



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Modelización de Low Impacts Developments a través
de la nueva versión del software SWMM (V.5.1)

Autor/es

Andrea Yesenia Jiménez Camacho

Director/es

Beniamino Russo

Escuela Universitaria Politécnica La Almunia
2015



eupla



Universidad
Zaragoza

**ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA
DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA (ZARAGOZA)**

MEMORIA

Modelización de Low Impacts
Developments a través de la nueva
versión del software SWMM (V.5.1)

423.13.116

Autor: **Andrea Yesenia Jiménez Camacho**

Director: **Beniamino Russo**

Fecha: **30-Junio-2015**

ÍNDICE DE CONTENIDO SIMPLE

1. RESUMEN.....	1
2. ABSTRACT.....	3
3. INTRODUCCIÓN.....	5
4. HIDROLOGÍA URBANA.....	7
5. PLUVIOMETRÍA.....	10
6. TÉCNICAS DE DRENAJE SOSTENIBLE (TEDUS).....	28
7. CUBIERTAS VERDES.....	44
8. MODELADO DE TEDUS EN SWMM V5.1.007.....	78
9. APLICACIÓN DE CUBIERTAS VERDES EN LA CUENCA DE ESTUDIO.....	98
10. CONCLUSIONES	113
11. BIBLIOGRAFÍA.....	116

ÍNDICE DE CONTENIDO COMPLETO

<u>1. RESUMEN</u>	<u>1</u>
<u>2. ABSTRACT</u>	<u>3</u>
<u>3. INTRODUCCIÓN</u>	<u>5</u>
<u>4. HIDROLOGÍA URBANA</u>	<u>7</u>
<u>4.1. CICLO HIDROLÓGICO</u>	<u>7</u>
<u>4.2. PRECIPITACIÓN</u>	<u>7</u>
<u>4.3. PÉRDIDAS HIDROLÓGICAS</u>	<u>9</u>
<u>5. PLUVIOMETRÍA</u>	<u>10</u>
<u>5.1. SERIE CONTINUA DE LLUVIA ANUAL</u>	<u>10</u>
<u>5.2. LLUVIA DE DISEÑO</u>	<u>11</u>
<u>5.2.1. Análisis de calidad de datos de series temporales</u>	<u>16</u>
<u>5.2.2. Cálculo de la máxima precipitación diaria para distintos períodos de retorno</u>	<u>21</u>
<u>5.2.2.1. Método de Gumbel</u>	<u>21</u>
<u>5.2.2.2. Distribución SQRT-ETmáx</u>	<u>23</u>
<u>5.2.3. Curva IDF</u>	<u>25</u>
<u>5.2.4. Bloques alternados</u>	<u>27</u>
<u>6. TÉCNICAS DE DRENAJE SOSTENIBLE (TEDUS)</u>	<u>28</u>
<u>6.1. OBJETIVO</u>	<u>28</u>
<u>6.2. CLASIFICACIÓN</u>	<u>28</u>
<u>6.2.1. Medidas estructurales: Infiltración</u>	<u>30</u>
<u>6.2.1.1. Sumideros</u>	<u>31</u>
<u>6.2.1.2. Pozos, zanjas y depósito de infiltración</u>	<u>32</u>
<u>6.2.1.3. Pavimentos permeables</u>	<u>33</u>
<u>6.2.2. Medidas estructurales: Filtración</u>	<u>34</u>
<u>6.2.2.1. Áreas de biorretención</u>	<u>35</u>
<u>6.2.2.2. Zanjas filtrantes</u>	<u>36</u>
<u>6.2.2.3. Swales (cunetas verdes)</u>	<u>37</u>
<u>6.2.2.4. Franjas filtrantes</u>	<u>38</u>
<u>6.2.3. Medidas estructurales: Detención y retención</u>	<u>39</u>
<u>6.2.3.1. Depósitos de detención</u>	<u>39</u>
<u>6.2.3.2. Estanques de retención</u>	<u>40</u>
<u>6.2.3.3. Drenaje geocelular</u>	<u>41</u>

<u>6.2.4. Medidas estructurales: Uso de vegetación</u>	<u>42</u>
<u>6.2.4.1. Humedales</u>	<u>42</u>
<u>6.2.4.2. Cubiertas verdes</u>	<u>43</u>
<u>7. CUBIERTAS VERDES</u>	<u>44</u>
<u>7.1. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS CUBIERTAS VERDES</u>	<u>45</u>
<u>7.2. TIPOS DE CUBIERTAS VERDES</u>	<u>45</u>
<u>7.2.1. Cubiertas verdes extensivas</u>	<u>47</u>
<u>7.2.2. Cubiertas verdes semi-intensivas</u>	<u>51</u>
<u>7.2.3. Cubiertas verdes intensivas</u>	<u>52</u>
<u>7.3. DISEÑO HIDRÁULICO Y CALIDAD DEL AGUA</u>	<u>55</u>
<u>7.4. ESPECIFICACIONES FÍSICAS</u>	<u>57</u>
<u>7.4.1. Resistencia al fuego</u>	<u>57</u>
<u>7.4.2. Aislamiento</u>	<u>57</u>
<u>7.4.3. Inclinación del tejado</u>	<u>58</u>
<u>7.4.4. Soporte de cubierta</u>	<u>58</u>
<u>7.4.5. Impermeabilización</u>	<u>59</u>
<u>7.4.6. Capa de drenaje</u>	<u>59</u>
<u>7.4.7. Capa de filtro geotextil</u>	<u>60</u>
<u>7.4.8. Suelo medio / crecimiento</u>	<u>60</u>
<u>7.4.9. El almacenamiento de agua / riego</u>	<u>61</u>
<u>7.4.10. Desague</u>	<u>61</u>
<u>7.4.11. Acceso</u>	<u>62</u>
<u>7.4.12. Paisaje y vegetación</u>	<u>62</u>
<u>7.5. REQUISITOS PARA EL FUNCIONAMIENTO Y MANTENIMIENTO</u>	<u>64</u>
<u>7.5.1. Construcción</u>	<u>65</u>
<u>7.5.2. Coste</u>	<u>65</u>
<u>7.5.3. Beneficios y costes</u>	<u>67</u>
<u>7.6. ALTERNATIVAS DE CUBIERTAS VERDES</u>	<u>69</u>
<u>7.6.1. Alternativas de capas</u>	<u>69</u>
<u>7.6.2. Alternativas de sustratos</u>	<u>71</u>
<u>7.6.3. Alternativas de especies vegetales</u>	<u>73</u>
<u>7.6.3.1. Plantas suculentas: género sedum</u>	<u>74</u>
<u>7.6.3.2. Plantas aromáticas: familia Lamiáceas</u>	<u>75</u>
<u>7.6.3.3. Plantas gramíneas: familia poeáceas</u>	<u>76</u>
<u>7.6.3.4. Plantas arbóreas</u>	<u>77</u>

ÍNDICES

8. MODELADO DE TEDUS EN SWMM V5.1.007.....	78
8.1. DEFINICIÓN DEL MÓDULO LID CONTROLS	78
8.2. UBICACIÓN DE LID's DENTRO DE SUBCUENCIAS.....	79
<i>8.2.1. Parámetros requeridos para definir LID's dentro de subcuenca.....</i>	<i>80</i>
8.3. CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS EN CUBIERTAS VERDES.....	82
<i>8.3.1. Parámetros de superficie.....</i>	<i>82</i>
<i>8.3.2. Parámetro de sustrato.....</i>	<i>83</i>
<i>8.3.3. Parámetros de lámina drenante.....</i>	<i>85</i>
8.4. CALIDAD.....	87
<i>8.4.1. Contaminantes.....</i>	<i>91</i>
<i>8.4.2. Uso del suelo.....</i>	<i>93</i>
9. APLICACIÓN DE CUBIERTAS VERDES EN LA CUENCA DE ESTUDIO.....	98
9.1. UBICACIÓN.....	98
9.2. URBANIZACIÓN DE LA ZONA.....	99
9.3. DIVISIÓN DE CUENCAS.....	100
9.4. RED DE DRENAJE.....	103
9.5. MODELIZACIÓN DE CUENCA DE ESTUDIO EN SWMM	104
9.6. ELECCIÓN DE PARÁMETROS PARA LA CUENCA DE ESTUDIO.....	105
9.7. MUESTRA DE RESULTADOS.....	107
<i>9.7.1. Simulaciones para una precipitación máxima con periodo de retorno de 10 años.....</i>	<i>108</i>
<i>9.7.2. Simulaciones para una precipitación máxima con T=2 y 5 años.....</i>	<i>110</i>
<i>9.7.3. Simulaciones para una lluvia continua anual.....</i>	<i>111</i>
10. CONCLUSIONES	113
11. BIBLIOGRAFÍA.....	116

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1: Reparto de escorrentía e infiltración en un entorno natural (Fuente: Coupe, S., 2003).....</i>	8
<i>Ilustración 2: Reparto de escorrentía e infiltración en un entorno urbano (Fuente: Coupe, S., 2003).....</i>	8
<i>Ilustración 3: Serie continua de lluvia correspondiente a 2013, datos diezminutales.</i>	11
<i>Ilustración 4: Mapa de isolíneas para la estimación del factor regional (MOPU,1990).</i>	25
<i>Ilustración 5: Curvas IDF para distintos periodos de retorno.....</i>	26
<i>Ilustración 6: Curva IDF para un periodo de retorno de 10 años.....</i>	26
<i>Ilustración 7: Representación bloques alternados.....</i>	27
<i>Ilustración 8: Jardines de lluvia (Fuente: www.susdrain.org).....</i>	30
<i>Ilustración 9:Área de bioretención (Fuente: www.susdrain.org, 2012).....</i>	35
<i>Ilustración 10: Reproduciendo la naturaleza sobre las cubiertas, Fuente: Zinco cubiertas ecológicas, 2014.</i>	44
<i>Ilustración 11: Tipos de cubiertas verdes</i>	45
<i>Ilustración 12: Cubierta extensiva: sedum tapizante. (Fuente: Zinco S.L., 2014).....</i>	47
<i>Ilustración 13: Cubierta extensiva: tapizante floral. (Fuente: Zinco S.L, 2014)</i>	48



<i>Ilustración 14: Cubierta extensiva: tapizante floral (cubierta invertida). (Fuente: Zinco S.L., 2014).....</i>	49
<i>Ilustración 15: Cubierta extensiva: pendiente 20º. (Fuente: Zinco S.L, 2014)</i>	49
<i>Ilustración 16: Cubierta extensiva: pendiente 35º. (Fuente: Zinco S.A, 2014)</i>	50
<i>Ilustración 17: Tipo cubierta semi-intensiva: plantas aromáticas.(Fuente: Zinco S.L., 2014)</i>	51
<i>Ilustración 18: Tipo cubierta intensiva: cubierta jardin. Fuente: Zinco S.L., 2014.</i>	53
<i>Ilustración 19: Capacidad de almacenamiento de cubiertas verdes (Fuente: adaptado de English Nature, 2003).....</i>	56
<i>Ilustración 20: Diferencia de temperatura entre cubierta normal y verde(Fuente: EPA, 2013).....</i>	57
<i>Ilustración 21: Pendientes para cubiertas verdes. (Fuente: www.greenroofguide.co.uk, 2005).....</i>	58
<i>Ilustración 22: Ejemplo: detalle de desagüe en un cubierta verde (Fuente: adaptado de Wilson et al,2004).....</i>	62
<i>Ilustración 23: Siembra de cubiertas verdes según su profundidad (Fuente:Recuperado de www.growinggreenguide.org, 2014).....</i>	63
<i>Ilustración 24: Ejemplo de capa aislante. (Fuente: Cemat, 2010).....</i>	69
<i>Ilustración 25: Ejemplo de capa drenante Platon De-25.(Fuente: Sánchez-Pando, 2008).....</i>	70

<i>Ilustración 26: Ejemplo de geotextil GEOPROMA®. (Fuente: DUPONT, 2007).....</i>	70
<i>Ilustración 27: Triángulo de texturas de suelo según USDA. (Fuente: Recuperado www.monografías.com/propiedadesdelsuelo,2009).....</i>	72
<i>Ilustración 28: Sedum sediforme. (Fuente:www.ipe.csic.es 2014).....</i>	74
<i>Ilustración 29: Sedum album L. (Fuente:www.ipe.csic.es, 2014).....</i>	74
<i>Ilustración 30: Thymus vulgaris. (Fuente:www.ipe.csic.es, 2015).....</i>	75
<i>Ilustración 31: Lavandula latifolia. (Fuente:www.ipe.csic.es, 2014).....</i>	75
<i>Ilustración 32: Rosmarinus officinalis L. (Fuente:www.ipe.csic.es, 2014).....</i>	75
<i>Ilustración 33: Cynodon dactylon. (Fuente:www.ipe.csic.es, 2014).....</i>	76
<i>Ilustración 34: Stipa parviflora. (Fuente:www.ipe.csic.es, 2014).....</i>	76
<i>Ilustración 35: Prunus cerasifera atropurpurea. Fuente:herbariobotanicoornamental.com, 2012.....</i>	77
<i>Ilustración 36: Acer monspessulanum. Fuente:www.ipe.csic.es, 2014.....</i>	77
<i>Ilustración 37: Albizzia julibrissin. Fuente: jardinesdelaoliva.com, 2010.....</i>	77
<i>Ilustración 38: Implantación de técnica LID en una cuenca.....</i>	79
<i>Ilustración 39: Ubicación de LID en una cuenca.....</i>	80



Ilustración 40: Ventana de configuración LID Control Editor para cubiertas verdes...82

*Ilustración 41: Capa drenaje marca Floradain para cubiertas extensivas. (Fuente
www.zinco.es, 2014).....86*

*Ilustración 42: Capa drenaje marca Floradain para cubiertas intensivas. (Fuente:
www.zinco.es, 2014).....86*

Ilustración 43: Introducción de contaminantes desde el nodo.....89

Ilustración 44: Introducción de contaminantes desde el editor de contaminantes.....90

Ilustración 45: Introducción de contaminantes desde el editor de usos del suelo.....91

Ilustración 46: Ubicación de la zona de estudio.....98

Ilustración 47: Zona urbanizada.....99

Ilustración 48: Zona de estudio dividida en subcuencas.....100

Ilustración 49: Esquema de la red de drenaje.....103

Ilustración 50: Representación de subcuencas, pozos y tuberías.....104

Ilustración 51: Hidrograma de salida de lluvia máxima con T=10años.....108

*Ilustración 52: Hidrograma de salida asociada a una lluvia máxima de periodo de
retorno igual 5 años.....110*

*Ilustración 53: Hidrograma de salida asociada a una lluvia máxima de periodo de
retorno igual 2 años.....110*

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Pérdidas por evapotranspiración 2013, (Fuente: oficinareganteragon.es, 2013).....</i>	9
<i>Tabla 2: Histórico de precipitaciones , estación aeropuerto de Zaragoza. Fuente: www.iaest.com, 2015.....</i>	15
<i>Tabla 3: Media y varianza de las precipitaciones.....</i>	16
<i>Tabla 4: Valor crítico estadístico para el test Kolmogorov Smirnov.....</i>	17
<i>Tabla 5: Valor crítico estadístico para el test Kolmogorov-Smirnov con n=74</i>	17
<i>Tabla 6: Resumen de los cálculos par la aplicación del test de Kolmogorov-Smirnov.</i>	20
<i>Tabla 7: Método de Gumbel.....</i>	22
<i>Tabla 8: Método SQRT-ETmáx.....</i>	24
<i>Tabla 9: Resultados obtenidos Gumbel y SQRT-ETmáx.....</i>	24
<i>Tabla 10: Método de los bloques alternados.....</i>	27
<i>Tabla 11: Características de los tipos de cubiertas verdes.</i>	46
<i>Tabla 12: Resumen características cubiertas extensivas Fuente: Cubiertas verdes en Barcelona, BCNecología, 2010.....</i>	46



<i>Tabla 13: Comparación de cubiertas verdes: Extensivos e Intensivos (Fuente: adaptado de "Greenbacks from Green Roofs: Forging a New Industry In Canada," CMHC. 1998.)</i>	54
<i>Tabla 14: Costes aproximados de la implantación de cubiertas verdes.....</i>	67
<i>Tabla 15: Beneficios y costes de cubiertas verdes (Fuente: EPA,2006)</i>	68
<i>Tabla 16: Clasificación de especies vegetales: S. sediforme.....</i>	74
<i>Tabla 17: Clasificación de especies vegetales: S. ambum L.....</i>	74
<i>Tabla 18: Clasificación de especies vegetales: T. vulgaris.....</i>	75
<i>Tabla 19: Clasificación de especies vegetales: L. latifolia</i>	75
<i>Tabla 20: Clasificación de especies vegetales: R. officinalis.....</i>	75
<i>Tabla 21: Clasificación de especies vegetales: C. dactylon.....</i>	76
<i>Tabla 22: Clasificación de especies vegetales: S. parviflora.....</i>	76
<i>Tabla 23: Especies arbóreas seleccionadas.....</i>	77
<i>Tabla 24: Propiedades físicas del suelo según texturas. (Fuente: Schwab,1996)</i>	84
<i>Tabla 25: Parámetros de Green Ampt para distintas texturas. (Fuente: adapt. de Rawls and Brakensiek, 1983)</i>	85
<i>Tabla 26: Concentraciones medias de varios indicadores de contaminación según estudio de PROMEDSU.....</i>	89

<i>Tabla 27: Contaminantes presentes en el estudio.....</i>	93
<i>Tabla 28: Calidad, Uso del Suelo, Datos Generales.....</i>	94
<i>Tabla 29: Calidad, uso del suelo y datos de acumulación de contaminantes.....</i>	95
<i>Tabla 30: Calidad, uso del suelo y datos de arrastre de contaminantes.....</i>	96
<i>Tabla 31: - Rendimientos medios alcanzados por distintas técnicas de tratamiento de las aguas de escorrentía (Fuente:"Stormwater Best Management Practices (BMP) Performance Analysis", US-EPA- Revisado en 2010).....</i>	97
<i>Tabla 32: Parámetros y criterios para el dimensionamiento de la red de drenaje....</i>	103
<i>Tabla 33: Parámetros SWMM para cubiertas verdes en la cuenca de estudio.....</i>	105
<i>Tabla 34: Resultados de simulación de lluvia continua anual correspondiente al 2013</i>	111
<i>Tabla 35: Comparativa de infiltración y escorrentía con distintos tipos de cubiertas para una lluvia continua 2013.....</i>	112

1. RESUMEN

Las ciudades han ido creciendo sin considerar el efecto que supone la modificación de las propiedades físicas del suelo, esta modificación consiste en el aumento de la zona impermeable, por lo que toda el agua proveniente de la lluvia al no poder infiltrarse en el terreno se convierte en escorrentía, al aumentar el volumen de flujo las EDAR no tienen la capacidad para tratar estos picos, por lo que el volumen remanente se vierte al medio sin tratar, esto supone un gran coste medioambiental.

El objetivo del presente estudio es dar una alternativa sostenible, para ello se plantea el uso de Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible (TEDUS), en concreto la implantación de cubiertas verdes, varios estudios han demostrado que reducen significativamente el volumen de escorrentía.

El cálculo se ha realizado con la nueva y nueva versión del software Storm Water Management Model de la EPA SWMM V5.1.007, que incluye un modulo específico para cubiertas verdes, permitiendo definir las tres capas de las que se compone una cubierta verde.

La zona de estudio se encuentra situado en la ciudad de Zaragoza, en el barrio de Miralbueno, es una área urbana no consolidada de 262,75 hectáreas.

El estudio se realizará para una lluvia de diseño, así como para una lluvia continua.

Se ha realizado una comparativa del uso de cubiertas verdes (extensiva, semi intensiva e intensiva) con la cubierta convencional, dando como resultado una disminución de volumen vertido al medio de hasta el 89%, esta reducción se debe al aumento de las pérdidas por infiltración y evapotranspiración.

En este estudio se ha conseguido los siguientes objetivos:

- Reducción del caudal pico.
- Reducción del volumen de escorrentía.
- Reducción del volumen vertido al medio.
- Aumento de pérdidas por infiltración y evapotranspiración.

Resumen

Por lo que quedan demostrado los beneficios hidrológicos, medioambientales y sociales de las cubiertas verdes.

Palabras clave: TEDUS, Cubiertas verdes, SWMM, DSU, precipitación

2. ABSTRACT

The cities have been growing without considering the effect that supposes the modification of the physical properties of the soil, this modification consists of the increase of the impermeable zone, what the whole water from the rain on not having been able to infiltrate into the area turns into run-off, on having increased the volume of flow the EDAR do not have the aptitude to treat these beaks, by what the remaining volume is spilt to the way without treating, this supposes a great environmental cost. The aim of the present study is to give a sustainable alternative, for it there appears the use of Low Impact Development (LID's), in I make concrete the implantation of green roofs, several studies have demonstrated that they be able to reduce significantly the volume of run-off.

The calculation there has realized with the new version of the software Storm Water Management Model of the EPA SWMM V5.1.007, that it includes a specific module for green roofs, allowing to define three caps of which a green roof consists. The zone of study is placed in the city of Saragossa, in Miralbueno's neighborhood, is an urban area not consolidated of 262, 75 Ha. The study will be realized for a rain of design, as well as for a constant rain. The comparative one has been realized of the use of green roofs (extensive, semi intensive and intensive) with the conventional roof, giving like proved a decrease of volume spilt to the way of up to 89 percent, this reduction owes to the increase of the losses for infiltration and evapotranspiration.

This study has achieved the following objectives:

- Reduction of peak flow.
- Reducing the volume of runoff.
- Reducing the volume discharged to the environment.
- Increase infiltration and evapotranspiration losses.

For what he remains demonstrated the hydrological, environmental and social benefits of the green roofs.

Key words: LID's, green roofs, SWMM, DSU, rainfall

Abstract

3. INTRODUCCIÓN

El siguiente estudio nace de la necesidad de dar respuestas a los nuevos retos de gestión urbana, con la finalidad de reducir los costes y riesgos generados por estos. El principal objetivo de estudio es minimizar los efectos producidos por las precipitaciones en zonas urbanizadas, y por tanto impermeabilizadas. Se trata de encontrar una metodología para este fin, como es el caso de las Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible (TEDUS).

La técnica seleccionada para este estudio es la implantación de cubiertas verdes, una TEDUS ya establecida en otros países y que han demostrado disminuir de manera significativa el volumen de escorrentía, así como disminuir el caudal pico.

El continuo y rápido crecimiento de las ciudades, así como el cambio de condiciones climáticas ha dado como resultado que las EDAR se queden infradimensionadas, y suponga que en muchos casos se tenga que verter directamente al medio, sin previo tratamiento.

Esta técnica trata de reproducir lo más fielmente posible, la situación del terreno previa a la impermeabilización.

Para un cálculo exacto de esta técnica de drenaje sostenible, se empleará el software SWMM, el cual permite el modelado hidrológico, además en su nueva versión 5.1 incluye un módulo específico para cubiertas verdes

El proceso a llevar cabo en este TFG es el siguiente:

Se recopila información acerca de los tipos de cubiertas verdes.

Se procede a analizar los datos de las precipitaciones obtenidas.

Se diseña una posible parcelación de la zona de estudio no urbanizada basada en el plan parcial del área.

Se diseña la red unitaria de saneamiento y se traslada a SWMM.

Se definen las áreas que serán ocupadas por cubiertas verdes y se especifican los los parámetros necesarios para cada tipo de cubierta.

Se ejecuta el modelo y se analizan los resultados.

El objetivo final es contrastar, el efecto de aplicar cubiertas verdes, esto se verá expuesto en la disminución del volumen y contaminantes en las descargas al sistema unitario (DSU), así como en los ahorros energéticos que supongan la disminución de

Introducción

volumen bombeado a la EDAR.

El estudio no engloba los siguientes aspectos:

1.-El diseño de la red de alcantarillado en general, solo se centrará en las tuberías, dejando fuera todo lo relacionado con aliviaderos, arquetas, pozos de registro y demás instalaciones complementarias de la red de saneamiento, exceptuando el depósito de retención.

2. El proceso constructivo de la red de saneamiento ni de sus instalaciones complementarias.

4. HIDROLOGÍA URBANA

La **Hidrología Urbana** es una especialidad de la Hidrología que estudia el ciclo hidrológico en el medio urbano y se diferencia de la Hidrología General por las alteraciones que se producen en el ciclo del agua por el proceso de urbanismo y es base fundamental en la concepción, diseño, operación y mantenimiento de obras de aprovechamiento y manejo del agua tales como: captaciones, manejo, disposición y entrega de aguas superficiales o subterráneas en áreas urbanas o en sus cercanías, obras de defensa contra crecidas, inundaciones, erosión y socavación, procesos de contaminación por los sistemas de evacuación y otros eventos de naturaleza similar.

4.1. CICLO HIDROLÓGICO

El **ciclo hidrológico** o **ciclo del agua** es el proceso de circulación del agua entre las distintas partes de la hidrósfera. Movimiento continuo y cíclico del agua en la atmósfera, suelo y subsuelo en sus distintas fases, esto representa el equilibrio existente en los diferentes elementos físicos involucrados.

El **ciclo hidrológico** comienza con la **evaporación** del agua desde la superficie del océano. A medida que se eleva, el aire humedecido se enfriá y el vapor se transforma en agua: es la **condensación**. Las gotas se juntan y forman una nube. Luego, caen por su propio peso: es la **precipitación**.

Una parte del agua que llega a la superficie terrestre será aprovechada por los seres vivos; otra discurrirá por el terreno hasta llegar a un río, un lago o el océano. A este fenómeno se le conoce como **escorrentía**. Otro porcentaje del agua se filtrará a través del suelo, formando acuíferos o capas de agua subterránea. Este proceso es la **infiltración**. Toda esta volverá nuevamente a la atmósfera, debido principalmente a la evaporación.

4.2. PRECIPITACIÓN

La **precipitación** es cualquier forma de hidrometeoro que cae de la atmósfera y llega a la superficie terrestre. Ésta precipitación puede ser infiltrada, almacenada o

convertirse en escorrentía.

Las construcciones se ven profundamente influidas por los factores climáticos, especialmente las precipitaciones. Un correcto dimensionamiento del drenaje garantizará la calidad y vida útil de las infraestructuras

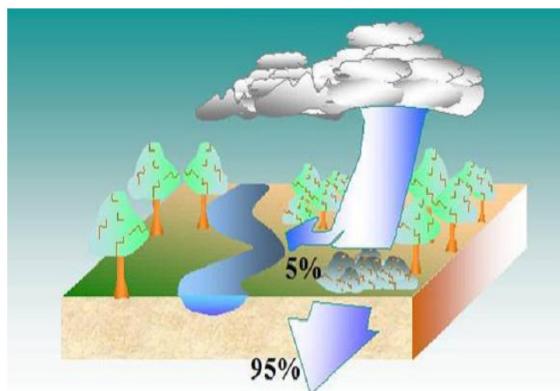


Ilustración 1: Reparto de escorrentía e infiltración en un entorno natural (Fuente: Coupe, S., 2003)

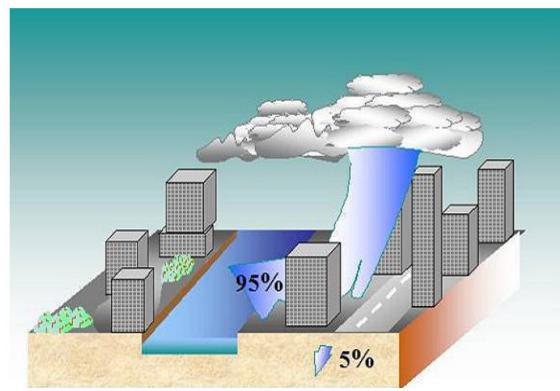


Ilustración 2: Reparto de escorrentía e infiltración en un entorno urbano (Fuente: Coupe, S., 2003)

Al urbanizar una zona, estamos modificando todas las variables físicas del terreno: se retira la vegetación, se impermeabiliza el suelo, se modifican las zonas de almacenamiento de agua, ... Es decir, se modifica el ciclo natural del agua pasando a formar parte del ciclo urbano del agua, siendo necesario en este último la intervención humana para transportar y tratar toda el agua convertida en escorrentía por las infraestructuras y edificaciones, controlando que la aportación de éstas no sean un riesgo para la población.

Es por ello que surge la necesidad de aplicar técnicas para intentar mitigar las consecuencias ambientales de modificaciones realizadas.

Como paso previo para llevar a cabo cualquier actuación de este tipo, es necesario conocer los datos de esta variable con el fin de realizar estudios. Existen una variedad de aparatos de medida, siendo los más extendidos actualmente los pluviómetros automáticos, los cuales miden la precipitación por tiempo, ya sea diezminutal, quinceminutal o treintaminutal, una vez obtenidos estos datos, se analizan su calidad basándose en 4 aspectos, la estacionariedad (que los cambios no sean superiores al 15%), homogeneidad (si proceden de la misma población), consistencia y adecuada (que la serie sea mayor de 25 años).

