Tabla 6.6).

En la Figura 6.15, se observa la expansión geográfica de Buenos Aires y de su entorno. Actualmente la densidad media de población en la capital argentina es de 150 hab/ha y las zonas verdes alcanzan a 0,6 m<sup>2</sup>/hab contra los 15 m<sup>2</sup>/hab recomendados por la Organización Mundial de la Salud (*Clarín*, 23-09-00).

Tabla 6.6. Peso de las grandes metrópolis en la población urbana y la población total de cada país, para el año 1990.

Ciudad	Porcentaje sobre la población urbana del país	Porcentaje sobre la población total del país
Buenos Aires (Argentina)	41	36
Seul (Corea del Sur)	35	26
México (México)	33	24
El Cairo (Egipto)	39	17
Tokio (Japón)	19	15
París (Francia)	21	15
Manila (Filipinas)	29	14
Londres (Reino Unido)	14	13
Bruxelas (Bélgica)	10	10
Lagos (Nigeria)	23	8

(Fuente: World Bank Indicators, 1995).

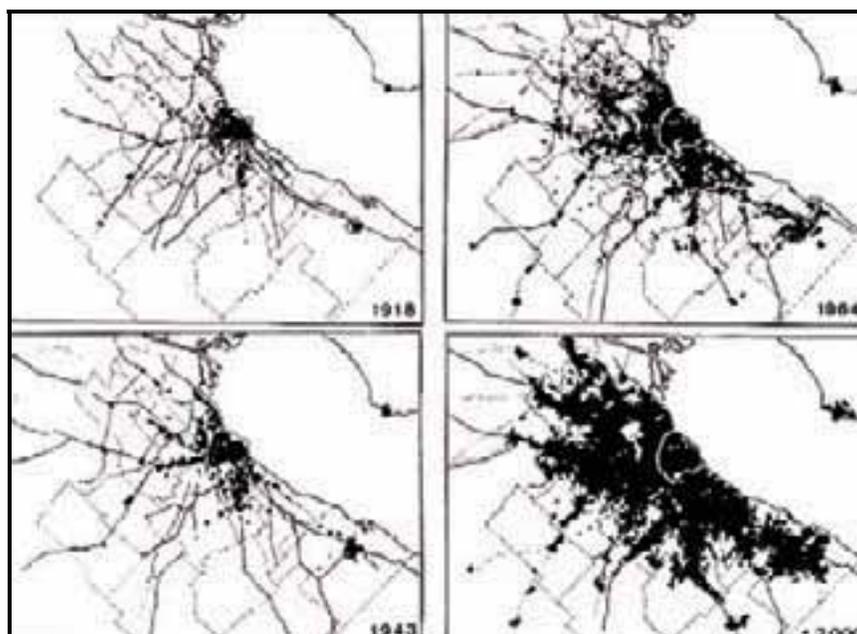


Figura 6.15. Crecimiento de Buenos Aires y del conurbano bonaerense.  
(Fuente: Guglielmo, 1996).

El constante y no planificado crecimiento de la ciudad de Buenos Aires, la falta de inversiones durante más de medio siglo y la alteración del régimen de precipitaciones, transformaron en obsoleto un sistema de desagües ejemplar para su época (Maza *et al.*, 2004).

En las últimas décadas la ciudad de Buenos Aires se ha inundado con frecuencia generando serios inconvenientes y daños materiales de consideración. Falczuk (2001) cita dos causas básicas asociadas a esta problemática: (a) las crecientes naturales de los cursos de agua que atraviesan la ciudad y los problemas estructurales de la red de desagües, cuya capacidad ha sido superada por la ocupación no planificada de los valles de inundación y (b) los fuertes vientos del sector sudeste (“*sudestadas*”) que producen un crecimiento del río de la Plata por encima de su media normal, anegando las zonas costeras. Cabe indicar que de acuerdo a las condiciones meteorológicas imperantes en la ciudad de Buenos Aires es raro la conjunción de ambos efectos, es decir, que durante la ocurrencia de precipitaciones intensas de corta duración se verifiquen también sudestadas o viceversa. Desde 1985 hasta marzo de 1998 se produjeron en el área metropolitana de Buenos Aires aproximadamente 26 procesos de inundación por precipitación pluvial y desborde del sistema de desagües. Una de las tormentas más severas ocurrió el 24 de enero de 2000 (Figura 6.16 y Figura

6.17), la cual produjo la pérdida de vidas humanas y severos daños económicos.



Figura 6.16. Inundación en la ciudad de Buenos Aires (enero 2000). Intersección de Avda. Cabildo y Blanco Encalada. (Fuente: [www.clarin.com.ar](http://www.clarin.com.ar))



Figura 6.17. Inundación en la ciudad de Buenos Aires (enero 2000). (Fuente: [www.clarin.com.ar](http://www.clarin.com.ar))

La ciudad actualmente cuenta con un complejo sistema de desagües que descargan en el Río de la Plata. Este sistema está conformado por dos subsistemas que abarcan dos grandes áreas: (i) *Radio Antiguo* y (ii) *Radio Nuevo*. El primero de ellos constituye un sistema mixto pluvial-cloacal que abarca aproximadamente 3.000 ha y cuya construcción fue iniciada en 1869. En el sector conocido como *Radio Nuevo*, el sistema de drenaje pluvial fue construido *a posteriori* del sistema cloacal, hecho que significó que una extensa y poblada región de la ciudad estuviese expuesta por años a los efectos de la inundación que acompañaban los desbordes de los principales arroyos que la

atravesaban (Maldonado, Vega y Medrano). Por tal razón dichos arroyos fueron posteriormente entubados, complementándose el sistema de drenaje actual con una red de conductos de orden menor.

Ambos subsistemas fueron proyectados para una población y densidad habitacional menores a las actuales, considerando una ciudad de edificación abierta, con espacios no impermeabilizados y bajo coeficiente de escorrentía. En la actualidad, el alto porcentaje de superficies impermeables directamente conectadas, la escasa pendiente superficial y la gran extensión de las cuencas hídricas torna complejo el desagüe en ocasión de lluvias intensas.

En síntesis, puede afirmarse que en la ciudad de Buenos Aires a lo largo de su historia existió un manejo de las inundaciones ligado a una concepción del desastre como producto, esto es, como algo que solo puede enfrentarse y solucionarse una vez ocurrido. Cada inundación catastrófica resulta de un proceso continuo, diario, de construcción social del riesgo. En este proceso es fundamental el papel jugado por la gestión urbana vinculada tanto a las inundaciones como a la orientación de la ocupación de territorios que, como la cuenca baja del Maldonado, son altamente peligrosos respecto a la inundación.

### **Necesidad de una gestión integral en relación a las inundaciones urbanas**

En relación a la gestión urbana vinculada a las inundaciones, en la ciudad de Buenos Aires desde siempre se consideró una solución única: la construcción de obras de ingeniería que si bien son necesarias, no son suficientes. Ejemplos concretos son las obras ejecutadas en el arroyo Maldonado: el tabicamiento del emisario principal y la remoción de un viejo puente carretero (en el cruce de las Av. Juan B. Justo y Santa Fe) son paliativos que aumentan en parte la capacidad de conducción en la canalización, pero no impiden las inundaciones (Maza *et al.*, 2004).

En relación a la gestión de la ocupación de la ciudad (instrumentos de planificación urbana), cabe indicarse que en ningún momento se incluyó en la ciudad de Buenos Aires la problemática del riesgo por inundaciones como elemento clave a considerar en la definición de zonificaciones del suelo e intensidades de uso. Ejemplos concretos de tal ausencia es la permisividad de los códigos respectivos en cuanto a aumentos de factores de ocupación y la construcción de sótanos a la vera de un antiguo arroyo canalizado.

Ambas gestiones siempre fueron independientes una de la otra: la primera, con dominio sobre la ciudad oculta bajo el asfalto, la segunda con dominio sobre la ciudad visible. Una alternativa válida que apuntaría a mitigar las inundaciones catastróficas es la integración de ambas gestiones, complementando la construcción de obras de ingeniería con una política urbana capaz de redefinir las pautas de ocupación de áreas con riesgo de inundación. Esta gestión, integral, debería incluir, además, mecanismos de comunicación del riesgo efectivos, como forma de vincular a todos los actores en juego.

A fin de optimizar el funcionamiento del sistema pluvial existente, y diseñar las obras que mejoren la capacidad de la ciudad para enfrentar las inundaciones, el municipio centró uno de sus ejes de acción en el desarrollo del Programa de Protección contra Inundaciones (con financiamiento del Banco Mundial), cuyo núcleo consiste en:

- El Plan Director de Ordenamiento Hidráulico, que comprende la planificación del funcionamiento del sistema de drenaje de toda la ciudad mediante las más modernas herramientas tecnológicas, el diseño de nuevas obras para un horizonte de planificación de 50 años, el desarrollo de un conjunto complementario de normas y procedimientos para reducir la vulnerabilidad de la ciudad a los desastres de origen hídrico.
- La elaboración del Proyecto Ejecutivo para la Cuenca del Arroyo Maldonado, incluida la documentación que permite el llamado a licitación para la ejecución de las obras.

El Plan Director constituye el segundo esquema de planificación hidráulico de la ciudad en más de 100 años. Incluye la modelación matemática de todas las cuencas de la ciudad, lo que permite conocer y predecir el funcionamiento de la red de desagüe pluvial urbano ante distintas eventualidades.

El Plan Director debe ser una eficiente herramienta de planificación y el fundamento de las inversiones en obras públicas y de la adopción de “medidas blandas” destinadas a optimizar el manejo de las inundaciones para un horizonte de 50 años. Además, debe contener instrumentos para mejorar la gestión técnica en el Área de Hidráulica del municipio. Son ejemplo de medidas blandas el manejo de espacios verdes y del arbolado público, utilización de materiales porosos y absorbentes en cierto tipo de construcciones, el manejo de emergencias, la zonificación de zonas por riesgo de inundación y el fortalecimiento institucional, entre otras.

## Efectos colaterales de la urbanización: ascenso del nivel de agua subterránea

Un fenómeno que adquirió características preocupantes es el ascenso progresivo de los niveles de agua subterránea en el conurbano bonaerense. Desde comienzos de la década de los años 80 comenzaron a evidenciarse problemas en las construcciones de sub-superficie (sótanos, cocheras subterráneas, cámaras, etc.), debido a anegamientos provocados por el ascenso del nivel del acuífero freático.

En la región el sistema hidrogeológico está integrado por un primer acuífero (capa freática) y otro semi libre infrayacente (Pampeano), que se comportan hidráulicamente como una única unidad. Por debajo y separados por un estrato de baja permeabilidad (acuitardo), se localiza un acuífero semiconfinado (Puelche), principal proveedor de agua para servicio público, uso industrial y riego hortícola en la región. Completa el perfil hidrogeológico el acuífero Paraná, localizado a mayor profundidad (Figura 6.18). La napa freática constituye el elemento de transición de la recarga meteórica. La trascendencia del Pampeano radica en que actúa como vía para la recarga y descarga del subacuífero Puelche subyacente, que es la unidad hidrogeológica más importante de la zona. El techo del Puelche se emplaza entre los 25 y 50 m de profundidad (según la posición geográfica) y su espesor varía entre los 15 y los 30 m.

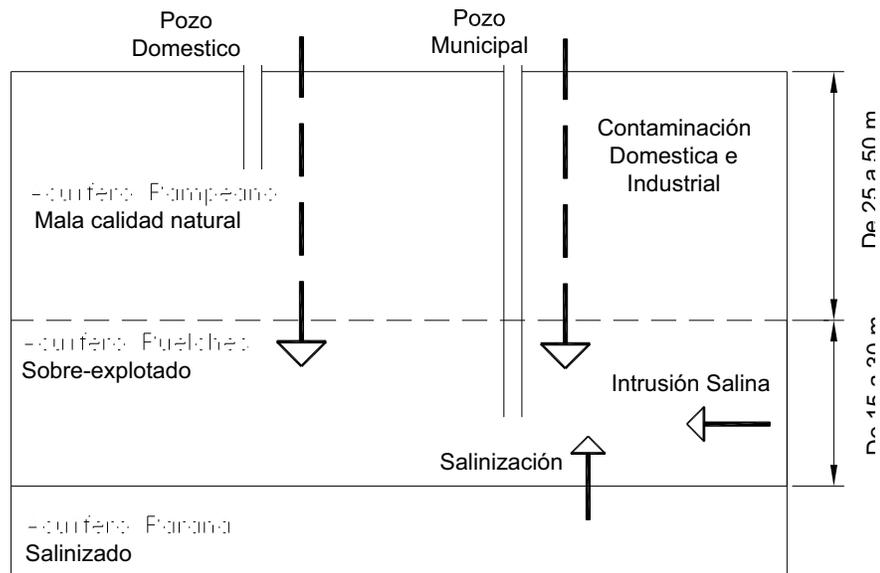


Figura 6.18. Acuíferos y problemática de la contaminación en el Área Metropolitana de Buenos Aires (Fuente: *Argentina, Gestión de los Recursos Hídricos*. Informe N° 20729-AR. Banco Mundial, 2000).

La explotación del acuífero Puelche desde fines del siglo pasado se tornó en sobreexplotación, con pronunciado descenso de los niveles de agua (niveles piezométricos) y en muchos casos, con intrusión de aguas salinas. Estos abatimientos trajeron consigo el de los niveles de agua del acuífero superior (niveles freáticos) por un proceso conocido como “filtración vertical descendente”, hasta el extremo de desaparición del acuífero freático en posiciones críticas.

En aquéllas condiciones (niveles freáticos deprimidos) ocurrió el mayor desarrollo urbano-industrial en el conurbano. Ya en el período 1970-1980 y a causa de la excesiva depresión del Puelche, de la intrusión de aguas salinas y/o presencia de nitratos por encima de las normas de potabilidad (asociada a falta de saneamiento básico o pérdida en los ductos cloacales), comenzó el abandono de pozos de captación con la consecuente recuperación de los niveles piezométricos.

Esta recuperación indujo a su vez la de los niveles freáticos, al reducirse notoriamente la filtración vertical descendente, retrotrayendo la situación casi al estado original. Este ascenso encontró a su paso instalada una nueva infraestructura edilicia subsuperficial, comenzando a producirse los anegamientos cada vez con más frecuencia.

Además, el déficit de agua generado por la salida de servicio de los pozos fue sustituido por una dotación procedente de tres plantas localizadas en el conurbano bonaerense (proyecto mediáticamente conocido como “ríos subterráneos”).

Estos aportes adicionales de aguas exógenas, como así también el déficit en las redes de evacuación cloacal, contribuyeron significativamente a los ascensos freáticos. También influyeron las pérdidas en las cañerías de agua corriente, cloacas y ductos pluviales.

Actualmente tanto en las aguas de la napa freática como del acuífero semi libre Pampeano se observan serios problemas de contaminación debido al uso intensivo de sistemas domiciliarios de eliminación de efluentes cloacales. De acuerdo a lo indicado previamente, un ejemplo de esta problemática es la sufrida por el municipio de Lomas de Zamora (sector meridional del conurbano bonaerense).

El partido de Lomas de Zamora posee cinco localidades: Lomas de Zamora, Banfield, Turdera, Llavallol y Temperley. Alberga una población estimada de 634.450 habitantes (año 2000), con una densidad poblacional de 71,28 hab/ha.

Ballester y Alvarez (2001) relatan que a inicios de la reciente década de los 90 el partido poseía el 67 % de su

población servida con agua corriente, siendo su origen a partir de perforaciones al sub acuifero Puelche y de agua superficial del Río de la Plata, con tratamiento de potabilización. La población servida con alcantarillado cloacal alcanzaba al 22,7 % del total de las viviendas.

En el año 2001 aproximadamente un 30 % del total de las viviendas del distrito contaban con alcantarillado cloacal, mientras que un 98 % de la población contaba con agua corriente. El aumento de este último porcentaje se realizó a expensas de la importación de agua al sistema desde el río de la Plata. Desde mediados del año 1997 se observó en el municipio de Lomas de Zamora, como así también en otros sectores del conurbano bonaerense y de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, un paulatino ascenso de la primera napa freática de agua, llegando en algunos sectores a adquirir características de una verdadera emergencia hídrica y sanitaria.

De acuerdo a Ballester y Álvarez (2001), desde 1998 y hasta el año 2001 se instalaron en el municipio de Lomas de Zamora (a modo de paliativo) aproximadamente unas 800 bombas de extracción, que deprimieron el nivel freático mediante bombeo controlado.

### **6.2.3 Inundaciones en la ciudad de Córdoba, Argentina**

#### **Evolución de la ciudad y problemas en el drenaje pluvial**

Enclavada sobre las terrazas de inundación del río Suquía la ciudad de Córdoba (1,4 millones de hab; 398 msnm) se ha desarrollado a lo largo de su historia siguiendo un proceso de urbanización típico: incremento incontrolado de áreas impermeables, ocupación de áreas inundables y uso exclusivo de medidas estructurales.

Otros factores que han contribuido para el agravamiento del problema de las inundaciones urbanas son el relieve ondulado de la región y la tendencia a la urbanización progresiva de los sectores más altos. Como resultado de ello los sectores centrales más bajos, que antiguamente no se inundaban, sufren desde hace algunos años serios problemas de inundaciones (Figura 6.19 y Figura 6.20).



Figura 6.19. Inundación en la región céntrica de la ciudad de Córdoba (calle La Pampa).



Figura 6.20. Inundación en la Avda. Vélez Sarsfield (región céntrica) de la ciudad de Córdoba (Fuente: matutino La Voz del Interior).

Otra característica que también merece destacarse es la tendencia natural de las cuencas rurales aledañas de aportar hacia los sectores de la ciudad actualmente urbanizados. Desde 1897 hasta el presente la tendencia al crecimiento de las áreas destinadas al uso agrícola y urbano se ha agudizado. En la zona rural aledaña se ha reducido cada vez más el bosque nativo, mientras que el

bosque remanente ha sido fuertemente alterado por la ocurrencia de incendios, tala indiscriminada, etc. La alteración y/o eliminación de la vegetación natural y el continuo laboreo de los suelos bajo técnicas no adaptadas a la conservación de los mismos han provocado un continuo aumento de los volúmenes escurridos (y de los caudales picos asociados) generados por las lluvias intensas. La problemática hídrica se ha agudizado al desarrollarse una infraestructura vial y urbana que no ha contemplado todas las características del sistema hídrico natural.

Las peores situaciones se vivieron a inicios de la década del 90, en oportunidad de la ocurrencia de un período húmedo muy marcados. Diversos barrios periféricos de la ciudad, en general localizados en áreas con alta probabilidad de inundación, sufrieron el embate de las aguas superficiales provenientes de los sectores rurales aledaños.

Desde 1982 las acciones del municipio han estado enmarcadas dentro del Plan Maestro de Desagües Pluviales de la ciudad, considerado un hito fundamental para el conocimiento de la problemática del drenaje pluvial de la misma (Esteve, 2001). En dicho Plan se definieron las 34 cuencas hídricas en que se divide la ciudad y se realizó un anteproyecto completo de los sistemas de desagües para cada una de las cuencas, predimensionando los conductos troncales y conductos secundarios. De acuerdo a lo relatado por Esteve (2001), el desarrollo de la ciudad hizo variar el plan original, cambiando las prioridades y aumentando los requerimientos, según los emprendimientos inmobiliarios, comerciales e industriales que produjeron nuevos polos de desarrollo dentro de la ciudad. En 1995 se realizó una readecuación general del plan general de desagües adaptándolo a los requerimientos de ese año, con previsiones hasta el 2004.

En síntesis, el conjunto de inundaciones sufridas por la ciudad (ribereñas, urbanas, de origen rural, etc.), conformó un complejo cuadro de situación que obligó al municipio a encarar en la década del 90 obras para el control del escurrimiento pluvial.

### **Experiencias en el control del escurrimiento pluvial urbano de la ciudad**

Dentro de la gestión de desagües pluviales urbanos la ciudad de Córdoba incluyó a principios de la década del 90 el principio de amortiguar los picos de las tormentas con el objeto de retardar los aportes y optimizar la red existente de desagües. Toya *et al.* (2003) presentaron un diagnóstico preliminar referido a los 10 primeros años de gestión de cuencos de retardo en la ciudad. A

continuación se citan los aspectos más destacados de dicho diagnóstico.

Los autores relatan que luego de los primeros años de estudio, adaptación y concientización en la toma de decisiones, tanto en el ámbito privado como público, en el año 1995 comenzó la construcción de los primeros cuencos retardadores urbanos.

Los parámetros para su diseño y construcción se fueron adaptando progresivamente, a medida que se presentaron distintos casos con nuevos condicionantes. Ello condujo al municipio a requerir dentro de los estudios de drenaje, con carácter de obligatorio, el análisis de factibilidad y cálculo de los cuencos de retardo para cualquier tipo de emprendimiento. La medida fue empleada como acción para compensar el rápido avance de la urbanización frente a una más lenta inversión pública en la construcción de ramales troncales de conducciones para el agua pluvial.

Del análisis básico de las documentaciones existentes los autores dedujeron la siguiente situación en la ciudad de Córdoba al año 2003:

- Existen 4 cuencos de retardo construidos y a cargo de la administración municipal, que suman en conjunto 26 ha.
- Se encuentran en etapa de proyecto diversos cuencos de retardo asociados a nuevas urbanizaciones, que en conjunto suman 74 ha. Los mismos pasarán progresivamente al dominio público.
- Existen 22 cuencos de retardo ejecutados y mantenidos por emprendimiento privados, mayormente asociados a plantas industriales, que representan 2 ha adicionales destinadas a estos fines.

Para efectuar el diagnóstico los autores analizaron 13 cuencos de retardo ejecutados en los primeros 10 años de experiencia en estas obras. En la Figura 6.21 se indica la ubicación de la mayoría de las obras ejecutadas y previstas.

Las características analizadas fueron:

- superficie
- sistema al que se conectan
- características de diseño
- usos concurrentes
- mantenimiento
- presencia de agua estancada, residuos, sedimentos
- presencia de moscas, mosquitos, roedores y otros animales
- antecedentes sobre accidentes asociados u otros eventos de contingencia (rotura de paredes, desbordes,

- contaminación con efluentes de otra naturaleza, etc)
- apropiación del espacio desde lo paisajístico y compromisos de mantenimiento (públicos o privados).

En la Figura 6.22, Figura 6.23 y Figura 6.24 se observan las características de algunas de las obras ejecutadas en la ciudad.



Figura 6.21. Ubicación de los cuencos de retardo del escurrimiento pluvial urbano en la ciudad de Córdoba, Argentina (Fuente: Toya *et al.*, 2003).



Figura 6.22. Cuenco de detención ejecutado en un emprendimiento privado. Córdoba, Argentina (Fuente: Toya *et al.*, 2003).



Figura 6.23. Cuenco de detención ejecutado en un emprendimiento comercial privado. Córdoba, Argentina (Fuente: Toya *et al.*, 2003).



Figura 6.24. Cuenco de detención de grandes dimensiones ejecutado en un sector público.

Del análisis del conjunto de informaciones recopiladas y de la experiencia propia en la ciudad Toya *et al.* (2003) concluyeron en el siguiente diagnóstico:

- La ciudad de Córdoba posee actualmente en su sistema de drenaje pluvial 28 ha destinadas a cuencos de retardo para amortiguación de caudales superficiales. Dicha superficie

- aumenta a 102 ha si se consideran las obras de retardo asociadas a nuevas urbanizaciones (en etapa de proyecto).
- De la observación “*in-situ*” existentes durante los eventos de lluvia como así también del análisis de antecedentes, se desprende que no se registran a la fecha inconvenientes derivados del inadecuado funcionamiento hidráulico de estas obras.
  - Los cuencos construidos están asociados a desagües pluviales existentes, que actúan de sistema receptor. Entre las obras proyectadas se encuentran, en menor medida, algunas en las cuales la salida se efectuará por volcamiento a cunetas.
  - El mayor número de cuencos ha sido ejecutado hasta el presente por emprendimiento privados, en general, asociados a grandes plantas industriales, supermercados, etc. Estas obras por lo general son de pequeñas dimensiones y poseen mantenimiento propio de cada emprendimiento. En algunos casos se observa una muy buena integración al medio urbano circundante, producto de un adecuado plan de mantenimiento.
  - Los cuencos de mayores dimensiones han sido construidos y/o mantenidos hasta el presente por el municipio. Se caracterizan por presentar una problemática ambiental preocupante: contaminación por presencia de residuos líquidos y sólidos que originan olores indeseables y potencian la vehiculación de enfermedades (aguas grises, acumulación de basuras, etc.), deterioro de la infraestructura (erosión de taludes, sedimentación, etc.) y presencia de malezas y mosquitos. En síntesis, presentan una deficiente integración con el medio ambiente urbano y suburbano.
  - En contrapartida, los cuencos públicos de menores dimensiones reflejan una mejor integración al entorno, con minimización de los problemas antes citados.

