



*Tendencias en el tratamiento
Integral de Aguas Residuales*

Congreso Internacional Ambiental Manizales

*“Tendencias en el tratamiento integral
de aguas residuales”*

Manizales, septiembre 18 - 21 de 2017



Instituto de Estudios Ambientales IDEA
Sede Manizales



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA



Universidad[®]
Católica
de Manizales



Vertidos en tiempo de lluvia: reducciones de carga contaminante

Manuel Gómez Valentín

Flumen – Universitat Politècnica de Catalunya

08034 BARCELONA – España
manuel.gomez@upc.edu



Introducción

Problemas de calidad de los medios receptores, ríos, costas, lagos...

- ❑ Vertidos en tiempo seco
- ❑ Vertidos en tiempo de lluvia



Vertidos en tiempo seco

Evitar el vertido al río de cargas contaminantes sin depurar.

Necesidad de construir depuradoras

Pero eso no elimina el 100% de problemas



Precipitaciones en medio urbano

Efectos directos de las lluvias en zona urbana

Problemas de cantidad
(Inundación)

Problemas de calidad en los
medios receptores



Problemas de inundación

Primer objetivo:
evitar la
acumulación de
agua en la
superficie de la
ciudad



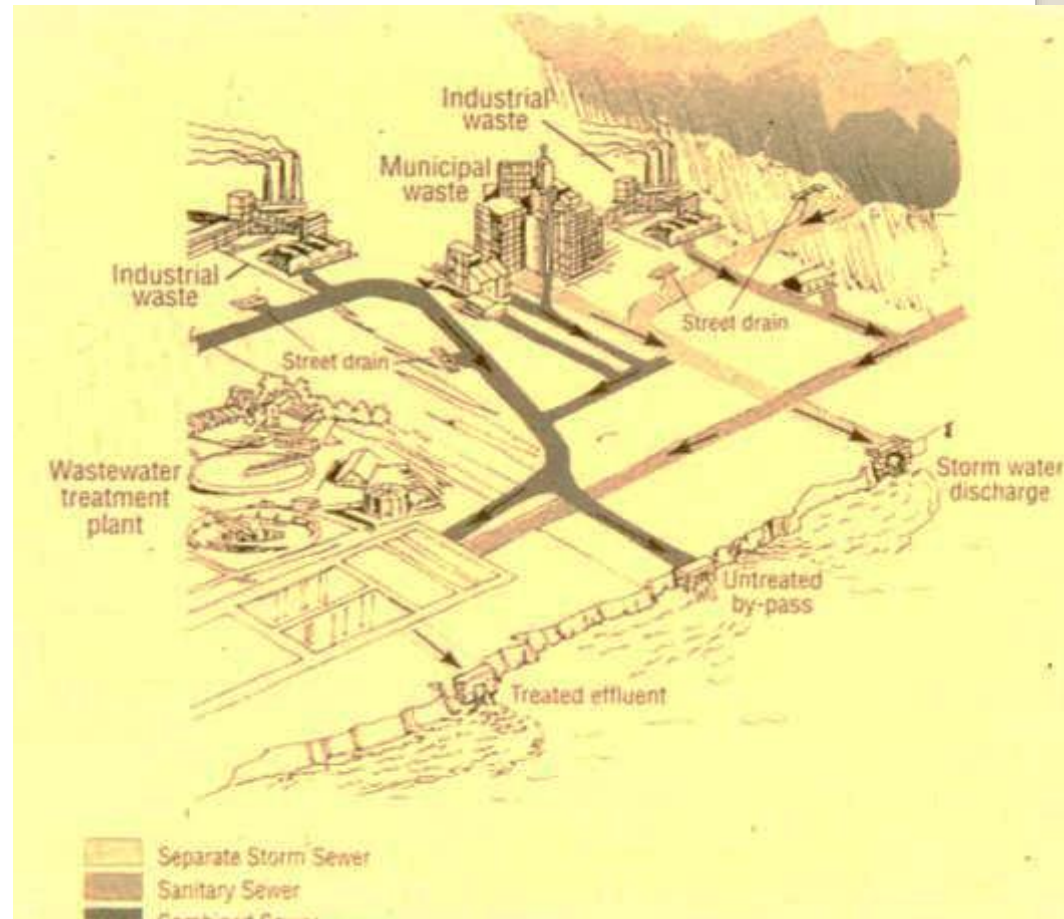
Vertidos: SSO y CSO

Redes Separativas:

- Escorrentía directamente al medio exterior, SSO

Redes unitarias:

- Escorrentía + parte del agua residual llega al medio exterior, CSO



Problemas de calidad del vertido

- CSO y SSO sobre los medios receptores
- Contaminantes asociados a la escorrentía y al agua residual (R.Unitaria)
- Efectos sobre los medios: contaminación

<i>Parámetro</i>	<i>Agua residual doméstica (mg/l)</i>	<i>Escorrentía (mg/l)</i>
SS	220	1900
DBO ₅	220	11
DQO	500	85
N amonia	25	1,45
N total	40	3,2
P total	8	0,34
Plomo	0,11	0,21
Cinc	0,43	0,30
Grasa	100	0,4
CF (Nº/100 ml)	10 ⁶ -10 ⁷	6430

Problemas de los CSO

- Redes Unitarias:
reducir el número
de vertidos, CSO,
y la carga
contaminante
asociada



Fuentes de contaminantes en los vertidos en tiempo de lluvia

- Aportación de la lluvia
- Escorrentía
- Sedimentos en la red
- Fracción de agua residual (doméstica o industrial) en caso de red unitaria

Lluvia

- Polvo en suspensión en el aire
 - Depende del lugar y época del año
 - Máximos de hasta 20 Tm/Km²/mes
 - Valores habituales, 0.1 to 2 Tm/Km²/mes
- Otros Gases en la atmósfera (NO_x, CO_x, SO_x)
 - Problemas de lluvia ácida (pH menor de 5 en algunos casos)

Sólidos aportados por la escorrentía

- Diferentes orígenes: obras de construcción, polvo, suciedad, materia orgánica, grasas, etc
- Materiales orgánicos e inorgánicos

Procesos físicos que se desarrollan

- Acumulación (Build-up) en superficie urbana
- Erosión y arrastre por la escorrentía
- Un evento de 10-15 mm puede eliminar cerca del 90 % de todos los materiales acumulados en superficie

Obras en medio urbano



Erosión superficial



Materia orgánica



Granulometrías de sólidos

- Gran variabilidad, materiales cohesivos y no cohesivos
- Polución adherida a los sólidos
- Cerca del 70% de toda la carga contaminante asociada a pequeñas partículas (menores de 0.125 mm)

Concentraciones

- Valores de áreas urbanas en USA

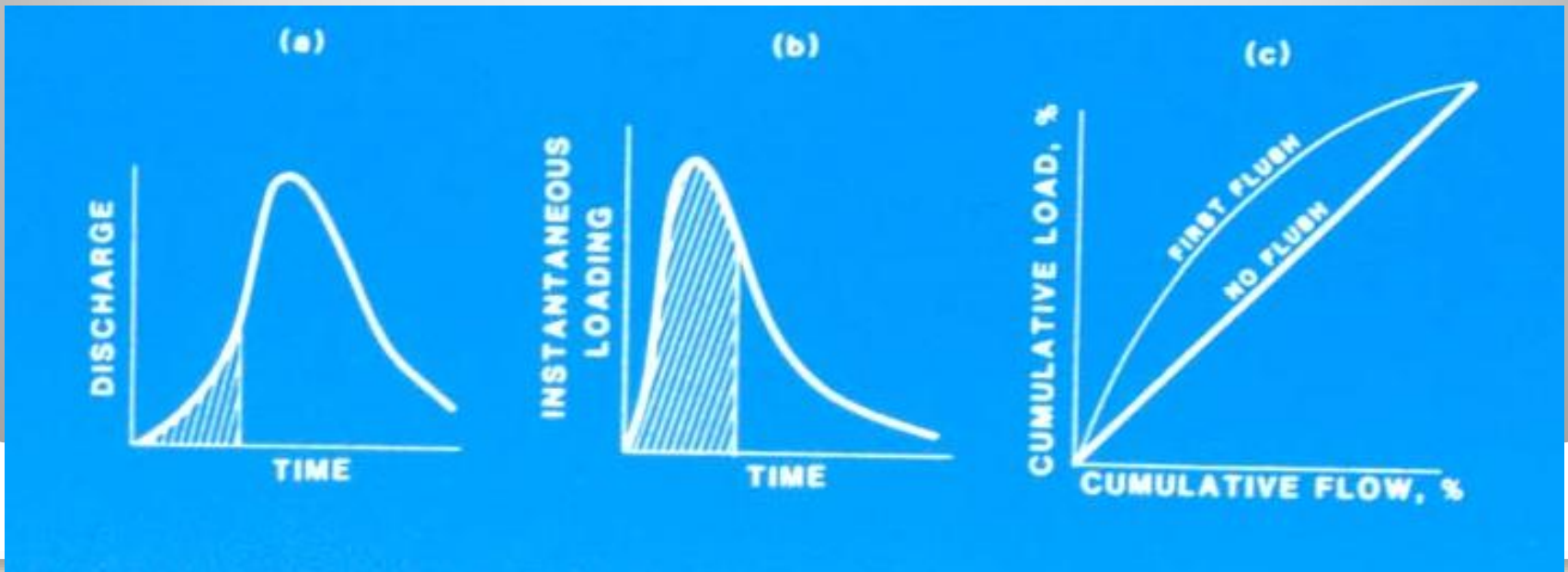
	Valor medio (mg/l)	Rango de valores
PH		6.5 – 8.1
Sólidos totales	1147	145 – 21600
DB0	24	2-133
PO₄	0.79	0.05 – 3.55
Pb	0.96	0.02 – 13.1
Fe	10.3	0.1 – 45
Cd	0.04	0.01 – 0.40

Primer lavado - First flush

- Un evento de lluvia encuentra la ciudad más sucia en los primeros minutos
- La concentración de contaminantes asociada a la escorrentía puede ser mayor en los primeros minutos

First flush

- Hidrograma y polutograma muestran valores punta en instantes de tiempo diferentes
- $C_{\text{máx}}$ antes que el $Q_{\text{máx}}$



First flush: concentraciones

- Similares en algunos parámetros a un agua residual

	Concentración del first flush	Concentración de un vertido prolongado
DQO	581 $\pm$ 92	161 $\pm$ 19
DBO	186 $\pm$ 40	49 $\pm$ 10
Sólidos totales	861 $\pm$ 117	378 $\pm$ 46
Sólidos en suspensión	522 $\pm$ 150	166 $\pm$ 26
Nitrógeno total	17.6 $\pm$ 3.1	5.5 $\pm$ 0.8
Ortofosfato	2.7 $\pm$ 1.0	---
pH	7.7 $\pm$ 0.1	7.2 $\pm$ 0.1

Parámetros del vertido

- Parámetros de un CSO / SSO
 - Sólidos
 - Materia Orgánica
 - Indicadores Biológicos
 - Nutrientes
 - Metales pesados
 - Otros elementos

Sólidos

- Aumentan la turbidez del medio receptor y reducen el efecto de la luz solar
- Acumulación en el cauce del río, cubriendo la zona béntica

Materia Orgánica

- Materia Orgánica se oxida, consumiendo el oxígeno disuelto del agua, DO
- Reduce el nivel de DO, a veces por debajo del umbral de supervivencia de la fauna
- Control de los niveles de DO en el río o mar

Nutrientes

- Pueden generar un bloom de algas (crecimiento exagerado)
- NH_4 / PO_4 como indicadores

Indicadores Biológicos

- Microorganismos patógenos
- Asociados a la materia orgánica
- Coliformes, salmonellas, E-colis etc. los más usuales

Metales pesados

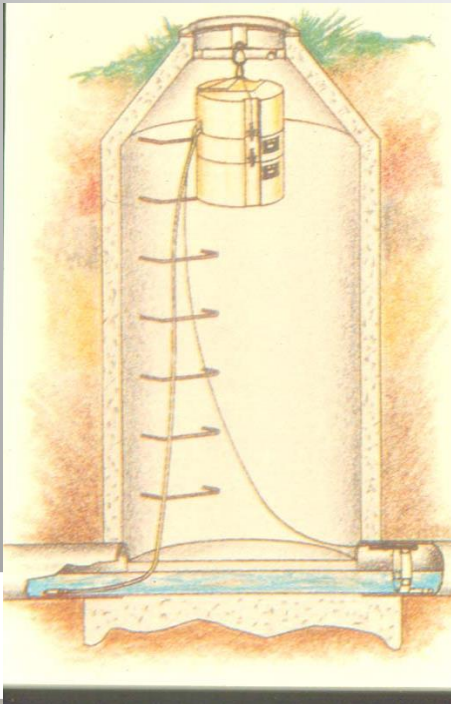
- Tóxicos por encima de unos valores mínimos
- En algunos casos, son bioacumulativos en el cuerpo de los peces y se pueden introducir en la cadena alimentaria
- Los más usuales: Fe, Zn, Cd, Pb, Hg

