

Trabajo Fin de Máster

DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO DE CUBIERTA VEGETADA EN LA UNIVERSIDAD DE BOLONIA Y APLICACIÓN A UN CASO REAL CON TECNOLOGÍAS DE DRENAJE SOSTENIBLE

Intensificación: *HIDRÁULICA URBANA*

Autor:

ANTONIO CALABUIG BELDA

Director:

DR. IGNACIO ANDRÉS DOMÉNECH

Codirector/es:

DR. MARCO MAGLIONICO

DRA. SARA SIMONA CIPOLLA

JULIO, 2016



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto

Título del TFM en español: DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO DE CUBIERTA VEGETADA EN LA UNIVERSIDAD DE BOLONIA Y APLICACIÓN A UN CASO REAL CON TECNOLOGÍAS DE DRENAJE SOSTENIBLE

Título del TFM en inglés: DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF GREEN ROOF IN BOLOGNA UNIVERSITY AND APPLICATION TO A REAL CASE WITH BEST MANAGEMENT PRACTICES

Título del TFM en Valenciano: DESENVOLUPAMENT D'UN MODEL MATEMÀTIC DE COBERTA VEGETADA A LA UNIVERSITAT DE BOLONYA I APLICACIÓ A UN CAS REAL AMB TECNOLOGIES DE DRENATGE SOSTENIBLE

Alumno: ANTONIO CALABUIG BELDA.

Director: DR. IGNACIO ANDRÉS DOMÉNECH.

Codirector/es:

DR. MARCO MAGLIONICO

DRA. SARA SIMONA CIPOLLA

Fecha de Lectura: JULIO,2016



Resumen

La presente tesina consiste en el desarrollo de un modelo matemático hidrológico de cubierta vegetada, y la posterior aplicación a un caso real con tecnologías de drenaje sostenible.

Inicialmente se realiza un análisis del estado del arte, centrándose el mismo en los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), y más concretamente en las cubiertas vegetadas, al igual que en la modelación matemática de las mismas.

Realizada la revisión del estado del arte e introducidos los aspectos más relevantes en referencia a la cubiertas vegetadas, el trabajo se centra en la cubierta vegetada caso de estudio.

El primero de los dos grandes bloques del trabajo consiste en la elaboración, calibración y validación del modelo matemático del sistema de cubierta vegetada existente en las instalaciones de la Universidad de Bolonia (Italia). Previamente a la construcción del modelo, se realiza una labor de análisis de los distintos elementos que componen la cubierta vegetada, desde los dispositivos de monitoreo hasta los propios componentes de los que se encuentra formada la cubierta. Elaborado el modelo matemático, se caracterizan y analizan los datos input a introducir al sistema, realizando a posteriori simulaciones en periodo extendido de un año.

El modelo se contruye bajo el software SWMM 5.1 y los módulos Low Impact Development (LID) existentes en el mismo. La detallada interpretación de los resultados, muestra el comportamiento de la cubierta vegetada frente a distintos eventos de precipitación analizados, al igual que pone de manifiesto las ventajas que supone la implementación de este tipo de tecnologías. Por otra parte es posible analizar la respuesta hidrológica de la cubierta, según la vegetación dispuesta en la misma, arrojando resultados que comparan una cubierta vegetada con vegetación autóctona frente a otra con vegetación tipo Sedum (la más extendida).

Con los parámetros obtenidos mediante los procesos de calibración y validación, el trabajo persigue la aplicación de los resultados a un caso real. En la ciudad de Bolonia se ha realizado un proyecto de urbanización, el cual contempla diversas técnicas de drenaje sostenible como cubiertas vegetadas, superficies verdes, cisternas de almacenamiento de las aguas de los propios tejados, al igual que un depósito de recogida de las aguas de primera lluvia y un estanque de retención de las aguas pluviales. En la presente parte de la tesina se trabaja sobre un modelo matemático de la urbanización ya existente. Dicho modelo no utiliza los módulos LID existentes en la versión más reciente de SWMM, y presenta numerosos errores referentes a la configuración del sistema, por tanto se actualizará la totalidad del modelo. Actualizado el modelo, se realiza una labor de búsqueda de los datos climatológicos necesarios para realizar simulaciones en continuo, más concretamente del periodo comprendido entre 1990 y 2015. Elaborado el modelo e introducidos los distintos datos de entrada necesarios, se establecen diversos escenarios de simulación, mediante la combinación de los diversos SUDS presentes en el sistema. Una vez obtenidos los resultados de las distintas simulaciones, es posible el análisis del funcionamiento del sistema en todo su conjunto, al igual que el análisis individual de cada uno de los SUDS contemplados, pudiendo de este modo obtener resultados referentes al funcionamiento del sistema más concretos, los cuales sirven a posteriori para la propuesta de mejoras plantada a realizar.

Resum

La present tesina consisteix en el desenvolupament d'un model matemàtic hidrològic de coberta vegetada, i la posterior aplicació a un cas real amb tecnologies de drenatge sostenible.

Inicialment es realitza una anàlisi de l'estat de l'art, centrant-se el mateix en els Sistemes Urbans de Drenatge Sostenible (SUDS), i més concretament en les cobertes vegetades, igual que en la modelació matemàtica de les mateixes.

Realitzada la revisió de l'estat de l'art i introduïts els aspectes més rellevants en referència a les cobertes vegetades, el treball es centra en la coberta vegetada cas d'estudi.

El primer dels dos grans blocs del treball consisteix en l'elaboració, calibratge i validació del model matemàtic del sistema de coberta vegetada existent en les instal·lacions de la Universitat de Bolonya (Itàlia). Prèviament a la construcció del model es realitza una tasca d'anàlisi dels diferents elements que componen la coberta vegetada, des dels dispositius de monitoratge fins als propis components dels quals es troba formada la coberta. Elaborat el model matemàtic, es caracteritzen i analitzen les dades input a introduir al sistema, realitzant a posteriori simulacions en període estès d'un any.

El model és construït baix el software SWMM 5.1 i els mòduls Low Impact Development (LID) existents en el mateix. La detallada interpretació dels resultats, mostra el comportament de la coberta vegetada enfront de diferents esdeveniments de precipitació analitzats, al igual que posa de manifest els avantatges que suposa la implementació d'aquest tipus de tecnologies. D'altra banda és possible analitzar la resposta hidrològica de la coberta, segons la vegetació disposada en la mateixa, obtenint resultats que comparen una coberta vegetada amb vegetació autòctona davant altra amb vegetació tipus Sedum (la més estesa).

Amb els paràmetres obtinguts mitjançant els processos de calibratge i validació, el treball persegueix l'aplicació dels resultats a un cas real. A la ciutat de Bolonya s'ha realitzat un projecte d'urbanització, el qual contempla diverses tècniques de drenatge sostenible com cobertes vegetades, superfícies verdes, cisternes d'emmagatzematge de les aigües dels propis teulats, al igual que un dipòsit de recollida de les aigües de primera pluja i un estany de retenció de les aigües pluvials. En la present part de la tesina es treballa sobre un model matemàtic de la urbanització ja existent. Aquest model no utilitza els mòduls LID existents en la versió més recent de SWMM, i presenta nombrosos errors referents a la configuració del sistema, per tant s'actualitzarà la totalitat del model. Actualitzat el model, es realitza una tasca de recerca de les dades climatològiques necessaris per a realitzar simulacions en continu, més concretament del període comprès entre 1990 i 2015. Elaborat el model i introduïts les diferents dades d'entrada necessàries, s'estableixen diversos escenaris de simulació, mitjançant la combinació dels diversos SUDS presents en el sistema. Obtinguts els resultats de les diferents simulacions, és possible l'anàlisi del funcionament del sistema en tot el seu conjunt, igual que l'anàlisi individual de cada un dels SUDS contemplats, podent d'aquesta manera obtenir resultats referents al funcionament del sistema més concrets, els quals serveixen a posteriori per a la proposta de millores plantada a realitzar.

Summary

This thesis is the development of a hydrological mathematical model of green roof, and subsequent application to a real case with sustainable drainage technologies.

Initially it's made an analysis of the state of the art, focusing it on Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS), and more specifically in vegetated roofs, as in the mathematical modeling of them.

Reviewed the state of the art and introduced the most important aspects in reference to vegetated roofs, work focuses on the green roof case study.

The first of the two blocks of this work consists of the development, calibration and validation of mathematical model of green roof located on the premises of the University of Bologna (Italy). Before building the mathematical model, it analyzes the different elements of the green roof, work of the various elements of the vegetated roof, from monitoring devices to the componenetes of the roof is formed.

Performed the mathematical model are characterized and analyzed the data input to introduce the system, performing extended simulations subsequent one-year period.

The model is made using SWMM 5.1 software and existing LID modules in it. The detailed interpretation of the results, shows the performance of the vegetated roof against different rainfall events analyzed, as well as it shows the advantages of deploying these technologies. Moreover it is possible to analyze the hydrological response of the Green roof, according to the vegetation disposed, showing results that comparing a green roof with native vegetation in front of the other with Sedum vegetation (the most used).

After obtaining the parameters by calibration and validation processes, the work involves the application of the results to a real case. In the city of Bologna it has made an urbanization project, which includes various techniques of sustainable drainage as vegetated roofs, green surfaces, storage tanks of water from the roofs, a first rain reservoir and a retention pond of rainwater. In this part of the thesis it is analyzed a existing mathematical model of the urbanization. This model doesn't use the modules LID existing in the latest version of SWMM, and presents numerous errors concerning system configuration, so the the whole model is updated. Then, the work is to look for climatological data needed to perform simulations continuously, more specifically the period between 1990 and 2015. Made the model and introduced the input data, various simulation scenarios are set, by combining the SUDS present in the system. After obtaining the results of the different simulations, it is possible the analysis of system, as well as the individual analysis of each of the SUDS contemplated. The further analysis of the different elements, allows analyze the system deficiencies and therefore propose improvements.



Palabras clave: SUDS, Drenaje sostenible, Cubierta vegetada, Calibración, SWMM.

Paraules clau: SUDS, Drenatge sostenible, Coberta vegetada, Calibració, SWMM

Keywords: SUDS, Sustainable Drainage, Green roof, Calibration, SWMM.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	13
1.1.	OBJETIVOS	13
1.2.	ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	15
2.	ESTADO DEL ARTE	19
2.1.	INTRODUCCIÓN	19
2.2.	EL CICLO HIDROLÓGICO	20
2.3.	EFFECTOS DE LA EXPANSIÓN URBANÍSTICA EN LAS AGUAS PLUVIALES	22
2.3.1.	PROBLEMAS DE CANTIDAD	22
2.3.2.	PROBLEMAS DE CALIDAD	23
2.3.3.	PROBLEMAS DE SERVICIO	23
2.4.	CAMBIOS EN LA GESTIÓN DE LAS AGUAS PLUVIALES	24
2.5.	ESTRATEGIAS CONVENCIONALES EN LA GESTIÓN DE LAS AGUAS PLUVIALES	26
2.6.	SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE	27
2.6.1.	CLASIFICACIÓN	30
2.6.2.	TIPOLOGÍA	31
2.7.	EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN LA MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LOS SUDS	39
3.	CUBIERTAS VEGETADAS	45
3.1.	INTRODUCCIÓN	45
3.2.	EVOLUCIÓN HISTÓRICA	45

3.3.	BENEFICIOS DE LAS CUBIERTAS VEGETADAS	48
3.4.	ASPECTOS TÉCNICOS.....	49
3.5.	DISEÑO.....	51
3.6.	LEGISLACIÓN.....	53
4.	CUBIERTA VEGETADA CASO DE ESTUDIO.....	59
4.1.	CONTEXTUALIZACIÓN	59
4.2.	REFERENCE ROOF.....	61
4.3.	SEDUM ROOF.....	62
4.4.	NATIVE ROOF.....	62
4.5.	ESTRUCTURA DE LA COBERTURA	64
4.6.	PROPIEDADES DE LA VEGETACIÓN.....	67
4.7.	PROPIEDADES DEL SUELO	70
4.8.	SISTEMA DE RIEGO.....	72
5.	SISTEMA DE MONITORIZACIÓN	75
5.1.	ESTACIÓN METEOROLÓGICA	75
5.2.	MEDIDA DE LA ESCORRENTÍA	77
5.3.	MEDIDA DE LA TEMPERATURA	78
6.	MODELO MATEMÁTICO DE LA CUBIERTA VEGETADA CASO DE ESTUDIO	81
6.1.	CONSIDERACIONES PREVIAS	81
6.1.1.	OBSERVACIONES HIDROLÓGICAS	81
6.1.2.	MODELACIÓN DEL DECAIMIENTO DE LA HUMEDAD DEL SUELO EN TIMEPO SECO	83

6.2.	EL MODELO SWMM	86
6.2.1.	BLOQUE HIDROLÓGICO.....	87
6.2.2.	BLOQUE HIDRÁULICO	87
6.3.	MODULO LID EN SWMM.....	88
6.4.	CONCEPTUALIZACIÓN DEL SISTEMA.....	93
6.5.	DATOS Y PARÁMETROS INPUT	96
6.5.1.	CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL SISTEMA	96
6.5.2.	DATOS CLIMATOLÓGICOS.....	98
7.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO.....	101
7.1.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	101
7.1.1.	PROCEDIMIENTO	101
7.1.2.	RESULTADOS.....	103
7.2.	CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO	104
7.2.1.	PROCEDIMIENTO Y CRITERIOS	105
7.2.1.	EVENTOS UTILIZADOS.....	107
7.2.2.	FASE PREVIA A LA CALIBRACIÓN	108
7.2.3.	ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN	110
7.2.4.	PROCESO Y RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA	111
8.	OBTENCIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES MEDIANTE EL MODELO MATEMÁTICO 121	
9.	APLICACIÓN A UN CASO REAL CON TECNOLOGÍAS DE DRENAJE SOSTENIBLE.....	131
9.1.	INTRODUCCIÓN	131
9.2.	CONTEXTUALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	132
9.3.	MODELO EXISTENTE.....	137

9.4.	REVISIÓN Y CORRECCIÓN DEL MODELO EXISTENTE	139
9.5.	DATOS INPUT	143
9.6.	SIMULACIONES REALIZADAS	146
9.7.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES	148
9.7.1.	ANÁLISIS GLOBAL DEL SISTEMA	148
9.7.2.	BENEFICIOS DE LAS CUBIERTAS VEGETADAS	153
9.7.3.	SISTEMA DE APROVECHAMIENTO DE AGUA	156
9.7.4.	INVARIANCIA HÍDRICA	158
9.7.5.	OTROS	160
9.8.	PROPUESTAS DE MEJORA	163
10.	CONCLUSIONES GENERALES	165
10.1.	SÍNTESIS DE RESULTADOS	165
10.1.1.	DE LA REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE	165
10.1.2.	DEL MODELO MATEMÁTICO DE CUBIERTA VEGETADA .	166
10.1.3.	DE LA APLICACIÓN A UN CASO REAL	167
10.2.	APORTACIONES DE LA TESINA	168
10.3.	LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS	169
11.	REFERENCIAS	171

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema simplificado del ciclo hidrológico.	21
Figura 2.2. Esquema simplificado del balance hidrológico español en hm ³ /año.	21
Figura 2.3. Cambios inducidos por el desarrollo urbano en la transformación lluvia- escorrentía	22
Figura 2.4. Representación del efecto “isla de calor”.	24
Figura 2.5. Sección correspondiente con una tramo de la Cloaca Máxima.	25
Figura 2.6. Interior de un tanque de tormenta en Tokio, Japón .	27
Figura 2.7. Triángulo de la sostenibilidad del drenaje urbano	28
Figura 2.8. Cadena de gestión en los sistemas SUDS	29
Figura 2.9. Cubierta Vegetada.	32
Figura 2.10. Superficie permeable.	33
Figura 2.11. Zanja Drenante.	33
Figura 2.12. Zanja filtrante.	34
Figura 2.13. Pozo Filtrante.	34
Figura 2.14. Dren Francés.	34
Figura 2.15. Cuneta Verde.	35
Figura 2.16. Depósito de infiltración.	35
Figura 2.17. Depósito de detención en superficie	36
Figura 2.18. Sistema Geocelular.	36
Figura 2.19. Estanque de retención .	37
Figura 2.20. Humedal artificial.	37
Figura 2.21. Zona de Bio-Retención .	38
Figura 2.22. Aljibe doméstico .	38
Figura 3.1. Cubiertas masificadas por acumulación de antenas.	46
Figura 3.2. Ciudad ideal de Leonardo da Vinci.	46
Figura 3.3. Jardines colgantes de Babilonia.	47
Figura 3.4. Cubierta vegetada.	48
Figura 3.5. Aspecto típico de un cubierta vegetada extensiva.	50
Figura 3.6. Aspecto típico de una cubierta vegetada intensiva.	50
Figura 3.7. Los 4 pilares del diseño integrado con SUDS	52
Figura 4.1. Emplazamiento del sistema de cubierta vegetada.	59
Figura 4.2. Vista panorámica del sistema de cubierta vegetada estudiado.	60

Figura 4.3. Render del sistema de cubierta vegetada con la distinción de parcelas.	60
Figura 4.4. Vista de la parte del sistema de cubierta vegetada RR.	61
Figura 4.5. Vista del sistema SR en invierno (imagen izquierda) y en verano (imagen derecha)	62
Figura 4.6. Vista del sistema NR en verano (imagen derecha) vista en época invernal (imagen izquierda).	63
Figura 4.7. Distinción de las distintas parcelas del sistema NR.	64
Figura 4.8. Fase de instalación de la membrana sobre la superficie NR.	65
Figura 4.9. Filtro de protección y acumulación (conjunto del paquete Seic). En orden ascendente se encuentra la membrana ZD UV, el filtro Seic-MediPro MP 300, el elemento MediDrain MD 25 y la tela filtrante MediFilter MF 1.	66
Figura 4.10. Bromus erectus.	68
Figura 4.11. Pentaphyllum dorycnium	69
Figura 4.12. Lotus corniculatus.	69
Figura 4.13. Proceso de siembra de la cobertura NR.	70
Figura 4.14. Comparación entre curvas granulométricas	71
Figura 4.15. Curva de retención	71
Figura 4.16. Curva de conductividad hidráulica	72
Figura 5.1. Estación meteorológica Onset Hobo U30.	75
Figura 5.2. Sondas capacitativas.	76
Figura 5.3. Medidor de escorrentía en fase de instalación.	77
Figura 5.4. Posición de los distintos aparatos de medida de la escorrentía.	78
Figura 5.5. Imágenes termográficas de la cubierta vegetada a finales del mes de Octubre del 2014	79
Figura 5.6. Termopares instalados sobre la superficie NR.	79
Figura 6.1. Conceptualización del sistema tras la implementación del módulo LID	89
Figura 6.2. Distintas capas y procesos en el módulo LID .	89
Figura 6.3. Ventana gráfica del módulo LID referente a “Bio-Retention Cell”.	90
Figura 6.4. Ventana gráfica del módulo LID referente a “Green Roof”.	91
Figura 6.5. Ventana gráfica del módulo LID referente a “Permeable Pavement”.	91
Figura 6.6. Ventana gráfica referente al “LID group edito”.	92
Figura 6.7. Ventana gráfica correspondiente con el “LID usage edito”.	92

Figura 6.8. Ejemplo de ventana de estado del módulo LID tras la realización de la simulación.	93
Figura 6.9. Esquema en SWMM del modelo referente al sistema SR y RR de la cubierta vegetada.	93
Figura 6.10. Esquema del modelo NR.	94
Figura 6.11. Modelo en SWMM de la cubierta vegetada en todo su conjunto.	95
Figura 6.12. Tabla coeficiente cultural sistema NR	98
Figura 6.13. Precipitación mensual del año 2014 (mm) y temperatura media mensual (C°).	99
Figura 7.1. Hidrograma donde se evidencian los picos existentes en el mismo debidos a fallos en el aparato de medida.	110
Figura 7.2. Hietograma de precipitación y comparación entre la escorrentía simulada y medida para el evento de lluvia del 19 de Enero del 2014, utilizado en fase de calibración, sobre la superficie Natural Roof.	113
Figura 7.3. Hietograma de precipitación y comparación entre la escorrentía simulada y medida para el evento de lluvia del 2 y 3 de Mayo del 2014, utilizado en fase de calibración, sobre la superficie Natural Roof.	113
Figura 7.4. Hietograma de precipitación y comparación entre la escorrentía simulada y medida para el evento de lluvia del 17 y 18 de Noviembre del 2014, utilizado en fase de calibración, sobre la superficie Natural Roof.	114
Figura 7.5. Hietograma de precipitación y comparación entre la escorrentía simulada y medida para el evento de lluvia del 23 y 24 de Enero del 2014, utilizado en fase de validación, sobre la superficie Natural Roof.	114
Figura 7.6. Hietograma de precipitación y comparación entre la escorrentía simulada y medida para el evento de lluvia del 27 y 28 de Enero del 2014, utilizado en fase de validación, sobre la superficie Natural Roof.	115
Figura 7.7. Hietograma de precipitación y comparación entre la escorrentía simulada y medida para el evento de lluvia del 30 y 31 de Enero del 2014, utilizado en fase de validación, sobre la superficie Natural Roof.	115
Figura 7.8. Hietograma de precipitación y comparación entre la escorrentía simulada y medida para el evento de lluvia del 9 de Febrero del 2014, utilizado en fase de validación, sobre la superficie Natural Roof.	116

Figura 7.9. Hietograma de precipitación y comparación entre la escorrentía simulada y medida para el evento de lluvia del 10 y 11 de Febrero del 2014, utilizado en fase de validación, sobre la superficie Natural Roof.	116
Figura 7.10. Hietograma de precipitación y comparación entre la escorrentía simulada y medida para el evento de lluvia del 13 de Noviembre del 2014, utilizado en fase de validación, sobre la superficie Natural Roof.	117
Figura 7.11. Hietograma de precipitación y comparación entre la escorrentía simulada y medida para el evento de lluvia del 6 y 7 de Diciembre del 2014, utilizado en fase de validación, sobre la superficie Natural Roof.	117
Figura 8.1. Hietograma de precipitación anual y comparación entre el volumen acumulado de lluvia sobre la superficie NR y el generado por el sistema de cubierta vegetada de dicha superficie.	122
Figura 8.2. Hietograma de precipitación anual y comparación entre el volumen acumulado uniformizado con respecto la superficie de cada uno de los sistemas de cubierta vegetada NR y SR, al igual que la superficie RR.	123
Figura 8.3. Confrontación entre los valores de precipitación y evaporación medios mensuales junto con los datos de temperatura media mensual.	124
Figura 8.4. Control del volumen de escorrentías sobre la cubierta vegetada.	126
Figura 8.5. Comparación entre los hidrogramas de salida de la cubierta vegetada NR y la cubierta impermeable para el evento de precipitación del 19-01-2014.	129
Figura 8.6. Comparación entre los hidrogramas de salida de la cubierta vegetada NR y la cubierta impermeable para el evento de precipitación comprendido entre el 17 y 18-11-2014.	129
Figura 9.1. Esquema del modelo finalizado sobre ortofoto de la zona de actuación.	132
Figura 9.2. Comparativa entre el aspecto del área objeto de estudio previo proyecto y simulación del aspecto futuro tras la realización del mismo (Comune di Bologna)	133
Figura 9.3. Sección transversal del tanque de tormenta proyectado.	135
Figura 9.4. Esquema simplificado de la situación de los sistemas de aprovechamiento de agua.	136
Figura 9.5. Cubiertas vegetadas ya instaladas.	137
Figura 9.6. Esquema de la red.	138
Figura 9.7. Situación de los elementos singulares del modelo.	142
Figura 9.8. Reparto del % de la superficie en función de la permeabilidad de la misma.	143

Figura 9.9. Precipitación anual acumulada para la totalidad de la serie histórica contemplada.	144
Figura 9.10. Variación anual de temperaturas típica (año 1990).	145
Figura 9.11. Análisis de valores extremos de temperatura anuales de la serie histórica.	145
Figura 9.12. Frecuencia relativa del volumen anual ingresado al embalse (cubiertas tipo Sedum)	149
Figura 9.13. Frecuencia relativa del volumen anual ingresado al embalse (cubiertas tipo Native)	149
Figura 9.14. Frecuencia relativa del volumen anual ingresado al embalse para escenarios sin tanque de tormenta (cubiertas tipo Sedum)	150
Figura 9.15. Frecuencia relativa del volumen anual ingresado al embalse para escenarios con tanque de tormenta (cubiertas tipo Sedum)	150
Figura 9.16. Frecuencia relativa del volumen anual ingresado al embalse para escenarios sin tanque de tormenta (cubiertas tipo Native)	151
Figura 9.17. Frecuencia relativa del volumen anual ingresado al embalse para escenarios con tanque de tormenta (cubiertas tipo Native)	152
Figura 9.18. Volumen acumulado a la salida en la residencia de estudiantes.	154
Figura 9.19. Volumen acumulado a la salida en cubierta vegetada aleatoria.	154
Figura 9.20. Reducción en % del agua a la salida de las cubiertas en función para NR y SR.	155
Figura 9.21. Volumen medio mensual a la salida de las cisternas para uso en riego.	157
Figura 9.22. Porcentual media mensual de agua disponible para riego.	157
Figura 9.23. Variación mensual del volumen pico (m ³) del embalse de retención.	159
Figura 9.24. Mapa de capacidades en conducciones para la situación más favorable.	160
Figura 9.25. Mapa de capacidades en conducciones para la situación más desfavorable.	161
Figura 9.26. Tramo con mayores problemas de capacidad en la situación más desfavorable.	162



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Comparación entre el sistema de drenaje convencional y el sistema alternativo SUDS (Perales Momparler & Andrés Doménech, 2008)	29
Tabla 3.1. Características principales en función del tipo de cubierta vegetada.	51
Tabla 4.1. Principales características del sistema RR.	61
Tabla 4.2. Principales características del sistema SR.	62
Tabla 4.3. Principales características del sistema NR.	63
Tabla 4.4. Detalle del sistema NR, con independencia del espesor del sustrato.	65
Tabla 4.5. Funcionamiento del riego sobre la cobertura vegetal NR.	73
Tabla 6.1. Capas de los que se compone cada uno de los SUDS en el módulo LID.	90
Tabla 6.2. Parámetros básicos en módulo LID para “Bio-Retention Cell”	97
Tabla 6.3. Parámetros básicos en módulo LID para “Pavement”	97
Tabla 7.1. Comportamiento del modelo observado tras el análisis de sensibilidad.	104
Tabla 7.2. Eventos utilizados en fase de calibración y validación del sistema, diferenciando los mismos mediante los superíndices “Cal” y “Val”, haciendo referencia a evento de calibración o validación respectivamente.	108
Tabla 7.3. Valore finales de calibración	112
Tabla 7.4. Valores obtenidos para los índices de Nash-Sutcliffe, PBIAS y RSR los cuales dan conformidad a los procesos de calibración y validación del sistema.	118
Tabla 7.5. Valores DPR del volumen de escorrentía y el pico del hidrograma, entre los hidrogramas medidos y simulados para los distintos eventos utilizados en las fases de calibración y validación del sistema.	119
Tabla 8.1. Cuantificación numérica y comparación del volumen total acumulado generado por cada una de las superficies que conforma el sistema de cubierta vegetada.	123
Tabla 8.2. Volúmenes de escorrentía capaces de retener la cubierta NR	126
Tabla 8.3. Porcentaje de eventos con escorrentía nula absorbidos por la cubierta NR para en el periodo anual de estudio.	127
Tabla 8.4. Incremento del volumen retenido tras eventos de precipitación en función del espesor de la capa.	128
Tabla 9.1. Controles contemplados en el modelo.	142
Tabla 9.2. Valores mensuales del coef. cultural en los distintos tipos de cubierta vegetada.	146
Tabla 9.3. Distintos escenarios contemplados en las simulaciones.	146
Tabla 9.4. Rango de velocidades en función del escenario simulado.	162



1. INTRODUCCIÓN

1.1. OBJETIVOS

El presente trabajo versa sobre el estudio del sistema de cubierta vegetada existente en las instalaciones de la Universidad de Bolonia (Italia), centrándose en la elaboración y calibración de un modelo matemático referente a dicha cubierta vegetada. El sistema se compone de diversas tipologías de cubierta vegetada, realizándose el modelo de una de ellas. Realizado el modelo matemático se persigue la calibración y validación del mismo, con la ayuda de los distintos datos recogidos en la propia instalación donde se emplaza la cubierta. Una vez validado el modelo, se persigue la obtención de distintos resultados los cuales reflejen el funcionamiento y las ventajas de esta tipología de cubiertas respecto de las convencionales. Finalizada la parte del trabajo referente al modelo matemático de la cubierta vegetada de la universidad, se continúa con la aplicación de los resultados a un caso de estudio real. Se trabaja sobre el modelo de una urbanización con emplazamiento en la ciudad de Bolonia, en la cual se contemplan cubiertas vegetadas sobre la totalidad de los edificios, entre otro tipo de tecnologías de drenaje sostenible, y otros elementos singulares como un tanque de tormentas. Tras finalizar el modelo matemático del sistema se procede con la obtención de una gran variedad de resultados, en función de una serie de escenarios diversos propuesta. A partir de las simulaciones realizadas es posible el análisis del funcionamiento del sistema en su conjunto, al igual que el de cada uno de los elementos que lo conforman, pudiendo finalmente cuantificar los beneficios que introduce en el sistema cada una de las tecnologías introducidas.