En el caso de la precipitación máximas se puede calcular con distribuciones estadísticas Gumbel, en la cual seleccionamos los valores máximos de todos los años hidrológicos (1 Oct. al 30 Sept.), de estos datos obtenemos la media y la desviación.

El hietograma de proyecto se puede calcular con curvas IDF o con patrones de distribución (Huff o SCS), en el caso de España las curvas IDF son las más empleadas.

Tormenta de proyecto a partir de curvas IDF._ existen varias formas:

- Lluvia constante en bloque.
- Tormenta triangular.
- Lluvia tipo sifalda.
- Lluvia doble triángulo.
- Método de bloques alternados.

En este estudio se empleará el método de los bloques alternados.

4.3. PÉRDIDAS HIDROLÓGICAS.

Las pérdidas hidrológicas o de precipitación son la parte de la lluvia caída (lluvia bruta) que no se transforma en escorrentía (lluvia neta). Esto es imprescindible para cualquier proceso de cálculo de sistema de drenajes. A todas estas variables relacionadas a continuación se les asigna un valor para su cuantificación y obtención del parámetro.

Los mecanismos de pérdidas hidrológicas son:

- Evapotranspiración.
- Evaporación.
- Interceptación.
- Almacenamiento en depresiones.
- Infiltración (métodos de cálculo o modelos).
 - Método de Horton.
 - Abstracción inicial.
 - Modelo índice \emptyset .
 - Modelo Green-Ampt.

En este estudio se emplea la media mensual de la estación de Montaña, correspondiente de 2013 de evapotranspiración (calculada con el método de FAO Blaney-Criddle), y en las pérdidas por infiltración se emplea el modelo de Green-Ampt.

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
ET_0 (mm/día)	1.07	1.74	2.82	4.08	5.01	6.15	6.27	5.7	4.27	2.57	1.92	0.68

Tabla 1: Pérdidas por evapotranspiración 2013, (Fuente: oficinaregantearagon.es, 2013)

5. PLUVIOMETRÍA

En este estudio se pretende estudiar el rendimiento hidráulico de las técnicas de drenaje urbano sostenible (TEDUS), para ello se han considerado dos supuestos de precipitación, una lluvia de diseño y una serie continua de lluvia anual.

Para la realización de la lluvia de diseño se ha partido de una serie histórica de datos, una vez determinada la calidad de esta serie, se ha calculado la máxima precipitación diaria con procedimientos estadísticos (Gumbel, SQRT-ETmáx), con la precipitación máxima calculada se ha determinado las curvas IDF según lo propuesto por la Dirección General de Carreteras (MOPU, 1990), de estas curvas escogemos la asociada a un periodo de retorno de 10 años y a partir de esta curva calculamos la lluvia de diseño con el método de los bloques alternados.

La serie continua de lluvia anual se ha obtenido directamente de la estación de medida, por lo que no requiere ningún cálculo.

5.1. SERIE CONTINUA DE LLUVIA ANUAL

Los datos se han obtenido del pluviómetro situado en la estación de canal, se ha seleccionado esta estación por la cercanía a la zona de estudio y por que el intervalo de toma de datos es diezminutal, por lo que se considera bastante precisa, para este estudio se tomará la lluvia continua correspondiente al año 2013.

Datos del pluviómetro

Código: 9443V
Altura sobre el nivel de mar: 258 metros.
Coordenadas UTM (huso 30): X. 676405,4 Y. 4611314,5

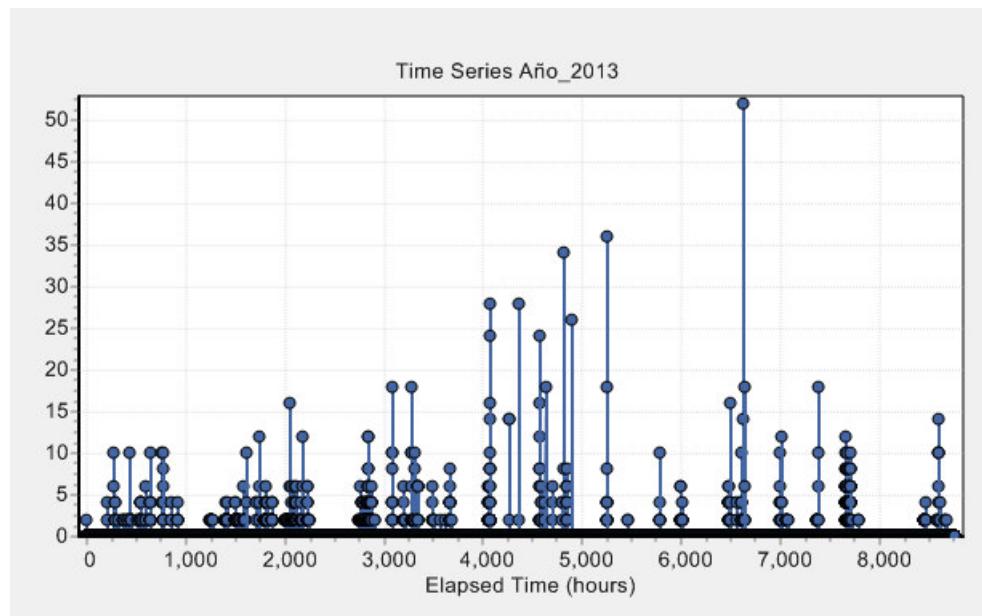


Ilustración 3: Serie continua de lluvia correspondiente a 2013, datos diezminutales.

5.2. LLUVIA DE DISEÑO

Los datos se han obtenido del pluviómetro situado en el aeropuerto de Zaragoza, del que se ha tomado la serie histórica, se ha seleccionado esta estación además de por la cercanía a la zona de estudio, es que cuenta con una serie de datos completa (74 años) y suficiente para poder realizar sobre los mismos los análisis estadísticos.

Los datos de precipitación diaria han sido recogidos cada treinta minutos desde enero 1941 hasta diciembre 2014, de los cuales se ha seleccionado el máximo mensual y a su vez de estos el máximo anual.

Datos del pluviómetro

Código: 9434
Altura sobre el nivel de mar: 247 metros.
Coordenadas UTM (huso 30): X. 665850 Y. 4614242

A continuación se expone la serie histórica con las precipitaciones máximas mensuales, así como las precipitaciones máximas anuales.

Serie histórica de precipitaciones

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Máximo
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1941	16.60	7.20	2.90	28.50	10.80	6.40	67.40	35.80	8.70	0.20	12.70	3.60	67.40
1942	3.50	7.40	8.10	35.40	7.50	19.50	2.00	6.80	12.60	11.80	18.40	3.40	35.40
1943	5.30	0.00	21.00	11.00	4.00	3.00	10.50	28.30	8.50	7.20	2.20	52.60	52.60
1944	0.00	8.40	3.80	10.20	24.30	12.20	1.70	2.40	14.30	13.40	4.00	9.50	24.30
1945	10.00	3.00	29.50	0.50	15.20	11.00	1.50	9.50	10.50	5.00	97.30	20.50	97.30
1946	10.00	8.00	7.00	16.00	47.40	17.00	6.00	12.00	11.70	18.00	5.50	6.00	47.40
1947	4.00	21.20	12.40	2.10	24.50	15.30	1.50	18.20	25.70	14.00	19.40	8.30	25.70
1948	16.40	12.40	6.40	14.20	17.40	4.90	5.20	22.70	4.00	7.70	1.60	1.80	22.70
1949	3.90	3.70	1.70	10.00	6.00	7.00	28.40	4.80	48.90	11.00	17.80	7.00	48.90
1950	6.40	4.70	13.60	8.00	46.40	7.50	8.50	14.90	3.40	0.60	7.50	40.20	46.40
1951	37.50	3.80	16.10	37.80	11.20	12.60	15.60	14.10	11.30	31.10	1.30	9.00	37.80
1952	9.70	1.30	7.70	18.10	5.90	5.20	32.2	11.60	13.50	4.00	7.70	5.80	32.20
1953	2.80	2.70	6.60	7.50	0.60	36.50	5.30	3.90	9.50	29.20	1.20	44.70	44.70
1954	8.40	2.30	66.40	11.70	16.10	19.70	30.90	2.40	5.40	1.70	8.50	0.80	66.40
1955	9.60	6.70	5.70	10.20	13.10	32.20	8.00	3.10	6.30	14.30	7.00	11.90	32.30
1956	9.20	8.10	9.50	6.10	44.20	7.50	1.20	39.50	15.40	7.30	17.00	5.60	44.20
1957	1.30	16.80	3.30	13.70	39.90	26.90	1.70	1.80	2.00	31.50	3.70	0.20	39.90
1958	22.70	1.50	4.60	5.80	5.00	10.50	9.30	3.70	9.60	3.50	10.00	33.00	33.00
1959	1.70	17.60	33.90	26.10	15.70	51.70	30.90	4.60	20.30	7.20	51.20	3.20	51.70
1960	8.70	4.40	6.70	0.90	10.00	12.00	6.20	1.60	30.70	32.60	4.20	14.90	32.60
1961	9.30	1.60	8.50	31.70	21.90	10.70	10.80	12.00	25.30	19.30	36.10	5.40	36.10
1962	12.50	7.70	5.20	6.30	17.50	4.70	0.00	0.60	30.70	34.10	6.40	10.20	34.10
1963	16.30	5.10	5.80	9.20	1.00	15.90	2.00	35.30	19.00	4.50	14.70	5.70	16.10

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Máximo
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1964	1.90	16.10	10.20	13.40	6.30	1.30	2.20	0.00	9.90	4.40	15.80	15.70	16.10
1965	9.40	11.10	8.60	1.20	3.00	19.00	4.00	0.10	8.70	22.20	16.80	8.30	22.20
1966	12.30	9.20	5.60	8.90	23.60	13.70	11.30	13.20	4.70	13.00	12.70	0.00	23.60
1967	2.10	5.00	0.80	10.70	1.60	2.30	6.20	3.20	5.60	29.20	27.50	0.90	29.20
1968	1.80	5.60	22.10	20.00	13.00	16.70	2.40	11.10	2.40	1.00	67.30	3.50	67.30
1969	16.00	20.10	13.80	26.50	11.30	9.40	3.80	11.00	23.40	32.70	7.90	5.30	32.70
1970	8.50	3.20	5.00	0.30	13.50	16.60	0.90	23.00	0.00	16.30	10.70	35.50	35.50
1971	9.00	8.00	12.80	36.10	32.10	20.90	3.80	2.60	3.50	13.80	21.20	23.30	36.10
1972	11.40	3.60	5.30	3.30	16.20	19.40	4.40	7.40	52.20	6.70	19.80	5.10	52.20
1973	3.10	2.60	1.80	10.30	12.90	23.30	8.60	5.40	5.90	4.60	11.10	11.70	23.30
1974	4.10	9.20	38.70	11.00	28.00	3.60	22.30	24.40	44.40	9.10	5.50	0.90	44.40
1975	3.10	9.20	5.80	24.20	31.50	19.00	7.80	11.50	18.00	0.70	4.00	20.20	31.50
1976	4.00	12.80	23.30	17.50	15.70	1.30	21.60	9.00	4.10	10.00	6.80	24.10	24.10
1977	28.00	2.70	11.40	5.00	12.20	23.90	20.00	9.30	4.60	5.80	15.30	5.30	28.00
1978	5.00	7.20	7.40	8.00	8.50	17.50	0.00	3.10	12.00	0.00	0.40	8.50	17.50
1979	9.60	3.70	0.80	18.70	60.70	7.10	6.10	2.60	4.00	11.00	17.30	9.30	60.70
1980	1.60	17.80	18.50	11.30	20.70	11.00	7.00	14.30	5.20	7.10	31.50	3.20	31.50
1981	0.30	22.10	3.00	42.50	3.30	12.10	9.80	7.80	17.90	3.80	0.50	1.40	42.5
1982	14.20	25.90	25.90	16.00	7.60	22.40	7.20	13.60	11.00	5.80	6.40	3.00	41.90
1983	0.00	4.70	4.70	7.90	9.30	2.70	5.60	15.10	39.60	0.30	36.60	5.60	39.60
1984	2.80	14.00	12.30	6.20	43.60	4.70	6.90	2.30	1.90	10.90	43.30	2.90	43.60
1985	5.80	14.20	2.50	12.50	16.60	31.20	13.90	1.20	0.00	5.20	7.90	5.90	31.20
1986	6.40	5.40	14.60	20.00	9.00	64.50	15.00	0.60	13.90	38.60	17.30	11.00	64.50
1987	17.30	10.80	1.70	5.90	20.70	1.20	6.80	0.80	43.00	13.80	22.80	15.60	43.00

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Máximo
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1988	23.20	0.30	2.60	21.90	7.30	19.90	7.50	0.10	1.60	24.70	7.50	2.40	24.70
1989	6.60	7.00	17.80	5.80	17.30	12.90	4.80	1.80	4.20	3.50	17.60	8.80	17.80
1990	2.80	0.00	2.10	12.10	46.20	14.30	57.70	5.40	5.40	27.20	7.90	2.80	15.30
1991	2.30	29.00	3.90	13.80	8.80	7.80	10.60	0.90	51.70	6.20	12.30	4.30	51.70
1992	1.70	5.80	4.50	1.40	11.50	24.00	1.30	13.40	15.00	14.90	1.70	3.40	24.00
1993	0.20	6.00	3.50	16.40	8.50	3.60	1.60	3.80	23.70	12.30	12.90	6.20	23.70
1994	3.00	11.50	0.20	6.50	14.60	0.00	3.20	8.00	17.20	15.10	16.60	6.80	17.20
1995	5.70	4.00	3.30	23.10	5.90	2.50	1.90	8.50	0.60	0.50	6.20	18.50	23.10
1996	21.50	8.80	6.50	16.40	17.20	4.10	7.90	36.30	6.40	5.00	11.90	23.40	36.20
1997	12.20	0.60	0.00	57.90	27.00	37.10	12.20	13.90	6.10	2.90	9.90	15.60	57.90
1998	7.20	2.50	1.80	12.40	21.70	1.60	2.60	4.60	8.50	11.10	9.10	4.70	21.70
1999	7.80	16.70	9.30	36.60	15.40	6.60	20.40	18.70	6.30	6.00	8.00	4.40	36.60
2000	8.00	0.00	5.40	22.20	23.40	12.20	1.60	1.00	1.20	45.40	16.20	4.80	45.40
2001	17.00	2.20	8.00	3.10	15.50	9.10	2.90	3.90	30.80	8.80	9.10	0.60	30.80
2002	10.00	5.80	32.50	9.10	39.50	16.80	22.80	51.90	70.80	15.90	6.50	14.40	70.80
2003	11.90	18.60	15.20	20.90	26.80	13.80	0.20	3.80	35.30	12.70	11.70	4.10	35.30
2004	6.20	21.20	29.50	10.70	7.90	6.40	35.20	0.70	1.70	12.10	7.70	24.20	35.30
2005	0.40	11.10	4.90	6.20	20.60	34.60	2.70	8.90	20.30	8.00	31.30	2.20	34.60
2006	8.60	20.70	6.40	15.00	3.50	20.60	18.60	18.60	25.00	9.50	6.70	3.60	25.00
2007	3.20	9.90	32.30	35.20	24.40	14.50	1.00	16.80	20.20	43.20	0.40	9.90	43.20
2008	3.00	5.00	4.20	9.40	18.20	12.70	11.60	3.80	4.60	27.00	16.80	11.40	28.20
2009	8.30	3.80	4.00	22.30	8.70	1.40	5.40	5.10	8.10	5.40	9.00	11.60	22.30
2010	13.00	6.40	19.90	21.00	5.30	8.10	6.10	3.30	11.00	28.20	4.40	9.90	28.20

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Máximo
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
2012	3.00	1.80	6.60	12.20	1.60	13.80	1.60	0.80	18.40	49.80	6.50	3.00	49.80
2013	5.40	14.80	7.30	14.20	6.60	16.20	5.40	20.40	7.40	7.60	38.40	5.00	38.40
2014	7.00	4.70	4.60	8.50	7.40	25.50	11.10	16.60	10.20	2.60	22.80	18.20	25.50

Tabla 2: Histórico de precipitaciones , estación aeropuerto de Zaragoza. Fuente: www.iaest.com, 2015.

5.2.1. Análisis de calidad de datos de series temporales

1. **Estacionariedad.-** Este análisis muestra si las condiciones meteorológicas no se han modificado en el tiempo, al ser la serie temporal de 74 años, para un mejor estudio se analiza en subintervalos de tiempo, con un cierto solape entre ellos. Se evalúa los valores medios y las varianzas de estas subseries temporales, las cuáles no deberían diferenciarse entre ellas en más de un 15 %. Si se supera ese valor, quiere decir que ha habido cambios en las condiciones de medida, etc.

Dividiremos nuestra serie histórica (74 años) en 3 períodos, 2 de 25 años y 1 de 24, con un solape de un año entre cada uno.

1941-1966

1966-1991

1991-2015

Siendo la media media :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_i$$

Varianza :

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Aplicando a nuestras series queda:

	1941-1966	1966-1991	1991-2015
(mm)	41.24	38.13	34.85
	320.67	201.52	167.51

Tabla 3: Media y varianza de las precipitaciones

La diferencia de media entre la subserie 1 y la 2 es de 7,5%, y entre la 2 y 3 es de 8,6%, siendo ambas menores del 15%, por lo que la serie es estacionaria.

La diferencia de varianza entre la subserie 1 y 2 es de 37,1%, y entre la 2 y 3 es de 16,8%.

2. Homogeneidad. - Se comprueba que la población de datos que se maneja es homogénea desde el punto de vista estadístico. En este caso se emplea el test de Kolmogorov-Smirnov.

Este test se basa en evaluar las desviaciones que se presentan entre la función de distribución acumulada $F(x)$ y el histograma acumulado observado $F_s(x)$.

Entonces se considera:

$$D = \max_{i=1}^n [F_s(x_i) - F(x_i)]$$

Es decir, el mayor valor absoluto de las n diferencias entre la función de distribución acumulada y el histograma acumulado observado. Si se conoce un valor crítico c , función del tamaño de la muestra y de un nivel de significancia (α), el ajuste se acepta si $c \geq D$

En la siguiente tabla se presentan los valores que tomaría el valor crítico estadístico para niveles de significancia del 1%, 5% y 10%.

Tamaño de la muestra, n	$\alpha = 0,10$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
5	0,51	0,56	0,67
10	0,37	0,41	0,49
15	0,30	0,34	0,40
20	0,26	0,29	0,35
25	0,24	0,26	0,32
30	0,22	0,24	0,29
40	0,19	0,21	0,25
>40	$1,22/\sqrt{n}$	$1,36/\sqrt{n}$	$1,63/\sqrt{n}$

Tabla 4: Valor crítico estadístico para el test Kolmogorov Smirnov

Donde se puede observar que el valor crítico estadístico para nuestro ejemplo, teniendo un número de muestras de $n=74$, para los distintos niveles de significancia.

	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
$n=74$	0,142	0,158	0,189

Tabla 5: Valor crítico estadístico para el test Kolmogorov-Smirnov con $n=74$

Para la aplicación del test de Kolmogorov-Smirnov, es necesario hallar la máxima diferencia entre la función de frecuencia acumulada observada $F_s(x)$ y la de distribución acumulada estimada con la función utilizada $F(x)$.

Función de frecuencia acumulada se calcula mediante la fórmula:

$$F_s(x) = 1 - \frac{m}{n}$$

Donde:

m es la posición de cada uno de los valores observados ordenados de mayor a menor.
 n es el número de datos de la serie.

Función de distribución de Valores Extremos Tipo I (EVI) o de Gumbel:

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-u}{\alpha}\right)\right]$$

Donde:

u es la moda de distribución.

x es la precipitación en mm.

Estimación de los parámetros u y α .

$$u = \bar{x} - 0.5772 \cdot \alpha$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \sigma$$

donde:

$$\bar{x} \text{ Es la media de la serie temporales. } \bar{x} = \frac{\sum P_{24}}{N}$$

$$\sigma \text{ Es la desviación media estándar. } \sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{N}}$$

donde:

N es el número de años

x es P_{24} de cada año

\bar{x} es la P_{24} media.

Quedando: $\bar{x} = \frac{2745,6}{74} = 37,10 \text{ mm}$ $\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{N}} = 15,17$

Partiendo de los datos obtenidos se calculan los parámetros u y a :

$$a = 11,80 \text{ mm}$$

$$u = 30,30$$

Una vez obtenidos todos estos datos, se deduce que el modelo de probabilidad es el siguiente:

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-30,30}{11,80}\right)\right]$$

Siendo x la precipitación en mm.

Con la ecuación del modelo de probabilidad para la distribución de valores extremos de Tipo I, ya es posible aplicar el test de Kolmogorov-Smirnov, obteniéndose los siguientes datos:

Posición	Precipitación (mm)	Fs(x)	F(x)	Fs(x)-F(x)
1	97.30	0.9865	0.9423	0.0442
2	70.80	0.9730	0.8671	0.1059
3	67.40	0.9595	0.8525	0.1069
4	67.30	0.9459	0.8521	0.0938
5	66.40	0.9324	0.8480	0.0844
6	64.50	0.9189	0.8390	0.0799
7	60.70	0.9054	0.8195	0.0859
8	57.90	0.8919	0.8039	0.0880
9	52.60	0.8784	0.7710	0.1074
10	52.20	0.8649	0.7683	0.0966
11	51.70	0.8514	0.7649	0.0864
12	51.70	0.8378	0.7649	0.0729
13	49.80	0.8243	0.7518	0.0725
14	48.90	0.8108	0.7453	0.0655
15	47.40	0.7973	0.7343	0.0630
16	46.40	0.7838	0.7267	0.0571
17	45.40	0.7703	0.7190	0.0513
18	44.70	0.7568	0.7134	0.0433
19	44.40	0.7432	0.7110	0.0322
20	44.20	0.7297	0.7094	0.0203
21	43.60	0.7162	0.7046	0.0116
22	43.20	0.7027	0.7013	0.0014
23	43.00	0.6892	0.6997	-0.0105
24	42.5	0.6757	0.6955	-0.0198
25	41.90	0.6622	0.6905	-0.0283
26	39.90	0.6486	0.6732	-0.0246
27	39.60	0.6351	0.6706	-0.0354
28	38.40	0.6216	0.6598	-0.0382
29	37.80	0.6081	0.6544	-0.0463
30	36.60	0.5946	0.6432	-0.0486
31	36.20	0.5811	0.6395	-0.0584
32	36.10	0.5676	0.6385	-0.0710
33	36.10	0.5541	0.6385	-0.0845
34	35.50	0.5405	0.6328	-0.0923

Posición	Precipitación (mm)	Fs(x)	F(x)	Fs(x)-F(x)
35	35.40	0.5270	0.6319	-0.1048
36	35.30	0.5135	0.6309	-0.1174
37	35.30	0.5000	0.6309	-0.1309
38	34.60	0.4865	0.6241	-0.1377
39	34.10	0.4730	0.6193	-0.1463
40	33.00	0.4595	0.6084	-0.1489
41	32.70	0.4459	0.6054	-0.1594
42	32.60	0.4324	0.6044	-0.1719
43	32.30	0.4189	0.6013	-0.1824
44	32.20	0.4054	0.6003	-0.1949
45	31.50	0.3919	0.5932	-0.2013
46	31.50	0.3784	0.5932	-0.2148
47	31.50	0.3649	0.5932	-0.2283
48	31.20	0.3514	0.5901	-0.2388
49	30.80	0.3378	0.5860	-0.2482
50	29.20	0.3243	0.5693	-0.2449
51	28.20	0.3108	0.5586	-0.2478
52	28.20	0.2973	0.5586	-0.2613
53	28.00	0.2838	0.5564	-0.2727
54	25.70	0.2703	0.5313	-0.2610
55	25.50	0.2568	0.5291	-0.2723
56	25.00	0.2432	0.5235	-0.2802
57	24.70	0.2297	0.5201	-0.2904
58	24.30	0.2162	0.5156	-0.2994
59	24.10	0.2027	0.5133	-0.3106
60	24.00	0.1892	0.5122	-0.3230
61	23.70	0.1757	0.5088	-0.3331
62	23.60	0.1622	0.5077	-0.3455
63	23.30	0.1486	0.5043	-0.3556
64	23.10	0.1351	0.5020	-0.3668
65	22.70	0.1216	0.4974	-0.3758
66	22.30	0.1081	0.4928	-0.3847
67	22.20	0.0946	0.4916	-0.3971
68	21.70	0.0811	0.4859	-0.4048
69	17.80	0.0676	0.4400	-0.3724
70	17.50	0.0541	0.4364	-0.3823
71	17.20	0.0405	0.4328	-0.3923
72	16.10	0.0270	0.4196	-0.3926
73	16.10	0.0135	0.4196	-0.4061
74	15.30	0.0000	0.4099	-0.4099

Tabla 6: Resumen de los cálculos para la aplicación del test de Kolmogorov-Smirnov

La máxima diferencia obtenida entre $F(x)$ y las $Fs(x)$ es $D=0,0408$; se compara con el valor crítico c , el cual es obtenido de la tabla 18.

Se observa que $D < c$, ya que $0,04 < 0,189$, siendo este valor correspondiente a $\alpha = 0,01$; es decir la bondad de ajuste tendrá un 99% de confianza, con este resultado podemos afirmar que el test de Kolmogorov-Smirnov es satisfactorio, de manera que se acepta que la serie de datos temporales obtenida es homogénea.

3. **Consistencia.-** En nuestro caso solo contamos con información de una estación pluviométrica, por lo que no podremos comprobar la consistencia.
4. **Adecuación.-** Nuestra serie es adecuada, esto se debe a que es mayor de 25 años.

Una vez comprobada la calidad de la serie histórica, se procede a emplearla en el cálculo de la lluvia de diseño.

5.2.2. Cálculo de la máxima precipitación diaria para distintos períodos de retorno.

El cálculo de la máxima precipitación diaria para diferentes períodos de retorno se ha realizado con las distribuciones estadísticas: métodos de máximos de Gumbel y SQRT-Máx.

5.2.2.1. Método de Gumbel

Gumbel propuso la denominada distribución de extremos tipo I, con dos parámetros, cuya función de distribución de probabilidad es la siguiente:

$$f(x) = e^{-e^{(\alpha(x-a))}} \quad -\infty \leq x \leq \infty$$

Los coeficientes a y α a se pueden expresar como:

$$a = \bar{x} - 0,245005 \sigma_x$$

$$\alpha = \frac{1,2825}{\sigma_x}$$

Para cálculo de la precipitación máxima asociada a una determinada duración D y a un periodo de retorno T , se calculará como:

$$P_D(T) = \bar{X} + K \cdot \sigma(T, N)$$

dónde

- Se calcula el valor medio \bar{X} de los valores máximos anuales

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_i = 37.1 \text{ mm}$$

- La desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{N} \right)} = 15.17$$

siendo:

- N =Número de ciclos y X_i = valor máximo anual.

- K es un factor de frecuencia que depende del periodo de retorno y del número de años de la serie.

$$K(T, N) = \frac{Y_T - Y_N}{S_N}$$

Siendo: $Y_T \rightarrow$ variable reducida $Y_T(T) = -\ln(\ln \frac{T}{T-1})$

$Y_N \rightarrow$ media reducida

$S_N \rightarrow$ desviación estándar reducida

Estos dos valores se obtienen a partir del número de años de la serie, mediante tablas:

Nº años	Y_N	S_N
74	0,55567	1,18896

Una vez obtenidos todos los datos necesarios, aplicamos la fórmula:

$P_D(T) = \bar{X} + K \cdot \sigma(T, N)$ y obtenemos las precipitaciones máximas asociadas a un periodo de retorno.

T(años)	YT	K	P(mm)
2	0.367	-0.159	34.689
5	1.500	0.794	49.154
10	2.250	1.425	58.731
25	3.199	2.223	70.832
100	4.600	3.402	88.720

Tabla 7: Método de Gumbel

5.2.2.2. Distribución SQRT-ETmáx

La ley SQRT-ETmáx, propuesta en Japón por Etoh, T., A. Murota y M. Nakamishi (1986), es uno de los escasos modelos de ley desarrollados específicamente para el análisis de máximas lluvias diarias y tiene la característica de conducir a resultados más conservadores que los obtenidos mediante la ley de Gumbel.

La ley SQRT-ETmáx es considerada por el C.E.D.E.X. más adecuada para numerosas regiones españolas que la tradicional ley de Gumbel.

La ley SQRT-ETmáx es una ley con dos parámetros, basada exclusivamente en datos locales, al igual que la de Gumbel.

Su formulación es:

$$F(x) = e^{-K(1+\sqrt{\frac{x}{\bar{x}}})e^{-\sqrt{\frac{x}{\bar{x}}}}} \quad (1)$$

k , α = parámetros de la distribución, que dependen de la media y desviación típica.