Otros indicadores

- Control de algunos contaminantes específicos importantes a nivel local:
 - Pesticidas
 - Hidrocarburos
 - Compuestos Industriales (fenoles, bencenos, etc)

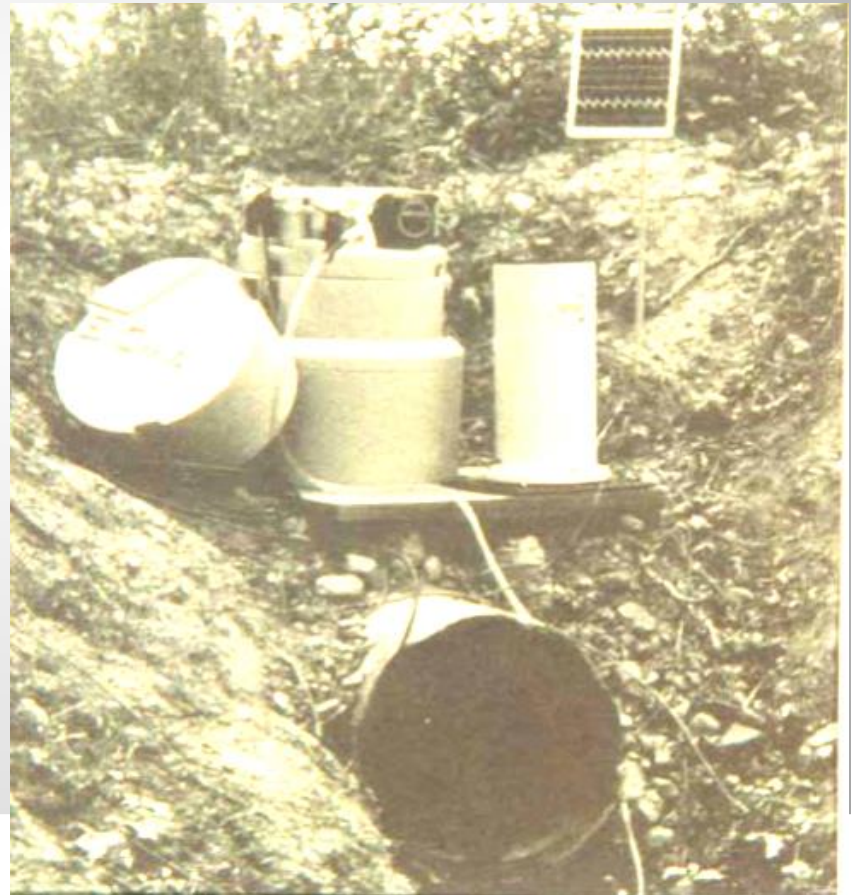
Medidas de campo: en red y medio receptor

- Caracterizar vertidos y sus impactos en medio receptor



Caracterización de vertidos: Toma de muestras

- Dificultades debido al tipo de muestras, aleatoriedad de la lluvia, errores en la elección de los puntos, fallos de los instrumentos, etc.



Eliminación de contaminantes por barrido



Chinese street cleaner



Cuantificación de vertidos: medidas y modelación matemática

Objetivos del estudio de los CSO

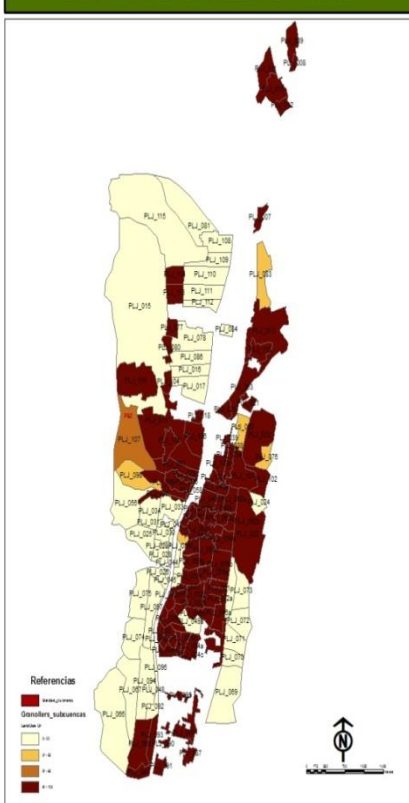


Río Congost cerca de Granollers

- ❑ Caracterizar en zona urbana e industrial los vertidos en tiempo de lluvia, CSO
- ❑ Dos cuencas piloto (urbana e industrial)
- ❑ Estudio del sistema principal, incluyendo EDAR en términos de cantidad y calidad
- ❑ Definir para diferentes usos de suelo, patrones de generación de carga contaminante que se puedan aplicar a otros municipios de la zona

Cuencas de estudio

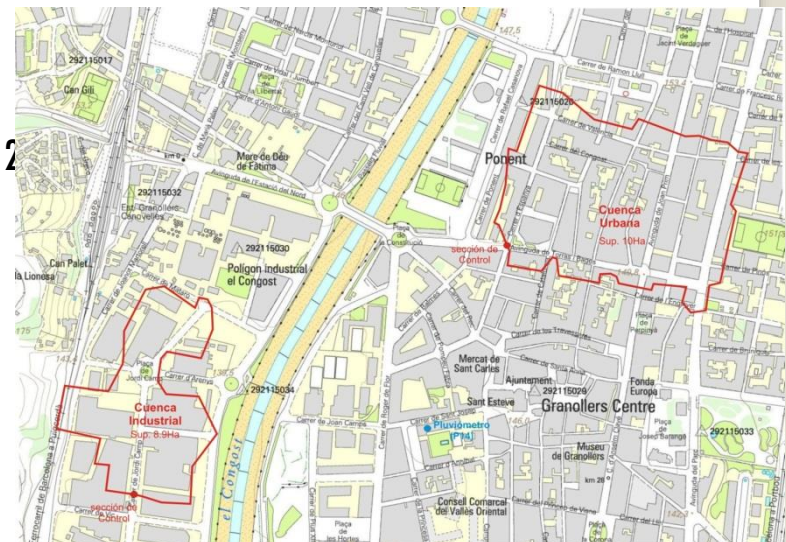
Uso de suelo. Áreas Urbanas



Cuenca de Granollers, incluyendo redes unitarias de Granollers, Canovelles, Les Franqueses del Vallès y La Garriga

Zona urbana e industrial

- Área de la cuenca:
 - 1.682 Ha (Hab-equivalentes > 12 000)
- Cuenca piloto Urbana:
 - 10 Ha
- Cuenca piloto Industrial :
 - 8.9 Ha



Parámetros considerados para caracterizar el vertido

Parámetros de análisis:

MES / TSS, Materia en Suspensión

NH₄, Amonio

DQO, Demanda Química de oxígeno



Protocolo de muestreo

- Cuencas Piloto

Toma de muestras a partir de un nivel mínimo de agua, y con muestreos a intervalos de: 0, 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90 y 120 minutos (total 9 muestras por evento)

- Granollers EDAR

Periodos de muestreo: cada hora durante el evento de lluvia

Equipamiento e Instrumentación

Lluvia



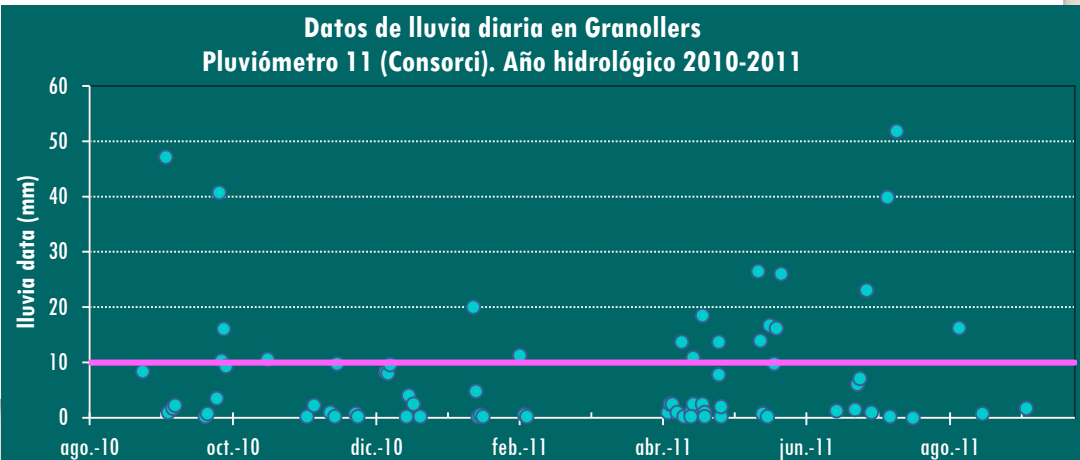
5 pluviómetros

Diferencias entre ellos durante el suceso de lluvia
(cuenca larga y estrecha, distancia máxima 11km)

Selección de eventos de lluvia representativos

Periodo de días sin llover entre 20 y 30 (permitir una acumulación representativa)

Mínima lluvia efectiva de 8 a 10 mm



Equipamiento e Instrumentación

Caudal y muestras de agua

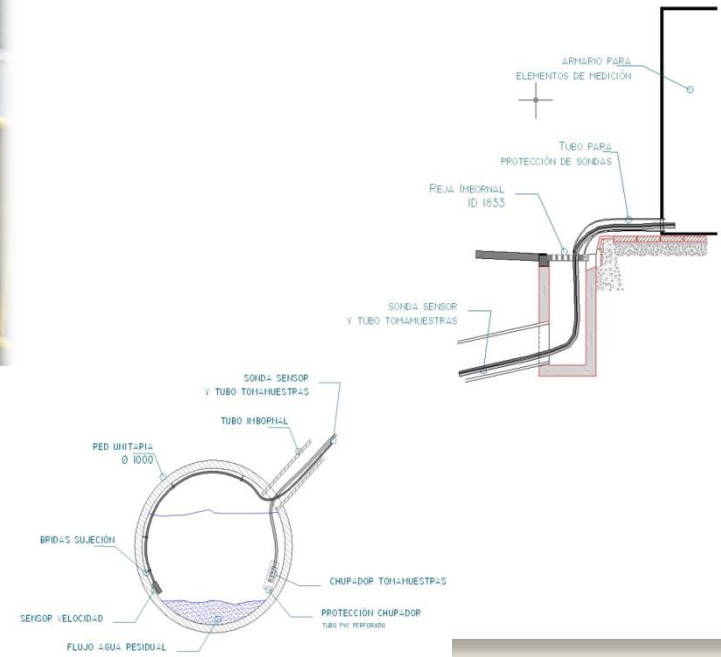
EDAR de Granollers

- Tomamuestras Hach. Sigma 900
- Limnómetro (EDAR entrada)
- Medida de caudal (pumping system)



Equipos en Urbana e Industrial

- Tomamuestras Hach. Sigma 950 y Sigma 900
- Sonda de presión (medida de nivel de agua)



Problemas observados durante el seguimiento



Acumulaciones de sedimentos, basura, etc



Fallos de los aparatos o problemas con el suministro eléctrico



Metodología: SWMM 5.0

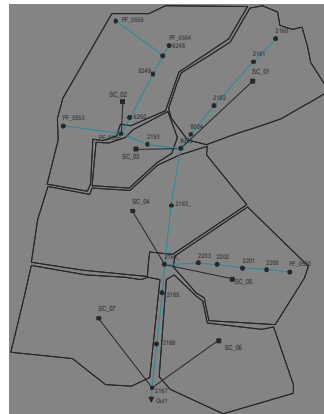
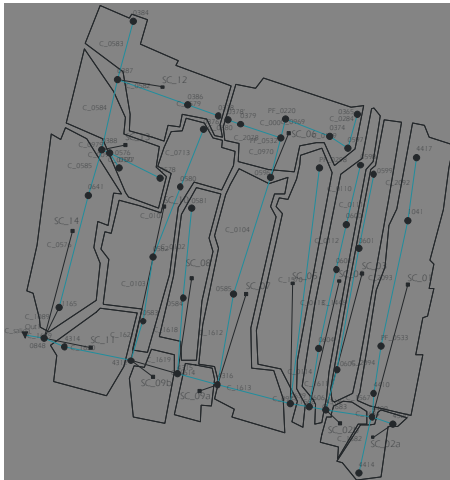