Luego de diagnosticar la situación imperante, los autores recomendaron las siguientes acciones:

- En el caso de los cuencos públicos ubicados en las zonas periféricas de la ciudad (por lo general próximos a barrios con situaciones socio-económicas críticas), impera la necesidad de encarar acciones de difusión y educativas, con vistas a concientizar a los vecinos en cuanto al uso y protección de los cuencos de retardo. Los autores sugirieron encarar este tipo de acciones siguiendo una

visión de integralidad de la cuenca, a través de acciones participativas, con intervención, entre otros, del estado municipal y ONG's.

Es preciso adecuar la normativa municipal vigente, no sólo en lo referido al cálculo hidrológico y al diseño hidráulico de estas obras, sino también en su relación con la gestión ambiental, la planificación urbana y el mantenimiento. Por lo tanto, sugieren extender la participación y el compromiso a diversas áreas de incumbencia dentro de la gestión comunal.

#### **6.2.4 Gestión del drenaje pluvial en la Red de Accesos a Córdoba (RAC)**

Por su posición geográfica la ciudad ha sido históricamente el nexo obligado entre las regiones Central, Cuyo, Noroeste, Litoral y Sur del país. El tránsito interurbano hacia y desde la ciudad se organiza a través de la Red de Accesos a Córdoba (RAC) la cual abarca la totalidad de los accesos en un radio de aproximadamente 35 km. La RAC está constituida por seis rutas convencionales, dos autopistas y la avenida de circunvalación de la ciudad (Figura 6.25). La extensión aproximada de la misma es de 400 km. El tránsito total en la RAC alcanza los 240.000 vehículos diarios. En 1996 el gobierno provincial concesionó la RAC a una única empresa, por un período de 25 años.

El contrato obligó al concesionario a estudiar y ejecutar un importante conjunto de obras hidráulicas y viales. Los estudios correspondientes se realizaron durante la segunda mitad de la década del 90. La primera etapa del plan de obras finalizó a inicios de 2001 y demandó inversiones por U\$S 240 millones. Las obras de drenaje significaron el 20 % de dicha inversión (Bertoni *et al*, 2004). La crisis económica que afectó al país desde fines de 2001 impuso la paralización de nuevas obras y serias restricciones en el plan de mantenimiento de otras. A continuación se describen los problemas observados en un sector de la RAC que recibe los aportes directos de la ciudad de Córdoba.

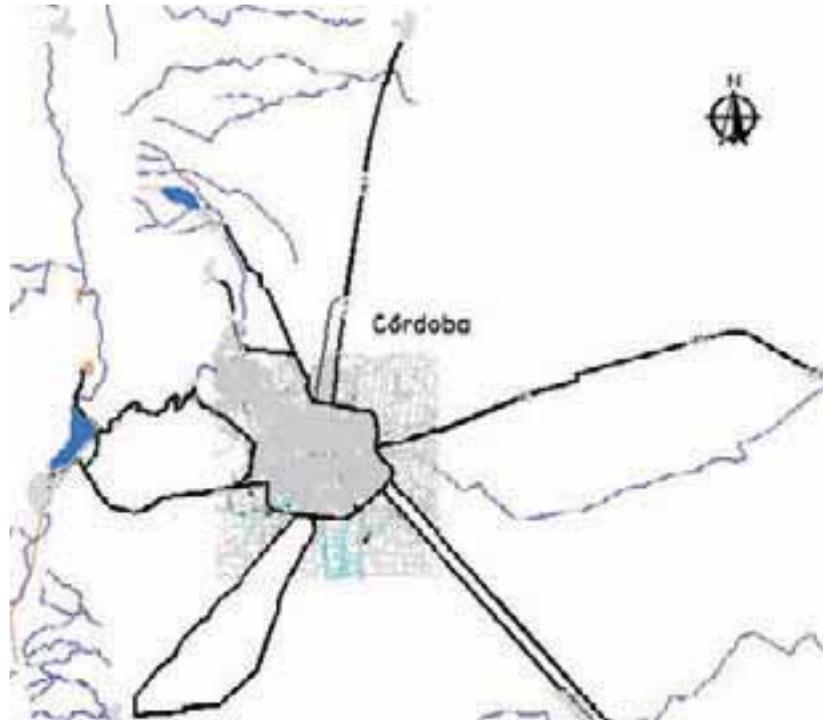


Figura 6.25. Red de Accesos a Córdoba (RAC), Argentina.

### **Inundaciones sobre el Arco Noreste de la Avda. de Circunvalación de Córdoba.**

Desde su construcción el Arco Noreste de la Avenida Circunvalación de la ciudad de Córdoba ha sufrido serios problemas durante la ocurrencia de tormentas intensas asociados con el escurrimiento de las aguas. Daños materiales reiterados a las obras de infraestructura existentes y hasta la pérdida de vidas humanas en ocasión de producirse lluvias intensas dan cuenta de la importancia de este recurrente problema.

El Arco Noreste de la Avenida de Circunvalación se desarrolla sobre el sector externo de la ciudad, donde la pendiente natural del terreno posee predominio del sentido Noroeste-Sureste. El sistema hidráulico de drenaje pluvial de la avenida está constituido básicamente por dos canales principales: el “interno” y el “externo”, ambos desarrollados en forma paralela a las calzadas viales (Figura 6.26).

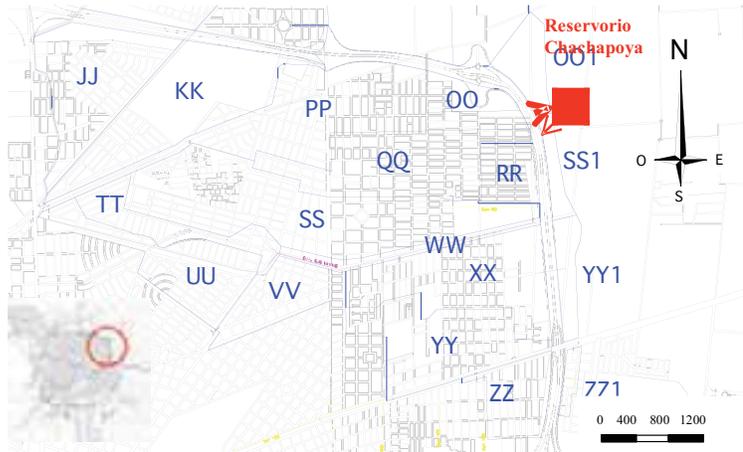


Figura 6.26. Cuencas de aporte directa e indirectamente asociadas al Arco Noreste de la Avenida de Circunvalación de la ciudad de Córdoba.

El canal interno se sitúa entre la ciudad y la avenida y recibe los aportes de las cuencas urbanas. El canal externo, tal como lo indica su nombre, recorre el sector externo de la avenida y recibe los aportes de diversas cuencas que en su mayoría se encuentran aún con una ocupación de tipo rural. En el sector aledaño externo a la avenida se desarrollan también asentamientos comerciales e industriales de tipo extensivo, sobre lotes de grandes dimensiones.

Desde su construcción original en la década de los años 80, el sistema de drenaje pluvial del sector experimentó diversos problemas. Ellos derivan, entre otros factores (Bertoni, *et al*, 2005):

1. del permanente aumento tanto de la urbanización como de la expansión agrícola sobre las cuencas de aporte;
2. de la falta de planificación y seguimiento conjunto entre los niveles municipales y provinciales a fin de lograr a través del tiempo un desarrollo urbano sostenible que interprete y controle la necesaria interrelación entre la ciudad y su avenida de Circunvalación;
3. de errores de diseño y/o de construcción del propio sistema de drenaje (construcción de tramos de canal con pendiente hidráulica crítica; descuidos en relación a la compleja y delicada interacción entre el suelo loésico y las obras hidráulicas rígidas, etc.);
4. de la propia insuficiencia de las obras de conducción (canales y alcantarillas).

La Empresa Caminos de las Sierras S.A., concesionaria de la RAC, readecuó en 1997-98 el sistema, aumentando en términos

generales su capacidad de conducción. Este aumento se logró en base a:

- a. la ampliación lateral de las secciones de alcantarillas existentes;
- b. la construcción de una importante obra de acumulación y regulación de caudales (denominada reservorio “Chachapoya”).

Aunque el Arco Norte y el Arco Noreste de la avenida se encuentran vinculados tanto desde el punto de vista vial como hidráulico, la existencia de la obra de control de caudales (Chachapoya) divide prácticamente en dos a estos sectores. Este reservorio o cuenco de detención, el mayor ya ejecutado en la ciudad de Córdoba ( $600.000 \text{ m}^3$ ), recibe los aportes de los canales interno y externo del sector norte.

Esta obra se desarrolla en terrenos aledaños al canal externo y recibe la totalidad del escurrimiento proveniente del sector Norte, a través del aporte de ese canal. Por su parte, una obra de desvío ejecutada sobre el canal interno asegura el 100% de derivación de los caudales generados por tormentas con períodos de retorno de 25 años. Dadas las revanchas del canal de aguas arriba se estima que la obra de derivación podría derivar porcentajes importantes del aporte producidos por tormentas de hasta 100 años de período de recurrencia.

El reservorio de Chachapoya posee dos conductos de 2,0 m de diámetro para la evacuación libre de los caudales hacia el canal externo. Los caudales erogados se mantienen prácticamente constantes para un amplio rango de situaciones, siendo la erogación total hacia el canal externo del Arco Noreste del orden de  $15 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Otra característica destacada del sistema es que prácticamente a partir del reservorio de Chachapoya los canales interno y externo se desarrollan en trinchera, es decir, con cotas de rasante inferiores a las del terreno aledaño. Por lo tanto, con excepción de algunas cuencas urbanas que aportan hacia el canal externo por un puente canal, todas las restantes lo hacen al canal interno, ya sea siguiendo un escurrimiento superficial mantiforme conducido por calles o concentrado en conductos subterráneos.

Aún con la existencia del reservorio Chachapoya, diversos problemas puntuales se siguieron registrando desde 1998 hasta la fecha. Una situación crítica particular, aunque sin implicar víctimas en el sector bajo análisis, se produjo durante la tarde del 26 de diciembre de 2003, en ocasión de producirse sobre la ciudad de Córdoba una tormenta de características severas.

Sobre el sector Suroeste de la ciudad esta tormenta fue acompañada por un devastador tornado. La lluvia ocurrida, que implicó la precipitación de una lámina de 113 mm en 1:45 h (de los cuales 65 mm precipitaron en 20 min), produjo diversos daños materiales sobre las obras viales e hidráulicas existentes en el Arco Noreste. Además de serias inundaciones en los barrios contiguos a la Avenida de Circunvalación, la lluvia produjo también desbordes del flujo en ambos canales. Estos desbordes produjeron, a su vez, erosiones y socavaciones en diversos sectores de los taludes de terraplenes y banquetas (Figura 6.27 a Figura 6.30).



Figura 6.27. Deterioros del canal externo durante la tormenta de diciembre de 2003. Situación anterior y posterior al pico de la crecida.



Figura 6.28. Desborde del canal interno durante la tormenta de diciembre de 2003.



Figura 6.29. Canal interno durante la tormenta de diciembre de 2003. Obsérvese el efecto producido por el inadecuado proyecto hidráulico de la transición.



Figura 6.30. Estado del canal central del Arco Noreste luego de la tormenta de diciembre de 2003.

La severidad de los problemas viales e hidráulicos derivó en la realización de un estudio que tuvo por objetivo recomendar eventuales acciones a ser implementadas sobre las cuencas de drenaje a fin de lograr un mayor control de los caudales evacuados, como así también recomendar eventuales modificaciones de las obras de drenaje existentes a fin de lograr un mejor funcionamiento hidráulico de las mismas.

El estudio implicó análisis hidrológicos y la verificación del comportamiento del sistema hidráulico para la tormenta de 2003 y para tormentas con tiempos de retorno de 25 y 100 años (Bertoni *et al.*, 2005). No existiendo datos de caudales o niveles que permitan calibrar con certeza a los modelos empleados, el análisis del coeficiente de escurrimiento (relación lámina precipitada vs. escurrida) se impuso como un control adicional a las informaciones recabadas entre los vecinos. Los estudios realizados permitieron inferir que en situaciones críticas este coeficiente oscila entre 0,70 y 0,78. A su vez, se dedujo que las cuencas urbanas estudiadas producen caudales picos específicos promedio (caudal pico por unidad de superficie) en el orden de 55, 85 y 115 l/s-ha asociados a tiempos de retorno de 25, 100 y 150 años respectivamente

El estudio propuso adoptar medidas junto a los niveles provincial y municipal de modo de congeniar la capacidad de producción y transferencia (volumen y caudales) de las cuencas de aporte con las limitaciones físicas de los canales de drenaje del sector. También fue recomendado encarar progresivamente tareas de mejora en ambos canales.

## **6.2.5 Inundación ribereña de la ciudad de Santa Fe, Argentina**

### **Introducción**

La ciudad de Santa Fe (Provincia de Santa Fe, Argentina; población de 400.000 habitantes) se localiza en la región central del litoral fluvial argentino, a la vera de dos importantes sistemas hídricos: el del río Paraná y el del río Salado (Figura 6.31). En el año 2003 se produjo una crecida del río Salado que superó ampliamente a todas las antecedentes. La misma tuvo connotaciones dramáticas en la ciudad de Santa Fe y zonas aledañas, provocando muertes y cuantiosos daños materiales. El fenómeno afectó también a diversas zonas rurales de la provincia, afectando seriamente a las actividades que se desarrollan habitualmente en la cuenca santafesina del río Salado. En la región de influencia directa de la ciudad de Santa Fe se localizan

500.000 habitantes, muchos de ellos afectados por una situación de pobreza. Al momento de producirse la inundación de 2003 el desempleo en la región era del 23,5%, siendo que el 53% de los hogares se encontraba en situación de pobreza.

La percepción del problema de las inundaciones de los sectores ribereños de la ciudad de Santa Fe ha sido asociada históricamente al comportamiento del río Paraná. A partir de créditos internacionales por U\$S 25 millones el gobierno del Estado de Santa Fe construyó, a lo largo de los años 90, un sistema de protección constituido por diferentes diques y terraplenes que encerraron a la ciudad y sus adyacencias. Este sistema dio cierta independencia a la ciudad de las crecidas del río Paraná. Sin embargo, el mismo se mostró inadecuado frente a las crecidas del río Salado.

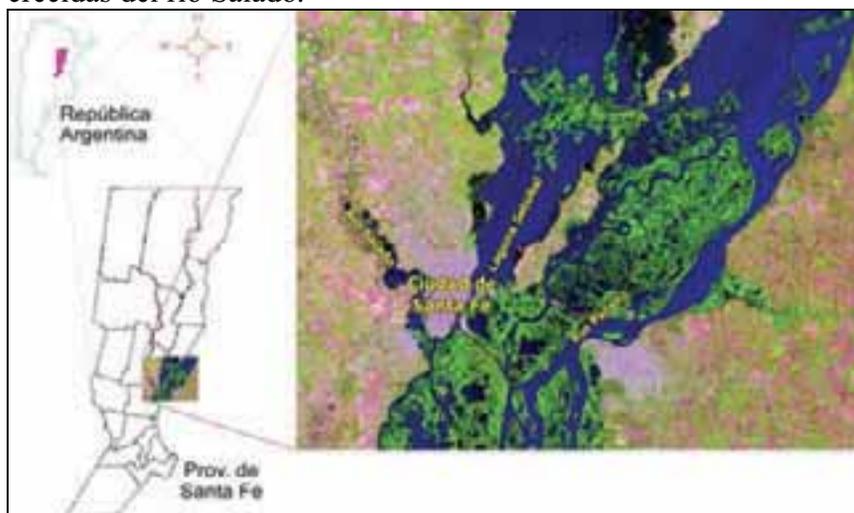


Figura 6.31. Ubicación relativa de la ciudad de Santa Fe en relación a la República Argentina

### **Aspectos de la cuenca inferior del río Salado**

La cuenca del río Salado abarca una superficie total aproximada de 247.000 km<sup>2</sup>, con una longitud del curso de aproximadamente 1.500 km. Si bien no existe un límite definido, convencionalmente se considera como cuenca inferior del río Salado al área que se desarrolla en la provincia de Santa Fe, con una superficie de 55.950 km<sup>2</sup> (aproximadamente el 42% del territorio santafesino).

La región presenta características de llanura, con un importante sector que actúa de gran almacenamiento (denominado "Bajos Submeridionales"). En diferentes sectores los límites de las subcuencas de aporte son difusos y sufren constantes modificaciones por las acciones del hombre, fundamentalmente por las redes vial e hidráulica (Ferreira, 2005). El clima de la

región presenta una transición entre el subhúmedo oriental y el semi árido occidental, con un gradiente de precipitación anual de 1.100 mm a 800 mm (período 1941-1970). En los tres últimos decenios (1971-2000) la zona ha presentado un aumento general de la precipitación media, de 900 mm a 1.200 mm (Paoli, 2004). La actividad en cuenca del río Salado es típicamente rural, asociada a la agricultura (soja/trigo), a la industria de la leche y a la cría de ganado en general.

Dentro de la cuenca se encuentran diversos centros urbanos. El más importante es la ciudad de Santa Fe, sobre la desembocadura del río Salado en el sistema del río Paraná (Figura 6.32).

El tramo final del río Salado, inmediatamente antes de llegar a su desembocadura en el sistema del río Paraná, posee como característica predominante que el nivel del río depende tanto de los caudales del propio río Salado como de los niveles que se registran sobre el río Paraná.



Figura 6.32. Afluentes y áreas de aporte en la cuenca inferior del río Salado. Provincia de Santa Fe (Paoli, 2004).

### Crecida del río Salado de 2003

Durante los meses de octubre de 2002 a marzo de 2003 se produjeron importantes precipitaciones en la cuenca del Salado santafesino. Estas precipitaciones fueron muy superiores a la media de los registros y produjeron un aumento significativo del contenido de humedad en el suelo. En consecuencia, una parte importante de la lluvia fue transformada en escurrimiento superficial.

En los tres primeros meses del 2003 se registraron crecidas cuyos picos superaron los  $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ , ocasionadas por precipitaciones ocurridas en distintos sectores de la cuenca. Durante el mes de abril de 2003 continuó precipitando con regular intensidad. La anomalía positiva de precipitación a lo largo del mes de abril de 2003 fue de 200 mm (Figura 6.33).

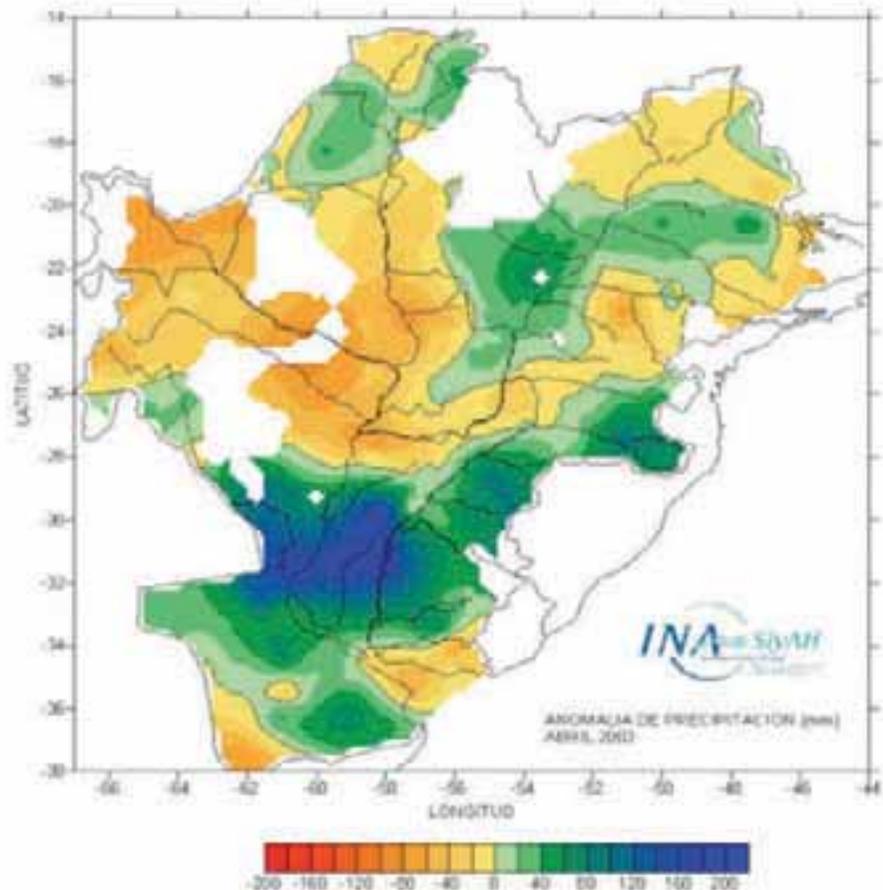


Figura 6.33. Anomalía de precipitación correspondiente a abril de 2003 (Fuente: Paoli, 2004).

Durante los días 23 a 25, y 28 y 29 de abril, se produjeron las tormentas que dieron origen a la crecida, cuyo máximo de 3954 m<sup>3</sup>/s se registró el 30/04/03. Entre los elementos que contribuyeron en la formación del pico cabe citar: (i) el estado de saturación del suelo en gran parte de la cuenca; (ii) la baja evapotranspiración en ese período; (iii) la ocurrencia de sucesivas crecidas anteriores, que hicieron que el río mantuviese un nivel alto, con caudales superiores a los 500 m<sup>3</sup>/s.

La Figura 6.34 ilustra hidrogramas correspondientes a tres crecidas del río Salado. Es posible observar que en el caso de la crecida de 2003 las ramas de ascensión y de recesión presentaron gradientes mucho más elevados.

Un estudio basado en un análisis estadístico que combinó marcas históricas y registros sistemáticos disponibles (Bertoni *et al.*, no publicado) indicó que el tiempo de recurrencia de esta crecida es de 800 años. Esta recurrencia difirió de la estimada con base en series estadísticas más cortas, aparentemente representativas, pero que no contemplaron la ocurrencia de eventos significativos verificados hacia fines del siglo XIX e inicio del siglo XX.

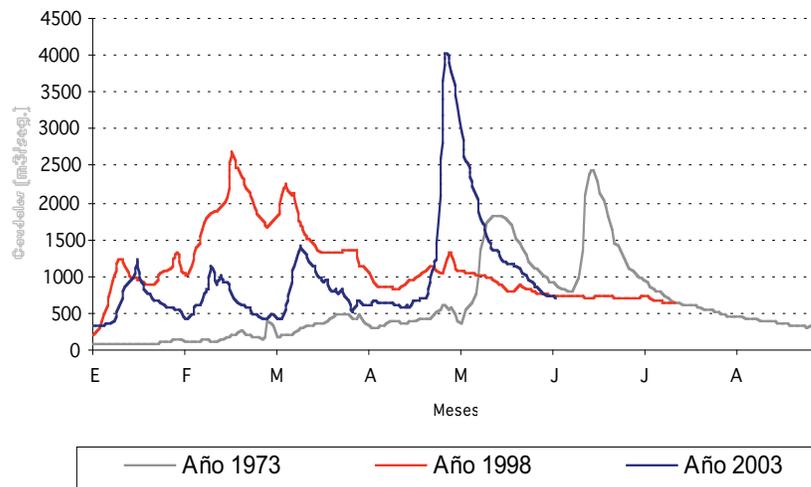


Figura 6.34. Hidrogramas correspondientes a tres crecidas del río Salado (Fuente: Paoli, 2004).

### Sistema de defensa de la ciudad de Santa Fe

Durante la década del 90 la ciudad de Santa Fe desarrolló un sistema de defensa contra inundaciones. El objetivo del plan de obras fue proteger a la ciudad primordialmente de las crecidas del río Paraná. Sobre el sector Oeste de la ciudad fue desarrollado un conjunto de diques laterales asociados a la construcción de la

Avda. de Circunvalación Oeste. Este conjunto de diques debía proteger a la ciudad de las crecidas del río Salado.

Para el borde oriental del río Salado el sistema de protección por terraplenes tuvo algunas características particulares, resultando de la combinación de una obra de tipo vial e hidráulica. La protección fue concebida en tres partes, asociada a la Avenida de Circunvalación Oeste de la ciudad, construida en el período 1995-1997. Hasta el año 2003 sólo habían sido ejecutadas las dos primeras partes de este sistema vial-hidráulico (tramos I y II, próximos a la desembocadura del río Salado (Figura 6.35b). En consecuencia, durante la crecida de 2003 la ciudad presentó una sección no protegida, a partir del extremo norte del sistema de defensa.