El cálculo de estos parámetros no es sencillo. Zorraquino (2004) ha elaborado una aproximación polinómica para su obtención. De este modo el cálculo es simple, pero excesivamente laborioso para realizarlo manualmente siguiendo estos tres pasos:

$$\ln(k) = \sum_{j=1}^n ai \cdot [\ln(C_v)]^j \quad (2)$$

donde:

C_v = coeficiente de variación (=desv típica/media aritmética)

ai = coeficientes calculados por el autor y que aparecen en una hoja Excel¹.

$$\ln(I_1) = \sum_{j=1}^n bi \cdot [\ln(k)]^j \quad (3)$$

donde:

$\ln(k)$ = calculado en el paso anterior

bi = coeficientes calculados por el autor y que aparecen en la hoja Excel¹.

$$\alpha = \frac{k}{1-e^{-k}} \frac{I_1}{2\bar{x}} \quad (4)$$

donde:

k , I_1 = calculados en los pasos anteriores

\bar{x} = media aritmética

Finalmente, con los valores de k y de $\hat{\alpha}$ obtenidos en (2) y (4), calculamos $F(x)$ con la expresión (1).

De esta manera queda definida la función de distribución $F(x)$ para una serie de valores conocidos de precipitaciones máximas. Para la estación considerada se ha aplicado el método anterior.

T(años)	P(mm)
2	37.1
5	46.4
10	55.8
25	68.8
100	90.2

Tabla 8: Método SQRT-ETmáx

La hoja excel empleada en estos cálculos ha sido proporcionada por el departamento de Geología de la Universidad de Salamanca, realizado por Javier Sánchez San Román.¹ Los coeficientes aplicados en la hoja Excel en algún caso difieren de los que aparecen en la publicación original Zorraquino, C (2004). Proceden de cálculos posteriores del autor (Zorraquino)

Como se observa en los valores obtenidos de las distribuciones tabla 9, el método de SQRT-ETmáx es más conservador que el de Gumbel, por lo que para este estudio se escoge el más desfavorable, es decir las precipitaciones máximas más desfavorables para cada periodo de retorno son las obtenidas por de las distribuciones de Gumbel.

T(años)	Gumbel P(mm)	SQRT-ET máx P(mm)	Precipitaciones máximas adoptadas Pd(mm)
2	34.68	37.1	34.68
5	49.15	46.4	49.15
10	58.73	55.8	58.73
25	70.83	68.8	70.83
100	88.72	90.2	88.72

Tabla 9: Resultados obtenidos Gumbel y SQRT-ETmáx

5.2.3. Curva IDF

Para hallar la IDF sintética partir de datos de lluvia de 24h, aplicaremos la expresión propuesta por la dirección general de carreteras (DGC).

$$I(D, T) = \frac{P(T)_{24h}}{24} FR^{\frac{28^{0.1} - D^{0.1}}{28^{0.1} - 1}}$$

donde:

P(mm) es la precipitación máxima en 24 horas de la estación meteorológica asociada a un periodo de retorno (calculada en el apartado anterior).

D (horas) es la duración.

FR es el factor regional .

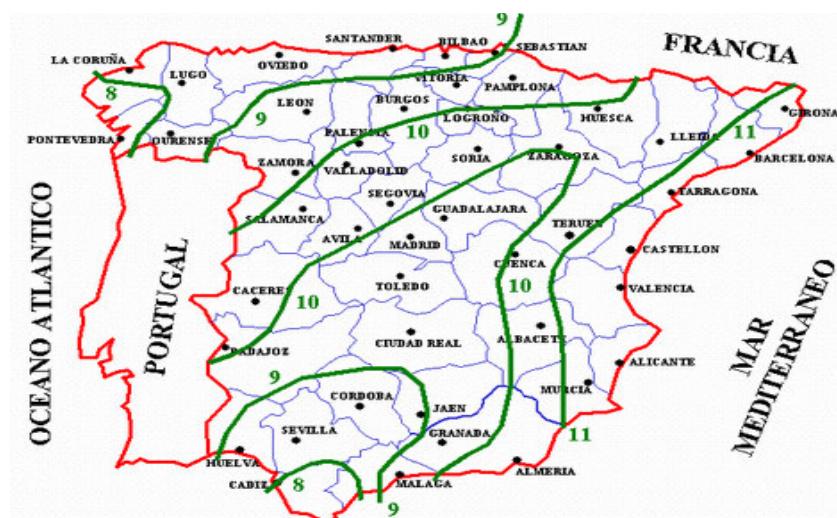


Ilustración 4: Mapa de isolíneas para la estimación del factor regional (MOPU,1990)

Al encontrarse nuestra zona de estudio en Zaragoza, el factor regional es 10, el cálculo lo realizaremos con un intervalo de tiempo de 5 minutos, hasta llegar a la duración total de una hora.

Escogemos la precipitación calculada por el método de distribuciones de Gumbel, asociado a los períodos de retorno de 2,5,10,25,100 años, como ya se explicó en el apartado anterior y se obtiene la siguiente gráfica.

CURVAS IDF

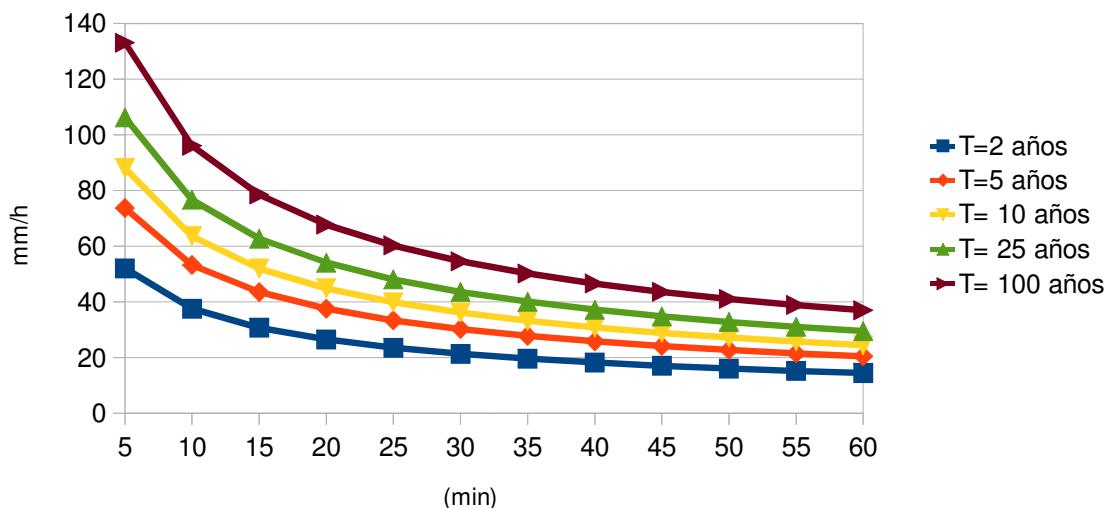


Ilustración 5: Curvas IDF para distintos períodos de retorno

Para el dimensionamiento de la red de emplearemos la correspondiente a un periodo de retorno de 10 años.

Curva IDF $T= 10$ años

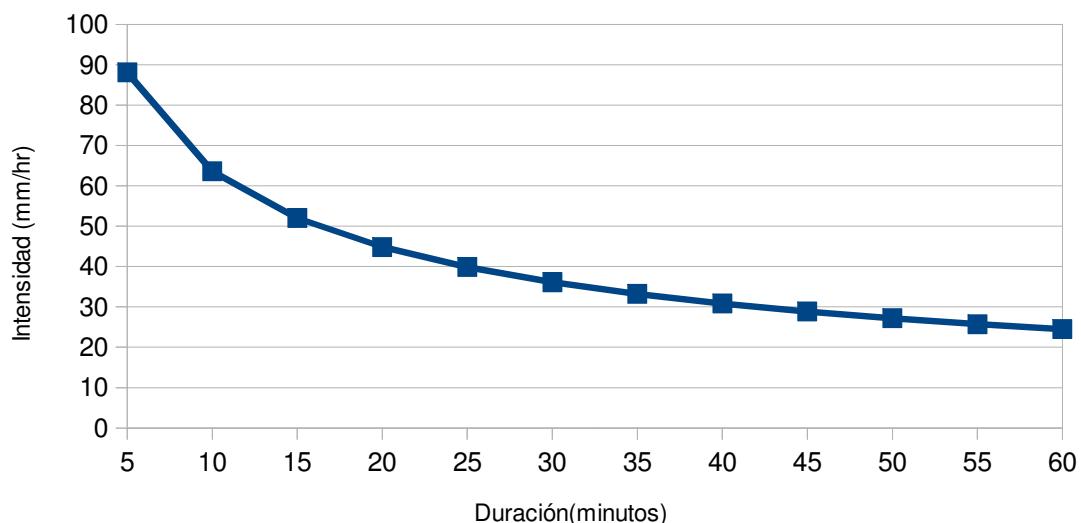


Ilustración 6: Curva IDF para un periodo de retorno de 10 años

5.2.4. Bloques alternados

Se trata sin duda del método más extendido, para obtener una lluvia de diseño a partir de curvas IDF ya sean históricas o sintéticas.

Intervalo tiempo (minutos)	Precipitacion (mm)	Intensidad (mm/h)
5	0.94	11.25
10	1.09	13.05
15	1.31	15.67
20	1.66	19.95
25	2.4	28.79
30	7.34	88.11
35	3.26	39.09
40	1.95	23.4
45	1.46	17.5
50	1.19	14.22
55	1.01	12.08
60	0.88	10.54

Tabla 10: Método de los bloques alternados

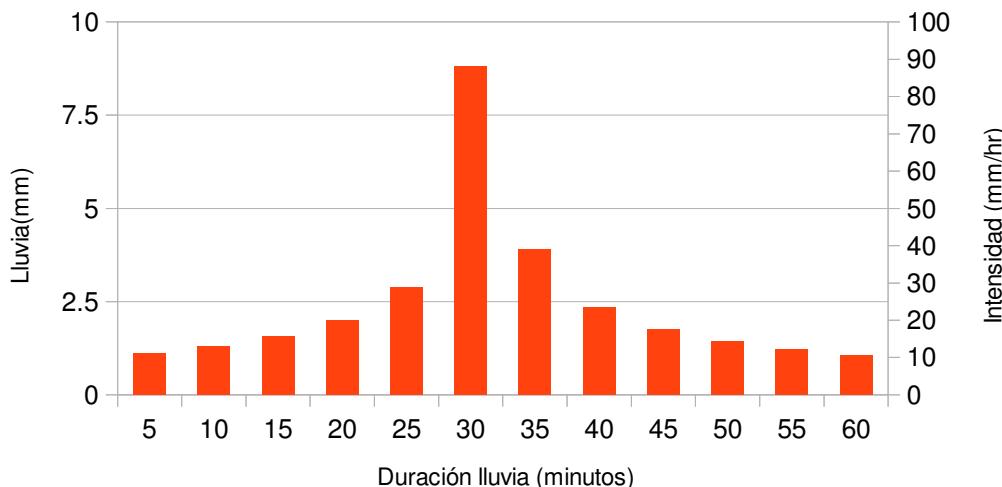


Ilustración 7: Representación bloques alternados

6. TÉCNICAS DE DRENAJE SOSTENIBLE (TEDUS)

Unas de las posibles definiciones de **Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible** puede ser: aquellos elementos participantes en el drenaje de las ciudades que, además de reducir el caudal circulante por la superficie de la misma, consiguen también disminuir de forma notable la cantidad de contaminantes que arrastra el agua de escorrentía.

Existe numerosa terminología para referirse a éste concepto. A continuación se presentan algunas posibles según los diferentes países donde son empleados:

- SUDS (Sustainable Urban Drainage Systems)
- BMPs (Best Management Practices)
- MPC (Mejores Prácticas de Control)
- BPAs (Buenas Prácticas Ambientales)
- TEDUS (Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible)
- LID (Low Impact Development)
- WSUD (Water Sensitive Urban Design)
- Diseño Urbano Sensible al Agua.

6.1. OBJETIVO

Los objetivos son gestionar y reducir el riesgo de inundaciones, mejorar la calidad del agua, mejorar la biodiversidad, mejorar la calidad de vida de las personas mediante la mejora de la calidad del espacio público, así como crear soluciones que puedan mantenerse y adaptarse con el tiempo de forma sencilla y eficaz.

6.2. CLASIFICACIÓN

Podemos clasificar las **Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible** utilizando los criterios de la organización CIRIA (Construction Industry Research and Information Association), así como los que utiliza CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) en su publicación "Gestión de las aguas pluviales: implicaciones en el diseño de los sistemas de saneamiento y drenaje urbano".

Estos organismos proponen dos tipos de clasificaciones para las TEDUS:

1. En medidas estructurales y no estructurales.

- Se consideran **medidas estructurales** aquellas que gestionan la escorrentía mediante actuaciones que contengan algún elemento constructivo o que supongan la adopción de criterios urbanísticos "ad hoc".
- Se consideran **medidas no estructurales** las que no precisan una actuación directa sobre la red ni la construcción de infraestructura alguna.

Dentro de esta primera clasificación, la organización CIRIA desglosa las técnicas estructurales en: técnicas de infiltración, técnicas de filtración, medidas que usan vegetación y medidas de detención y retención.

Estructurales

Infiltración

- Sumideros
- Zanja de Infiltración
- Pavimentos permeables

Filtración

- Áreas de Bioretención
- Zanja filtrante

Detención y retención

- Depósitos enterrados o superficiales de retención
- Estanques de retención
- Drenaje geocelular

Usan vegetación

- Cubiertas verdes
- Humedales

No estructurales

Campañas de concienciación ciudadana.

2. Según el emplazamiento en el que se va a implantar o aplicar el sistema de drenaje:

- Técnicas de **control en origen**: métodos utilizados en el mismo lugar que se genera la escorrentía, "in situ".
 - Cubiertas verdes
 - Pavimentos permeables
- Técnicas de **control en vertido** o aguas abajo: son las aplicadas a elementos de la red de alcantarillado, es decir, las que se emplean sobre la escorrentía una vez generada de forma previa a su vertido al medio.

- Cunetas verdes
- Estanques de retención
- Depósitos de retención
- Humedales artificiales.
- Técnicas de **control en transporte**: se aplican en el recorrido del flujo.
 - Swales (cunetas verdes).
 - Canales .

La clasificación que se considera para este estudio será: **En medidas estructurales y no estructurales**, por ser una clasificación más usada e intuitiva.

6.2.1. *Medidas estructurales: Infiltración*

Estas técnicas consisten en permitir la infiltración del agua al terreno, dependiendo del escenario en el que se aplique requieren unas condiciones determinadas, como por ejemplo, estas técnicas no deben situarse a menos de cinco metros de una edificación, porque existe la probabilidad de afección a la cimentación, así como una correcta impermeabilización en el caso de los pavimentos permeables evitando que el agua afecte al núcleo del terraplén.

Una de estas técnicas de infiltración son los jardines de lluvia, su diseño se puede observar en la ilustración 3.

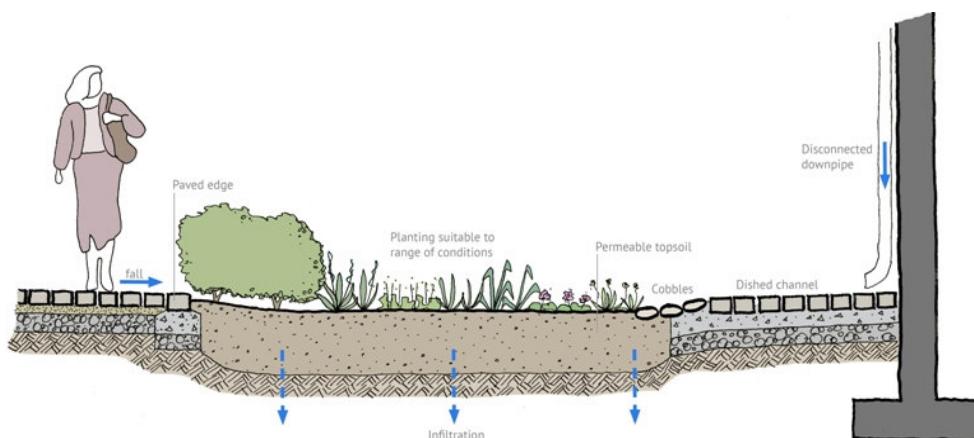


Ilustración 8: Jardines de lluvia (Fuente: www.susdrain.org)

6.2.1.1. Sumideros

Son excavaciones cuadradas o circulares , llenas de escombros o revestidos con anillos / estructuras de almacenamiento, perforadas, rodeadas de relleno granular de ladrillo, hormigón prefabricado o polietileno. Pueden ser agrupados y unidos entre sí para drenar grandes áreas que incluyen autopistas. La estructura de soporte y el relleno pueden ser sustituidos por unidades modulares o geocelulares.

Cantidad

Proporcionan almacenamiento para la escorrentía en una cámara subterránea, forrada con una membrana porosa y llena de gruesa roca triturada.

Mejoran la capacidad natural del suelo para drenar el agua. Lo hacen mediante la prestación de una gran superficie de contacto con el suelo circundante, a través de la cual puede pasar el agua.

La cantidad de agua que puede ser eliminada por un pozo de absorción dentro de un tiempo especificado depende principalmente del potencial de infiltración del suelo circundante. El tamaño del dispositivo y la densidad aparente de cualquier material de relleno regirán capacidad de almacenamiento.

Calidad

La escorrentía es tratada de manera diferente por un pozo de absorción. Los sumideros incluyen:

- Filtración física para eliminar los sólidos.
- Adsorción sobre el material.
- Reacciones bioquímicas que implican microorganismos que crecen en el relleno o en el suelo.

El nivel de tratamiento depende del tamaño de los medios de comunicación y la longitud de la trayectoria de flujo a través del sistema, que controla el tiempo que tarda la segunda vuelta para pasar en el suelo circundante. El pre-tratamiento puede ser necesario antes de permitir el escurrimiento contaminado en un pozo de absorción.

Integración con el medio

Son fáciles de integrar en un sitio, pero ofrecen muy poco en el valor de la biodiversidad, ya que deben estar completamente bajo tierra y el agua no debe

aparecer en la superficie.

Sin embargo, aumentan el contenido de humedad del suelo y ayudan a recargar el agua subterránea, lo que ayuda a mitigar los problemas de flujo de los ríos bajos.

Mantenimiento

La remoción de sedimentos / escombros del dispositivo de pre-tratamiento.

Supervisión del rendimiento (utilizando la observación también).

6.2.1.2. Pozos, zanjas y depósito de infiltración

Una zanja de infiltración, por lo general se halla llena de material granular permeable, está diseñada para promover la infiltración de agua de la superficie al suelo. Un depósito de infiltración es una depresión diseñada para promover la infiltración de la escorrentía de las aguas superficiales en el suelo. Las plantas en un depósito de infiltración deben ser capaces de soportar períodos de encharcamiento y períodos secos y, a ser posible, mantener o mejorar el espacio poroso en los suelos subyacentes a través de sistemas de raíces profundas.

Cantidad

Proporcionan almacenamiento para la escorrentía en una cámara subterránea, forrada con una membrana porosa y llena de gruesa roca triturada.

Mejoran la capacidad natural del suelo para drenar el agua. Lo hacen mediante la prestación de una gran superficie de contacto con el suelo circundante, a través de la cual puede pasar el agua.

La cantidad de agua que puede ser eliminada mediante una zanja de infiltración dentro de un tiempo especificado depende principalmente de la potencial de infiltración del suelo circundante. El tamaño del dispositivo y la densidad aparente de cualquier material de relleno regirán capacidad de almacenamiento.

Calidad

El escurrimiento es tratado de diferentes maneras en una zanja de infiltración, incluyendo:

- Filtración física para eliminar los sólidos.
- Adsorción sobre el material en la zanja.

- Reacciones bioquímicas que implican microorganismos que crecen en el relleno o en el suelo.

El nivel de tratamiento depende del tamaño de los medios de comunicación y la longitud de la trayectoria de flujo a través del sistema, que controla el tiempo que tarda la segunda vuelta para pasar en el suelo circundante.

Integración con el medio

Las zanjas de infiltración son fáciles de integrar en un sitio. Son ideales para su uso alrededor de los campos de juego, áreas recreativas o espacios públicos abiertos. Aumentan el contenido de humedad del suelo y ayudan a recargar el agua subterránea, mitigando así los problemas de flujo de los ríos bajos.

Mantenimiento

La inspección regular para detectar signos de obstrucción.

La remoción de sedimentos del sistema de pre-tratamiento.

El levantamiento y la limpieza o sustitución de la piedra.

6.2.1.3. *Pavimentos permeables*

Los firmes permeables son secciones compuestas de varias capas de materiales de construcción que permiten el paso del agua a través suyo, desde la superficie hasta la explanada, y en conjunto ofrecen la capacidad portante necesaria para resistir un tráfico determinado. La clasificación de los firmes permeables se puede realizar atendiendo al tipo de pavimento permeable: discontinuos (adoquines con ranuras y césped o grava con refuerzos) o continuos (mezcla bituminosa porosa y hormigón poroso); o atendiendo a la gestión que se realice del agua infiltrada: infiltración al terreno, almacenamiento o drenaje diferido.

Cantidad

Respecto a la gestión de la cantidad de aguas pluviales, el uso de firmes permeables ofrece reducciones de coste, al minimizar la generación de escorrentía superficial y por tanto las dimensiones de cunetas, sumideros y otros elementos parte del sistema de alcantarillado (Grover et al., 1972; Field et al., 1982).

Calidad

En cuanto a la depuración que ofrecen los firmes permeables, diversos estudios han demostrado que su empleo mejora de forma significativa la calidad de las aguas que los atraviesan (Pratt et al., 1999; Newman et al., 2002; Puehmeier et al., 2004; Bayón et al. 2005). Los hidrocarburos contenidos en la escorrentía urbana son retenidos en el interior de los firmes permeables, pudiendo llegar a ser biodegradados con el paso del tiempo (Coupe et al., 2003; Bayón et al. 2005; Newman et al., 2006). Los firmes permeables también son capaces de retener los metales pesados que arrastra la escorrentía superficial urbana, principalmente procedentes de tejados (cobre y zinc) o carreteras (plomo), asegurando una correcta calidad del agua infiltrada, aún cuando el nivel freático está próximo (Fach y Geiger, 2005).

Mantenimiento

Una limpieza cada 4 o 5 años con aspiradores autopropulsados sería suficiente para mantener las propiedades drenantes de una capa de mezcla bituminosa porosa.

Construcción

El subsuelo debe estar bien compactado, se debe colocar suelo adecuado en las zonas blandas, las membranas impermeables deben ser tratadas cuidadosamente para evitar cualquier deterioro en la colocación.

6.2.2. Medidas estructurales: Filtración

La filtración y la eliminación de los sedimentos y otras partículas de la escorrentía de las aguas superficiales es uno de los principales métodos de tratamiento para el drenaje sostenible. Esto puede ocurrir a través de la captura en el suelo o en su conjunto, en las plantas o en capas de geotextil dentro de la construcción. La ubicación de cualquier filtración dependerá de la estructura del componente TEDUS particular, un ejemplo son las áreas de bioretención como se muestra en la ilustración 9.

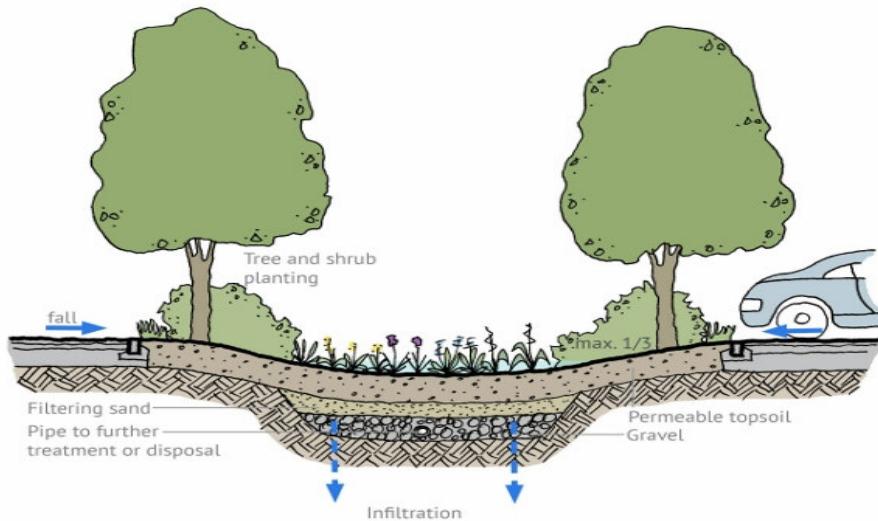


Ilustración 9: Área de bioretención (Fuente: www.susdrain.org, 2012)

6.2.2.1. Áreas de biorretención

Son depresiones poco profundas que son típicamente drenaje y se basan en los suelos, en la vegetación de ingeniería mejorada y en la filtración para eliminar la contaminación y reducir la escorrentía de aguas abajo.

Cantidad

Depende del tamaño, puede almacenar grandes o pocas cantidades de agua.

Calidad

El agua que se almacena se irá filtrando al subsuelo primero por una capa de tierra y luego por el geotextil, las partículas sólidas se irán quedando en estas capas.

Mantenimiento

La inspección regular.

Basura / remoción de escombros.

Sustitución de cubierta de mantillo.

Manejo de la vegetación.

Rematar suelo y escarificado.

Construcción

Las áreas de Bioretención idealmente deberían construirse a finales de la obra, para minimizar la erosión y la generación de sedimentos, la cubierta vegetal densa y vigorosa debe establecerse sobre la zona permeable de captación para contribuir antes de que la escorrentía llegue a las instalaciones. Si esto no es práctico, las áreas bioretención deben ser protegidos de la escorrentía mediante el uso de cercas de fango o balas de paja como se recomienda en el CIRIA.

Se debe tener cuidado de no compactar el suelo que se encuentra por debajo de esta área, así mismo se debe comprobar que los geotextiles no estén obstruidos o rasgados antes de ser colocados.

6.2.2.2. *Zanjas filtrantes*

Son excavaciones poco profundas llenas de escombros o piedras, que crean un almacenamiento subsuperficial temporal de la escorrentía de aguas pluviales. Estas zanjas se pueden utilizar para filtrar y transmitir las aguas pluviales a los componentes SUD's aguas abajo .

Lo ideal sería que reciban el flujo de entrada lateral de una superficie impermeable adyacente, pero las entradas de fuentes puntuales pueden ser aceptables.

Cantidad

Puede transportar grandes tormentas, normalmente se construyen con desbordamientos de alto nivel y su área del plan debe estar dimensionada para proporcionar almacenamiento debajo del nivel invertido, también se emplean como almacenamiento temporal en el subsuelo.

Calidad

Retienen las partículas más gruesas, ya sea escombros o basura en general.

Mantenimiento

La inspección regular para detectar signos de obstrucción.

La remoción de sedimentos del sistema de pre-tratamiento.

El levantamiento y la limpieza o sustitución de la piedra.

Construcción

El geotextil y el relleno de piedra deben estar limpios antes de la construcción, todas las excavaciones de zanjas deben seguir las mejores prácticas de construcción y contar con el apoyo, si es requerido. Ningún miembro del personal debe entrar en una zanja de profundidad mayor a 1,2m sin apoyo. Los soportes para zanjas deben estar diseñados para garantizar la seguridad de los trabajadores. También puede ser necesario apoyar trincheras profundas en un suelo débil.

6.2.2.3. *Swales (cunetas verdes)*

Las cunetas verdes son canales vegetados con hierba, que conducen el agua de escorrentía desde las superficies de drenaje a un sistema de almacenaje o a una conexión con el alcantarillado existente. Estos canales vegetados suelen situarse en los márgenes que quedan en los bordes de las calzadas por lo que pueden llamarse cunetas verdes (MINVU-DICTUC, 1996).

Cantidad

Las swales generalmente están diseñados como sistemas de conducción, también pueden ser diseñados con diques para aumentar la atenuación y, en su caso, la infiltración.

Calidad

Son eficaces en la eliminación de contaminantes sólidos en suspensión a través de la filtración y sedimentación. La vegetación atrapa las partículas orgánicas y minerales que luego se incorporan al suelo.

Integración con el medio

Las swales a menudo se integran en el uso de la tierra circundante. Especies de pastos y flores silvestres locales se pueden introducir para el interés visual y proporcionar un hábitat de vida silvestre.

Mantenimiento

Basura / remoción de escombros.

Hierba del corte y remoción de los recortes.

Compensación de ensenadas, alcantarillas y salidas de los escombros y

sedimentos.

Reparación de zonas erosionadas o dañadas.

6.2.2.4. Franjas filtrantes

Tienen pendiente suave, son franjas de vegetación y de tierra que proveen oportunidades para el transporte lento y la infiltración (en su caso). Están diseñados para aceptar la escorrentía como flujo laminar por tierra desde el desarrollo aguas arriba y, a menudo se encuentran entre un área de superficie dura y una corriente de recepción, la superficie de recogida de aguas, tratamiento o sistema de eliminación.

Cantidad

Las franjas filtrantes sólo atenúan el flujo ligeramente, pero que pueden ser utilizados para reducir el área impermeable drenada.

Calidad

Las franjas filtrantes son eficaces en la eliminación de contaminantes sólidos a través de la filtración y la sedimentación. La vegetación atrapa las partículas orgánicas y minerales que luego se incorporan al suelo.