EPA-SWMM5

■ Modelo de las cuencas Piloto

- A partir del inventario de la red

- Predecir comportamiento en términos de Cantidad y Calidad
- Código de dominio Público
- Facilidad de uso, con menor número de parámetros que otros códigos

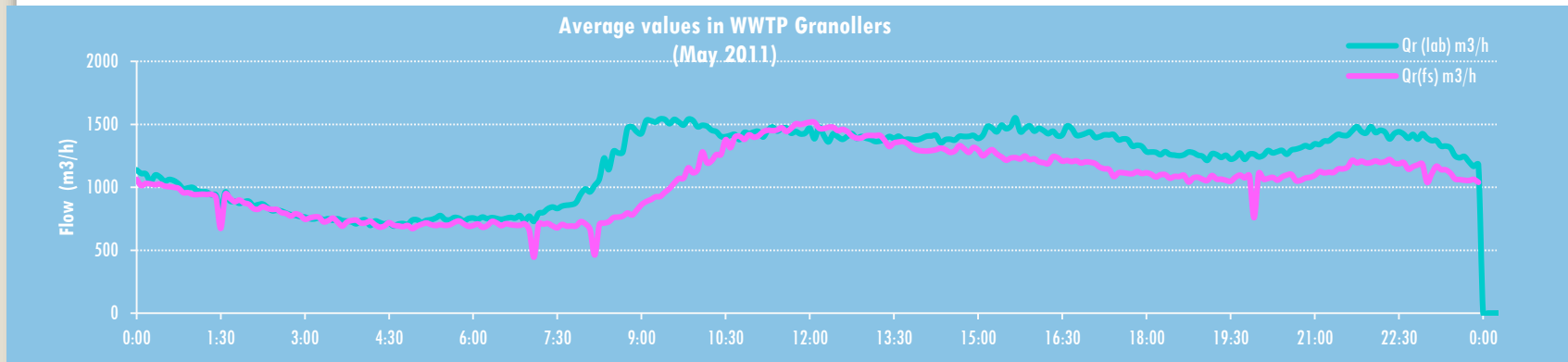


Sistema Granollers



Datos de aguas residuales

Medidas en la EDAR, en días laborables y fin de semana. Patrones temporales obtenidos



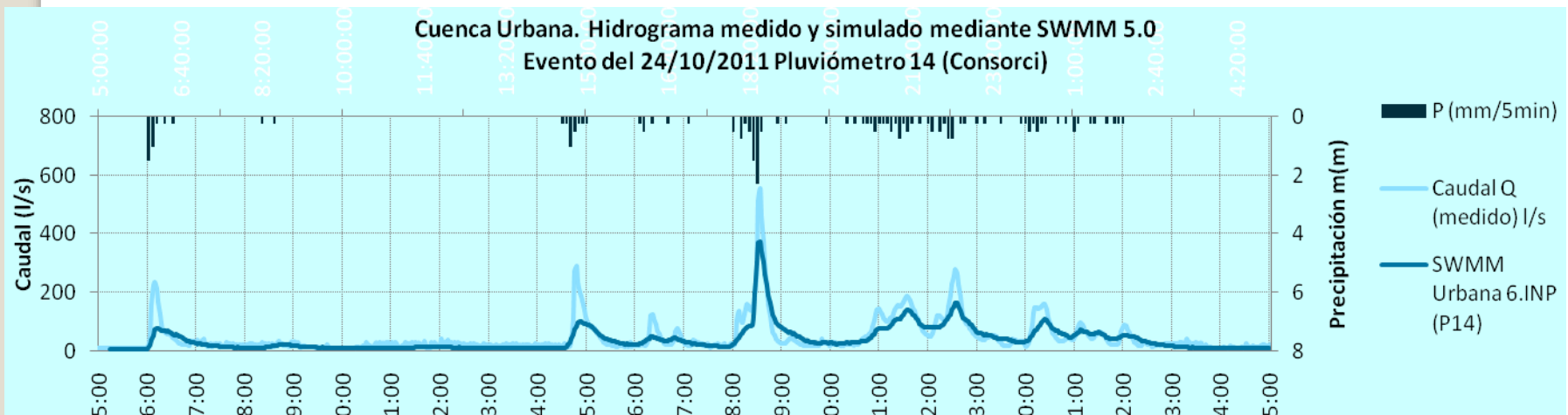
Datos de 6 meses
de la EDAR

EDAR	Valores medios anuales		
	DQO/SS	DBO5/SS	NH4/SS
Laborables	1.94	1.02	0.15
Fin de semana	1.90	1.30	0.20

EDAR / cuenca piloto	DQO/SS	NH4/SS	DQO/DBO5
domésticas	2.95	0.20	1.46
Residuales industriales	5.98	0.03	1.46

Resultados: Cuenca Urbana

Datos de caudal, registrados y calculados con SWMM5



Parámetros del modelo

3 eventos para calibración y 3 más para validación

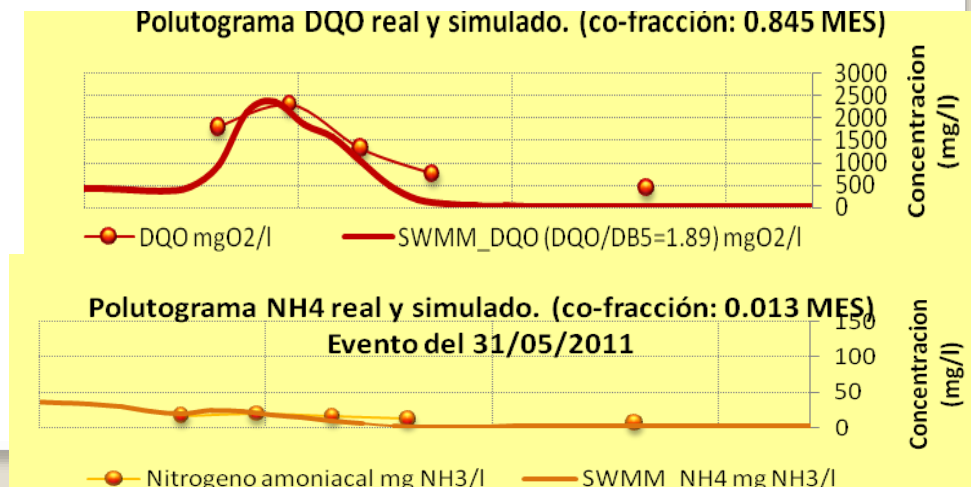
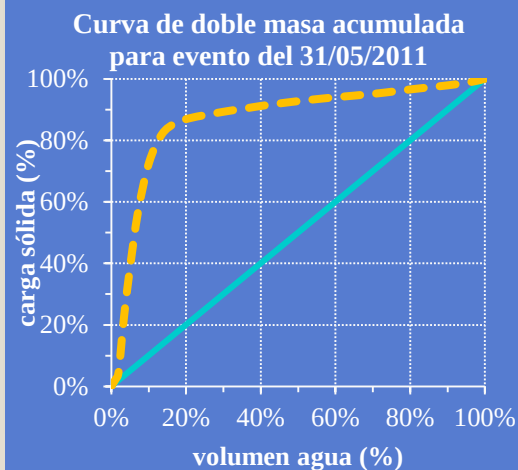
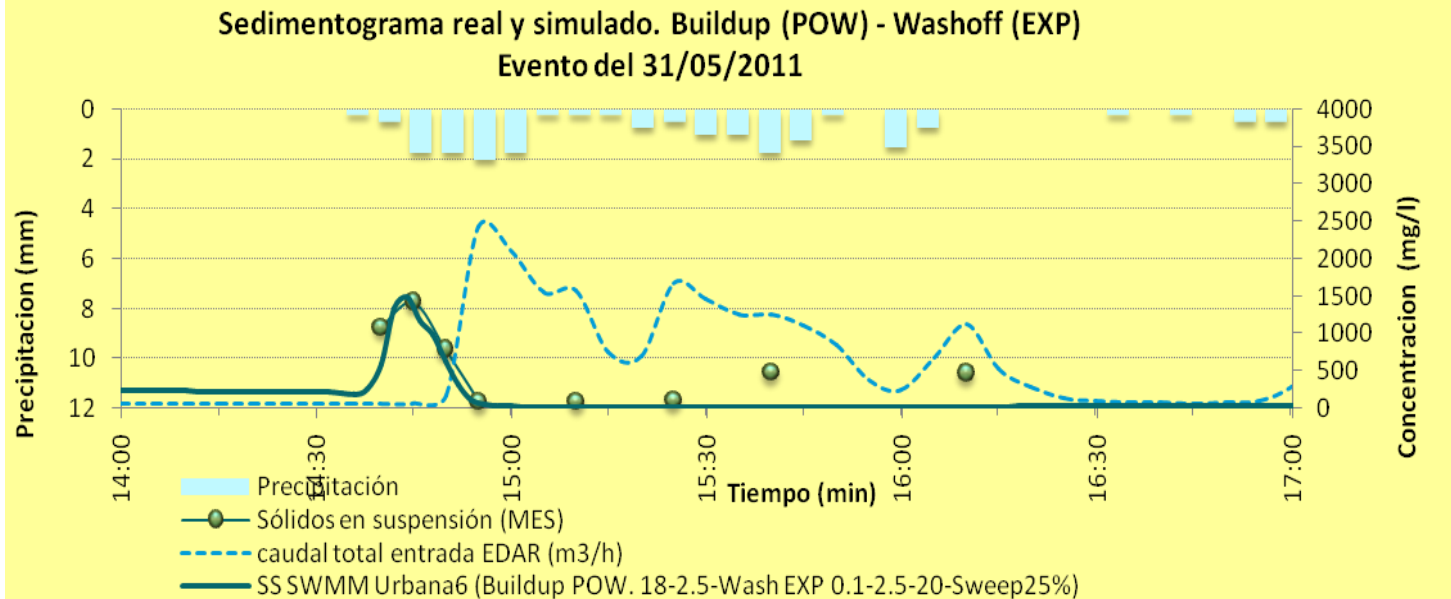
Lluvia de los 5 pluviómetros

Cuenca Urbana		
Valores por Sub-cuencas		
Manning rough. Coef	Impermeable	0.015
	Permeable	0.04
% área impermeable		77 to 90
Pendientes medias (%)		From 0.5 to 2.15
Depression storages (mm)	Impermeable	1.0
	Permeable	1.5
Pérdidas		Número de Curva
	CN	De 60 a 76
	Drying period (days)	
	20	

Resultados: Cuenca Urbana

Calibración y validación del modelo de Calidad de aguas

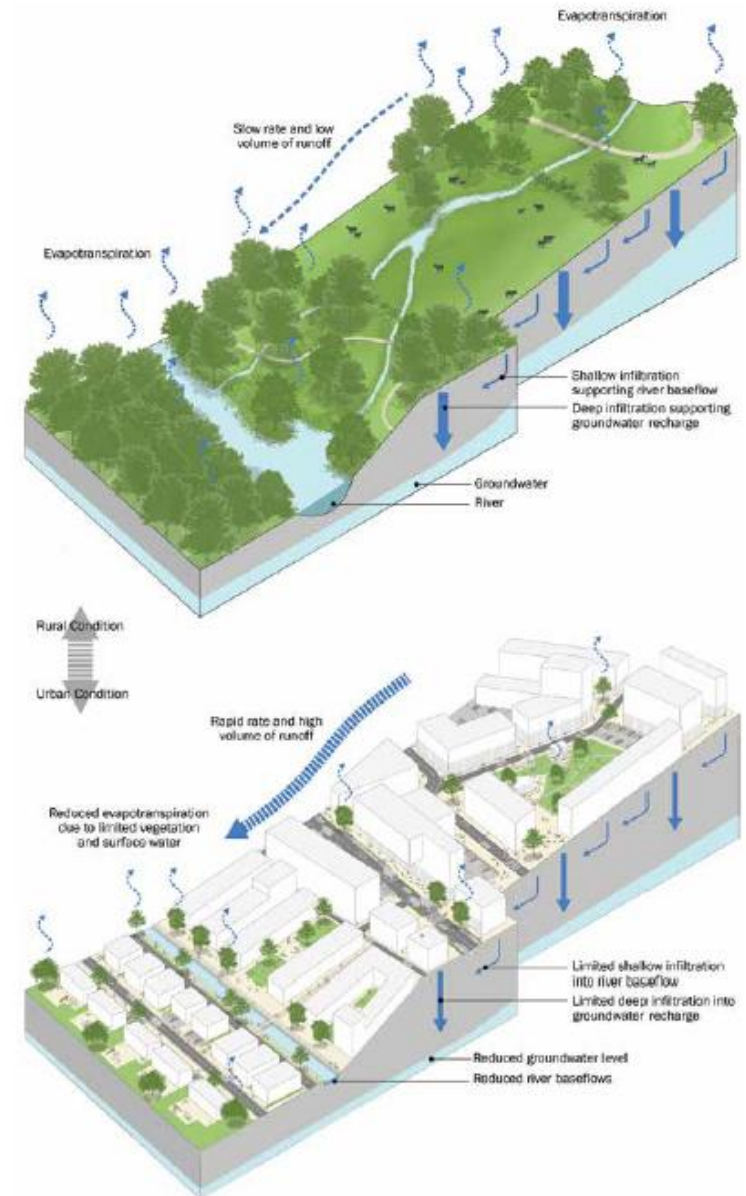
2 eventos para calibración
y 2 más para validación