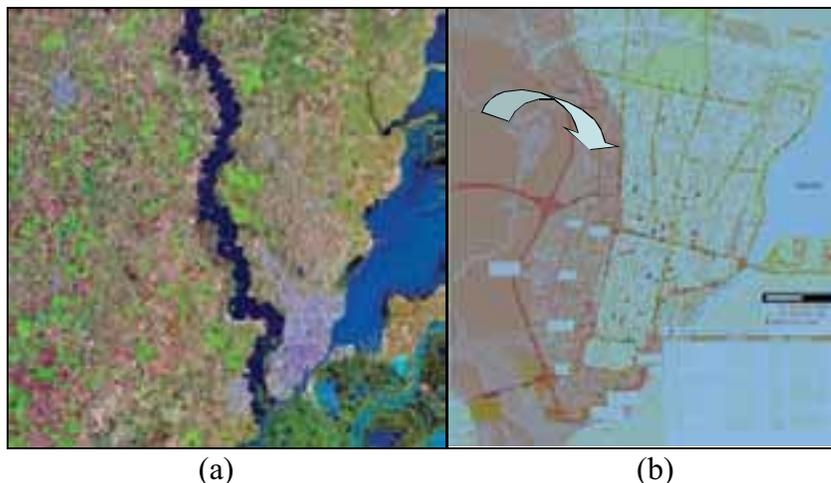


Figura 6.35. (a) ciudad de Santa Fe en la desembocadura del río Salado sobre el sistema Paraná ; (b) Sector inundado en abril de 2003 (Fuente: El Litoral, [www.litoral.com.ar](http://www.litoral.com.ar)).

### **Inundación de la Ciudad de Santa Fe**

La magnitud de caudal pico dio lugar a la formación de escurrimientos en el tramo inferior del río Salado con niveles elevados que superaron la cota mínima de desborde hacia el casco urbano, en la zona próxima al Hipódromo, cuando los niveles del río superaron la cota 15 m IGM (cota según el sistema del Instituto Geográfico Militar).

El crecimiento de los niveles del río sumado a la falta de una protección adecuada en el extremo final del tramo II, produjo una progresiva socavación y la formación de una brecha de más de 100 m de longitud. Por esta brecha se generó el ingreso del mayor volumen de agua a la ciudad, habiendo alcanzado el agua un nivel próximo a los 17 m IGM.

El agua ingresó durante varios días, provocando el

anegamiento de una tercera parte de la ciudad. En numerosos barrios el agua superó 2,50 m de profundidad. El agua que ingresó se fue progresivamente almacenando en el recinto urbano, como resultado del endicamiento provocado por la existencia de las obras de defensa laterales, que no preveían secciones fusible para su accionamiento durante emergencias. Las acciones de voladura y apertura de brechas en estas defensas se iniciaron cuando el nivel del agua dentro del recinto urbano presentaba, en las partes más críticas, una diferencia positiva del orden de 2,40 m en relación al río.

### **Causas de la Inundación de la Ciudad de Santa Fe**

La inundación de la ciudad de Santa Fe reconoce causas diversas, las cuales pueden agruparse en estructurales y no estructurales (o emergenciales).

Entre las primeras cabe señalar a la expansión urbana de la ciudad de Santa Fe sobre la planicie de inundación del río Salado, la cual ha sido un hecho permanente. En el apartado siguiente se presenta una breve síntesis sobre este particular.

El progresivo desarrollo de la ciudad hacia el Oeste dio lugar, a su vez, a la materialización de una serie de obras de infraestructura urbana y vial, que actualmente se encuentran emplazadas en el valle aluvial del río Salado. El puente de la autopista Santa Fe – Rosario (con una luz de 155 m dentro de un valle de inundación de más de 3.000 m de ancho), reduce la capacidad de conducción natural del río, generando fuertes estrechamientos al normal escurrimiento de las aguas en épocas de crecida. Según estudios, dicho puente produjo, en oportunidad de la crecida de 2003, una sobreelevación hacia aguas arriba del orden de los 0,70 m a 0,80 m.

Como ya se indicara, las obras de defensa existentes en el valle aluvial del río Salado presentaban, al momento de la crecida, dos tramos materializados (tramos I y II). El proyecto del tramo II previó su cierre provisorio según un muro provisorio, transversal al eje del terraplén, conformado por mampostería reforzada. Así mismo, se preveía la necesidad de complementar el cierre mediante una acción de emergencia, en caso de producirse una crecida. Es factible suponer que esta concepción del proyecto estuvo basada en la hipótesis de una continuación relativamente rápida del tramo III de la defensa. Sin embargo, es evidente que la misma presentaba elevados riesgos frente a potenciales crecidas del río en el período previo a la materialización de este último tramo.

En relación a acciones estructurales en la cuenca de aporte,

cabe señalar que en la cuenca inferior del río los canales artificiales son empleados para drenar zonas relativamente bajas o afectadas negativamente por el trazado de las redes de infraestructura vial y/o ferroviaria. Estudios hidrológicos realizados permitieron estimar que estas acciones podrían provocar como impacto hidrológico sobre una de las principales subcuencas del sistema, un aumento de la magnitud de los caudales del orden del 30 % y reducciones del orden de 12 h en el tiempo de llegada a la salida de la subcuenca. Siendo lógico suponer que impactos equivalentes se podrían manifestar en las restantes subcuencas del río Salado ante la materialización de medidas semejantes, se deduce que las acciones antrópicas en la cuenca seguramente incidieron con respecto a la situación anterior a la de los años 70, y produjeron cambios sustanciales tanto en el pico como en el tiempo de llegada de la onda de crecida del año 2003.

Entre las causas no estructurales se destaca la falta e implementación de un Plan de Emergencia, con su respectivo Plan de Contingencia. De haber existido estas importantes herramientas de organización y trabajo, durante la emergencia se podrían haber tomado las siguientes medidas no estructurales y estructurales:

- evacuación ordenada de las personas potencialmente afectadas;
- determinación del lugar y del tiempo para producir las brechas en el terraplén de la defensa;
- cerramiento de la defensa con bolsas de arena en forma anticipada, lo cual hubiera permitido por una parte su realización en seco y, por otra, haberse logrado una mayor altura y longitud de resguardo, lo que hubiese resultado en una mitigación en cuanto a los tiempos de desarrollo de los acontecimientos;
- pronóstico hidrológico de la crecida, con anticipación mínima suficiente para permitir las acciones antes citadas.



Figura 6.36. Inundación en los barrios oeste de la ciudad de Santa Fe, Argentina (Fuente: Paoli, 2004).

### **Ocupación urbana del valle de inundación del río Salado**

Una revisión de la cartografía histórica de una ciudad resulta de gran importancia a los efectos de analizar y comprender la evolución de su inadecuado crecimiento sobre la planicie de inundación lateral del río Salado.

Hasta fines del siglo XIX la ciudad de Santa Fe mantuvo su expansión urbana en total equilibrio con el río Salado. Como resultado de ello el nivel de percepción de la población acerca de las crecidas del río Salado era prácticamente inexistente.

Las tendencias expansivas más importantes de la ciudad hacia el oeste, en particular sobre la planicie de inundación natural del río Salado, se verificaron durante la primera mitad del siglo XX, a partir de la materialización de los terraplenes ferroviarios que transmitieron cierta sensación de seguridad al aislar varios recintos de la planicie de inundación natural del río. En 1937 se construye la defensa oeste, denominada Terraplén Irigoyen, la cual ayuda a la ampliación del radio urbano de la ciudad de Santa Fe sobre la planicie de inundación del río Salado.

Desde 1940 y hasta la actualidad se ha venido produciendo un sostenido proceso de urbanización de la planicie de inundación natural del río Salado. En el año 1914 se produjo una importante crecida del río Salado cuyo caudal máximo estimado fue del orden de 2.750 m<sup>3</sup>/s. En el año 1973 se produjo otra inundación del río

Salado cuyo caudal máximo observado fue de 2.430 m<sup>3</sup>/s. Entre ambas crecidas se produjo un ciclo relativamente seco de 59 años de duración. Dentro del mismo las crecidas del río Salado no superaron los 800 m<sup>3</sup>/s (a excepción del año 1946 en que superó escasamente este umbral). Ello fue un elemento decisivo para que el conjunto de tomadores de decisión de aquellos años desconsiderara la necesidad de planificación del desarrollo urbano de la ciudad de forma compatible con las características de la planicie de inundación del río Salado. A la luz del conocimiento actual, ello constituyó una clara falencia de formación y/u orientación por parte de los tomadores de decisión, la cual condujo a errores de planificación.

Otro hecho a destacar, de significativa importancia para comprender la evolución de la urbanización de áreas inundables en la ciudad de Santa Fe, ha sido el paulatino arraigue de la idea de solución a los problemas de las inundaciones con base exclusivamente en la ejecución de obras de ingeniería.

El conjunto de falencias indicadas condujo a decisiones inapropiadas, tales como, entre otras, la instalación tanto del nuevo Hospital de Niños como de la Estación Transformadora de Energía, en áreas signadas por su alto riesgo hídrico.

El proyecto y ejecución del terraplén de Defensa Oeste correspondiente a la Av. de Circunvalación, efectuado en el año 1996, sin el acompañamiento de la implementación efectiva de diversas medidas no estructurales, tales como planes de alerta y de contingencia, son un ejemplo de visión basada exclusivamente en la ejecución de obras de ingeniería.

Finalizando esta síntesis sobre la evolución de la urbanización del sector oeste de la ciudad de Santa Fe, se presenta en la Figura 6.37, a modo de ilustración, una comparación de los distintos niveles de desarrollo urbano de la ciudad a lo largo del tiempo. En las ilustraciones se indica la presencia de las obras de infraestructura (caminos, ramales ferroviarios, etc.) a medida que las mismas se fueron ejecutando en el tiempo. Estas obras se indican en el color correspondiente al año de evaluación de la urbanización. También se incluyen las curvas de nivel del terreno, elemento que da cuenta del avance de la ciudad sobre las zonas topográficamente más deprimidas.

Por su parte, la Figura 6.38 permite comparar la vista del sector oeste ilustrada por la Foto N° 1 con su similar actual. Lo propio ocurre respectivamente en la Figura 6.39 en relación con la Foto N° 2.

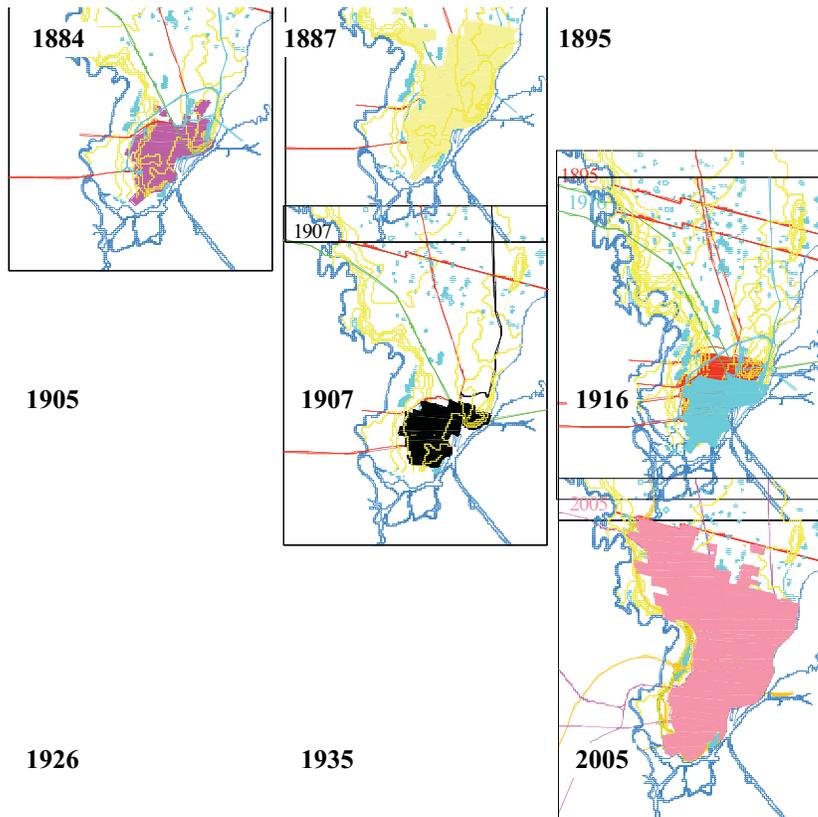


Figura 6.37. Desarrollo urbano de la ciudad de Santa Fe desde 1884 hasta la actualidad.



Figura 6.38. Transformación urbana: comparación de dos imágenes de un mismo sector durante la década del 30 (bañados del río) y en el año 2005.



Figura 6.39. Transformación urbana: comparación de dos imágenes de un mismo sector durante la década del 30 y en el año 2005.

### 6.2.6 Inundación de la ciudad de Trelew, Argentina

A continuación se describe un caso particular de inundación ocurrido en la ciudad de Trelew (región patagónica de Argentina), donde la falta de planificación de la expansión urbana, las deficiencias de mantenimiento de las obras hídricas y hasta el vandalismo contribuyeron para generar, durante una lluvia extraordinaria, una inundación de proporciones en un importante sector de la ciudad. El material presentado ha sido extraído de Serra (2004).

La ciudad de Trelew, situada en el valle inferior del río Chubut, ocupa actualmente un área aproximada de 15 km<sup>2</sup>. La ciudad ha crecido dentro de una zona de depresiones lagunares y riberas sujeta a crecidas naturales. La construcción de barrios en estos sectores y de rutas terraplenadas sin obras hidráulicas adecuadas, la política fiscal inmobiliaria, la escasa relevancia de criterios hidroambientales de planificación en la decisión sobre nuevas urbanizaciones, son elementos que vienen contribuyendo al agravamiento del problema de las inundaciones urbanas. Constituyen, por lo tanto, las principales conductas de Estado a modificar.

Un ejemplo de expansión urbana sin planificación lo constituye la existencia de barrios de la ciudad que restringen la salida de un importante sistema aluvional, denominado el Cañadón del Parque Industrial. Este sistema hídrico sólo se activa durante lluvias de cierta magnitud y drena sus aguas hacia la laguna Chiquichano, ubicada en el casco urbano de la ciudad (Figura 6.40).

Para paliar el problema de las inundaciones provocadas por las crecidas de esta cuenca hídrica, a partir de 1984 se construyeron sobre un cañadón en el sector industrial de la ciudad de Trelew tres terraplenes importantes. La finalidad perseguida fue laminar las crecidas de origen pluvial, a fin de obtener un desagüe controlado, con menores caudales y con un tiempo mayor

de escurrimiento. Luego de ocurridas algunas lluvias importantes en mayo de 1992, dichas obras fueron modificadas y reconstruidas mediante aportes del Programa de Emergencia del Ministerio del Interior.

Las modificaciones incluyeron:

- Supresión del primer terraplén;
- Aumento del cuerpo y altura del segundo terraplén (Presa II), y tercer terraplén (Presa III);

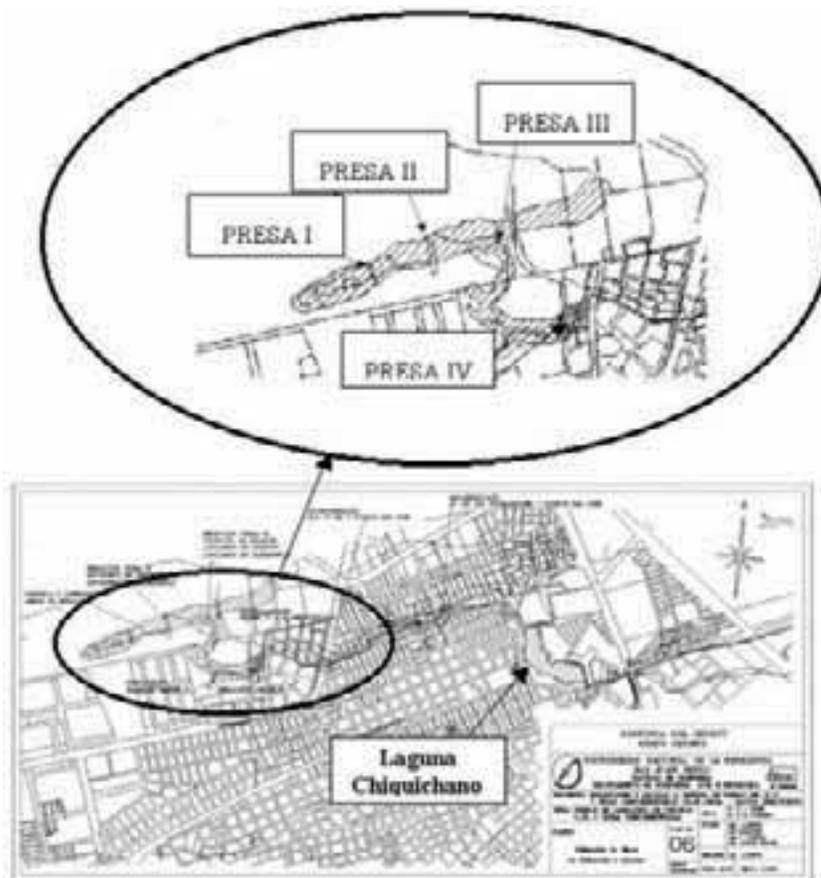


Figura 6.40. Ciudad de Trelew y zona afectada por la inundación de abril de 1998. (Fuente: Serra *et al.*, 2002).

- Incorporación en las presas de un cuerpo o núcleo impermeable de arcilla;
- Compactación adecuada de los suelos, incorporación de filtros o drenes y revestimientos con piedras en los muros, para la protección contra el oleaje;
- Incorporación de conductos entubados en cada terraplén, para la regulación y drenaje de las aguas;
- Incorporación de un vertedero lateral de derivación, para el caso de grandes crecidas que superaran la capacidad de

- almacenamiento del pequeño embalse o tajarar;
- Revestimiento de gaviones para la protección a la erosión, según las normas constructivas usuales.

Se dispuso, a su vez, de un cuarto terraplén (Cierre IV), de muy baja altura, a pocos metros del Barrio Constitución, con la simple misión de constituir la obra de toma y derivación de las aguas reguladas desde el cañadón a una laguna, denominada Chiquichano.

Las obras ejecutadas incluyeron una obra de toma y un conducto subterráneo, que conduce las aguas reguladas desde el Cierre IV hasta la laguna Chiquichano, bajo las calles del Barrio Constitución y una calle canal (conducto pluvial).

El sistema en su conjunto debía almacenar transitoriamente en las pequeñas presas las aguas provenientes de su cuenca natural, desarrollada sobre la región de la meseta aledaña. La necesidad de regulación fue dada por la existencia de barrios de la ciudad que restringen la salida natural del sistema hacia la laguna Chiquichano. Las aguas debían ser “captadas” en su totalidad por el Cierre IV, frente al Barrio Constitución, y conducidas por el conducto subterráneo ya citado.

La altura de las presas fue establecida de modo de no inundar sectores fabriles aledaños. Por tal motivo se incluyó asimismo, vertederos laterales a las presas. La derivación de las tormentas que superasen la capacidad de acumulación debía ocurrir hacia la calle canal. Como seguridad adicional en caudales extremos, se previó la erosión lenta y controlada del vertedero de la presa III y del Cierre IV (vertedero fusible).

Entre 1992 y 1998, el escurrimiento de todas las lluvias fue retenido por completo, con desagüe controlado por el conducto subterráneo. Sin embargo, en abril de 1998, ocurrió una tormenta excepcional, asociada al fenómeno de la corriente de “El Niño”. La precipitación totalizó 251 mm en 54 horas, de los cuales 150 mm precipitaron en un día. Esta cantidad duplicó el máximo registro diario en Trelew en los 50 años observados por el Servicio Meteorológico Nacional. Aunque no fueron detectadas referencias pluviométricas históricas similares en la región del valle inferior del río Chubut, cabe destacar que la geomorfología de los cañadones es un indicador de la ocurrencia pasada de eventos extraordinarios, aún mayores al registrado.

El escurrimiento generado durante este evento extraordinario colmató la Presa II, la que inició su desagüe por el vertedero de emergencia hacia la Presa III. Por acciones de vandalismo, habían sido quitadas del vertedero de gaviones de la primera presa las mallas de hierro zincado de protección a la

erosión. La abertura de una brecha entre éste y el cuerpo de la presa produjo la disminución del volumen de almacenamiento de la presa. Cuando el volumen acumulado en la Presa III exigió la entrada en operación del vertedero lateral de emergencia, el mismo se encontró obstruido por camionadas de escombros depositadas en él, y hasta un chasis abandonado en su cuenco. Esto produjo la sobre elevación por varios minutos del agua del embalse por sobre la cresta del terraplén, erosionando fuertemente sus paredes y debilitando el cuerpo de la presa. Simultáneamente, la presión del agua en la embocadura del vertedero provocó la remoción abrupta de los escombros depositados, generando una primera y sorpresiva “onda de crecida”. La misma sobrepasó inmediatamente el Cierre IV, inundó abruptamente el Barrio Constitución y continuó su rumbo por la calle canal hacia la Laguna.

Debido al incesante escurrimiento, uno de los estribos de la Presa III cedió, provocando la segunda onda de crecida. Pocas horas después rompió el “terraplén de la vía” sobre dicha presa, generando la tercera onda de crecida. Luego de 48 hs. los embalses quedaron vacíos, habiendo circulado por ellos un volumen estimado en 1.000.000 de m<sup>3</sup> de agua. Este volumen de agua colmó la laguna Chiquichano a niveles inusuales, hecho que sumado al agua de lluvia acumulada en el casco urbano, produjo la inundación de una enorme superficie urbana anegada (Figura 6.41). La situación de inundación se agravó por el endicamiento producido por la ruta 25.

Si no hubieran existido las presas durante la crecida, los picos de caudales en el Barrio Constitución hubieran sido algo menores. Pero el volumen de agua ingresado a la laguna hubiera sido el mismo y en un período de un día y medio en lugar de los cuatro días que demoró por efecto de retardo de las presas, aún fallidas. Esta situación hubiera generado crecidas de magnitud mayores en populosos barrios alrededor de la Laguna.



Figura 6.41. Imagen del Sector Mil Viviendas, dentro del Sistema del Cañadón del Parque Industrial, Trelew, durante la tormenta extraordinaria del 24/25 de abril de 1998.

Para solucionar el problema se plantearon varias alternativas, desde el retiro de todas las presas (volver al estado natural inicial del cañadón), hasta varias alternativas de refacción y mejoras del sistema de presas. La solución final contempló el rediseño de todo el sistema de regulación. En el contexto descrito, las presas no resuelven todo el problema, pero establecen un control importante de las crecidas del cañadón, dando mayor almacenamiento en un sector que compensa el almacenamiento perdido por el avance urbano en otros.

Los hechos de 1992 y 1998, marcan una necesaria modificación de las pautas de planificación urbanística de Trelew y su toma de conciencia pública, teniendo presente las limitaciones de uso de suelos inundables, el manejo de la masa de agua pluvial en lluvias de magnitud y la seguridad hídrica, cuyo debate aún es una asignatura pendiente. El caso sirve para remarcar, además, la necesidad de contemplar a los rasgos geomorfológicos de una región como elementos fundamentales para mitigar probables desastres hídricos ante eventos excepcionales o episódicos. Por último, la falta de mantenimiento y el vandalismo constituyen dos aspectos colaterales del problema que no pueden soslayarse en las actuales circunstancias de América Latina.

### **6.2.7 Inundación repentina en San Carlos Minas, Argentina.**

La pequeña localidad de San Carlos Minas (1.000 habitantes) está ubicada en el estado de Córdoba, región central de Argentina. El pueblo se desarrolla en la margen de arroyo Noguinet. Su cuenca (260,4 km<sup>2</sup>), cubre un área caracterizada por colina y fuertes pendientes. En enero 1992 el pueblo fue devastado por una crecida repentina (Barbeito *et al.*, 2004).