Para abordar los objetivos planteados con anterioridad, surgen de manera progresiva los diversos puntos a tratar en el presente trabajo:

- Estudio global referente a la necesidad o conveniencia de la utilización de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, más concretamente de cubiertas vegetadas, haciendo un barrido general desde evolución histórica del problema hasta el breve análisis de las distintas técnicas existentes para la mitigación de los problemas tratados, conduciendo estas tal y como se ha mencionado, a la utilización de tecnologías como las cubiertas vegetadas
- Análisis del estado del conocimiento con referencia a las cubiertas vegetadas, mereciendo especial atención los aspectos referentes tanto a la modelación de los mismos (considerando parámetros y procedimientos de modelación), como a la gestión de los resultados obtenidos. En el estado del conocimiento también se abordan temas referentes a la idoneidad

de emplear uno u otro software informático, siendo el modelo empleado el SWMM, así como se contemplan de manera breve aspectos referentes al diseño de las cubiertas vegetadas.

- Revisión en el estado del conocimiento a la normativa existente en materia de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible.
- Analizar las distintas configuraciones de cubiertas vegetadas, describiendo de manera detallada la del sistema que engloba el presente estudio, incluyendo en este análisis las propiedades fundamentales de cada una de las partes que conforman la cubierta vegetada.
- Estudiar los distintos instrumentos empleados para la monitorización del sistema existente en las instalaciones de la Universidad de Bolonia.
- Recopilación y análisis de la totalidad de los datos climatológicos necesarios para la simulación de los modelos empleados.
- Realización de un estudio de sensibilidad del modelo empleado, mediante la utilización de la parte del mismo ya calibrado, para de esta manera proceder con la calibración del modelo al completo, tras la conceptualización final del mismo.
- Validación del modelo obtenido tras dar conformidad al proceso de calibración realizado.
- Obtener resultados mediante el modelo matemático, los cuales permitan analizar el funcionamiento de la cubierta vegetada, al igual que evidenciar los numerosos beneficios de las mismas.
- Realización de un trabajo de revisión, actualización y mejora del modelo de la urbanización sobre la que se realiza el trabajo de aplicación a un caso real, ya que se dispone de una versión del modelo (creada para los primeros trabajos realizados sobre el área de estudio), la cual no contempla la implementación de los módulos de drenaje sostenible empleados para la implementación de las cubiertas vegetadas, y por otro lado presenta numerosas deficiencias en su conceptualización y modelación. Por tanto existe un trabajo previo a la obtención de los resultados, de adecuación y revisión del modelo informático existente, mediante la utilización de los planos del proyecto de la zona de nueva urbanización.
- Tras finalizar el modelo, analizar el funcionamiento global del sistema el cual contempla tecnologías de drenaje sostenible.

- Analizar el funcionamiento de cada uno de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible que se contemplan.
- Proponer en caso de ser necesario una serie de actuaciones para mejorar el funcionamiento del sistema analizado.

1.2. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El presente trabajo consta de un total de 11 capítulos, en 8 de los cuales se contemplan los distintos objetivos expuestos con anterioridad.

En el segundo capítulo se hace una revisión del estado del arte en materia de las tecnologías de drenaje sostenible. Partiendo de una breve introducción, se analizan los diversos efectos de la expansión urbanística sobre las aguas pluviales, se continúa con el análisis de los cambios, propiciados por la propia problemática, habidos en la gestión de las aguas pluviales. Llegados al punto donde prácticamente se encuentran la mayor parte de los sistemas, es decir, al drenaje convencional, se introduce el nuevo cambio de paradigma, mediante la introducción de los denominados Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). Posteriormente se realiza un breve análisis de los SUDS, para finalizar el capítulo realizando una revisión científica sobre la evolución de la modelación matemática de este tipo de sistemas de drenaje.

Es en el tercer capítulo donde se profundiza en el análisis de las cubiertas vegetadas, partiendo de una breve introducción y evolución histórica, pasando por los beneficios de los mismos, hasta llegar finalmente a tratar algunos aspectos más técnicos de este tipo de cubiertas. A partir de las consideraciones técnicas surge el introducir algunas de las consideraciones de diseño, para finalizar mediante la exposición de la legislación existente actualmente en materia de SUDS, donde se incluyen las cubiertas vegetadas.

El cuarto capítulo se centra ya en el sistema de cubierta vegetada sobre el cual se centra el estudio. El capítulo incluye la descripción de la totalidad de la cubierta vegetada, al igual que incluye las propiedades más importantes de los componentes de la misma, como son la vegetación y el sustrato de suelo.

El quinto capítulo versa sobre el sistema de monitorización existente sobre la cubierta. Se describen en detalle los sistemas a partir de los cuales a posteriori se extrae la información necesaria para poder realizar las simulaciones en el modelo matemático. Más concretamente se

hace referencia a la estación meteorológica, el sistema de aforo de la escorrentía y, finalmente al sistema de medida de la temperatura.

El sexto capítulo hace referencia al modelo matemático de la cubierta vegetada sobre la cual se realiza el estudio. Se explica de manera muy breve el modelo SWMM, software utilizado para la modelación, al igual que se introduce el módulo LID del mismo, el cual permite la modelación de los SUDS. Seguidamente se expone la conceptualización del sistema sobre el cual se realiza el modelo matemático, finalizando el capítulo mediante la introducción y análisis de los distintos datos y parámetros necesarios para realizar las simulaciones, es decir, los datos y parámetros input.

Es en el séptimo capítulo donde, una vez introducidos los datos básicos para la realización de las simulaciones, es necesario realizar una calibración y posterior validación del sistema. Para ello se realiza en primer lugar un análisis de sensibilidad, identificando los parámetros candidatos a ser calibrados. Posteriormente se procede con la calibración y validación del modelo.

Una vez validado el modelo matemático, en el octavo capítulo se analizan los resultados obtenidos tras la realización de las simulaciones. Del análisis de los distintos resultados obtenidos, surge el profundizar en el funcionamiento de las cubiertas vegetadas. Finalmente se procede con la exposición de una serie de conclusiones, a raíz de los resultados obtenidos y del comportamiento de las cubiertas vegetadas observado.

El noveno capítulo se centra en la aplicación de los resultados a un caso real en el cual se contemplan tecnologías de drenaje sostenible. Inicialmente se realiza una contextualización, al igual que se explica el método a seguir para la obtención de resultados. Dicho método pasa desde la modificación y actualización de un modelo matemático del sistema analizado (una urbanización), donde para las cubiertas vegetadas se introducen los parámetros obtenidos tras el proceso de validación, pasando por el análisis de los datos input y exposición de los distintos escenarios de simulación contemplados. Dichos escenarios de simulación tienen la finalidad de poder analizar con detenimiento el funcionamiento y especialmente la influencia que tiene sobre el sistema, contemplar un tipo u otro de tecnología de drenaje sostenible. Posteriormente se realiza un análisis de los resultados, al igual que las conclusiones oportunas desprendidas de los mismos, finalizando el capítulo con la propuesta de mejoras considerada para la mejora de la eficiencia y el funcionamiento del sistema.

Ya por último, el décimo capítulo aborda las conclusiones referentes a la totalidad del estudio realizado.



2. ESTADO DEL ARTE

2.1. INTRODUCCIÓN

Tal y como es sabido, la expansión urbanística experimentada (especialmente años atrás) ha traído implícita una creciente impermeabilidad en las zonas urbanas, la cual ha significado la producción de cambios en las propiedades de la superficie de la tierra. Particularmente se puede afirmar a grandes rasgos que la vegetación nativa es reducida y se modifican las características del drenaje, reduciendo la capacidad de infiltración del suelo. Al producirse una pérdida del suelo natural y de la vegetación, dentro de una cuenca urbana, el ciclo hidrológico se ve significativamente afectado, debido al aumento de las tasas y los volúmenes de la escorrentía, limitando de esta manera la interceptación y la evapotranspiración. (Jacobson, 2011). Se entiende por Superficie Impermeable Efectiva (EIA) de una cuenca hidrográfica la superficie que se encuentra conectada directamente a un sistema de drenaje, siempre en el caso de que este exista, y que esta superficie es indudablemente la que contribuye al aumento de los volúmenes de escorrentía. Por otro lado también es recogido en diversas publicaciones, en referencia a las EIA, que una reducción de las mismas puede compensar significativamente el impacto negativo referente a los posibles escenarios de calentamiento global en la hidrología urbana y en la eficiencia de los sistemas de drenaje urbanos.

Debido por tanto al incremento de la EIA, existe la necesidad creciente de actuación, y por tanto, la implantación de medidas encaminadas a la reducción de los efectos negativos provocados por el aumento de la superficie impermeable en las zonas urbanas. Por ello, con la finalidad de mitigar el impacto directo sobre la impermeabilidad de las zonas urbanas, lo cual repercute sobre la escorrentía de dichas zonas tanto en cantidad como en calidad del agua, se desarrollan técnicas para su aplicación del tipo LID (Low Impact Development). De manera particular, los sistemas tipo LID son diseñados para reproducir o imitar las condiciones hidrológicas previas al desarrollo urbanístico, promoviendo de esta manera factores como son el almacenamiento, los procesos de evapotranspiración y la infiltración del agua en el terreno (Ahiablame & Engel, 2012). En la literatura existente se puede encontrar otra nomenclatura destinada a la denominación de las técnicas tipo LID, como BMP (Best Management Practices) o como comúnmente se denominan en el territorio nacional español, SUDS (Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible).

Dentro de las distintas técnicas que engloban los SUDS, las cubiertas vegetadas (tecnología sobre la que versa el presente estudio) contribuyen de una manera muy notable a la gestión de los problemas de cantidad y calidad de las aguas pluviales, promoviendo de esta manera la reducción de la escorrentía, el retardo de la respuesta hidrológica y el control de las cargas contaminantes de las superficies urbanas. Se han obtenido resultados de distintos estudios experimentales los cuales se han realizado en laboratorios a escala piloto o in situ a escala real, demostrando el impacto positivo de las cubiertas vegetadas, (Palla, et al., 2012); (Stovin, et al., 2012), al igual que en la entrega de contaminantes (Gnecco, et al., 2013).

En los últimos años se ha acrecentado el interés referente a la investigación en el campo de las técnicas dirigidas a la disminución de la escorrentía generada en episodios lluviosos, al igual que la disminución y ralentización del volumen vertido a los sistemas de alcantarillado, siempre que se hable de solucionar los problemas referentes a cantidad. Este interés del que se habla ha sido transmitido por las Administraciones Públicas, particularmente en Europa y Norte América, en forma de disminución de los impuestos o incentivos económicos, con la finalidad de fomentar la implementación de SUDS, lo que resalta aún más si cabe los beneficios e importancia de los mismos.

Dada la necesidad de evaluar tanto el funcionamiento como el rendimiento de las cubiertas vegetadas, es necesaria la creación de técnicas que proporcionen estos resultados de forma rápida y a ser posible económica. De esta necesidad surge la idea de emplear software informático para la modelación de esta tipología de cubiertas.

2.2. EL CICLO HIDROLÓGICO

La implementación de SUDS implica un cambio en la conceptualización de la gestión de las aguas pluviales, por tanto se realiza un análisis general referente a la gestión de las mismas, para poder posteriormente introducir los cambios en cuanto a la gestión que implica el contemplar tecnologías de drenaje sostenible, partiendo por tanto de la gestión natural de las aguas pluviales, es decir, del ciclo hidrológico.

De manera simplificada se puede describir el ciclo hidrológico como aquel que describe la circulación del agua en la atmósfera, suelo y subsuelo en cada una de sus distintas fases no presentando ni un punto de inicio ni uno de final. El agua en la naturaleza por tanto se encuentra en movimiento constante.



Figura 2.1. Esquema simplificado del ciclo hidrológico (www.selba.org).

Dicho movimiento natural tiene su origen en la radiación solar, la cual produce la evaporación del agua tanto en océanos como en lagos, embalses y ríos, así como la producida desde las masas vegetales y el suelo propiamente dicho. El agua evaporada pasa a formar parte de la atmósfera. En fase de vapor, el agua tiende a condensarse y posteriormente a precipitarse sobre la superficie de la tierra. Del agua precipitada, una parte de pequeñas proporciones escurre a través de la superficie y los ríos hacia el mar (escorrentía superficial), mientras que la otra parte se incorpora en forma de humedad del mismo suelo, siendo aprovechada por las distintas especies vegetales, devolviéndola a posteriori en forma de vapor a la atmósfera como transpiración, o evaporándose de manera directa del suelo. Existe otra fracción de agua la cual directamente no llega a precipitar sobre el suelo, siendo retornada directamente a la atmósfera, y finalmente el resto del agua es la que circula por los niveles inferiores del suelo, conformando las aguas subterráneas. Tal y como se ha mencionado se trata de una descripción simplificada del ciclo hidrológico, siendo este mucho más complejo de lo mencionado.

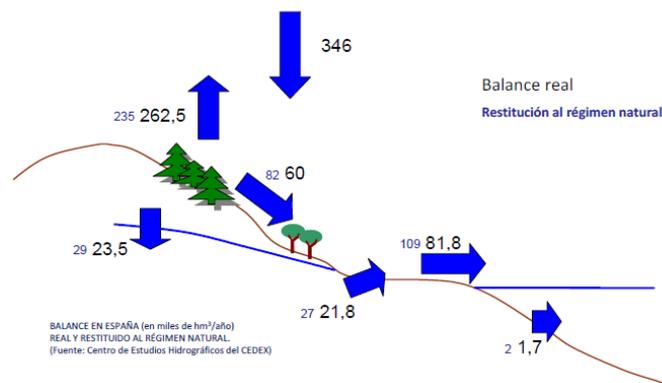


Figura 2.2. Esquema simplificado del balance hidrológico español en $hm^3/año$ (Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX).

2.3. EFECTOS DE LA EXPANSIÓN URBANÍSTICA EN LAS AGUAS PLUVIALES

Los cambios introducidos en el sistema debido al aumento de la EIA producen una serie de problemas, los cuales pueden agruparse de forma general en tres grandes grupos, haciendo referencia a problemas de cantidad, calidad y servicio del agua.

2.3.1. PROBLEMAS DE CANTIDAD

El incremento de las zonas impermeables repercute de manera directa sobre el ciclo natural del agua, es decir, donde el agua podía filtrarse de forma natural en el suelo no urbanizado justo después de alterarse las condiciones naturales del suelo ya no puede hacerlo, obteniendo como consecuencia directa, en términos de cantidad de agua, el incremento de los volúmenes de escorrentía existentes tras la ocurrencia de los distintos eventos lluviosos. No solamente se aumentan los volúmenes de escorrentía, sino que además se produce una aceleración en los tiempos de respuesta en los hidrogramas de avenida, tal y como se puede apreciar en la Figura 2.3.

Otra consecuencia directa ligada al aumento tanto de la respuesta de los hidrogramas como al volumen de agua, es el aumento del riesgo de inundación por incapacidad de los sistemas de saneamiento, y por otro lado el aumento del coste de implantación de los mismos, debido a la necesidad de aumentar su capacidad.

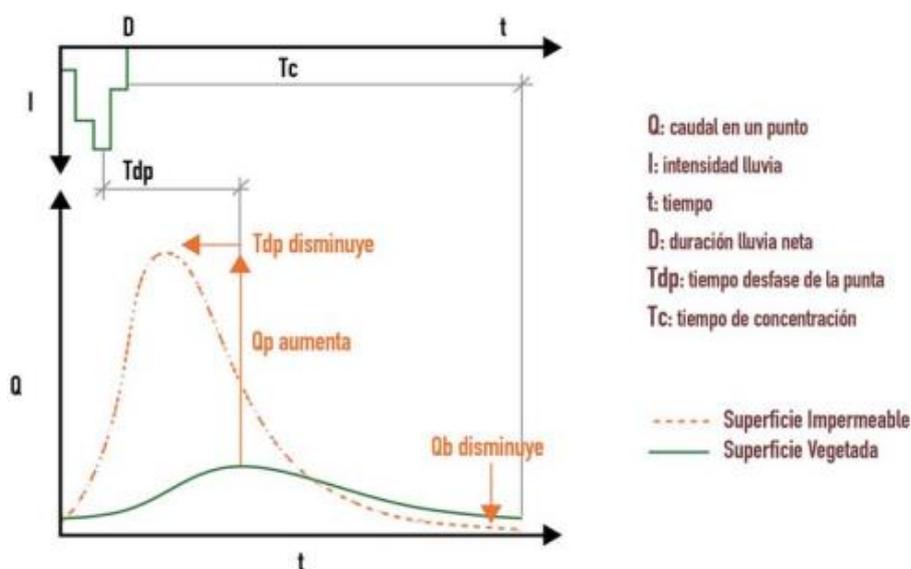


Figura 2.3. Cambios inducidos por el desarrollo urbano en la transformación lluvia-escorrentía
(Perales Momparler & Andrés Doménech, 2008)

2.3.2. PROBLEMAS DE CALIDAD

Los problemas de calidad del agua generados por el aumento de las superficies impermeables tienen una relación directa con la actividad humana y la contaminación que genera. Durante el desarrollo normal de las distintas actividades del hombre se generan una gran cantidad de contaminantes, ya sea tanto en el entorno de las cuencas urbanas como en la propia atmósfera. Los distintos contaminantes que han sido acumulados en la superficie durante los periodos secos, durante los distintos eventos de precipitaciones son arrastrados a los sistemas de colectores. Si a esta contaminación se le suma la correspondiente con los sedimentos acumulados en los sistemas de alcantarillado, como consecuencia de la circulación de aguas negras, en el contexto de sistemas unitarios, el problema de la calidad del agua se agrava más aún si cabe. Hay que matizar que esto no quiere decir que el problema de la calidad del agua solamente se relacione con los sistemas unitarios, como anteriormente se pensaba, ya que como actualmente se conoce y se ha demostrado, el efecto del primer lavado junto con la contaminación tanto difusa como puntual, hacen que en los sistemas separativos se puedan alcanzar puntas de contaminación similares o incluso mayores a las que se encuentran en los sistemas unitarios, dependiendo en todo momento del tipo de cuenca y sus condiciones de contorno.

Las consecuencias directas referentes al incremento de la contaminación de las aguas de escorrentía conlleva a decaimientos en el oxígeno disuelto del agua (puede afectar tanto en el medio receptor como en los procesos de tratamiento del agua), también es de notar el aumento en las concentraciones de nutrientes del agua (con el efecto directo sobre la eutrofización que esto conlleva), y por último cabe destacar la acumulación de sustancias tóxicas (de esta acumulación se derivan tanto consecuencias sobre la cadena trófica de las especies, así como el posterior aumento de los distintos costes de tratamiento del agua).

2.3.3. PROBLEMAS DE SERVICIO

Los denominados problemas funcionales son los que hacen referencia a problemas de carácter social, es decir, aquellos que tengan que ver con la comodidad de las personas, la propia estética y aceptación social, funcionalidad, etc.

Uno de los problemas a destacar englobado dentro de la presente categoría, es la pérdida de valor del agua de escorrentía debido a su no utilización, ya que esta presenta una calidad aceptable para la realización de diversas actividades, pero en cambio se utiliza solamente para

diluir las aguas de carácter residual, con el consecuente aumento de la cantidad de agua a depurar con posterioridad, lo cual de nuevo vuelve a influir sobre las dimensiones de las distintas instalaciones destinadas a este fin, así como el consumo de energía.

Otro problema, el cual se puede considerar de una menor importancia, es el de la inseguridad generada por las acumulaciones de agua tanto sobre los pavimentos como por las aceras, ya que esto puede resultar peligroso tanto para los vehículos como para los viandantes, debido en gran parte al decaimiento de la resistencia al deslizamiento.

Finalmente se encuentra el problema relacionado con el denominado efecto de “isla de calor”, que tiene que ver con la rapidez con la cual el agua drena de la zona urbana, conllevando esto a la reducción de la capacidad del terreno de llevar a cabo una suavización de la temperatura ambiente. Por tanto dicho efecto es consecuencia directa de la creciente impermeabilización del suelo, y se produce por tanto en las zonas urbanas. Se crean por tanto microclimas en las ciudades los cuales restan calidad de vida a los habitantes.

En la siguiente figura se puede apreciar el mencionado efecto “isla de calor”, donde se observa que la temperatura guarda una relación con el nivel de urbanización existente en cada zona.

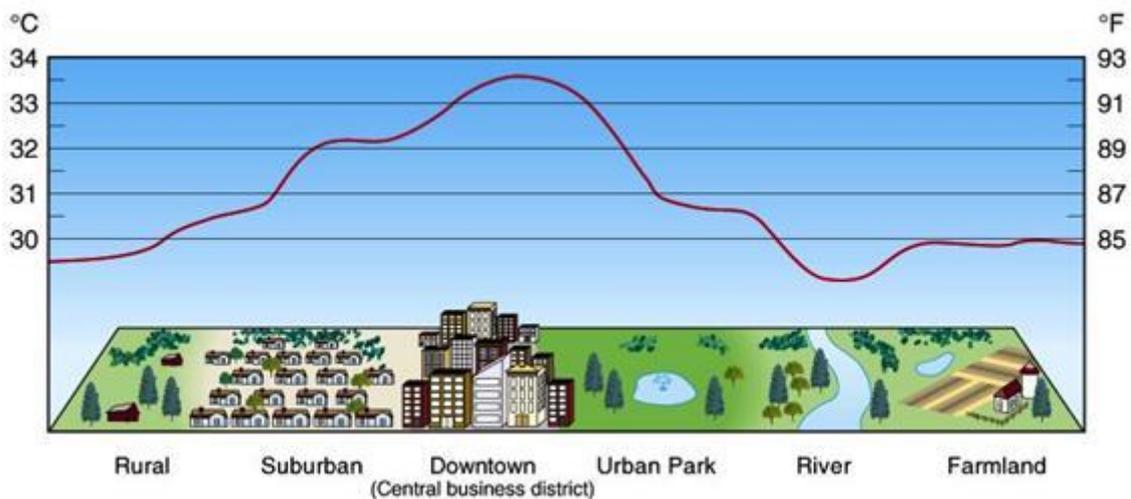


Figura 2.4. Representación del efecto “isla de calor”(www.tiempo.com).

2.4. CAMBIOS EN LA GESTIÓN DE LAS AGUAS PLUVIALES

La gestión de las aguas pluviales ha sufrido grandes cambios desde sus inicios hasta como se conoce en la actualidad, siendo esta evolución lenta y debida a los diferentes problemas que se iban encontrando, es decir, se puede afirmar que la evolución hasta el momento ha sido fruto

del “sistema” de prueba y error, mejorando los errores que se encontraban como se ha mencionado.

Antiguamente las aguas usadas y contaminadas se vertían directamente sobre las calzadas. Más adelante, en el siglo V a.C, la civilización romana y la griega son las que incluyen por sus calles el drenaje de las aguas pluviales, mediante la implementación de conducciones al aire libre. Fruto de la propia disposición al aire libre, y por tanto de las condiciones de insalubridad presentes, emergieron con facilidad las pandemias y enfermedades. Para prevenir dichas enfermedades se cambió la metodología de drenaje, disponiendo en este caso las canalizaciones bajo tierra y contrayendo desagües en las mismas casas. De este modo se mejoró notablemente la higiene en los núcleos urbanos.

Seguidamente se construyen los primeros sistemas de drenaje unitarios, los cuales han tenido y aún conservan un peso importante en la actual concepción referente a la gestión y el diseño de los sistemas de drenaje urbanos convencionales. El máximo exponente en este caso es la conocida como Cloaca Máxima (Figura 2.5), la cual fue ejecutada en Roma, con el propósito de llevar a cabo la eliminación de los restos generados por el pueblo romano. La Cloaca Máxima atraviesa la totalidad de la ciudad, desembocando en el mismo río Tíber.



Figura 2.5. Sección correspondiente con una tramo de la Cloaca Máxima (www.thehistoryblog.com).

Es en 1895 cuando en España se promulga la Ley de Saneamiento y Mejora de las poblaciones, con tal de dar solución a los distintos problemas de saneamiento asociados a los cascos históricos de las poblaciones. Durante ese periodo las distintas redes de saneamiento eran diseñadas con la finalidad de verter la mayor cuantía posible que el sistema receptor fuera capaz de diluir, por lo consiguiente, tanto el control como el tratamiento de las descargas era considerablemente reducido. Es desde este punto desde el que surge el criterio de la dilución,

el cual evoluciona constantemente hasta la actualidad, a pesar de que ya se considera obsoleto (Andrés Doménech, 2010)

Ya a partir del siglo XX aparecen los sistemas de saneamiento comúnmente conocidos como sistemas convencionales, los cuales pretenden mandar a tratar el mayor volumen posible de agua. Esta concepción de los sistemas de saneamiento es la que sigue en vigor en la actualidad. Cabe mencionar que los sistemas actuales de saneamiento presentan debilidades, especialmente en periodos lluviosos, donde a menudo se producen las descargas de sistemas unitarios (DSU), cuando la capacidad de los colectores se ve superada, con el consecuente problema ambiental que esto conlleva.

Hasta el momento solamente se hablaba de cantidad de agua, hasta que es en 1960 cuando se introduce el concepto de calidad, especialmente la referente a los vertidos de escorrentías de carácter urbano. Tal y como se ha mencionado con anterioridad, la evolución de los sistemas de saneamiento es fruto de la necesidad de solventar problemas existentes, por tanto en este caso se introducen técnicas dirigidas a mejorar este problema expuesto.

Ya en la actualidad más reciente se están desarrollando técnicas de drenaje que pretenden de alguna manera reproducir las condiciones naturales previas al desarrollo de la urbanización, intentando de esta manera eliminar o reducir desde su origen los distintos problemas existentes, de manera que no se trasladen dichos problemas a los sistemas de saneamiento (dichos problemas por tanto son los referentes a reutilización, infiltración y por último la regulación de las aguas de lluvia). Son dichas técnicas las denominadas SUDS.

2.5. ESTRATEGIAS CONVENCIONALES EN LA GESTIÓN DE LAS AGUAS PLUVIALES

El enfoque convencional tiene su fundamento en el evacuar lo antes posible las distintas aguas tanto pluviales como las residuales. Con tal objetivo, las distintas infraestructuras son diseñadas mediante el conjunto de unos parámetros que hacen referencia esencialmente a un caudal punta, asociado a un periodo de retorno.

De gran importancia es contemplar el futuro desarrollo urbanístico de las ciudades, ya que de no hacerlo, tras la expansión se generan de manera inevitable diversos problemas como la incapacidad de los colectores. Dicha incapacidad se mitiga con la introducción de aliviaderos en los sistemas de saneamiento, los cuales regulan las redes generando de manera directa descargas en los sistemas unitarios (DSU).

Para eliminar la problemática referente a los DSU se ejecutan en la actualidad diversas medidas que conllevan la disposición de tanques de tormenta, colectores de grandes dimensiones, tamices en los aliviaderos, etc. Se trata en su gran mayoría de actuaciones de un coste considerablemente relevante. Con estas actuaciones se soluciona el problema de necesidad de espacio y saturación de los servicios en los núcleos urbanos.



Figura 2.6. Interior de un tanque de tormenta en Tokio, Japón (www.fierasdeलाingeniería.com).

2.6. SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE

Tal y como ya se ha mencionado con anterioridad, los SUDS son el fruto de los distintos problemas existentes en los sistemas de drenaje llamados convencionales, planteando estos una nueva concepción referente al tratamiento y gestión de las aguas pluviales. Los SUDS adoptan la filosofía de gestionar el agua de lluvia como parte fundamental del sistema y no como una parte de la que deshacerse (un problema), es decir, se conceptualiza la cuenca urbana de tal manera que se pretende asemejar su comportamiento de la manera más precisa posible (dentro de las posibilidades) al comportamiento que presentaría dicha cuenca en su estado primitivo, o mejor dicho, natural.