Actuaciones para reducir los vertidos / carga contaminante

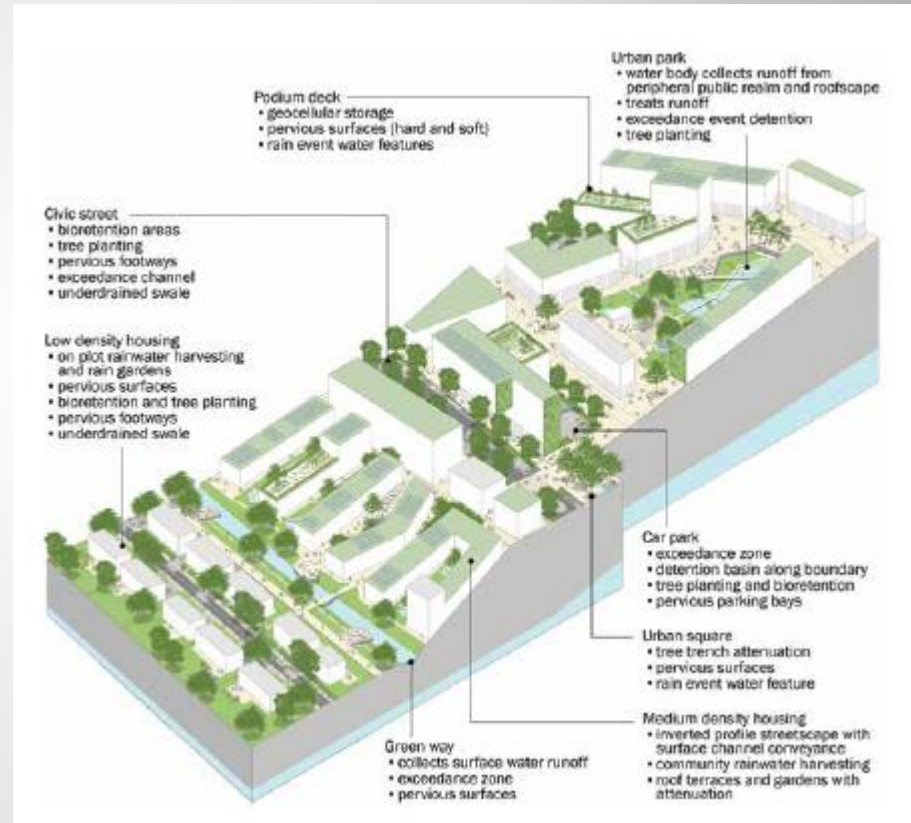
Idea motriz: revertir procesos

- Proceso de urbanización
- Recuperar lo más posible el estado natural de la cuenca



Idea motriz: revertir procesos

- No se podrá alcanzar la situación inicial previa
- Repermeabilizar la ciudad
- Reducir porcentaje de impermeabilidad

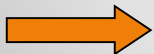


Principios de actuación

- Reducir volumen de escorrentía
 - Aumentar las pérdidas, favorecer la infiltración, etc.
 - Menores volúmenes de escorrentía
 - Menores volúmenes de vertido
- Aumentar tiempo de recorrido / retención de la escorrentía
 - Reducción de caudales puntas

Tipos de actuaciones

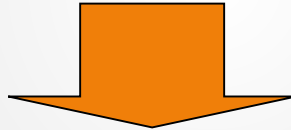
- Se pueden clasificar en:
 - **Medidas estructurales** (construcción de nuevos colectores, rehabilitación de otros antiguos)

$I(t)$  $Q(t)$  Diseño de colectores

- **Medidas no estructurales**

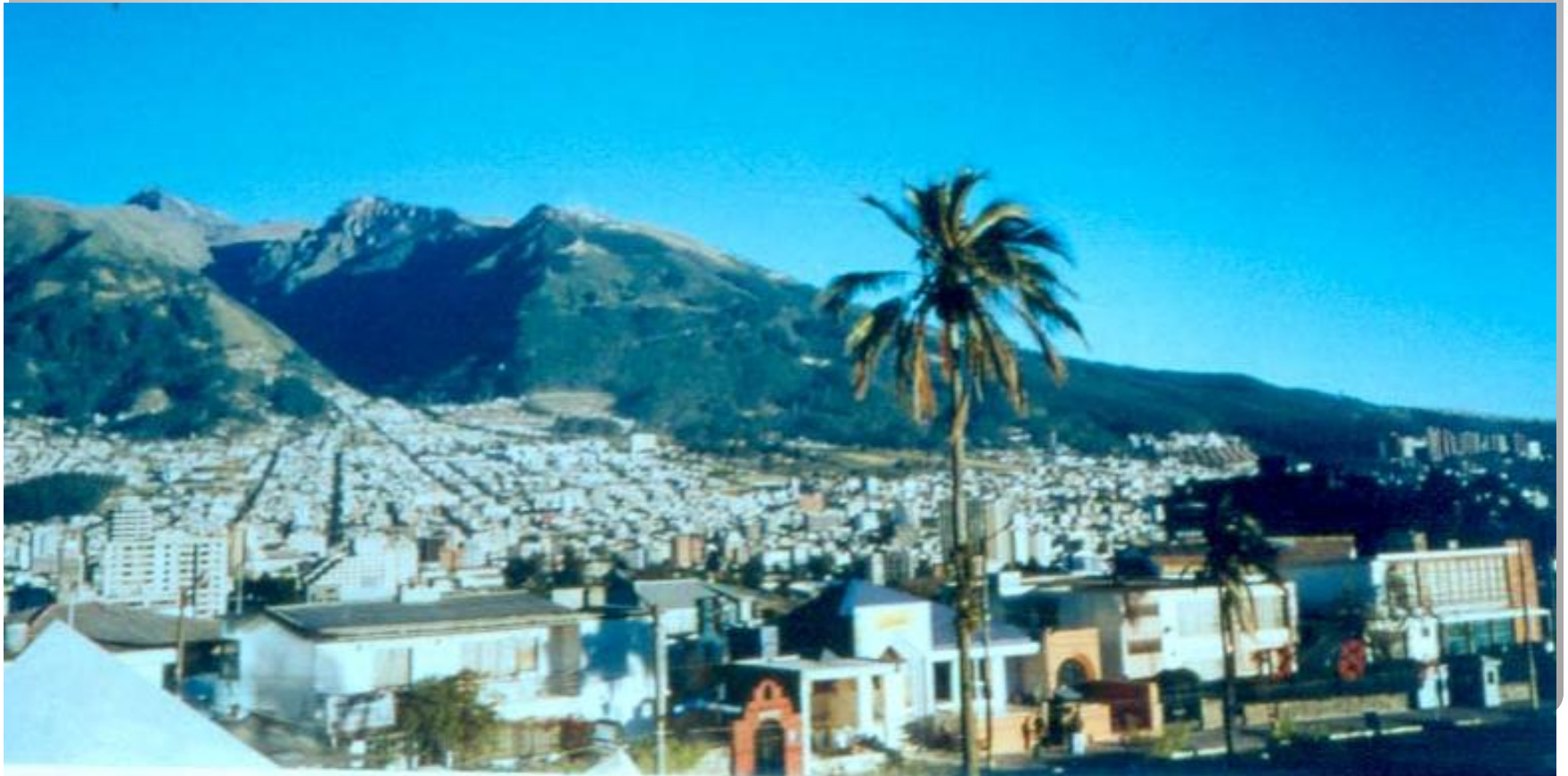
Medidas no estructurales

- Actuaciones a nivel de planeamiento urbanístico
 - Planes generales de drenaje



- Definición de zonas de riesgo de inundación
- Previsión de aumentos de escorrentía en futuros procesos de urbanización
- Limitación de nuevos caudales de pluviales a conectar a la red
- Ordenación del subsuelo

Ocupación indiscriminada del medio urbano



Medidas no estructurales

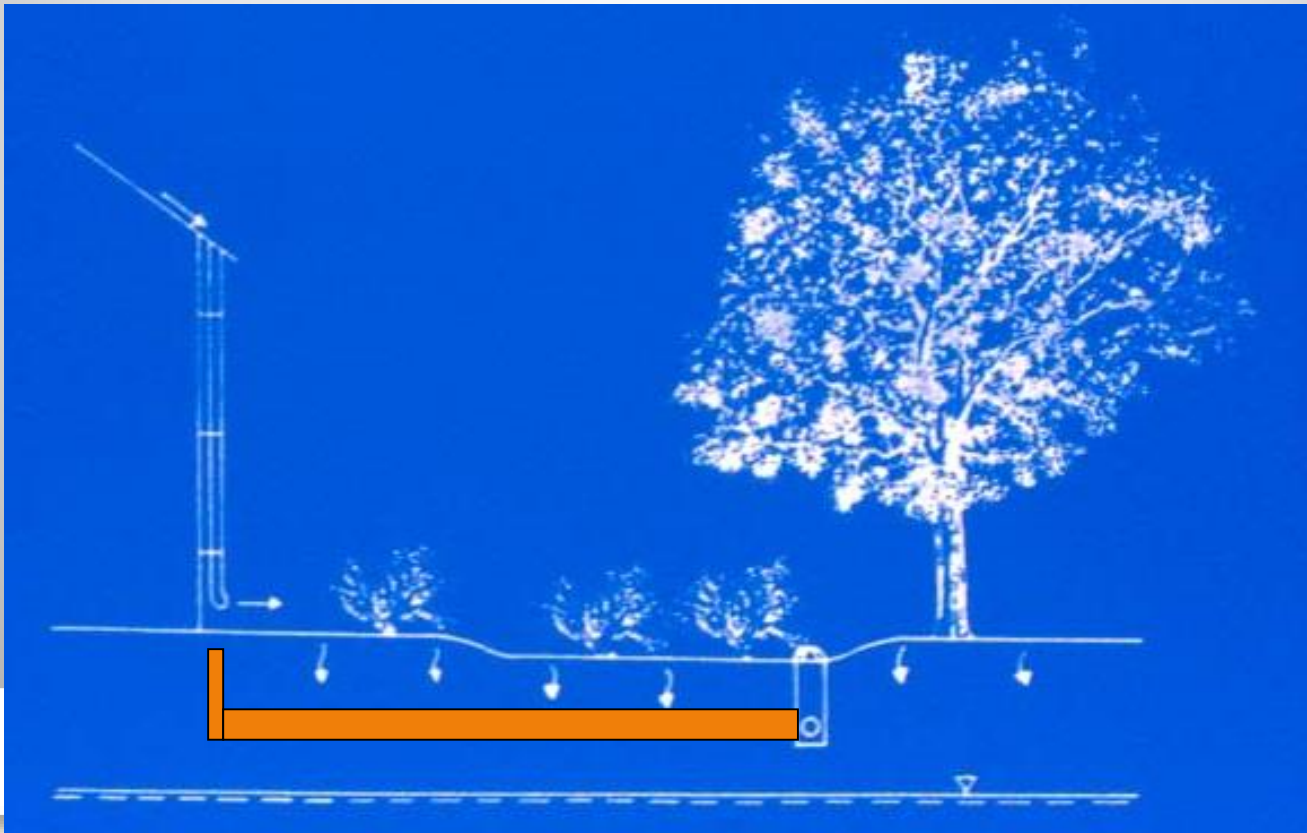
- Actuaciones de acondicionamiento de la ciudad
 - Aumento de la infiltración
 - Aumento del tiempo de concentración de las cuencas

Aumento de la infiltración

- Favorecer la escorrentía natural
- ``Permeabilizar`` la ciudad
- Desconectar superficies que estaban directamente conectadas a la red de drenaje
- Cuidar el mantenimiento de estos elementos  colmatación por arrastre de sedimentos