La tormenta convectiva que dio origen a la crecida precipitó 240 mm en 6 h en la cuenca superior, 140 mm en 7 h en la cuenca media y 204 mm en 6 h en la cuenca baja. La intensidad media de la lluvia fue calculada en 180 mm/h. En San Carlos Minas la inundación activó un sistema de paleocauces antiguos (Figura 6.42). La capacidad del curso fue superada repentinamente y, por consiguiente, el pueblo fue inundado en pocos minutos. Al mismo tiempo grandes árboles arrastrados por la corriente fueron acumulados conjuntos a un puente ubicado en la entrada del pueblo. La capacidad de proyecto del puente era de 800 m<sup>3</sup>/s pero este valor fue reducido drásticamente por la obstrucción de los árboles arrastrados. Esto creó un efecto de dique que algunos minutos después causó una onda frontal, similar a una onda de rotura de presa. Esta inmensa onda devastó el pueblo con un caudal máximo del orden de 1.900 m<sup>3</sup>/s. La consecuencia fue de 30 muertos, 40 personas desaparecidas y pérdidas materiales importantes. La Figura 6.43 ilustra el nivel máximo del agua en la sección aguas arriba del puente. La Figura 6.44 indica algunas de las pérdidas producidas por el paso de la crecida sobre el pueblo.

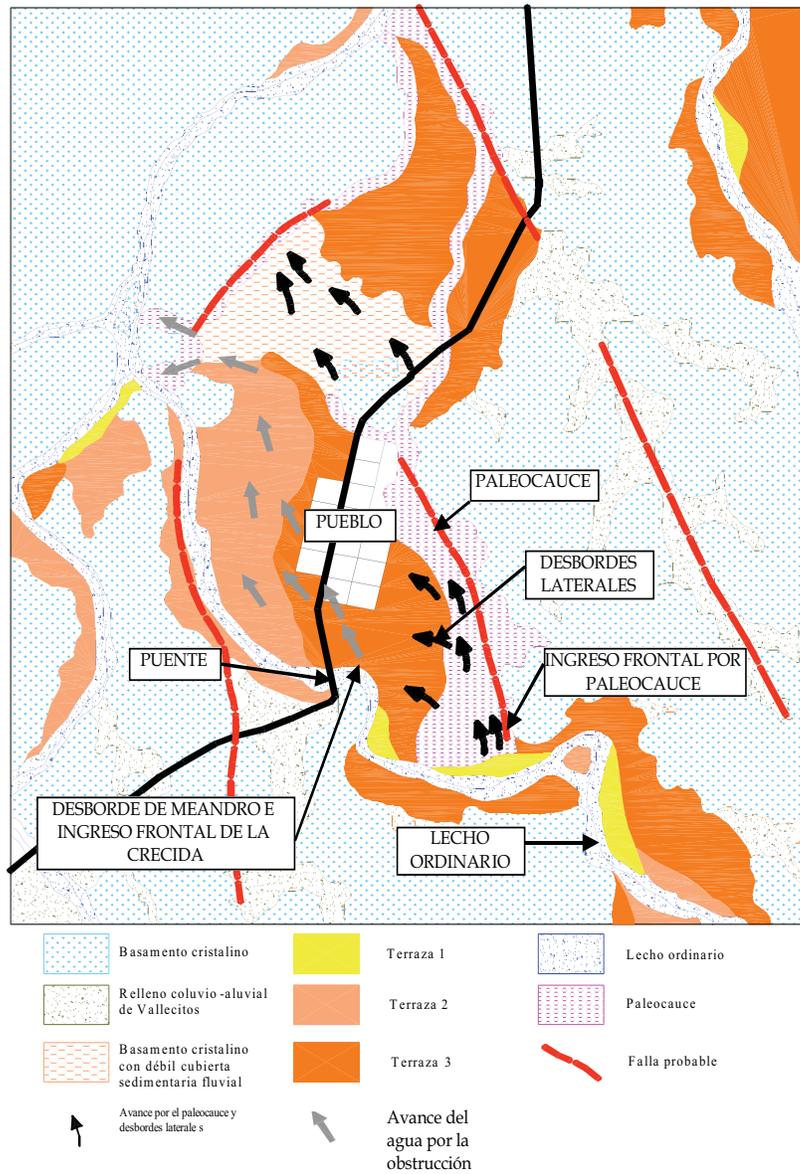


Figura 6.42. Camino seguido por la crecida repentina sobre San Carlos Minas, en enero de 1992. (Fuente: Barbeito *et al.*, 2004).



Figura 6.43. Sector inmediato aguas arriba del puente. Evento de enero de 1992 en San Carlos Minas, Argentina (Fuente: Barbeito *et al.*, 2004).



Figura 6.44. Daños sobre viviendas en un barrio de San Carlos Minas, Argentina. Inundación de enero de 1992.

### 6.2.8 Soluciones encaradas

La Dirección Provincial de Hidráulica (DPH, 1992) encaró a través de su Departamento de Estudios y Proyectos una serie de soluciones, todas de tipo estructural. Para definir los caudales de paso en San Carlos Minas se estudiaron las precipitaciones en la cuenca. Conforme citado previamente, las mismas se

caracterizaron por ser abundantes y de corta duración, con montos variables entre 60 y 250 mm y con duraciones próximas a 2 h, localizadas fundamentalmente en las Cumbres de Gaspar.

Mediante un estudio hidrológico basado en los escasos datos existentes fueron ajustados los caudales para distintos períodos de recurrencia (Tabla 6.7). Como control de estos estudios se encaró el procesamiento de datos obtenidos en el Dique Pichanas (receptor final del aporte de la cuenca), donde se había registrado el ingreso de la crecida a lo largo del tiempo. Con ello se confirmaron los valores de caudales y recurrencia calculados.

Tabla 6.7. Caudales máximos asociados a diferentes recurrencias. Arroyo Noguinet en San Carlos Minas, Argentina.

<b>Recurrencia [años]</b>	<b>Caudal máximo [m<sup>3</sup>/s]</b>
50	750
100	980
500	1.200
1.500	1.500

La DPH planteó alternativas de obras para diferentes caudales y, por ende, para diferentes grados de seguridad para la población. Estas alternativas incluyeron:

- Defensa con puente y vado.
- Defensa con puente.
- Sistema canal.

Las dos primeras alternativas definían obras en el mismo sector del puente, con caudales de proyecto del orden de 1.250 m<sup>3</sup>/seg y recurrencia de 500 años. Para el caso de caudales mayores estaba previsto el sobrepaso de las estructuras y la inundación de algunos sectores de la urbanización en forma controlada.

La tercera alternativa fue la adoptada finalmente como solución, dado que se consideró que brindaba los mayores coeficientes de seguridad a la población. Las obras diseñadas, para un caudal de 1.950 m<sup>3</sup>/seg, con una recurrencia de 5.000 años, reubicaron al cauce del río, alejándolo de la población hacia el sector Sur (Figura 6.45b).

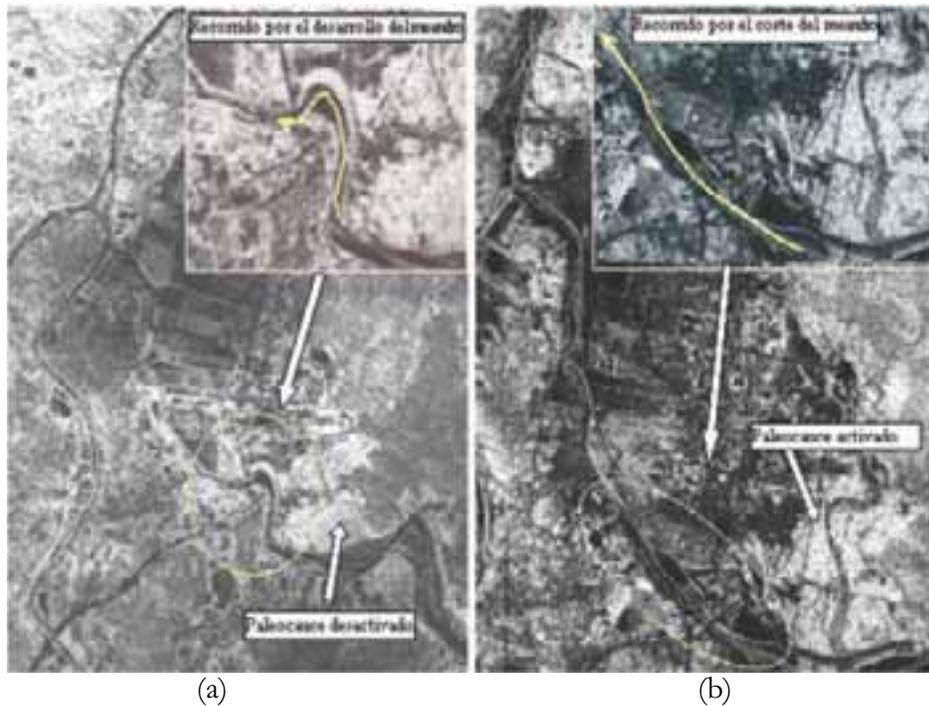


Figura 6.45. Foto aérea (a): año 1970 y (b) año 1998, luego de efectuada la obra de rectificación del meandro natural (“canalización”) (Fuente: Barbeito *et al.*, 2004).

Mediante esta obra quedó anulada la curva del río a través de la cual se produjo el ingreso incontrolado de las aguas en el día de la catástrofe.

Las obras que se propusieron para el proyecto consistieron en:

- Un canal de 815 m, ancho variable entre 40 y 80 m y profundidad variable hasta 10 m. El mismo fue excavado parcialmente en roca y el restante en suelo, determinando un volumen total de movimiento de suelo de 180.000 m<sup>3</sup>.
- Cierre transversal del río de 180 m de longitud y 6,40 m de altura máxima referida a la cota del lecho, ejecutado con materiales sueltos, provenientes de los excedentes de excavación del canal de sistematización. El cierre posee un sistema de inyecciones en el aluvión y un núcleo de mezcla de materiales finos y gruesos en el cuerpo principal.
- Cierre longitudinal en el brazo de crecidas, de 550 m de longitud y una altura promedio de 1,50 m, compuesto de materiales sueltos.
- Puente carretero sobre el canal de 48 m de longitud. La infraestructura, pila y estribos de hormigón armado fueron fundados directamente en roca.

- Reconstrucción de la Ruta Provincial N° 15 en las zonas afectadas.
- Sistematización del cauce, aguas abajo desde la salida del canal hasta la desembocadura en el río Salsacate.
- Reacondicionamiento de la cañada de desagüe sobre el antiguo brazo de crecidas.
- Reacondicionamiento de las acequias de riego en zonas afectadas de acuerdo a la nueva urbanización.
- Construcción de un nuevo sistema de alimentación, almacenamiento y conexión con la red existente de agua potable.
- Sistema de alimentación de agua para futuro balneario.

El estudio de todos los factores intervinientes evidenció que en la inundación analizada tuvieron alta participación factores naturales de tipo meteorológicos, hidrológicos y geológico – geomorfológicos. En la transformación de esta inundación en catástrofe el gravitante fue el factor antrópico.

La magnitud e intensidad de las precipitaciones producidas, como así también las características de la geología de superficie de la cuenca (que indican importantes porcentajes de roca cristalina desnuda alternantes con suelos discontinuos muy superficiales y de rápida saturación), y la torrencialidad de la cuenca (que se deduce de los parámetros morfométricos calculados), han sido sin duda los aspectos naturales de mayor incidencia en el carácter extraordinario de la creciente producida.

El grado de alteración a que está expuesta la cuenca, que puede considerarse de un grado intermedio por degradación de la vegetación natural, si bien tuvo cierta incidencia, adquirió un papel secundario.

La dinámica fluvial generada afectó a unidades y elementos geomorfológicos perfectamente definidos y reconocibles tanto en el análisis de los fotogramas como en el control de campaña.

De los estudios realizados se desprendió que la totalidad de la población y su entorno estaba localizada en un área inestable desde el punto de vista hidrológico, en grados que variaban según la posición geomorfológica. Es por ello que el factor antrópico, en base a la incorrecta localización de la infraestructura edilicia, fue el que adquirió el mayor peso en el desastre ocurrido.

Para la localización del pueblo y en particular de barrios nuevos, como así también del puente carretero que produjo el efecto de embalse, no fueron consideradas las características evidentes del riesgo hidrológico que estos sectores presentaban.

El grado que adquirió la catástrofe, como así también el nivel de inversiones posteriores en la búsqueda de soluciones, es un claro ejemplo de la falta de planificación en acciones tanto previas a un evento crítico como “a posteriori” del mismo. En efecto, durante la urbanización del pueblo ni el estado provincial ni el nacional dedicaron esfuerzos con el fin de reorientar la ubicación del mismo. Sin embargo, las inversiones realizadas “a posteriori” demostraron un alto grado de aversión al riesgo hídrico por parte de las autoridades.

La adopción de una medida estructural de la envergadura de la realizada (proyectada para un tiempo de recurrencia de 5.000 años) no se compatibiliza ni con las arcas públicas ni con la existencia de numerosas urbanizaciones serranas sujetas a amenazas similares, sobre las cuales poco o nada fue realizado desde entonces.

### **6.2.9 Inundación lacustre en Villa Carlos Paz, Argentina**

El embalse San Roque (Figura 6.46) se ubica en el centro geográfico continental de Argentina, en la provincia de Córdoba. Posee una cuenca hídrica de 1.650 km<sup>2</sup>, con relieve accidentado. El clima es típico de la zona templada mediterránea, con concentración estival de lluvias y altas temperaturas. La precipitación media anual, calculada en el período 1945-1979, fue de 720 mm.

Hacia fines del siglo pasado una preocupación gravitante de los gobernantes de la provincia de Córdoba era aprovechar la fuente de agua proporcionada por el río Suquía. Así en el año 1881 comienzan las tratativas sobre la construcción de una represa que traería a la ciudad de Córdoba protección ante grandes crecidas.

El 12 de abril de 1890 se inauguró el dique San Roque (Figura 6.47), que fuera por aquel entonces la presa más grande del mundo. El Ingeniero Gustavo Eiffel, profesor en el Politécnico de París de dos de los responsables del proyecto (Ings. Dumesnil y Casaffoust), manifestó por entonces: *“Dos obras llaman la atención del mundo en este momento; mi torre y el dique de Córdoba; con la diferencia que éste es productivo y mi torre no”*.

El dique fue reemplazado en 1944, subsistiendo los restos de la obra original a 150 metros aguas arriba del actual, el cual embalsa, hasta nivel del vertedero, 200 Hm<sup>3</sup>. El original también almacenaba 200 Hm<sup>3</sup>, ya que ambos vertederos están a similar cota referidas al nivel del mar. El actual prevé contener y controlar hasta 150 Hm<sup>3</sup> en el caso de crecientes mientras que el original solo preveía control sobre unos 30 Hm<sup>3</sup>.

El embalse San Roque cubre la mayor parte del abastecimiento de agua para la ciudad de Córdoba (1.400.000 habitantes), además de proveer agua para riego y generación hidroeléctrica. Cuenta con válvulas reguladoras y un vertedero en embudo (tipo “morning glory”), diseñado de modo que su caudal máximo tiende rápidamente a un valor de 240 m<sup>3</sup>/s. De esta manera resulta en una medida de protección contra inundaciones en la ciudad de Córdoba (capital de la provincia), la cual se localiza aguas abajo del embalse.

A nivel de labio de vertedero (35,3 m), el espejo de agua cubre 16,83 km<sup>2</sup> y contiene 184,9 Hm<sup>3</sup>. Para la cota de expropiación original del perilago (38,0 m), abarca 18,82 km<sup>2</sup>, con un volumen de 238,40 Hm<sup>3</sup>. En el supuesto caso que alcanzara el coronamiento del dique (43,0 m), abarcaría 22,50 km<sup>2</sup>, con 344,23 Hm<sup>3</sup>.

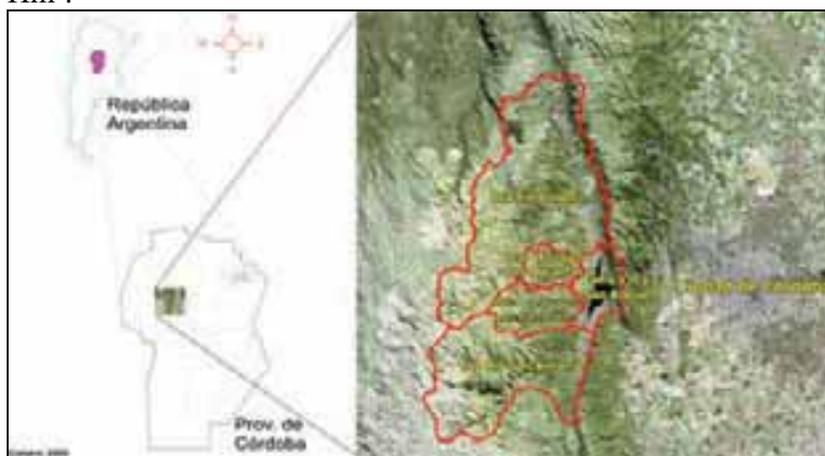


Figura 6.46. Cuenca de aporte al embalse San Roque. Ubicación geográfica y unidades hidrológicas



Figura 6.47. Fotografía del Original Dique San Roque, a 33 mts de embalse. (Fuente: Zuleika Gore-Edwards Bialet Laprida).

Entre los aspectos de la vulnerabilidad del sistema, que hacen del embalse San Roque un prototipo para el estudio de crecientes lacustres, cabe citar:

- A orillas del espejo existen varias poblaciones turísticas, destacándose por su importancia la ciudad de Villa Carlos Paz, que posee 45.000 habitantes estables. Durante la temporada turística estival esta ciudad triplica su población. Las crecidas de los ríos que aportan al embalse ocurren en verano, en coincidencia con la presencia del turismo.
- Buena parte de la actividad de los visitantes se desarrolla en el embalse y sus afluentes, o en su periferia.
- La cota de expropiación efectiva alrededor del perilago fue fijada por el municipio de Villa Carlos Paz en un valor más bajo (36 m) que el originalmente considerado en el proyecto del embalse (38 m). Aun así la cota de 36 m es violada a menudo, lo cual demuestra la falta de control tanto del municipio como de la autoridad provincial del agua.
- La capacidad de vertido del embalse es reducida, para proteger, como ya fuera citado, a la ciudad de Córdoba.
- Actualmente el embalse presenta un fuerte proceso de eutrofización, debido fundamentalmente a la carga orgánica domiciliar de las localidades ubicadas sobre el perilago, que no poseen tratamiento de efluentes, y al aporte de fósforo originado por los incendios rurales que se producen durante el período de sequía.

En las últimas décadas la precipitación pluvial sobre el área de aporte ha crecido notoriamente, en tanto que, desde la privatización del servicio de abastecimiento de agua a la ciudad de Córdoba, el manejo del embalse tiende a mantener elevado su nivel como medida de control de la eutrofización. Ambas causas han dado origen a la una tendencia incremental de la altura del cuerpo de agua de casi 8 cm/año (Caamaño y Catalini, 2002). Consecuentemente, se ha potenciado la amenaza y el riesgo de inundación de márgenes, hecho que se ha convertido en un problema serio en los últimos años. Hacia fines de 1999 se produjo la mayor inundación ya registrada en el perilago, abarcando importantes sectores de la ciudad de Villa Carlos Paz (Figura 6.48). Ello dio origen al estudio de escenarios críticos probables y a la delimitación de las áreas bajo riesgo hídrico de inundación. Este trabajo fue desarrollado por Caamaño y Catalini (2002) y Catalini (2003).



Figura 6.48. Inundación de la ciudad de Villa Carlos Paz (1999), Argentina, en el perillago del dique San Roque.

### **Predicción de escenarios críticos en el embalse San Roque**

La cota a alcanzar por la superficie del espejo de agua depende del volumen ingresante al embalse, del estado inicial de éste, de las condiciones de manejo de las descargas y de la distribución de los aportes en el tiempo.

Caamaño y Catalini (2002) y Catalini (2003) presentaron la estimación del máximo caudal medio afluente al embalse para una dada recurrencia y para un determinado número de días de duración del evento. Para el resto de los factores fueron admitidas distintas hipótesis de trabajo, conducentes a la confección del mapa de riesgo hídrico. Éstas se presentan a continuación.

### **Duración hipotética del evento a analizar**

A través de la observación de la serie histórica de niveles de este embalse (periodo 1944-2005), se pudo concluir que el tiempo de reacción del sistema luego de la ocurrencia de precipitaciones en la cuenca es como máximo de 4 días, dependiendo del estado inicial y de la localización en la cuenca de las mayores precipitaciones.

### Determinación de la cota inicial del embalse

Los resultados obtenidos mostraron que el embalse presenta una tendencia incremental de su altura, hecho que imposibilitó determinar una cota media a partir de la serie diaria. El análisis de los valores máximos, medios y mínimos anuales se presenta en la Figura 6.49. La misma permite apreciar que la tendencia incremental presentada en la serie diaria, se observa también en los máximos, medios y mínimos anuales. Se observa un incremento mayor en las cotas mínimas (que alcanza 9,9 cm/año). Para las cotas máximas se mantiene la tendencia observada en los valores diarios. De mantenerse este comportamiento, el mismo provocará una disminución del rango existente entre las cotas máximas y mínimas (del orden de los 6,75 m). Considerando todos estos aspectos, se adoptó como cota inicial del embalse para las simulaciones la correspondiente al labio del vertedero ( $h_0=35,30$  m).

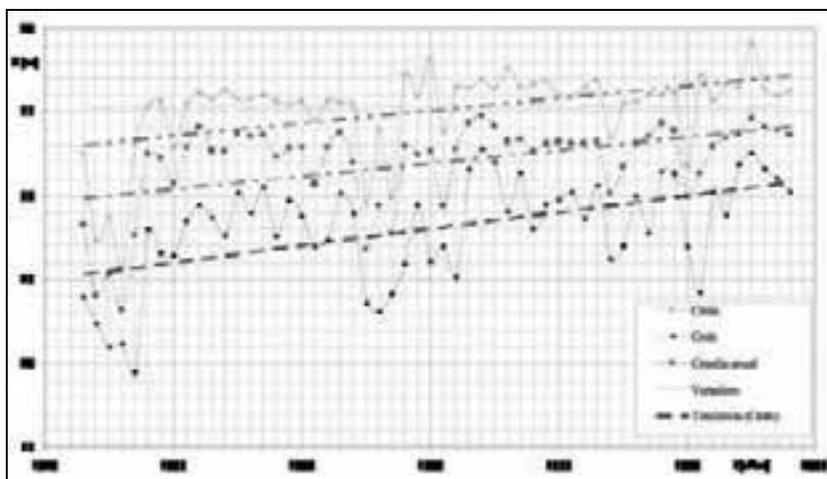


Figura 6.49. Series de niveles máximos, medios y mínimos anuales (período 1947-2003)

### Determinación de las condiciones de manejo de las descargas

En toda simulación del comportamiento de un embalse es necesario conocer las condiciones de descarga y la política de manejo del recurso hídrico adoptada por las autoridades. En este caso particular los autores concluyeron que no existió una política constante en el tiempo (en realidad se afirma la inexistencia de una política), razón por la cual plantearon dos alternativas arbitrarias, admitiendo luego del análisis la siguiente: evacuación del 100 % ( $24 \text{ m}^3/\text{seg}$ ) por tomas y 90 % (prom.  $72 \text{ m}^3/\text{seg}$ ) por

válvulas. Con base en estos supuestos fue realizado el *mapa de riesgo*.

### Determinación de las cotas con recurrencia asociada

Las cotas máximas asociadas a distintas recurrencias fueron obtenidas a partir de un balance hídrico entre entradas y salidas al embalse. Para las primeras fueron analizadas tres posibles distribuciones temporales dentro del día: (i) *aportes medios al inicio de la jornada*, (ii) *uniformes durante el transcurso del día* y (iii) *suposición de la ocurrencia de un hidrograma deducido a partir de un modelo hidrológico determinado por los autores*. Esta última alternativa fue empleada en definitiva para la confección del *mapa de riesgo*, ya que la cuenca no dispone de todas las informaciones hidrológicas necesarias. Para el estudio fueron seleccionadas 10 recurrencias asociadas a las entradas al embalse, variando entre 10 y 10.000 años.

En base a la modelación se procedió a la selección de niveles de riesgo asociado, los cuales fueron caracterizados como: *Alto*, *Medio*, *Bajo* y *Mínimo*. Los tres primeros poseen una recurrencia (T) y una cota máxima (h) asociada, mientras que el último fue adoptado siguiendo los lineamientos del proyecto original de la presa que establece que el embalse puede almacenar los volúmenes excedentes hasta la cota de coronamiento (43,00 m). La Tabla 6.8 presenta las informaciones relativas a los cuatro niveles antes indicados, en donde el riesgo es definido como la probabilidad de que haya inundación al menos una vez en n años sucesivos lo cual se puede expresarse como:

$$R = 1 - [1 - (1 / T)]^n = 1 - P \left(\frac{1}{T}\right)^n \quad (6.1)$$

Tabla 6.8. Niveles de Riesgo Seleccionados.