Integración con el medio

Franjas filtrantes a menudo se integran en el uso de la tierra circundante, por ejemplo, el espacio o la carretera arcenes públicos abiertos. Especies de pastos y flores silvestres locales se pueden introducir para el interés visual y proporcionar un hábitat de vida silvestre.

Mantenimiento

Basura / remoción de escombros.

Siega.

Reparación de zonas erosionadas o dañadas.

Construcción

La franja filtrante debe ser construida para proporcionar un longitudinal uniforme y de pendiente consistente, sin ondulaciones graves que causará un encharcamiento localizado o promover el flujo en canales. Se debe tener cuidado de no compactar el

suelo debajo de una franja de filtración, porque se puede reducir su capacidad de infiltración, se debe proteger de los grandes caudales hasta que la vegetación este fijada.

6.2.3. Medidas estructurales: Detención y retención

6.2.3.1. ***Depósitos de detención***

Los depósitos de detención son zonas de almacenamiento o instalaciones que proporcionan control de flujo a través de la atenuación de la escorrentía de aguas pluviales. También facilitan cierta sedimentación de partículas contaminantes.

Los depósitos de detención son normalmente superficies secas y en ciertas situaciones la tierra también pueden funcionar como un centro de recreo. Sin embargo, los depósitos de detención también se pueden mezclar, incluyendo una zona permanentemente húmeda para la fauna o el tratamiento de la escorrentía y una zona que suele ser seco para atender a la atenuación de inundaciones.

Los depósitos de detención tienden a encontrarse hacia el final del tren gestión TEDUS, por lo que se utilizan si se requiere un tratamiento extendido de la escorrentía o si son necesarios por razones de fauna o paisaje.

Cantidad

Pueden ser diseñados para controlar los caudales mediante el almacenamiento de agua de la inundación y liberándola lentamente una vez que el riesgo de inundaciones ha pasado. Los depósitos de detención deben ser diseñados para funcionar tanto en tiempo seco como en húmedo. La cantidad también puede estar influenciada por la cantidad de agua que se puede infiltrarse en el suelo si no hay riesgo para la calidad del agua subterránea .

Calidad

Los depósitos de detención tratan la escorrentía de varias maneras:

- La sedimentación de sólidos, en fija o de movimiento lento de agua.
- Adsorción por el suelo.
- Actividad biológica.

Integración con el medio

Los depósitos de detención ofrecen muchas oportunidades para el paisajista. Se pueden utilizar para los deportes y la recreación. Pueden ser parte del espacio público abierto.

Mantenimiento

- Basura / recolección de basura.
- Entrada / salida de limpieza.
- Manejo de la vegetación.
- Monitoreo de sedimentos y la eliminación cuando sea necesario.

6.2.3.2. *Estanques de retención*

Son lagunas artificiales que tienen agua de forma permanente por lo que permiten la proliferación de flora y fauna acuáticas. Su profundidad ha de estar comprendida entre 1,2 y 2 m. El volumen de agua constante oculta bancos de sedimentos antiestéticos e incrementa el rendimiento en la eliminación de nutrientes, metales pesados, coliformes y materia.

Cantidad

Pueden ser diseñados para controlar las tasas de flujo mediante el almacenamiento de agua de la inundación y liberando lentamente una vez que el riesgo de inundación ha pasado (también conocido como estanque de equilibrio). El agua almacenada cambiará el nivel de agua y los estanques deben ser diseñados para funcionar tanto en tiempo seco y mojado. La cantidad también puede estar influenciada por la cantidad de agua que puede infiltrarse en el suelo si no hay riesgo para la calidad del agua subterránea.

Calidad

Los estanques tratan la escorrentía de varias maneras:

- La sedimentación de sólidos en aguas tranquilas. Tener plantas en el agua mejora condiciones de calma y promueve la liquidación.
- Adsorción por vegetación acuática.
- Actividad biológica.

Integración con el medio

Los estanques ofrecen muchas oportunidades para el paisajista. Permanentemente los estanques están mojados, pueden ser utilizados para almacenar agua para su reutilización, y ofrecen excelentes oportunidades para la prestación de los hábitats de vida silvestre, además pueden ser parte del espacio público abierto.

Mantenimiento

- Eliminación de Basura / escombros.
- Entrada de limpieza / salida.
- Vegetación gestión.
- Monitoreo de sedimentos y la eliminación cuando sea necesario.

6.2.3.3. *Drenaje geocelular*

Los sistemas geocelulares se pueden utilizar para controlar y gestionar el escurrimiento de agua de lluvia de la superficie ya sea como un pozo de absorción o como un tanque de almacenamiento. La naturaleza modular/nido de abeja de los sistemas geocelulares permite que puedan ser adaptados a las necesidades específicas de cualquier sitio.

Calidad

Para lograr un tratamiento de calidad de agua, estos sistemas tendrán que formar parte de un tren de gestión TEDUS, con la gestión de sedimentos apropiado y dispositivos de control de la contaminación instalado.

Mantenimiento

Inspeccionar e identificar las áreas que no están funcionando correctamente. Si es necesario, tomar medidas correctivas.

La remoción de escombros de la superficie de captación (donde puede causar riesgos para el desempeño).

Cuando la lluvia se infiltra en los bloques de arriba, revisar si la superficie del filtro esta bloqueada por cieno, algas u otras materias.

Construcción

Es fundamental que la preparación del terreno y la instalación del sistema se llevan a cabo a las condiciones de control de calidad apropiados.

Todos los tanques de almacenamiento se deben sellar completamente de acuerdo con las normas de impermeabilización (es decir, uniones soldadas en lugar de adhesivo grabado) y la integridad de la junta deberá comprobarse a través el uso de ensayos no destructivos, para asegurar que es a prueba de fugas. Se necesita tener cuidado durante la instalación, contra daños tanto de la estructura modular y el geotextil y/o envoltura geomembrana.

6.2.4. Medidas estructurales: Uso de vegetación

6.2.4.1. *Humedales*

Los humedales son superficies amplias de agua construidas artificialmente, con poca profundidad y vegetación propia de pantanos y zonas húmedas. Este sistema proporciona un mayor grado de filtración y eliminación de nutrientes gracias a la acción de la vegetación, ocupando una menor extensión que otros sistemas (EPA, 1999).

La construcción de estos espacios artificiales se pueden llevar a cabo por medio de geoestructuras o sistemas modulares geocelulares. Una de las funciones de estos humedales artificiales es la de controlar y gestionar la escorrentía de agua de lluvia, ya sea como un pozo de absorción o como un tanque de almacenamiento.

Es fundamental destacar que en ningún caso los humedales naturales deben recibir aportaciones procedentes de escorrentía urbana, sólo los humedales artificiales están preparados para esta tarea (CIRIA C523, 2001).

Dada la importancia que tiene la revegetación de los humedales, debe realizarse en lo posible con especies vegetales nativas para maximizar su rendimiento y su longevidad. Del mismo modo es importante asegurar un flujo base, incluso durante los períodos de sequía.

6.2.4.2. Cubiertas verdes

Las cubiertas verdes comprenden un sistema de múltiples capas que cubre la cubierta de un edificio o estructura podio con cubierta vegetal. La cubierta consistirá en una capa impermeable, un sustrato en crecimiento y una capa de drenaje (aunque no todos las cubiertas verdes requieren una capa de drenaje).

Los cubiertas verdes están diseñadas para interceptar y retener la precipitación, reducir el volumen de la escorrentía y la atenuación de los flujos máximos.

Calidad del agua

A través de una variedad de procesos de tratamiento físicos, biológicos y químicos que filtran contaminantes y reducen el volumen de escorrentía de precipitación, las cubiertas verdes reducen la cantidad de contaminación entregado al sistema de drenaje local y, en última instancia, en las aguas receptoras. Un contaminante que las cubiertas verdes ayudan a controlar, es el nitrógeno.

Mientras que el gas nitrógeno se produce de forma natural como un componente principal de la atmósfera, compuestos nitrogenados de escape de los automóviles, fertilizantes agrícolas y las actividades industriales pueden crear un problema significativo de contaminación. Los compuestos de nitrógeno en el aire pueden caer al suelo en polvo, gotas de lluvia, o simplemente debido a la gravedad. Cuando estos compuestos son arrastrados por las aguas pluviales, contribuyen a los problemas de eutrofización de las aguas superficiales. Los cubiertas verdes, sin embargo, pueden ayudar a que la contaminación por nitrógeno sea un problema menor de calidad del agua.

Cantidad de agua

Un objetivo importante del diseño de cubiertas verdes es detener y retener la escorrentía post-desarrollo en todo un sitio con el fin de imitar las funciones hidrológicas previas al desarrollo del sitio. Esto se logra mediante la infiltración, avapotraspiración y el almacenamiento temporal de agua de escorrentía mediante uno o unas Prácticas de gestión integrada (PIM) que ayudan a mantener la velocidad de descarga pico pre-desarrollo y el momento.

En el siguiente capítulo se explicará más minuciosamente las cubiertas verdes.

7. CUBIERTAS VERDES

Se define **cubierta verde** como tecnología de la construcción mediante la cual cubiertas o azoteas de edificios o construcciones son adaptadas parcial o totalmente para el crecimiento vegetativo con el fin de obtener una función ecológica.

Esta tecnología consiste en superponer capas en las cubiertas de los edificios con el fin de conseguir simular un suelo apto para el crecimiento de determinadas especies vegetales así como mejorar las propiedades respecto a las cubiertas convencionales. Podemos diferenciar cinco capas identificadas en la ilustración 5: capa impermeable, capa protectora, capa drenante, capa filtrante y capa vegetal.

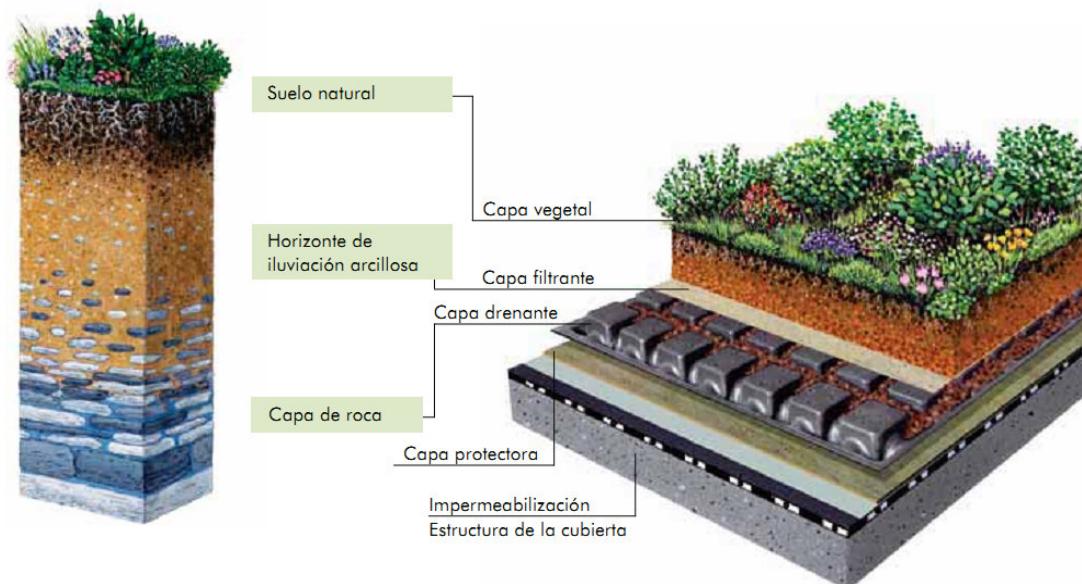


Ilustración 10: Reproduciendo la naturaleza sobre las cubiertas, Fuente: Zinco cubiertas ecológicas, 2014.

7.1. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS CUBIERTAS VERDES

Ventajas

- Reducir la contaminación atmosférica.
 - Incrementar la capacidad de retención de agua.
 - Puede ser aplicado en núcleos de población de alta densidad.
 - Contribuye a la implementación de energías renovables.
 - Superficie libre utilizable.
 - Mejora la biodiversidad ofreciendo un hábitat.
 - No requiere la ocupación de superficies específicas.
 - Mejora la calidad del aire.
 - Ayudar a gestionar los impactos de isla de calor urbano.
 - Ahorra energía, buen aislamiento térmico.
 - Prolonga la vida útil de la impermeabilización.
 - Incrementa la absorción acústica.

Desventajas

- Mayor coste constructivo en comparación con cubiertas convencionales.
 - No es apropiado para cubiertas con grandes inclinaciones.
 - Dificultades para la implementación en algunas estructuras.
 - Mayor coste en mantenimiento de la vegetación.
 - Dificultad de posibles reparaciones.

7.2. TIPOS DE CUBIERTAS VERDES

Existen tres tipos diferenciados de cubiertas verdes y se clasifican en función del espesor del sustrato y de las especies vegetales utilizadas: extensivos, intensivos y semi-intensivos.

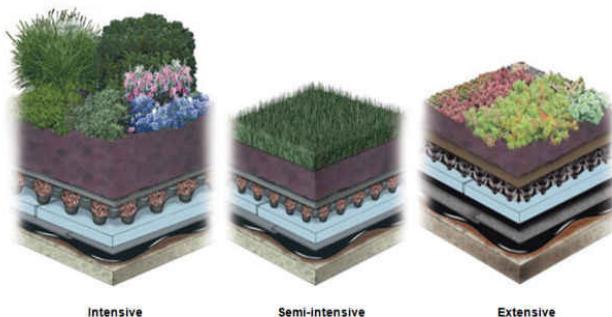


Ilustración 11: Tipos de cubiertas verdes

A continuación, en la tabla 2, se relacionan los diferentes tipos de cubiertas, extensivos, intensivos, semi-intensivos, con sus características principales.

	Extensivo	Semi-Intensivo	Intensivo
Profundidad	25-125 mm*	125-180mm	180-610mm
Peso	74-122 kg/m ²	122-195 kg/m ²	170-390kg/m ²
Peso c/agua	95-175kg/m ² *	195-280 kg/m ²	350-815kg/m ²
Plantas	Musgos, sedums, suculentas y algunas gramíneas	Perennes seleccionados, sedums, ornamentales, aromáticas y pequeños arbustos	Plantas perennes, césped, verde Putt, arbustos y árboles, la agricultura en la azotea
Altura plantas	15cm	1-3m	10m
Capacidad de retención de agua.	25-64 l/m ² *	70 l/m ²	113 l/m ²
Riego	No se recomienda, dependerá de la zona	Parcialmente, según sea necesario	Si, automático/fluido
Mantenimiento	Bajo / 2-3 inspecciones por año	Medio / mensuales	Alto / quincenales
Coste	Bajo	Medio	Alto

Tabla 11: Características de los tipos de cubiertas verdes.

*En la tabla 3 se relacionan los diferentes tipos de cubiertas extensivas con sus características propias.

Cubierta extensiva	Sédum	Herbáceas	Inclinados
Espesor	9-13 cm	11 cm	12 cm
Peso saturado	95-150 kg/m2	115 kg/m2	175 kg/m2
Capacidad de retención de agua	25 l/m2	35 l/m2	64 l/m2

Tabla 12: Resumen características cubiertas extensivas Fuente: Cubiertas verdes en Barcelona, BCNecología, 2010.

A continuación se expondrán los diferentes tipos de cubiertas verdes, así como algunos ejemplos seleccionados del catálogo comercial de la empresa ZinCo Cubiertas Ecológicas S.L, disponible en <http://www.zinco-cubiertas-ecologicas.es/guias_tecnicas/guias/Cubiertas_sistemas_verdes.pdfp>

7.2.1. *Cubiertas verdes extensivas.*

Los cubiertas extensivas actúan como una capa con funciones ecológicas, que tienen beneficios, tanto ambientales como económicos sobre los costes de mantenimiento del edificio donde se implantan (sirven de aislante térmico). Este sistema es el más ligero de todos y el más barato. Siendo el mejor para instalar en los tejados de difícil acceso o en los de gran pendiente.

Sistema “Sedum Tapizante”

Como indica el nombre de la cubierta, se utilizan plantas del género *Sedum* y variedades complementarias con densidad de plantación de 16 unidades por metro cuadrado.

Estructura del sistema

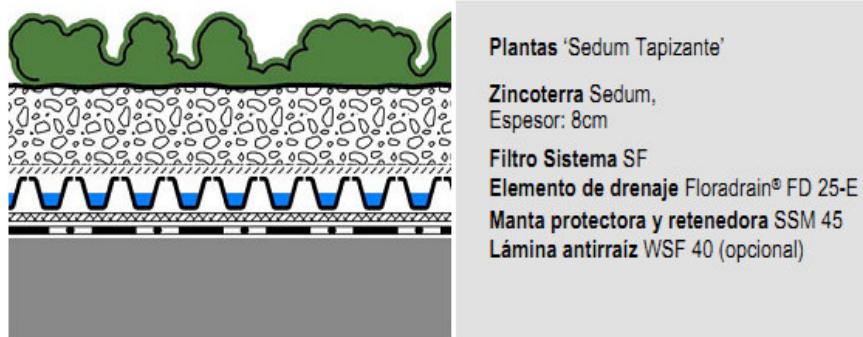


Ilustración 12: Cubierta extensiva: sedum tapizante. (Fuente: Zinco S.L., 2014)

Datos técnicos

- Espesor de la estructura: aprox. 11cm
- Peso saturado de agua: aprox. 120 kg/m²
- Volumen de retención de agua: aprox. 30 l/m²

Ventajas

- Capa de protección ecológica en vez de cubierta con grava.
- Requiere un mínimo de mantenimiento.
- Para cubiertas sin charcos y inclinación ligera hasta 8°.

Sistema “Tapizante floral”

Estructura del sistema

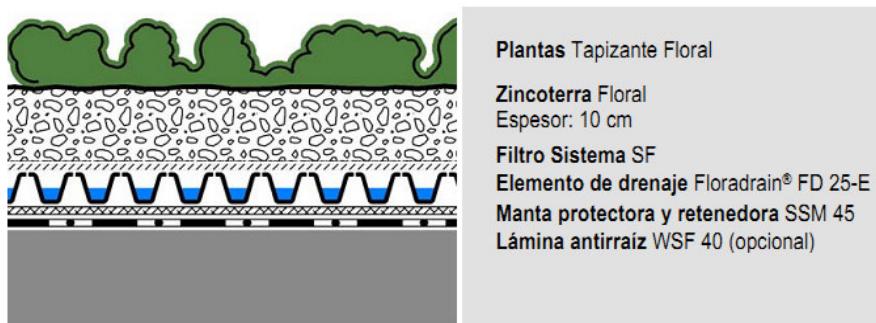


Ilustración 13: Cubierta extensiva: tapizante floral. (Fuente: Zinco S.L, 2014)

Datos técnicos

- Espesor de la estructura: aprox. 13cm
- Peso saturado de agua: aprox. 150 kg/m²
- Volumen de retención de agua: aprox. 50 l/m²

Ventajas

- Cubierta ecológica con una gran variedad de plantas y protección ecológica.
- Da muchas posibilidades de incluir formas estéticas y paisajísticas.
- Requiere poco mantenimiento.
- Para cubiertas sin charcos y inclinación ligera hasta 8°.

Tapizante Floral (cubierta invertida)

Estructura del sistema

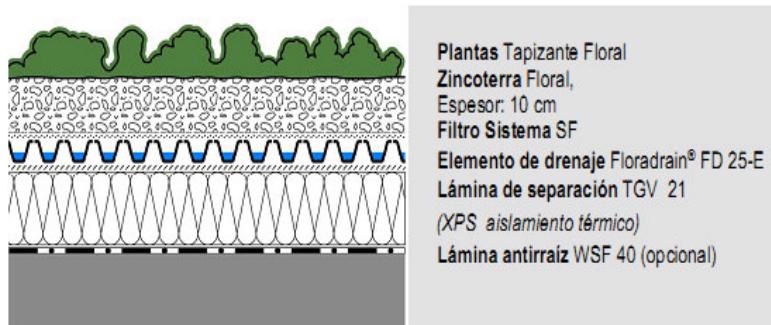


Ilustración 14: Cubierta extensiva: tapizante floral (cubierta invertida).

(Fuente: Zinco S.L., 2014)

Datos técnicos

- Espesor de la estructura: aprox. 13 cm
- Peso saturado de agua: aprox. 145 kg/m
- Volumen de retención de agua: aprox. 40 l/m²

Ventajas

- Sistema para cubierta verde con aislamiento térmico.
- Requiere un mínimo de mantenimiento.
- Para cubiertas sin charcos y inclinación ligera hasta 8°.

Sistema "Cubierta con pendiente 20°"

Estructura del sistema

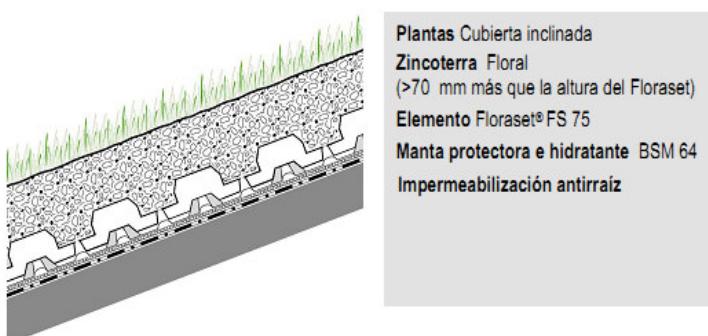


Ilustración 15: Cubierta extensiva: pendiente 20°. (Fuente: Zinco S.L., 2014)

Datos técnicos

- Inclinación 10°-20°
- Altura: aprox. 15 cm
- Peso saturado de agua: aprox. 145 kg/m²
- Volumen de retención de agua: aprox. 44 l/m²

Ventajas

- Cubierta verde atractiva con una inclinación de 10° hasta 20°, con poco mantenimiento.
- Los elementos Floraset retienen el sustrato y evitan movimientos del mismo.
- El perfil aero y los soportes antiempuje transfieren fuerzas de empuje directamente al forjado.
- El forjado tiene que ser apto para absorber las fuerzas

Sistema "Cubierta con pendiente 35°"

Estructura del sistema

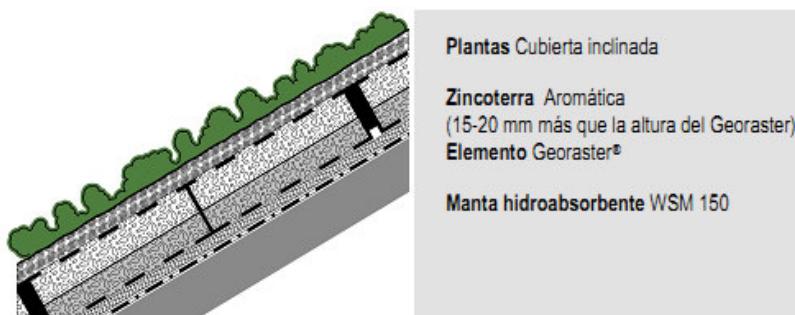


Ilustración 16: Cubierta extensiva: pendiente 35°. (Fuente: Zinco S.A, 2014)

Datos técnicos

- Inclinación 21° - 35°
- Altura: aprox. 12 cm
- Peso saturado de agua: aprox. 170 kg/m²
- Volumen de retención de agua: aprox. 55 l/m²

Ventajas

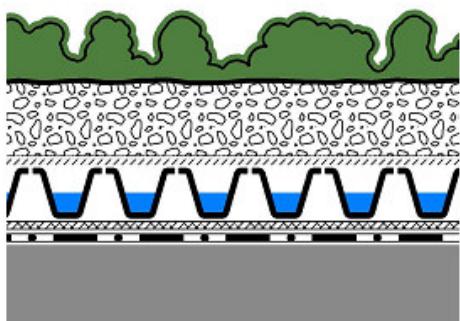
- Cubierta verde atractiva con una inclinación de 21° hasta 35°.
- Los elementos Georaster® transmiten las fuerzas transversales en los soportes antiempuje y en la estructura.
- A partir de 30° se recomienda tepes precultivados.
- Las especies vegetales seleccionadas deben estar adaptadas a la climatología de la zona, ya que la radiación solar es mayor (especialmente en las que están orientadas al sur).
- Cubiertas verdes inclinadas necesitan un mantenimiento periódico. Un sistema adicional de riego es recomendable.

7.2.2. **Cubiertas verdes semi-intensivas.**

Las características de este sistema son una combinación de las asociadas a los sistemas intensivos y extensivos. Este sistema es ideal para tejados finos que son parcialmente accesibles. A menudo se incluyen en azoteas con un uso social-recreativo por lo que se le añaden elementos paisajísticos para hacerlos más atractivos. Usualmente estos sistemas se instalan sobre tejados de metal o de hormigón/cemento que pueden soportar el sobrepeso y la membrana impermeable.

Sistema “Plantas Aromáticas”

Estructura del sistema



Plantas según lista de plantas

Zincoterra Aromáticas
 A partir de 100 mm - 150 mm)

Filtro Sistema SF
 Elemento de drenaje Floradrain® FD 40-E
 Manta protectora y retenedora SSM 45

Lámina antirraíz WSF 40 (opcional)

Ilustración 17: Tipo cubierta semi-intensiva: plantas aromáticas. (Fuente: Zinco S.L., 2014)

Datos técnicos

- Espesor medio de la estructura: aprox. 17 cm
- Peso medio saturado de agua: aprox. 195 kg/m
- Volumen medio de retención de agua: aprox. 70 l/m²

Ventajas

- Cubierta verde atractiva que deja libertad para acentos paisajísticos, p.ej. con lavanda, origanum, claveles o iris.
- Para cubiertas con una inclinación hasta 8°.
- Se recomienda un sistema de riego durante los meses calurosos y un mantenimiento periódico.
- Es posible crear combinaciones entre zonas pavimentadas y zonas ajardinadas.

7.2.3. Cubiertas verdes intensivas.

La instalación de cubiertas verdes intensivas es comparable a la construcción de un jardín en una cubierta ya que proporcionan beneficios similares a los de pequeños parques o jardines domésticos. Por eso, a menudo se las denominan también cubiertas ajardinadas. Dado que la variedad vegetal es más amplia que en las capas extensivas, necesitan de mayores cargas estructurales y espesores de sustrato para retener más agua y mantener la vegetación. Además, el mantenimiento ha de ser periódico, con tareas habituales de jardinería como cortar el césped, abonado, riego o escardas.

Sistema “Cubierta Jardín”

Estructura del sistema

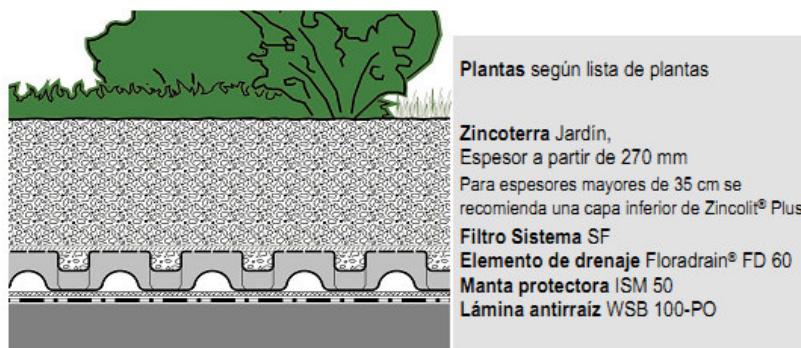


Ilustración 18: Tipo cubierta intensiva: cubierta jardin. Fuente: Zinco S.L., 2014.

Datos técnicos

- Espesor de la estructura: a partir de 27cm
- Peso saturado de agua: a partir de 345 kg/m²
- Volumen de retención de agua: a partir de 115 l/m²

Ventajas

- Sistema de cubierta verde multifuncional con una gran capacidad de retención de agua y la posibilidad para un sistema de aljibe.
- Muchas combinaciones posibles, como p.e. zonas pavimentadas, patios, árboles o zonas infantiles.
- Floradrain® FD 60 se puede llenar con hormigón para hacer una sub-estructura para zonas pavimentadas sin penetrar la impermeabilización.

De la información anterior, se expone en la tabla 4 una valoración de las cubiertas verdes extensivas e intensivas con sus ventajas y desventajas generales.

Cubiertas verdes extensivas	Cubiertas verdes intensivas
<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ligero; cubierta generalmente no requiere refuerzo. • Apto para grandes áreas. • Apto para tejados con 0-30 ° (pendiente). • Bajo mantenimiento y larga vida. • A menudo no hay necesidad de riego y especializada. • Sistemas de drenaje. • Conocimientos técnicos Menos necesario. • Con frecuencia adecuada para proyectos de modernización. • Se puede dejar a crecer la vegetación espontánea. • Relativamente barato. • Parece más natural. • Más fácil para la planificación de autoridad para exigir como condición para la aprobación de las obras. 	<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Una mayor diversidad de plantas y hábitats. • Buenas propiedades de aislamiento. • Puede simular un jardín silvestre en el suelo. • Se puede hacer muy atractivo visualmente. • A menudo accesible, con más diversa utilización de la cubierta. Es decir, para la recreación, el cultivo de alimentos, como espacio abierto. • Más de la eficiencia energética y de aguas pluviales capacidad de retención. • Mayor vida útil de la membrana.
<p>Desventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Menos de la eficiencia energética y de aguas pluviales beneficios de retención. • Más selección limitada de las plantas. • Por lo general, no hay acceso para la recreación u otros usos. • Poco atractivo para algunos, sobre todo en invierno. 	<p>Desventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mayor carga de peso en el cubierta. • Necesidad de sistemas de riego y drenaje que requiere energía, agua, materiales. • Mayores costos de capital y de mantenimiento. • Los sistemas más complejos y experiencia.