Escorrentía natural

- Función de las características del terreno



Aumento de la infiltración

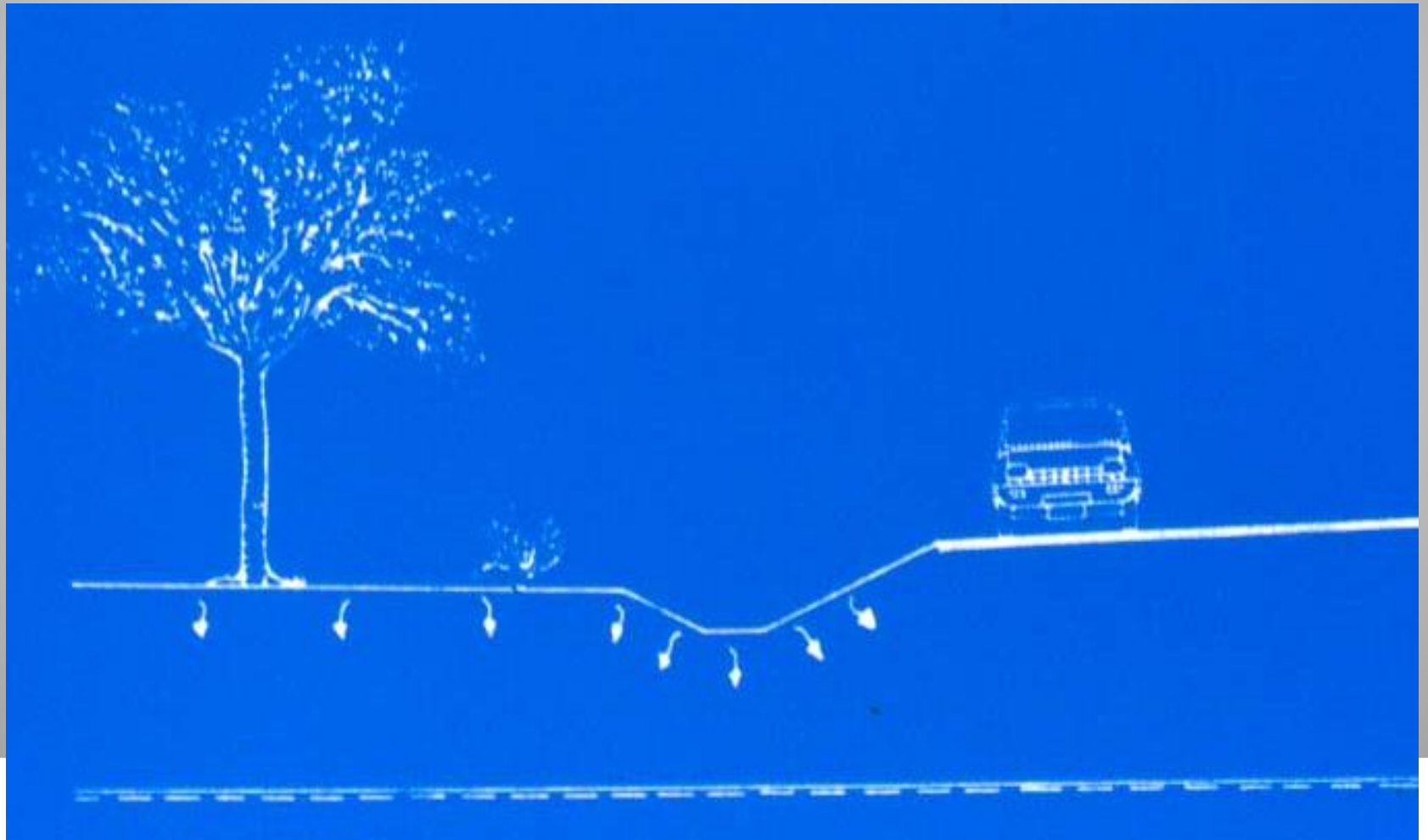
- Gestión de las aguas pluviales de tejados, infiltrándolas en el terreno



Bandas verdes – zonas filtrantes



Uso de cunetas filtrantes



Bandas verdes

- Cunetas filtrantes



Zonas de retención local

- Pequeñas zonas de almacenamiento



Rotondas urbanas

- Pequeñas zonas de almacenamiento local



Cuneta lateral de almacenaje

- No mezclar pluviales y residuales en edificación
- Permite el uso de zonas de infiltración / laminación a cielo abierto



SUDs para viales

- Escorrentía de los viales, a balsa de almacenaje
- Desarrollo longitudinal del almacenamiento (cientos a miles de m³)



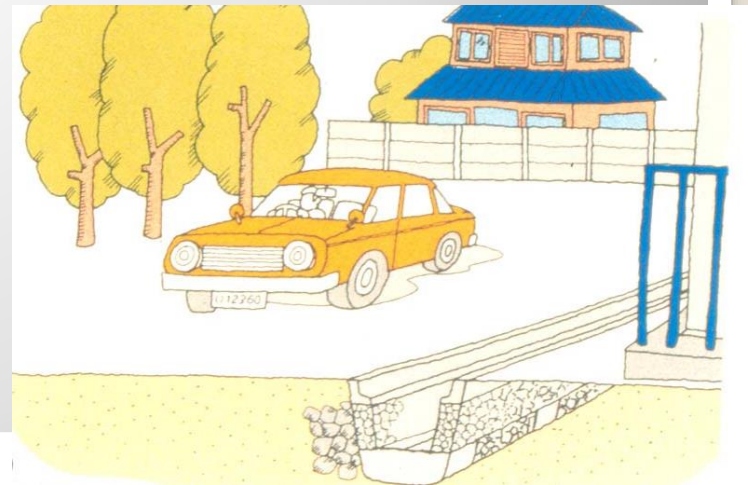
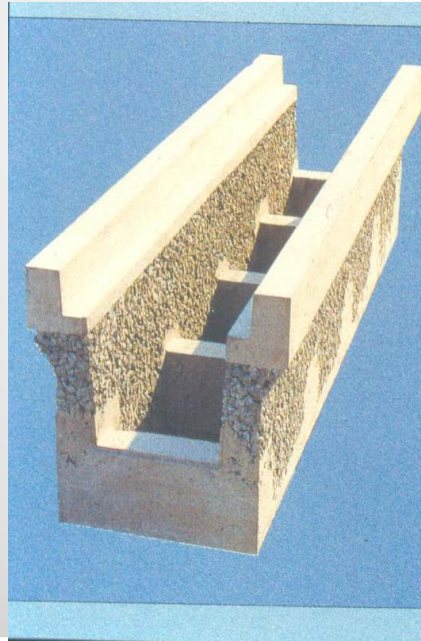
SUDs para carreteras

- Conexión directa, plataforma de circulación a cauce / drenaje



Aumento de la infiltración

- Aprovechar elementos filtrantes que hoy día se usan en hormigón convencional



Sant Boi. Uso de balsa y SUDs

- Uso combinado de diferentes tecnologías
- Aceras filtrantes, isletas, etc.

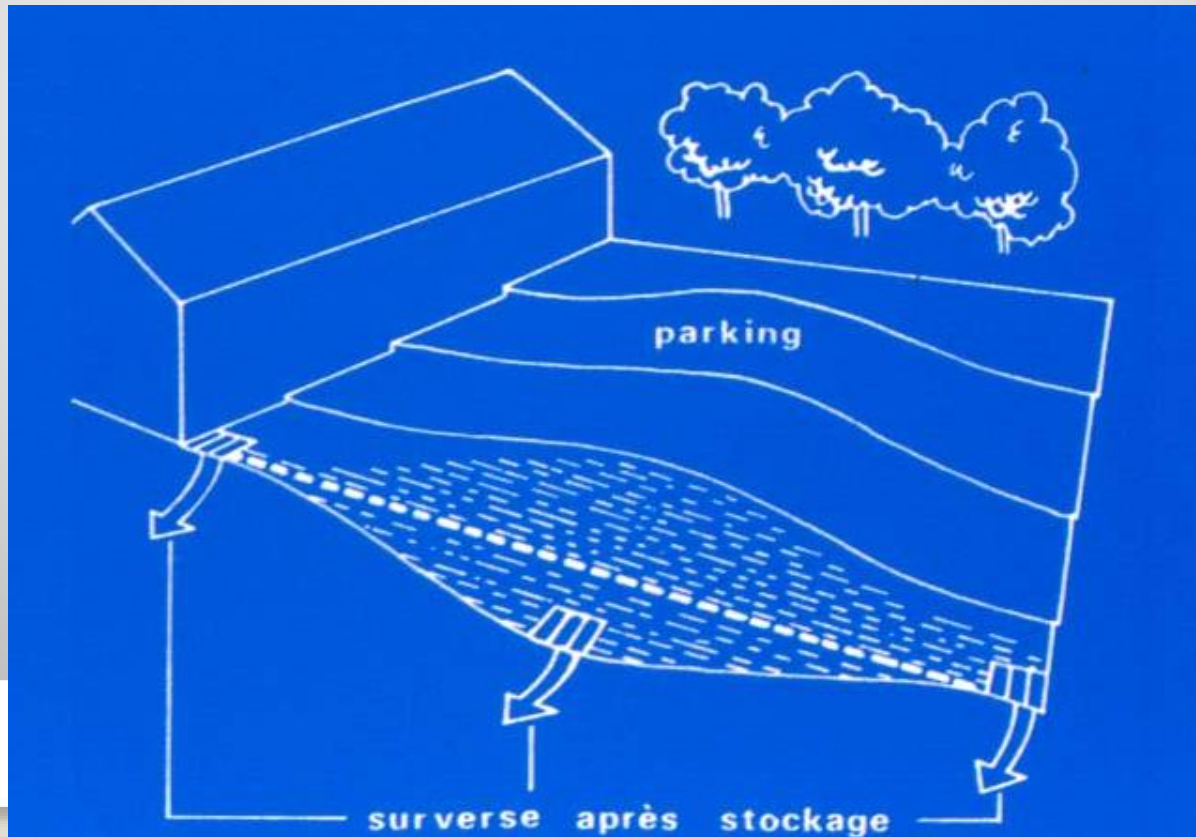


Aumento del Tiempo de concentración

- Retención del agua en edificios o espacios abiertos
- Limitadores de caudal de entrada en los pozos de imbornal
- Pavimentos porosos. Doble opción:
 - Infiltración
 - Recogida inferior (evitar contaminación de las aguas subterráneas)
- Depósitos de retención

Almacenamiento en zonas de aparcamiento

- Aceptar niveles de inundación (almacenamiento) en tiempo de lluvia



Zonas de aparcamiento

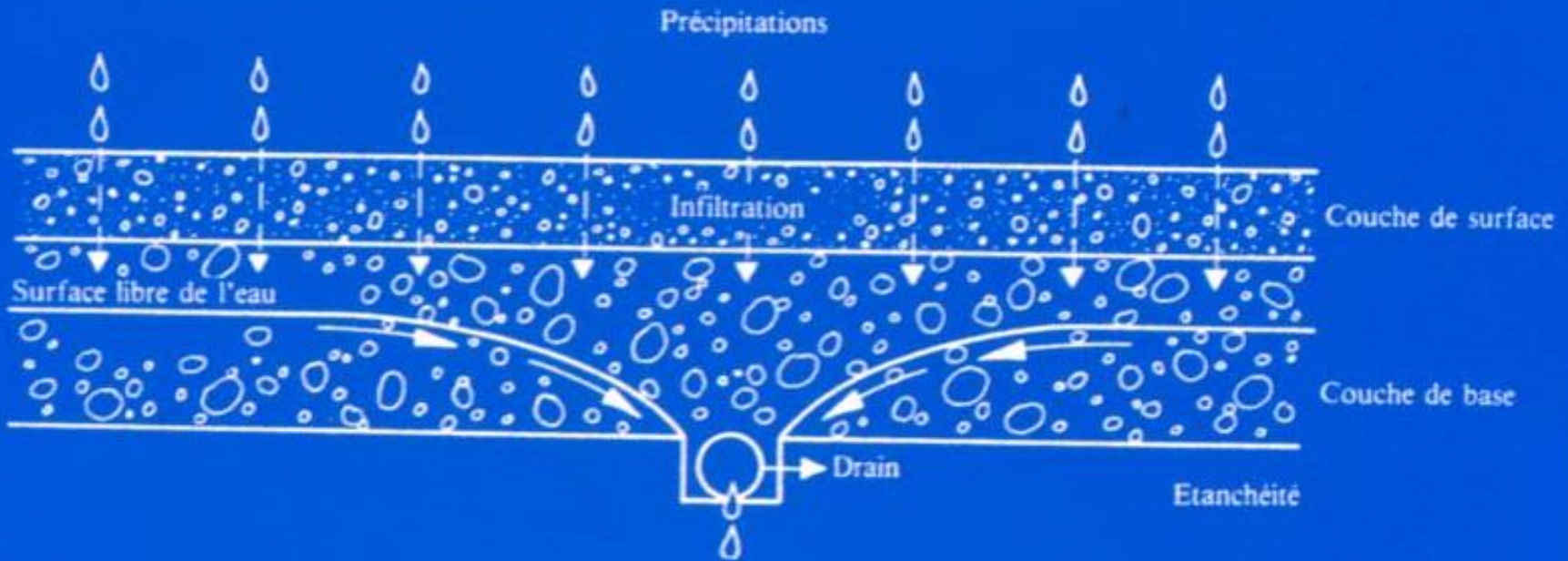


Empleo de pavimentos porosos

- Mezclas abiertas en las capas del pavimento (incluyendo la de rodadura)
- Mayor infiltración, a la vez que se reducen los niveles de ruido
- Se alcanzan porosidades del 20%
- Permeabilidad alta 0.1 a 2 cm/s
- Dos opciones:
 - Infiltración en el terreno
 - Recogida con un drenaje profundo: aumento del tiempo de concentración