Niveles de Riesgo	Tr [años]	Cota [m]	$\Delta h$	Riesgo %. N
Alto	10	37.01		10.00 %
Medio	500	38.23	1.22	0.20 %
Bajo	1000	39.19	0.96	0.10 %
Mínimo	---	43.00	3.81	

### Superficies Inundables

Con base en datos batimétricos y de curvas de nivel fueron estimadas las superficies del espejo de agua y del perilago para los distintos niveles de riesgo asignados, dando ello origen al Mapa de Riesgo Hídrico para el perilago del embalse San Roque (Figura

6.50). Mediante el empleo de imágenes satelitales actualizadas fue obtenido el valor correspondiente a la superficie urbanizada de la ciudad de Villa Carlos Paz (850 Ha), el cual fue adoptado como valor referencial de los porcentajes de área urbana con riesgo ante eventos hidrológicos críticos. A su vez se determinaron otros parámetros de interés relacionados a las superficies inundables (Tabla 6.9).

El mapa de riesgo del embalse San Roque permite advertir que la cota de edificación mínima adoptada en los últimos años (36 m) resulta excesivamente baja para buena parte de la ciudad de Villa Carlos Paz. Ello indica la necesidad de adoptar en forma efectiva aquella cota originalmente considerada en los estudios del embalse (38 m). La adopción de esta cota no disminuiría el riesgo en las zonas ya construidas de Villa Carlos Paz, pero impediría el aumento del problema en la ciudad y serviría también de base para todos los nuevos asentamientos que se desarrollan en otras comunas linderas al embalse.

El espacio inundable del perillago entre las cotas 36 y 38 es de 200 Ha, de las cuales aproximadamente 94 Ha corresponden a la actual área urbana de Villa Carlos Paz. Ello representa el 47 % de la zona de inundación potencial, por lo que fijando la cota 38 como limite inferior de urbanización se mantendrían libres de riesgo aproximadamente 106 Ha.

Tabla 6.9. Superficies inundables para la ciudad de Villa Carlos Paz y porcentaje de áreas urbanas con riesgo de inundación.

<b>Cota (m)</b>	<b>35.30</b>	<b>37.01</b>	<b>38.23</b>	<b>39.19</b>	<b>43.00</b>
<b>ΔA (km<sup>2</sup>)</b>	---	0.618	0.365	0.277	1.452
<b>Superficie inundable (Ha)</b>	---	<b>61.83</b>	<b>98.33</b>	<b>126.07</b>	<b>271.23</b>
<b>% de Áreas urbanizadas con riesgo de inundación para Villa Carlos Paz</b>					
<b>Con relación a la superficie correspondiente a la cota de coronamiento</b>	---	10.90%	17.34%	22.23%	47.83%
<b>Con relación al total de la ciudad</b>	---	7.27%	11.57%	14.83%	31.91%

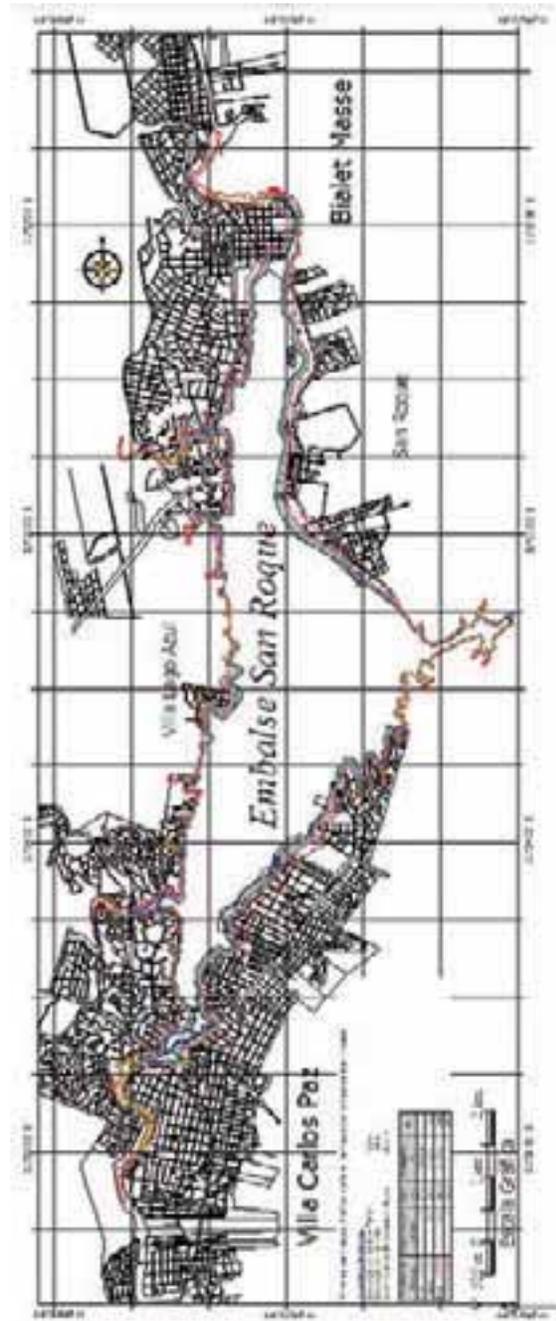


Figura 6.50. Mapa de Riesgo Hídrico con recurrencia asociada para la ciudad de Villa Carlos Paz (Fuente: Catalini, 2004)

## 6.3 Inundaciones urbanas en Centro América

Centro América presenta el 54 % de su población concentrada en áreas urbanas, la mayoría de las cuales presenta serios problemas asociados al drenaje urbano. La ocurrencia de tormentas severas, el desarrollo incontrolado de sus áreas urbanas, con fuerte tendencia a la aplicación exclusiva del concepto sanitarista (higienicista) de conducción rápida de las aguas hacia aguas abajo, las deficiencias en la infraestructura urbana y una marcada presencia de residuos sólidos en la vía pública, conforman un panorama que resulta en la recurrente ocurrencia de inundaciones urbanas.

A continuación se presentan aspectos de la problemática correspondiente a la región metropolitana de San Salvador (AMSS) y a la ciudad de Managua (Nicaragua).

### 6.3.1 Inundaciones urbanas en el Área Metropolitana de San Salvador

El Salvador posee 55,4 % de su población concentrada en las áreas urbanas. El área metropolitana de San Salvador (AMSS), concentra 2 millones de habitantes. El 10 % de esta población vive en condiciones de extrema pobreza extrema y está ubicada principalmente en áreas de alto riesgo (áreas amenazadas por torrentes, laderas con alto riesgo de deslaves, etc.). El 75 % de las viviendas es atendida por el sistema de alcantarillado cloacal, pero menos del 10 % de lo colectado recibe tratamiento.

El Área Metropolitana de San Salvador presenta una problemática compleja en relación al drenaje urbano. La gran mayoría de los problemas que actualmente se observan en el área se asocian a la cantidad y calidad del agua escurrida. La ocurrencia de inundaciones urbanas y los permanentes problemas de contaminación de la calidad del agua escurrida son el resultado de un crecimiento urbano de tipo tradicional, sin planificación, de la aplicación sistemática del concepto sanitarista (higienista) en el drenaje de las aguas lluvias y de la falta de una política de estado en la materia.

La presión poblacional, la demanda de tierras y servicios, las condiciones de la infraestructura urbana y la falta de planificación, han incrementado de forma exponencial los riesgos por inundaciones. Éstas ocurren no solamente en las zonas aledañas a los ríos, sino también en áreas de mayor altura topográfica.

El AMSS se desarrolla sobre la porción superior de dos cuencas hídricas: Acelhuate e Ilopango. La parte principal del AMSS está ubicada sobre la primera. Este curso recibe un aporte de efluentes cloacales de 5 m<sup>3</sup>/s. En el AMSS el sistema de provisión de agua es insuficiente para la demanda de las nuevas urbanizaciones, así que la importancia de nuevos manantiales de agua con calidad y cantidad suficientes es permanente. Durante muchos años las soluciones para el sistema de drenaje pluvial fueron basadas en obras de conducción de hidráulica tales como conductos, alcantarillas, etc. Es decir, típicamente un enfoque basado en medidas estructurales que apuntan a acelerar y concentrar el flujo superficial. Debido a su permanente crecimiento (Figura 6.51) la región también ha experimentado un aumento no controlado de sus superficies impermeables.

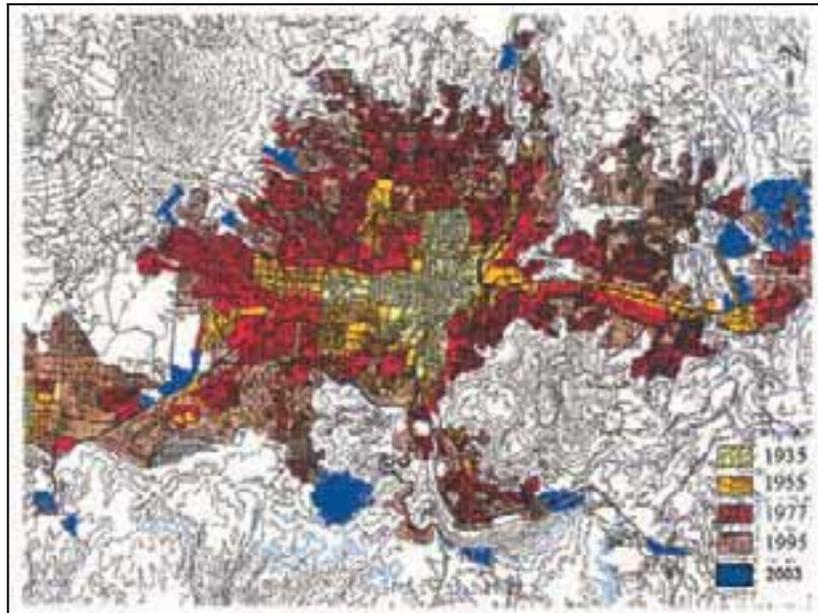


Figura 6.51. Evolución de la zona metropolitana de San Salvador (AMSS) en el periodo 1935-2003 (Fuente: OPAMSS, 2005).

### 6.3.2 Inundaciones urbanas asociada a la tormenta tropical “Stan” (2005)

A lo largo de los primeros días de octubre de 2005 la tormenta tropical “Stan” afectó a varios países de América Central. A continuación son citados algunos aspectos de la situación en AMSS.

Desde el 28 de septiembre 2005 las precipitaciones sobre el territorio de El Salvador habían comenzado a saturar los suelos.

El 1º de octubre de 2005 el sistema atmosférico engendró una zona de depresión (1008 milibares) en la región costera pacífica de El Salvador, favoreciendo el desplazamiento de humedad hacia el territorio nacional. La Zona de Convergencia Intertropical generó desde la mañana de ese día lluvias y fuertes chaparrones sobre todo el territorio de El Salvador, principalmente en la franja central de las áreas costeras.

A lo largo de una semana la tormenta "Stan" produjo importantes precipitaciones; para el AMSS el total de lluvia en 6 días fue superior a 500 mm (Figura 6.52). Según SNET (2005) la precipitación media correspondiente al mes de octubre es de 205 mm. La sucesión de inundaciones y de deslaves de tierra producidos en los 14 municipios que conforman el AMSS resultaron en 65 personas fallecidas y un gran número de desabrigados. La Figura 6.53 ilustra el fenómeno en el sector urbano.



Figura 6.52. Distribución total de la lluvia durante la tormenta « Stan » en El Salvador (Fuente: SNET, [www.snet.gob.sv](http://www.snet.gob.sv)).



Figura 6.53. Inundación en San Salvador durante la tormenta « Stan ». (Fuente: OPAMSS, 2005).



Figura 6.54. Inundación ribereña asociada a la tormenta tropical “Stan”. San Salvador. (Fuente: OPAMSS, 2005)

Algunas fuentes de información han asociado casi exclusivamente esta situación al cambio climático global. Aunque la severidad climática en la región de América Central haya constituido una materia destacada, las reales causas de los problemas observados se asocian a un conjunto de los factores sociales, técnicos y de gestión.

Según destacado por Cruz y Molina (2004), la red de drenaje de aguas lluvias del AMSS sufre de una seria de problemas. Entre ellos tiene citar la inexistencia de una institución legalmente responsable de la planificación, limpieza y mantenimiento general, razón por la cual la red se encuentra actualmente muy deteriorada, funcionando en condiciones deficientes. El Ministerio de Obras Publicas ha sido el responsable del mantenimiento parcial del sistema, como parte de la red relativa a la red pública. Sin embargo, a partir del año 2000 comenzó un proceso gracias al cual el Ministerio ha ido progresivamente desentendiéndose de esta problemática.

El sistema de conductos subterráneos del AMSS, casi en su totalidad está constituido por conductos de concreto de sección circular. Entre los problemas identificados en la red de drenaje cabe citar graves deficiencias estructurales, incapacidad hidráulica, conexiones cruzadas de aguas negras y de las aguas industriales (Figura 6.55), proyectos inadecuados, cambios de diámetros de mayores a menores en dirección a aguas abajo y pozos de visita sellados por el pavimento de las calles.



Figura 6.55. Tuberías empotradas directamente en los conductos de drenaje pluvial. (Fuente: Cruz y Molina, 2004).

Otro factor importante de mencionar es el hecho de existir dos estaciones climáticas muy definidas: la estación lluviosa y la estación seca. Esta última tiene una duración media de 5 a 6 meses durante la cual se produce la acumulación de basura y desechos varios. Al momento de producirse lluvias de gran intensidad se generan las condiciones necesarias para el arrastre con todos estos desechos sólidos, los cuales se introducen en los conductos

pluviales.

Todo lo previamente mencionado es el resultado, por una parte, de una falta de planificación propia del sistema y de la falta de reglamentación de los proyectos y, por otra parte, de importantes deficiencias de planificación en el crecimiento de la región metropolitana.

### **6.3.3 Ensayo de dispositivos de regulación: caso de la urbanización Residencial Paso Fresco**

La Urbanización Residencial Paso Fresco se encuentra emplazada en la ladera del Volcán de San Salvador. Posee una superficie aproximada de 2 has, con 38 lotes de 400 m<sup>2</sup> de superficie promedio y un porcentaje de áreas impermeables del 70 %. Esta urbanización ha sido desarrollada a partir del año 2004. En ella la Unidad Ambiental (UA) de la Oficina de Planificación del AMSS (OPAMSS) propuso un dispositivo de regulación del flujo que constituye una de las primeras medidas en su tipo dentro de la región del AMSS.

Para la evacuación de aguas lluvias fue construido un sistema de drenaje y regulación conformado por una red de captación clásica (bocas de tormenta o tragantes y conductos), más un dispositivo de almacenamiento y amortiguación subterráneo a la salida del loteo. Este último dispositivo consta de tres cámaras de acceso, un conducto de 1,8 m de diámetro y una salida restringida (0,50 m de diámetro) la cual actúa como reguladora de flujo de salida hacia la red municipal (Figura 6.56). La conexión entre el conducto de gran diámetro y el de salida a la red se efectúa a través de una cámara dotada de dos compartimentos conectados por descargadores de fondo (0,30 m de diámetro) y un vertedero, según se ilustra en la Figura 6.57.



a. vista de una de las cámaras de acceso al dispositivo regulador.

(b) vista interna del conducto de regulación, con marcas de niveles máximos luego de ocurrida la tormenta Stan (octubre 2005).

Figura 6.56. Dispositivo de regulación por conducto (Urbanización Paso Fresco).

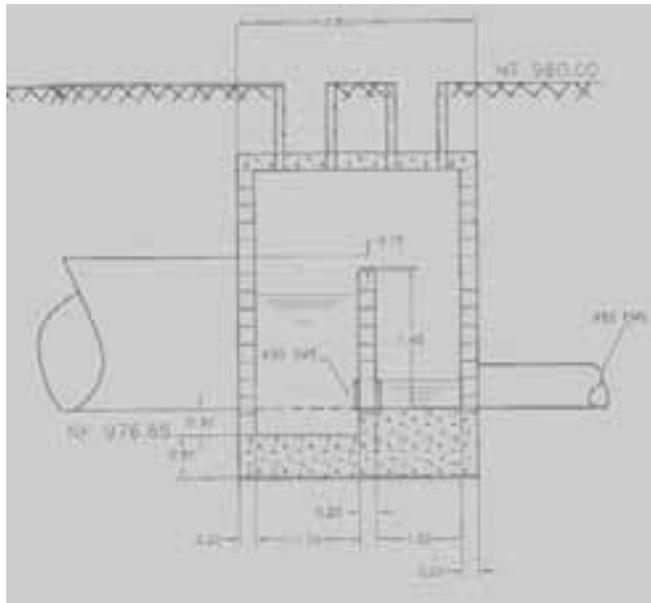


Figura 6.57. Detalle constructivo de la cámara del dispositivo de almacenamiento y regulación (Residencial Paso Fresco, AMSS)

El sistema fue simulado matemáticamente, incluyendo lotes, espacios verdes y sus respectivas calles (Figura 6.58; Bertoni y Catalini, 2005). Para verificar el comportamiento del sistema de drenaje antes distintos escenarios fueron utilizadas

tormentas de proyecto basadas en las curvas i-d-f de la región. Los eventos analizados fueron supuestos de 2 horas de duración y con periodos de retornos que abarcaron 2, 5, 10, 25 y 50 años.

Las simulaciones efectuadas reflejaron el comportamiento del sistema de drenaje ante tres escenarios básicos alternativos:

- (i) estado rural de preurbanización;
- (ii) desarrollo urbano tradicional “*sanitarista*” y
- (iii) desarrollo urbano con control del escurrimiento.

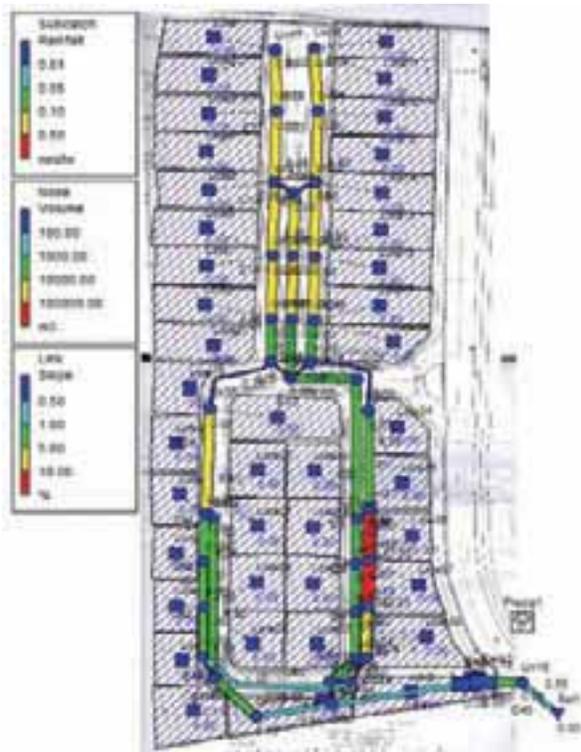


Figura 6.58. Esquema de simulación de la urbanización Residencial Paso Fresco.

El primer escenario indicado refleja las condiciones que deberían ser mantenidas luego de la urbanización. El segundo escenario permite observar el impacto del desarrollo urbano tradicional basado simplemente en obras de captación y conducción que aceleran el escurrimiento. Las simulaciones dentro del tercer escenario incluyeron:

- (a) el análisis del comportamiento del dispositivo de regulación existente;
- (b) la optimización del dispositivo existente, que implicó una reducción del diámetro del conducto de control del escurrimiento, y

- (c) el replanteo del sistema de control adicionando un sistema de infiltración/exfiltración mediante la realización de una trinchera de material poroso y de perforaciones en las paredes del conducto empleado como sistema de regulación subterráneo.

### **Simulación estado rural de preurbanización**

En este caso la totalidad de la urbanización fue supuesta en estado rural. La Tabla 6.10 presenta los resultados obtenidos bajo este supuesto.

Tabla 6.10. Caudales y volúmenes de salida para el escenario rural preurbanización.

Tr	[años]	2	5	10	20	50
<b>Caudal Salida</b>	[l/s]	410	560	650	780	950
<b>Volumen</b>	[m <sup>3</sup> ]	762	1005	1338	1416	1707

### **Simulación escenario sanitarista**

En la Tabla 6.11 se pueden apreciar los valores modelados para las distintas recurrencias bajo análisis. Se observa que, como es lógico, el mayor impacto de la urbanización se hace sentir sobre las tormentas más frecuentes, es decir, para tiempos de retorno bajos. Este impacto se traduce en un aumento de los caudales y de los volúmenes escurridos y en una reducción de los tiempos de respuesta de la cuenca.

Tabla 6.11. Caudales y Volúmenes de Salida para el escenario sanitarista.

Tr	[años]	2	5	10	20	50
<b>Caudal Salida</b>	[l/s]	554.0	771.5	837.1	962.1	1092.4
<b>Volumen</b>	[m <sup>3</sup> ]	1227	1500	1852	1939	2227

### **Simulación dispositivo existente (escenario de regulación actual)**

Los resultados son presentados en la Tabla 6.12.

Tabla 6.12. Caudales y volúmenes de salida para el dispositivo de regulación existente.

Tr	[años]	2	5	10	20	50
<b>Caudal Salida</b>	[l/s]	457.1	769.9	838.0	960.5	1091.6
<b>Volumen</b>	[m <sup>3</sup> ]	1224	1483	1859	1963	2234
<b>Altura</b>	[m]	1,66	1,81	1,84	1,87	1,91

Las informaciones presentadas permitieron concluir que el sistema de amortiguación y retención de excedentes actualmente en operación posee características que le otorgan capacidad de regulación para tormentas con tiempos de retorno superiores a los ensayados en este estudio. En otras palabras, para tormentas con recurrencias entre 2 y 50 años la existencia del conducto de salida de 0,50 m y de un volumen insuficiente de almacenamiento (dado por el conducto de 1,80 m) no consiguen amortiguar los caudales de salida.

En síntesis, las características de los hidrogramas de salida denotan el excesivo diámetro del conducto de salida a la red municipal, el cual no permite retener los excedentes el tiempo suficiente como para disminuir significativamente el impacto de la urbanización sobre la red de desagües pluviales. La modelación matemática de la totalidad de la urbanización permitió observar, a su vez, que existe un sobredimensionamiento generalizado del sistema de drenaje actual de los excedentes pluviales de la urbanización (sistema de calles, conductos colectores, etc.).

### **Optimización del dispositivo existente**

Bajo este escenario la alternativa seleccionada comprende la reducción del conducto de salida del dispositivo de 0,50 m a 0,30 m, es decir, una reducción del 40 % en el diámetro del conducto de regulación. Los resultados alcanzados mediante esta modificación son presentados en la Tabla 6.13 En ellas se puede apreciar que se logra una reducción significativa de los caudales pico en relación al dispositivo actual. Como era de esperar, el efecto de amortiguación de caudales aumenta a medida que se incrementa la recurrencia de las tormentas intensas.

Tabla 6.13. Caudales y volúmenes de salida para el dispositivo existente, con reducción del 40 % en el conducto de salida.

<b>Tr</b>	<b>[años]</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>50</b>
<b>Caudal Salida</b>	<b>[l/s]</b>	410.0	444.8	445.2	445.9	446.3
<b>Volumen</b>	<b>[m³]</b>	1227.00	1506.84	1852.08	1946.40	2215.89
<b>H sobre calzada</b>	<b>[m]</b>	0.0	0.20	0.22	0.23	0.23
<b>Permanencia</b>	<b>[min]</b>	0	20	30	30	50

Como es lógico, la reducción del diámetro del conducto de salida significa un aumento de los niveles máximos en el conducto almacenador de 1,80 m de diámetro. Para recurrencias elevadas (10 a 50 años) ello ocasiona inundaciones leves (en torno a 0,20 m) en las zonas más bajas (calles) de la urbanización, por periodos

de tiempo que en ningún caso supera 1 h de permanencia.

Este tipo de inundación controlada (en tiempo y en altura máxima) es considerada aceptable dentro de los parámetros de diseño de la calle, ya que permite que la misma cumpla con su función básica aún ante tormentas severas.