Los SUDS se presentan como una herramienta muy útil de gestión en zonas ya urbanizadas y consolidadas, ya que estos sistemas no presentan ningún problema de compatibilidad con los sistemas convencionales.

Los principales objetivos atribuibles a los SUDS son los de llevar a cabo una reducción de la cuantía de escorrentía de agua de lluvia, tanto en términos de caudal como volumen. Por otro lado se encuentra el objetivo de mejorar la calidad de las aguas circulantes por la escorrentía generada tras los episodios lluviosos, con tal de favorecer a los sistemas receptores de esta agua. Por último se encuentra el objetivo de beneficiar el entorno, hablando tanto de la mejora del paisaje como de la calidad ambiental. Dichos tres objetivos se engloban en el llamado “triángulo de la sostenibilidad”, el cual viene a representar que cada uno de los tres objetivos tiene el mismo peso e importancia a la hora de realizar el diseño de cualquier sistema de este tipo, y que por otro lado, que los beneficios asociados a la implantación del sistema recaigan a cada una de estas tres categorías (Woods-Ballard , et al., 2007).

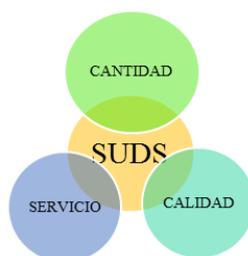


Figura 2.7. Triángulo de la sostenibilidad del drenaje urbano (elaboración propia)

Cabe mencionar por otra parte que la misma reducción de los volúmenes de las escorrentías y los caudales punta generados, se traduce en un funcionamiento más eficiente en las estaciones de tratamiento de aguas, ya que se reducen los volúmenes a tratar, también se ven menos alterados los patrones de contaminantes y por último, debido a la resolución del problema de incapacidad de los sistemas de colectores, se reduce el número de vertidos (DSU) sobre todo a la entrada de las EDARs.

Para llegar a conseguir la finalidad que persiguen los SUDS (reproducir las condiciones naturales del terreno previa la alteración del mismo), es necesario establecer o disponer una cadena de gestión de la escorrentía. Para alcanzar los objetivos deseados, estas técnicas de drenaje se deben combinar, por tanto debe existir una jerarquía establecida, la cual pasa desde la prevención, al control en origen, gestión del entorno urbano y finalmente gestión de las cuencas.



Figura 2.8. Cadena de gestión en los sistemas SUDS (Perales Momparler & Andrés Doménech, 2008)

Por último, se adjunta una tabla comparativa entre los sistemas convencionales de colectores y los sistemas alternativos SUDS.

	SISTEMA CONVENCIONAL COLECTORES	SISTEMA ALTERNATIVO SUDS
Coste de construcción	Pueden ser equivalentes, aunque los usos indirectos de los SUDS reducen su coste real	
Costes de operación y mantenimiento	Establecido	No establecido: falta experiencia
Control de inundaciones en la propia cuenca	Sí	Sí
Control de inundaciones aguas abajo	No	Sí
Reutilización	No	Sí
Recarga / Infiltración	No	Sí
Eliminación de contaminantes	Baja	Alta
Beneficios en servicios al ciudadano	No	Sí
Beneficios educacionales	No	Sí
Vida útil	Establecida	No establecido: falta experiencia
Requerimientos de espacio	Insignificantes	Dependiendo del sistema, pueden ser importantes
Criterios de diseño	Establecida	No establecido: falta experiencia

Tabla 2.1. Comparación entre el sistema de drenaje convencional y el sistema alternativo SUDS (Perales Momparler & Andrés Doménech, 2008)

A modo de conclusión, con referencia a los problemas actuales que presenta el drenaje urbano cabe añadir la siguiente consideración: hasta el momento la gestión del drenaje urbano se ha abordado de manera centralizada, es decir se puede hablar de gestión centralizada, donde se adopta un enfoque desagregado para abordar temas referentes a cantidad y calidad de las aguas.

Con los SUDS se pretende abordar y solucionar los problemas con un enfoque integrado mediante la gestión del agua realizada de manera descentralizada, es decir, se pretende gestionar el agua desde el momento en que la misma se pone en contacto con la superficie (este es el llamado comúnmente cambio de paradigma que introducen los SUDS).

2.6.1. CLASIFICACIÓN

Son diversas las clasificaciones referentes a los distintos sistemas SUDS existentes en función de distintos criterios. Se pretende realizar a continuación dicha clasificación de manera breve y concisa.

En primer lugar se establece una clasificación de los SUDS en función del lugar de aplicación de los mismos (Woods-Ballard , et al., 2007):

- Medidas de prevención: donde se incluye el adecuado planeamiento y una serie de normas de buenas prácticas, enfocadas a la disminución de la cantidad y aumento de la calidad del agua de escorrentía.
- Control de origen: se trata de las medidas aplicables a los distintos elementos del sistema que conforma el drenaje previamente a la incorporación en la propia red de saneamiento.
- Control en el entorno urbano: estas medidas son las que se aplican en la propia red de drenaje, ya sea superficial o en la red subterránea.
- Control de cuenca: son estas las actuaciones que se ejecutan en la parte final de los distintos sistemas de drenaje.

Por otro lado se plantea una clasificación en función de las características de funcionamiento del sistema dispuesto (Rodríguez Bayon, et al., 2015):

- Medidas preventivas: son consideradas medidas preventivas todas aquellas consideradas a nivel de planteamiento, enfocadas a evitar la ocurrencia de los distintos problemas relacionados con la escorrentía mencionados en puntos anteriores.
- Sistemas de infiltración: se trata de medidas que reciben de manera directa el agua, ya sea de la lluvia o de la escorrentía, favoreciendo la infiltración superficial (en el lugar donde se produce la precipitación).
- Sistemas de transporte permeable: al contrario que los sistemas de infiltración, el cometido principal de estos sistemas es el de transportar el agua hacia otro sistemas, ya sean de tratamiento o de vertido.

- **Sistemas de tratamiento pasivo:** son aquellos que se emplazan en la parte final de la red, los cuales se sitúan con la finalidad de alargar el tiempo de permanencia de las aguas pluviales en la red durante un periodo de tiempo determinado, antes de su vertido al medio receptor, o entrega al punto de tratamiento.

Finalmente se realiza la clasificación en función del tipo de actuación (Temprano González, et al., 1996), de donde se diferencian:

- **Medidas no estructurales:** dichas medidas engloban tanto la educación de los propios ciudadanos, como una serie de técnicas para la disminución de la contaminación en origen, la creación de organismos reguladores que contemplen por ejemplo la correcta gestión y desarrollo. Dichas técnicas mencionadas tienen como finalidad la reducción de la escorrentía y la prevención de la contaminación de la misma donde esta es generada
- **Medidas estructurales:** son aquellas medidas que modifican el comportamiento de la escorrentía, en términos de cantidad y calidad, a través de actuaciones que en mayor o menor medida contengan elementos constructivos.

2.6.2. TIPOLOGÍA

De las distintas clasificaciones existentes, surge la idea de la no existencia de un único criterio para la definición de los distintos tipos de SUDS existentes en la actualidad, por tanto se adopta la última de las clasificaciones expuesta, para realizar una breve descripción de la tipología de dichos sistemas, en función por tanto si se clasifican como medidas estructurales o no estructurales, basándose en el artículo publicado por (Perales Momparler & Andrés Doménech, 2008)

Partiendo de que con anterioridad ya han sido descritas a que hacen referencia las medidas clasificadas como estructurales y no estructurales, seguidamente se procede a nombrar directamente la tipología de actuaciones contemplada en cada una de ellas.

MEDIDAS NO ESTRUCTURALES

- **Educación:** Se entiende por unas medidas educativas las que pretenden realizar una labor de concienciación del problema y sus soluciones a la población. Incluye la identificación de los distintos agentes implicados y los distintos esfuerzos realizados hasta la fecha. Por otro lado las medidas educativas contemplan cambios de hábito en la población, y finalmente, hacer

partícipe a la misma en el proceso, mediante la integración de sus comentarios en la implementación de los programas.

- **Planificación y diseño** minimizando las superficies impermeables, con la finalidad de disminuir la escorrentía generada. Por otra parte considerar el drenaje desde las etapas iniciales de planeamiento urbanístico.
- **Limpieza** frecuente de las distintas superficies impermeables, con tal de reducir la acumulación de contaminantes.
- **Control** de la utilización de distintos productos químicos como los herbicidas en las zonas destinadas a parques y jardines, al igual que la realización de controles en las zonas en obras, con tal de minimizar el arrastre de sedimentos.
- Disponer de las herramientas necesarias para tratar posibles episodios de vertidos accidentales mediante técnicas que no contemplen la utilización del agua.
- **Limitación del riesgo** de que la escorrentía entre en contacto con contaminantes.
- **Recogida y reutilización** de pluviales.
- **Control** estricto de las conexiones fraudulentas al sistema de drenaje.

MEDIDAS ESTRUCTURALES

- **Cubiertas vegetadas** (*Green roofs*): Se trata de sistemas multicapa que presentan la cubierta vegetada, destinados a recubrir tejados y terrazas. Se encuentran concebidos para realizar las tareas de intercepción y retención de las aguas pluviales, reduciendo por tanto el volumen de escorrentía y atenuando los caudales pico producidos. Realizan también la función de retención de contaminantes, al igual que actuar como aislante térmico en los edificios donde se implantan, compensando el efecto “isla de calor”.



Figura 2.9. Cubierta Vegetada (www.drenajesostenible.org).

- **Superficies Permeables (*Permeable Paving*):** Las superficies permeables son aquellas que a la vez que son aptas para la circulación, tanto de vehículos como de peatones, permiten la filtración vertical del agua. Dentro de las superficies permeables se distinguen los pavimentos permeables continuos y discontinuos. En la estructura de los mismos, las capas inferiores deben ser capaces de filtrar el agua o por el contrario acumularla y retenerla para su posterior evacuación. Se consigue una atenuación de los caudales pico de las escorrentías y, por otro lado también consiguen una mejora en la calidad de las aguas, mediante la eliminación de metales, sólidos suspendidos, grasas y aceites principalmente.



Figura 2.10. Superficie permeable (www.arkigrafico.com).

- **Zanja Drenante (*Drainage Ditch*):** son franjas las cuales se encuentran rellenas por materiales de carácter drenante, como los son las gravas. El principal cometido de este tipo de drenes es el de captar y transportar el aguas procedente de la escorrentía urbana. Permiten por otro lado la reducción de sustancias contaminantes presentes en el agua.



Figura 2.11. Zanja Drenante (www.drenajesostenible.org).

- **Franja Filtrante (*Filter Strips*):** En este caso se trata de franjas de suelo vegetadas diseñadas con la finalidad de tratar la escorrentía de superficies impermeables adyacentes o zonas intensamente ajardinadas. Normalmente se trata de instalaciones lineares las cuales

discurren en paralelo a la superficie impermeable y generalmente sirven para recibir la escorrentía de aceras, paseos y calles.



Figura 2.12. Zanja filtrante (www.drenajesostenible.org).

- **Pozos y zanjas de infiltración** (*Soakaways and Infiltration Trenches*): Son aquellos pozos y zanjas de poca profundidad los cuales se encuentran rellenos de materiales drenantes, sobre los que vierte la escorrentía de las superficies contiguas.



Figura 2.13. Pozo Filtrante (www.drenajesostenible.org).

- **Drenes Filtrantes o Franceses** (*Filter Drains*): En este caso se trata de zanjas de poca profundidad rellenas de material filtrante, las cuales pueden presentar o no conductos en la parte inferior para el transporte de la escorrentía.



Figura 2.14. Dren Francés (www.drenajesostenible.org).

- **Cunetas Vegetadas (*Swales*):** Se trata de depresiones longitudinales, estrechas y con taludes suavizados, dispuestas con la finalidad de captación y transporte de la escorrentía generada en entornos urbanos. La vegetación dispuesta en este tipo de cunetas debe ser notablemente densa, para que de esta manera se puedan producir los fenómenos de filtración y transporte de una manera correcta, sin que se presente el fenómeno de la erosión. Se disponen con el objetivo de ralentizar el flujo circundante pequeñas barreras transversales.



Figura 2.15. *Cuneta Verde* (www.drenajesostenible.org).

- **Depósitos de infiltración (*Infiltration Basins*):** Se trata básicamente de depresiones en el terreno, las cuales se encuentran cubiertas por vegetación, dispuestos con la finalidad de almacenar y recoger las aguas fruto de la escorrentía, aconteciendo en ellos los procesos de sedimentación e filtración de los contaminantes. El agua se almacena en una primera fase en estos depósitos, infiltrándose a posteriori. Los procesos de eliminación de los contaminantes se producen mediante una serie de procesos de tipo natural como son la adsorción y absorción, filtración, sedimentación e procesos químicos y biológicos.



Figura 2.16. *Depósito de infiltración* (www.drenajesostenible.org).

- **Depósitos de Detención en superficie** (*Detention Basins*): Este tipo de depósitos tienen la finalidad de proporcionar de forma temporal, almacenamiento al agua de escorrentía generado por la lluvia, con el objetivo principal de suavizar el impacto generado por un caudal punta de magnitud elevada, que se podría generar aguas abajo. Presentan por tanto periodos secos y también, mediante los procesos de sedimentación mejoran la calidad de las aguas de escorrentía.



Figura 2.17. Depósito de detención en superficie (savia-medioambiental.blogspot.com)

- **Depósitos de Detención enterrados o Sistemas Geocelulares** (*Detention Basins*): Los sistemas geocelulares o modulares, se encuentran formados por distintos módulos plásticos con alta proporción de huecos. Son utilizados con la finalidad de crear zonas de almacenamiento e infiltración de las aguas de lluvia en un nivel inferior al del terreno, teniendo la capacidad de laminar las avenidas.



Figura 2.18. Sistema Geocelular (www.iagua.es).

- **Estanques de Retención** (*Retention Ponds*): En este caso se trata de estanques que se caracterizan por mantener un volumen constante de agua en el transcurso de las estaciones

húmedas. Se produce en ellos una eliminación de contaminantes mediante los procesos de sedimentación y degradación bioquímica, realizada esta última por las especies presentes en el estanque de retención.



Figura 2.19. Estanque de retención (www.drenajesostenible.org).

- **Humedales (Wetlands):** Se trata de zonas de profundidad reducida, las cuales se construyen con la finalidad de captar y acumular las aguas procedentes tanto de las escorrentías como de los flujos subterráneos. En los humedales artificiales, mediante procesos de absorción de las especies vegetales, la sedimentación, distintas transformaciones biológicas y la absorción, se llevan a cabo reducciones e incluso eliminación de diferentes contaminantes del agua. A parte de presentar beneficios referentes a la calidad de las aguas procedentes de la escorrentía urbana, este tipo de humedales resultan beneficiosos para la gestión de los caudales asociados a dicha escorrentía.



Figura 2.20. Humedal artificial (depuranatura.blogspot.com).

Aunque las siguientes técnicas no se corresponden estrictamente con sistemas SUDS, dado que no existe un criterio universal de clasificación de los mismo tal y como se ha mencionado, se incluyen dos técnicas más.

- **Plantaciones de árboles y creación de zonas de Bio-Retención:** La disposición de árboles permite la intercepción del agua de lluvia a través de las propias hojas de los mismos y en sus ramas, produciéndose por tanto una disminución del flujo de la escorrentía. Por otro lado cabe destacar el beneficio que supone la presencia de los árboles en cuanto a la mejora de las capacidades de infiltración del terreno, favoreciendo por tanto la recarga de acuíferos. Por otro lado las zonas de Bio-Retención son zonas las cuales mediante la disposición de vegetación, permiten un tratamiento de la escorrentía de agua urbana. Comúnmente son denominados jardines de lluvia, y en ellos se dan los procesos tanto de intercepción de la escorrentía, como posterior evapotranspiración, infiltración y por otra lado la eliminación de contaminantes en menor proporción. Son por tanto un instrumento útil y sencillo para reducir el volumen de escorrentía de las aguas urbanas en episodios lluviosos.



Figura 2.21. Zona de Bio-Retención (www.drenajesostenible.org).

- **Aljibes:** Se trata de instalaciones sencillas y comúnmente utilizadas las cuales permiten el fácil aprovechamiento de las aguas de lluvia, principalmente de uso doméstico en zonas ajardinadas. Se sitúan conectados a las bajantes de las casas o edificios, recogiendo por tanto el agua proveniente de las cubiertas, aprovechando dicha agua para usos que no requieran agua potable.



Figura 2.22. Aljibe doméstico (greenlandsrevolution.wordpress.com).

2.7. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN LA MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LOS SUDS

Conocidos los numerosos beneficios que aportan los SUDS, y en particular las cubiertas vegetadas sobre los edificios, cada día es más corriente la instalación de los mismos en diversas instalaciones. Se encuentra por tanto necesaria la elaboración de un método que permita evaluar las prestaciones de este tipo de cubiertas.

Si bien en el transcurso de los años se han propuesto numerosas relaciones empíricas que relacionan la precipitación y la escorrentía generada, en los últimos años, en particular del 2010 a la actualidad se ha visto incrementado el número de investigaciones encaminadas a la propuesta de modelos que consisten en la previsión de la escorrentía en función de la precipitación y de otros parámetros. Mientras que algunos de los estudios describen con detalle la dinámica de eventos simples, otros tratan de describir eventos mayormente extendidos. En cuanto a los modelos hasta el momento propuestos para la modelación de los procesos hidrológicos, se pueden clasificar de las siguientes maneras: - modelos originalmente nacidos para la modelación de acuíferos en medio poroso parcialmente saturado, - modelos conceptuales en los cuales las cubiertas vegetadas vienen conceptualizados mediante la combinación de embalses lineales y no lineales, - modelos basados en el balance hídrico en los cuales las cubiertas vegetadas vienen representados como embalses simples con restricciones respecto a la escorrentía (She & Pang, 2010).

Son numerosos los modelos hidrológicos desarrollados durante los últimos años. (Zimmer & Geige, 1997) desarrollaron un modelo de embalses tanto lineales como no lineales para la modelación de las cubiertas vegetadas y pavimentaciones permeables sometidos a hietogramas sintéticos de precipitación del tipo rectangulares. (Bengtsson, et al., 2005) a través de la observación de los resultados de la escorrentía generada en un modelo a escala reducida, derivando un hidrograma unitario que una vez convertido en lluvia real permita la estima de la escorrentía. El principal inconveniente del método expuesto es que solamente es válido para cubiertas vegetadas con la misma configuración que la dispuesta en su estudio. (Hilten, et al., 2008) mediante la utilización del software Hydrus-1D, el cual resuelve numéricamente las ecuaciones de Richards por medio parcialmente saturado a través de la predicción de la escorrentía en una cubierta vegetada la cual se constituía por 100 mm de substrato y sin drenaje, sobre la base de eventos simples. A raíz de dicho estudio surge la necesidad de caracterizar con mayor precisión las propiedades físicas del suelo que no vienen directamente medidas pero se

requieren para la calibración. Se continuó con el uso del Hydrus-1D (Palla, et al., 2012), el cual fue combinado con un modelo de embalse lineal, obteniendo de esta manera un modelo para la simulación de una cubierta vegetada constituida por dos estratos de materiales, como son el substrato y el drenaje. En dicho modelo mediante el software se modela y simula los procesos de infiltración unidimensional (flujo vertical), mientras que con el modelo lineal se modela la infiltración lateral y los procesos de convolución. En el mismo estudio, (Palla, et al., 2012) propone un segundo modelo del tipo conceptual constituido por 3 embalses lineales en cascada. En ambos casos, los modelos son calibrados en base a los eventos registrados durante la fase de monitorización de la cubierta vegetada en escala real. Tras la comparación entre ambos modelos se desprende que el modelo realizado mediante Hydrus-1D permite una predicción más exacta de la escorrentía con respecto al modelo conceptual. El empleo de dicho software viene retomado por (Hakimdavar, et al., 2014) para modelar el comportamiento de tres cubiertas vegetadas, concluyendo al final del estudio que el modelo es capaz de simular, solo parcialmente, el comportamiento de la cubierta.

Mediante la utilización del modelo SWMM, se modela detalladamente la variación de la humedad en el substrato durante una sucesión de eventos simples, basándose en las ecuaciones de Richards (Palla, et al., 2009). Por otro lado, (Kasmin, et al., 2010), utiliza un simple modelo conceptual con dos parámetros, en el cual la escorrentía viene descrita mediante un embalse no lineal. A pesar de que dicho modelo se encuentra en grado reproducir con precisión aceptable la escorrentía generada, presenta poco interés ya que los diferentes procesos vienen combinados en un único proceso equivalente. (Sherrard & Jacobs, 2012) proponen un modelo esta vez con cinco parámetros, el cual se incluye un balance de masas con time-step diario reproduciendo el volumen no retenido diariamente y anualmente. Por otro lado, propone un modelo para la determinación del balance anual y otro modelo destinado a la determinación de balances diarios. Es (Stovin, et al., 2013) quien propone un modelo para la cuantificación de la escorrentía producida por las cubiertas vegetadas en base a la modelación en el continuo temporal. Los resultados de su estudio muestran una reducción volumétrica la cual varía entre el 0.19 (para periodos fríos y clima húmedo) y el 0.59 (en climas cálidos y secos).

(She & Pang, 2010) desarrollan un modelo físicamente basados en otros tres submodelos. Dichos modelos son el de evapotranspiración, el de infiltración y finalmente el de propagación de la escorrentía. Los dos primeros submodelos mencionados se encuentran en el US EPA SWMM5 y sobre el cual se implantó el tercero de los submodelos mencionados. El modelo utiliza las ecuaciones de Green Ampt y la ley de Darcy para modelar los procesos en el

substrato, sin embargo el drenaje viene modelado a través de la ecuación de Manning. Por otro lado la evapotranspiración viene fijada con un valor igual a cero durante la precipitación y se considera un decaimiento exponencial de la humedad para simular el efecto del tiempo seco. Son dos eventos empleados para la calibración del modelo, siendo caracterizado el primero el correspondiente con una larga duración de lluvia y el segundo siéndolo por un periodo de retorno superior a dos años. Pese a que el rendimiento del modelo se considera aceptable, el mismo sobreestima significativamente los picos de escorrentía. Finalmente para obtener los resultados deseados, el drenaje se modela mediante la disposición de una rugosidad ficticia.

(Carbone, et al., 2014) propone una modelo conceptual para la predicción de la escorrentía de las cubiertas vegetadas que viene calibrado y validado mediante la realización de pruebas experimentales efectuadas sobre la cubierta a escala reducida, sometido a precipitaciones sintéticas de intensidad constante. El modelo se subdivide en tres bloques, cada uno de los cuales representa uno de los principales estratos de la cubierta, tales como la vegetación, el substrato y el drenaje, sobre los que se resuelve el balance de masas.

Mediante la utilización de Matlab, (Lamera, et al., 2014) desarrollan un modelo, en contraposición a los estudios precedentes, en el cual el proceso de infiltración no viene representado mediante el enfoque de Darcy-Richards, sino a través del uso del modelo simplificado, de tipo “bucket”, que se encuentra basado en el concepto de almacenamiento de agua en el suelo entre los límites de capacidad de campo y el punto de marchitez. Dicho modelo se calibra y valida en base a eventos simples que derivan de las experiencias de (Stovin, et al., 2012) (Palla, et al., 2012). La principal carencia del modelo utilizado resulta ser la falta de un módulo para la modelación de la evapotranspiración y por tanto la consecuencia directa de no poder realizar simulaciones en continuo.

(Burszta Adamiak & Mrowiec, 2013) utilizan el módulo LID (LOW Impact Development) implementado en el software US EPA SWMM5 para modelar la respuesta hidrológica de 4 cubiertas vegetadas a escala reducida. Paralelamente, (Zhang & Guo, 2013) proponen un modelo probabilístico para la evaluación de la respuesta hidrológica a medio y a largo plazo. (Locatelli, et al., 2014) estiman la retención de las cubiertas vegetadas tanto en continuo como para eventos simples mediante la utilización de un modelo conceptual con embalses no lineales y 5 parámetros diferenciados. Esta vez el modelo se calibra y valida mediante la utilización de los datos experimentales de 3 cubiertas vegetadas extensivas a escala real y cobertura tipo

Sedum. En este caso la evapotranspiración se calcula en base a la ecuación de Penman-Monteith corregida con un coeficiente de cultivo igual a 0.6.

Una parte muy importante a la hora de realizar modelos matemáticos referentes a sistemas en los que predomina la vegetación, es la consideración del proceso de evapotranspiración. Tras los estudios de (Berghage, et al., 2009) y (Voyde, et al., 2010) se demuestra que el volumen de agua adquirida por el proceso de evapotranspiración resulta ser máximo cuando el suelo se encuentra saturado, y tiende a disminuir progresivamente con la reducción de la humedad del suelo. (Voyde, et al., 2010) remarcan que la evapotranspiración varía tanto en función de las especies vegetales dispuestas como en función de la disponibilidad hídrica del sustrato, y proporciona las relaciones empíricas para la modelación del decaimiento en el tiempo de la evapotranspiración. (Stovin, et al., 2013) demuestran que son las condiciones de humedad iniciales del sustrato las que incrementan las diferencias entre la ETP (Evapotranspiración potencial) y la ETR (Evapotranspiración real o activa). (Kasmin, et al., 2010) y (Nagase & Dunnett, 2012), demostraron que los distintos métodos tradicionales utilizados para la estima de la ET, en el campo de la agricultura, pueden ser adaptados para su aplicación en el campo de las cubiertas vegetadas. A fecha de la redacción del presente estudio, aún no se encuentran artículos científicos publicados los cuales contengan información referente a los coeficientes culturales a utilizar para tener en cuenta las distintas tipologías de especies y la diferencia entre los sustratos y el suelo tradicional. Ya más recientemente se han empleado cámaras atmosféricas colocadas sobre cubiertas vegetadas a escala real, para de este modo cuantificar la ETR, como es el de la cubierta con vegetación tipo sedum empleado en el estudio de (Coutts, et al., 2013).

Son los estudios más recientes los que destacan que la variación de la humedad en el sustrato en tiempo seco depende de las características de las especies, al igual que de las propiedades físicas del sustrato y de las condiciones meteorológicas (Berretta, et al., 2014). También se destaca por otra parte la dificultad existente a la hora de reproducir las condiciones climáticas, y concluye su estudio con un modelo hidrológico basado en el balance hídrico que consiste en estimar la ETR en función de la ETP, a partir de una función y en la extracción de la humedad del suelo y de un coeficiente corrector, calibrado y validado en base a observaciones realizadas durante un periodo de 15 meses.

Tal y como se observa se ha ido evolucionando desde una fase donde se proponían modelos para la cuantificación de la relación existente entre aportes y escorrentía generada, a otra fase

donde se trata de estimar la relación entre la humedad del suelo, evapotranspiración y escorrentía generada. Son numerosos los estudios que evidencian que la evapotranspiración representa el parámetro clave para la simulación en continuo, ya que es el proceso que reduce el contenido de humedad en el suelo, modificando por tanto las condiciones iniciales en el substrato y consecuentemente en la retención de la cubierta vegetada.



3. CUBIERTAS VEGETADAS

Dado que el enfoque del presente trabajo versa sobre las cubiertas vegetadas, se analiza en el presente apartado de una manera más profunda los aspectos relacionados con las mismas, siendo por tanto una continuación de la revisión del estado del arte centrada en los aspectos referentes a este tipo de cubiertas.

3.1. INTRODUCCIÓN

Arquitectónicamente hablando se puede afirmar que las cubiertas son, a grandes rasgos, los grandes olvidados en la construcción, limitándose su diseño a cumplir las propias funciones de un tejado. Desde el punto de vista técnico las cubiertas aportan muchos más que las funciones típicamente convencionales de los mismos, ya sea desde beneficios puramente estéticos, hasta beneficios referentes al propio medio ambiente. Un ejemplo claro de ello son las cubiertas vegetadas.

Se denominan Cubiertas Vegetadas a aquellas cubiertas que se encuentran de manera total o parcial, cubiertas por cobertura vegetal viva. Es importante matizar que una cubierta sobre la que se disponen simplemente plantas con sus correspondientes maceteros o recipientes, no se consideran de cubiertas verdes propiamente dichas ya que el conjunto de las plantas en este caso no forma parte total o integral del sistema.