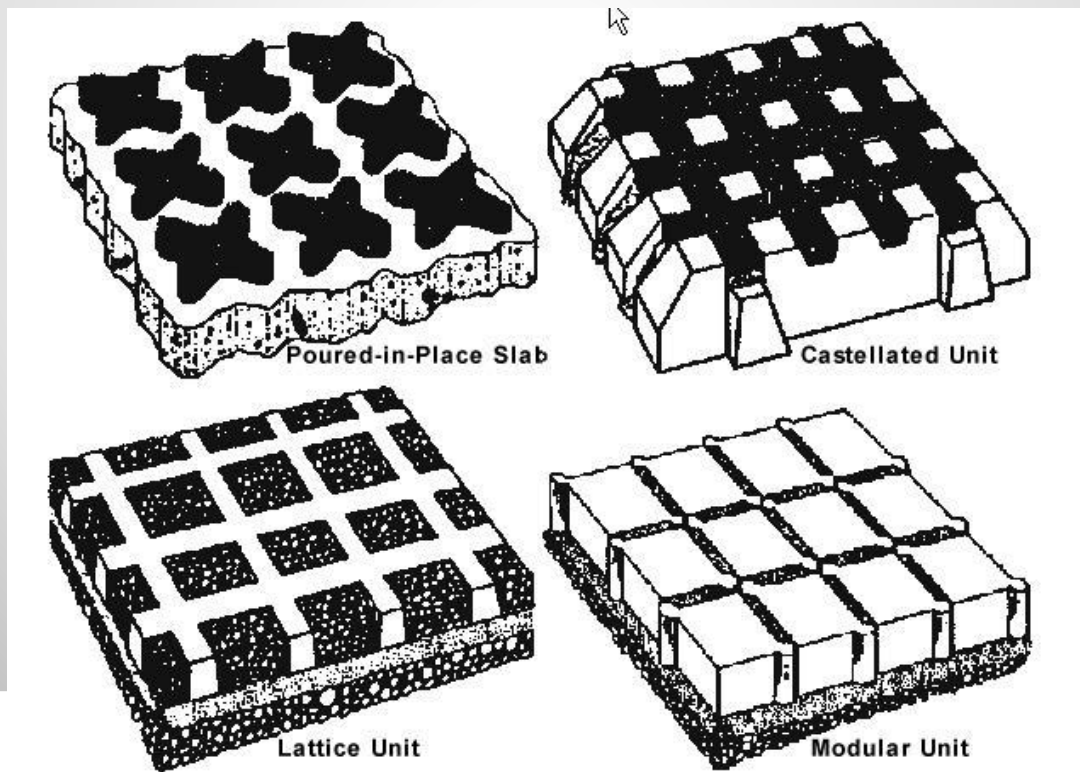
Pavimentos porosos

- Incluidos en Francia en el catálogo de firmes
- Gradación de huecos creciente con la profundidad para facilitar la limpieza



Pavimentos porosos

- Pavimentos de placas alveolares



Ejemplo de estudio

- Cuenca urbana en Granollers, 140 Ha
 - 87.2 Ha impermeables (62%)



Granollers

- Actuaciones propuestas

- Volumen de retención en terreno natural 46700 m³
- Retención distribuida en zona pavimentada 1820 m³
- Permeabilización del tejido urbano
- Creación de franjas verdes 50 m³

Volumen total 48570 m³

345 m³ / Ha

Volumen teórico, pero no siempre es movilizable

Granollers

- Problemas debidos a la falta de uniformidad en la distribución de esos volúmenes
- Posibilidad de reducir hasta en un 90% el volumen de vertidos al exterior
- En realidad se reduce poco más del 25%
- No es posible transferir caudales de la red a la superficie (red unitaria)
- Sí existiría esa posibilidad en caso de tener red separada

Depósitos de retención

- Actuación constructiva pero no de nuevos colectores
- Obra local (depósito) frente a una obra lineal (colector)
- Consideraciones según la red sea unitaria o separativa
- Posibilidad de construirlos a cielo abierto en algún caso  más económicos

Depósitos de retención

- En caso de red separativa, posibilidad de construcción a cielo abierto e integrarlo en entornos urbanos



Depósitos de retención

- Uso conjunto en zona urbana superficie / depósito



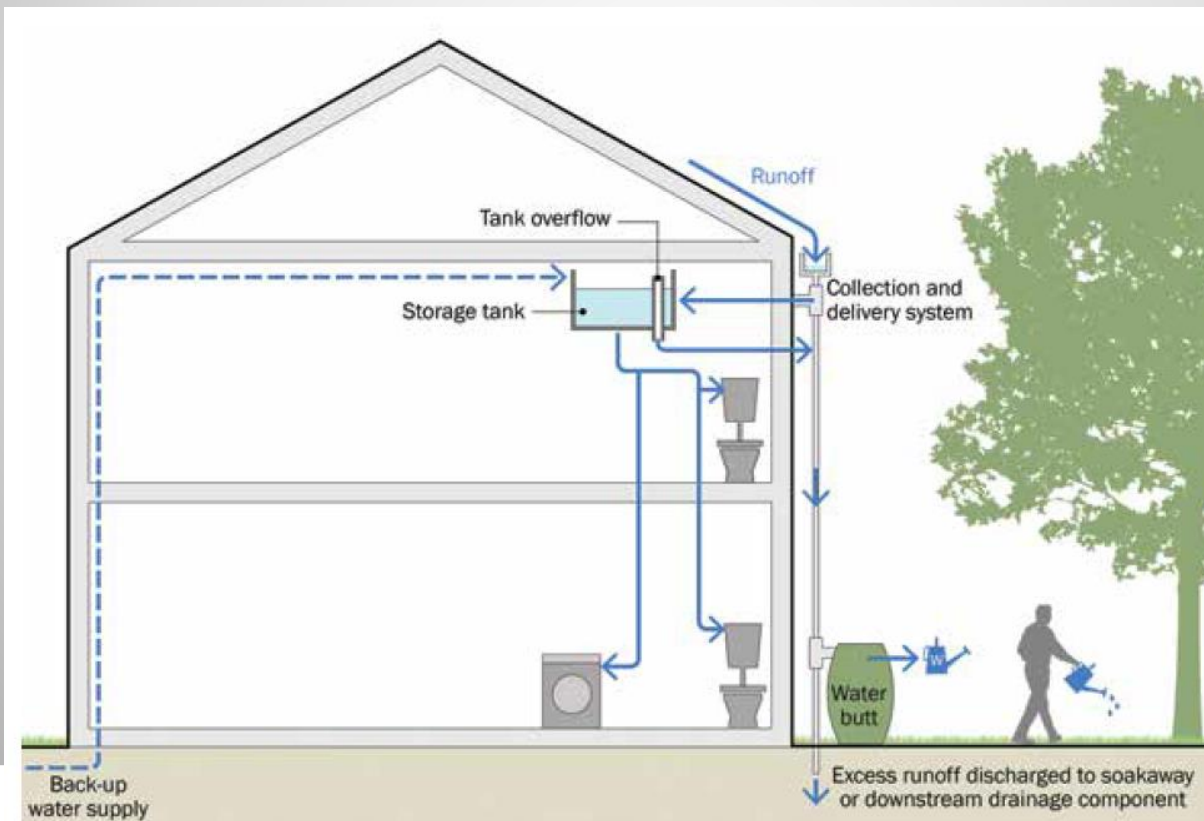
Balsa de laminación. Sant Boi

- Regulador de salida: tipo orificio
- Salida duplicada por seguridad
- Taludes laterales con vegetación natural



Captación de agua de lluvia (RWH)

- Recoger y reutilizar volúmenes de agua de lluvia
- Uso residencial o comercial / industrial



Caso de técnica SUDs tejado verde en Barcelona

Concepto de tejado verde

- Transformación de un área usualmente impermeable, en zona de almacenamiento y crecimiento de vegetación

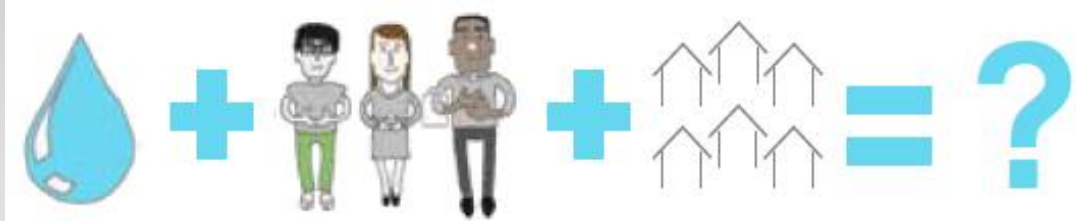


Concepto de tejado verde

- Aplicable a numerosos casos de tejado, grandes o pequeños



Objetivos de un tejado verde



Fuente: *Water Sensitive Urban Design in the UK*

Ciudad sostenible → Drenaje urbano sostenible →
Tejados verdes

Objetivos

- Qué son los tejados verdes, beneficios y aspectos a tener en cuenta.
- Estudio cuantitativo del comportamiento hidrológico de los tejados verdes en el clima Mediterráneo mediante el software SWMM5.
- Proponer las características más óptimas de un paquete de tejado verde para Barcelona.

Drenaje urbano sostenible

DESARROLLO SOSTENIBLE



DRENAJE URBANO SOSTENIBLE

Cambio de filosofía en la concepción de las redes de drenaje ofreciendo una solución holística y duradera. Medidas que contribuyen al desarrollo sostenible y mejora del diseño urbano.

Cantidad

Calidad

Servicios

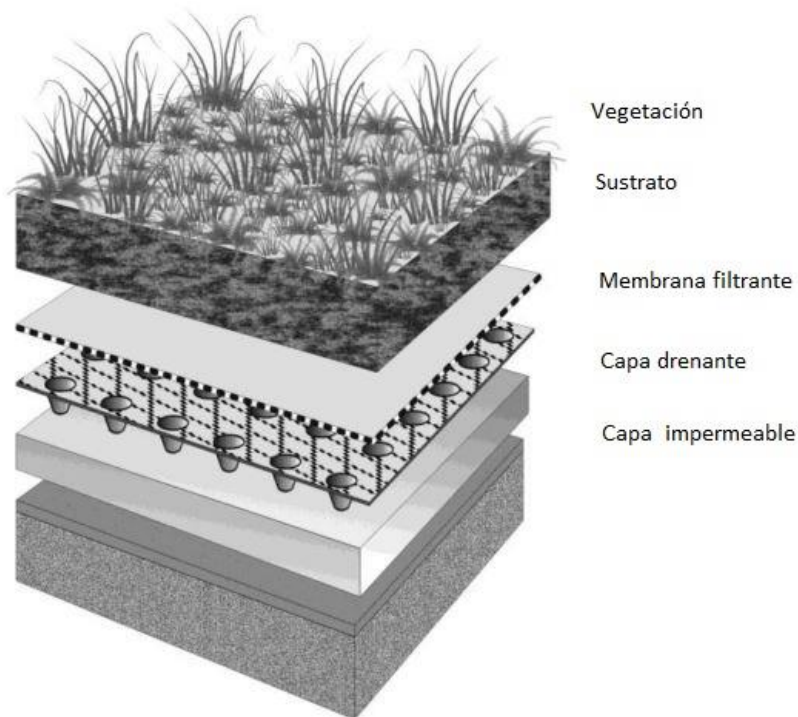


Fuente: *Sistemas urbanos de drenaje sostenible. Universidad de Cantabria*

Tejados verdes

Técnica de construcción mediante la cual la cubierta de un edificio se adapta para el crecimiento de vegetación.