### Replanteo del dispositivo existente

Una nueva alternativa de modelación realizada sobre la urbanización fue planteada a partir de la hipótesis de instalación de un sistema de infiltración/exfiltración adicionado al dispositivo existente. La redefinición del dispositivo de control incluyó la existencia de una trinchera de regulación parcial alrededor del conducto almacenador. El pasaje del flujo desde este último hacia la trinchera se produce a través de 8 hileras de orificios realizados sobre el conducto. Si las condiciones del suelo natural lo permiten, el flujo desde la trinchera continúa infiltrándose hacia capas más profundas. A los efectos de presentar estimaciones conservativas del funcionamiento de la trinchera, la misma fue simulada adoptándose parámetros del modelo matemático correspondientes a una trinchera ensayada en el IPH-UFGRS/Brasil. Merece indicarse que esta trinchera se encuentra emplazada en un terreno mucho menos permeable que el del AMSS, por lo que es altamente probable que en la mayoría de las zonas comprendidas por el AMSS se obtengan, en realidad, mayores volúmenes infiltrados en relación a los simulados.

Los resultados obtenidos permitieron observar reducciones importantes en el caudal pico erogado hacia la red municipal para todas las recurrencias analizadas (Tabla 6.14).

Tabla 6.14. Caudales y volúmenes de salida para el dispositivo con capacidad de infiltración/exfiltración

Tr	[años]	2	5	10	20	50
<b>Caudal Salida</b>	[l/s]	339.5	395.1	434.9	435.5	444.8
<b>Volumen</b>	[m <sup>3</sup> ]	1209.57	1476.99	1830.60	1920.63	2145.00
<b>h calzada</b>	[m]	0.00	0.00	0.00	0.01	0.20
<b>Permanencia</b>	[min]	0	0	0	5	35

Si se comparan los resultados con aquellos correspondientes a la alternativa de optimización del dispositivo existente, se puede apreciar que sólo para recurrencias elevadas se alcanzan niveles sobre la calzada, implicando una permanencia sensiblemente inferior. Las disminuciones en los volúmenes aportados fueron despreciables debido a la consideración del

funcionamiento conservativo de la trinchera. Se remarca que, en la realidad, este tipo de dispositivo podrá ofrecer también como beneficio la reducción de los volúmenes escurridos.

### **Comparación de resultados correspondientes a todos los escenarios**

La Figura 6.59 presenta los hidrogramas de salida de la urbanización Residencial Paso Fresco correspondiente a cada uno de los escenarios ensayados, para un tiempo de retorno de 10 años.

Entre los aspectos más destacados cabe citarse:

- el desarrollo urbano de la urbanización Residencial Paso Fresco según el proceso tradicional de ejecución exclusiva de obras de conducción de tipo “sanitarista” representaría un fuerte impacto hidrológico en relación al estado rural pre-urbanización del área. Este impacto estaría dado por un significativo aumento del caudal pico, la reducción del tiempo al pico y un importante aumento del volumen total escurrido;
- el dispositivo de control del escurrimiento actualmente existente en la urbanización consigue mantener el pico del hidrograma generado por la urbanización dentro del 10 % de crecimiento en relación a la situación de pre-urbanización. Sin embargo, el volumen escurrido se asemeja al del escenario sanitaria;
- la optimización del dispositivo existente (reducción del diámetro de salida) permite alcanzar la condición de “impacto hidrológico nulo” en términos de caudal y tiempo al pico en relación a la situación rural. El volumen escurrido se asemeja al del escenario sanitaria;
- La adopción de un dispositivo de control mediante infiltración consigue alcanzar una condición de “impacto hidrológico positivo” de la urbanización, ya que se observa una reducción significativa del caudal máximo y un aumento del tiempo al pico en relación a la condición de pre-urbanización. El volumen escurrido es inferior a las restantes situaciones urbanas ensayadas. La magnitud de esta reducción depende de las condiciones de permeabilidad y humedad antecedente del suelo circundante.

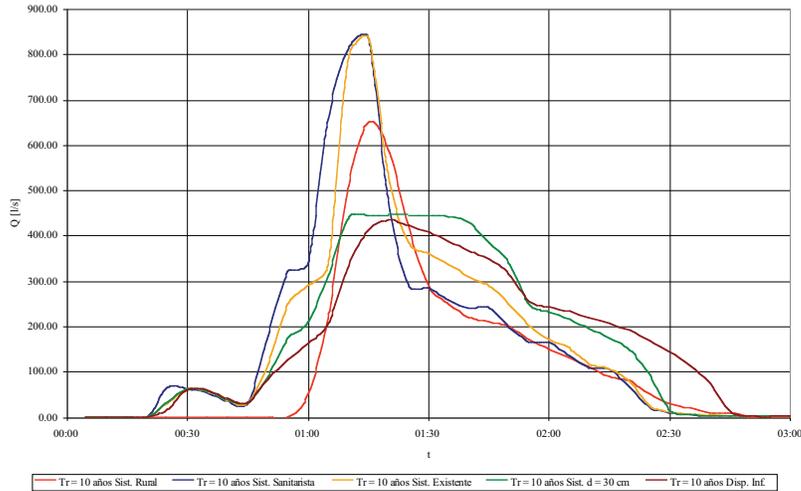


Figura 6.59. Hidrogramas de salida para todos los escenarios ensayados ( $Tr = 10$  años).

En otras palabras, la función de los dispositivos de control del escurrimiento propuestos hace que el aumento de la recurrencia de las tormentas se traduzca en un aumento de la permanencia de los caudales máximos y no en un aumento de estos últimos, tal como es habitual observar en las áreas urbanas (Figura 6.60).

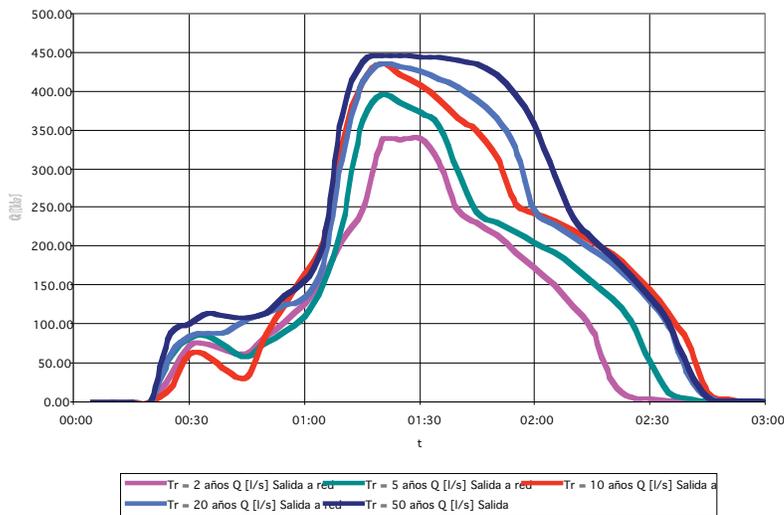


Figura 6.60. Efecto de aumento de la permanencia de los caudales máximos generado por los dispositivos de control propuestos.

### 6.3.4 Red de Micro Presas de Managua, Nicaragua

La Ciudad de Managua, capital de Nicaragua, posee un área total de  $544 \text{ km}^2$  de los cuales  $173.7 \text{ km}^2$  corresponden al

área urbana. La población de la ciudad es de aproximadamente 1 millón de habitantes, con una tasa de crecimiento de 2,5 % anual. La ciudad se desarrolla sobre un área de piedemonte, sobre el Lago Xolotlán (o Lago de Managua). El relieve de la región es accidentado, razón por la cual la ciudad es atravesada por una vasta red de cauces, en su mayoría de fuerte pendiente que desaguan en el Lago de Managua (Figura 6.61).

A lo largo de su historia la ciudad ha sido afectada por diversos terremotos (1844, 1855, 1931, 1972) que la han afectado seriamente. Producto de ello, actualmente la ciudad presenta una fisonomía de núcleos urbanos dispersos, entre los que se intercalan zonas con menor densidad habitacional. A partir de la década del 90 la ciudad recuperó una fuerte tendencia de crecimiento, acompañando al desarrollo económico del país. El acelerado crecimiento de la ciudad de Managua, con la expansión hacia la periferia ha originado déficit en los servicios de equipamientos y servicios básicos.



Figura 6.61. Ciudad de Managua y principales subcuencas de aporte (Fuente: ALMA, 2005).

Entre los elementos más sensibles a la problemática urbana de la ciudad, se pueden señalar los siguientes (Alcaldía de Managua, 2005):

- Su ubicación geográfica, que la hace más vulnerable frente a los desastres naturales, al ser atravesada por fallas geológicas activas, una vasta red de cauces naturales y una inclinación bastante acentuada de sur a norte, hacia la

costa.

- Debilidad en el control urbano por la falta de aplicación y cumplimiento de las leyes y reglamentos urbanísticos, así como la no actualización de las mismas que propician el crecimiento anárquico de la ciudad.
- Déficit de viviendas
- Limitada cobertura de los servicios básicos en los sectores habitacionales espontáneos.
- Limitaciones en el Servicio de Recolección de Basura.

El clima de la región es de tipo tropical, siendo frecuente la ocurrencia de tormentas convectivas que producen chaparrones de altas intensidades. Las crecidas originadas en las cuencas que atraviesan a la ciudad arrastran considerable material sólido. En las zonas de aguas arriba los residuos corresponden en su mayoría a desechos de tipo agrícolas, originados en la cosecha de cultivos. En la zona media y baja de las cuencas, ocupadas por la población urbana, los desechos corresponden, en su gran mayoría, a envases plásticos tipo PET.

Desde la década del 80 la ciudad desarrolló una red de micro presas en el sector medio-bajo de cada cuenca, con el doble objetivo de recolectar la basura y producir la amortiguación de los picos de las crecidas (Figura 6.62). Hasta la actualidad han sido construidas aproximadamente 15 micro presas. Aún cuando no existe un monitoreo sistemático de los residuos sólidos colectados y extraídos, Sarria Duarte (*comunicación personal*, 2005) analizó el volumen de sedimentos extraídos en cada micro presa, con los resultados que se presentan en la Figura 6.63. En el año 2005 fue construido un nuevo reservorio, de 95.000 m<sup>3</sup>, que colecta la basura de un sector urbano (Figura 6.64).



Figura 6.62. Micro presa de Villa Fontana en la ciudad de Managua (Fuente: ALMA, 2005)

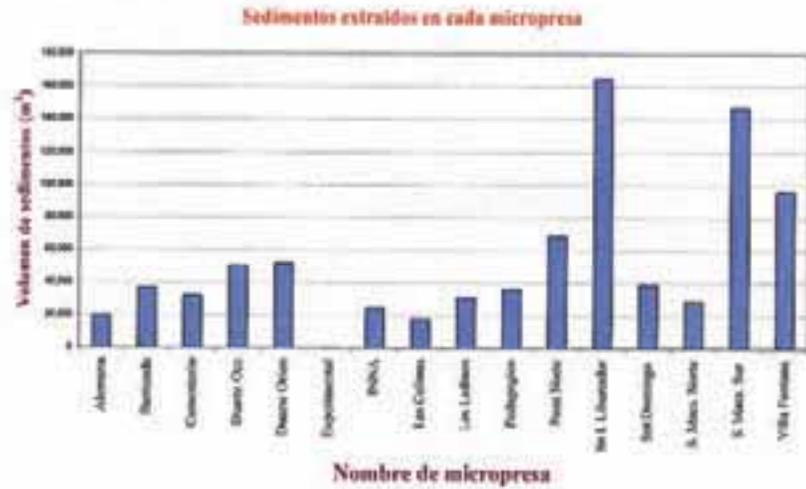


Figura 6.63. Volumen de sedimentos recolectados en la red de micro presas de la ciudad de Managua (Fuente: Sarria Duarte, *comunicación personal*, 2005).



Figura 6.64. Concentración de basura urbana en la micro presa Los Gauchos Tiscapa, inaugurada en 2005. Ciudad de Managua.

## Referencias

- BALLESTER, R. Y ÁLVAREZ, G. 2001. Problemática provocada por el ascenso de la napa freática en el municipio de Lomas de Zamora. Conurbano de la provincia de Buenos Aires. III° Jornadas de Saneamiento Pluvial Urbano. Ponencias. Municipalidad de Rosario. Disponible en CD.
- BANCO MUNDIAL 2000. Argentina, Gestión de los recursos hídricos. Elementos de política para su desarrollo sustentable en el siglo XXI. Volumen I-Informe Parcial. Informe N° 20729-AR.
- BARBEITO, O., AMBROSINO, S., BERTONI, J.C. Y PAOLI, C.U. ( 2004). Inundaciones Severas por Crecidas Extremas. Capítulo 9 in: Bertoni, J.C., Inundaciones Urbanas en Argentina, 2004, 270 p.
- BERTONI, J.C. (ORG.) (2004), Inundaciones Urbanas en Argentina. Ed. GWP-SAMTAC. ISBN 987-9406-76-1. 270 p.
- BERTONI, J.C., VATER, G. Y REDOLFI, E. (2004), Storm water Management in the Highway around network to access to Cordoba city, Argentina, Proceeding of Novatech, Lyon, France, 895-902.
- BERTONI, J.C., PEUSER, G. Y SIMES, E. (2005). Estudio Hidrológico-Hidráulico correspondiente a las Cuencas de Aporte y a los Canales de Drenaje. Avenida de Circunvalación de la Ciudad de Córdoba Arco Noreste. Informe a Caminos de las Sierras S.A. 96 p.
- BERTONI, J.C. CATALINI, C.G. (2005). Dispositivos de Regulación y Control del Drenaje Pluvial Urbano. Contrato de Servicios N° FORGAES 054-2005-SER. Informe a OPAMSS. 320 p.
- CAAMAÑO NELLI, G.; CATALINI, C.G (2002); Adaptación de técnicas para estimar lluvias de diseño de diseño a la predicción de crecientes en lagos y embalses, XIX Congreso Nacional del Agua. Artículo Completo: ISBN 987-20378-1-7, CD. Resumen: ISBN 987-20378-0-9, pp. 43-44. Comité Permanente de los Congresos del Agua. Villa Carlos Paz. Republica Argentina.
- CATALINI, C.G; Predicción de Ingresos de Agua al Embalse San Roque, Informe de Pasantia, Instituto Nacional del Agua, Centro de la Región Semiárida. Villa Carlos Paz, Argentina.
- CATALINI, C.G (2004) Predicción de Crecientes en Embalses de Córdoba, Informe de Beca Especial convocatoria 2002 Agencia Córdoba Ciencia, S.E.
- CRUZ, C. Y MOLINA L. (2004). Criterios para el drenaje de Aguas Lluvias. Segundo Curso Riesgos Urbanos: Drenajes de Aguas Lluvias e
- CRUZ, M., 2004; *Optimização do controle da drenagem urbana*. Tesis de Doctorado Instituto de Pesquisas Hidráulicas. UFRGS.
- ESTEVE, J. R. (2001). Planes generales de desagües pluviales de la ciudad de Córdoba. III° Jornadas de Saneamiento Pluvial Urbano. Ponencias. Municipalidad de Rosario. Disponible en CD.
- FALCZUK, B. (2001). Plan Director de Ordenamiento Hidráulico de la ciudad de Buenos Aires. III° Jornadas de Saneamiento Pluvial Urbano. Ponencias. Municipalidad de Rosario. Disponible en CD.
- FERREIRA, G. (2005), Descripción de la Crecida del Río Salado e Inundación de Santa Fe en 2003. XX Congreso Nacional del Agua, Mendoza, Argentina. Proceeding in Cd.
- GUGLIELMO, R. (1996). Les grandes métropoles du monde et leur crise, Ed.

- A.Colin, Paris, 268 p.
- IPH, 2001. *Plano Director de Drenagem Urbana de Porto Alegre*. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. DEP Departamento de Esgostos Pluviais Prefeitura Municipal de Porto Alegre. 5 volúmenes.
- JICA, 1995. *The master study on utilisation of water resources in Parana State in the Federation Republic of Brazil*. Pectoral Report vol. 11. Flood Control.
- MAZA, J. (2004). Inundaciones en los grandes centros urbanos, Capítulo 5 in: Bertoni, J.C., *Inundaciones Urbanas en Argentina, 2004*, 270 p.
- OPAMSS, (2005); Compendio de Informaciones sobre el AMSS, para ejecución de Contrato 054.2005-SER
- PDDURM, 2002. *Plano Director de Drenagem urbana da Região Metropolitana de Curitiba Volumen: medida não-estruturais*. SUDHERSA e CH2MHILL do Brasil Servicios de Engenharia Ltda..
- PAOLI, C.U. (2004). Inundaciones ribereñas en el tramo del Parana Medio. Cap. 4 in: Bertoni, J.C., *Inundaciones Urbanas en Argentina, 2004*, 270 p.
- PME, 1983. *Lei n. 1790. Prefeitura Municipal de Estrela 3p.*
- PME, 1981. *Lei n. 1707. Prefeitura Municipal de Estrela 10p.*
- REZENDE, B e TUCCI, C.E.M, 1979. *Análise hidráulica e hidrológica dos problemas de inundação urbana na cidade de Estrela*. RS. Relatório Técnico, p. 29
- SERRA, J.J., MALNERO, H., SAINZ TRÁPAGA, J. Y CHACHERO, M. (2002). Aspectos más relevantes de la problemática hídrica en el valle inferior del río chubut (UNPSJB, Trelew, Chubut). XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo; Puerto Madryn.
- SERRA, J.J. (2004). Urbanización e Inundaciones en Sistemas Hídricos del Centro de la Región Patagónica, Capítulo 6 in: Bertoni, J.C., *Inundaciones Urbanas en Argentina, 2004*, 270 p.
- SNET (2005). Informaciones colectadas para el desarrollo del contrato 054/2005-SER. Servicio Nacional de Estudios Territoriales (no publicado).
- SUDERSHA, 2002. *Medidas não-estruturais*. Plano Director de Drenagem Urbana da Região Metropolitana de Curitiba. CH2MHILL. Engenharia do Brasil Ltda..
- TOYA, M.; RAHMANNE, I. OLIVERA, S. Y BERTONI, J.C. (2003). Gestión de cuencos de retardo en el sistema de drenaje pluvial urbano de Córdoba. Poster. XIII Congreso Argentino de Saneamiento y Medio Ambiente. AIDIS. Bs. Aires. Argentina.
- TUCCI, C.E.M 1996. *Estudios Hidrológicos e Hidrodinámicos no rio Iguaçu na*. RMC. COMEC/PROSAM, 2 vols
- TUCCI, C.E.M; VILLANUEVA, A, 1997. *Controle de enchentes das cidades de união da Victória e Porto União*. CORPRERI, 117 p.
- TUCCI, C.E.M. Y BERTONI, J.C. (ORG.) (2004), *Inundações Urbanas na América do Sul*. Ed. GWP-SAMTAC, OMM, ABRH. ISBN:85-88686-07-4. 471 p.
- TUCCI, 2005. *Proposta do Plano Nacional de Águas Pluviais*. Ministerio das Cidades Brasília 120p.
- Inundaciones. San Salvador.
- WORLD BANK (1995). 1995 World Development Indicators, N.Y. USA.

## Conceptos y glosario

**A.1 Sistema de Drenaje:** Los sistemas de drenaje se clasifican: *en la fuente, microdrenaje y macrodrenaje*. El drenaje *en la fuente* es definido por el escurrimiento que ocurre en el lote, condominio o emprendimiento individual, estacionamientos, parques y paseos públicos.

El *microdrenaje* es definido por el sistema de conductos pluviales o canales a nivel del loteo (o lotificación) o de la red primaria urbana. Este tipo de sistema de drenaje es proyectado para atender al drenaje de precipitaciones con riesgo moderado.

El *macrodrenaje* involucra los sistemas colectores de diferentes sistemas de microdrenaje. El macrodrenaje involucra áreas de por lo menos 2 km<sup>2</sup> (o 200 hectáreas). Estos valores no deben ser tomados como absolutos porque la malla urbana puede poseer las más distintas configuraciones. Este tipo de sistema debe ser proyectado para acomodar las precipitaciones superiores a las del microdrenaje con riesgos de acuerdo con los perjuicios humanos y materiales potenciales.

Uno de los puntos que han caracterizado este tipo de definición ha sido la metodología de estimación, ya que el Método Racional es utilizado para estimación de caudales en el microdrenaje, y los modelos hidrológicos que determinan el hidrograma del escurrimiento son utilizados en el macrodrenaje. Las simplificaciones aceptadas para el dimensionamiento en el método Racional pueden ser utilizadas para cuencas del orden de 2 km<sup>2</sup>, que representa la restricción definida anteriormente.

**A.2 Escurrimiento y condiciones de proyecto:** El escurrimiento en un río depende de varios factores que pueden ser agregados en dos conjuntos:

**Control aguas abajo.** Los controles de aguas abajo que modifican el escurrimiento *aguas arriba* son condicionantes en la red de drenaje. Los controles de *aguas abajo* pueden ser

estrangulamientos del río debido a puentes, rellenos, cambio de sección, reservorios, océano, etc. Estos controles reducen el caudal de un río independientemente de la capacidad local de escurrimiento;

**Controle locales.** Definen la capacidad de cada sección del río de transportar una cantidad de agua. La capacidad local de escurrimiento depende del área de la sección, del ancho, del perímetro y de la rugosidad de las paredes. Cuanto mayor la capacidad de escurrimiento, menor el nivel de agua.

Para ejemplificar este proceso, se puede usar una analogía con el tráfico de una avenida. La capacidad de tráfico de autos de una avenida, en una determinada velocidad, depende de su ancho y del número de vías. Cuando el número de autos es superior a su capacidad, el tráfico se vuelve lento y ocurre congestión. En un río, a medida que llega un volumen de agua superior al caudal normal, el nivel sube e inunda las áreas ribereñas. Por lo tanto, el sistema está limitado en este caso a la capacidad local de transporte de agua (o de autos).

Considere, por ejemplo, el caso de una avenida ancha con dos vías para el mismo sentido, pero que existe un tramo en que las dos vías se transforman en apenas una. Existe un tramo de transición, antes de llegar al cambio de vía que reduce la velocidad de todos los autos, creando un congestionamiento, no por la capacidad de la avenida en aquel punto, sino por lo que ocurre en el tramo posterior. En este caso, la capacidad está limitada por la transición de vías (que ocurre *aguas abajo*) y no por la capacidad local de la avenida. De la misma manera, en un río, si existe un puente, relleno o otra obstrucción, el caudal de *aguas arriba* es reducido por la restricción de *aguas abajo* y no por su capacidad local. Con la reducción del caudal, ocurre un aumento de los niveles. Ese efecto es muchas veces denominado de *remanso*.

El tramo de transición, que sufre efecto de *aguas abajo* depende de factores que varían con el nivel, desnivel del escurrimiento y capacidad del escurrimiento a lo largo de todo el tramo.

El escurrimiento puede ser considerado en régimen permanente o no permanente. El escurrimiento permanente es utilizado para proyecto, generalmente con los caudales máximos previstos para un determinado sistema hidráulico. El régimen *no permanente*, permite conocer los niveles y caudales a lo largo del río y en el tiempo, representando la situación real. Generalmente, una obra hidráulica que depende apenas del caudal máximo es

dimensionada para condiciones de régimen permanente y verificada en régimen no permanente.

**A.3 Riesgo e incertidumbre:** El riesgo de un caudal o precipitación es entendido en este texto como la probabilidad ( $p$ ) de ocurrencia de un valor igual o superior en un año cualquier. El tiempo de retorno ( $T$ ) es el inverso de la probabilidad ( $p$ ) y representa el tiempo, *en media*, que este evento tiene chance de repetirse.

$$T = \frac{1}{p} \quad (\text{a.1})$$

Para ejemplificar, considere un *dado*, que tiene seis caras (números de 1 a 6). En una jugada cualquiera la probabilidad de salir el número 4 es  $p = 1/6$  (1 chance en seis posibilidades). El tiempo de retorno es, *en media*, el número de jugadas que el número deseado se repite. En ese caso, usando la ecuación a.1 queda  $T = 1 / (1/6) = 6$ . Por lo tanto, **en media**, el número 4 se repite a cada seis jugadas. Se sabe que este número no ocurre exactamente a cada seis jugadas, pero si se repite la jugada millares de veces y sacamos la media, ciertamente eso ocurrirá. Siendo así, el número 4 puede ocurrir dos veces seguidas y pasar muchas sin ocurrir, pero en media se repetirá en seis jugadas. Haciendo una analogía, cada jugada del *dado* es un año para las crecidas. El tiempo de retorno de 10 años significa que, en media, la crecida puede repetirse a cada 10 años o en cada año esta crecida tiene 10% de chance de ocurrir.