3.2. EVOLUCIÓN HISTÓRICA

Tal y como de alguna manera se ha mencionado con anterioridad, la concepción global que se tiene sobre el concepto de cubierta, tejado o azotea, es una definición fría, como la de ser la parte descubierta y exterior de una casa o edificio. Dichas cubiertas sirven, entre otras cosas, como puntos de acumulación de antenas parabólicas, postes de luz o simplemente punto de paso de tendidos telefónicos, es decir, se convierten en ciertos casos en puntos del edificio con un interés nulo y por tanto carente de interés para la realización de ninguna actividad.



Figura 3.1. Cubiertas masificadas por acumulación de antenas (cettpac.blogspot.com).

El poco interés del que se caracterizaban las cubiertas, hasta hace muy pocos años, difiere con el que existía antaño por los mismos tal y como se refleja en algunas construcciones históricas, en donde arquitectónicamente hablando, se debatían aspectos como su uso, pretendiendo en muchos casos relacionar el concepto de naturaleza con las cubiertas, tal y como se concibe de alguna manera actualmente.

A modo de ejemplo, se considera interesante apuntar que el propio Leonardo da Vinci, considera la colocación de jardines en la parte superior de edificios destinados al uso de servicios, como lo hace en una propuesta realizada para la reforma de la ciudad de Milán. A parte de la colocación de jardines en lo alto de los edificios, se consideran otras actuaciones, como la colocación de unas galerías longitudinales en las cubiertas, con la finalidad de crear paseos o estancias confortables. A pesar de que la mayoría de las propuestas descritas no se llevaban a cabo, se resalta el interés o importancia que se tenía por la creación de ambientes confortables y habitables en las azoteas de los edificios, ya en el S. XV.



Figura 3.2. Ciudad ideal de Leonardo da Vinci (www.encicloarte.com).

Por tanto tal y como ya se sabe, la idea de disponer vegetación sobre las cubiertas no es un concepto reciente del presente siglo, sino que viene siendo utilizado desde hace siglos en diversas partes del mundo.

Las primeras manifestaciones de este tipo de disposiciones constructivas se remontan a más de dos mil quinientos años atrás, donde la civilización babilónica era conocida por sus jardines colgantes. A pesar de que dichos jardines colgantes no se disponían con la finalidad que lo hacen hoy en día las cubiertas vegetadas, la intención de relacionar urbanización con naturaleza estaba presente. Estos jardines colgantes se dispusieron como una demostración de amor del rey Naducodonosor II a su esposa Amytis, para con ello recordarle las montañas de su tierra.



Figura 3.3. Jardines colgantes de Babilonia (www.maravillasdelmundo.net).

Los conceptos hasta ahora expuestos sobre cubiertas vegetadas difieren un poco del que se conoce en la actualidad, proviniendo el concepto actual de Islandia, donde a raíz de las limitaciones de recursos existentes, se usaba tierra para la construcción de las cubiertas y paredes, debido a que esta era uno de los escasos materiales de construcción disponibles en la zona.

Finalmente, la tecnología de cubierta vegetada que definitivamente se conoce en la actualidad tiene sus orígenes en Alemania, a partir de la publicación del libro “*Áreas habitadas de los techos, transitables y cubiertas por vegetación*”.

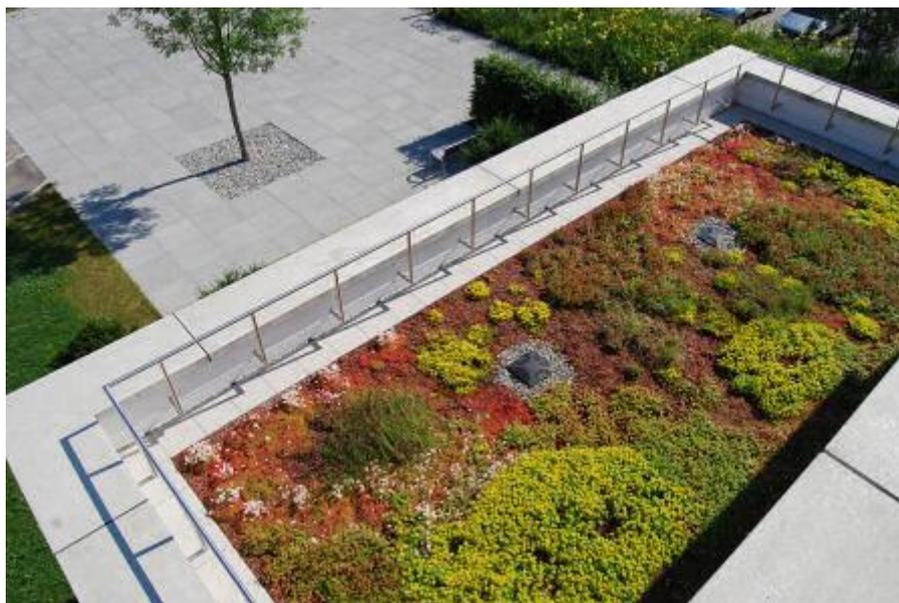


Figura 3.4. Cubierta vegetada.(www.greencitygrowers.com).

3.3. BENEFICIOS DE LAS CUBIERTAS VEGETADAS

El interés de las cubiertas vegetadas viene proporcionado por las distintas ventajas o beneficios que presentan. Dichas ventajas hacen referencia tanto a aspectos de cantidad y calidad del agua, como a aspecto medioambientales. En primer lugar y como uno de los principales beneficios de las cubiertas vegetadas se encuentra la disminución del volumen de escorrentía y la atenuación de los caudales pico durante los episodios lluviosos. Por otra parte, se demuestra que presentan una buena capacidad para la eliminación de los distintos contaminantes presentes en el agua. Ayudan por otra parte a retener la humedad y por tanto, evitar el denominado efecto “isla de calor” presente en los distintos entornos urbanos, al igual que proporciona un considerable efecto de aislamiento tanto térmico como acústico. Finalmente, dado que se trata de sistemas que se disponen sobre las cubiertas de los edificios, no suponen una ocupación adicional de espacio, adaptándose por tanto de manera idónea a zonas densamente pobladas, donde a su vez presentan mayores beneficios.

Como resulta lógico pensar, no todo lo que rodea las cubiertas vegetadas son ventajas, sino que presentan algunas limitaciones como por ejemplo la más directa que es el coste inicial de implantación de los mismo, comparando este coste con el de una cubierta convencional, aunque este coste depende en gran parte también de la tipología de cubierta vegetada dispuesta, como más adelante se expondrá. Por otra parte presentan dificultades de implantación en cubiertas con elevada pendiente (superiores al 20%). En muchos casos las propias condiciones o

limitaciones estructurales del edificio se presentan como un impedimento a la hora de disponer esta tipología de cubiertas. Ya por último, es muy importante tener en cuenta que una mala disposición constructiva de los mismos, especialmente si la membrana aislante no se encuentra convenientemente dispuesta, puede ocasionar consecuencias directas sobre la estructura del edificio.

3.4. ASPECTOS TÉCNICOS

Una vez introducidas las cubiertas vegetadas, y antes de describir el propio caso de estudio se ha considerado describir algunos aspectos técnicos generales de los mismos.

Las cubiertas vegetadas son estructuras compuestas por diferentes capas, dispuestas en la cumbre de los tejados, en donde se propicia el crecimiento de la vegetación. Los principales elementos que las componen en orden ascendente son la membrana bituminosa impermeabilizada, el filtro, el sustrato y finalmente las especies vegetales. A veces la configuración base se encuentra enriquecida mediante el empleo de capas adicionales tales como una membrana antirraíces (la cual sirve para proteger la membrana bituminosa de las raíces), y mediante la incorporación de filtros adicionales (Castleton, et al., 2010) (Palla, et al., 2009). Por otra parte las cubiertas vegetadas pueden estar constituidas por sistemas de tipo modular, pre-cultivados o dispuestos insitu y pueden disponerse sobre toda la superficie de la cubierta o solamente en una parte.

Existen distintas tipologías de cubierta vegetada según las características de los mismos, diferenciando entre:

- **Cubiertas vegetadas extensivas:** se conocen como cubiertas vegetadas extensivas aquellas en las cuales la vegetación que lo compone es baja o de poco crecimiento, y sobre todo se caracterizan por necesitar mantenimiento prácticamente nulo, excepto en los primeros días siguientes a la implantación del mismo, debido a la necesidad de afianzar la cobertura vegetal a la cubierta. Dadas sus características, este tipo de cubiertas son típicas de cubiertas donde es complicado el acceso a las mismas y por tanto solamente se hace para pequeñas labores de mantenimiento. Estas cubiertas pueden ser llanas o inclinadas.



Figura 3.5. Aspecto típico de un cubierta vegetada extensiva (www.greenroofs.com).

- **Cubiertas vegetadas intensivas:** se trata de un tipo de cubierta vegetada en la que es usual disponer de equipación complementaria como puede ser iluminación, bancos, etc. Otra de sus características es que son accesibles, por tanto pueden ser acondicionados para que los usuarios del edificio puedan acceder al mismo. Dadas las características anteriormente mencionadas, se considera por norma general una carga sobre la cubierta del edificio mayor a la de las cubiertas vegetadas de tipo extensivo. En cuanto a los costes de mantenimiento como resulta lógico, son más grandes que los existentes en las cubiertas vegetadas de tipo extensivo.
- **Cubiertas vegetadas intensivas simples:** se considera una variación simple de las cubiertas vegetadas intensivas, tal y como su nombre indica, estando caracterizadas por disponer sobre la cubierta de los mismos césped, por norma general. El mantenimiento requerido por este tipo de cubiertas se caracteriza por requerir de cortado, abono y finalmente riego. Frente a las cubiertas vegetadas intensivas presentan la ventaja de ser considerablemente más ligeras y por tanto el edificio requiere de una menor resistencia estructural.



Figura 3.6. Aspecto típico de una cubierta vegetada intensiva. (www.greenroofs.com).

A pesar de las distinciones anteriormente mencionadas entre los distintos tipos de cubierta vegetada, en la actualidad dicha distinción no es clara del todo. A modo de resumen se muestra a continuación una tabla donde se muestran las principales características de los distintos tipos de configuración, expuesta por (Berardi, et al., 2014).

Atributos principales	Extensivo	Intensivo
Espesor de sustrato	< 200 mm	> 200 mm
Accesibilidad	No accesibles (raíces frágiles)	Accesibles (se pueden utilizar con fines de recreación)
Peso	60-150 kg/m ²	> 300 Kg/m ²
Diversidad de especies	Baja	Alta
Complejidad de construcción	Moderadamente fácil	Técnicamente compleja
Riego	No suele ser necesario	Necesarios sistemas de drenaje y riego
Mantenimiento	Simple	Complicado
Costes	Bajos	Altos

Tabla 3.1. Características principales en función del tipo de cubierta vegetada (Berardi, et al., 2014)

Para realizar la elección de la tipología de especies a disponer sobre la cubierta de una manera correcta, se requiere la realización de un examen cuidadoso de las condiciones ambientales y el microclima existente en el lugar de implantación, al igual que un conocimiento agronómico y fisiológico de la vegetación. La familia del Sedum es de las más utilizadas para su implantación en las cubiertas vegetadas, particularmente en las cubiertas vegetadas de tipo extensivo. Son el lento y horizontal crecimiento, la alta tolerancia a la sequía y sus bajos costes de mantenimiento los que hacen a esta familia de especies las más utilizadas en este tipo de cubiertas. Otra característica importante que se desarrolla en posteriores apartados es su capacidad para adaptar el metabolismo a distintas condiciones adversas, como son las condiciones de estrés hídrico.

3.5. DISEÑO

Los aspectos de diseño más importante vienen recogidos en *The SuDS manual* publicado por (Woods-Ballard, et al., 2007) y ahora en su versión más reciente publicada en 2015. En la sección de dicho manual destinada a las cubiertas vegetadas, se recogen los puntos más importantes de diseño:

- Hay que contemplar las cargas variables derivadas del mantenimiento de las cubiertas, en caso de que este lo requiera.
- Es muy importante considerar la capacidad resistente del edificio donde se implanta la cobertura vegetal.
- Se debe contemplar el peso del conjunto saturado de agua y suelo.

- Tener siempre presente como se gestionará el drenaje del agua sobre la cubierta.
- Hay que tener presente en todo momento la idoneidad de las especies vegetales a disponer en la cubierta, siendo estas una de las partes fundamentales del sistema.

El manual de diseño menciona los 4 pilares básicos del diseño integrado con SUDS. Dichos 4 pilares fundamentales a tener en cuenta en el diseño de este tipo de tecnologías tienen una relación directa con el ya introducido triángulo de la sostenibilidad (Figura 3.7)

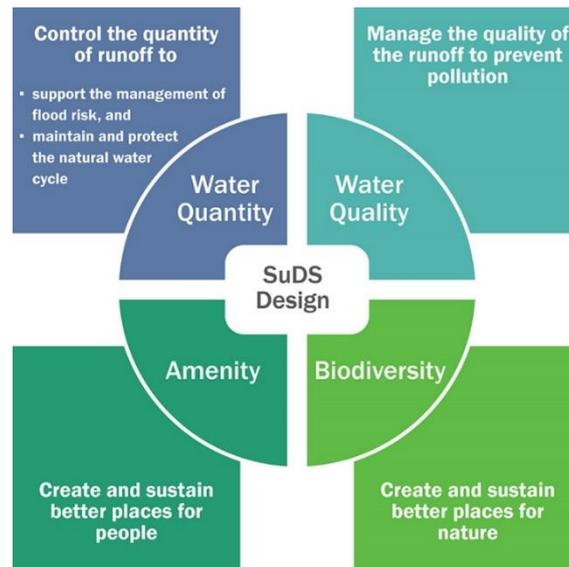


Figura 3.7. Los 4 pilares del diseño integrado con SUDS (Woods-Ballard , et al., 2015)

Siguiendo las indicaciones del manual, se especifica que para garantizar unas buenas condiciones de drenaje, las pendientes deben tener como mínimo 2° , pudiendo llegar hasta los 35° (dependiendo tanto del tipo de cubierta como del fabricante de la misma). Hay que tener especial cuidado en no generar ningún tipo de depresiones, para evitar las acumulaciones de agua.

En función del tipo de cubierta vegetada dispuesta, las cargas introducidas por el mismo al edificio varían entre 0.7 y 5 kN/m^2 .

Es recomendable que el sistema sea capaz de poder almacenar el agua generada por lluvias de hasta dos años de periodo de retorno. En cambio, con las tormentas de mayor magnitud, las cubiertas vegetadas no las eliminarán por completo, sino que ayudarán a atenuar la escorrentía generada por las mismas.

Tal y como ya se ha mencionado, la elección de las especies vegetales a disponer es muy importante. Siempre que sea posible tienen que disponer vegetación capaz de adaptarse a las

condiciones climáticas del sitio de implantación. En climas secos por ejemplo, es muy importante disponer especies resistentes a periodos de sequía. Cuando sea necesario se deberán disponer sistemas de riego, especialmente necesario en los primeros periodos, en los que la vegetación se está consolidando en el sustrato, al igual que en zonas donde el clima estival proporcione grandes periodos de sequía y temperaturas altas.

Referente al diseño, existe una publicación en la que se recogen las pautas establecidas para tal fin. Dicho documento es el llamado *New York State Stormwater Management Design Manual* (NYSDEC, 2015), publicado en su versión más reciente en 2015.

3.6. LEGISLACIÓN

Cierto es que gran parte de la normativa no incluye el término drenaje urbano sostenible, ya que por lo general dicha normativa se redactó en base a los sistemas de drenaje anteriormente introducidos como convencionales. Sin embargo parte de esta normativa si es de aplicación en aquellos sistemas en los cuales se incluyan las denominadas técnicas de drenaje urbano sostenible.

Seguidamente se expondrá tanto la legislación como las recomendaciones más importantes en materia de técnicas de drenaje urbano sostenible, tanto a nivel europeo, como a nivel estatal y autonómico, incluyendo la normativa italiana existente en materia de cubiertas vegetadas, debido al contexto en el que se ha desarrollado el presente estudio.

- **Normativa europea**

Directiva Europea 91/271 sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas.

Se trata de una ley mediante la cual se quiere garantizar el correcto tratamiento de las aguas residuales, con la finalidad de proteger tanto la salud de las personas como el medio ambiente.

Directiva Marco del Agua (2000/60/CE) por la que se establece el marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.

En la presente directiva se establecen distintas normas dirigidas a frenar el deterioro existente en las distintas masas de agua de la Unión Europea, con la finalidad de obtener un buen estado de los ríos, al igual que de los lagos y las masas de agua subterráneas de Europa en el 2015. Particularmente, dicha protección incluye desde la protección de la totalidad de las formas de agua, hasta la regeneración de los ecosistemas existentes en el interior de dichas masas y

alrededores, al igual que la reducción de la contaminación en dichas masas y, finalmente el garantizar el correcto y sostenible uso del agua.

Directrices sobre mejores prácticas para limitar, mitigar o compensar el sellado del suelo:

Se trata de un documento de la Comisión Europea que hace referencia a las buenas prácticas para, tal y como su nombre indica, limitar, mitigar o reducir el sellado del suelo, estableciendo la utilización de diversos materiales o sistemas naturales para la captación de las aguas.

Directiva 2007/60 de evaluación y gestión de los riesgos de inundación:

Se considera el incluir dicha directiva, ya que la misma hace referencia a la reducción y gestión de los distintos riesgos referentes a las inundaciones, en términos de medio ambiente, patrimonio, salud humana y finalmente economía.

Directiva 2006/118/CE, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro.

Esta última directiva tiene como objetivo la prevención y actuación contra la contaminación existente en las aguas subterráneas. De igual manera que la anterior se ha considerado incluirla debido al beneficio en cuanto a calidad de las aguas subterráneas que puede aportar la implantación de diversos sistemas de drenaje urbano sostenible.

- **Normativa estatal**

Real Decreto 1290/2012 de 7 de septiembre, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, y el Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.

En dicho documento se indica que los distintos proyectos referentes a nuevos desarrollos urbanos, se debe plantear algún tipo de medidas para la limitación de los aportes del agua tras los eventos de precipitación a los sistemas de colectores.

Real Decreto 233/2013, de 5 de abril, por el que se regula el Plan Estatal de fomento del alquiler de viviendas, la rehabilitación edificatoria, y la regeneración y renovación urbanas, 2013-2016.

Se contempla en el Real Decreto que pueden ser actuaciones subvencionables aquellas como las cubiertas vegetadas, las actuaciones referidas a la gestión sostenible de las escorrentías urbanas, y finalmente aquellas que tengan como finalidad la reducción del uso del riego y el agua potable.

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 el Real Decreto se recoge textualmente: “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.) que garanticen que el eventual aumento de escorrentía respecto del valor correspondiente a la situación preexistente puede ser compensado o es irrelevante”, en el artículo 56 del mismo.

UNE-EN 752: Sistemas de desagües y de alcantarillado exteriores a edificios.

Esta norma expone la frecuencia a la que deben limitarse los rebosamientos de los sistemas de alcantarillado, al igual que la necesidad de que el medio receptor se proteja de la misma contaminación.

A pesar de la no existencia a nivel estatal de normativa específica para los SUDS, existen algunas recomendaciones que hacen referencia a su uso, a pesar de no nombrar el término SUDS de manera explícita, tales como:

La sequía en España. Directrices para minimizar su impacto

El documento contempla directrices referentes a la captación. Drenaje y gestión de las aguas pluviales. Menciona también la necesidad de promover la implantación de este tipo de medidas mediante incentivos económicos.

Libro Verde de Medio Ambiente Urbano

En el libro verde se contemplan aspectos como la reducción tanto del sellado como de la impermeabilización de los suelos, así como los efectos beneficiosos de disponer cubiertas vegetales. También hace referencia a aprovechamientos de agua de lluvia y al establecimiento en los planes urbanísticos de unos valores mínimos con referencia a la permeabilidad del suelo. Estos son los puntos a destacar con referencia a los sistemas de drenaje urbano sostenible.

Tal y como ya se sabe, a nivel estatal, hasta el momento no se contemplaba en ningún momento la exigencia de plantear SUDS, lo cual ha cambiado muy recientemente, tras la publicación del RD 1/2016, el cual si exige la implementación de este tipo de tecnologías., tal y como se expone a continuación.

Real Decreto 1/2016, de 8 de enero, por el que se aprueba la revisión de los Planes Hidrológicos de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Occidental, Guadalquivir, Ceuta, Melilla, Segura y Júcar, y de la parte española de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Oriental, Miño-Sil, Duero, Tajo, Guadiana y Ebro.

En el artículo 44 de dicho documento, “Drenaje en las nuevas áreas a urbanizar y de las vías de comunicación”, se cita en su artículo primero textualmente (se expone debido a la gran relevancia del mismo en material legislativa, fortaleciendo la bases del cambio de paradigma ya mencionado): “Las nuevas urbanizaciones, polígonos industriales y desarrollos urbanísticos que pueden producir alteraciones en el drenaje de la cuaca o cuencas interceptadas deberán introducir sistemas de drenaje sostenible (uso de pavimentos permeables, tanques o depósitos de tormenta, etc.) que garanticen que el eventual aumento de escorrentía respecto del valor correspondiente a la situación preexistente puede ser compensado o es irrelevante.”: Tal y se puede apreciar, la importancia de dicho punto, radica en el hecho de la obligatoriedad referente a la implantación de tecnologías de drenaje sostenible.

- **Normativa autonómica y municipal**

ANM 2006\50 Ordenanza de Gestión y Uso Eficiente del Agua en la Ciudad de Madrid

En el documento se contemplan aspectos como el de la necesidad de gestionar las aguas provenientes de las escorrentías. También se contemplan aspectos como el de la implantación de superficies permeables en los nuevos espacios urbanos y la necesidad de favorecer la infiltración e impedir la compactación del suelo, por ejemplo en zonas ajardinadas, mediante la implementación de distintas tecnologías que permitan conseguir este fin.

Guía de criterios técnicos generales de la red de colectores en la ciudad de Barcelona.

En esta guía de referencia para la ciudad de Barcelona, publicada en septiembre del 2015, se hace referencia directa a los SUDS, estableciendo entre otras consideraciones hidráulicas e hidrogeológicas, la obligatoriedad de definir la titularidad de los SUDS, lo cual resulta de gran importancia, sobre todo a la hora del mantenimiento de los mismos.

ITOHG-SAN-1/4, Instrucción Técnica de Obras Hidráulicas, Técnicas de drenaje sostenible.

Es en esta esta normativa gallega donde se menciona de manera directa y como tal las Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible. En el documento se justifican las bases conceptuales y de cálculo, las cuales justifican los criterios recogidos en la norma para la implementación de Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible (TDUS).

Plan de Acción Territorial sobre prevención del Riesgo de Inundación en la Comunidad Valenciana (PATRICOVA)

A nivel de la Comunidad Valenciana, el PATRICOVA, en su actualización más reciente en el año 2015, también promueve la implantación de tecnologías de drenaje sostenible. Lo hace en el noveno punto del artículo 23, en donde se expone que “En el diseño de la Infraestructura Verde, se fomentará el uso de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible”.

Normativa para obras de saneamiento y drenaje urbano de la ciudad de Valencia

La ciudad de Valencia incluye en su normativa de saneamiento más reciente, publicada en el 2016, un punto destinado específicamente a los SUDS: “2.5. USO DE SISTEMAS DE DRENAJE SOSTENIBLE”, en el que se cita textualmente: “Los nuevos proyectos de urbanización incorporarán, en la medida de lo posible, medidas para fomentar la infiltración en las superficies...”

- **Normativa italiana**

UNI 11235 : 2007 “Verde Pensile: prestazioni di sistema e valore ecologico”

Dicha norma se centra principalmente en las características de los distintos elementos o capas que conforman los sistemas vegetados, apartando de manera general indicaciones sobre el rendimiento del sistema. La norma también puede servir como referencia para la realización de ensayos. Es muy útil por tanto desde el punto de vista del diseño.

UNI 11235 : 2015 “Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione, il controllo e la manutenzione di coperture a verde”

Esta norma substituye a la anteriormente expuesta. La nueva norma profundiza más sobre las cubiertas vegetadas, dando en este caso indicaciones referentes a la planificación, ejecución,



control y mantenimiento de los mismos, en función del contexto climático y del propio edificio donde se implanten.

4. CUBIERTA VEGETADA CASO DE ESTUDIO

El siguiente apartado se centra en la descripción del sistema de cubierta vegetada sobre el que versa el presente trabajo.

4.1. CONTEXTUALIZACIÓN

La cubierta vegetada estudiada se sitúa sobre uno de los edificios de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Bolonia, concretamente sobre la escuela de nueva construcción situada al norte de la ciudad (Figura 4.1) ya que se encuentra dividida en dos grupos de edificios, unos a las afueras y otro en el centro (sede histórica).



Figura 4.1. Emplazamiento del sistema de cubierta vegetada.

Gracias a una iniciativa del DICAM (Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali dell'Università di Bologna), del CIRI (Centro interdipartimentale ricerca industriale dell'Università di Bologna), del AUTC (Servizio tecnico di ateneo) y de la AUM (Azienda Agraria dell'Università di Bologna), nació el proyecto de la cubierta vegetada en la Universidad de Bologna (Bonoli & Cappellaro, 2013). Dicho proyecto consistió en la realización de una cubierta vegetada a escala real sobre la cubierta del laboratorio LAGIRN (Laboratorio di GeoIngegneria e Risorse Naturali), al igual que la creación de una segunda cubierta vegetada sobre la cubierta del laboratorio LIDR (Laboratorio di Idraulica). Concretamente la parte de la cubierta vegetada que abarca el presente estudio se sitúa sobre el laboratorio LAGIRN.



Figura 4.2. Vista panorámica del sistema de cubierta vegetada estudiado.

Las distintas dimensiones de los dos tipos de cubierta vegetada dispuestas es fruto de un estudio en el que se tuvo en cuenta la capacidad estructural de los edificios donde se han implantado, la exposición al sol, la geometría y la presencia de paneles solares sobre las cubiertas vecinas.

La totalidad del proyecto abarca un área de poco menos de 200 m^2 , divididos en 3 parcelas distintas e independientes, las cuales se han nombrado de la siguiente manera: Reference Roof (RR), Sedum Roof (SR) y finalmente Natural Roof (NR) (Figura 4.3).

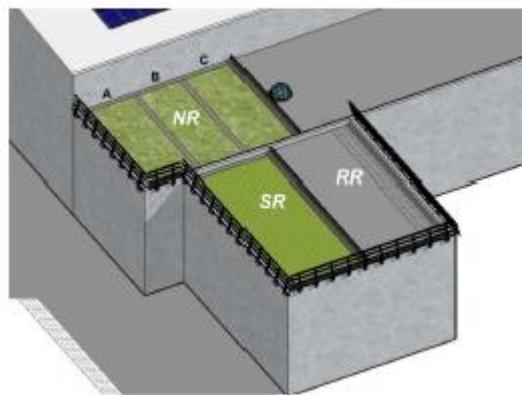


Figura 4.3. Render del sistema de cubierta vegetada con la distinción de parcelas.

La construcción de la cubierta vegetada tuvo una duración no superior a 2 meses, iniciándose en Junio del 2013 y finalizada a mitades del mes de Julio del mismo año. A partir del mes de agosto del 2013 se inició la campaña completa de monitorización, la cual se encuentra aún en funcionamiento en la actualidad.

La parcela donde se ubican las superficies SR y RR consta de una superficie total de 114 m^2 , constando de bajantes de agua de lluvia colocadas respectivamente sobre las esquinas al sur-este y al sur-oeste. Dada la regularidad de la superficie y la consecuente simetría respecto a los puntos de vertido, se decidió realizar la división de este cuerpo en 2 parcelas de igual superficie. Por otra parte la cobertura de la superficie donde se ubica el sistema NR es de 230 m^2 , de los

cuales la parte del sistema de cubierta vegetada caso de estudio abarca aproximadamente un tercio.

4.2. REFERENCE ROOF

Las principales características del RR vienen reflejadas en la Tabla 4.1. Principales características del sistema RR., ocupando una superficie total de 57 m^2 y contando con una pendiente constante del 0.5% en orientación de Noroeste a Sureste. La superficie se encuentra cubierta mediante una membrana de PVC con un espesor nominal de 2.0 mm , la cual resulta ser particularmente adecuada para realizar la función de impermeabilización en cubiertas planas accesibles, como es el caso de la cubierta donde se ha instalado.