Tabla 13: Comparación de cubiertas verdes: Extensivos e Intensivos (Fuente: adaptado de "Greenbacks from Green Roofs: Forging a New Industry In Canada," CMHC. 1998.)

7.3. DISEÑO HIDRÁULICO Y CALIDAD DEL AGUA

Los criterios en cuanto a diseñar una cubierta verde son:

- Diseño para el almacenamiento de agua.
- Inclinación del cubierta.
- Resistencia estructural de la cubierta.
- El diseño hidráulico debe seguir la guía BS EN 12056-3 (BSI, 2000).
- Sumideros para reducir los riesgos de saturación.

Consideraciones de diseño adicionales incluyen:

- El peso saturado del sistema y la capacidad de soporte de carga de la cubierta y la estructura subyacente.
- Cargas impuestas, incluyendo el mantenimiento y la cubierta nevada.
- Resistencia a la penetración de las raíces en la membrana impermeable.
- Resistencia a la cizalladura del viento y (levantamiento) presiones negativas de viento.
- Gestión de drenaje, idoneidad de material vegetal.

Aunque las cubiertas verdes absorben la mayor parte de la precipitación que reciben durante los eventos ordinarios, existe la necesidad de descargar el exceso de agua en el sistema de drenaje del edificio. Esto es porque su rendimiento hidráulico durante eventos extremos tiende a ser bastante similares a los cubiertas estándar. El diseño hidráulico del drenaje de las cubiertas verdes debe por lo tanto, seguir la norma BS EN 12056-3 (BSI, 2000) así como la normal BS EN 6229, Código de prácticas para cubiertas planas con revestimientos apoyados continuamente (BSI, 1982).

Los cubiertas verdes contribuirán a la atenuación de los flujos de las tormentas más grandes y esto debe ser tenido en cuenta al dimensionar los dispositivos TEDUS aguas abajo.

En la ilustración 14 se puede observar la capacidad de almacenamiento de las diferentes cubiertas verdes. La cantidad de agua por volumen de sustrato estará entre el 20% en volumen en cubiertas extensivas y el 45% en volumen en cubiertas intensivas. En cualquier caso, la capacidad máxima de agua no debe exceder el 65 % en volumen con el fin de evitar el anegamiento.

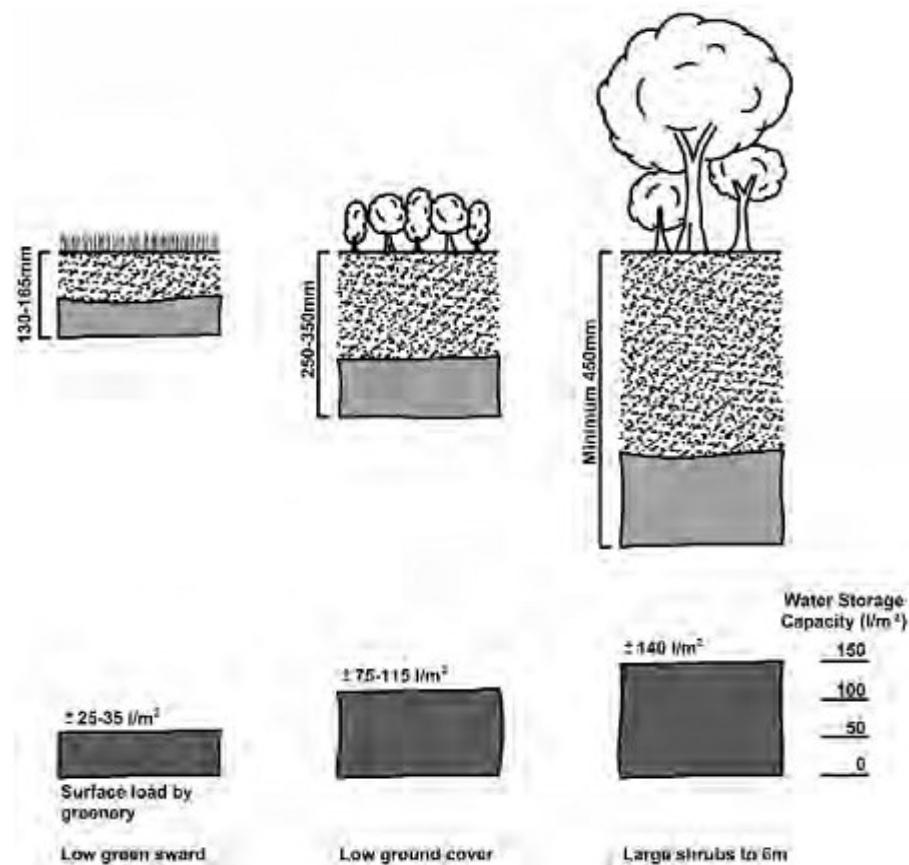


Ilustración 19: Capacidad de almacenamiento de cubiertas verdes

(Fuente: adaptado de English Nature, 2003)

Según un estudio desarrollado para el proyecto *Blue Green Dream Climate-KIC* en el cual se estudió el efecto de las cubiertas verdes en una cuenca urbana situada en Villepinte (Francia), cerca de París, llegaron a la conclusión de que una saturación del 10% al 50% en volumen representa una capacidad de almacenamiento de agua de unos 6 mm (6 l/m^2) para un sustrato con espesor 3 cm. Parece suficiente para reducir significativamente la consecuencias de una amplia gama de eventos de lluvia. Por esta razón, la aplicación de cubiertas verdes es más eficiente para eventos de precipitación estándar y cortas que para los eventos extremos y largos en los que el sustrato podría ser saturado rápidamente. En consecuencias, las cubiertas verdes deberían de ser más adaptadas para reducir los impactos de eventos de lluvia de verano que los de invierno. Además, como la evapotranspiración es mayor en verano, la probabilidad de tener baja saturación inicial del sustrato es mayor.

7.4. ESPECIFICACIONES FÍSICAS

7.4.1. Resistencia al fuego

Las cubiertas verdes deberían de presentar cierta resistencia al fuego como lo hacen los cubiertas convencionales. Pruebas en Alemania (DIB 4102-7) han demostrado que en las cubiertas extensivas hay poca probabilidad de inicio de incendio por chispas, siempre que la base del sustrato tenga un mínimo de 30mm y no contenga más del 20% de volumen de contenido orgánico, por lo que se recomienda que las cubiertas verdes no contengan más del 20% de contenido orgánico en volumen. Estas son algunas recomendaciones para reducir el riego :

- Dejar espacios intencionadamente sin vegetación, por ejemplo gravas (de 20 mm a 40 mm de anchura) o de pavimento (500 mm de ancho).
- Poner soportes de piedra u hormigón con una anchura de mínima de 1 m o muros cortafuegos con un alto de 300 mm.
- Se debe evitar la presencia de especies invasoras (se consigue con el mantenimiento rutinario).

7.4.2. Aislamiento

Estudios han demostrado que las cubiertas vegetales son un aislante excelente en invierno y verano. Una cubierta plana, sin vegetación, puede llegar a acumular hasta 21°C más de calor que una cubierta vegetal.



On a typical day, the Chicago City Hall green roof measures almost 80°F (40°C) cooler than the neighboring conventional roof.

Ilustración 20: Diferencia de temperatura entre cubierta normal y verde(Fuente: EPA, 2013)

7.4.3. Inclinación del tejado

Un buen drenaje es vital para aumentar la vida útil de una cubierta verde, de esta forma se garantiza que el agua no se quede encharcada en zonas no preparadas para ello. La pendiente mínima será de 1 en 80, recomendado para cubiertas planas en BS 6229 (BSI, 1982), normalmente están diseñadas para una pendiente de 1 en 40. El coste de las cubiertas verdes tiende a aumentar con la pendiente de la cubierta, para cubiertas con una inclinación mayor de 1 en 10, el escurrimiento rápido debe prevenirse mediante el aumento de la capacidad de retención del sustrato. Para cubiertas más inclinadas se deben diseñar con los siguientes criterios:

- Evitar el deslizamiento y erosión del suelo.
- Proporcionar apoyo adicional con listones transversales.
- Proporcionar una estructura de rejilla elevada para asegurar el sustrato.

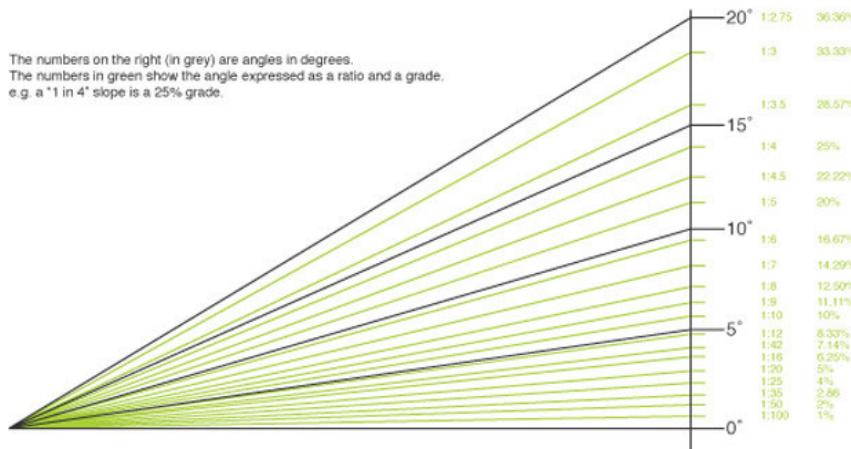


Ilustración 21: Pendientes para cubiertas verdes. (Fuente: www.greenroofguide.co.uk, 2005)

7.4.4. Soporte de cubierta

La carga adicional en la estructura de la azotea varía con el tipo de cubierta verde, pero suele estar dentro de un rango de 0,7 a 5 kN/m². En cubiertas verdes intensivas con árboles y transitables, las cargas pueden llegar hasta 10 kN/m².

La carga distribuida debe tener en cuenta el suelo saturado (y cargas de nieve), y también se debe considerar el personal de mantenimiento y equipos.

Las presiones de levantamiento del viento son mayores en las esquinas de una

cubierta y estas deben ser zonas sin vegetación, se debe curbar con adoquines para evitar daños. Sin embargo, las cubiertas verdes no son más vulnerables a esta amenaza que las cubiertas convencionales. Los árboles pueden requerir protección contra el viento, o de lo contrario colocar un anclaje. En edificios altos, las velocidades altas de viento pueden incrementar la pérdida de agua y / o dañar las plantas a través de quemaduras por el viento, romper las hojas, y puede por lo tanto, resultar un riesgo para la supervivencia o vegetales a largo plazo, para mitigar estos efectos se pueden usar barreras.

7.4.5. Impermeabilización

La capa de impermeabilización debe de ser de alta calidad, porque es un componente vital para el sistema. Existen dos tipos comunes de membrana:

1. Capa membrana de asfalto de goma que se aplica directamente a la cubierta como un líquido caliente.
2. Capa membrana de lámina termoplástica que se instalan normalmente entre una barrera y capa aislante.

La capa de impermeabilización puede necesitar ser anclada a la cubierta para resistir el levantamiento del viento si se utiliza láminas de plástico. Las membranas deben ser resistentes a las raíces y deben ser protegidas contra los cambios de temperatura y los daños mecánicos para garantizar la integridad de la estructura del edificio.

Se debe tener cuidado con las membranas, porque su reparación es difícil una vez se ha colocado el resto de capas, por lo que se recomienda realizar pruebas de estanqueidad antes de instalarse en la cubierta.

7.4.6. Capa de drenaje

No la suelen llevar todos los tipos de cubiertas verdes, la capa de drenaje se encuentra sobre la capa de impermeabilización y la base de la cubierta verde. Favorece a que el sustrato se mantenga aireado, además almacena agua para las épocas de sequía, y drena el exceso de agua. Se conecta a los canalones y bajantes,

normalmente a través de sistemas de drenaje geocelulares o geocompuestos, que son ligeros y proporcionan eficiente drenaje.

La capa debe tener la capacidad de flujo suficiente para llevar el volumen necesario de agua de la cubierta y para evitar el encharcamiento de agua sobre la membrana. La capacidad de flujo dependerá de un número de factores, siendo los principales la hidráulica gradiente y la presión de confinamiento aplicada a la geocompuesto. Los estándares europeos (BS EN 13252, BSI, 2001) requieren que los fabricantes de "geotextiles y productos relacionados" tengan una capacidad de flujo en un gradiente hidráulico de 1.0 (para los cubiertas verdes, los gradientes más apropiados serían del orden de 0,01) y una presión de confinamiento de 20 kPa (que es adecuada para aplicaciones de cubiertas verdes), los fabricantes también deben ser capaces de dar los datos de rendimiento apropiado para menores pendientes hidráulicas.

Una capa superficial de grava en una anchura de aproximadamente 400 mm desde el exterior, se recomienda en el perímetro de la cubierta, proporcionando de drenaje adicional cerca de puntos de vertido, control de incendios y en el acceso a la azotea para el mantenimiento.

7.4.7. Capa de filtro geotextil

Esto evita la obstrucción de la capa de drenaje por lo separa del medio de crecimiento anteriormente. Es fundamental para marcar la posición de las entradas de la cubierta antes de instalar el capa de protección, de modo que puedan ser fácilmente localizados.

7.4.8. Suelo medio / crecimiento

El espesor del suelo depende del tipo de vegetación que se vaya a sembrar, el espesor suelo estar entre 100mm 250mm, aunque mayores profundidades contribuyen a la estabilidad contra el viento, a compensar las altas tasas de secado y a proteger las raíces de los daños por heladas.

Son obligatorios suelos de baja densidad y con buena retención de agua, así como las mezclas de orgánicos y material mineral (por ejemplo, triturado de piedra pómex y arcilla expandida).

Los materiales apropiados deben ser:

- Permeable al agua.
- Que retenga agua y aire.
- Resistente a la putrefacción, el calor, las heladas y la contracción.
- Alto contenido de nutrientes.
- Un buen medio de enraizamiento.

La tierra vegetal normal es demasiado pesada para su uso en sistemas de cubiertas verdes y el medio de crecimiento debe ser cuidadosamente formulado para cubrir las necesidades de oxígeno, nutrientes y humedad de plantas. Existen directrices detalladas para la especificación de los suelos para las cubiertas verdes, han sido desarrollado en Alemania (FLL, 2002), así como el pliego de condiciones de suelo.

7.4.9. El almacenamiento de agua / riego

Los cubiertas verdes deben ser capaces de almacenar agua. Si esto no es posible dentro del sustrato se deben proveer formas adicionales de almacenamiento de agua. No se recomiendan los sistemas de riego debido al coste y a la dotación de recursos asociados a su implementación y gestión, en el caso de que sea necesario, las necesidades hídricas se calculan a partir del volumen del suelo, su densidad, punto de marchitez y capacidad de campo .

Si se requiere la irrigación, los irrigadores nivel que introducen agua directamente a la raíz zonas a través de la capa de drenaje tienen las siguientes ventajas:

- Se anima a las raíces para crecer hacia abajo en la parte más profunda del suelo donde condiciones de temperatura y humedad son más estables.
- Se mantiene la superficie de la cubierta verde seca, desalentando así la germinación de semillas de malas hierbas.
- Las pérdidas de agua por evaporación se reducen al mínimo.

7.4.10. Desagüe

Deben existir varios puntos de desagüe en las cubiertas verdes para reducir al mínimo el riesgo de bloqueo, lo que podría tener graves consecuencias. También deben ser de fácil acceso para limpieza de temporada.

Los detalles sobre la capacidad, ubicación de los canales de agua de lluvia y puntos de desagüe se da en la BS 12056-3 (BSI, 2000), los puntos de desagüe deben

aceptar tanto el escurrimiento de la capa de drenaje y como el de la superficie del sistema.

Los puntos de desagüe deben estar separados del medio de crecimiento tal como se muestra en la ilustración 17.

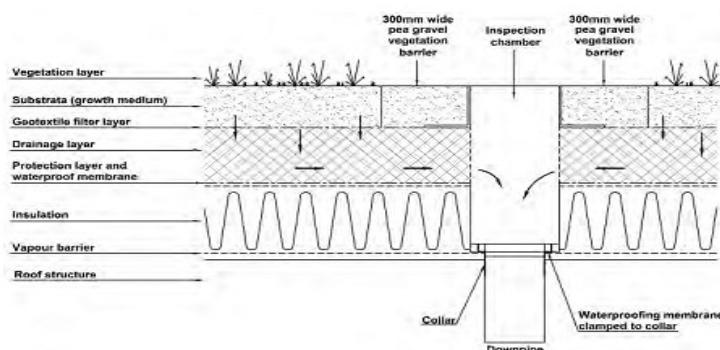


Ilustración 22: Ejemplo: detalle de desagüe en un cubierta verde

(Fuente: adaptado de Wilson et al,2004)

7.4.11. Acceso

Las escaleras, las barreras del perímetro, caminos y en algunos casos, la iluminación y los ascensores, todos deben estar construidos según las normas pertinentes, si la cubierta verde es para ser utilizado por personas, también se debe considerar la posibilidad de acceso para el mantenimiento, en el caso de que la cubierta no sea transitable.

7.4.12. Paisaje y vegetación

El microclima de la azotea es un entorno difícil para las plantas, el asesoramiento de un arquitecto paisajista o profesional similar con experiencia de cubiertas verdes es esencial. La vegetación tiene que soportar lluvias periódicas, alternando agua y períodos secos. Las plantas también tienen que soportar fuertes vientos y bajas temperaturas invernales (que no se mejora con el calor ambiental almacenado en el suelo).

Para que la vegetación sea capaz de sobrevivir debe tener las siguientes características:

- Perenne.
- Tolerante a la sequía, que requieren poco o ningún riego después del establecimiento.

- Preferencia por los suelos bien drenados.
- Colonización rápida.
- Autosuficiente, sin la necesidad de fertilizantes, pesticidas o herbicidas.
- Capacidad para soportar el calor, el frío y los fuertes vientos.
- Capacidad de tolerar la pobreza del suelo y condiciones ligeramente ácidas.
- Bajo mantenimiento es decir, necesitan poco o ningún corte o poda.
- Resistente al fuego.

La elección de las plantas también depende de las otras capas en el diseño del cubierta (y viceversa) y en condiciones de sol y sombra. Las plantas elegidas deben ser apropiadas para el sustrato utilizado, su espesor y las condiciones ambientales. Para hacer frente a estos requisitos, especies alpinas o subalpinas son los más adecuados para los cubiertas verdes. Algunos sedum (Sedum) especies se adaptan bien, al igual que los juncos (Carex), festuca (Festuca) y hierba de plumas (Stipa). Las hierbas, pastos y otras cubiertas de tierra baja también pueden ser apropiados, sin embargo se debe buscar el consejo de un especialista, en muchos casos puede ser muy bueno para ampliar la gama de plantas, como para mejorar el almacenamiento de agua, mejorar la estética del cubierta o potenciar la biodiversidad. El uso de una gama más amplia de las plantas depende de otras capas en el sistema y la accesibilidad o la visibilidad de la cubierta.

Sugerencias para las plantas pertinentes con el aumento de la profundidad de medio de crecimiento se dan en la ilustración 18.

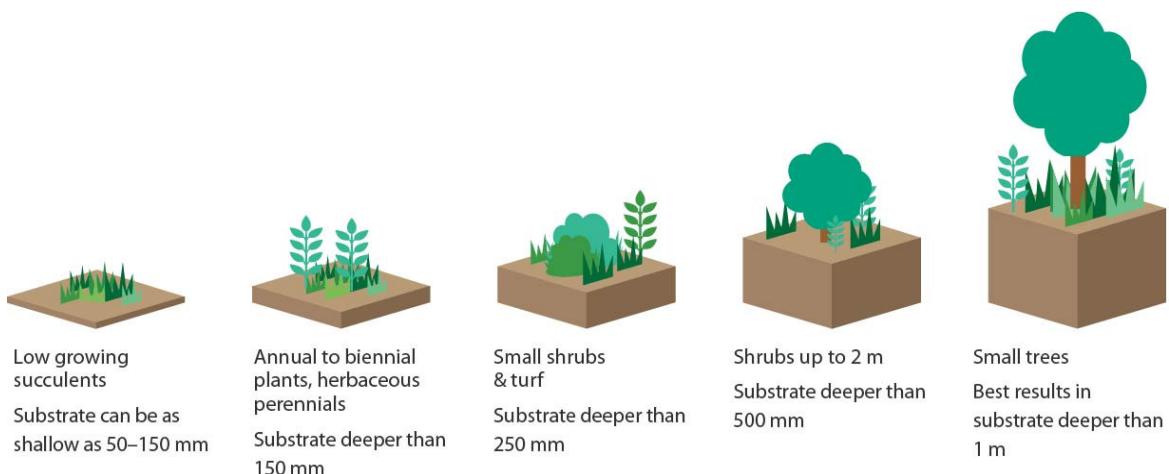


Ilustración 23: Siembra de cubiertas verdes según su profundidad (Fuente: Recuperado de www.growinggreenguide.org, 2014)

Hay cuatro métodos básicos en instalación de la vegetación en cubiertas verdes:

1. Alfombras de vegetación: Son alfombras de pre-germinado que proporcionan completa e inmediata cobertura y control de la erosión. Estas tienen un mínimo de problemas de malezas, y requieren poco mantenimiento o el riego durante el período de establecimiento.
2. Tapones o plantas en macetas: Estos pueden proporcionar más flexibilidad, pero la cobertura toma más tiempo, y la erosión puede ser un riesgo. Requerirán riego y deshierbe durante el establecimiento.
3. Puntillas: Estos tienen que ser plantados a mano, y requieren escarda, el control de la erosión y riego inicialmente.
4. Semillas: Estos tienen que ser a mano o en máquina, y requieren el deshierbe, la erosión control y riego inicialmente.

Las cubiertas verdes intensivas, al ser ajardinadas logran adaptarse estéticamente. Las cubiertas verdes extensivas no pueden ser universalmente aceptadas debido a su aspecto en diferentes épocas del año, aunque en la práctica, las cubiertas verdes en los centros urbanos no son visibles para la mayoría de los transeúntes, pueden ser pasadas por alto debido a que los edificios son de gran altura. En las zonas suburbanas tienden a utilizar cubiertas inclinadas que son más visibles.

7.5. REQUISITOS PARA EL FUNCIONAMIENTO Y MANTENIMIENTO

La vida útil de una cubierta verde esta estimada en 50 años, para ello se necesita mantenerlas adecuadamente.

Las cubiertas verdes intensivas requieren un mantenimiento regular. Los céspedes requerirán siega semanal o quincenal, las alfombras de vegetación pueden requerir deshierbe semanal o quincenal durante la temporada de crecimiento, y los prados de flores silvestres pueden requerir siega anual con los esquejes quitados.

Las cubiertas verdes extensivas normalmente sólo deberían exigir visitas bi-anual o anuales para eliminar la basura, comprobar las brechas cortafuego y desagües y, en algunos casos, eliminar plantas invasoras. La mayor parte del mantenimiento se requiere generalmente en los primeros tres años, y por lo general esto se hace a cargo el proveedor de la cubierta verde.

La membrana impermeabilizante requiere inspecciones visuales para garantizar

la estanqueidad, por eso es recomendable en las zonas sensibles mantenerlas libres de plantas y dividir la cubierta en diferentes compartimentos para facilitar la reposición de la membrana (periodos de 30 a 50 años).

Las revisiones de drenajes y canaletas para comprobar el estado de la membrana se establecen en dos o tres veces al año.

El área del sistema mecánico debe estar provista de barreras y con drenaje separado, para asegurar que el drenaje de la cubierta no vaya a ser contaminado.

La formación e información sobre la operación y mantenimiento de la cubierta deberá ser proporcionado a todos los propietarios e inquilinos. Se requerirán cierres de seguridad para personal que trabaja en la azotea.

Las vías de acceso a la azotea deben ser diseñados y mantenidos para ser seguros y eficientes, además los pasillos deben estar siempre libres de obstáculos.

Las actividades de mantenimiento deben ser detallados en el Plan de Seguridad y Salud, se debe llevar a cabo una evaluación del riesgo.

7.5.1. Construcción

La correcta aplicación de la membrana impermeable es esencial para la viabilidad de la cubierta verde. El control de calidad se garantizará mediante la utilización de procedimientos de cubiertas certificadas y una prueba de agua inmediatamente después de la aplicación de la membrana para asegurar la impermeabilidad.

El lastrado temporal de los componentes individuales puede ser necesario durante la construcción para evitar el levantamiento por el viento.

Se requiere un acceso seguro para la construcción de la cubierta verde, y también para todas las actividades realizadas bajo la misma.

7.5.2. Coste

Si bien los costes iniciales de las cubiertas verdes son más altos que los de las cubiertas convencionales, los propietarios de los edificios pueden ver compensada la diferencia a través de la reducción de los costes energéticos y de gestión de las aguas pluviales, y potencialmente por la mayor esperanza de vida de los cubiertas verdes en

comparación con los materiales para cubiertas convencionales.

Los investigadores y las comunidades están comenzando a estudiar, el ciclo de vida con un completo análisis para determinar los beneficios netos de los cubiertas verdes. Un estudio de la Universidad de Michigan comparó los costes esperados de las cubiertas convencionales con el coste de 1.950 m² de cubierta verde y todos sus beneficios, como la gestión de las aguas pluviales y la mejora de la salud pública por efecto de la absorción de los óxidos de nitrógeno. La cubierta verde costaría 464.000 dólares para su instalación frente a 335.000 dólares para una cubierta convencional. Sin embargo, durante su vida útil, la cubierta verde ahorraría alrededor de 200.000 dólares. Casi dos tercios de estos ahorros provendrían de la reducción de las necesidades de energía para el edificio con el cubierta verde.

El coste promedio de las medidas adoptadas para procesar el agua lluvia sin recurrir al alcantarillado son de 15 euros por metro cuadrado. Una cubierta vegetal extensiva procesará aproximadamente un 54% del agua lluvia durante el invierno, lo que significa un beneficio de entre 8 y 10 euros por metro cuadrado (54% de 15 euros).

No se ha conseguido información exacta de los costes en la implantación de cubiertas verdes, los datos mostrados en la tabla 5 corresponden a estimaciones.

ESTUDIOS Y COMPONENTES	COSTES	
Estudio de viabilidad estructural	0,1% Coste de la obra	Es imprescindible cuando el edificio está construido.
Dirección de obra	0,3% Coste de la obra	El número y el tipo de consultores necesarios dependerá de las medidas y la complejidad del proyecto y de la superficie.
Cubierta extensiva	80-90 €/m ²	Incluye instalación del sistema de irrigación para poder regar en épocas de sequía extrema, también incluye el coste plantas.
Cubierta extensiva	220-250 €/m ²	Incluye instalación del sistema de irrigación para poder regar en épocas de sequía extrema, también incluye el coste plantas.
Mantenimiento cubierta	10-20 €/m ²	Costes que dependen de la superficie, el tipo de cubierta, sistema de riego y las plantas escogidas. Costes sólo aplicables los 2 primeros años.*

Tabla 14: Costes aproximados de la implantación de cubiertas verdes.

*En muchos de los casos los distribuidores de cubiertas verdes, se encargarán del mantenimiento en los tres primeros años de vida útil de la misma.

7.5.3. *Beneficios y costes*

Las cubiertas verdes pueden proporcionar un micro hábitat para las aves y los insectos, la conexión de hábitats naturales aislados entre sí, o proporcionar un hábitat "isla" por encima de los que están en el nivel del suelo.

Los cubiertas verdes pueden ser diseñadas específicamente para asemejarse a los ecosistemas en peligro, es decir, praderas o xerojardines.

Los cubiertas verdes pueden mejorar la calidad del aire mediante el aumento de la evapotranspiración y el efecto de filtrado y la sombra de su follaje, lo que ayuda a mejorar el efecto de isla de calor urbano, sobre todo en zonas con escasa vegetación.

Beneficios /costes	Energía, Hidrología	Otros
Beneficios privados	<ul style="list-style-type: none">Reducción del consumo de energía.Mayor vida útil.	<ul style="list-style-type: none">Reducción del ruido.Valor estético.La producción de alimentos.
Beneficios públicos	<ul style="list-style-type: none">Temperatura reducida.Reducción de las aguas pluviales.Costes de la instalación reducidos.	<ul style="list-style-type: none">Contaminantes de aire reducidos.Reducción de gases de efecto invernadero.Beneficios para la salud humana.
Costes privados	<ul style="list-style-type: none">Instalaciones Arquitectura/IngenieríaMantenimiento.	N/A
Costes públicos	<ul style="list-style-type: none">La administración del programa.	N/A

Tabla 15: Beneficios y costes de cubiertas verdes (Fuente: EPA,2006)

7.6. ALTERNATIVAS DE CUBIERTAS VERDES

7.6.1. Alternativas de capas

- Cubriendo la estructura de la cubierta encontramos la **membrana impermeabilizante**. Puede estar compuesta por materiales bituminosos, con cierto contenido en polímeros reciclados como el polietileno (PE) o caucho sintético (EPDM). El uso de cloruro de polivinilo (PVC) no se recomendaría dado el impacto ambiental de sus compuestos clorados.