El riesgo o la probabilidad de ocurrencia de una precipitación o caudal igual o superior en un determinado período de  $n$  años es:

$$P_n = 1 - (1 - p)^n \quad (\text{a.2})$$

Por ejemplo, ¿qué chance hay de ocurrir una crecida de 10 años en los próximos 5 años? O sea, se desea conocer cual la probabilidad de ocurrencia para un período y no apenas para un año cualquiera. En este caso:

$$P_n = 1 - \left(1 - \frac{1}{10}\right)^5 = 0,41 \text{ o } 41\% \quad (\text{a.3})$$

La probabilidad o el tiempo de retorno es calculado con base en la serie histórica observada en el lugar. Para el cálculo de la probabilidad las series deben ser representativas y homogéneas en el tiempo. Cuando la serie es *representativa*, los datos existentes permiten calcular correctamente la probabilidad. Por ejemplo, el período de crecida entre 1970 y 1998 en el río Guaíba en Porto Alegre, Brasil, no es muy representativo, porque ocurrieron solamente crecidas pequeñas y fuera de este período ocurrieron varias mayores.

La serie es *homogénea*, cuando las alteraciones en la cuenca hidrográfica no producen cambios significativos en el comportamiento de la misma y, en consecuencia, en las estadísticas de los caudales del río.

En el proyecto de áreas urbanas, como ocurre alteraciones en la cuenca, *el riesgo utilizado se refiere a la ocurrencia de una determinada precipitación, que se admite que no es influenciada por la urbanización*. La combinación de la ocurrencia en la precipitación, su distribución temporal, condiciones antecedentes, etc., hacen con que el riesgo de precipitación no sea el mismo del riesgo del caudal resultante.

El riesgo adoptado para un proyecto define la relación entre las inversiones involucradas para reducir la frecuencia de las inundaciones y los perjuicios aceptados. Al adoptar un riesgo de 10% anualmente, o tiempo de retorno de 10 años, se acepta que en media podrán ocurrir eventos que produjeron perjuicios una vez a cada 10 años. El análisis adecuado involucra un estudio de evaluación económica y social de los impactos de las crecidas para la definición de los riesgos. Sin embargo, esta práctica es inviable debido al costo del propio estudio para pequeñas áreas. De esta manera, los riesgos usualmente adoptados son presentados en la tabla a.1.

El proyectista debe intentar analizar adicionalmente lo siguiente:

- Elegir el límite superior del intervalo de la tabla cuando involucren grandes riesgos de interrupción del tráfico, perjuicios materiales, potencial interferencia en obras de infraestructura como subestaciones eléctricas, abastecimiento de agua, almacenamiento de productos dañados cuando mezclados con agua y hospitales;
- Cuando exista riesgo de vida humana se debe intentar definir un programa de defensa civil y alerta y utilizar el límite de 100 años para el proyecto;
- Evaluar cuál será el impacto para eventos superiores al

del proyecto y, plantear un sistema de alerta y minimización de perjuicios.

La *incertidumbre* es la diferencia entre las estadísticas del muestreo y de la población de un conjunto de datos. Las incertidumbres están presentes en los errores de recolección de datos, en la definición de parámetros, en la caracterización de un sistema, en las simplificaciones de los modelos y en el procesamiento de estas informaciones para definición del proyecto de drenaje.

**A.4 Glosario: Sistema natural:** El sistema natural es formado por el conjunto de elementos físicos, químicos y biológicos que caracterizan el sistema natural de la cuenca hidrográfica y los recursos hídricos formado por los ríos, lagos y océanos.

*Ecosistemas* pueden ser vistos como factores de producción dinámicos para el desarrollo social y económico (Folke, 1997). Los ecosistemas producen los recursos renovables y sus mecanismos en el que la sociedad humana se basa. A nivel global el ecosistema es energizado por la radiación solar y sustentado por el ciclo hidrológico, y a nivel local por la biota que soporta la vida y el ambiente integrado (Falkenmarker, 2003).

Tabla A. 1. Tiempo de retorno para sistemas urbanos.

Sistema	Característica	Intervalo	Valor frecuente
Microdrenaje	Residencial	2 – 5	2
	Comercial	2 – 5	5
	Áreas de edificios públicos	2 – 5	5
	Aeropuerto	5 – 10	5
	Áreas comerciales y avenidas	5 – 10	10
Macrodrenaje		10 - 25	10
Zonificación de áreas ribereñas		5 - 100	100*

\* limite del área de reglamentación

**Conservación:** es entendida como la acción que minimiza la acción antrópica sobre el ecosistema;

**Preservación:** es entendida como la acción que evita cualquier acción antrópica sobre el ecosistema;

**Desarrollo sustentable:** es el desarrollo económico y social que

conserva y preserva los ecosistemas a lo largo del tiempo.

**Gerenciamiento integrado de los Recursos Hídricos:** es el proceso que promueve el desarrollo coordinado y el gerenciamiento del agua, tierra y recursos relacionados para maximizar el resultado económico y social de forma equitativa sin comprometer la sustentabilidad vital del ecosistema (GWP, 2000).

**Carga:** es el producto de la concentración de un parámetro de calidad del agua por el caudal y es más representativo que la concentración de un parámetro de calidad del agua. Una concentración puede ser alta con pequeño caudal y muy bajo con alto caudal.

**Disponibilidad hídrica:** es la disponibilidad de agua en un determinado lugar a lo largo del tiempo. La disponibilidad puede ser de agua superficial o subterránea.

**Regulación de caudal:** La disponibilidad hídrica puede ser natural, sin efecto de regulación y con regulación a partir de un reservorio. La regulación puede ser medida con base en una porción del caudal medio, debido que el caudal mayor, que puede ser regulado, es el caudal medio que representa el máximo caudal disponible. Dependiendo del clima y de las condiciones topográficas el caudal regulado puede variar entre 0,25 y 0,8 del caudal medio. Para climas húmedos en Brasil ha sido utilizado valores de 0,6 a 0,7 del caudal medio y para clima semiáridos de 0,20 a 0,40 (Silva y Tucci, 2002);

**Enfermedades vehiculadas por el agua:** Existen muchas enfermedades que se transmiten a través del agua. En Brasil 65% de las internaciones hospitalarias son provenientes de enfermedad de vehiculación hídrica. Las enfermedades transmitidas a través del agua pueden ser clasificadas basadas en el concepto de White *et al.* (1972) y presentado por Prost (1993):

- Enfermedades con fuente en el agua (water borne diseases): dependen del agua para su transmisión como el cólera, la salmonela, la leptospirosis, (desarrollada durante las inundaciones por la mezcla de la orina del ratón), diarrea, etc. El agua en este caso se transforma en el vehículo pasivo para el agente de infección;

- enfermedades debido a falta de higiene (water-washead diseases): dependen de la educación de la población y de la disponibilidad de agua segura. Estas enfermedades están relacionadas con infecciones de oído, piel y ojos;
- relacionado con el agua (water-related): en el cual el agente utiliza el agua como la malaria, esquistosomosis (el agente utiliza el agua para desarrollarse) y fiebre hemorrágica.

**Fuentes contaminantes:** fuentes difusas y puntuales. Las fuentes difusas, generalmente son de origen urbana (escurrimiento pluvial), agrícola (escurrimiento pluvial que transporta materia orgánica, sedimentos, agroquímicos, entre otros), producción agropecuaria difusa (granjas con aves y cerdos), mineración dispersa (uso de mercurio, mineración de carbón que deja el agua ácida, etc.); efluentes de cloacas en fosas; las fuentes puntuales tradicionales son los efluentes domésticos urbanos y rurales y efluentes industriales.

**Indicadores de calidad del agua:** los indicadores pueden ser índices que combinan concentración de determinados constituyentes del agua. Los índices intentan reflejar las condiciones del agua para diferentes usos en función del encuadramiento del río (definiciones cuanto al uso). Los indicadores también pueden ser la concentración de algunos parámetros de calidad del agua que reflejan las condiciones en función de las fuentes contaminantes. Por ejemplo, la concentración de coliformes (en partes por millón), generalmente es utilizada para caracterizar el agua en cuanto a la contaminación para los fines de abastecimiento de agua cuando la fuente es orgánica humana. El oxígeno disuelto (OD) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) son parámetros de calidad que permiten una visión de las condiciones del río para contaminación orgánica en general y en la vida acuática. La concentración de Nitrógeno y Fósforo son utilizadas para caracterizar si un sistema hídrico puede eutrofizar. La DQO es la Demanda Química de Oxígeno utilizada como indicador de contaminación de algunas industrias.

***Medidas de control de inundaciones:***

***estructurales:*** cuando el hombre altera el sistema natural para control de inundaciones como por ejemplo, diques, presas, reforestación, etc;

***no estructurales:*** cuando el hombre convive con la inundación a través de: seguro contra inundación, previsión y alerta de inundación, zonificación de las áreas de inundación, protección local y medidas legales asociadas.

***Metas del Millenium:*** Las Naciones Unidas han establecido como meta para el año 2015 la reducción en 50 % la pobreza en el mundo. En el contexto de Agua y Saneamiento estas metas establecen la reducción también en el 50 % de las personas que no poseen acceso al agua tratada y en la misma proporción para saneamiento de efluentes domésticos.

***Modificación climática:*** son las alteraciones de la variabilidad climática debido a las actividades humanas.

***Usos consuntivos del agua:*** son usos que reducen el volumen entre la retirada del sistema hídrico y su retorno. Generalmente son considerados como usos consuntivos: abastecimiento humano, animal, industrial e irrigación.

***Variabilidad climática:*** son las variaciones del clima en función de los condicionantes naturales del globo terrestre y sus interacciones. *Modificaciones Climáticas* son las alteraciones del clima en función de las acciones antrópicas. Por otro lado el IPCC (2001) define *Modificación Climática* (*Climate Change*) como los cambios de clima en el tiempo debido a variabilidad natural y/o resultado de las actividades humanas (acciones antrópicas).

***Vulnerabilidad a eventos extremos:*** es la incapacidad de la población de retornar a las condiciones previas de ocurrencia del evento en términos de habitación y condiciones socioeconómicas.

## Reglamentación de Porto Alegre - Brasil

**Legislación Federal y Provincial (o Departamental):** Las legislaciones que involucran el drenaje urbano y la inundación ribereña están relacionadas con: recursos hídricos, uso del suelo y licenciamiento ambiental.

**En relación a los Recursos Hídricos:** La Constitución Federal de Brasil define el dominio de los ríos; la Legislación Federal define los recursos hídricos a nivel federal y establece los principios básicos de la gestión a través de cuencas hidrográficas. La cuenca del río Guaíba, en la cual se inserta la ciudad de Porto Alegre, se encuentra dentro de un sistema hídrico de dominio del Estado.

La Constitución del Estado, artículo. 171, instituye el Sistema Provincial (Departamental) de Recursos Hídricos y, en su párrafo 1, caracteriza que el sistema debe desarrollar acciones para *“controlar las aguas superficiales y subterráneas”*: La ley provincial n° 10.350 del 30 de diciembre de 1994, reglamenta el Sistema Provincial de Recursos Hídricos. En su artículo 2; dentro de la política, uno de los objetivos es el de *“combatir los efectos adversos de crecidas y sequías y de la erosión del suelo”* e *“impedir la degradación y promover la mejoría de la calidad y el aumento de la capacidad de abastecimiento de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos...”*

El artículo 3° destaca que *“todas las utilizaciones de los recursos hídricos que afectan su disponibilidad cualitativa o cuantitativa, salvadas aquellas de carácter individual, para satisfacción de las necesidades básicas de la vida, que quedan sujetas a la previa aprobación del Estado”*.

La Legislación establece la descentralización del gerenciamiento a través del Comité de Cuenca como primera

medida para resolución de eventuales conflictos de usos de los recursos hídricos.

El artículo 29 caracteriza que *“dependerá del otorgamiento del uso del agua cualquier emprendimiento o actividad que altere las condiciones cuantitativas y cualitativas o ambas de las aguas superficiales o subterráneas, observado el Plan Provincial y los Planes de la Cuenca Hidrográfica”*. Dentro de este contexto el escurrimiento pluvial resultante de las ciudades debe ser objeto de otorgamiento o de control a ser previstos en los Planes referidos. Como estos procedimientos aún no están siendo cobrados por el Estado, no existe en el momento una presión directa para la reducción de los impactos resultantes de la urbanización.

La tendencia será que los Comités y el Estado, en áreas de su dominio, como el del Lago del río Guaíba próximo a Porto Alegre, establezcan patrones a ser perseguidos por los municipios con relación a la cantidad y calidad del agua.

**En relación al uso del suelo:** En la Constitución Federal (artículo 30), se define que el uso del suelo es municipal. Sin embargo, los Estados y la Unión pueden establecer normas para la disciplina del uso del suelo con el objetivo de proteger el medio ambiente, de controlar la contaminación, la salud pública y la seguridad. De esta manera, se observa que en el caso del drenaje urbano que involucra el medio ambiente y el control de la contaminación, la materia y competencia es concurrente entre el Municipio, el Estado Provincial y la Nación. La tendencia es que los municipios introduzcan directrices de macro zonificación urbana en los Planes Directores de Desarrollo Urbano, incentivados por las Provincias.

Sin embargo, se observa que la zonificación relativa al uso del suelo no ha contemplado los aspectos del drenaje y de las inundaciones en muchas ciudades del país.

Lo que ha sido observado son legislaciones fuertemente restrictivas en cuanto a la protección de manantiales y ocupación de áreas de reserva ambiental, sin que el municipio adquiera la propiedad y reciba impuestos de la misma. La legislación muy restrictiva sólo produce reacciones negativas y desobediencia. Por lo tanto, no favorece los objetivos de control del drenaje urbano. Esto ocurre en la forma de invasión de las áreas, loteos (lotificaciones) irregulares, entre otros.

**En relación a la licencia ambiental:** Esta licencia establece los límites para la construcción y operación de canales de drenaje, regulado por la ley 6938/81 y resolución CONAMA nº 237/97. De

la misma manera, la resolución CONAMA 1/86 artículo 2º, § VII establece la necesidad de la licencia ambiental para las “obras hidráulicas para drenaje”.

Recientemente, al referirse a los procedimientos para la licencia ambiental en la ciudad de Porto Alegre, fue acordado que ésta será de atribución del municipio, respetada la legislación existente, de esferas superiores o correlatos.

En cuanto al límite con otras ciudades, la ciudad de Porto Alegre posee una pequeña área en cuencas comunes con otros municipios. Las principales son: (a) el tramo de *aguas arriba* en la cuenca del Arroyo Diluvio, que queda dentro del municipio de Viamão, donde las acciones que ahí ocurren en la parcela de la referida ciudad puedan afectar la cuenca del Diluvio *aguas abajo*, en Porto Alegre; (b) una área contribuyente de la margen izquierda del Arroyo Feijó, que forma el límite de la ciudad de Porto Alegre con las ciudades de Alvorada y Viamão. En este caso, el ordenamiento y el control urbano de los dos lados del arroyo deben ser coherentes con la política de control del drenaje.

El control institucional del drenaje que involucre más de un municipio puede ser realizado: (a) a través de la legislación municipal adecuada para cada municipio; (b) o a través de legislación provincial que establezca los patrones a ser mantenidos en los municipios, de tal manera que no transfieran impactos; (c) el uso de los dos procedimientos anteriores. Probablemente, la última hipótesis deberá ocurrir a largo plazo, pero a corto plazo es más viable la primera opción, hasta que los Comités de Cuenca y los Planes Provinciales desarrollen la reglamentación sectorial. Por lo tanto, cuando sean desarrollados los Planes de las Cuencas que involucran más de un municipio, se debe buscar acordar acciones conjuntas con estos municipios para obtenerse la planificación de toda la cuenca.

## Plan Director de Desarrollo Urbano y Ambiental

A continuación son destacados los principales elementos de la legislación municipal, Plan Director de Desarrollo Urbano y Ambiental (PDDUA), ley nº 434 de 1999, relacionados con el drenaje urbano.

Valoración ambiental, principios y estrategias: El PDDUA de la ciudad de Porto Alegre destaca en sus principios básicos, artículo 1º § II, *la promoción de la calidad de vida y del ambiente, reduciendo las desigualdades y la exclusión social*. El propio Plan incorpora en el título, en los principios y en las

directrices la visión de la sustentabilidad ambiental (artículo 2°).

El artículo 13° define los objetivos ambientales de valoración ambiental del Plan, mientras que el artículo 15 define los elementos naturales del ambiente y el artículo 16 caracteriza el curso del agua por la masa líquida que cubre una superficie, siguiendo un curso o formando un bañado, cuya corriente puede ser perenne, intermitente o periódica.

La implementación de la estrategia ambiental (artículo 17°) será desarrollada, entre otros, a través *de la promoción de acciones de saneamiento, monitoreo de la contaminación y de optimización del consumo energético*. El drenaje urbano se inserta en el contexto del saneamiento ambiental. Aún dentro de la estrategia de calificación ambiental, algunos de los programas previstos en el artículo 18°, que de alguna manera se interrelacionan con este plan, son el Programa de Implantación y Mantenimiento de Áreas Verdes Urbanas (III), Programa de Gestión Ambiental (V), Programa de Prevención y Control de la Polución (VI). En el artículo 25° son definidas las estrategias de planificación de la ciudad donde se destacan el Programa de Sistemas de Informaciones y en el (IV) el Programa de Comunicación y Educación Ambiental, en el cual se insertan programas similares previstos en este plan.

Formulación de política, planes y programas: En artículo 39 son definidas las atribuciones del *Consejo Municipal de Desarrollo Ambiental* que objetiva formular las políticas, planes, programas y proyectos de desarrollo urbano, en el cual el Plan Director de Drenaje Urbano (PDDRU) es uno de los planes. Este consejo tiene representación municipal, provincial y nacional, de entidades gubernamentales, de entidades no gubernamentales y de las regiones de planeamiento de la ciudad.

El artículo 42 define que el planeamiento será elaborado a través del PPDUA (Plan de Desarrollo Urbano y Ambiental) y en el artículo 43 prevé la existencia de Planes Sectoriales o Intersectoriales.

*Instrumentos de regulación:* En los instrumentos de regulación son definidos los tipos de proyectos, los estudios necesarios de acuerdo con las características de los proyectos, dando énfasis a la adecuación ambiental y al control de la contaminación, del cual el drenaje es un componente importante.

Dentro de este contexto, el Estudio de Viabilidad Urbanística es solicitado para emprendimiento urbanos, buscando analizar el impacto sobre la infraestructura urbana donde se incluye el drenaje (Art. 63, párrafo 1).

El PDDUA prevé, en la legislación, algunos instrumentos importantes para el drenaje urbano de acuerdo con el encuadramiento de las áreas:

- *Áreas de poca ocupación*(Art. 65) donde están previstas medidas que controlan la contaminación de las aguas, no alteren la absorción del suelo y no tengan riesgos de inundación.
- *Áreas de contención de crecimiento urbano* (Art. 80) son áreas que pueden ser definidas en función de la densificación actual y su futuro agravamiento de restricciones por el aumento de las inundaciones o de los condicionantes de drenaje. La ciudad de Porto Alegre posee una extensa área ribereña donde los costos de drenaje son muy altos. Con la impermeabilización excesiva de estas áreas pueden surgir problemas significativos en el drenaje, con frecuentes inundaciones. El plan de cada cuenca puede permitir identificar estas áreas;
- *Áreas de revitalización* (Art. 81): representan áreas del patrimonio ambiental o relevantes para la ciudad que necesitan tratamiento especial. El artículo 83 define las áreas: Centro Histórico, Islas de Delta del Jacuí, Orla del Guaíba, Praia de Belas. Solo el Centro Histórico no está dentro del área de riesgo de inundación ribereña por la protección dada por el Muro de Mauá.
- *Áreas especiales de interés ambiental*: son áreas singulares que necesitan de tratamiento especial (Art. 85, Párrafo I).
- *Áreas de protección ambiental* (Art. 87), pueden ser de preservación permanente y conservación; poseen características propias y necesitan de zonificación específica.

Plan Regulador: El artículo 97 establece una de las principales bases para la reglamentación del drenaje urbano; éste establece que en las zonas identificadas como problemáticas deberán ser construidos reservorios de detención pluvial. En su párrafo único define que será de atribución del Ejecutivo la definición de los criterios a través de decreto.

El artículo 134 restringe el parcelamiento del suelo en terrenos sujetos a inundación, antes de la toma de acciones para asegurar el escurrimiento de las aguas y protección contra las crecidas e inundaciones, y en terrenos donde las condiciones

geológicas e hidrológicas no aconsejan edificaciones (Anexo 8.1). En el 3º párrafo, establece los condicionantes del espacio para el drenaje urbano como la faja “no edificable”, y, en el párrafo 6º, define que los nuevos emprendimiento deben mantener las condiciones hidrológicas originales de la cuenca, a través de la amortiguación del caudal pluvial.

El artículo 137 reserva áreas para los equipamientos urbanos, entre los cuales se encuentra el drenaje urbano.

El artículo 160 de las disposiciones transitorias destaca la necesidad de decreto del legislativo para la definición y dimensionamiento de los reservorios de aguas pluviales.

Uno de los aspectos relacionados con la protección ambiental y el drenaje urbano se refiere a la faja marginal de los arroyos urbanos. El Código Forestal prevé la distancia de 30 m desde la margen de los arroyos, definida por la sección del lecho menor. En el desarrollo de la ciudad no se observa que este límite ha sido atendido, lo que dificulta el control de la infraestructura del drenaje urbano. En este sentido, se observa la necesidad de medidas para actuar sobre la ciudad ya desarrollada con parcelamiento aprobado y el cobro sobre los futuros parcelamientos de la ciudad.

## Reglamentación propuesta

Los principios de la reglamentación propuesta se basan en el control en la fuente del escurrimiento pluvial a través del uso de dispositivos que amortigüen el escurrimiento de las áreas impermeabilizadas y/o recuperen la capacidad de infiltración a través de dispositivos permeables o por el drenaje en áreas de infiltración.

Considerando la legislación municipal que instituye el PDDUA, analizada en el ítem anterior, la propuesta del decreto aquí presentada reglamenta el artículo 97º como previsto en el párrafo único y el artículo 160 de las disposiciones transitorias. Además de esto, se debe destacar que en el artículo 134, párrafo 6 del parcelamiento de suelo, la ley también prevé estas mismas condiciones para nuevos emprendimientos.

A continuación se presenta la propuesta del decreto municipal para ser evaluada por el Ejecutivo, que sugiere la reglamentación de los artículos 97 y 134 del Plan de Desarrollo Urbano y Ambiental.

Esta propuesta se base en la estandarización de elementos básicos para la reglamentación, que son:

- Caudal máximo de salida a ser mantenido en todos los desarrollos urbanos como es el caso de nuevas edificaciones o parcelamientos;
- Volumen de detención necesario para el mantenimiento del caudal máximo citado en el ítem anterior;
- Espacio para el empleo de pavimentos permeables y otras medidas de control en la fuente del drenaje urbano por los emprendedores;
- Faja de dominio y condicionantes para nuevos parcelamientos.

## Decreto propuesto

### DECRETO N °

Reglamenta el control del drenaje urbano.

El Intendente Municipal de Porto Alegre, en el uso de sus atribuciones legales y teniendo en cuenta los Art. 97 y Art. 135 § 6° de la Ley Complementar 434/99 y considerando que:

- compete al poder público prevenir el aumento de las inundaciones debido a la impermeabilización del suelo y a la canalización de los arroyos naturales;
- el impacto resultante de la impermeabilización produce un aumento de la frecuencia de inundaciones y el aumento del transporte de material sólido, que degrada el ambiente urbano y disminuye la calidad del agua;
- • debe ser responsabilidad de cada emprendedor el mantenimiento de las condiciones previas de inundación en los arroyos de la ciudad, evitándose la transferencia para el resto de la población de la carga de la compatibilización del drenaje urbano;
- • la preservación de la capacidad de infiltración de las cuencas urbanas es prioridad para la conservación ambiental de los arroyos y ríos que componen el macrodrenaje y de los ríos receptores del escurrimiento de la ciudad de Porto Alegre,

Declara que:

Art. 1° Toda ocupación que resulte en superficie impermeable,

deberá poseer un caudal máximo específico de salida para la red pública menor o igual a 20,8 l/(s.ha).

§ 1ª El caudal máximo de salida es calculado multiplicándose el caudal específico por el área total del terreno.

§ 2º Serán consideradas áreas impermeables todas las superficies que no permitan la infiltración del agua hacia el subsuelo.

§ 3º El agua precipitada sobre el terreno no puede ser drenada directamente hacia las calles, cordón cuneta y/o redes de drenaje, exceptuándose el previsto en el § 4º de este artículo.

§ 4º Las áreas de retiro de la línea municipal, mantenidas como áreas verdes, podrán ser drenadas directamente hacia el sistema de drenaje.