SISTEMA MULTICAPA



TIPOS

Extensivos	Intensivos
20 – 200 mm	> 200 mm
No accesibles	Accesibles como espacio público
Musgos, sedums ...	Plantas perennes, arbustos, árboles e incluso agricultura
	

Green Roofs and Walls Policy Implementation Plan. Sidney

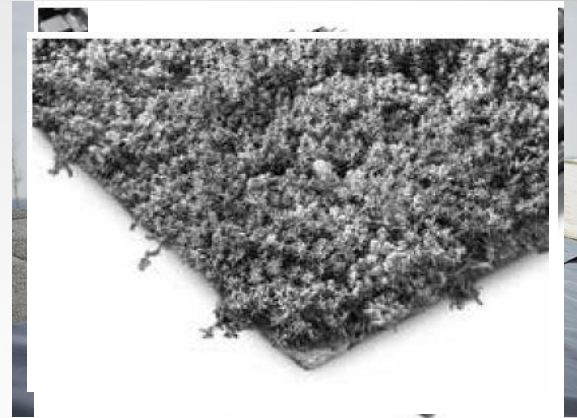
Beneficios



Aspectos técnicos I

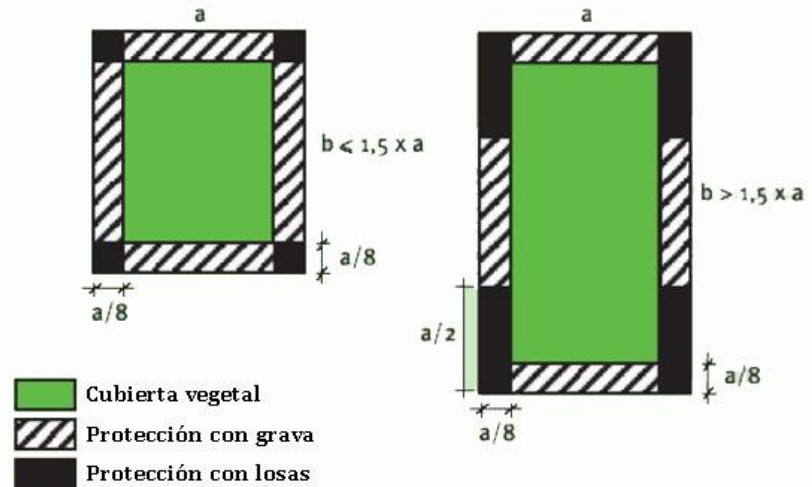
SISTEMA MULTICAPA

- Membrana impermeable
- Capa drenante
- Capa filtrante
- Sustrato
- Vegetación



SEGURIDAD

- Evacuación de las aguas
- Accesos
- Operaciones de mantenimiento
- Resistencia al fuego
- Resistencia al viento



Aspectos técnicos II

ESTRUCTURA DEL TEJADO

- Inclinación
- Espacio disponible
- Capacidad estructural

▲ Medidas de seguridad necesarias en función

SOBRECARGAS POR USO

Cubierta solamente accesible para su conservación	100 kg/m ²
Cubierta de uso privado	150 kg/m ²
Cubierta de uso público	(según el uso)

Fuente: ZINCO

SOBRECARGA SEGÚN TIPO DE CUBIERTA

Cubierta extensiva	< 150 Kg/m ²
Cubierta intensiva	≥ 350 Kg/m ²

Fuente: Normativas
Técnicas de Jardinería

Fuente: DB-SE-AE:
Seguridad
Estructural,
Acciones en la
Edificación

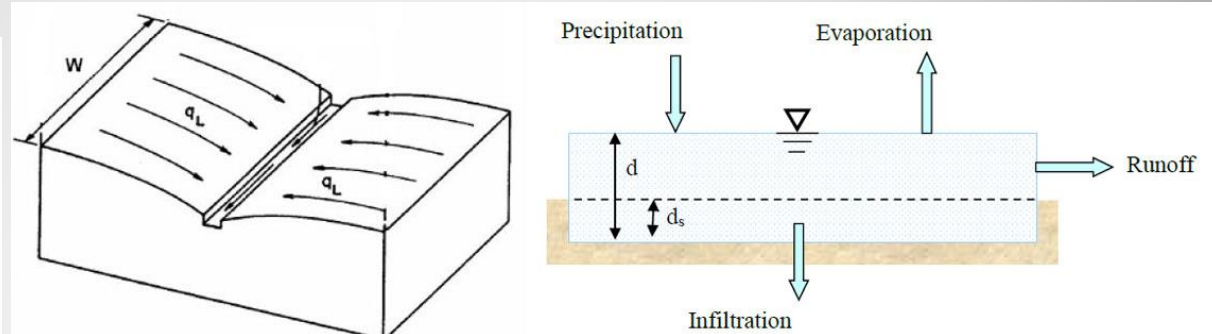
SWMM5

MODELO CONCEPTUAL



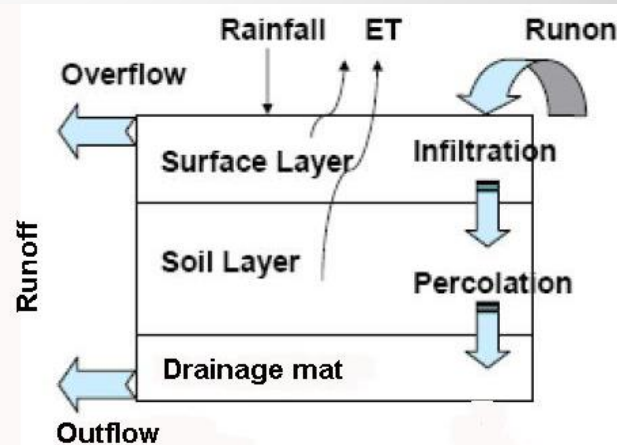
Fuente: *Manual SWMM5*

MODELO LLUVIA - ESCORRENTÍA



Fuente: *Manual SWMM5*

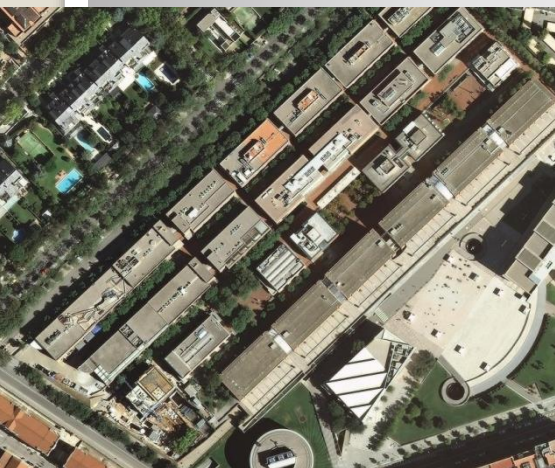
DIAGRAMA CONCEPTUAL DE UN TEJADO VERDE



Fuente: *Manual SWMM5*

Caso de estudio

CARACTERÍSTICAS DE LOS PAQUETES DE TEJADO VERDE



Capa	Característica	Unidades	Valor
Superficie	Altura de berma	mm	25
	Volumen vegetación	Fracción	0.15
	Rugosidad Manning		0.40
	Pendiente	%	1
Sustrato	Grosor	mm	Variable (100, 150, 200)
	Porosidad	vol. Frac.	0.40
	Capacidad	vol. Frac.	0.27
	Punto de marchitez	vol. Frac.	0.10
	Conductividad	mm/h	50
	Pendiente conductividad		45
	Altura de succión	mm	3.50
Capa drenaje	Grosor	mm	25
	Fracción de huecos	Fracción	0.30
	Rugosidad Manning		0.25

SOBRECARGAS

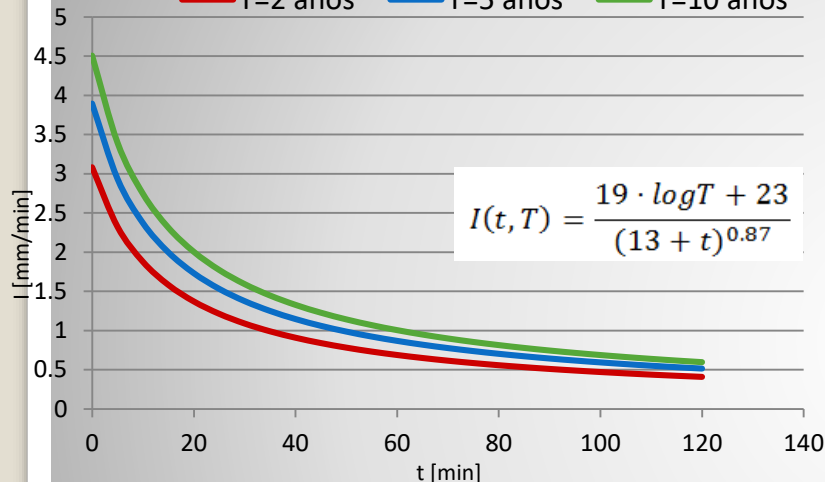
Espesor [mm]	Seco [kg/m ²]	Saturado [kg/m ²]	Anegado [kg/m ²]
200	200	286	311
150	153	219	244
100	105	151	176

Eventos aislados I

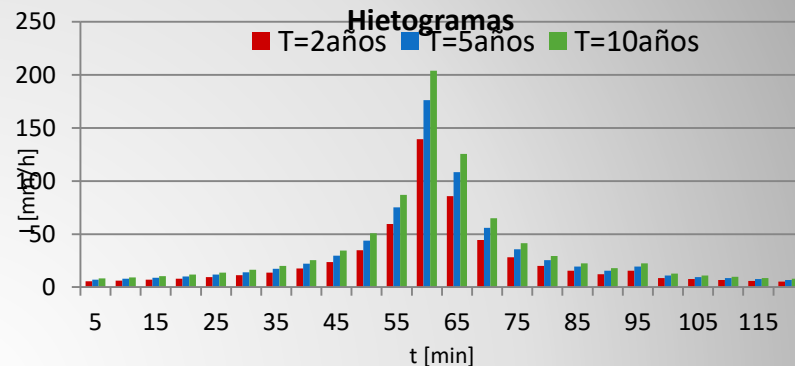
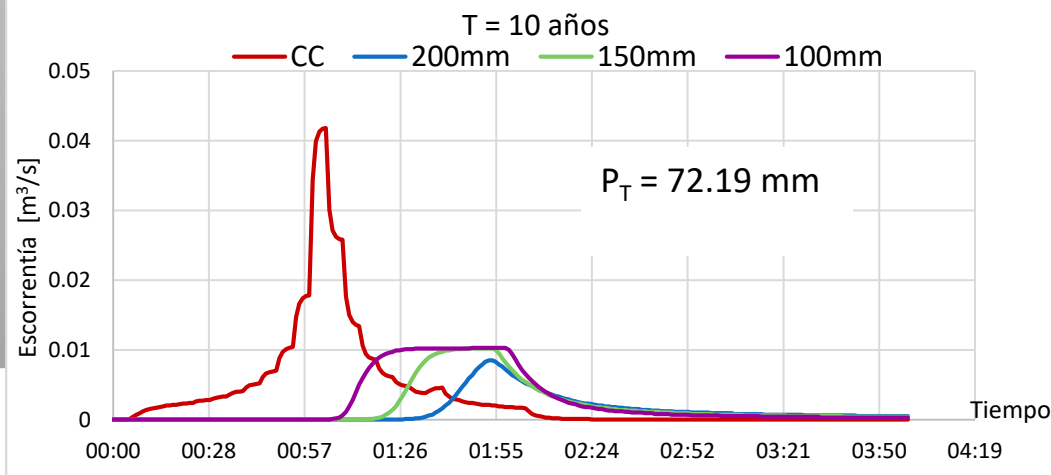
PLUVIOMETRÍA

IDF Barcelona

— T=2 años — T=5 años — T=10 años



RESULTADOS PARA DIFERENTES GROSORES



Cubierta	E_T [mm]	E_{coef}
CV1-200mm	25.45	0.353
CV2-150mm	37.88	0.525
CV3-100mm	50.01	0.693
C. Convencional	72.09	0.999