Conviene que se trate de **membranas monolíticas**, con el fin de eliminar las aberturas por dilatación y contracción y así, disminuir el riesgo de filtraciones accidentales cuando se den condiciones de humedad constante o incluso de agua estancada.



Ilustración 24: Ejemplo de capa aislante. (Fuente: Cemat, 2010)

En ocasiones, es recomendable la selección de membranas impermeables que incorporan un tratamiento anti-raíces, sobretodo en el caso de las cubiertas intensivas en las que los sistemas radiculares de las plantas pueden ser más agresivos. La barrera anti-raíces puede ser una membrana de polietileno de alta densidad (HDPE) o de asfalto modificado reforzado con poliéster y gránulos cerámicos.

- Encima de la membrana impermeabilizante, se coloca la **capa de aislamiento**. Una de las opciones más recomendables es la utilización de poliestireno extruido (en inglés *XPS* o *styrofoam*), posee una conductividad térmica típica entre 0,033 W/mK y 0,036 W/mK, presenta una baja absorción de agua y unas prestaciones mecánicas muy altas.

- Sobre la capa de aislamiento se instalan los componentes de retención de agua y **capa de drenaje**. Son sistemas especialmente diseñados para permitir la retención de agua y nutrientes necesarios en épocas de sequía, al mismo tiempo que aseguran un buen drenaje y aireación, de este modo garantizarán un buen balance entre agua y aire. Pueden llegar a retener hasta 5 L/m² de agua, que llega al sustrato por evaporación o por contacto directo de las raíces de las plantas permitiendo el auto abastecimiento.



Ilustración 25: Ejemplo de capa drenante Platon De-25.(Fuente: Sánchez-Pando, 2008)

Esta capa dispone de cavidades o poros que permiten una eficiente circulación del aire, regulando la humedad y la ventilación del suelo y las raíces. Los materiales utilizados pueden ser fibras de polipropileno (PP) o polietileno (PE) ambas recicladas conformado en paneles.

- Entre la capa de drenaje y la capa vegetal se sitúa la **capa filtrante**. La función de esta capa es la de soportar el sustrato de la capa vegetal evitando que caiga y obstruya la capa de drenaje. Los materiales utilizados para esta función pueden ser de material **geotextil**, es una tela permeable y flexible de fibras sintéticas, principalmente polipropileno y poliéster cuyas principales aplicaciones son: el control de la erosión, el refuerzo de suelos, la filtración y separación entre capas de materiales.



Ilustración 26: Ejemplo de geotextil GEOPROMA®. (Fuente: DUPONT, 2007)

7.6.2. Alternativas de sustratos

Los sustratos para cubiertas verdes deben de ser específicos para adaptarse a las características de las cubierta, al tipo de vegetación escogida y al programa de mantenimiento seleccionado.

La tierra normal presenta características diferentes a las requeridas en las cubiertas verdes, tiene una permeabilidad muy limitada, permite muy poca retención de agua, tiene un peso muy elevado y unas propiedades físico-químicas inadecuadas. Además, pueden ser el vector de proliferación de malas hierbas y enfermedades en las plantas seleccionadas.

Como cualquier sustrato, estará compuesto de materiales orgánico e inorgánico pero éstos deberán estar diseñado específicamente para proporcionar a las plantas seleccionadas una zona de: enraizamiento, aireación, riego y los nutrientes que necesitan para sobrevivir, además que facilite la liberación del exceso de agua.

Las características principales que los sustratos para cubiertas verdes deben cumplir los siguientes aspectos:

- Buen drenaje para garantizar la evacuación rápida del agua de lluvia en condiciones de fuertes pluviometrías, evitando posibles sobrecargas estructurales por exceso de agua retenida.
 - Buena porosidad del sustrato, garantizando facilitando la aireación y el drenaje del agua.
 - Buena capacidad de retención de agua. Este agua retenida queda disponible para las planta en condiciones menos favorables minimizando el estrés hídrico de las plantas.
 - Buena capacidad de enraizamiento para las especies seleccionadas.
 - Buena capacidad tapizante que evite la erosión del sustrato por acción del viento.
 - Facilidad en la su instalación.
 - Inocuo, libre de organismos patógenos, sustancias fitotóxicas o semillas de malas hierbas.
 - Baja densidad para reducir el peso del sistema.
 - Resistencia al fuego evitando altas proporciones de materia orgánica.
 - Adecuada proporción de nutrientes según las especies vegetales seleccionadas.
- (Nota: las cubiertas extensivas tienen un requerimiento de nutrientes bajos,

mientras que los cubiertas intensivas y semi-intensivas tienen mayor necesidad de nutrientes).

La **textura del suelo** es la proporción en la que se encuentran distribuidas variadas partículas que pueden conformar un sustrato. Según sea el tamaño, porosidad o absorción del agua en la partícula del suelo o sustrato, puede clasificarse en 3 grupos básicos que son: la arena, el limo y las arcillas.

Las textura de suelo empleada en el sustrato de cubiertas verdes se acercarán a los tipos **franco**, esto se debe a los siguientes motivos:

- Los suelos arenosos son muy porosos y tienen poca capacidad de retención de agua.
- Los suelos arcillosos son compactos, tienen poca capacidad de drenaje.

La siguiente ilustración expone el triángulo de texturas de suelos. Según la proporción de tamaño de partículas se obtiene la textura correspondiente. En las aristas del triángulo esta situada la clasificación granulométrica del suelo de menor a mayor tamaño de partícula en: arcilla, limo y arena.

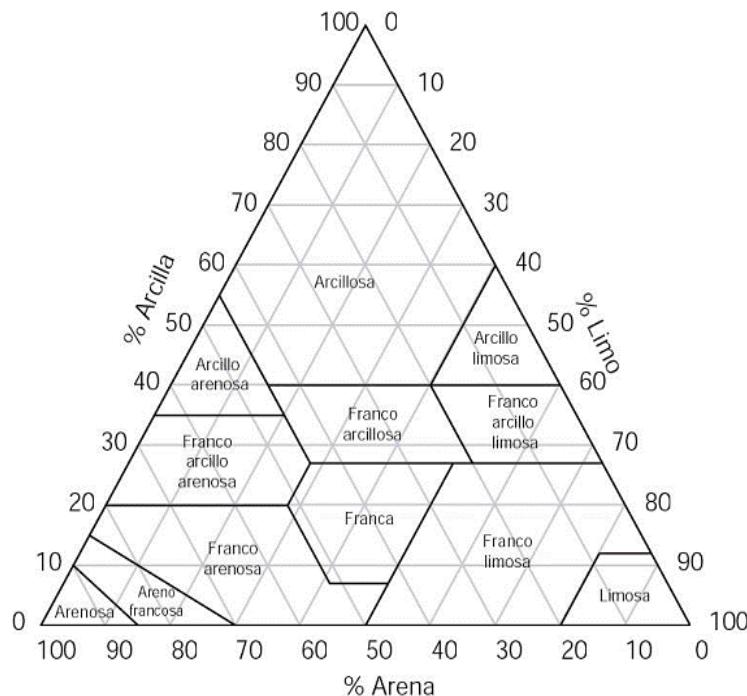


Ilustración 27: Triángulo de texturas de suelo según USDA. (Fuente:
Recuperado www.monografias.com/propiedadesdelsuelo,2009)

7.6.3. Alternativas de especies vegetales

La vegetación es lo que define a un cubierta verde. El tipo y la extensión de la vegetación determina el carácter visual y la calidad de la cubierta.

La vegetación protege la capa de sustrato de lixiviación y erosión; atrapa, absorbe y evapora el agua de lluvia; a través de la evaporación, la transpiración y el sombreado que contribuye a la refrigeración de la superficie del cubierta; proporciona alimento y hábitat para invertebrados y aves; y ayudará a la captura de los contaminantes del aire y proporcionar un sumidero de carbono atmosférico.

Para la selección de especies vegetales se tendrán en cuenta los siguientes criterios:

- Origen
 - especies nativas y naturalizadas
 - especies foráneas y adaptadas
- Clima
 - temperaturas
 - precipitación anual
 - índice de humedad
 - exposición
- Sustrato
 - pH
 - humedad
 - materia orgánica
 - textura
- Ornamentales
 - tamaño
 - forma y hábito
 - textura
 - color

Las plantas seleccionadas para este estudio, considerando el clima mediterráneo continental desértico de la ciudad de Zaragoza (inviernos fríos y veranos calurosos y secos) y dependido del tipo de cubierta son:

7.6.3.1. Plantas suculentas: género **sedum**

Las plantas **suculentas** o **crasas** son aquellas en las que la raíz, el tallo o las hojas se han engrosado para permitir el almacenamiento de agua en cantidades mucho mayores que en el resto de las plantas. Esta adaptación les permite mantener reservas de agua durante períodos prolongados y sobrevivir en entornos áridos y secos que otras plantas encuentran inhabitables. Las plantas suculentas más utilizadas en las cubiertas verdes son las pertenecientes al género **sedum**. Son plantas anuales o perennes, proporcionan cobertura vegetal durante todo el año y una amplia variedad de formas de hojas y colores. La mayoría de especies florecen en mayo y junio y los colores más comunes de flores son de color amarillo o rosa pálido. Son especies fiables y ampliamente utilizadas en cubiertas vegetales.

<u>Género y especie:</u>	<i>Sedum sediforme</i> (Jacq.) Pau
<u>Requerimiento ecológicos</u>	<p>Imagen</p>  <p><i>Ilustración 28: Sedum sediforme.</i> (Fuente: www.ipe.csic.es 2014)</p>

Tabla 16: Clasificación de especies vegetales: *S. sediforme*

<u>Género y especie:</u>	<i>Sedum album L.</i>
<u>Requerimiento ecológicos</u>	<p>Imagen</p>  <p><i>Ilustración 29: Sedum album L.</i> (Fuente: www.ipe.csic.es, 2014)</p>

Tabla 17: Clasificación de especies vegetales: *S. album L.*

7.6.3.2. Plantas aromáticas: familia *Lamiáceas*

Las **plantas aromáticas** son aquellas constituidas principalmente por aceites esenciales. Siendo los suelos aragoneses en su mayor parte calizos y secos, son el hábitat preferido por la mayoría de las aromáticas. Son generalmente hierbas, perennes o anuales. Las plantas de este grupo dan diversidad visual, estructural y ecológica a una cubierta verde.

Género y especie:	<i>Thymus vulgaris</i>	
Requerimiento ecológicos	Imagen 	<i>Ilustración 30: Thymus vulgaris.</i> <i>(Fuente:www.ipe.csic.es, 2015)</i>

Tabla 18: Clasificación de especies vegetales: *T. vulgaris*

Género y especie:	<i>Lavandula latifolia</i>	
Requerimiento ecológicos	Imagen 	<i>Ilustración 31: Lavandula latifolia.</i> <i>(Fuente:www.ipe.csic.es, 2014)</i>

Tabla 19: Clasificación de especies vegetales: *L. latifolia*

Género y especie:	<i>Rosmarinus officinalis</i> L.	
Requerimiento ecológicos	Imagen 	<i>Ilustración 32: Rosmarinus officinalis</i> <i>L. (Fuente:www.ipe.csic.es, 2014)</i>

Tabla 20: Clasificación de especies vegetales: *R. officinalis*

7.6.3.3. Plantas gramíneas: familia poeáceas

Las **plantas gramíneas** son la cuarta familia con mayor riqueza de especies. Son plantas herbáceas que su ciclo de vida pueden ser anuales, bienal o perennes. Por lo general son plantas que pueden cubrir grandes superficies en poco período de tiempo. Son más susceptibles a grandes variaciones de agua, tanto la escasez como el exceso de agua, que otros tipos de plantas. Como parte de la vegetación mixta, proporcionan una contraste visual y una diversidad estructural adicional. Por lo general, las plantas indicadas en las fichas son utilizadas en cubiertas verdes como tapizantes.

Género y especie:	<i>Cynodon dactylon</i>	
Requerimiento ecológicos	<p>Imagen</p> 	<p><i>Ilustración 33: Cynodon dactylon.</i> (Fuente: www.ipe.csic.es, 2014)</p>

Tabla 21: Clasificación de especies vegetales: *C. dactylon*

Género y especie:	<i>Stipa parviflora</i>	
Requerimiento ecológicos	<p>Imagen</p> 	<p><i>Ilustración 34: Stipa parviflora.</i> (Fuente: www.ipe.csic.es, 2014)</p>

Tabla 22: Clasificación de especies vegetales: *S. parviflora*

7.6.3.4. Plantas arbóreas

Un **árbol** es una planta perenne, de tallo leñoso, que se ramifica a cierta altura del suelo. Al igual que en la selección de plantas, las especies arbóreas han sido elegidas atendiendo criterios de adaptación a las funciones en la cubierta verde así como a las condiciones climáticas y edafológicas. En la siguiente tabla se muestra las especies seleccionadas:

ESPECIE ARBOREA	NOMBRE COMÚN	ALTURA	pH	RESISTENCIA VIENTO	HUMEDAD	CRECIMIENTO
Acer monspessulanum	Arce de Montpellier	6-10	5 – 8,5	Alto	Media	Muy lento
Albizzia julibrissin	Acacia de constantinopla	5-10	5 – 7,5	Media	Media	Rápido
Cercis siliquastrum	Árbol de Judas	5-8	6,5 – 8,5	Baja	Media	Medio
Cornus mas	Cornejo macho	6-8	6 – 8,5	Alta	Media	Medio
Koelreuteria paniculata	Koelreuteria	7-9	4,5 - 8	Bajo	Media	Lento
Prunus cerasifera atropurpurea	Ciruelo rojo	6-8	5 – 8,5	Media	Media	Rápido

Tabla 23: Especies arbóreas seleccionadas



Ilustración 36: Acer monspessulanum.
Fuente: www.ipe.csic.es, 2014



Ilustración 35: Prunus cerasifera atropurpurea.
Fuente: herbariobotanicoornamental.com, 2012



Ilustración 37: Albizzia julibrissin.
Fuente: jardinesdelaoliva.com, 2010

8. MODELADO DE TEDUS EN SWMM v5.1.007

El **SWMM (Storm Water Management Model)** es un software de modelado de gestión de aguas pluviales diseñado por la EPA (United States Environmental Protection Agency).

SWMM permite modelizar 7 tipos de TEDUS diferentes: áreas de bioretención, jardines de lluvia, cubiertas verdes, pavimentos permeables, zanjas filtrantes, depósito de lluvia y cunetas verdes. En la última versión de este software, versión 5.1, se ha incluido un nuevo módulo específico para el modelado de cubiertas verdes (**LID Controls**), evitando así tener que utilizar el módulo de biorretención con las ventajas que esto conlleva. Este nuevo módulo, añade a las capas disponibles en el módulo usado anteriormente una nueva capa, la capa drenante, mejorando de esta manera la efectividad del modelo de esta técnica.

Como se ha descrito anteriormente, las **Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible (TEDUS)** tienen diferentes denominaciones. Se recuerda que **LID (Low Impact Development)** es el término empleado en Estados Unidos para esta técnica.

8.1. DEFINICIÓN DEL MÓDULO LID CONTROLS

La utilización de la técnicas LID dentro de un proyecto de SWMM es un proceso en dos fases que:

1. Crea un conjunto de técnicas LID independientes de la escala que pueden ser implementadas en todo el área de estudio.
2. Asigna cualquier combinación y tamaño deseado de esas técnicas a las subcuencas seleccionadas.

Cuando se añade una o varias técnicas LID a una cuenca, el “*Area property*” de la misma es el área total de la cuenca (ambas partes, la que contiene la técnica LID y la que no), mientras que el porcentaje de impermeabilidad y los parámetros de anchura “*Width parameters*” se aplican sólo a la porción de terreno que no tiene la técnica LID implantada.

Seleccionando en el menú la categoría “*Hydrology / LID’s Controls*” desde el “*Data Browser*” se puede agregar, editar o eliminar objetos LID individuales. Para determinar las características de las técnicas LID de cada cuenca se utilizan los módulos “*Property Editor*” y “*Group Editor*”.

8.2. UBICACIÓN DE LID's DENTRO DE SUBCUENCAS

Hay dos enfoques o métodos diferentes para ubicar los LID dentro de una cuenca:

- Localizarlas dentro de una cuenca ya existente que reemplazará a una porción del área de la misma, ocupando un área real dentro de ella.
- Crear una nueva subcuenca dedicada exclusivamente a la práctica de una única LID.

El primer enfoque permite una combinación de técnicas LID para ser colocadas en una cuenca, cada una de las técnicas pueden tener un tratamiento específico en función de la escorrentía generada en la porción no-LID (parte de la subcuenca no ocupada por ninguna técnica LID). Hay que tener en cuenta que bajo esta opción, el área donde están implantadas las técnicas LID actúa en paralelo (no se las puede poner a trabajar en serie). Además, después de la colocación de las LID, las propiedades de la cuenca “*Porcentaje de impermeabilidad*” y “*Anchura*” requieren de un ajuste para compensar la cantidad de área de cuenca original que ha sido sustituida por la técnica LID.

El segundo enfoque permite que las diferentes LID puedan trabajar en serie y también permite que la escorrentía de diferentes subcuenca aguas arriba sea transferida a las subcuenca LID. Si estas subcuenca LID individuales surgen de subcuenca existentes, habrá que realizar también ajustes del porcentaje de impermeabilidad, la anchura y del área. Además, cada vez que una técnica LID ocupa toda una subcuenca, los valores asignados a las propiedades estándar de la superficie de la subcuenca (como impermeabilidad, pendiente, rugosidad, etc) son invalidados por aquellos que pertenecen a la LID.

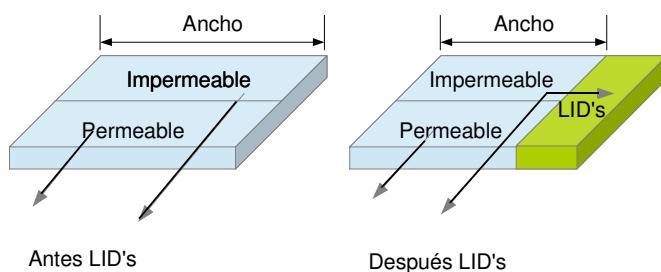


Ilustración 38: Implementación de técnica LID en una cuenca.

8.2.1. Parámetros requeridos para definir LID's dentro de subcuenca

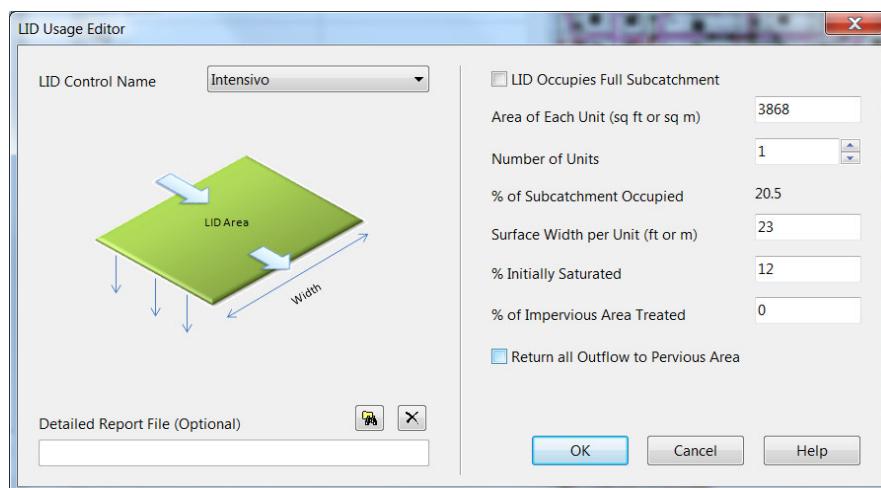


Ilustración 39: Ubicación de LID en una cuenca

Los parámetros a definir son:

- **Área de cada unidad (Area of Each Unit):** La superficie dedicada a cada unidad igual de LID en metros cuadrados, dividirá el total del área de la subcuenca entre el número de LID iguales. La etiqueta debajo del campo "número de unidades" indica la cantidad de área total de cuenca se dedica a un LID y se actualiza automáticamente cuando se realizan cambios ya sea en el número de unidades o en el área de cada unidad. Si la ventana "LID Occupies Full Subcatchment" está activada, entonces este campo queda inhabilitado
- **Número de unidades iguales (Number of Replicate Units):** Número de unidades del mismo tamaño de LID (por ejemplo, si existen varios edificios en una misma subcuenca, con igual área de cubierta) desplegados en la subcuenca.
- **Anchura de la superficie por unidad (Surface Width Per Unit):** Anchura del flujo a la salida de cada unidad LID (metros). Este parámetro sólo se aplica a cubiertas verdes, pavimentos porosos, zanjas de infiltración y cunetas verdes, ya que utilizan el flujo para transmitir el escurrimiento superficial de la unidad. Los otros procesos LID, tales como las áreas de biorretención, *rain gardens* y los depósitos de lluvia, simplemente desbordan el exceso de escorrentía que excede de sus bermas en el caso de las dos primeras técnicas o

de su capacidad en el caso de la última LID's.

- **% Saturado Inicialmente (% Initially Saturated):** Para las áreas de biorretención, éste es el grado de llenado inicial de agua (0% de saturación corresponde a la humedad del punto de marchitez, la saturación del 100% es la que tiene el contenido de humedad igual a la porosidad). La zona de almacenamiento debajo de la zona del suelo del área de biorretención se supone que es completamente seca. Para otros tipos de LID se corresponde con el grado de llenado de agua en el que está su zona de almacenamiento inicialmente.

El **porcentaje de saturación inicial de las cubiertas verdes** se calculará a partir de la capacidad de campo y el punto de marchitez, dependiendo si queremos que la vegetación se encuentre en buen estado "verde" se multiplicará por ½, de lo contrario se multiplicará por 1/3, quedando de la siguiente forma:

$$\text{Para cubiertas extensivas } \Delta S(\%) = \frac{1}{3}(CC - PM)$$

$$\text{Para cubiertas intensivas y semi-intensivas } \Delta S(\%) = \frac{1}{2}(CC - PM)$$

- **% Área impermeable tratada (% of Impervious Area Treated):** Porcentaje de la superficie impermeable del área de la subcuenca que no contiene técnicas LID, cuya escorrentía se trata con las técnicas de drenaje urbano sostenible. Si la unidad LID trata sólo la lluvia directa, como ocurre con las cubiertas verdes, este valor es 0. Y si la técnica LID ocupa la cuenca entera, este campo ha de ser ignorado.
- **Flujo de salida que va al área permeable (Send Outflow to Pervious Area):** Se selecciona esta opción si el flujo de salida de la LID se devuelve a la zona permeable de la cuenca, en lugar de ir al punto de vertido de la cuenca, es decir el flujo de salida del LID no llega a entrar al sistema. Un ejemplo de donde se podría aplicar esto sería un depósito de lluvia cuyo contenido se utiliza para el riego de una zona de césped. Este campo se ignora si la unidad LID ocupa la cuenca entera.

8.3. Configuración de parámetros en cubiertas verdes

Seleccionado el tipo de LID que nos concierne para el presente estudio, cubiertas verdes (green roofs), el programa requiere la definición de las tres capas principales de las cubiertas verdes: superficie, sustrato y drenaje.

El programa considera las cubiertas verdes como una variante de una célula de biorretención, la cual dispone de una capa drenante bajo la capa suelo que evacua el exceso de agua percolada tras un episodio de lluvia.

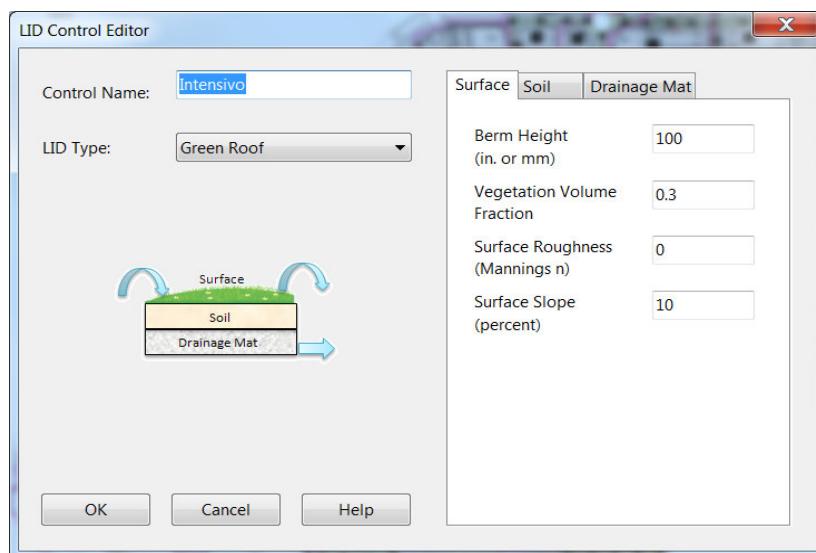


Ilustración 40: Ventana de configuración LID Control Editor para cubiertas verdes

8.3.1. Parámetros de superficie.

- **Altura de la berma (Berm Height) [mm].** En el caso de que haya presentes muros de confinamiento o bermas la altura de la berma es la profundidad máxima a la que el agua puede estancarse por encima de la superficie antes de que se produzca un desbordamiento. Para las técnicas LID por las que circule flujo superficial, es la altura de cualquier almacenamiento por depresión superficial. Para las cunetas verdes, es la altura de su sección transversal trapezoidal.

- **Fracción de volumen de vegetación (Vegetation volume fraction).** Es la fracción de volumen dentro de la profundidad de almacenamiento rellena con vegetación. Es decir, es el volumen ocupado por los tallos y las hojas, no la superficie de cobertura vegetal. Habitualmente, este volumen se puede ignorar, pero en determinadas ocasiones, cuando el crecimiento vegetativo es muy denso. El factor puede estar comprendido entre 0,1 a 0,3.
 - 0,1 cubiertas extensivas
 - 0,2 cubiertas semi-intensivas
 - 0,3 cubiertas intensivas
- **Rugosidad de la superficie (Surface roughness).**- Coeficiente de Manning, se emplea en los casos de Pavimentos Porosos o de Cunetas Verdes, en cubiertas verdes es igual a cero, esto se debe a que no se llegará a tener escorrentía en los cubiertas (flujo horizontal), el flujo siempre será vertical.
- **Pendiente de la superficie (Surface slope)[%].**- Pendiente de la superficie del cubierta verde, superficie del pavimento poroso. Utilice 0 para otros tipos de LID's, dependiendo del tipo de cubierta que se tenga el valor podrá oscilar entre 3 y 10%, siendo el mínimo establecido por norma el 3%.

8.3.2. Parámetro de sustrato

- **Espesor de la capa del suelo (Thickness)[mm]** Los valores típicos están en el rango de los 450 a 900 mm para áreas localizadas en calles o sobre el suelo directamente y de 60 a 600 mm para cubiertas verdes o green roofs.
- **Porosidad (Porosity).**- Fracción de volumen vacío respecto al volumen total del suelo.
- **Capacidad de campo (Field capacity).**- Relación del volumen de agua en los poros con el volumen total después de que el suelo haya sido drenado, es lo equivalente a cantidad de agua que un suelo retiene contra la gravedad cuando se le deja evacuar libremente.

- **Punto de marchitez (Wilting Point).**- Volumen de agua en los poros en relación al volumen total de un suelo bien seco, es pues la cantidad de agua que corresponde al límite inferior del agua absorbida por las raíces.

Textura	η (%)	ρ_b (g/cm ³)	Capacidad de campo $\theta(333 \text{ cm})$ (cm ³ /cm ³)	Punto de marchitez $\theta(15,000 \text{ cm})$ (cm ³ /cm ³)
Ar	32–42	1,65	0,15	0,08
F-Ar	40–47	1,50	0,21	0,12
F	43–49	1,40	0,31	0,17
a-F	47–51	1,35	0,36	0,18
L-a	49–53	1,30	0,40	0,20
a	51–55	1,25	0,44	0,21

Tabla 24: Propiedades físicas del suelo según texturas. (Fuente: Schwab, 1996)

- **Conductividad hidráulica (Conductivity)[mm/hr].**- Propiedad física que determina el movimiento de líquidos y gases en el sustrato. (0,5 mm / h para suelos saturados)
- **Pendiente de la conductividad (Conductivity slope).**- Pendiente media de la curva que relaciona la conductividad y la humedad del suelo, los valores van de 5 para arenas y 15 para arcilla limosa.
- **Altura de succión (suction head)[mm].**- Es el valor medio de succión capilar usado en green-Ampt.