§ 5º Para terrenos con área inferior a 600 m<sup>2</sup> y para habitaciones unifamiliares, la limitación de caudal referido en el inicio de este artículo podrá ser desconsiderada, a criterio del Departamento de Desagües Pluviales.

Art. 2º Todo parcelamiento del suelo deberá prever en su implantación el límite del caudal máximo específico dispuesto en el Art. 1º.

Art. 3º La comprobación del mantenimiento de las condiciones de ocupación previa en el lote o en el parcelamiento del suelo debe ser presentada al DEP- (Departamento de Esgotos Pluviales<sup>4</sup>).

§ 1º Para terrenos con área inferior a 100 (cien) hectáreas cuando el control adoptado por el emprendedor sea el reservorio, el volumen necesario del reservorio debe ser determinado a través de la ecuación:

$$v = 4,25 \cdot AI$$

donde v es el volumen por unidad de área de terreno, en m<sup>3</sup>/ha, y AI es el área impermeable del terreno, en %.

§ 2º El volumen de reservación necesario para áreas superiores a 100 (cien) hectáreas debe ser determinado

---

<sup>4</sup> N.de T: Departamento de Desagües Pluviales de la Municipalidad de Porto Alegre

a través de estudio hidrológico específico, con precipitación de proyecto con probabilidad de ocurrencia del 10% en cualquier año (Tiempo de retorno = 10(diez) años).

§ 3º Podrá ser reducida la cantidad del área a ser computada en el cálculo referido en el §1º caso sean aplicadas las siguientes acciones:

- Aplicación de pavimentos permeables (bloques perforados con relleno de arena o césped, asfalto poroso, concreto poroso) para reducir en un 50% el área que utiliza estos pavimentos;
- Desconexión de las canaletas del tejado para superficies permeables con drenaje reducir en un 40% el área del tejado drenado;
- Desconexión de las canaletas de tejado para superficies permeables sin drenaje reducir en un 80% el área del tejado drenado;
- Aplicación de trincheras de infiltración reducir en un 80% las áreas drenadas para las trincheras.

§ 4º La aplicación de las estructuras listadas en el § 3º estará sujeta a la autorización del DEP, después de la debida evaluación de las condiciones mínimas de infiltración del suelo en el lugar de implantación del emprendimiento, a ser declaradas y comprobadas por el interesado.

§ 5º Las reglas de dimensionamiento y construcción para las estructuras listadas en el § 3º como también para los reservorios deberán ser obtenidas en el Manual de Drenaje Urbano del Plan Director de Drenaje Urbano de Porto Alegre.

Art. 4º Después de la aprobación del proyecto de drenaje pluvial de la edificación o del parcelamiento por parte del DEP, es vedada cualquier impermeabilización adicional de superficie.

Párrafo Único: La impermeabilización podrá ser realizada en el caso que haya retención del volumen adicional generado de acuerdo con la ecuación del Art.3º §1º.

Art. 5º Los casos omitidos en el presente decreto deberán ser objeto de análisis técnico por parte del DEP.

Art. 6º Este decreto entrará en vigor en la fecha de su publicación, revocadas las disposiciones en contrario.

MUNICIPALIDAD DE PORTO ALEGRE





# Rateo de costo del drenaje urbano para áreas no-controladas

## C.1 Costo de Mantenimiento

El costo unitario uniforme sería

$$C_u = \frac{C_t}{A_b} (\$/m^2) \quad (c.1)$$

donde  $A_b$  es el área de la cuenca en  $km^2$  y  $CT$ , costo total en \$ millones,  $A_b$  el área de la cuenca que puede ser subdividida en:

$$100 = A_p + A_i \quad (c.2)$$

siendo  $A_p$  la parcela de áreas permeables (%) y  $A_i$  la parcela de áreas impermeables (%).

En un área urbana las áreas impermeables pueden ser desdobladas en la expresión:

$$A_i = \alpha i_m + \beta i_l \quad (c.3)$$

donde  $\alpha$  es la parcela del área con calles y direcciones públicas, como parques y plazas;  $i_m$ , es la parcela impermeable de esta área (%),  $\beta$  es la parcela del área ocupada por los lotes urbanos;  $i_l$  es la parcela de impermeabilización del lote. En este caso se tiene que  $\alpha + \beta = 1$ .

La ecuación anterior queda:

$$A_i = \alpha i_m + (1 - \alpha) i_l \quad (c.4)$$

El valor de  $\alpha$  usualmente varía de 0,25 a 0,35 del área loteada. Considerando el valor de  $\alpha = 0,25$  y distribuyendo 15% para calles y 10% para plazas y, a su vez, como las calles poseen el 100% de áreas impermeables y las plazas próximas de cero, resulta

$$i_m = (0,15 \times 100 + 0 \times 0,10) / 0,25 = 60\% \quad (c.5)$$

La ecuación 4 queda:

$$A_i = 15 + 0,75 \cdot i_l \quad (c.6)$$

El principio de la tasa de cobro de la operación y mantenimiento del drenaje urbano es el de la proporcionalidad con relación al volumen de escurrimiento superficial generado. Considerando que las áreas impermeables poseen un coeficiente de escurrimiento de 0,95 y las áreas permeables de 0,15 ( $C_p=0,15$  e  $C_i = 0,95$ ), el volumen generado por las áreas impermeables es de 6,33 superior al de las áreas permeables. De esta manera el costo unitario de un área permeable es:

$$Cu_p = \frac{0,15}{0,95} Cu_i = 0,158 \cdot Cu_i \quad (c.7)$$

donde  $Cu_i$  es el costo unitario de las áreas impermeables. El costo total de la operación y mantenimiento es igual:

$$Ct = \frac{A_b}{100} (Cu_p \cdot A_p + Cu_i \cdot A_i) \quad (c.8)$$

Utilizando las ecuaciones 2 y 7 en la ecuación 9, resulta:

$$Ct = \frac{A_b \cdot Cu_i}{100} (15,8 + 0,842 \cdot A_i) \quad (c.9)$$

El costo unitario de las áreas impermeables queda:

$$Cu_i = \frac{100 \cdot Ct}{A_b \cdot (15,8 + 0,842 \cdot A_i)} \quad (c.10)$$

donde  $Cu$  está expresado en  $\$/m^2$ ,  $Ct$  en millones y  $A_b$  en  $km^2$ .

Conocidos los valores de  $C_t$ ,  $A_b$  y  $A_i$  de la cuenca total, el valor de  $Cu_i$  es fijado para la cuenca o para el área total en cuestión.

El cálculo del costo a ser pago por una propiedad de área  $A$ , en  $m^2$ , resulta:

$$Tx = \frac{A}{100} (Cu_i \cdot A_i + Cu_p \cdot A_p) \quad (c.11)$$

y

$$Tx = \frac{A}{100} [Cu_i A_i + 0,158 \cdot Cu_i \cdot (100 - A_i)] \quad (c.12)$$

$$Tx = \frac{A \cdot Cu_i}{100} (15,8 + 0,842 \cdot A_i) \quad (c.13)$$

donde  $A_i$  es el área impermeable de la propiedad, en %. La expresión de  $A_i$  puede ser obtenida a través de la ecuación 5 y, sustituyendo en la ecuación 12 resulta:

$$Tx = \frac{A \cdot Cu_i}{100} (28,43 + 0,632 \cdot i_i) \quad (c.13)$$

Para verificar la coherencia de esta ecuación, considere una cuenca donde el área impermeable total es de 40%. Para que el área total de la cuenca tenga 40 % de áreas impermeables, el área impermeable de los lotes será (según la ecuación 5)  $i_i = 33,33$  %, y considerando  $A = A_b$ , utilizando las ecuaciones 11 y 12, se debe obtener  $T_x = C_t$ .

Para ejemplificar, considere el costo de \$ 1.400,00/ha, en una cuenca de 40 % de área impermeable, el costo de mantenimiento de un lote de 300  $m^2$  es obtenido utilizando inicialmente la ecuación 9:

$$Cu_i = \frac{100 \times 0,14}{1 \times (15,8 + 0,842 \times 40)} = \$0,283/m^2 \quad (c.14)$$

$$Cu_p = 0,283/6,33 = \$0,045/m^2 \quad (c.15)$$

y la ecuación 12, resulta

$$T_x = \frac{300 \cdot 0,283}{100} (28,43 + 0,632 \cdot i_1) = 24,137 + 0,545 \cdot \quad (c.16)$$

Tabla C. 1. ejemplo del rateo de costo basado en el área impermeable del lote.

Área impermeable %	Tasa anual para un terreno de 300 m <sup>2</sup> \$
5	26,86
10	29,59
20	35,04
30	40,49
40	45,94
50	51,39
60	56,84
70	62,29
80	67,74

### Rateo de costos para implementación de las obras del Plan de Drenaje

En este caso, el rateo de costos es distribuido sólo para las áreas impermeabilizadas, que aumentaron el caudal por encima de las condiciones naturales. En este caso, la ecuación 1 queda:

$$Cup_i = \frac{Ctp \cdot 100}{A_b \cdot A_i} \quad (c.17)$$

donde Ctp es el costo total de implementación del Plan y A<sub>i</sub> es la distribución de las áreas impermeables en cada área, dada por la ecuación 5.

La tasa a ser cobrada para cada área del lote urbanizado de i<sub>1</sub> % es obtenida a través de la expresión:

$$T_{xp} = \frac{A_i \cdot Cup_i \cdot A}{100} \quad (c.18)$$

lo que resulta, según la ecuación 5:

$$T_{xp} = (15 + 0,75 \cdot i_1) \frac{Cup_i \cdot A}{100} \quad (c.19)$$

Substituyendo la ecuación 14 resulta:

$$T_{xp} = \frac{A \cdot C_{tp} \cdot (15 + 0,75 \cdot i_i)}{A_b \cdot A_i} \quad (c.20)$$

donde, como anteriormente,  $A_i$  es el área impermeable de toda la cuenca en %;  $A$  es el área del terreno en  $m^2$ ;  $A_b$  es el área de la cuenca en  $km^2$ ;  $C_{tp}$  es el costo total en \$ millones;  $i_i$  es el área impermeable del lote en %.

Para un lote sin área impermeable, la contribución tarifaria del propietario se refiere a la parcela común de las calles y resulta:

$$T_{xp} = \frac{15 \cdot A \cdot C_{tp}}{A_b \cdot A_i} \quad (c.21)$$

Considere una cuenca que necesita \$ 3 millones de inversiones para el Plan Director. El área impermeable es de 40% y el área de la cuenca de 5  $km^2$ . La tasa a ser paga para un terreno de 300  $m^2$  para implantación de las medidas en la cuenca es obtenida por:

$$T_{xp} = \frac{300 \cdot 3 \cdot (15 + 0,75 \cdot i_i)}{5 \cdot 40} = 67,5 + 3,375 \cdot i_i \quad (c.22)$$

En la Tabla C.2 son presentados los valores de acuerdo con el área impermeable del lote.

Tabla C. 2. Tasa para la implementación del Plan Director de la cuenca para un lote de 300  $m^2$ .

Área Impermeable [%]	Tx [\$]
0	67,50
10	101,25
20	135,00
30	168,75
40	202,50
50	236,25
60	270,00
70	303,75
80	337,50



## Elementos para la reglamentación de Porto Alegre

En la reglamentación para el desarrollo urbano es necesario establecer criterios básicos de cálculo, de forma de tornar más simple la definición de medidas legales y el dimensionamiento del control debido a la impermeabilización. Algunos de los elementos básicos de reglamentación son:

- Caudal específico de predesarrollo;
- Volumen específico necesario para el control de una determinada área.

### Caudal de predesarrollo

El caudal de predesarrollo corresponde a condiciones más próximas a la situación natural. En principio, este caudal debe ser mantenido después del desarrollo. Para la reglamentación de este caudal es necesario establecer criterios simples que sean aplicables de manera general en la ciudad, sin perjuicio de su control. El caudal puede ser obtenido a través del Método Racional por la expresión:

$$Q = 0,278 \cdot C \cdot I \cdot A \quad (d.1)$$

donde Q es el caudal máximo en m<sup>3</sup>/s, I es la intensidad de la precipitación en mm y A es el área de la cuenca en km<sup>2</sup>. Esta ecuación puede ser expresada para el caudal específico natural en:

$$q_n = \frac{Q}{A} = 2,78 \cdot C \cdot I \quad (d.2)$$

donde  $q_n$  es obtenido en l/(s.ha).

Esta ecuación depende de C, coeficiente de escurrimiento e I, intensidad de la precipitación en mm /h.

**Coeficiente de escurrimiento:** El coeficiente de escurrimiento de una cuenca de superficies variables puede ser estimado por la ponderación del coeficiente de diferentes superficies. Considerando una cuenca urbana donde pueden existir dos tipos de superficies: permeable e impermeable, por lo tanto es posible establecer que:

$$C = \frac{C_p A_p + C_i A_i}{A_t} \quad (d.3)$$

donde  $C_p$  es el coeficiente de escurrimiento del área permeable de la cuenca;  $A_p$  es el área de la cuenca con superficie permeable;  $C_i$  es el coeficiente de escurrimiento de un área impermeable;  $A$  es la parcela de la cuenca con área impermeable. Esta ecuación puede ser transformada de acuerdo con lo siguiente:

$$C = \frac{C_p A_p}{A_t} + \frac{C_i A_i}{A_t} = C_p + (C_i - C_p) \cdot AI \quad (d.4)$$

donde  $AI = A_i/A_t$ , representa la parcela de áreas impermeables.

**Coeficiente medio:** El coeficiente de escurrimiento puede ser expresado por una relación lineal con la tasa de áreas impermeables, donde los subíndices representan los valores de las áreas permeables e impermeables. La influencia de AI depende de la diferencia entre los coeficientes, como se puede observar en el segundo término de la ecuación (4).

Con base en 44 pequeñas cuencas urbanas americanas Schueler (1987) obtuvo la relación:

$$C = 0,05 + 0,9 \cdot AI \quad (d.5)$$

Esta ecuación fue obtenida con  $R^2 = 0,71$ . Urbonas *et al.* (1990) utilizaron datos de 60 cuencas urbanas de los Estados Unidos y obtuvieron:

$$C = 0,858 \cdot AI^3 - 0,78 \cdot AI^2 + 0,774 \cdot AI + 0,04 \quad (d.6)$$

Como los datos utilizados se refieren a 2 años de datos para las dos ecuaciones anteriores, probablemente el coeficiente se refiere a una precipitación con riesgo del mismo orden (Urbonas e Roesner, 1992).

En este caso, para la ecuación (5):  $C_i - C_p = 0,9$ ,  $C_p = 0,05$ ,  $C_i = 0,95$ . El resultado del ajuste muestra que el coeficiente de áreas impermeables es de 0,95, debido a una pérdida de 5%, que puede ser debido a: imprecisión de la estimación de las áreas impermeables; infiltración de las juntas de la superficie; evaporación de superficies calientes. En la ecuación (6):  $C = 0,04$ .

En Brasil no existe un muestreo de este tamaño de cuencas urbanas, pero con la muestra disponible, Tucci (2000) presentó la siguiente ecuación:

$$C = 0,047 + 0,9 \cdot AI \quad (d.7)$$

Los datos utilizados fueron de 11 cuencas seleccionadas ( $R^2 = 0,92$ ) según los siguientes criterios:

- Cuencas con por lo menos cinco eventos;
- valores consistentes de áreas impermeables;
- valores consistentes con relación a los eventos hidrológicos.

Considerando que  $Q$  representa el coeficiente de escurrimiento de una parcela urbanizada, el valor de 0,95 obtenido retrata principalmente superficies de asfalto y concreto donde el valor es próximo del límite superior.

Adicionalmente se debe considerar que el propio coeficiente de escurrimiento no es un valor fijo que puede variar con la magnitud de las crecidas (Urbonas e Roesner, 1992), las condiciones iniciales, las características de la distribución de la precipitación y el tipo de suelo, entre otros. En una cuenca rural el valor del coeficiente de escurrimiento no es siempre el correspondiente a  $C_p = 0,047$ , sino que varía de acuerdo con condicionantes físicos. Estas ecuaciones permiten una estimación media de este valor.

***Coficiente basado en el SCS:*** El valor de  $C_p$  en la ecuación (3) representa el coeficiente de escurrimiento de una superficie permeable que puede ser estimada con base a ecuación del SCS (SCS, 1975):

$$C_p = \left[ \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \right] \cdot \frac{1}{P} \quad (d.8)$$

donde P es la precipitación total del evento en mm; S es el almacenamiento, que está relacionado con el parámetro que caracteriza la superficie (CN) por:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (d.9)$$

El valor del CN depende del tipo de suelo y características de la superficie. La precipitación total del evento para el método racional es:

$$P = I \cdot t_c \quad (d.10)$$

donde I es la intensidad en mm/h y  $t_c$  el tiempo de concentración en horas. En la tabla I son presentados algunos valores de S para algunas superficies, obtenidos con base en el CN de las tablas de SCS (1975). En esta misma tabla son presentados valores de  $C_o$  para precipitación de 1 h y 2 años de tiempo de retorno de Porto Alegre (riesgo aproximado de los valores medios obtenidos de los eventos de la tabla 1). Estos valores están en la vecindad del valor ajustado de  $C_p$ . La cuenca del arroyo Diluvio (Porto Alegre), posee gran parte de las cuencas analizadas con predominancia de suelos A, B y C, mientras que los puestos con características rurales están en suelos del tipo A y B, con predominancia para suelo del tipo A.

Debido a la gran variabilidad de este coeficiente y la necesidad de definir un valor padrón único, se utilizó el coeficiente de escurrimiento  $C = 0,10$ , que representa un valor intermedio entre los suelos A y B, que predominan en gran parte de la ciudad.

**Intensidad de la precipitación:** La intensidad de la precipitación es estimada de acuerdo con la duración o el tiempo de concentración de la cuenca y del tiempo de retorno. Cuanto menor el tiempo de concentración, mayor la intensidad y mayor será el caudal específico medio a ser adoptado. De la misma manera, cuanto mayor el tiempo de retorno, mayor será el caudal específico natural. Valores altos de caudal específico natural

implican en un menor volumen de control para cada lugar.

Si se considera la curva de Intensidad-Duración-Frecuencia del puesto de la Redenção (región central de Porto Alegre), que a pesar de haber sido eliminado posee una serie más extensa y representa un área más central de la ciudad, y se analiza la intensidad para 1 hora, para diferentes riesgos, la ecuación de escurrimiento en función del tiempo de retorno resulta:

$$q = 8,35 \cdot T^{0,217} \quad (d.11)$$

Tabla D. 1. Valores de S y  $C_n$ .

Tipo de suelo	Campo	Calles de tierra	Área agrícola
A			
S (mm)	19,8	52,9-79,5	31,1 - 19,8
$C_D$	0,032	0	0-0,03
B			
S (mm)	11,2	22,8-32,5	11,91-20,7
$C_D$	0,158	0-0,015	0,025-0,14
C			
S (mm)	7,6	13,5-17,8	6,9-14,3
$C_D$	0,277	0,049-0,108	0,094-0,31
D			
S (mm)	6,3	9,7-12,7	5,0-11,9
$C_D$	0,34	0,12 - 0,20	0,14-0,42

Tabla D. 2. Valores de  $C_p$  con  $R^2 = 0,999$ .

Fuente	$C_p$
Césped (suelo arenoso) ASCE, 1969	0,05 – 0,20
Césped (suelo pesado) ASCE, 1969	0,13 – 0,35
Bosques, parques y campos de deporte, Wilken, 1978	0,05 – 0,20
Ecuación Schueller (USA, 44 cuencas)	0,05
Ecuación Urbonas et al (1990) (USA, 60 cuencas)	0,04
Ecuación Tucci (Brasil, 11 cuencas)	0,047
Usando Soil Conservation Service	0,025 – 0,31

En este caso, utilizando el tiempo de retorno de 10 años, el valor recomendado es de 13,9 l/(s.ha). Para ejemplificar, el valor medio utilizado en la ciudad de Seattle (USA) es de 14 l/(s.ha). El valor específico para 10 años en Denver, USA es de  $q_{10}=16,7$  l/s.ha.

Tabla D. 3. Valores de caudal específico de predesarrollo

Tiempo de retorno Años	Caudal l/s.ha
2	9,62
5	11,9
10	13,9
25	16,9
50	19,5
100	22,5

## Volumen de control

El volumen de control para pequeñas áreas urbanas (< 2 km<sup>2</sup>) puede ser estimado con base en la ecuación:

$$V = (Q_u - Q_n) \cdot t \cdot k \quad (d.12)$$

donde V es el volumen en m<sup>3</sup>; Q, es el caudal de predesarrollo en m<sup>3</sup>/s; Q<sub>u</sub> es el caudal resultante del desarrollo urbano; t es la duración en minutos y k = 60 para conversión de unidades.

El caudal debido al desarrollo urbano es estimado por la ecuación (1). El caudal de predesarrollo fue estimado en el ítem anterior a través de su caudal específico. Sin embargo, transformando la ecuación 10 en volumen específico, o sea, volumen por unidad de área, resulta:

$$\frac{V}{A} = (0,278 \cdot C \cdot I - q_n) \cdot 60 \cdot t \quad (d.13)$$

El coeficiente de escurrimiento puede ser estimado de acuerdo con las áreas impermeables con C<sub>p</sub>=0,10 e Q=0,95, lo cual resulta en la expresión:

$$C = 0,10 + 0,95 \cdot AI \quad (d.14)$$

La intensidad de la precipitación puede ser representada por la ecuación:

$$I = \frac{a}{(t + b)^d} \quad (d.15)$$

Sustituyendo en la ecuación del volumen específico resulta:

$$v = \left( \frac{0,278 \cdot C \cdot a}{(t + b)^d} - q_n \right) \cdot 60 \cdot t \quad (d.16)$$

El volumen máximo es obtenido para duración a través de la ecuación:

$$t = \left( \frac{q_n \cdot (t + 0,278 \cdot C \cdot a)}{0,278 \cdot C \cdot a(1-d)} \right)^{\frac{1}{(d+1)}} - b \quad (d.17)$$

Utilizando los datos de precipitación de Porto Alegre (Posto Redenção) se obtuvo los volúmenes para tiempos de retorno variando de 2 a 100 años y áreas impermeables variando de 5 a 100 %. En la tabla D.4 son presentados los resultados. Estos valores fueron ajustados a una ecuación con la siguiente expresión:

$$v = 2,624 \cdot T^{0,269} \cdot AI \quad (d.18)$$

donde T es dado en años; AI es el área impermeable en % y v es obtenido en m<sup>3</sup>/ha. El coeficiente de determinación del ajuste fue de R<sup>2</sup>=0,99.

Para cada tiempo de retorno fueron también ajustadas ecuaciones específicas, que representan mejor los resultados. En la tabla D.5 son presentados los coeficientes de la recta y el R<sup>2</sup> de ajuste. En este caso, la recta resultante para el tiempo de retorno de 10 años es:

$$v = 4,864 \cdot AI \quad (d.19)$$

Tabla D. 4. Volumen específico en m<sup>3</sup>/ha

Área impermeable %	Tiempo de retorno					
	2	5	10	25	50	100
5	21,82	25,83	29,25	34,45	38,89	31,52
10	33,52	40,25	46,11	55,13	62,97	43,67
20	59,66	72,95	84,77	103,32	119,82	69,47
30	88,35	109,35	128,29	158,42	185,64	97,46
40	118,91	148,51	175,51	218,93	258,63	127,6
50	150,94	189,91	225,77	283,98	337,72	159,75
60	184,18	233,18	278,62	352,96	422,17	193,86
70	218,45	278,09	333,76	425,45	511,46	229,84
80	253,63	324,44	390,94	501,12	605,16	267,55
90	289,62	372,10	449,97	579,72	702,96	306,95
100	326,34	420,95	510,71	661,04	804,58	347,96

En este caso, el volumen necesario para recuperar el caudal preexistente para un área de 1000 m<sup>2</sup> con 50 % del área impermeable es:

$$V = (1000/10000) \cdot 4,864 \cdot 50 = 24,32\text{m}^3 \quad (\text{d.20})$$

Para una profundidad de 2 m, corresponde a 12,32 m<sup>2</sup> el 1,23% del área total.

Tabla D. 5. Coeficiente de la recta de ajuste del volumen específico para cada tiempo de retorno

Tiempo de retorno años	a	R2
2	3,1648	0,9966
5	4,0416	0,9945
10	4,8640	0,9922
25	6,2252	0,9884
50	7,5090	0,985
100	9,0490	0,981

$v = a \text{ AI}$ ; donde  $v$  es el volumen específico en m<sup>3</sup> y AI en %.