Reference Roof (RR)	
Superficie	57 m^2
Perímetro	32.5 m
Pendiente	0.50%
Cobertura	Membrana bituminosa
Área verde	-
Vegetación	-
Riego	-

Tabla 4.1. Principales características del sistema RR.

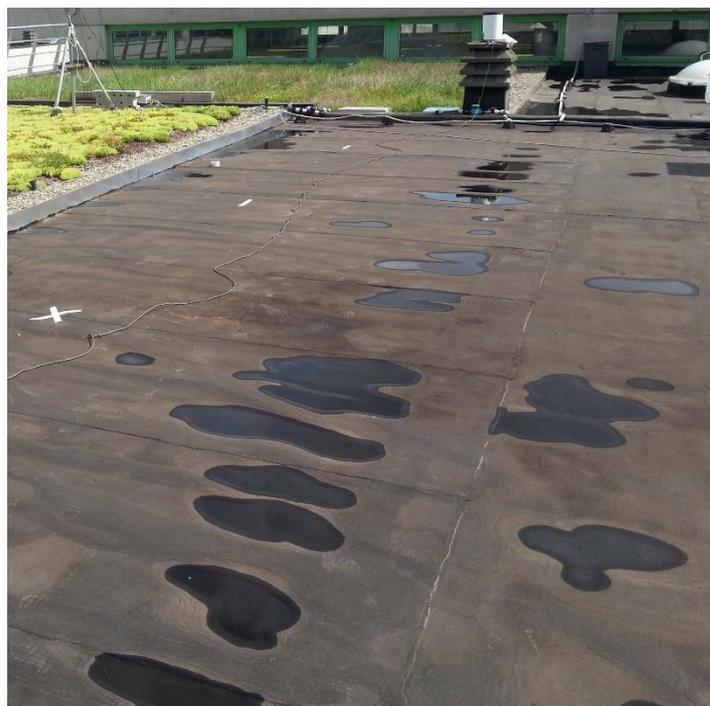


Figura 4.4. Vista de la parte del sistema de cubierta vegetada RR.

4.3. SEDUM ROOF

De igual manera se presentan en la Tabla 4.2. Principales características del sistema SR. las características principales de SR, la cual se presenta con un paquete *Verde pensile extensivo-Sistema Seic mediterranean Green roof* comercializado por SEIC Verde Pensile- Harpo Spa. El presente paquete, cuyos elementos constitutivos se encuentran descritos en apartados posteriores, se encuentra básicamente constituido por una membrana anti-raíces, un filtro de protección, un elemento de drenaje que a su vez cumple la función de acumulador de agua y aireación, un filtro de protección, junto con 10 cm correspondientes al sustrato y a una capa de vegetación, que en el caso del RF es de una mezcla de especies del género Sedum.

Sedum Roof (SR)	
Superficie	57 m ²
Perímetro	32.5 m
Pendiente	0.50%
Cobertura	Sistema Seic Mediterranean green roof
Área verde	47 m ²
Vegetación	Mix de Sedum
Espesor del sustrato	10 cm
Riego	Lluvia

Tabla 4.2. Principales características del sistema SR.



Figura 4.5. Vista del sistema SR en invierno (imagen izquierda) y en verano (imagen derecha)

4.4. NATIVE ROOF

Tal y como ya ha sido mencionado, la superficie total donde se ubica el sistema NR es de 230 m², de los cuales 72 m² han sido destinados a la construcción de dicha parte del sistema de cubierta vegetada.



Figura 4.6. Vista del sistema NR en verano (imagen derecha) vista en época invernal (imagen izquierda).

La peculiaridad del NR es que a su vez se divide en 3 superficies verdes de cerca de unos 19 m², dentro de cada una de las cuales ha sido implantada una versión modificada del paquete *Verde pensile extensivo- Sistema Seic Mediterranean green roof*. La modificación de la que se habla corresponde con la tipología de la cobertura vegetal empleada, junto al espesor del sustrato en cada una de las 3 áreas verdes. Se consideró por tanto oportuno emplear esta parte de cubierta vegetada (la denominada NR) para investigar sobre el comportamiento de la cobertura vegetal constituida por una mezcla de hierbas y leguminosas provenientes de las poblaciones silvestres locales.

Cada una de las distintas subparcelas existentes dentro del NR posee un espesor creciente la una respecto la otra, teniendo la primera de ellas un espesor de 8 cm, la segunda 10 cm y finalmente la tercera parcela un espesor de 12 cm.

Native Roof (NR)	
Superficie	72 m ²
Perímetro	34.8 m
Pendiente	0.50%
Cobertura	Sistema Seic Mediterranean green roof modificado
Área verde	3 subparcelas de 19 m ²
Vegetación	Mezcla de especies silvestres nativas
Espesor del sustrato	8-10-12 cm respectivamente
Riego	Lluvia y riego inicial

Tabla 4.3. Principales características del sistema NR.

Respecto al riego inicial que se contempla en la tabla anterior, se especifica en apartados posteriores las consideraciones oportunas con respecto a este tema, ya que han de tenerse presentes a la hora de realizar el modelo matemático del sistema.

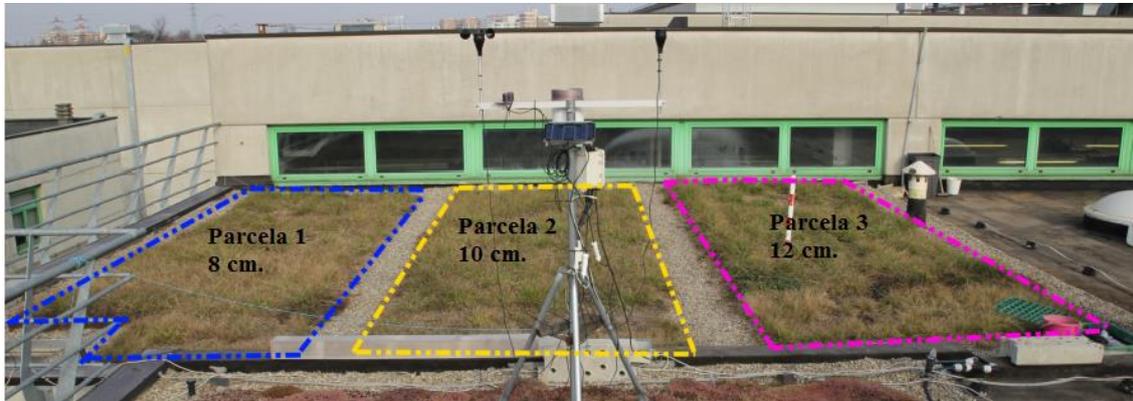


Figura 4.7. Distinción de las distintas parcelas del sistema NR.

4.5. ESTRUCTURA DE LA COBERTURA

Descrito el sistema de cubierta vegetal existente en las instalaciones de la Universidad de Bolonia, se procede a continuación con la descripción de la estructura de la cubierta referente a la parte del sistema caso de estudio, es decir, la cubierta NR.

Hay que destacar en primer lugar que los distintos componentes que conforman la cubierta vegetal han sido instalados según la configuración estándar que caracteriza las cubiertas de tipo extensivo, cuyas características han sido expuestas en el apartado 3.4. Se enumeran a continuación los distintos elementos que conforman el sistema, desde la parte inferior del mismo hacia arriba:

- Membrana impermeabilizante sintética anti raíces HarpoPlan ZD UV;
- Filtro de protección y acumulación Seic-MediPro MP 300;
- Elemento de drenaje, aireación y acumulación hídrico MediDrain MD 25;
- Tela filtrante MediFilter MF 1;
- Substrato SEIC para cubiertas vegetadas extensivos;
- Vegetación extensiva: especies locales

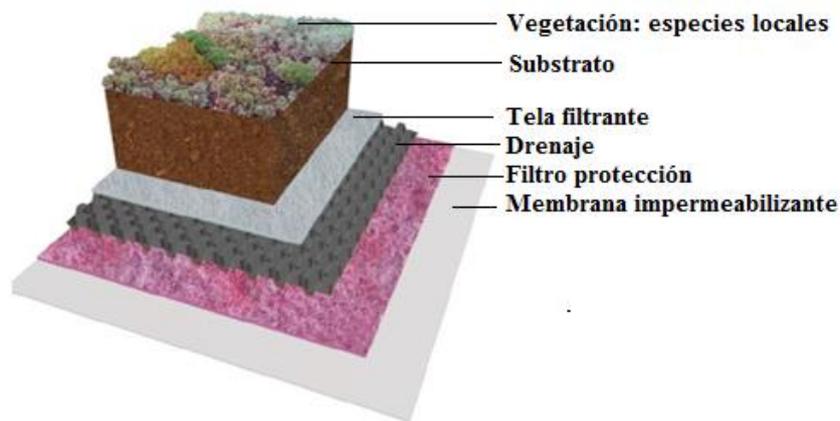


Tabla 4.4. Detalle del sistema NR, con independencia del espesor del sustrato.

De una manera más detallada se analizan a continuación cada uno de los elementos que conforman la cubierta vegetal.

- **Membrana impermeabilizante sintética anti raíces HarpoPlan ZD UV:** se trata de una membrana de PVC con un espesor nominal de 2 mm y reforzada con fibra de vidrio. Entre sus principales propiedades, según marca la norma EN 13948, se encuentra la de la resistencia a los microorganismos y a las raíces. Suministrada en rollos y soldada con aire caliente, la membrana fue instalada en Junio del 2013.



Figura 4.8. Fase de instalación de la membrana sobre la superficie NR.

- **Filtro de protección y acumulación Seic-MediPro MP 300:** se encuentra constituido por fibra de polipropileno, la cual realiza a su vez la función de protección mecánica y acumulación hídrica. El filtro se colocó sobre la cubierta buscando de esta manera el asegurar la superposición de al menos 10 cm entre una hoja y la sucesiva. El filtro viene doblado lateralmente sobre rejilla metálica que tiene la función de garantizar una mayor protección de la funda. El fieltro, fabricado con materiales reciclados, no debe exponerse directamente a los rayos UV para evitar pérdida su funcionalidad.

- Elemento de drenaje, aireación y acumulación hídrico MediDrain MD 25:** tiene como función primaria la de elemento de drenaje, es decir, remover rápidamente el exceso del agua en la cubierta. A la función primaria se le añade una secundaria, como es por ejemplo la función de acumulación hídrica y la de aireación del sustrato. El elemento de drenaje MediDrain MD 25 es una fina lámina de poliestireno modelado por termo fusión como un elemento tridimensional que contiene vasos de pequeñas dimensiones, los cuales sirven como elementos de almacenamiento y de canales para la conducción del agua. Las características geométricas del presente elemento han sido estudiadas minuciosamente a modo de garantizar un amplio sistema de canales de drenaje sobre la cara inferior y exterior para la difusión de la presión de vapor y la propia aireación. Por otra parte tal y como ya se ha mencionado, también cumplen la función de acumulador hídrico, cuya capacidad de acumulación es proporcional al tamaño de sus elementos. Por otra parte, el material del que se encuentra constituido el elemento es prácticamente impermeable, el agua por tanto lo puede atravesar exclusivamente a través de los elementos de ventilación o por medio de las articulaciones de solapamiento entre hojas. Se puede afirmar por tanto que el flujo del agua de lluvia se lleva a cabo en paralelo al sustrato con velocidades variables en función de la carga hidráulica. Las dimensiones de las cavidades de los elementos de drenaje utilizados en la cubierta fruto de estudio, son aquellas que garantizan un volumen de acumulación de agua aproximadamente del 3 l/m² y un volumen de llenado de aproximadamente 10 l/m² en 2,5 cm de espesor.
- Tela filtrante MediFilter MF 1:** La tela filtrante presenta la función principal de impedir la obstrucción del elemento de drenaje por la parte del sustrato o las raíces. La tela filtrante MEDIFILTER MF 1 se encuentra constituida de una fina capa de 0.47 mm compuesta por un geotextil gris en fibra de alambre soldado de polipropileno.



Figura 4.9. Filtro de protección y acumulación (conjunto del paquete Seic). En orden ascendente se encuentra la membrana ZD UV, el filtro Seic-MediPro MP 300, el elemento MediDrain MD 25 y la tela filtrante MediFilter MF 1.

- **Substrato SEIC para cubiertas vegetadas extensivas:** El substrato SEIC se presenta como el medio poroso sobre el cual se produce el crecimiento de las raíces de las plantas dispuestas. El substrato por otro lado, es el material que mayor influencia tiene sobre los fenómenos hidrológicos que suceden en la cubierta vegetada. Se encuentra constituido por una mezcla de minerales (entre los que se distinguen minerales como la piedra pómez, lapilli volcánica y zeolite, al igual que materia orgánica, como la turba y residuos vegetales compostables. Para evitar que con el tiempo, debido a fenómenos de descomposición, se presenten reducciones en el espesor del sustrato, los porcentajes de sustancia orgánica son más bajos que el 2-4%. El pH es aproximadamente igual a 7, mientras que la capacitancia de intercambio catiónico es aproximadamente de 20 meq/100.

4.6. PROPIEDADES DE LA VEGETACIÓN

Sin duda alguna, tanto la cobertura vegetal como la selección de la tipología de la vegetación de la que se componen las cubiertas vegetadas, se considera la pieza clave en el buen funcionamiento de los mismos, tal y como afirma (Dvorak & Volder, 2010), donde se expone que se trata del parámetro de diseño de la cubierta vegetada más crítico. La tipología de especies a disponer se hace en función de tres factores principales: en primer lugar en función de las características climáticas de la zona donde se dispone la cubierta vegetada, por otro lado en función del espesor del substrato y, finalmente en función del nivel de mantenimiento contemplado o tolerado.

La situación de la ciudad de Bolonia se caracteriza por poseer un clima sub-mediterráneo, en el cual se distinguen periodos áridos en los meses de verano, menos acentuados que si se encontraran en un clima mediterráneo estricto, pero se mantiene presente y limitante para la supervivencia de las especies vegetales, y un periodo invernal frío, en el cual la temperatura nocturna puede descender en ocasiones de los 0 °C, y en donde se pueden presentar episodios de nieve con relativa facilidad. Para tales condiciones climáticas, y más teniendo en cuenta el limitado número de espesores disponible (8, 10 y 12 cm), fueron seleccionadas, en cooperación con el DIPSA (Departamento de Ciencias Agrícolas) de la Universidad de Bolonia, las distintas especies vegetales que la selección natural ha hecho aptas para poder sobrevivir en los ambientes sujetos a condiciones de moderada humedad en verano y bajas temperaturas durante los periodos invernales.

Hasta el momento, casi la totalidad de especies vegetales seleccionadas a la hora de implantar una cobertura vegetal de tipo extensivo en climas similares al de la zona de estudio, se

implantaba una mezcla de especies Sedum, tal y como se ha hecho en la parte del sistema de cubierta vegetada SR. La implantación de este tipo de cobertura es debida mayormente a la gran capacidad que tienen para poder sobrevivir en ambientes, y a la ya comprobada eficiencia que presentan en cuanto a la reducción de la escorrentía. Como es sabido, la cubierta piloto de la universidad pretende investigar la idoneidad de disponer especies vegetales autóctonas, las cuales se implantan en la superficie correspondiente con NR, donde tras un proceso de selección realizado por el DIPSA, se decide implementar una mezcla de tres especies provenientes de pastizales semiáridos. Las especies seleccionadas provenientes de praderas semiáridas son las siguientes:

- Bromus erectus (Gramínea)
- Lotus corniculatus (Leguminosa)
- Dorycnium pentaphyllum (Leguminosa)

Dichas especies son características en el territorio de la región donde se sitúa la cubierta vegetada. El *Bromus erectus* (Figura 4.10) es una especie perenne de la familia de los Poaceae. Las raíces pueden llegar hasta los 60 cm de profundidad, pudiendo llegar el conjunto integral de la planta a alcanzar alturas comprendidas entre 40 y 120 centímetros. Se compone de tallos fuertes y rígidos, con 3 o 4 nudos. Presenta la línea de base de color verde amarillento o gris y verde. Las hojas superiores son generalmente planas y poco peludas. Las inflorescencias crecen en panículas de 10-25 cm de altura en posición vertical, siendo su color característico el violeta, rojo o verde. Por norma general, estas especies crecen de manera natural en los suelos calcáreos europeos, Asia sudoriental y África noroccidental.



Figura 4.10. *Bromus erectus*.

El *Pentaphyllum dorycnium* (Figura 4.11) es una planta herbácea con tallo leñoso dotada de ramas erectas o ascendente. Las hojas, con 5 segmentos casi iguales entre sí, se insertan casi directamente en el vástago y son pubescentes. Las flores son pequeñas, tienen una corola blanca y papilionácea y son usados en umbelas. El fruto es en cambio una verdura sin pelo. Crece principalmente en praderas con suelos calcáreos. El tiempo de floración es de mayo a julio. Se distribuye ampliamente en todo el territorio nacional.



Figura 4.11. Pentaphyllum dorycnium

El *Lotus corniculatus* (Figura 4.12), conocido por el nombre de Ginestrino, pertenece a la familia Fabaceae. Es una hierba perenne y curvada en la base, con una altura comprendida entre los 10 y los 30 cm. Las hojas se dividen en tres hojas romboidales. Las flores presentan un color amarillo. Las legumbres, delgadas y cilíndricas, son de color marrón. El Lotus es nativo del Viejo Mundo (Europa, Asia y África del Norte), pero hoy en día también se ha naturalizado en América del Norte y otras partes del mundo. En Europa se encuentra presente en todos los países. Esta planta es una importante fuente de néctar para muchos insectos.



Figura 4.12. Lotus corniculatus.

Las semillas de las tres especies dispuestas fueron tomadas de manera directa de la naturaleza, concretamente del Parque Regional del “Monte Sole”. Dichas semillas fueron cultivadas en el

vivero de la Universidad Agraria de la Universidad de Bolonia (AUB). La Figura 4.13 muestra la fase de siembra de las plantas, las cuales habían crecido en pequeños cuencos y fueron trasladadas a la escuela de Ingeniería, implantándose las mismas el 12 de julio del 2013.

Dadas las particularidades de la fecha de implantación, se tuvo que realizar una serie de riegos diarios durante la totalidad del periodo estival, para de esta manera hacer posible que las raíces arraigaran de manera correcta sobre el sustrato del suelo. A posteriori el riego se fue ralentizando hasta que finalmente se suspendió, adaptando progresivamente de esta manera la instalación a las condiciones lo más similares a las naturales posible.



Figura 4.13. Proceso de siembra de la cobertura NR.

4.7. PROPIEDADES DEL SUELO

Al igual que sucede con la cobertura vegetal, las propiedades del suelo a disponer en el conjunto de la cubierta vegetada tienen una gran importancia, ya que son estas propiedades las que condicionan la respuesta hidrológica de la cubierta en gran parte. Aunque queda fuera del objeto del presente estudio, se pretende dar una visión general de dichas propiedades, las cuales se obtuvieron de manera experimental por el DICAM y por el DIPSA.

Cabe destacar la obtención de la curva granulométrica en un total de dos muestras distintas, como lo son una muestra original del suelos y otra muestra del suelo tomada de la propia cubierta después de un año de instalación del mismo, destacando como a pesar de tomar la muestra un año después, las dos muestras presentan una curva granulométrica similar.

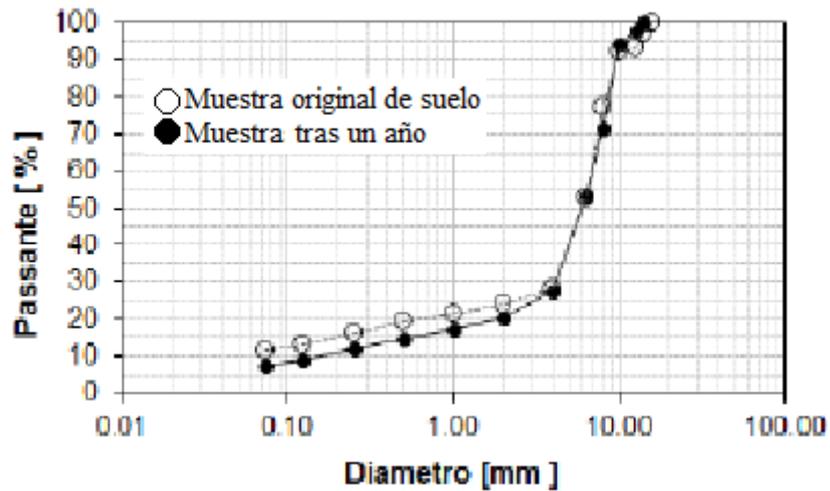


Figura 4.14. Comparación entre curvas granulométricas (gráfico proporcionado por el DICAM)

Otro parámetro importante calculado es el peso específico real, obteniendo en laboratorio un valor $\gamma_r = 26.5 \text{ kN/m}^3$.

Por otro lado se obtuvo una porosidad media del sustrato igual al 60%, lo que representa un volumen de poros muy elevado.

Finalmente cabe destacar la obtención tanto de la curva de retención como la curva de conductividad hidráulica (Figura 4.15 y Figura 4.16) las cuales representan las propiedades más importantes del suelo, en el contexto del presente estudio y las cubiertas vegetadas en general.

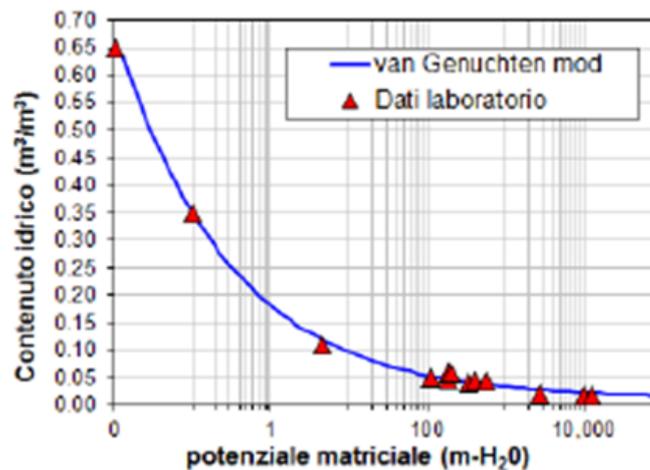


Figura 4.15. Curva de retención (Cipolla, 2015)

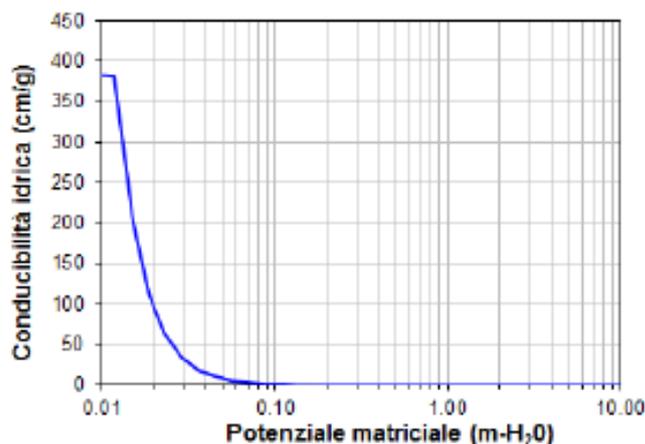


Figura 4.16. Curva de conductividad hidráulica (Cipolla, 2015)

La curva de retención es la herramienta que permite la determinación de dos parámetros muy importantes del sustrato como son la Capacidad de Campo y el Punto de Marchitez. La capacidad de campo representa básicamente el contenido de agua o de humedad el cual puede retener el suelo tras su saturación o después de haber sido mojado con abundancia y dejado drenar a posteriori, evitando las pérdidas por medio de los fenómenos de evapotranspiración hasta que finalmente el potencial hídrico del suelo se estabiliza. EL punto de marchitamiento en cambio, representa el punto de humedad mínima en el cual una especie vegetal ya no puede continuar extrayendo agua del sustrato y por tanto no puede recuperar la pérdida hídrica, a pesar de que la humedad ambiental pueda encontrarse saturada. Tras la realización de las diversas pruebas realizadas por el DICAM, finalmente fue posible cuantificar la Capacidad de Campo, con un valor del 35 % v/v (a pF1), y el Punto de Marchitamiento Permanente, con un resultados de 0.06 % v/v (a -1.5 MP).

4.8. SISTEMA DE RIEGO

A pesar de que se describe de manera muy breve, resulta muy importante realizar algunas matizaciones sobre el ya mencionado en anteriores apartados, sistema de riego existente.

La totalidad de la superficie destinada al NR se encuentra equipada con un sistema de riego a la lluvia (programable pero no controlable a distancia), el cual se utiliza durante el periodo de verano posterior a la instalación (junio-agosto de 2014) de acuerdo con las indicaciones que se muestran siguiente tabla.

Periodo	Duración (min./día)	Vol. Riego (l·m ² /día)
22 Mayo - 7 Julio	10	3.3
8 Julio - 9 Agosto	5	1.6
9 Agosto - 25 Agosto	10	3.3

Tabla 4.5. Funcionamiento del riego sobre la cobertura vegetal NR.

El objetivo del riego descrito no es otra que la de fortalecer y asegurar el correcto crecimiento de las especies vegetales dispuestas en la cobertura NR, ya que por un lado las condiciones climáticas del momento de la implantación no eran las óptimas, y por otro lado, no se tenía experiencia alguna en la realización de cubiertas vegetadas con este tipo de cobertura vegetal.

La importancia de remarcar la existencia de riego en el sistema NR viene justificada fundamentalmente por los siguientes factores.

- Dado que se ha mencionado repetidas veces que el sistema de cubierta vegetada de la Universidad de Bolonia es un sistema extensivo, por definición del mismo, no se necesita mantenimiento ni tampoco un sistema de riego, ya que el mismo se basta de la propia agua de lluvia. El sistema de riego ya se sabe por tanto que se utiliza únicamente en la fase de adaptación de la cobertura vegetal.
- El caudalímetro existente en el punto de aforo del sistema NR no diferencia si las lecturas que realiza son debidas a un episodio lluvioso o a uno de riego, por tanto hay que tener localizado y cuantificado el periodo de riego, el cual puede llegar a servir para la validación final del modelo matemático.

Cabe mencionar que, con la misma finalidad con la que se realizan las labores de riego, además se realizaron otras prácticas, como fueron la fertilización (mayo de 2014) y la siega (3 veces al año).



5. SISTEMA DE MONITORIZACIÓN

Parte muy importante en el conjunto del sistema de la cubierta vegetada es la implementación de un correcto y eficiente sistema de monitorización, ya que entre muchas otras cosas, es el que proporcionará los datos necesarios para proceder con la calibración y validación del modelo matemático a realizar.

El sistema de monitorización dispuesto ha estado seleccionado con la colaboración de la Universidad de Columbia y en particular con el grupo *Green roofs*. Se conforma por distintos aparatos, como los destinados a la medida de las variables meteorológicas y los referentes a la medida de la escorrentía, así como sondas de medida del contenido volumétrico del agua en el sustrato, termopares y termómetros para la medida del perfil vertical de temperaturas y por último los necesarios para realizar algunas observaciones termográficas.

5.1. ESTACIÓN METEOROLÓGICA

Para el control y medida de los distintos parámetros meteorológicos se ha dispuesto de una estación meteorológica Onset Hobo U30 (Hobo), la cual se puede apreciar en la Figura 5.1. La misma fue instalada en agosto del 2013 sobre la superficie destinada al SR.



Figura 5.1. Estación meteorológica Onset Hobo U30.

La estación es capaz de adquirir datos cada segundo, procesarlos cada 5 minutos y transmitirlo por medio de un sistema Wi-Fi al servicio Onset Hobolink, por medio del cual los datos son visualizados en línea con actualizaciones horarias.