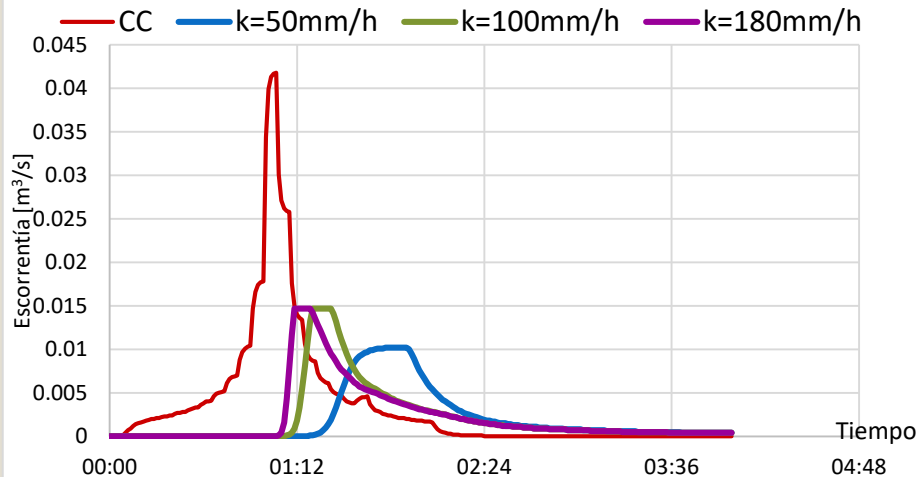
Cubierta	E_T [mm]	E_{coef}
CV1-200mm	4.69	0.095
CV2-150mm	15.38	0.312
CV3-100mm	27.39	0.555
C. Convencional	49.26	0.998

Cubierta	E_T [mm]	E_{coef}
CV1-200mm	15.92	0.255
CV2-150mm	28.17	0.452
CV3-100mm	40.28	0.646
C. Convencional	62.26	0.998

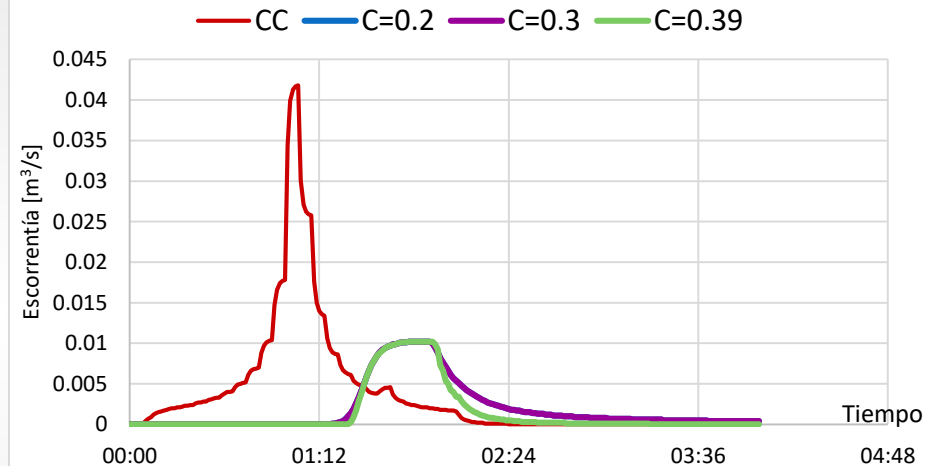
Eventos aislados II

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

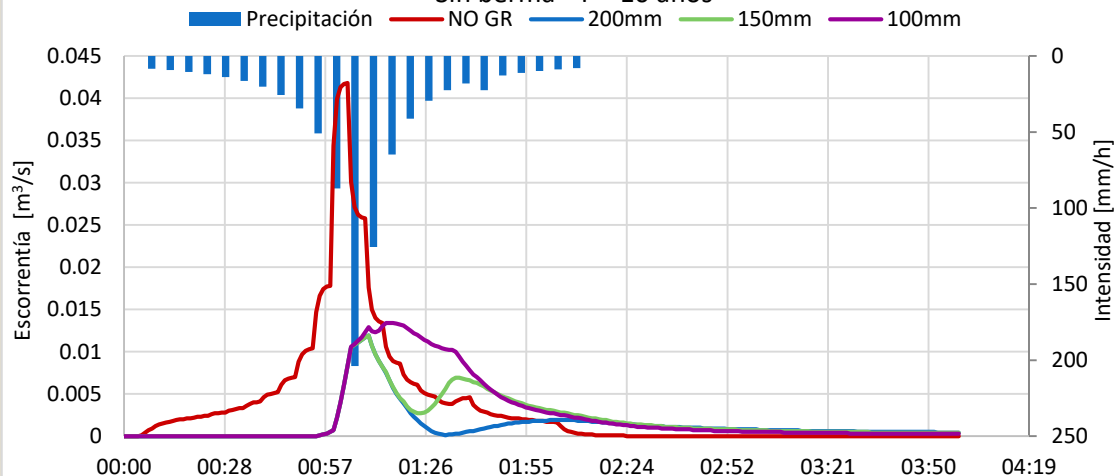
Variación de permeabilidad - T=10años



Variación de capacidad- T=10años



Sin berma - T = 10 años



Cubierta	E_{sup} [mm]	$E_{drenada}$ [mm]
CV-200mm	14.27	11.63
CV2-150mm	14.27	23.75
CV3-100mm	14.27	35.29
C. Resultados sin berma	72.9	0
Convencional		

Simulación continua I

PLUVIOMETRÍA



Fuente: GoogleEarth

- Observatorio meteorológico de Fabra, Barcelona. $P_T = 539.8$ mm
- Estación meteorológica de Granollers. $P_T = 523.8$ mm

Características del clima Mediterráneo

- Variabilidad espacial y temporal
- Irregularidad diaria y contribución al total anual
- Marcada estacionalidad
- Eventos cortos pero intensos (torrencialidad)
- Dificultad de previsión

EVAPOTRANSPIRACIÓN

$$ET_0 \times K_C = ET_{\text{Real}}$$



- $P - ET_0 > 0 \rightarrow K_C$ óptimo o déficit
- $P - ET_0 < 0 \rightarrow K_C$ déficit o supervivencia

Escenario 1 = año normal
(óptimo y déficit)

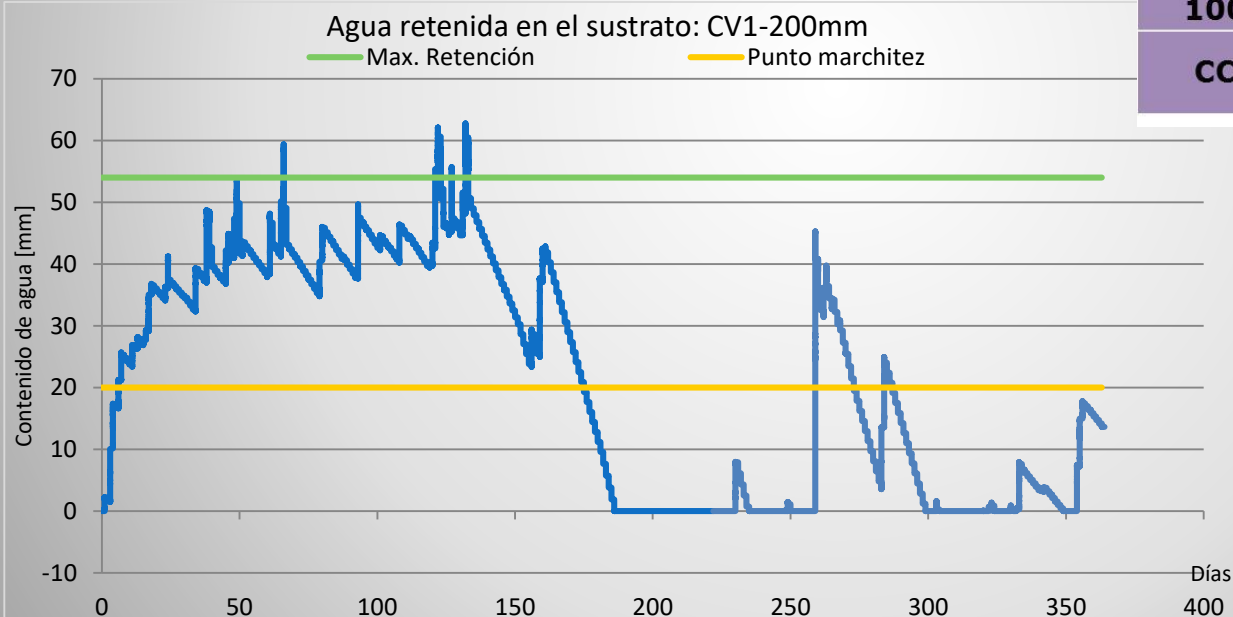
Escenario 2 = año seco (déficit
y supervivencia)



Efecto del cambio climático

Simulación continua II

BARCELONA



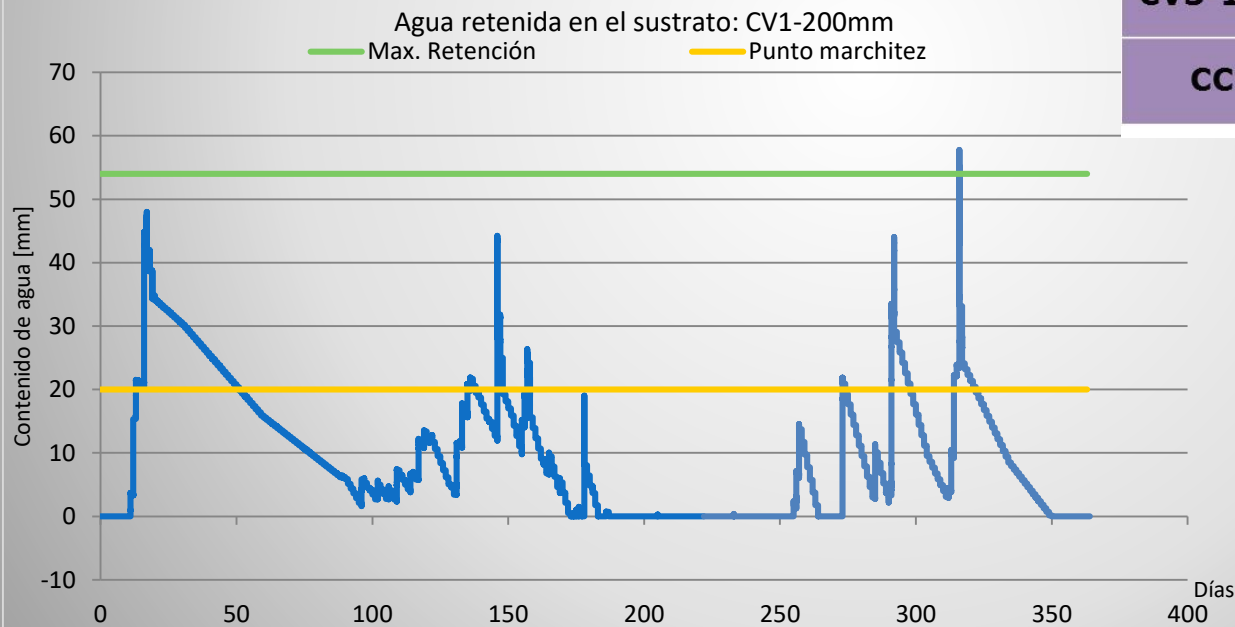
P=538.9
mm

ESCENARIO 1

	ET [mm]	E _T [mm]	E _R [l/s]	E _{Co} eff
CV1- 200	248.5 6	276.5 0	0.9	0.5 13
CV2- 150	231.2 7	293.7 9	1.9	0.5 45
CV3- 100	206.4 0	319.5 7	4	0.5 93
CC	22.65	516.2 5	14.5	0.9 57

Simulación continua III

GRANOLLERS



P=543.23
mm

ESCENARIO 1

	ET [mm]	E _T [mm]	E _R [l/s]	E _{Co} eff
CV1-200	235.0 1	300.3 6	7.4	0.5 53
CV2-150	218.4 1	324.9 3	8.3	0.5 98
CV3-100	185.6 4	357.6 7	9.1	0.6 58
CC	34.04	509.1 9	18.9	0.9 37

6. Conclusiones

Los tejados verdes suponen una solución para descargar el sistema de drenaje de las ciudades. El porcentaje de reducción de escorrentía en un edificio dependerá del espesor del sustrato y antecedentes climáticos. En Barcelona varía entre 48 y 32% y en Granollers entre 45 y 29%. Los caudales pico se reducen a más de la mitad.

Además tiene beneficios añadidos tanto a nivel del edificio como a escala ciudad.