Textura (USDA)	K_s (m/s) · 10 ⁻⁶	S_{av} (m)	$\theta_e \approx \theta_s$ (m ³ /m ³)	
Arcillosoa	0,167	0,0639–1,565 (0,3163)	0,427–0,523 (0,475)	
Arcillo-Arenosa	0,333	0,0408–1,402 (0,2390)	0,370–0,490 (0,430)	
Franco-Arcillosoa	0,556	0,0479–0,9110 (0,2088)	0,409–0,519 (0,464)	
Arcillo-Limosa	0,278	0,0613–1,394 (0,2922)	0,425–0,533 (0,479)	
Franco-Arcillo-Limosa	0,556	0,0567–1,315 (0,2730)	0,418–0,524 (0,471)	
Franco-Arcillo-Arenosa	0,833	0,0442–1,080 (0,2185)	0,332–0,464 (0,398)	
Franca	3,67	0,0133–0,5938 (0,0889)	0,375–0,551 (0,463)	
Franco-Limosa	1,89	0,0292–0,9539 (0,1668)	0,420–0,582 (0,501)	
Franco-Arenosa	6,06	0,0267–0,4547 (0,1101)	0,351–0,555 (0,453)	
Arenosa-Franca	16,6	0,0135–0,2794 (0,0613)	0,363–0,506 (0,437)	
Arenosa	65,4	0,0097–0,2536 (0,0495)	0,374–0,500 (0,437)	

Tabla 25: Parámetros de Green Ampt para distintas texturas. (Fuente: adapt. de Rawls and Brakensiek, 1983)

8.3.3. Parámetros de lámina drenante

- **Espesor (thickness) [mm].-** Los valores típicos de espesor de esta capa están entre 2,5 y 5 cm.
- **Fracción de vacío (Void fraction).-** Es el cociente del volumen vacío respecto al volumen total de la capa, el rango típico va de 0,5 a 0,6.
- **Rugosidad (Roughness).-** Constante n de Manning empleada para calcular la tasa de flujo horizontal del agua drenada a través de la capa. No es una especificación estándar del producto suministrada por los fabricantes y por lo tanto debe ser estimada. Se sugieren valores relativamente altos, de 0.1 a 0.4.

Por ejemplo, la marca comercial Floradrain, empleada en la construcción de cubiertas verdes por la empresa Zinco S.L., disponible en www.zinco.es, ofrece la siguiente información acerca de las láminas drenantes, y a partir de estos valores podemos calcular los parámetros requeridos por SWMM.

Para cubiertas extensivas donde el espesor del sustrato es pequeño se emplea capas de drenaje con una altura de 25mm.

Floradrain® FD 25-E



Elemento de drenaje y de retención de agua de poliolefina reciclada, resistente a la presión, para su instalación en cubiertas ajardinadas de tipo extensivo.



Datos técnicos

Floradrain® FD 25-E

Elemento de drenaje y retención de agua fabricado de poliolefina reciclada.

Material:	Poliolefina (principalmente polietileno)
Color:	gris oscuro
Altura:	aprox. 25 mm
Peso:	aprox. 1,7 kg/m ²
Diámetro de las aperturas de difusión:	aprox. 2 mm
Capacidad de retención de agua:	aprox. 3 l/m ²
Volumen de relleno:	aprox. 10 l/m ²
Resistencia a la compresión (vacío):	aprox. 270 kN/m ²
Capacidad de drenaje en superficie (EN ISO 12958):	
con 1 % de pendiente:	aprox. 0,59 l/(s·m)
con 2 % de pendiente:	aprox. 0,85 l/(s·m)
con 3 % de pendiente:	aprox. 1,05 l/(s·m)
Dimensiones:	aprox. 1,00 m x 2,00 m

Ilustración 41: Capa drenaje marca Floradain para cubiertas extensivas. (Fuente www.zinco.es, 2014)

Para cubiertas intensivas donde el espesor del sustrato es mayor se emplea capas de drenaje con una altura de 60mm.

Floradrain® FD 60



Elemento de drenaje y de retención de agua en ABS, probado durante años, para su instalación en cubiertas ajardinadas intensivas o transitables.



Datos técnicos

Floradrain FD® 60

Elemento de drenaje y de retención de aguas fabricado de ABS reciclado, moldeado mediante calor.

Material:	ABS (Acrilonitrilo)
Color:	negro
Altura:	aprox. 60 mm
Peso:	aprox. 2,30 kg/m ²
Capacidad de retención de agua relleno con Zincolit®Plus:	aprox. 10 l/m ²
Volumen de relleno:	aprox. 27 l/m ²
Resistencia a compresión (10% de compactación):	
vacío:	aprox. 19 kN/m ²
relleno:	aprox. 75 kN/m ²
Capacidad de drenaje en superficie (EN ISO 12958) (vacío):	
con 1 % de pendiente:	aprox. 1,4 l/(s·m)
con 2 % de pendiente:	aprox. 2,0 l/(s·m)
con 3 % de pendiente:	aprox. 2,5 l/(s·m)
Dimensiones:	aprox. 1,00 m x 2,00 m

Ilustración 42: Capa drenaje marca Floradain para cubiertas intensivas. (Fuente: www.zinco.es, 2014)

8.4. CALIDAD

Los suelos pueden considerarse como un sistema depurador porque es capaz de degradar o inmovilizar los contaminantes.

Los contaminantes, al entrar en contacto con el suelo, sufren distintas transformaciones, condicionadas por los factores climáticos, por las características del contaminantes y por las propias características edáficas.

El poder de amortiguación de un suelo representa la capacidad que tiene para inactivar los efectos negativos de los contaminantes. Esta beneficiosa acción se puede ejercer por varios mecanismos: neutralización, degradación biótica o abiótica, adsorción, complejación e insolubilización.

La capacidad depuradora depende fundamentalmente de determinadas características de los suelos:

- **Actividad microbiológica:** facilita la descomposición e inmovilización de los contaminantes.
- La **arcilla y la materia orgánica** absorben los contaminantes, los inmovilizan o liberan.
- La **capacidad filtrante** que regula la facilidad de penetración del contaminante.

Estas acciones dependerán de las propiedades del suelo:

- Los suelos con mayor proporción de **arcillas** tienen alta capacidad de auto depuración (en cubiertas verdes no se recomienda la alta presencia de arcillas por su poca capacidad drenante y su facilidad de encharcamiento).
- **Porosidad y permeabilidad:** facilitan la circulación de contaminantes.
- Capacidad de **intercambio iónico**: Fijan los contaminante sobre la superficie de las partículas sobre todo de las arcillas y materia orgánica.
- Los suelos con altos **contenidos en óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso** tiene gran capacidad para absorber e inmovilizar metales pesados.
- **PH:** Los contaminantes acidifican el suelo aumentando su vulnerabilidad.
- **Potencial de oxidación (Eh):** ambientes oxidante aumenta la capacidad autodepurante.

Los mecanismos de depuración de contaminantes en las cubiertas verdes

incluyen la filtración y la adsorción por las capas de sustrato, drenaje y la retención de las plantas. La eficiencia de la eliminación depende de factores como capa de suelo, estación, la naturaleza de los contaminantes, la temperatura y los niveles de luz. Sin embargo, la eliminación de contaminantes no es motivo de gran preocupación, porque la lluvia que cae sobre un cubierta verde no contiene grandes concentraciones contaminantes.

En el entorno urbano se podrían considerar concentraciones relativamente bajas de metales pesados y sólidos en suspensión. Las cubiertas verdes actúan como filtros pasivos de sólidos en suspensión llegando a retener partículas inferiores a 10 micras. Un estudio realizado por AF Speak (2012) demostró que los suelos extensivos capturan el 2,3% y los semi-intensivos del 9,8 al 17% .

No existe un módulo específico en SWMM que gestione los contaminantes en relación a la aplicación de TEDUS. Uno de los parámetros que se ven afectados por la aplicación de TEDUS es el área impermeable, resultando considerablemente menor que en modelos convencionales, esto da lugar a una menor escorrentía y como los contaminantes se asocian la escorrentía, se verán disminuidos en función de esta.

Sin embargo, existe una variable en la definición del arrastre de contaminantes llamada Stormwater Best Management Practices (BMP)(en porcentaje) asociada con técnicas de mejora de la gestión de la red que pudieran haberse realizado. La carga de arrastre calculada en cada intervalo se reduce en esta proporción, esto se explicará en el apartado de contaminantes.

Es habitual expresar el comportamiento de los contaminantes en tiempo de lluvia a partir de dos valores básicos: la concentración máxima en el polutograma generado por el suceso de lluvia y la concentración media de suceso (CMS), que es la masa total que ha pasado por la sección de control dividida entre el volumen total de agua que ha fluido durante el suceso.

Para la valoración del comportamiento de contaminantes se utilizarán los medidos en concentración media de sucesos (CMS). Se seleccionan los indicadores de contaminación que afectan al estudio que nos compete.

CMS (mg/L)	Sólidos en suspensión (SS)	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)
Valores medios	530,6	702,6	320,9

Tabla 26: Concentraciones medias de varios indicadores de contaminación según estudio de PROMEDSU

A la hora de introducir los contaminantes en SWMM, se nos presentan dos caminos diferentes: por una parte, la introducción directa en el editor de propiedad de nodo donde se puede especificar un caudal directo y continuo en tiempo seco a los que se asocia las concentraciones de los diferentes indicadores de la contaminación; por otra parte, desde el visor de datos, en el apartado de calidad se nos presenta dos formas de introducir datos de contaminación: desde el editor de contaminantes y desde el editor de usos del suelo.

En la ilustración 43 se muestra las ventanas para introducir los valores de contaminación desde el editor de propiedades de nodo.

Tal como se ha explicado, existe la posibilidad de introducir el caudal y las concentraciones de contaminantes (en mg/l) como aporte directo el cual se utiliza para especificar series temporales de aportes directos de caudal externo o de contaminante entrantes en un nodo de la red de drenaje; y como aportes en tiempo seco el cual se utiliza para especificar un aporte continuo en tiempo seco que entra en un nodo de la red de drenaje.

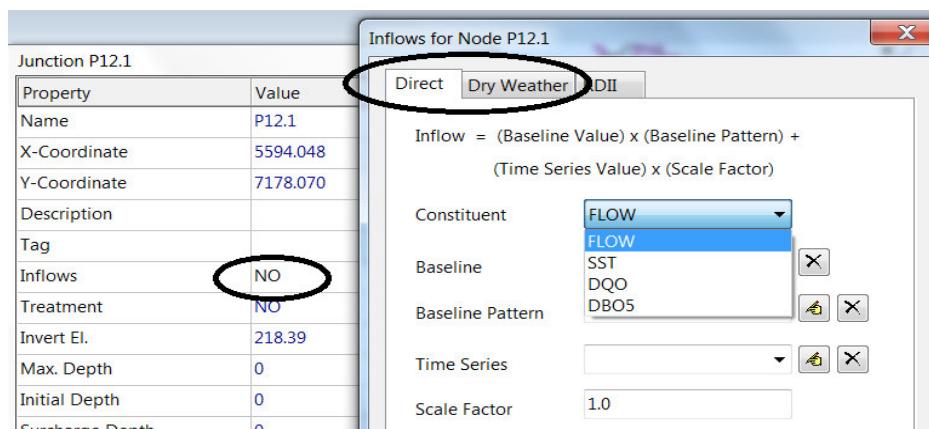


Ilustración 43: Introducción de contaminantes desde el nodo

Desde el apartado de calidad a la hora de incluir las concentraciones de los

indicadores de contaminación en SWMM, se nos presenta dos formas.

1. En la ilustración 44 se muestra la ventana para introducir los valores de contaminación desde el editor de contaminantes, donde se requiere parámetros diferenciados como las concentraciones: de aguas pluviales y de aguas residuales. Cada variable nos presenta un tratamiento diferente de las concentraciones ya que en función del volumen de agua en el que se disuelva, el volumen total de contaminantes variará enormemente. Por ejemplo, si se establece que la concentración de SS en "Concentración de flujo residual en tiempo seco" el volumen final será mucho más reducido que si lo colocamos en "Concentración en lluvia" porque el volumen de lluvia es mucho mayor que el residual.

Pollutant Editor	
Property	Value
Name	SST
Units	MG/L
Rain Concen.	0
GW Concen.	0.0
I&I Concen.	0.0
DWF Concen.	0
Init. Concen.	0
Decay Coeff.	0.0
Snow Only	NO
Co-Pollutant	*
Co-Fraction	0.0

*Ilustración 44: Introducción de contaminantes
desde el editor de contaminantes*

2. En la ilustración 45 se muestra la ventana para introducir los valores de contaminación desde el editor de usos del suelo, en la pestaña de arrastre se requiere la Event Mean Concentration (ECM) o Concentración Media de Suceso (CMS), que es la media de la mezcla de concentraciones entre las aguas residuales y las aguas de tormenta medidas en sucesos de lluvia.

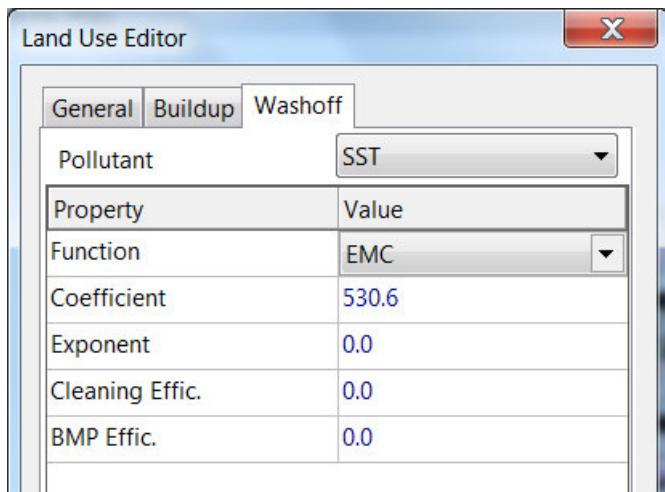


Ilustración 45: Introducción de contaminantes desde el editor de usos del suelo

También es posible definir agentes contaminantes asociados (co-pollutants) y asignarle una fracción cuya concentración en el caudal de escorrentía contribuye a la concentración del que está siendo editado. Por ejemplo la relación con un co-contaminante podría darse cuando la concentración de DBO_5 en el caudal de escorrentía es una fracción fija de la concentración total de sólidos en suspensión. En este caso los sólidos en suspensión se declararían como el co-contaminante de DBO_5 .

Existe una clara relación entre la concentración de Sólidos en Suspensión y la carga orgánica e inorgánica(DBO_5 , DQO).

La fracción de SST asociada como co-contaminante de la DQO es 1,32.

La fracción de SST asociada como co-contaminante de la DBO_5 es 0,60.

SWMM permite definir, la acumulación de contaminantes que se dan en días de no lluvia, así como la acumulación inicial de carga de contaminantes en la superficie de la cuenca antes del inicio de la simulación, en este estudio se considera un día de tiempo seco previo a la simulación.

8.4.1. Contaminantes

El programa SWMM permite estudiar la generación, entrada y transporte (evolución) de cualquier número de contaminantes asociados a la calidad del agua

definidos por el usuario.

La información necesaria para cada uno de estos agentes contaminantes es:

- Nombre del agente contaminante.
- Unidades de concentración (es decir, mg/litro, ug/litro, o unidades/litro).
- Concentración del contaminante en las aguas provenientes de la lluvia.
- Concentración del contaminante en las aguas subterráneas.
- Concentración del contaminante en los procesos de entrada directa o de infiltración.
- Concentración en el flujo en tiempo seco.
- Concentración inicial en todo el sistema de transporte.
- Coeficiente de decaimiento para la reacción de primer orden.

Primero se define los contaminantes presentes en el estudio, dado que los indicadores de concentración proceden de concentraciones medias de sucesos se han introducido en el apartado de arrastre de contaminantes (EMC) el valor correspondiente a los SST, además de dato de acumulación se considera el límite fijado para SST en áreas residenciales, los indicadores DQO y BDO5 se han relacionado con los SST:

En la siguiente tabla se muestra los datos a introducir en SWMM V5.1.

Indicadores de contaminación	SST	DQO	DBO₅
Unidades	mg/L	mg/L de O ₂	mg/L de O ₂
Concentración en Lluvia	0,0	0,0	0,0
Concentración en aguas subterráneas	0,0	0,0	0,0
Concentración en aportes I&I	0,0	0,0	0,0
Concentración de flujo sanitario tiempo seco	0,0	0,0	0,0
Concentración inicial	0,0	0,0	0,0
Coeficiente de decaimiento (1/días).	0,0	0,0	0,0
Solo nieve	NO	NO	NO
Co-Contaminante	*	SST	SST
Co-Fracción	0,0	1,32	0,60

Tabla 27: Contaminantes presentes en el estudio

8.4.2. Uso del suelo

La acumulación y el arrastre de contaminantes desde las áreas de las diferentes cuencas se determinan a partir de los usos del suelo asignados a dichas áreas. Es posible también la determinación de cargas de contaminante en el sistema de saneamiento mediante la introducción de series temporales de caudales de entrada, así como mediante los caudales de tiempo seco.

Dependiendo del tipo de actividades desarrolladas o bien características superficiales del suelo asignadas a las cuencas, los usos se pueden diferenciar en uso: residencial, industrial, comercial y no urbanizado. Las características superficiales del suelo incluyen parámetros tales como césped, pavimentos, terrazas, suelos sin uso, etc.

Los usos del suelo se utilizan únicamente para considerar los fenómenos de

acumulación y arrastre de contaminantes en las cuencas.

Los procesos que definen a cada uno de los usos del suelo son: Limpieza de calles (street sweeping), acumulación de contaminante (pollutant buildup) y arrastre de contaminante (pollutant washoff). Los datos a incluir en el apartado de calidad-uso del suelo en SWMM son:

- **Datos de limpieza de calles:** En este caso no se conocen los datos respecto a la limpieza por lo que los valores serán cero.

Nombre de uso del suelo	Residencial
Intervalo de limpieza de calles (días)	0
Disponibilidad para la Limpieza.-Fracción del contaminante acumulado que puede ser eliminado mediante la limpieza de la calle.	0
Última Limpieza (días)	0

Tabla 28: *Calidad, Uso del Suelo, Datos Generales*

- **Datos de Acumulación:** describe las propiedades asociadas a la acumulación de contaminantes sobre el terreno durante periodos de tiempo seco.

<u>Contaminante</u>	SST
Función. -Tipo de función de acumulación utilizada para el contaminante. Las opciones son NONE (ninguna) si no hay acumulación; POW para una función potencial de acumulación; EXP para acumulación exponencial, y SAT para una acumulación según una función de saturación.	POW*
Máxima acumulación (kg o lbs). De contaminante por unidad de variable normalizadora (área o longitud, tal como se puede ver en la parte inferior). Se representa como C_1 en las funciones de acumulación.	100
Constante proporcional. -Una constante temporal que gobierna la tasa de acumulación de contaminante. Es el coeficiente C_2 en las funciones de acumulación potencial y exponencial*. Para la función potencial las unidades son de (masa/día) C_2 y para la función exponencial es (días) $^{-1}$.	1
Exponente Potencia/Sat.(días). -Es el exponente C_3 utilizado en las función potencial o la constante de semisaturación C_2 en la función de saturación.	1
Variable de normalización. -Las opciones son área del terreno (ha) y longitud de cauce. Para la longitud de cauce se puede utilizar cualquier unidad, puesto que ésta permanecerá constante para todas las subcuenca del proyecto.	Área

Tabla 29: Calidad, uso del suelo y datos de acumulación de contaminantes

***Función Potencial (POW):** La acumulación de contaminantes es proporcional al tiempo elevado a una cierta potencia, hasta que se alcanza un valor máximo

$$\text{Min}(C1, C2*t^{C3})$$

Donde:

C1 es la máxima acumulación posible (masa por unidad de área).

C2 constante de crecimiento del contaminante acumulado.

C3 exponente del tiempo.

Se supone que cuando el uso es Residencial existe una acumulación de SST de 1Kg ·Ha, hasta alcanzar un valor límite de 100 Kg·Ha (este valor varía para cada uso del suelo, por ejemplo para suelo rústico es 25 Kg·Ha), en nuestro caso será 100 Kg·Ha.

- Arrastre de contaminantes.**

Nombre contaminante	SST
Coeficiente. -Es el valor del coeficiente C_1 en las expresiones de arrastre exponencial y mediante curva, o bien la concentración media de contaminante durante el evento.	530,6
Función. -Elección de la función de arrastre del contaminante. Las opciones son: NONE no hay arrastre; EXP arrastre exponencial; RC.-curva de arrastre en función del caudal de escorrentía; EMC.-arrastre donde la relación con el caudal de escorrentía es lineal.	EMC*
Exponente .-Es el valor del exponente C_2 en las expresiones de arrastre exponencial y mediante curva.	0,0
Eficiencia de la Limpieza(%). - Eficiencia de eliminación en la limpieza de calles para el contaminante. Representa la fracción del total de contaminante susceptible de ser limpiado en el total del uso del suelo que es finalmente arrastrado.	0,0
Eficiencia BMP (%) .-Eficiencia de la eliminación asociada con técnicas de mejora de la gestión de la red que pudieran haberse realizado. La carga de arrastre calculada en cada intervalo se reduce en esta proporción.	0,0

Tabla 30: Calidad, uso del suelo y datos de arrastre de contaminantes

***Concentración Media del Episodio (Event Mean Concentration):** Se trata de una función específica para determinar el flujo de arrastre, cuyo exponente es 1.0 y coeficiente es C_1 . Representa la concentración de contaminante arrastrado en unidades de masa por litro.

Tal como se ha expuesto anteriormente, en el estudio se consideran los indicadores: SST, DBO₅, DQO suministrados por PROMEDSU correspondientes a concentraciones medias de sucesos. Por este motivo, la introducción de valores en SWMM se llevará a cabo mediante la segunda opción, usos del suelo, ya que la zona de estudio en su totalidad es de uso residencial.

Dado que los valores suministrados por PROMEDSU son Event Mean Concentration (ECM) o concentración media de suceso (CMS), es decir, concentración de contaminantes en sucesos de lluvia. Es por ello que no representan las concentraciones contaminantes de aguas residuales urbanas emitidas en un período

sin lluvia, denominada Concentración Media de Tiempo Seco (CMTS).

Para la variable BMP se expone a continuación una tabla en la que la Agencia Americana de Medioambiente (EPA) presenta los porcentajes de eliminación de contaminantes esperados con la aplicación de TEDUS, las cubiertas verdes aún no están recogidas.

TEDUS	TSS	TP	Zn
SISTEMAS DE INFILTRACION	98%	83%	98%
HUMEDAL	98%	63%	91%
ÁREA DE BIORETENCIÓN	94%	60%	96%
PAVIMENTO POROSO	98%	43%	92%
CUNETAS VERDES	69%	29%	83%
ESTANQUE DE RETENCIÓN	69%	20%	96%

Tabla 31: - Rendimientos medios alcanzados por distintas técnicas de tratamiento de las aguas de escorrentía (Fuente:"Stormwater Best Management Practices (BMP) Performance Analysis", US-EPA- Revisado en 2010)

9. APLICACIÓN DE CUBIERTAS VERDES EN LA CUENCA DE ESTUDIO

La aplicación de las cubiertas verdes se realiza en una zona urbana no consolidada, situada en la provincia de Zaragoza, en el barrio de Miralbueno, con los siguientes datos:

- 262,75 hectáreas de superficie.
- 100.000 habitantes equivalentes.
- 28500 viviendas.

9.1. UBICACIÓN

El área de estudio se encuentra situado al norte con zona urbanizada consolidada del barrio, este Ronda Ibón de Plan, al oeste con la A-2/Z40, al sur con la carretera de Madrid y el canal imperial.



Ilustración 46: Ubicación de la zona de estudio

9.2. URBANIZACIÓN DE LA ZONA

La zona se ha urbanizado siguiendo los criterios especificados en el Plan General de Ordenación Urbana de Zaragoza (PGOUZ).

1. Se ha dotado con zonas verdes y zonas de equipamiento.
 2. Se ha diseñado los edificios con una correcta respuesta al entorno (orientación, viento, vistas).
 3. La ordenación general se apoya en los viales principales diseñados por el Ayuntamiento de Zaragoza.
 4. Se ha considerado las zonas de aparcamiento.



Ilustración 47: Zona urbanizada

9.3. DIVISIÓN DE CUENCAS

Para la división se ha considerado las líneas de flujo existentes en la zona, a partir de ahí con ayuda el programa GV-SIG se ha calculado las subcuenas, luego se ha procedido a depurar los valores dados, tanto para que las cuencas no corten cubiertas verdes como subdividiendo las subcuenas según el número de pozos existentes en su trazado.

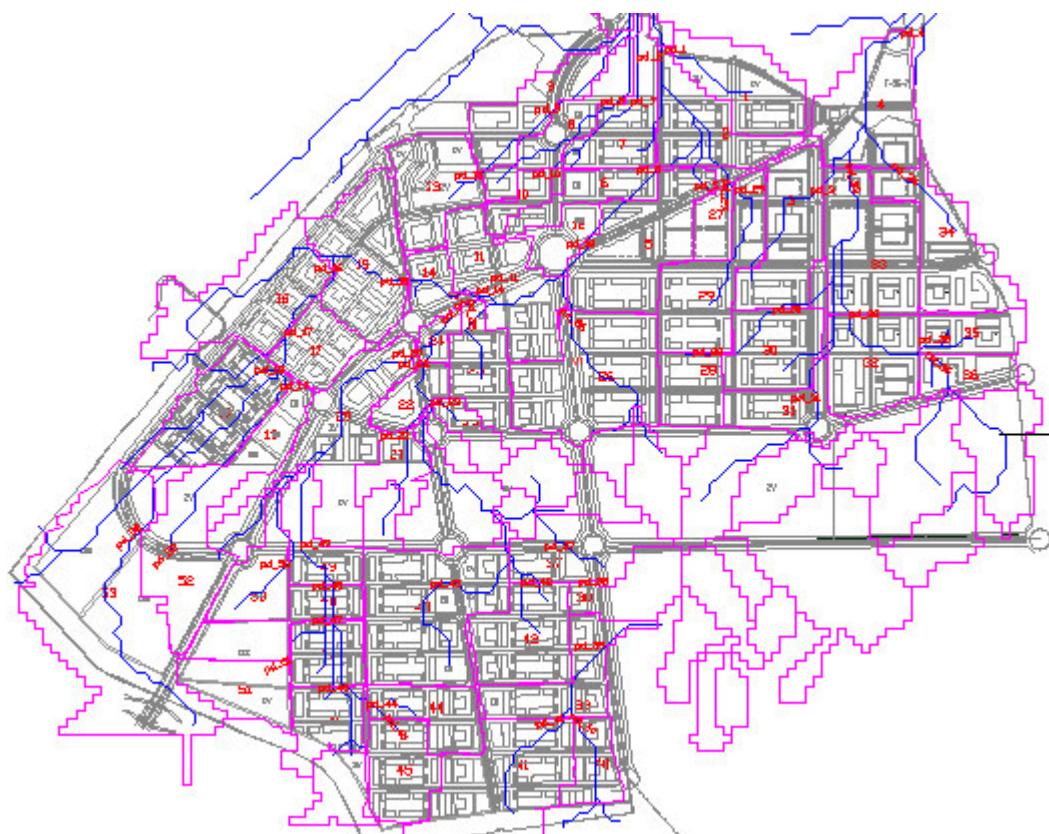


Ilustración 48: Zona de estudio dividida en subcuenas

Los trazados azules corresponden a las líneas de flujo.

Los trazados lilas corresponden a las divisiones de subcuenas realizada por el programa GV-SIG ya depuradas.