La estación Hobo se encuentra dotada de un pluviómetro de báscula caracterizado por tener una precisión del $\pm 1.0\%$ por encima de los 20 mm/h, con una temperatura entre los 0 y los 50°C. El pluviómetro se caracteriza por tener una sensibilidad de 0.2 mm. (esta característica del pluviómetro se analiza detenidamente en apartado 7.2.1, para la correcta interpretación de los datos)

Para la medición del contenido volumétrico del agua en el suelo, se utilizan 2 sondas capacitivas para instalaciones superficiales ECH₂O de Decagon que miden la constante dieléctrica del suelo, la cual es directamente proporcional con el contenido volumétrico del agua en el mismo (θ). Los sensores capacitivos de superficie se encuentran formados por dos electrodos de varilla que son insertados en el terreno y los cuales tienen el mismo principio de funcionamiento que las sondas capacitivas del tipo TDR para instalaciones profundas. A causa de la diversa composición mineralógica del suelo y de la diversa densidad o tésitura, la precisión del instrumento se encuadra en torno al $\pm(3-4)\%$. Sin embargo, dadas las características no convencionales del sustrato, se optó por efectuar una oportuna calibración de las sondas con el propósito de mejorar la correspondencia entre los valores medidos y las propiedades del sustrato. Las sondas capacitivas se encuentran directamente conectadas a la estación meteorológica y, también en este caso, hay una adquisición de datos cada segundo que viene recogida cada 5 minutos y posteriormente memorizada. La estación meteorológica está capacitada para medir otros parámetros meteorológicos tales como la dirección y la velocidad del viento, la temperatura del aire, la irradiación solar, la humedad relativa, el punto de rocío, y la radiación fotosintéticamente activa (photosynthetically active radiation, PAR).



Figura 5.2. Sondas capacitivas.

5.2. MEDIDA DE LA ESCORRENTÍA

Para realizar las medidas correspondientes con la escorrentía, se han utilizado diversos sensores, desarrollados en los laboratorios de la Universidad de Columbia, los cuales se conectan al data logger presente en la estación Hobo. Los diferentes instrumentos utilizados se componen de un tubo circular dotado en la extremidad de un vertedero triangular con un ángulo de 20°. En el interior del tubo circular se encuentra contenido un sensor Senix TSPC-30S1 por ultrasonidos que mide la altura de la lámina de agua que se forma dentro del dispositivo con una precisión de 0.086mm. Al aumentar el flujo de agua, en nivel de la misma aumenta y por tanto el sensor empieza a medir la variación de la superficie libre, lo cual transforma en un incremento de voltaje. Tales dispositivos funcionan para temperaturas comprendidas entre los 0 y los 70°C y fueron calibrados para flujos de agua que pueden oscilar entre el rango de 0.005-2.5 l/s. Los sensores fueron calibrados por primera vez en los laboratorios de la Universidad de Columbia y una segunda vez en el laboratorio LIDR de la Universidad de Bolonia apenas antes de su instalación. La calibración se realizó disponiendo los sensores en condiciones similares a las de campo y posteriormente registrando contemporáneamente los valores de la escorrentía medidos y el correspondiente voltaje.



Figura 5.3. Medidor de escorrentía en fase de instalación.

Una vez descargados los datos en el data logger, los valores de voltaje vienen convertidos en flujo de agua mediante una ecuación de calibración establecida. La normalización de estos datos respecto el área drenada permite la determinación de la altura de la escorrentía en los 5 minutos del intervalo considerado.

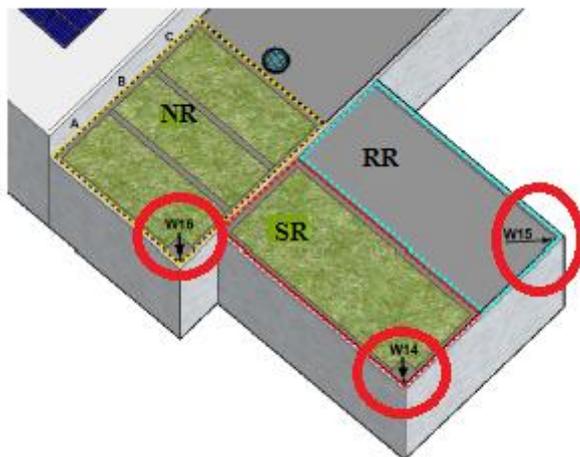


Figura 5.4. Posición de los distintos aparatos de medida de la escorrentía.

Los medidores de flujo demostraron ser unos instrumentos idóneos para la medida de bajos caudales. Sin embargo las reducidas dimensiones de los vertederos, determinaron la necesidad de un mantenimiento periódico para la eliminación de las hojas y otros materiales que causan alteraciones en la toma de datos.

5.3. MEDIDA DE LA TEMPERATURA

La adquisición de los datos referentes a la temperatura se realiza mediante el análisis de las imágenes termográficas por infrarrojos, con la ayuda de 8 termopares y de dos sondas de temperatura. Dicha adquisición de datos se realiza mediante una termo cámara modelo FLUKE TIR 400, con alta resolución y cuyas principales características técnicas son las de operar en el espectro de los infrarrojos de los $7.5 \mu\text{m}$ a los $14\mu\text{m}$ (onda larga) y en el intervalo de temperaturas comprendidas entre los -20°C y los 1200°C con una precisión de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ o del 2%. Las tomas panorámicas de la cubierta vegetada se realiza mediante el empleo de una amplia lente angular de infrarrojos adicional con una resolución de 2.62 mRad . La Figura 5.5 muestra, a modo de ejemplo, dos tomas panorámicas mediante las cuales se pueden apreciar las grandes diferencias de temperatura existentes entre la vegetación de la cubierta vegetada NR y la membrana bituminosa adyacente, y entre las 3 parcelas del sistema NR de manera simultánea.

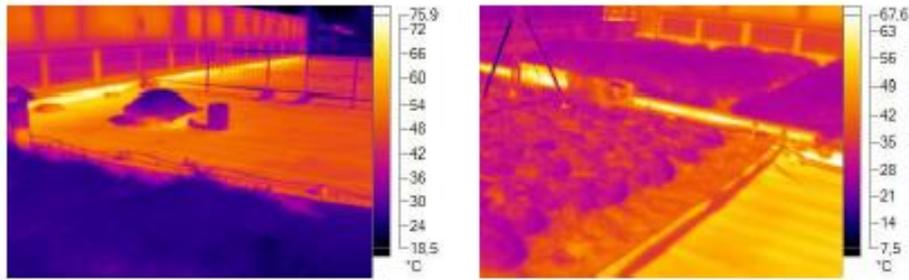


Figura 5.5. Imágenes termográficas de la cubierta vegetada a finales del mes de Octubre del 2014 (DICAM)

A partir del mes de Octubre del 2014 se prefirió adquirir en continuo los datos de temperaturas mediante el uso de termopares.



Figura 5.6. Termopares instalados sobre la superficie NR.

Los termopares se encuentran constituidos por dos conductores de distinta naturaleza y soldados en los extremos, en los cuales, cuando son sometidos a un gradiente de temperatura, se establece una diferencia de potencial. La tensión que se va a medir se conoce como la fuerza electromotriz Seebeck. En este caso los termopares fueron calibrados en el Laboratorio de física técnica del DIN (Departamento de Ingeniería Industrial) de la Universidad de Bolonia. Los termopares se encuentran conectados a un data logger que permite la adquisición y memorización de una dato cada minuto. Los termopares se colocan sobre las distintas parcelas y posicionados en diferentes alturas mediante la ayuda de varillas graduadas con el fin de reconstruir el perfil vertical de temperaturas.



6. MODELO MATEMÁTICO DE LA CUBIERTA VEGETADA CASO DE ESTUDIO

Para realizar el análisis del comportamiento hidráulico de conjunto de la cubierta vegetada, se realiza el modelo matemático del sistema. El conjunto completo de cubierta, tal y como ya se ha expuesto, se encuentra formado por las coberturas RR, SR y NR, donde las dos primeras ya fueron modeladas y calibradas durante los trabajos realizados por (Cipolla, 2015). Se ha continuado el trabajo de modelación en base al software empleado en el trabajo anterior, pero en su versión más actualizada, es decir SWMM 5.1 de la EPA. Esta versión de SWMM incorpora, además de la modelación de la escorrentía urbana, un módulo específico que permite la modelación de los SUDS, el cual toma el nombre de módulo LID (Low Impact Development).

6.1. CONSIDERACIONES PREVIAS

Previo a la conceptualización del modelo matemático, es necesario realizar un análisis de diversos aspectos los cuales tienen relación directa con la propia modelación a realizar, especialmente en la tipología de simulación a realizar. Por ello, en los siguientes apartados se analiza cada una de las consideraciones tenidas en cuentas, haciendo en todo momento una revisión de la literatura científica al respecto y llegando a una serie de conclusiones, para tener finalmente clara la tipología y modo de proceder en las simulaciones a realizar (lo cual influye directamente en los resultados obtenidos tal y como posteriormente se verá). El realizar las siguientes consideraciones, por otro lado, también resulta útil a la hora de interpretar los distintos resultados obtenidos tras la realización de las diversas simulaciones.

6.1.1. OBSERVACIONES HIDROLÓGICAS

El parámetro más investigado en la literatura científica a nivel internacional, el cual viene siendo considerado como el mejor indicador de las prestaciones hidrológicas de una cubierta vegetada, es su capacidad de retención o el volumen que se retiene en el paquete respecto al volumen de precipitación. Por otra parte la atenuación y el retardo del pico del hidrograma de escorrentía representan otros de los indicadores prestacionales de una cubierta vegetada.

Numerosos son los artículos ya publicados los cuales permiten obtener una visión general de las prestaciones de las cubiertas vegetadas, en función de la pendiente de la cubierta, el tipo de substrato, la vegetación empleada, así como el clima donde se encuadran las cubiertas y la

duración de la precipitación, entre otros factores (Berndtsson, 2010), (Carson, et al., 2013); (Palla, et al., 2010), (Razzaghmanesh, et al., 2014), (Stovin, et al., 2012), (Wong & Jim, 2014).

De manera general, los distintos artículos que han sido publicados hasta el momento, pueden ser clasificados en dos grandes grupos: los que hacen referencia a resultados obtenidos mediante modelos a escala reducida y los que lo hacen en base a los resultados obtenidos sobre modelos de cubierta vegetada a escala real.

En cuanto a la retención estimada mediante el empleo de modelos físicos a escala reducida del tipo extensivos, varía del 30 al 86% (Getter, et al., 2007), (Morgan, et al., 2013), (Nardini, et al., 2012), (Schroll, et al., 2011), (Stovin, et al., 2012), (Wong & Jim, 2014). Realizados los diversos estudios sobre los modelos físicos a escala reducida, ha sido demostrado que la retención aumenta al aumentar el espesor del substrato (VanWoert, et al., 2005), así como la disminución de la pendiente que caracteriza la cubierta vegetada (Getter, et al., 2007), (VanWoert, et al., 2005). Por otra parte la retención no es constante durante todo el año, sino que varía en función del clima al que se encuentre expuesta la cubierta vegetada (Schroll, et al., 2011).

Tal y como se desprende de lo anteriormente mencionado, se presentan diversos rendimientos en función de la estación del año, de donde se ha demostrado que la influencia de la vegetación en periodos invernales es mínima, mientras por el contrario en los periodos estivales, a causa de los procesos de evapotranspiración, se encuentra como uno de los factores más influyentes en el rendimiento de la cubierta vegetada. Este hecho ha sido verificado a través de distintas observaciones realizadas durante todo el año en parcelas donde se disponía tanto de la vegetación típica de una configuración estándar extensiva, por otro lado de vegetación media y finalmente de ninguna vegetación.

(Carson, et al., 2013) presenta una publicación donde se recogen tanto las características geométricas principales, la duración de las observaciones y los resultados obtenidos de distintas cubiertas vegetadas estudiadas en diversos países del mundo. Las cubiertas analizadas a escala real, presentan superficies comprendidas entre los 13 y 7000 m², con espesores del substrato variables entre los 50 y 200 mm, y finalmente condiciones climáticas muy diversas. Los valores de retención medidos varían entre el 12 y el 76.4%.

En cuanto a la retención de la cubierta, ya sea medida en un modelo a escala reducida o uno a escala real, se encuentra directamente relacionada con la definición del evento pluviométrico

(Stovin, et al., 2012) mantiene que la reducción del tiempo seco (ADWT) se corresponde con una reducción de la retención de la cubierta vegetada. Por el contrario, aumentando el ADWT que define el evento, se corre el riesgo de que los pequeños eventos se engloben en los eventos vecinos.

(Carter & Rasmussen, 2006) encuentra durante sus investigaciones la existencia de una relación inversa entre la intensidad de la lluvia y el porcentaje de lluvia retenida, es decir, a mayores intensidades de lluvia menores retenciones se producen en las cubiertas vegetadas. La relación anteriormente mencionada ha sido verificada a posteriori en numerosos estudios realizados (Carson, et al., 2013), (Fioretti, et al., 2010), (Speak, et al., 2013), (Stovin, et al., 2012).

Por otra parte es importante destacar que durante un evento meteorológico, los mecanismos clave que regulan los procesos hidrológicos de las cubiertas vegetadas son la lluvia capturada por la vegetación, los procesos de acumulación e infiltración en el sustrato y el drenaje. Finalmente, el volumen de agua que el sistema no puede retener es el considerado como salida o escorrentía (Stovin, et al., 2012). Sin embargo, los volúmenes retenidos en el sustrato son desprendidos a la atmósfera debido a los procesos de evapotranspiración.

(Yang, et al., 2015) expone que las causas que generan la escorrentía en las cubiertas vegetadas son principalmente dos: la saturación del sustrato y la superación de la capacidad de infiltración de la cubierta.

6.1.2. MODELACIÓN DEL DECAIMIENTO DE LA HUMEDAD DEL SUELO EN TIMEPO SECO

La evapotranspiración es el proceso físico mediante el cual se produce un intercambio de manera lenta y gradual de un estado líquido a otro gaseoso, una vez se adquiere la energía necesaria para superar la tensión superficial. Los diferentes estudios existentes a día de hoy referentes a la modelación de los procesos de evapotranspiración en las cubiertas vegetadas, se puede considerar que son más bien reducidos (Berretta, et al., 2014), (Stovin, et al., 2013). Los dos estudios basan sus consideraciones sobre una campaña experimental continua y detallada, pero no de aplicación en un modelo a escala real, sino sobre un modelo en escala reducida sobre elevado con respecto a la altura de la cubierta vegetada, y por tanto en contacto directo con el aire no solamente en la interfaz atmosfera-vegetación, sino también en la parte inferior del paquete del firme.

Los vacíos existentes en cuanto a publicaciones en el campo de la modelación de la evapotranspiración en las cubiertas vegetadas es lo que motiva la investigación en este campo (Cipolla, 2015) en analogía a lo hecho con (Berretta, et al., 2014). El estudio realizado por (Cipolla, 2015) se centra en el análisis de la variación del contenido de humedad en el suelo en tiempo seco y en la posibilidad de modelar esta variación con un simple modelo hidrológico basado en el balance hídrico, sobre la estimación de la evapotranspiración potencial ETp y sobre una función de extracción de la humedad del suelo.

En cuanto al balance hídrico, el mismo viene descrito usualmente por la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = P - R - ETr$$

en donde $\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$ representa la variación del contenido volumétrico del agua en el suelo, P , R y ETr corresponden respectivamente con el volumen de precipitación, el volumen agotado y el volumen perdido por la evapotranspiración. Focalizando para un periodo en tiempo seco es posible obviar los términos que hacen referencia a la precipitación y a las salidas.

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = ETr$$

Expresando la evapotranspiración real en función de la ETp y de la función SMEF propuesta por (Zhao, et al., 2013) y como precedentemente se hizo por parte de (Stovin, et al., 2013).

$$ETr = ETp \cdot \frac{\theta}{\theta_{FC}}$$

Las formulaciones utilizadas para la estimación de la ETp son múltiples (Zhao, et al., 2013), basándose algunas de ellas en métodos experimentales, y otras derivadas directamente de la ecuación de (Penman, 1948). En el estudio realizado por (Cipolla, 2015) la ETp se encuentra determinada mediante la formulación de FAO-56

La formulación de Hargreaves (Hargreaves & Samani, 1985) implica que la determinación de la ETp diaria respecto a una superficie vegetada estándar únicamente es función de un parámetro climático, en este caso la temperatura, y de la radiación solar neta, la cual viene estimada en función de la latitud y el día del año. Se trata de una formulación muy sencilla la

cual en el transcurso de los años ha tomado fuerza al necesitar de un número reducido de parámetros, como son la temperatura máxima y mínima diaria y la latitud.

$$ETp = 0.00023 \cdot RA \cdot \sqrt{TD} \cdot (T + 17.8)$$

en donde RA representa la radiación solar extraterrestre, la cual debe ser expresada en las mismas unidades que la ETp . Por otro lado TD representa la diferencia entre la temperatura máxima y mínima mensual y finalmente T que representa la temperatura del aire, expresada en °C. (Zhao, et al., 2013) afirman que la ecuación es particularmente idónea para la estimación de la ETp en climas aridos y semi-áridos o en las superficies herbáceas. El modelo FAO-56 Penman-Monteith (Allen, et al., 1998) es el modelo recomendado por la FAO y la World Meteorological Organization (WMO) para la estimación de la ETp respecto a una superficie caracterizada por una cobertura vegetal estándar.

$$ETp = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

donde ETp representa la evapotranspiración de referencia (mm/día), R_n representa la radiación neta sobre la superficie vegetada ($M J m^{-2}d^{-1}$) estimada a partir de la radiación global, G hace referencia a la calor en el suelo ($M J m^{-2}d^{-1}$), T expresa la temperatura del aire (°C), u_2 por otro lado expresa la velocidad del viento (m/s) a 2 metros del propio suelo, $(e_s - e_a)$ expresa el déficit de saturación (kPa), Δ representa la pendiente de la curva de presiones ($kPa/°C$) y finalmente γ hace referencia a la constante psicométrica ($kPa/°C$).

La presente ecuación viene reconocida a nivel internacional como la ecuación capaz de determinar la ETp respecto a una superficie de referencia sin contemplar ni el clima ni región de referencia (Allen, et al., 1998). Una vez determinada la ETp mediante las dos formulaciones anteriormente expuestas se integran en el modelo en el cual las condiciones iniciales de humedad del suelo vienen fijadas igual al dato medido al inicio de cada serie de tiempo seco analizada. La ETp se calcula utilizando los parámetros meteorológicos medidos en la estación meteorológica, siendo estos las temperaturas máximas y mínimas diarias, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. La ETp se asume igual a la ETp dividida por 24 horas. Dicha simplificación no permite la modelación de las variación diaria pero las diferencias en periodos extendidos no son significativas.

Tras la finalización de los estudios realizados por (Cipolla, 2015) se pueden extraer diversas conclusiones. En la primera del estudio realizado, donde se analizan los resultados de la campaña de monitorización, donde se muestra que el contenido de agua almacenado en el sustrato se encuentra caracterizado por fluctuaciones cíclicas diurnas, causadas por la alternancia día y noche a la que corresponde variaciones de la radiación solar y de la temperatura. Tras el análisis de los datos se observa que la amplitud de las oscilaciones no resulta constante en el tiempo, sino que varía, aparte de con los parámetros meteorológicos, con el contenido inicial de agua y con el estado vegetativo de las plantas. A igualdad del contenido inicial de agua las fluctuaciones diarias resultan fuertemente influenciadas por el estado vegetativo de las plantas, obteniendo los valores máximos en la fase reproductiva primaveral y estival y disminuyendo progresivamente hasta alcanzar los valores mínimos en la fase de senescencia invernal. En la segunda parte del trabajo, los datos medidos se comparan con los resultados obtenidos a partir de un primer modelo a partir del cual se estima la ETr a partir de la ETp , mediante la aplicación de una función de extracción de la humedad del suelo (SMEF) que incluye las condiciones de humedad inicial del sustrato. Tras la obtención de los resultados se aprecia que la aplicación de esta ecuación conduce a una mejora en la estimación de la ETr . Una mejora adicional del modelo fue obtenida mediante la introducción de un coeficiente de cultivo mensual (k_c), el cual permite incluir en el modelo el estado vegetativo de las plantas en el momento de la simulación.

Ya mencionado con anterioridad, cabe remarcar y se desprende de los anteriormente mencionado, que el modelo matemático se conceptualizará para realizar simulaciones en continuo o periodo extendido, para de esta manera poder contemplar los efectos de la evapotranspiración en el sistema.

6.2. EL MODELO SWMM

El EPA Storm Water Management Model (Rossman, 2010), es un modelo de simulación dinámica hidrológico-hidráulica y de calidad del agua, de libre distribución. La condición de software libre, junto a la gran versatilidad del modelo y la posibilidad de manipular el código del mismo es lo que ha hecho posible que el modelo SWMM sea uno de los más empleados a nivel mundial.

El software permite la realización de cálculos tanto en la situación de disponerse únicamente un evento de lluvias, como la realización de cálculos en periodo extendido o en continuo.

La estructura interna de cálculo del programa se estructura principalmente de dos bloques: un referente al cálculo de la escorrentía, es decir el bloque con carácter hidrológico, y el bloque de transporte, es decir el de carácter hidráulico. Dichos bloques se analizan de una manera más detallada en el siguiente apartado.

6.2.1. BLOQUE HIDROLÓGICO

Su funcionamiento es como el de un grupo de cuencas donde sobre las mismas se producen eventos de precipitación. Tras la ocurrencia de dichos eventos se produce la escorrentía, la cual se genera mediante la ocurrencia de una serie de mecanismos hidrológicos. Para el cálculo, el presente bloque tiene en cuenta los siguientes mecanismos:

- Procesos de evaporación de las aguas que permanecen estancadas
- Acumulaciones y deshielo de las nieves
- Variación en el tiempo de la precipitación
- Almacenamiento en depresiones de la precipitación
- En zonas no saturadas: ocurrencia del fenómeno de infiltración
- Posible recarga de acuíferos
- Para flujo superficial: consideración del modelo de embalse no lineal
- Efecto de los SUDS en cuanto a la retención de las aguas de lluvia y escorrentía.
- Procesos de intercambio de agua entre sistemas de transporte de la misma y los acuíferos

6.2.2. BLOQUE HIDRÁULICO

El presente bloque es el encargado de realizar el análisis correspondiente a el recorrido realizado por la escorrentía, por medio de un conjunto de conducciones (ya sean desde tuberías hasta canales). Mediante la totalidad de los procesos de cálculo hidráulico que el modelo incorpora, el modelo SWMM permite:

- Posibilidad de introducir un gran abanico de geometrías diversas para las conducciones, e incluso introducir secciones tanto abiertas como cerradas

- Posibilidad de modelación de sistemas hidráulicos especiales, como los son los vertederos, orificios, divisores de flujo y unidades tanto de almacenamiento como de tratamiento
- Capacidad de realizar cálculos en redes de grandes dimensiones
- Tiene la capacidad de realizar modelaciones de diversos regímenes de flujo hidráulico
- Permite la aplicación de caudales externos, al igual que de concentraciones, para a posteriori poder realizar cálculos referentes a la calidad del agua, al igual que calcular caudales en tiempo seco e intercambios de caudales entre diversos sistemas de acuíferos.
- Posibilidad de realizar el cálculo hidráulico mediante flujo uniforme, onda cinemática, o finalmente onda dinámica
- Permite finalmente la posibilidad de incorporar controles dinámicos para de esta manera poder realizar simulaciones referentes al funcionamiento de equipos de bombeo, al igual que la posición del labio en los vertederos y por otro lado la abertura de los distintos orificios.

6.3. MODULO LID EN SWMM

Tal y como se ha mencionado, la versión más reciente del software contempla la posibilidad de modelar distintas técnicas de drenaje sostenible en denominado módulo LID. Dicho módulo permite por tanto contemplar los procesos de retención, captura e infiltración de las escorrentías de agua urbanas, los cuales son los procesos típicos en los sistemas SUDS. Dichos procesos se consideran como características de la propia cuenca de estudio.

Básicamente la implementación del módulo LID en SWMM consiste en destinar una nueva cuenca en la modelo matemática íntegramente destinada a la definición del LID. De manera simplificada en la siguiente figura se visualiza el modo de funcionamiento tras la implementación del módulo, en donde las flechas indican la dirección del flujo (escorrentía) hacia un punto de salida del sistema.

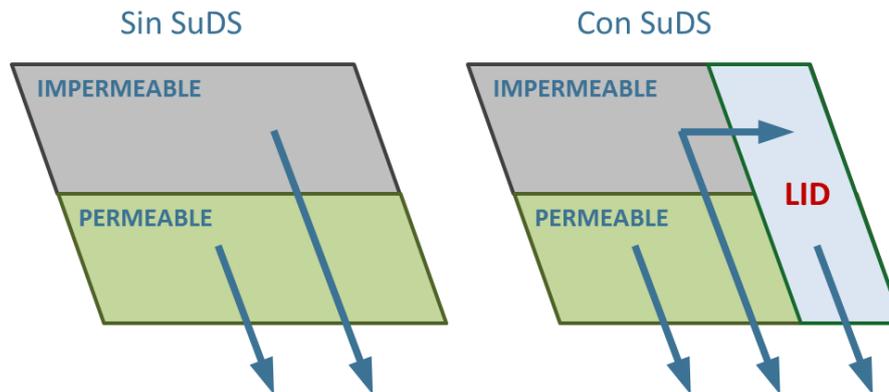


Figura 6.1. Conceptualización del sistema tras la implementación del módulo LID (Ignacio Andrés Doménech, 2016)

Con respecto a la conceptualización de los elementos de drenaje sostenible que el módulo LID contempla, SWMM los considera como un conjunto de elemento o capas. Entre dichas capas se contemplan los fenómenos de almacenamiento, flujo vertical entre las propias capas y finalmente salida del agua tanto superficialmente como en profundidad, o ambas dos. La conceptualización de cada uno de los tipos de SUDS se realiza mediante la combinación de algunas de las capas mencionadas que componen el módulo LID.

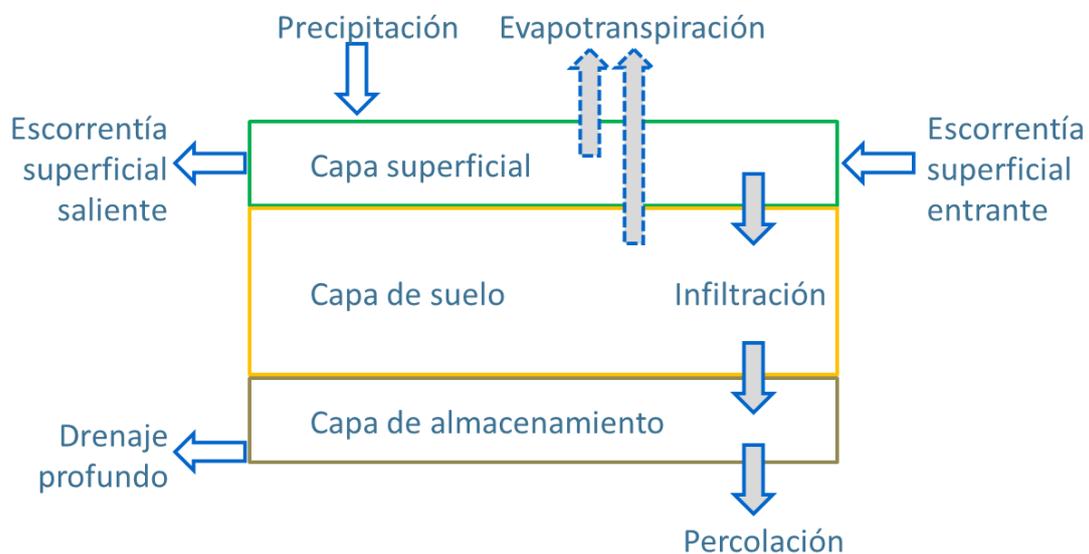


Figura 6.2. Distintas capas y procesos en el módulo LID (Ignacio Andrés Doménech, 2016).

En la siguiente tabla puede visualizarse la combinación de capas correspondiente con cada una de las tecnologías de drenaje sostenible incluidas en el módulo LID, en donde “X” representa que la capa existe y “O” que puede o no existir (opcional).

SUDS	Capa superficial	Pavimento	Capa de suelo	Capa de almacenamiento	Dren
Cuneta vegetada	X				
Desconexión drenaje	X				X
Aljibe				X	X
Zanja de infiltración	X			X	O
Pavimento permeable	X	X	O	X	O
Cubierta vegetada	X		X		X
Jardín de lluvia	X		X		
Zona de biorretención	X		X	O	O

Tabla 6.1. Capas de los que se compone cada uno de los SUDS en el módulo LID.

De manera más específica se procede a describir los distintos sistemas de drenaje sostenible que han tomado parte en la modelación matemática del sistema.

- **“Bio-Retention Cell”**: Las áreas de biorretención se conceptualizan como depresiones con vegetación cultivada en una superficie de suelo, situadas sobre una capa drenante de grava. Tienen la capacidad de almacenar, infiltrar y finalmente evaporar las acumulaciones de agua procedentes de la escorrentía o de la propia precipitación.

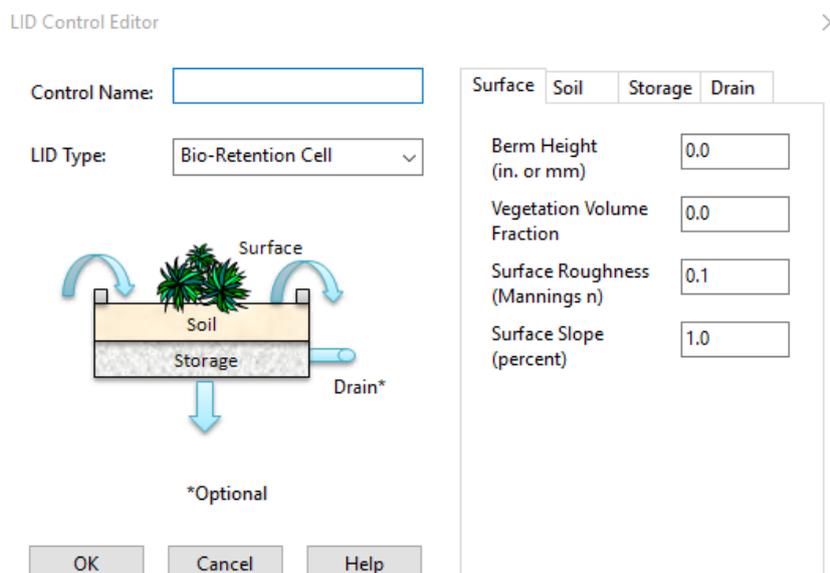


Figura 6.3. Ventana gráfica del módulo LID referente a “Bio-Retention Cell”.

- **“Green Roof”**: El módulo LID considera las cubiertas vegetadas como una variante de los anteriores (Bio-Retention Cell), el cual presenta la capa drenante bajo la superficie del suelo, encargada de drenar los excesos de agua infiltrada.

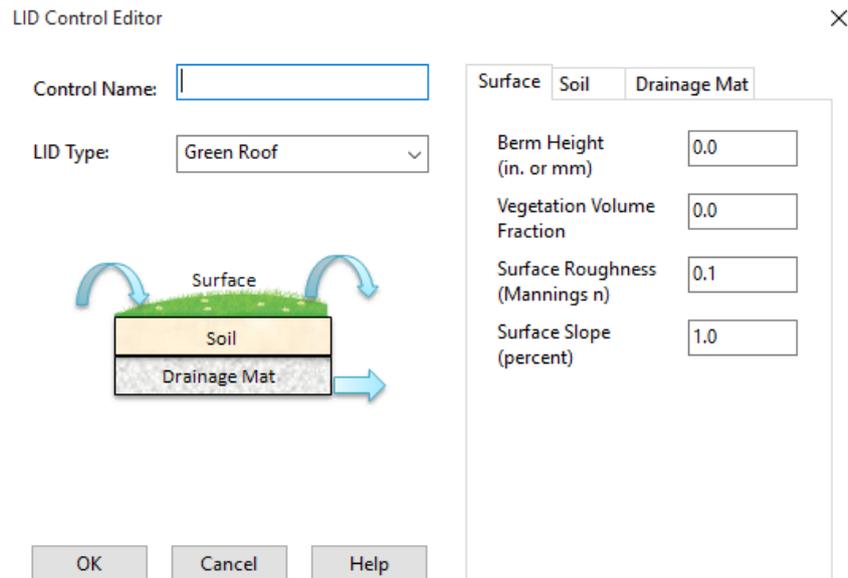


Figura 6.4. Ventana gráfica del módulo LID referente a “Green Roof”.

- **“Permeable Pavement”**: Los pavimentos permeables, como su nombre indica se tratan de superficies continuas y permeables. Son básicamente superficies excavadas las cuales se rellenan de gravas y posteriormente se cubren por mezclas de asfalto o cemento con características drenantes, es decir, porosos.

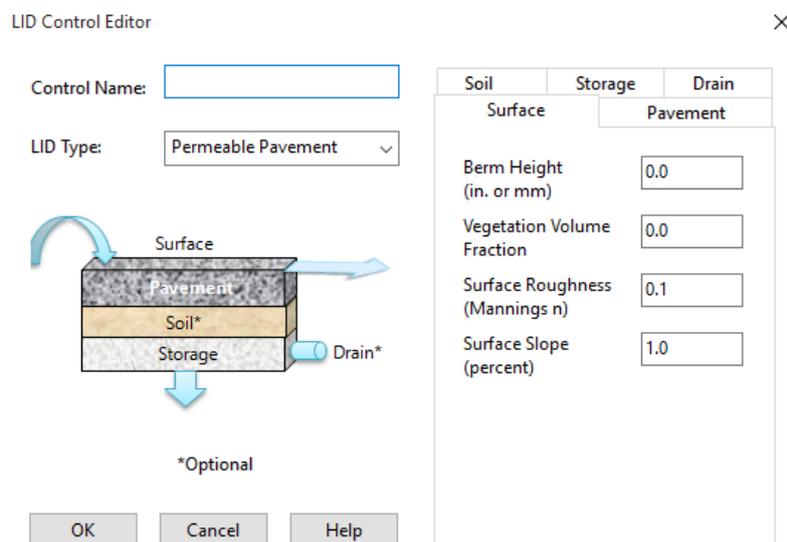


Figura 6.5. Ventana gráfica del módulo LID referente a “Permeable Pavement”.

El módulo LID se encuentra estructurado por medio de un comando referente a la consulta (“LID group editor”) y otros dos destinados a la edición (“LID control editor” y “LID usage

editor”). A través de estos comandos se puede definir el o los sistemas SUDS que incorpore el sistema.

- **“LID group editor”**: se trata de una herramienta que permite la consulta y la identificación de los sistemas SUDS incorporados en la cuenca de estudio.

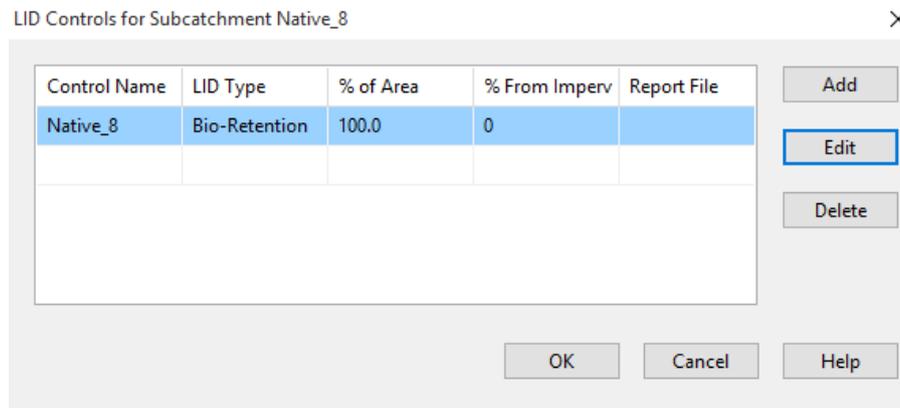


Figura 6.6. Ventana gráfica referente al “LID group edito”.

- **“LID Control editor”**: es la herramienta que permite la selección y definición del sistema SUDS a disponer en la cuenca. En el mismo se definen los distintos parámetros hidráulicos e hidrológicos que lo definen, así como los geométricos. (Figuras expuestas en el apartado anterior)
- **“LID usage editor”**: concretamente marca la configuración de las distintas técnicas empleadas en la cuenca de estudio, definiendo entre otros, la superficie que ocupan con respecto a la total de la cuenca, al igual que el porcentaje de escorrentía que se genera en el propio sistema y que se debe gestionar por la infraestructura.

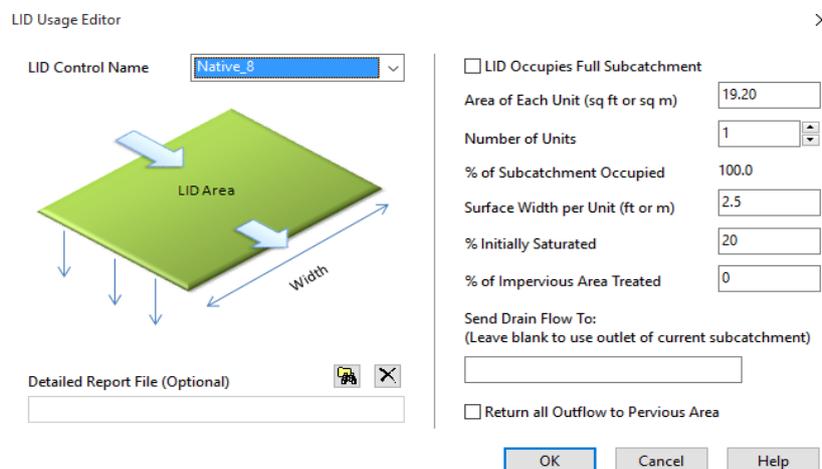


Figura 6.7. Ventana gráfica correspondiente con el “LID usage edito”.

SWMM evalúa el comportamiento de los SUDS mediante el análisis de los resultados obtenidos en término de evaporación, escorrentía y finalmente infiltración. Mediante la consulta del informe de estado del software, una vez realizados los cálculos, es posible el visualizar los resultados de una forma esquemática y ordenada. Dichos parámetros hacen referencia a la escorrentía, evaporación, infiltración, etc.

Topic: Click a column header to sort the column.

Subcatchment	LID Control	Total Inflow mm	Evap Loss mm	Infil Loss mm	Surface Outflow mm	Drain Outflow mm	Initial Storage mm	Final Storage mm	Continuity Error %
SEDUM-ERBA_ROOF	SEDUM_ROOF	944.00	543.08	0.00	0.00	419.33	53.13	34.73	-0.00
SEDUM_GRAVEL_ROOF	Ghiaia_sedum	944.00	0.00	0.00	0.00	898.98	8.33	0.00	5.60
Native_12	Native_12	944.00	573.14	0.00	0.00	350.09	20.96	41.72	-0.00
Native_10	Native_10	944.00	543.08	0.00	0.00	384.05	17.85	34.72	-0.00
Native_8	Native_8	944.00	502.14	0.00	0.00	426.04	11.91	27.72	-0.00

Figura 6.8. Ejemplo de ventana de estado del módulo LID tras la realización de la simulación.

6.4. CONCEPTUALIZACIÓN DEL SISTEMA

Dado que el conjunto del sistema de tejado verde dispuesto sobre las instalaciones de la Universidad de Bolonia se puede analizar de manera independiente (refiriéndose a cada uno de los sistemas, RR, SR y NR), para la conceptualización y creación del modelo de sistema NR, se parte de un nuevo modelo, para de esta manera trabajar con un modelo lo más “limpio” posible (a pesar de la sencillez del modelo en este caso). Es ya tras el proceso de calibración y validación cuando finalmente se crea el modelo conjunto en su totalidad.

Para la creación del modelo NR, se ha tomado como ejemplo los pasos seguidos para la creación del resto de modelo, el cual como ya se ha mencionado en diversas ocasiones, ya se encuentra elaborado.

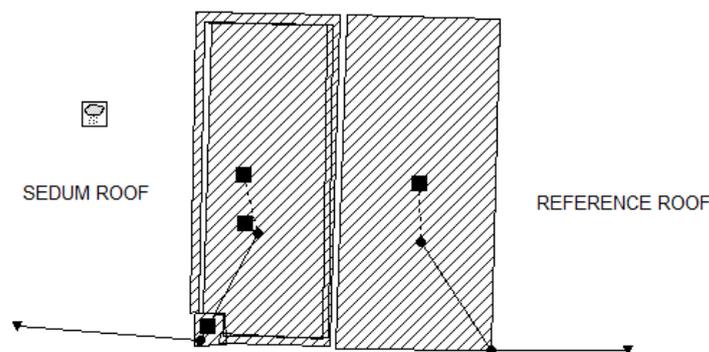


Figura 6.9. Esquema en SWMM del modelo referente al sistema SR y RR de la cubierta vegetada.

Una vez proporcionados los planos de proyecto y la totalidad de las características ya de la grava como del substrato que conforma la propia cubierta vegetada, completando esto con una visita insitu que se realizó a la cubierta, se procede con la elaboración del modelo. Tal y como ya se ha mencionado, el sistema NR se divide en 3 subsistemas diferenciados, en función del espesor de los mismos, por tanto al realizar el esquema se diferencian estas 3, disponiendo de igual manera la grava presente alrededor de cada uno de estos subsistemas (representados mediante subcuencas diferenciadas). Por otra parte, en el punto de recogida de la escorrentía generada por la cubierta vegetada, se dispone de otra superficie diferenciada. Para representar el sistema de recogida de aguas de la cubierta, se ha dispuesto en cada una de las partes de la cubierta un punto de recogida de aguas, en donde cada uno de ellos recoge la escorrentía generada por el conjunto cubierta-grava correspondiente (refiriéndose a los subsistemas diferenciados en el conjunto de la cobertura NR). Los puntos de recogida se conectan entre ellos de manera que la escorrentía generada por el sistema NR de 12 cm, se conduce hasta el punto de recogida de la generada por el sistema NR de 10 cm, hasta que finalmente la totalidad de la escorrentía se transporta hasta donde se dispone el caudalímetro. Ya donde se encuentra situado el caudalímetro existe una pequeña superficie impermeable (por de operatividad), dicha área debe ser contabilizada en el cómputo de la generación de escorrentía, y es por ello por lo que en dicha superficie, existe un nuevo punto de recogida, en donde se suma la escorrentía generada por el sistema NR y la generada por dicha pequeña superficie. Ya finalmente se dispone de un punto de vertido, el cual ya recoge la totalidad de la escorrentía del sistema NR. Dicho punto de vertido simula por tanto el caudalímetro del sistema NR, el cual ha sido descrito en apartados anteriores y descrito como W15. La figura expuesta a continuación muestra algunas de las consideraciones anteriormente expuestas.

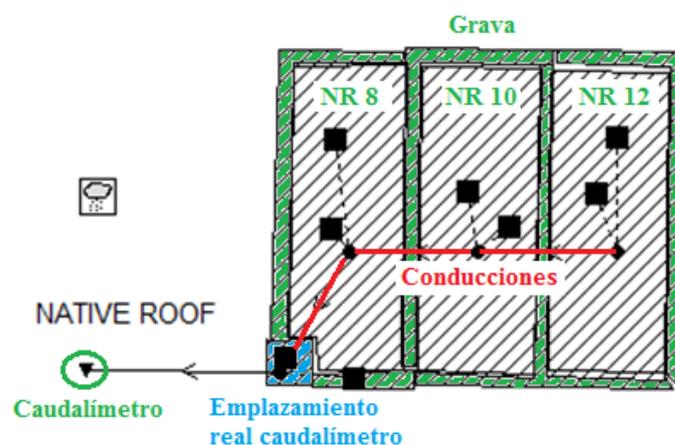


Figura 6.10. Esquema del modelo NR.

A diferencia de muchos de los estudios ya realizados sobre las cubiertas vegetadas mediante el empleo del SWMM y su módulo LID, para la ejecución del presente modelo se ha utilizado el módulo correspondiente con “Bio-Retention Cell”, es decir, células o áreas de bioretención las cuales evaporan el agua que ha sido acumulada por la precipitación. La decisión de utilizar el módulo “Bio-Retention Cell”, es debida a que el mismo posee la peculiaridad de ser exactamente igual al módulo “Green Roof”, pero contando con una capa extra, introduciendo una serie de parámetros denominados “Underdrain”.

Dichos parámetros resultan ser los más influyentes en los resultados de las simulaciones, y por tanto los más susceptibles a ser los parámetros de calibración. El término “Underdrain” viene a representar un orificio de salida (a modo de dren) de capacidad “ q ” por unidad de superficie (mm/h). En posteriores apartados se analiza con más detalle tanto el término como la sensibilidad del modelo a las variaciones de los parámetros que definen el mismo.

Por otra parte, para la conceptualización de la parte de la cubierta vegetada compuesta por grava, se ha utilizado la tecnología “Permeable Pavement”.

Finalizado el modelo en SWMM del sistema de cubierta vegetada NR se procede a la calibración del mismo, tal y como se detalla en el capítulo siguiente. Una vez calibrado el modelo, se dispone a realizar un modelo final, el cual contemple el sistema de cubierta vegetada en todo su conjunto. No se realiza ninguna labor posterior de calibración de dicho modelo, ya que el mismo ha sido calibrado de manera independiente, por tanto para la realización del nuevo modelo únicamente ha sido necesaria una labor de unificación de los datos a un mismo modelo.

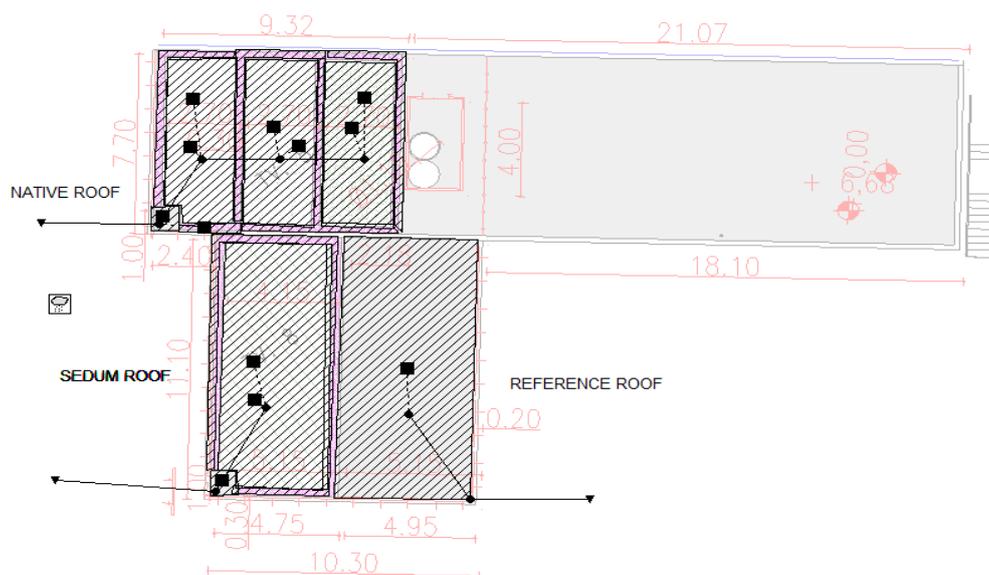


Figura 6.11. Modelo en SWMM de la cubierta vegetada en todo su conjunto.

Por último, resulta importante destacar la finalidad de contemplar conducciones en el modelo matemático las cuales conectan cada uno de los subsistemas de la cubierta con el punto de drenaje (tal y como se aprecia en la figura anterior). En la realidad la cubierta vegetada no consta de conducciones que conecten el drenaje de cada subsistema y posteriormente lo conduzcan hacia el punto de drenaje, pero a la hora de realizar el modelo matemático se ha considerado conveniente considerar las mismas, excluyendo la opción de conectar directamente cada una de las subcuencas al punto de drenaje. La finalidad de incluir las conducciones atiende a la mayor facilidad de extracción posterior de datos en el sistema, ya que de esta manera es posible analizar de manera sencilla las cuantías aportadas por cada uno de los subsistemas de la cubierta vegetada.

Elaborado el esquema del modelo matemático a utilizar para la calibración y validación del sistema, en el siguiente apartado se exponen los datos de entrada introducidos al modelo para caracterizarlo físicamente.

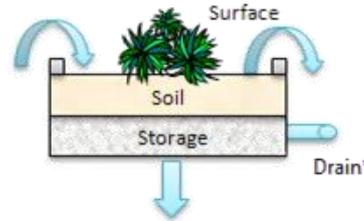
6.5. DATOS Y PARÁMETROS INPUT

Dos grandes grupos de datos son los introducidos inicialmente al modelo realizado, uno de ellos con los parámetros físicos, los cuales describen las características del sistema, siendo el otro gran grupo el referente a los datos climatológicos. Se procede seguidamente a describir aquellos de relevada importancia en el presente modelo.

6.5.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL SISTEMA

Los parámetros que definen la composición del sistema de la cubierta vegetada son los que más atención precisan, si lo que se pretende es ser lo más fiel a la realidad posible, por tanto, tal y como ya se ha mencionado en anteriores apartados, la gran mayoría de dichos parámetros fueron obtenidos mediante ensayos de laboratorio. Dada la importancia de los mismos, se exponen a continuación los parámetros característicos introducidos al modelo, correspondientes con la tecnología “Bio-Retention Cell” empleada para caracterizar la cubierta vegetada NR.

BIO-RETENTION CELL



SURFACE		SOIL	
Berm Height (mm)	3	Thickness (mm)	120-100-80
Vegetation Volumen Fraction	0.15	Porosity (volume fraction)	0.4
Surface Roughness (Mannings n)	0.02	Field Capacity (volume fraction)	0.35
SurfaceSlope (percent)	0.75	Wilting Point (volume fraction)	0.06
		Conductivity (mm/h)	2280
		Conductivity Slope	5
		Suction Head (mm)	1
STORAGE		DRAIN	
Thickness (mm)	25	Flow Coefficient	6
Void Ratio (Voids/Solids)	0.5	Flow Exponent	0.5
Seepage Rate (mm/h)	0	Offset Height (mm)	0
Clogging Factor	0		

Tabla 6.2. Parámetros básicos en módulo LID para “Bio-Retention Cell”

PERMEABLE PAVEMENT			
SURFACE		SOIL	
Berm Height (mm)	3	Thickness (mm)	0
Vegetation Volumen Fraction	0	Porosity (volume fraction)	0.5
Surface Roughness (Mannings n)	0.02	Field Capacity (volume fraction)	0.2
SurfaceSlope (percent)	0.75	Wilting Point (volume fraction)	0.1
		Conductivity (mm/h)	0.5
		Conductivity Slope	10
		Suction Head (mm)	3.5
STORAGE		DRAIN	
Thickness (mm)	25	Flow Coefficient	6
Void Ratio (Voids/Solids)	0.5	Flow Exponent	0.5
Seepage Rate (mm/h)	0	Offset Height (mm)	0
Clogging Factor	0		
PAVEMENT			
Thickness (mm)	100		
Void Ratio (Voids/Solids)	0.4		
Impervious Surface Fraction	0		
Permeability (mm/h)	3000		
Clogging Factor	0		

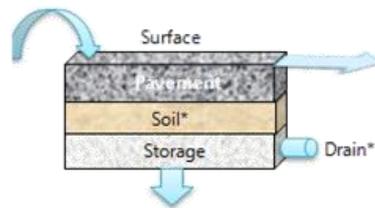


Tabla 6.3. Parámetros básicos en módulo LID para “Pavement”

Cabe resaltar que los distintos parámetros que definen la componente “Drain” para cada uno de los sistemas (tanto la grava como la cubierta vegetada), no son los parámetros finales, ya que como en posteriores apartados se expone, estos son los parámetros de calibración del sistema, por tanto los valores expuestos en las tablas, son los valores por defecto que introduce el propio software.

Finalmente, las conducciones contempladas en el modelo matemático, adoptan un número de Manning de 0.01, asimilando las mismas a conducciones de PVC.

6.5.2. DATOS CLIMATOLÓGICOS

Como datos input se han utilizado los referentes a la campaña de monitorización realizada durante la totalidad del año 2014. Se analiza por tanto la serie anual de eventos y registros obtenidos mediante los sistemas de monitorización ya descritos. Cabe mencionar que la consideración de los datos climatológicos referentes al año 2015 (lo cual hubiese sido beneficioso para los procesos de calibración y validación del sistema) no se ha considerado conveniente, debido a una serie encadenada de fallos en el sistema de monitorización durante un periodo prolongado, los cuales unidos a que los trabajos de calibración del sistema se iniciaron a finales de octubre del 2015, hacen disponer de una serie discontinua e incompleta de datos del año en cuestión.

Además de los datos meteorológicos que se describirán a en el presente apartado, se exponen los datos input más relevantes para la correcta obtención de resultados.

Con referencia a la vegetación, aparte de introducir las distintas características de las mismas, es necesario introducir un coeficiente de cultivo mensual a la hora de realizar los cálculos para el sistema NR. Dicho coeficiente cultural hace referencia al “krop” descrito en el apartado 6.1.2, empleado como herramienta para el cálculo de la evapotranspiración. En la siguiente tabla se refleja el valor mensual del coeficiente cultural adoptado para el tipo cubierta vegetada NR.

Coef. Cult. NR	
Enero	0.25
Febrero	0.25
Marzo	0.75
Abril	3
Mayo	5
Junio	5.75
Julio	5.75
Agosto	5.75
Septiembre	1.5
Octubre	1
Noviembre	0.75
Diciembre	0.25

Figura 6.12. Tabla coeficiente cultural sistema NR

Otros datos de entrada importantes a la hora de realizar los cálculos, son los referentes a la situación geográfica de la cubierta vegetada. Un dato importante es el referente a la latitud, la cual para las instalaciones de la Universidad de Bolonia toma un valor de $44^{\circ} 30' 27''$.

Finalmente cabe destacar como datos de entrada, los referentes a la temperatura y la precipitación. Referente a la temperatura, se introduce un archivo el cual hace referencia a la temperatura máxima y mínima diaria para la totalidad de la serie de datos contemplados (es necesario realizar una labor de presentación de los datos al formato SWMM, ya que se dispone del fichero elaborado por la estación meteorológica). Es importante mencionar que se indica al software que los cálculos referentes a la evaporación del sistema, los hace en base al fichero de datos de temperatura introducido, y mediante la consideración de los coeficientes de cultivo mensuales introducidos y ya mencionados.

En cuanto a los datos de precipitación, los cuales han sido extraídos del fichero generado en la estación meteorológica, cabe destacar que se introduce al programa un fichero que contempla, para la serie anual, datos de precipitación diaria en *mm* con una discretización cincominutal. Se muestra en el siguiente gráfico los valores correspondientes con la precipitación mensual del año 2014.

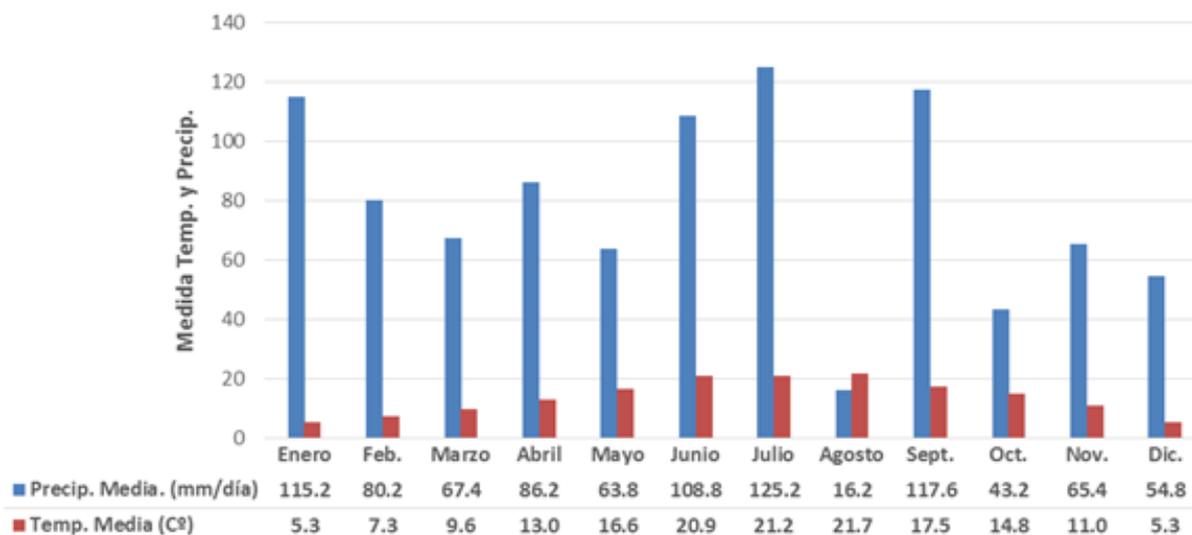


Figura 6.13. Precipitación mensual del año 2014 (mm) y temperatura media mensual (C°).

Tal y como puede observarse, el año 2014 se caracterizó por presentar una serie de eventos de precipitación un tanto peculiar. Con un total de 134 eventos de precipitación registrados durante la totalidad del año, hay que destacar el acumulado de precipitación mensual de algunos de los meses del periodo estival, como junio y julio, frente a los meses de noviembre y diciembre, en donde la precipitación mensual acumulada es significativamente menor. La atipicidad en dichos

valores se debe a la existencia de numerosos eventos de precipitación de corta duración, pero alta intensidad registrados en los meses de verano, habiendo registrado intensidades de precipitación en el mes de julio de 166 mm/h .