SUB-CUENCAS

Nº	Área (m2)	Área verde (m2)	LID's %
C1.1	16636	1663.6	10%
C1.2	14996	4768	32%
C2.1	6297.7	900	14%
C2.3	14996	4768	32%
C2.4	10175	2384	23%
C3.1	7500	2937	39%
C3.2	14000	3870	28%
C3.3	14996	4768	32%
C4.1	7500	2937	39%
C4.2	7500	2937	39%
C5.1	10175	2384	23%
C5.2	6714	1250	19%
C5.3	11820	1188	10%
C5.4	19425	6876	35%
C5.5	10925	5613	51%
C6.1	17277	4768	28%
C6.2	3142	900	29%
C7.1	14096	3868	27%
C7.2	17277	4768	28%
C8.1	6174	900	15%
C8.2	6122	2008	33%
C8.3	6163	2786	45%
C9.1	14899	4261	29%
C9.2	7936	2464	31%
C10.1	6957	2225	32%
C10.2	4888	2975	61%
C11.1	4911	900	18%
C11.2	9884	3374	34%
C11.3	8316	3785	46%
C11.4	16428	3448	21%
C11.5	9245	3448	37%
C12.1	5405	540.5	10%
C13.1	33675	3284	10%
C13.2	9884	3374	34%
C14.1	12837	6083	47%
C15.1	11491	3605	31%
C15.2	3169	2043	64%
C15.3	13765	5658	41%
C15.4	13765	5072	37%
C15.5	16213	6114	38%
C16.1	13765	5658	41%
C17.1	13765	5658	41%
C17.2	13765	5658	41%
C18.1	14996	4768	32%
C18.2	14996	4768	32%
C18.3	14996	4768	32%
C18.4	10591	3401	32%
C19.1	4092	409.2	10%
C19.2	5717	571.7	10%

SUB-CUENCAS

Nº	Área (m2)	Área verde (m2)	LID's %
C19.3	2973	297.3	10%
C20.1	7257	2536	35%
C20.2	6559	2536	39%
C20.3	7735	4600	59%
C20.4	7735	4600	59%
C21.1	5900	2536	43%
C22.1	10424	3295	32%
C23.1	7072	2384	34%
C24.1	8641	1080	12%
C24.2	3663	1080	29%
C25.1	14145	3868	27%
C25.2	12017	3868	32%
C25.3	7072	2384	34%
C26.1	9827	3448	35%
C26.2	9827	3448	35%
C26.3	13274	5580	42%
C26.4	13274	5580	42%
C26.5	19425	6876	35%
C27.1	15413	6100	40%
C28.1	13274	5580	42%
C28.2	13274	5580	42%
C29.1	13274	5580	42%
C29.2	13274	5580	42%
C29.3	11775	3800	32%
C30.1	14996	4768	32%
C30.2	14996	4768	32%
C31.1	14996	4768	32%
C32.1	13765	6558	48%
C32.2	15000	6500	43%
C32.3	13765	6558	48%
C33.1	28000		0%
C33.2	15000	6500	43%
C33.3	13765	6558	48%
C34.1	7500	2937	39%
C34.2	14600	6501	45%
C35.1	14600	6502	45%
C36.1	8000	6503	81%
C37.1	15104	3654	24%
C38.1	5608	1624	29%
C39.1	11216	4148	37%
C39.2	18140	4788	26%
C39.3	5608	1624	29%
C40.1	13455	2974	22%
C40.2	5608	2524	45%
C41.1	23011	6498	28%
C41.2	18140	4788	26%
C42.1	15104	3654	24%
C42.2	18140	6412	35%
C42.3	18140	6412	35%

SUB-CUENCAS

Nº	Área (m2)	Área verde (m2)	LID's %
C43.1	16862	4790	28%
C43.2	16863	4790	28%
C43.3	17225	6410	37%
C43.4	18546	5790	31%
C43.5	9019	2524	28%
C43.6	8236	2524	31%
C44.1	19770	7310	37%
C44.2	8415	3424	41%
C44.3	20134	5948	30%
C45.1	11355	3420	30%
C45.2	9087	4788	53%
C45.3	10063	3888	39%
C46.1	29992	9536	32%
C47.1	14996	4768	32%
C47.2	14996	4768	32%
C48.1	14996	4768	32%
C48.2	20417	2041.7	10%
C49.1	14996	4768	32%
C50.1	22023	2202.3	10%
C51.1	26185	2618.5	10%
C52.1	56942	5694.2	10%
C53.1	40090	4009	10%

Las cuencas obtenidas han sido 53, pero a su vez estas se han subdividido quedando un total de 126 subcuencas, cada una caracterizada por su área total, área de la zona verde y el porcentaje de cubierta verde a implementar.

9.4. RED DE DRENAJE

Una vez determinado las distribución de la zona, así como las subcuenca aportantes al sistema, se calcula la red de saneamiento, del que se han considerado los siguientes criterios.

PARÁMETRO DE CÁLCULO	CRITERIO ADOPTADO
PERÍODO DE RETORNO T=10años	Cálculo de caudales de aguas pluviales adaptado por el servicio de Infraestructura Hidráulica del Ayto. De Zaragoza
PRECIPITACIÓN DIARIA DE CÁLCULO 58,73mm	Parámetro comúnmente utilizado en Hidrología urbana
TIEMPO DE CONCENTRACIÓN tc=15minutos	Cálculo de caudales de aguas pluviales adaptado por el servicio de Infraestructura Hidráulica del Ayto. De Zaragoza
MÁXIMA INTENSIDAD DE LA LLUVIA I=88,11mm/hr	Cálculo de caudales de aguas pluviales adaptado por el servicio de Infraestructura Hidráulica del Ayto. De Zaragoza
COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA C=0,7	

Tabla 32: Parámetros y criterios para el dimensionamiento de la red de drenaje



Ilustración 49: Esquema de la red de drenaje

Los cálculos realizados se encuentran en el anexo 1 de saneamiento.

9.5. MODELIZACIÓN DE CUENCA DE ESTUDIO EN SWMM

Para la inserción de datos en SWMM se ha considerado los siguientes criterios:

1. Los pozos se deben situar cada 50 metros, cuando exista un cambio de pendiente, en los cambios de dirección.
2. Las tuberías se dimensionarán cumpliendo la normativa de velocidades mínimas y máximas, se considerará un máxima de un 85% de llenado.



Ilustración 50: Representación de subcuenca, pozos y tuberías.

El sistema completo del estudio es:

1. Cubiertas verdes
2. Red de saneamiento calculada en el Anexo 1.
3. Emisario ¹
4. Punto de vertido al río Ebro ¹
5. EDAR ¹
6. Depósito de 40.000m³ ¹

¹ El diseño y dimensionamiento de la red general del sector, así como de su depósito optimizado e infraestructuras asociadas (aliviaderos, bombeo,...) han sido tomadas del Trabajo fin de grado **Dimensionamiento de tanques de tormenta según nuevos estándares** realizado por O. Chami (2014).

9.6. Elección de parámetros para la cuenca de estudio.

En este caso emplearemos suelos fracos, siendo su composición 40% de arenas, 20% de arcilla y 40% de limos, esto mezclado con compost pobre en humus, más turbas rubias y negras, por lo que los parámetros correspondientes al suelo se tomarán de la tabla 23.

Parámetros	Extensivo	Semi-Intensivo	Intensivo
Altura de la berma (mm)	50	80	100
Volumen de Vegetación	0,1	0,2	0,3
Pendiente de la superficie (%)	3	3	3
Espesor de la capa del suelo (mm)	75	150	400
Porosidad	0,43	0,43	0,43
Capacidad de campo (cm ³ /cm ³)	0,34	0,34	0,34
Punto de marchitez (cm ³ /cm ³)	0,17	0,17	0,17
Conductividad hidráulica (mm/hr)	13,21	13,21	13,21
Pendiente de la conductividad	5	5	5
Altura de succión (mm)	88,9	88,9	88,9
Espesor (mm)	25	40	60
Fracción de vacío	0,70	0,64	0,62
Rugosidad	0,3	0,26	0,52

Tabla 33: Parámetros SWMM para cubiertas verdes en la cuenca de estudio

Para definir los parámetros de la capa drenaje, se han tomado valores de la marca comercial Floradrain, tal como se explicó en el apartado 8.3.3.

	Altura(m)	Ancho(m)	Caudal (l/s)
Extensiva	0.060	0.90	2.5
Semi-Intensiva	0.040	0.90	2.6
Intensiva	0.025	0.90	1.05

Calculándose el coeficiente de rugosidad a partir de la fórmula de Manning.

$$Q = \left(\frac{A}{n} \right) \cdot \left(\frac{A}{P_m} \right)^{(2/3)} \cdot 0.03^{(1/2)} \rightarrow$$

Extensiva n=0.30
Semi-Intensiva n=0.26
Intensiva n=0.52

La fracción de huecos se ha calculado dividiendo el volumen vacío con el volumen total de la capa.

El porcentaje de saturación inicial, para un suelo franco se calculará a partir de lo expuesto en el punto 8.3.4.

Cubiertas extensivas $\Delta S = \frac{1}{3}(0.34 - 0.17) = 0.056 \approx 5.6\%$

Cubiertas intensivas y semi-intensivas $\Delta S = \frac{1}{2}(0.34 - 0.17) = 0.056 \approx 11.33\%$

El siguiente dato no es requerido por SWMM, pero es necesario su cálculo para determinar la periodicidad de riego.

Según lo especificado en el apartado 6.5.5, se calculará la necesidad de riego en las cubiertas extensiva, con un espesor de 25cm, y una densidad aparente 1,4, tiene una capacidad de campo del 34% y un punto de marchitez de 17%.

Volumen de $1m^2 \cdot 0.25m = 0.25m^3 = 250dm^3$

Masa de $1m^3 = 250dm^3 \cdot 1.4 = 350kg$

Agua utilizable por las plantas = $34\% - 17\% = 17\%$

Agua utilizable en $1m^2 = 350kg \cdot 0.17 = 59.5kg = 59.5$ litros

59.5 litros/m² = 59.5 mm este valor lo multiplicamos por el coeficiente cultivo $K_c=0.2$, quedando 11.96 mm·día=360mm/mes, este valor se compara con las precipitaciones mensuales y si la necesidad es menor que la precipitación, no necesita riego.

9.7. Muestra de resultados

El estudio prevé obtener el rendimiento/comportamiento hidráulico de las cubiertas verdes es por ello tal como se comentó en el capítulo de pluviometría se va a simular el modelo para eventos ordinarios (lluvia continua anual), así como para eventos extraordinarios (lluvia de diseño).

La aplicación de cubiertas verdes influirá en el hidrograma de salida de dos formas:

- Reteniendo la primera parte de la lluvia, dando como resultado la disminución del tiempo pico y el aumento del tiempo base.
- Disminuyendo el caudal pico y de esta forma la velocidad de la escorrentía.

Hay que considerar que cuando la lluvia cae en una cubierta verde, una vez alcanzada la capacidad de campo de la capa de suelo, el agua drena a través de la capa de drenaje a una velocidad que es aproximadamente igual a la conductividad hidráulica saturada de suelo.

Primero se simulará el efecto de las cubiertas verdes frente a las cubiertas convencionales para una lluvia máxima asociada a un periodo de retorno de 10 años, luego se mostrará la variación cuando la lluvia está asociada a periodos de retorno menores, con esta simulación se pretende mostrar las ventajas hidrológicas que presenta la implantación de cubiertas verdes.

Segundo se simulará la respuesta de la cuenca con LID y sin LID a una lluvia continua de un año, se mostrarán las variables afectadas, los valores en los puntos de vertido, así como el comportamiento del tanque de tormentas, con esta simulación se pretende mostrar las ventajas, hidrológicas, medioambientales y sociales.

9.7.1. Simulaciones para una precipitación máxima con periodo de retorno de 10 años

Las cubiertas verdes modifican el área impermeable de las cuencas donde se aplican, favoreciendo la infiltración y el almacenamiento.

HIDROGRAMA DE SALIDA

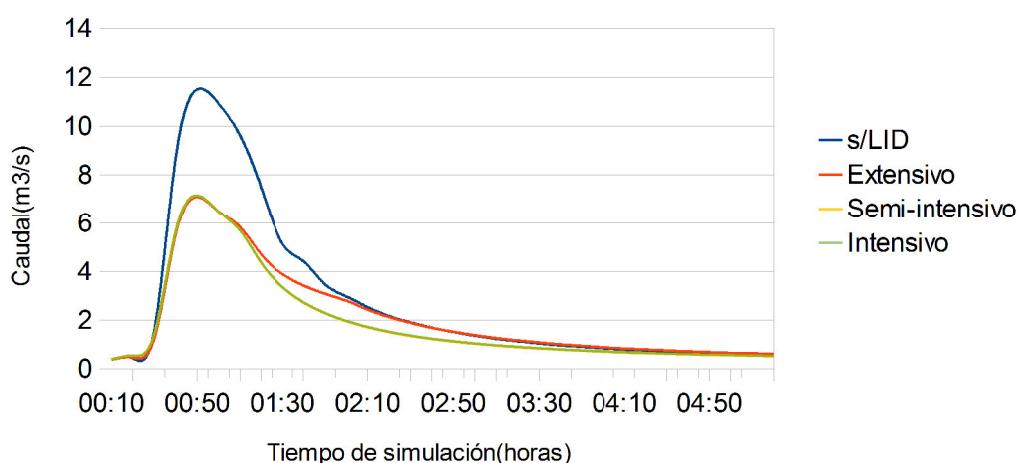


Ilustración 51: Hidrograma de salida de lluvia máxima con $T=10$ años

El hidrograma de salida asociado a una lluvia considerada en el proyecto con periodo de retorno de 10 años (ilustración 51), muestra el efecto de atenuación que producen las cubiertas verdes en la hidrología superficial.

En los primeros minutos de lluvia, se aprecia que el caudal aportado por los diferentes tipos de cubiertas es distinto, esto se debe, al porcentaje de saturación inicial considerado, explicado en el punto 9.6.

El **caudal pico** se ve reducido considerablemente por la utilización de cubiertas verdes, un **39%**, pasando de **11,5m³/s** en sistemas sin LID a **7,09m³/s** en sistemas LID. No se aprecian grandes variaciones del caudal pico respecto a la utilización de los tres tipos de cubiertas estudiadas.

Respecto al **volumen de escorrentía**, se aprecian variaciones importantes en la utilización o no de técnicas LID, así como en el empleo de los diferentes tipos de cubiertas estudiadas.

Respecto al volumen total de escorrentía **sin técnicas LID (1370184m³)**, se observa, una reducción mínima de volumen de escorrentía del **4.2%** por la utilización de técnicas LID respecto a la no utilización.

Dentro de las técnicas LID estudiadas, la reducción del volumen de escorrentía respecto al volumen sin aplicar técnicas LID es de: **4,2% (1312884m³) en cubiertas extensivas; 13.5% (1184676m³) en cubiertas semi-extensivas y 12,9% (1193964m³) en cubiertas intensivas.**

El caudal base se debe a la continua aportación de las aguas residuales.

La diferencia de volumen se debe a las pérdidas por infiltración, al ser el tiempo de simulación pequeño no da tiempo a que se den pérdidas por evaporación.

9.7.2. ***Simulaciones para una precipitación máxima con T=2 y 5 años***

En las siguientes ilustraciones se muestran los hidrogramas asociados a una lluvia máxima con períodos de retorno de 2 y 5 años, en ellas se observa que siguen la misma línea que para T=10 años, en cuanto a la reducción de caudal pico y volumen total, sin embargo las diferencias entre las diferentes cubiertas se reducen al reducir T.

HIDROGRAMA DE SALIDA, Lluvia máxima T=5 años

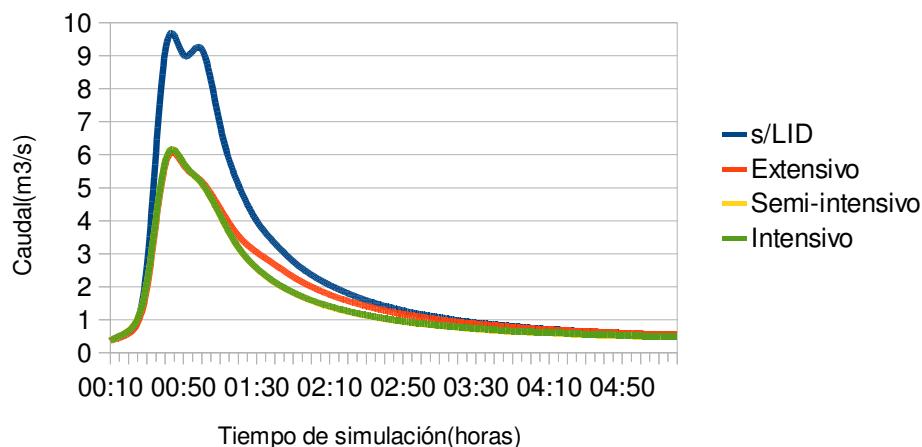


Ilustración 52: Hidrograma de salida asociada a una lluvia máxima de periodo de retorno igual 5 años

HIDROGRAMA DE SALIDA, Lluvia máxima T=2 años

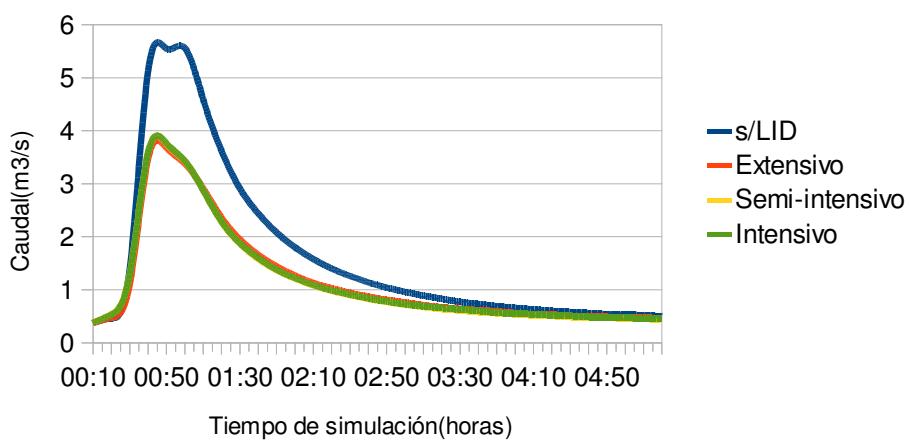


Ilustración 53: Hidrograma de salida asociada a una lluvia máxima de periodo de retorno igual 2 años

9.7.3. Simulaciones para una lluvia continua anual

La cuenca de estudio se ha simulado con valores de lluvia continua correspondiente al año 2013, obteniéndose los siguientes resultados:

	CONVENCIONAL	EXTENSIVO	SEMI-INTENSIVO	INTENSIVO
Nº de eventos de vertido DSU	2	1	1	1
Volumen de vertidos DSU (10^3 m 3 /año)	74.10	36.05	25.93	7.84
Volumen vertido a EDAR (10^3 m 3 /año)	12391.60	12197.24	12122.23	12137.87
Masa SS vertido por DSU (kg/año)	922.44	695.03	538.37	191.23
Masa DBO vertido por DSU (kg/año)	1239.34	417.01	323.02	114.74
Masa DQO vertido por DSU (kg/año)	1217.63	917.43	710.65	252.43
Masa SS vertido a EDAR (kg/año)	71861.71	71526.80	71933.32	72332.00
Masa DBO vertido a EDAR (kg/año)	51447.09	42916.08	43159.99	43399.20
Masa DQO vertido a EDAR (kg/año)	94857.46	94415.38	94951.99	95478.24
Nº de llenados del depósito	45	44	43	40
Total volumen bombeado (10^3 m 3 /año)	576.42	280.8	256.59	244.26
Energía consumida Kw-hr	3869.63	1790.61	1649.52	1591.05

Tabla 34: Resultados de simulación de lluvia continua anual correspondiente al 2013

Una de las principales ventajas en la utilización de las cubiertas verdes es el aprovechamiento del agua por la vegetación, retención y almacenamiento de agua. Según los resultados de la tabla 34, se observa que produce efectos significativos en la disminución del volumen respecto al convencional, tanto el **vertido DSU (51,3% extensivo, 65,0% semi-intensivo y 89,4% intensivo)**, **vertido a EDAR (1,56% extensivo, 2,17% semi-intensivo y 2,04% intensivo)** como el total de **volumen bombeado (51,3% extensivo, 55,5% semi-intensivo y 57,6% intensivo)**.

Respecto a la calidad se observa la reducción de contaminantes en **Descargas al Sistema Unitario (DSU)** que ejercen los tipos de cubiertas verdes (al disminuir el volumen de vertido) con respecto a la no utilización de esta técnica.

- **Sólidos en Suspensión Total (SST)** se reducen un **25% extensivo, 42% semi-intensivo y 79% intensivo**.
- **Demandा Química de Oxígeno (DQO)** se reduce un **25% extensivo, 42% semi-intensivo y 79% intensivo**.
- **Demandा Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)** se reduce un **66% extensivo, 74% semi-intensivo y 91% intensivo**.

Los valores de contaminación están asociados al flujo, por lo que si este diminuye, los contaminantes disminuirán proporcionalmente.

Otro de los factores que se pueden destacar de los resultados obtenidos en el estudio es el importante **ahorro energético** que produce la aplicación de cubiertas verdes. Por un lado, se reduce considerablemente la energía consumida por la estación de bombeo del depósito a la EDAR. Se estima una disminución en: cubiertas **extensivas del 53,7%** (1790KW·hr); cubiertas **semi-intensivas del 57,3%** (1649W·h) y cubiertas **intensivas 58,8%** (1591Kw·hr) respecto al sistema convencional (3869Kw·hr).

A estos ahorros energéticos también se podrían añadir los correspondientes a las mejoras del aislamiento que las cubiertas verdes proporcionan a los edificios.

En la siguiente tabla se muestra una comparativa entre la precipitación, las pérdidas y la escorrentía en la cuenca para cada tipo de cubierta verde.

Parámetros (Vol ha.m)	TIPOS DE CUBIERTAS			
	Convencional	Extensivo	Semi-intensivos	Intensivos
Precipitación	161.02	160.91	160.91	160.91
Almacenamiento inicial	0	0.89	1.63	4.96
Infiltración	52.15	62.58	62.58	62.57
Evapotranspiración	24.54	37.37	43.22	45.31
Escorrentía	84.68	60.9	55.39	51.89

Tabla 35: Comparativa de infiltración y escorrentía con distintos tipos de cubiertas para una lluvia continua 2013

El almacenamiento inicial en cada cubierta crece según el porcentaje de saturación, y este a su vez está asociado al del volumen de sustrato.

La infiltración aumenta con el uso de técnicas LID, la diferencia existente entre las mismas no varía, esto se debe a que el suelo empleado, es decir la capacidad de campo es la misma en los tres casos.

Uno de los parámetros de pérdidas que más aumenta es la **evapotranspiración**, varía según el tipo de vegetación, un **52% extensivas , 76% semi-intensivas y 84% intensivas**.

El aumento de las pérdidas dan como resultado la reducción de la escorrentía, un **28% extensivas , 34% semi-intensivas y 38% intensivas**.

10. CONCLUSIONES

Las ciudades crecen (en España el 70% de los habitantes son urbanos), dada la imprevisibilidad de este crecimiento, normalmente asociada a factores económicos, ha dado como resultado infraestructuras supradimensionadas o inframensionadas, esto se ha visto reflejado en España en los últimos 15 años, siendo necesaria la implantación de nuevas tecnologías que minoren el efecto provocado por esta concentración de población.

Las cubiertas son aproximadamente el 40% de las urbanizaciones, por lo que su aprovechamiento es necesario. La aplicación de Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible (TEDUS), concretamente las cubiertas verdes dan dos ventajas principales:

- El aprovechamiento del espacio.
- La captación de agua en el origen.

En cuanto a los beneficios hidrológicos, la técnica consigue: el retardo del caudal pico del hidrograma y menor volumen vertido al sistema **28-39%** dando como resultado: menor dimensionamiento de las redes de alcantarillado, menor tratamiento de aguas (en volumen **2%**, en calidad **43%**), menor descargas al medio de contaminantes **54-91%**, esto es el resultado del aumento de las pérdidas de infiltración **17%** y evapotranspiración **31-45%**.

En cuanto a beneficios ambientales, esta técnica, disminuye la contaminación vertida al medio hasta un **91%** en cubiertas intensivas, este efecto se asocia al volumen de vertido, ya que las cubiertas verdes no funcionan como filtro de contaminantes al no estar en contacto directo con la escorrentía generada, las cubiertas verdes absorben parte de la contaminación atmosférica y disminuye considerablemente el dióxido de carbono (CO₂). No se ha encontrado bibliografía suficiente donde se estudie la capacidad de adsorción de contaminantes por parte de las cubiertas verdes en su conjunto, especialmente por parte del sustrato.

En cuanto a los tipos de cubiertas utilizadas, se puede concluir que las cubiertas semi-intensivas son las que presentan mayores ventajas presentan en su conjunto.

Conclusiones

El impacto ambiental se ve significativamente reducido con la implantación de cubierta verdes. Dada la densidad de las ciudades actuales, uno de los aspectos que parece atraer a ciertos sectores es el impacto visual que genera la vegetación en las cubiertas. Se trata de una apuesta por la protección del entorno así como el compromiso con el cambio climático.

Actualmente España no se tiene una normativa específica en cuanto a cubiertas verdes, pero sí recomendaciones.

En publicaciones Europeas se pueden encontrar: "*Directrices sobre mejores prácticas para limitar, mitigar o compensar el sellado del suelo*", documento de trabajo de la Comisión Europea 2012,(ISBN 978-92-79-26211-1), que como medidas de mitigación del sellado del suelo (páginas 29 a 32), establece: Utilización de materiales y superficies permeables, diseño urbanístico inspirado en el concepto de infraestructura verde o sistemas naturales de captación de agua.

Como adelanto a una posible introducción legislativa en España, recientemente se publicó el Real Decreto 400/2013, de 7 de junio, por el que se aprueba el Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Oriental. En su artículo 56.1 indica "que Las nuevas urbanizaciones, polígonos industriales, desarrollos urbanísticos e infraestructuras lineales que puedan producir alteraciones en el drenaje de la cuenca o cuencas interceptadas deberán introducir **sistemas de drenaje sostenible** (uso de pavimentos permeables, tanques o dispositivos de tormenta, etc.)

Se ha constatado, a la vista de los resultados las ventajas tanto económicas, medioambientales y sociales que proporciona la aplicación de técnicas de drenaje sostenibles, ya sea individualmente o en conjunto. Lo ideal sería la implementación en todo el proceso desde el origen pasando por el transporte hasta el vertido.

La autora del estudio cree que en un futuro cercano, la aplicación de cubiertas verdes será legislada y de implantación obligatoria al menos en algunas localizaciones de nuestra geografía. En muchos países de nuestro entorno, dentro de la UE, la obligatoriedad de implantar técnicas de drenaje urbano sostenible en edificios de nueva construcción ya es una realidad.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Abellán, A. **Drenaje Urbano Sostenible**. (21 de abril de 2014). Recuperado el 18 de Mayo de 2015 en drenajeurbanosostenible.org.
- Bass, B., Kuhn, M., Peck S., "**Greenbacks from Green Roofs: Forging a New Industry in Canada**" (GBGR), CMHC. 1998 p. 24.
- Breuning, J. y Green Roof Service LLC, **Modern Green Roof Technology**. (2 de febrero de 2014). Recuperado el 10 de Abril de 2015. En www.greenrooftechnology.com/extensive-green-roof.
- Cabildo, Mª P. et al (2014) **Reciclado y tratamiento de residuos**. Madrid: editorial UNED
- Chami, O. (2014). **Dimensionamiento de tanques de Tormenta según nuevos estándares**. Trabajo Fin de Grado de Ingeniería Civil. Universidad de Zaragoza.
- CHI Support, **Descripción de los parámetros usados por LID's** (2015). Recuperado el 15 de Abril de 2015 en support.chiwater.com/support/solutions/articles/36706-lid-editor
- CIRIA, 2007. **The SUDS manual**. C697. CIRIA 2007. RP697. ISBN 978-0-86017-697-8. ISBN 0-86017-697-5.
- CIRIA, 2007. **Site handbook for de construction of SUDS**. C698.
- CIRIA 2007 .RP697.ISBN-13 978-0-86017-698-5. ISBN-10 0-86017-698-3.
- Department of Energy 2004. Federal Technology Alert: **Green Roofs**. DOE/EE-0298, Washington, D.C.
- Fassman-Beck, E. **Curve Number Approximation for Living Roofs** .13th International Conference on Urban Drainage, Sarawak, Malaysia, 7-12 September 2014
- Gómez, M. **Curso de Hidrología Urbana**, Flumen 2008. ISBN 978-84-612-1514-0
- Gómez, M. **Introducción a la Hidrología Urbana**. Documentación del Seminario de Hidrología Urbana 2007.
- Instituto Pirenaico de Ecología (2015), **Atlas de la Flora de Aragón** Recuperado el 11 de Junio de 2015 en www.ipe.csic.es/floragon/

- López, F. y Mintegui, J. A. (1986) **Hidrología de Superficie**. Madrid: Escuela de Ingenieros de Montes. ISBN: M-398-9910-6
- Muñoz Carpena, R., y Ritter Rodriguez A. (2005) **Hidrología Agroforestal**. Gobierno de Canarias. ISBN: 84-8476-245-9
- Nanía, L.S. y Gómez Valentín, M. 2008. **Ingeniería Hidrológica**. II Edición. Grupo Editorial Universitario. Septiembre 2009. ISBN 84-8491-636-7.
- Russo Beniamino et al (2008), **Depósitos para retención de primera escorrentía. Criterios de diseño y operación** . FLUMEN, Universidad de Zaragoza y Universidad de Cataluña.
- Speaka, J. J. Et al (2012). **Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city**. Recuperado el 10 de Junio de 2015 en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231012007157.
- Trapote J. (2001) **Infraestructuras Hidráulico-Sanitarias II. Saneamiento y Drenaje Urbano**. Universidad de Alicante. ISBN:978-84-9717-170-0
- W. Eva, Enviromental Protection Agency, **Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies-Green Roofs**.
- Zorraquino,C (2004).- **La función SQRT-ET max**. Revista de Obras Públicas, 3447:33-37
- Zúñiga López I. y Crespo del Arco E. (2012) **Meteorológica y Climatología**. Madrid: editorial UNED

Relación de documentos

(X) Memoria	117	páginas
(X) Anexos	16	páginas
(_) etc	0	páginas

La Almunia, a 3 de 07 de 2015

Firmado: Andrea Yesenia Jiménez Camacho