Para la realización de los cálculos en periodo extendido, al software deben introducirse las series históricas tanto de precipitaciones como de temperaturas, al igual que los coeficientes de cultivo expuestos. Con estos datos SWMM permite realizar los cálculos de evaporación, en función de los datos de temperatura (juntos con los coeficientes culturales).

7. ANALISIS DE SENSIBILIDAD, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

7.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

La finalidad de realizar un análisis de sensibilidad es básicamente para el conocimiento o predicción de la tendencia a la variación del modelo tras la realización de distintos cambios en los parámetros que lo definen.

Tal y como se ha expuesto, ya se dispone del modelo matemático de parte del sistema de cubierta vegetada existente en las instalaciones de la Universidad de Bolonia, el cual se encuentra calibrado y validado, por tanto, para la realización del análisis de sensibilidad se ha utilizado dicha parte del modelo. Más concretamente se ha utilizado el modelo y los ficheros utilizados para la calibración del mismo.

7.1.1. PROCEDIMIENTO

La metodología seguida para la realización del análisis de sensibilidad del modelo ha consistido en proceder a la variación de los distintos parámetros que describen cada uno de los componentes del módulo LID empleado para la modelación de la cubierta. Al disponer de los archivos de calibración del modelo matemático, los cuales describen los hidrogramas de salida registrados a la salida de las cubiertas vegetadas, se analizan las variaciones de dichos hidrogramas tras la modificación de distintos parámetros que describen la cubierta vegetada.

Como ha sido justificado en el apartado 6.4, el módulo finalmente elegido para la modelación de las cubiertas vegetadas ha resultado ser el correspondiente con “Bio-Retention Cell”. Siguiendo los criterios para la calibración de la parte del modelo ya realizado, a priori únicamente se realizaría el análisis de sensibilidad mediante la modificación de los parámetros que describen el término “Drain” dentro del módulo, pero con tal de realizar un análisis de mayor rigor y descartar la posibilidad de calibrar el modelo con otros parámetros, se pretende analizar la conveniencia o no de realizar cambios en otros parámetros que definen la cubierta vegetada. Como consideraciones previas al inicio del análisis de sensibilidad, únicamente cabe mencionar que se ha realizado dicho análisis para los eventos utilizados en la calibración del modelo ya existente, con los correspondientes hidrogramas de salida generados en la cubierta SR y sus correspondientes datos de calibración, como ya se ha mencionado con anterioridad.

Para la interpretación de los resultados principalmente se ha llevado a cabo una inspección visual de los resultados, los cuales se analizan en forma de gráficas. Dichas inspecciones visuales se han acompañado del cálculo de uno de los parámetros utilizados para cuantificar la bondad de los resultados obtenidos tras la calibración y validación, como es el PBIAS, el cual mide la tendencia de los datos simulados a ser mayores o menores a los distintos datos observados. A priori únicamente se pretendía realizar un análisis de manera visual mediante la comparación de las gráficas, pero al observar que los principales cambios producidos en los resultados, tras la variación de los parámetros, eran cambios que influían sobretodo en el volumen de los hidrogramas, más que en la forma de los mismos, se considera un buen indicador a tener en cuenta para la decisión de que parámetros presentan mayor influencia en el modelo.

De la totalidad del abanico de parámetros que definen la cubierta vegetada en el modelo matemático, se ha descartado la posibilidad de modificar aquellos que describen físicamente el modelo, es decir, parámetros como los que definen geoméricamente la cubierta vegetada, incluyendo el espesor de las capas, su pendiente, etc. Continuando con el análisis de los datos susceptibles a variar, se considera oportuno descartar aquellos parámetros que han sido obtenidos mediante un trabajo previo de laboratorio. Estos son parámetros como la porosidad, capacidad de campo, punto de marchitez, la conductividad, tasa de infiltración, etc.

Tras realizar una primera selección de los datos, se dispone para la realización del análisis de la totalidad de los datos que definen el término “Drain” (tal y como ya se sabía de antemano), al igual que el coeficiente de Manning en la capa superior “Surface” y otros parámetros adimensionales incluidos en el módulo. Es importante mencionar que no se profundiza (en este punto del trabajo) en el significado físico de cada uno de los parámetros mencionados sobre los cuales se realiza el análisis de sensibilidad, ya que dicha labor se realizará posteriormente, sobre los parámetros de calibración, una vez identificados los mismos.

Seleccionados los distintos parámetros sobre los cuales se realizará el análisis de sensibilidad del sistema, se realiza para cada uno de ellos la misma metodología de forma ordenada. En primer lugar se procede a aumentar el valor del número (en el caso de acrecentar los valores) al doble del mismo, haciéndolo posteriormente al triple, cuádruple, etc. De esta manera se puede apreciar de manera rápida si el sistema es sensible a grandes variaciones del valor analizado, y por otra parte si existen valores del mismo a partir de los cuales el sistema deja de presentar variaciones apreciables. Una vez realizado este paso, se puede seleccionar un “rango de

sensibilidad” del sistema para cada uno de los valores, y se pasa en segundo lugar a modificar el valor del parámetro, modificándolo en una unidad (desde el valor inicial del mismo), para de esta manera analizar la sensibilidad a pequeñas variaciones del mismo.

7.1.2. RESULTADOS

Tras la realización del análisis de sensibilidad se puede concluir que los parámetros que mayor influencia tienen sobre el sistema son, como se presuponía, los que describen el término “Drain”. Los demás parámetros analizados producen variaciones prácticamente inapreciables en los resultados, llamando especialmente la atención que la variación del número de Manning (que describe la cubierta vegetada) no produce variaciones significativas en los resultados del sistema. Es importante mencionar, que pese a no contemplarse en fase de análisis de sensibilidad del sistema, a modo de ajuste final se realizan pequeñas variaciones con respecto al número de Manning, pero no del descrito en los módulos LID del sistema, sino de las conducciones existentes en la cubierta vegetada.

Tal y como ya ha sido ya mencionado, el modelo de la cubierta vegetada ha sido conceptualizado mediante la combinación de superficies destinadas al propio paquete de cubierta y grava. Ambas constan del término “Drains”, por tanto el análisis también incumbe la modificación de los parámetros que describen la grava. Puede parecer innecesario el análisis de la variación de los parámetros que describen la grava, ya que se trata de la misma que se utiliza para la parte de la cubierta SR, pero, tal y como se verá en apartados posteriores, resulta necesario conocer cómo influye la variación de dichos parámetros.

A continuación se procede a exponer los resultados obtenidos en forma de observaciones descritas en una tabla, las cuales serán las directrices a seguir en el proceso de calibración posterior.

Parámetro	Variaciones		
	Incrementar valor	Disminuir valor	Límites
Flow Coefficient (c)	Desplazamiento positivo en el eje de abscisas	Desplazamiento negativo en el eje de abscisas	Un valor = 0 anula la función del dren. Para valores superiores a 40 no se producen variaciones
Flow Exponen (n)	Aumentan picos. Mayor aumento en valores más grandes	Disminuyen picos. Mayor disminución en valores mayores de los picos	Para valores superiores a 10 no se aprecian variaciones significativas. Trabajar con valores > 0
Offset Height (h)	Reduce el volumen del hidrograma	Incrementa el volumen del hidrograma	Valor máximo igual al del espesor de la capa inferior (mm) y mínimo = 0

Tabla 7.1. Comportamiento del modelo observado tras el análisis de sensibilidad.

Las variaciones descritas se repiten tanto para la variación de los parámetros en la cubierta vegetada como en los de la grava. Únicamente cabe mencionar que para la grava, la modificación de los parámetros conlleva unas variaciones más significativas del hidrograma simulado, no siendo por tanto proporcional a la variación producida al modificar los parámetros que describen el paquete de cubierta vegetada.

Tras la realización del análisis de sensibilidad, aparte de identificar cuáles son y cómo afectan al modelo los parámetros a utilizar en el proceso de calibración, se da conformidad al modo de proceder (parámetros elegidos) en la calibración del modelo existente, ya que no se disponía de ningún análisis de sensibilidad en ese caso. En consecuencia, se da por buena a la decisión previa tomada con referencia a la utilización del módulo LID empleado para la descripción de la cubierta vegetada.

7.2. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

De manera introductoria se exponen a continuación conceptos básicos referentes a la definición tanto de calibración como de validación.

Se considera que los procesos de calibración-validación son la componente con mayor importancia y a su vez complejidad que envuelven a los procesos de modelación. Se trata básicamente de una etapa en la cual se ajustan una serie de parámetros (en el caso del presente estudio, parámetros hidrológicos, dada la naturalidad del mismo), con el fin de que el modelo con el que se trabaja sea capaz de reproducir con una precisión aceptable las distintas variables que han sido observadas y medidas en campo.

Por tanto, la finalidad de estos procesos no es otra que la de permitir que mediante una herramienta teórica se pueda finalmente disponer de una herramienta útil para la cuantificación de la escorrentía generada por diferentes configuraciones de cubierta vegetada, como es el caso del presente estudio, y de esta manera poder realizar una gestión eficiente a posteriori de futuras actuaciones en este campo.

Más concretamente se entiende por proceso de calibración aquella etapa en la que un conjunto de parámetros, convenientemente seleccionadas, se ajustan con la finalidad de que los resultados del mismo modelo reproduzcan los datos medidos experimentalmente, tal y como se ha introducido con anterioridad. Hay que tener presente que las propias observaciones realizadas en campo pueden resultar ser inciertas, debido a cualquier factor como por ejemplo un error en la toma de muestras, por tanto las mismas se encuentran sujetas a observación e interpretación. Se desprende por tanto que existe la necesidad de establecer una serie de criterios para llevar a cabo la calibración, y estos deben ser tanto cualitativos como cuantitativos, de los que se desprende finalmente que la calibración no es un proceso ni estándar ni único para la totalidad de los modelos.

En cuanto al proceso de validación, de manera genérica se puede definir como el proceso en el cual, mediante la utilización de los distintos parámetros obtenidos en el proceso precedente de calibración, se comprueba finalmente que se reproducen los datos medidos tras realizar la simulación. Calibrado el modelo, el mismo ha de ser utilizado para poder simular un segundo grupo de datos los cuales ya se conocen, es decir, si por ejemplo se realiza la calibración para distintos meses del periodo estival, en el proceso de validación el modelo debe ser capaz de reproducir los resultados deseados para los meses correspondientes con el periodo invernal.

7.2.1. PROCEDIMIENTO Y CRITERIOS

Una vez analizada la literatura científica publicada en la cual se exponen los distintos métodos utilizados para la calibración y validación de los modelos hidrológicos para la simulación de cubiertas vegetadas, se opta por la estrategia de calibración y validación más común y empleada, la cual también ha sido usada para la calibración del modelo referente a la parte de la cubierta RR y SR, es decir, mediante la comparación de distintos hidrogramas observados y simulados, en este caso para la parte de cubierta NR.

Dado que han sido identificados y a grandes rasgos acotados los distintos parámetros a tener en cuenta en la presente fase de calibración, se modificarán los mismos mediante el modo de proceder comúnmente denominado “prueba y error”.

La comparación entre hidrogramas mencionada, se realiza tanto de manera cuantitativa como cualitativa, por tanto, se han tenido en cuenta observaciones gráficas de manera cualitativa, al igual han sido usados tres parámetros cuantitativos, como los son el Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), más conocido como índice de Nash, el “percent bias” (PBIAS) y finalmente la relación existente entre el error medio cuadrático y la desviación estándar (RSR). Se procede de dicha manera tal y como recomienda (Moriassi, et al., 2007).

Seguidamente se procede a describir en qué consisten cada uno de los parámetros utilizados para dar conformidad al proceso de calibración del sistema.

El primero de los parámetros mencionados es el Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), el cual según (Nash & Sutcliffe, 1970) toma la siguiente expresión:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{mod})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{mean})^2} \right]$$

En donde “ n ” es el número total de observaciones realizadas, “ y^{obs} ” representa el valor de la variable observada, “ y^{mod} ” el valor correspondiente de la variable modelada y, finalmente “ y^{mean} ” representa el valor promedio de los distintos eventos observados para el evento de simulación que se esté utilizando en la calibración. El parámetro NSE refleja la relación existente entre el valor observado y el simulado, aproximándose este a la línea de regresión lineal a 45°. El valor del parámetro NSE puede variar dentro del rango de $-\infty$ a 1, siendo el valor unidad el considerado como valor óptimo.

El segundo de los parámetros introducidos es el PBIAS, el cual mide la tendencia de los datos simulados a ser mayores o menores a los distintos datos observados (Gupta, et al., 1999). Se considera un valor 0 como valor óptimo, al igual que valores positivos indican una tendencia a la sobreestimación, y valores negativos por el contrario, una tendencia a la subestimación de los resultados. El PBIAS se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{mod}) \cdot 100}{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs})} \right]$$

En la que los parámetros que la conforman se corresponden con los ya expuestos anteriormente para el NSE. Valores del PBIAS de 6 ± 10 % indican que el modelo es muy bueno.

Finalmente el parámetro RSR (observations standard deviation ratio) es un índice que expresa la relación entre el error cuadrático medio y la desviación estándar.

$$RSR = \frac{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{mod})^2} \right]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{mean})^2} \right]}$$

El parámetro RSR varía entre un valor óptimo correspondiente con 0 y cualquier valor positivo. Mayores valores del índice indican menores rendimientos de modelo.

Los parámetros descritos son por tanto los utilizados para valorar las prestaciones y el correspondiente rendimiento del modelo empleado para la simulación de la escorrentía generada por las cubiertas vegetadas.

Por otra parte y a modo de completar la calibración del sistema han sido calculados dos índices dirigidos principalmente a la comparación entre los volúmenes de salida o escorrentía y los picos de los hidrogramas. Siguiendo las consideraciones expuestas por (Palla, et al., 2012), la precisión alcanzada de los resultados se puede evaluar simplemente mediante la estimación del error porcentual relativo (ERP). Dicho índice se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$ERP = 100 \cdot (x_{obs} - x_{sim}) / x_{obs}$$

en donde x_{obs} representa el valor observado y x_{sim} el valor simulado.

7.2.1. EVENTOS UTILIZADOS

En la tabla Tabla 7.2. Eventos utilizados en fase de calibración y validación del sistema, diferenciando los mismos mediante los superíndices “Cal” y “Val”, haciendo referencia a evento de calibración o validación respectivamente. se muestran los distintos eventos utilizados en los procesos tanto de calibración como validación. Es importante mencionar que el número de eventos utilizados en cada uno de los casos depende directamente de los datos disponibles, ya que sucedieron durante la campaña de monitorización algunos errores debido al mal funcionamiento de los instrumentos de medida. Aparte del mal funcionamiento ocasional de los instrumentos de medida, se han detectado otros problemas, los cuales conllevan a la imposibilidad de utilizar dichos eventos para la calibración, debido a la obstrucción por hojas

u otros materiales de los aparatos de medida. Es importante mencionar que la imposibilidad de utilizar ciertos eventos debido a errores en el registro de datos no se achaca por tanto al propio evento de precipitación, sino a la escorrentía generada tras dicho evento.

Cobertura	Evento
Natural Roof	19 Enero ^{Cal}
	23-24 Enero ^{Val}
	27-28 Enero ^{Val}
	30-31 Enero ^{Val}
	9 Febrero ^{Val}
	10-11 Febrero ^{Val}
	2-3 Mayo ^{Cal}
	13 Noviembre ^{Val}
	17-18 Noviembre ^{Cal}
	3-4 Diciembre ^{Cal}
	6-7 Diciembre ^{Val}

Tabla 7.2. Eventos utilizados en fase de calibración y validación del sistema, diferenciando los mismos mediante los superíndices “Cal” y “Val”, haciendo referencia a evento de calibración o validación respectivamente.

En cuanto a los distintos eventos utilizados para la calibración del NR hay que destacar que los mismos se caracterizan por ser eventos de media, baja y alta intensidad, al igual que de duración variable, buscando con ello utilizar diferentes eventos representativos acontecidos en el transcurso del año 2014, el cual se caracteriza por ser uno de los años menos lluviosos de los últimos tiempos.

Se considera importante mencionar que existen una serie de registros de escorrentía en periodos estivales, los cuales no pertenecen a ningún episodio lluvioso. Se trata de la escorrentía generada por los periodos de riego (apartado 4.8). Con el fin de verificar el correcto funcionamiento del modelo tras la fase de validación, se realizó un modelo auxiliar del sistema sobre el cual se introdujo el riego, dando un punto extra de conformidad a los parámetros definitivos obtenidos tras la calibración y validación del sistema.

7.2.2. FASE PREVIA A LA CALIBRACIÓN

Una vez se dispone de la totalidad de los datos necesarios para realizar la calibración del modelo (en este caso de los datos necesarios para representar el hidrograma de salida en la cubierta vegetada), se procede a analizar dichos datos. Tras realizar un primer análisis de los

hidrogramas generados a la salida de las cubiertas vegetadas tras los distintos episodios lluviosos, al igual que tras analizar las propias mediciones climatológicas, se observan diversas anomalías las cuales cabe analizar para la correcta interpretación del sistema, y por tanto para proceder de manera correcta en la fase de calibración. Se entiende por tanto como fase previa a la calibración la de dar conformidad a los propios datos que van a ser utilizados para dicha fase, al igual que la correcta interpretación de los datos involucrados en la misma.

El propio funcionamiento del pluviómetro utilizado conduce a la introducción de pequeños errores de poca importancia, pero a tener en cuenta en la interpretación de los resultados. En primer lugar se procede a realizar una muy breve descripción del funcionamiento de los mismos, para finalmente explicar el pequeño error que esto conlleva en algunas mediciones. El pluviómetro consta de una cubeta de tipo triangular doble, la cual tiene una bisagra en medio, con tal de dotar de carácter basculante la cubeta en el punto medio de la misma. El equilibrio de la cubeta depende directamente de la cantidad de agua de lluvia existente en las cubetas, basculando la misma en el caso del instrumento utilizado a los 0.2 mm de precipitación, de manera que la parte de la cubeta que se encuentra llena oscila vaciándose y empieza a llenarse la otra mitad de la cubeta. Lo que registra la lluvia es cada uno de estos movimientos oscilantes.

Una vez claro el funcionamiento del pluviómetro se explica que tras analizar los datos de lluvia registrados, se encuentren de manera aislada o al principio de algunos eventos de precipitación, diferentes registros de lluvia con exactamente 0.2 mm . Por tanto hay que tener claro que esta lluvia no tiene por qué pertenecer exactamente al evento de lluvia donde se ha registrado, pudiendo tener parte de esos 0.2 mm que formar parte de un evento de lluvia pasado, donde no se llegó a acumular sobre la mitad de la cubeta parcialmente llena la cantidad suficiente para bascular. Como ya se ha mencionado, no se trata de un error importante a la hora de modelar, simplemente se trata de una apreciación a tener en cuenta a la hora de interpretar los resultados del modelo.

Por otro lado, seleccionados los eventos que serán usados para realizar la propia calibración (apartado 7.2.1), se analizan los hidrogramas a la salida de la cubierta vegetada que genera cada uno de ellos, donde como ya se ha expuesto anteriormente, se observan una serie de anomalías. Se detectan ciertos errores de medición los cuales se deben corregir de manera manual previamente a la realización de la fase de calibración. Al representar los hidrogramas se pueden detectar una serie de picos, los cuales se detecta con facilidad que no son valores del propio hidrograma, sino que se trata de errores en la medición (Figura 7.7 para el día 19 de enero del

2014). Se procede por tanto a una corrección de dichos errores de manera manual, disponiendo valores interpolados entre los valores medidos en los extremos de donde se sitúa el valor erróneo detectado. Dichos errores se atribuyen a fallos en el propio aparato de medida y no a factores externos, tal y como sucede en otros eventos registrados.

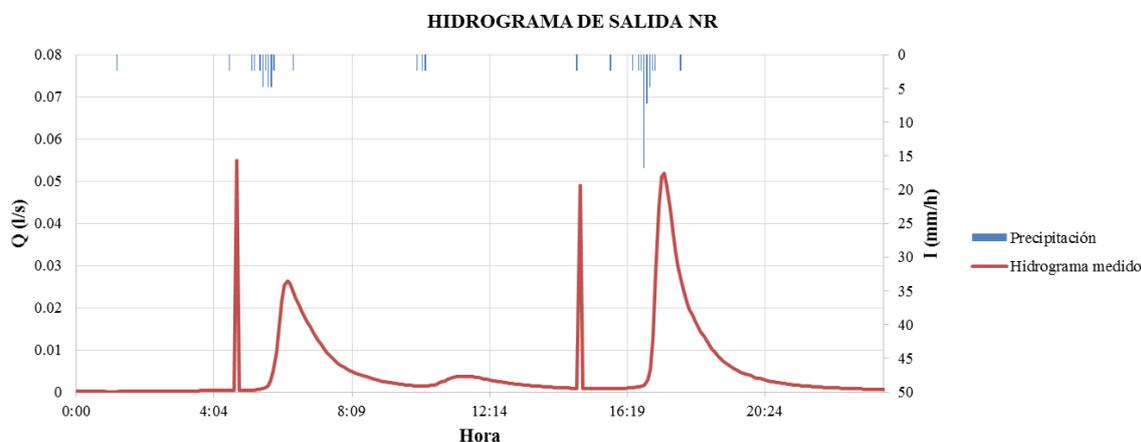


Figura 7.1. Hidrograma donde se evidencian los picos existentes en el mismo debidos a fallos en el aparato de medida.

7.2.3. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN

Como se menciona en el apartado 6.4, a diferencia de muchos de los estudios ya realizados sobre las cubiertas vegetadas mediante el empleo del SWMM y su módulo LID, para la ejecución del presente modelo se ha utilizado el módulo correspondiente con “Bio-Retention Cell”, el cual resulta ser prácticamente igual al módulo “Green Roof”, pero con la diferencia de incluir una serie de parámetros denominados “Drain”, los cuales resultan ser los que más influyen en los resultados de las simulaciones, y por tanto han sido los seleccionados para realizar el proceso de calibración.

Se considera importante realizar un análisis de los distintos elementos que toman parte en el proceso de calibración, con la finalidad de entender su significado físico, y por tanto añadir rigor al proceso de calibración.

Según el manual de SWMM, los parámetros que describen el término “Drain”, no son otra cosa que una serie de variables que describen un dren existente en el sistema. Tras realizar un análisis de dichos parámetros, se entiende que representan un orificio de salida (a modo de dren) de capacidad “ q ” por unidad de superficie (mm/h), el cual se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$q = C \cdot (h - Hd)^n$$

en la cual h representa el espesor de la capa de drenaje, Hd representa la altura del agua con respecto a la parte inferior de la lámina de agua y finalmente C y n son dos coeficientes los cuales regulan el caudal en la salida de la capa de drenaje (coeficiente y exponente de drenaje respectivamente), dependiendo de la altura de la lámina de agua. Estos últimos dos parámetros, tal y como ya se ha expuesto en apartados anteriores, son los que mayor sensibilidad presentan y por tanto los intervinientes en la fase de calibración.

Para el caso en el que no existe un desagüe inferior, el término C toma un valor nulo. Según el manual del software, en dicho caso el valor que adopta el exponente n es de 0.5, por tanto el desagüe actúa como un orificio. Utilizando dicho valor, es posible realizar una estimación aproximada del término C basándolo en el tiempo T que se necesita para drenar a una cierta profundidad D , tal y como se ve en la formulación utilizada para estimar el caudal de salida por un orificio:

$$C = 2 \cdot D^{1/2} \cdot T$$

Tanto el coeficiente como el exponente de drenaje son términos que vienen a determinar la tasa del flujo a través del dren o desagüe, siendo dependientes de la altura del agua que se almacena por encima de la cota del mismo desagüe.

La formulación empleada es por tanto de una variación de la fórmula comúnmente conocida como fórmula del orificio, proveniente del teorema de Torricelli, y por tanto la modificación de los parámetros de la misma tiene gran influencia en los resultados del modelo.

7.2.4. PROCESO Y RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA

A modo introductorio y previo a la obtención de los distintos resultados es muy importante mencionar que tal y como ya ha sido expuesto, la simulación del modelo utilizado en el presente estudio se ha realizado de forma continua a lo largo de todo un año, concretamente durante la totalidad del año 2014. Proceder mediante la realización de una simulación en continuo de un año en cuestión presenta la posibilidad de eliminar la imprecisión existente ligada a la definición del contenido de humedad en el suelo, parámetro crítico sobre todo cuando se realizan simulaciones de eventos simples, tal y como demuestra (Burszta Adamiak & Mrowiec, 2013) tras la realización de sus investigaciones de modelación de las cubiertas vegetadas a través de

módulo LID de SWMM, concluyendo que se trata del parámetro que mayor influencia tiene en la modelación, si esta tal y como se ha expuesto, se realiza considerando eventos simples. Para la realización del presente estudio se ha impuesto la condición de saturación total del suelo al inicio de la simulación, siendo el propio software el que de acuerdo con los parámetros meteorológicos introducidos en el modelo, determina el grado de saturación del suelo. Es por esto que en el estudio del arte se describe el decaimiento de la humedad en el suelo.

Ya centrados en el proceso propio de calibración, mediante la modificación de los parámetros de calibración establecidos, a través del modo de proceder deducido tras el proceso de análisis de sensibilidad y utilizando los eventos seleccionados para el proceso, tras obtener unos resultados conformes con los criterios anteriormente establecidos, se da conformidad al proceso de calibración, cuyos resultados se exponen a continuación tanto de forma gráfica como de forma numérica en una tabla.

Previamente se muestran los valores finales adoptados para cada uno de los parámetros de calibración empleados, diferenciando tal y como ya se sabe entre los valores obtenidos para las dos grandes tipos de superficie existente en la cubierta vegetada, como lo son la grava y la superficie correspondiente con el paquete de la propia cubierta vegetada.

	Natural Roof	
	Cubierta Vegetada	Grava
Flow coef.	0.3	0.01
Flow exp.	1.4	1
Offset Height (mm)	3	3

Tabla 7.3. Valores finales de calibración

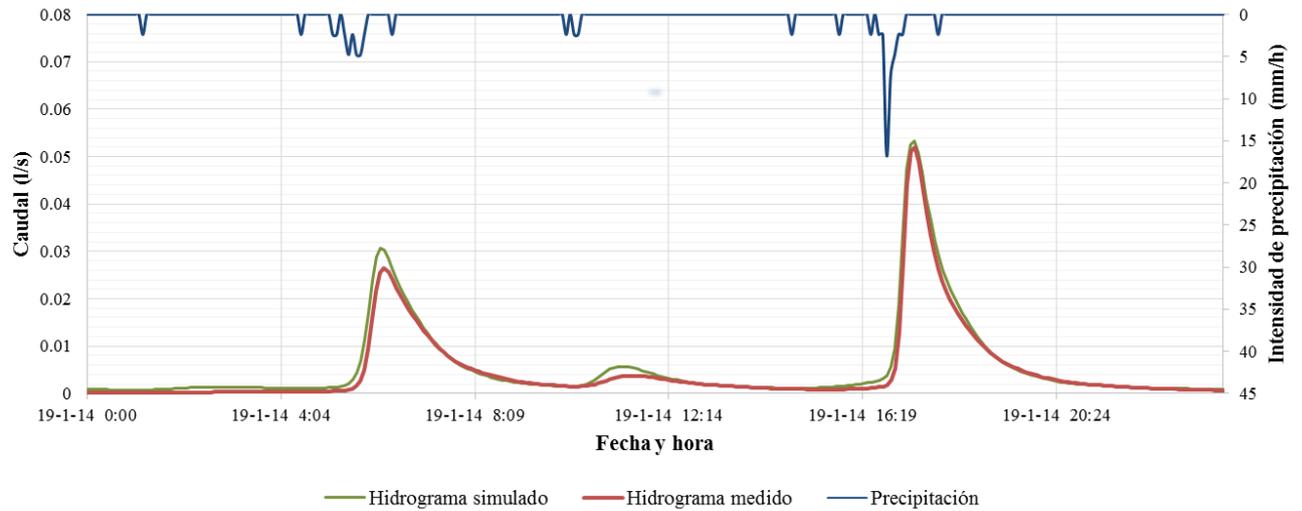


Figura 7.2. Hietograma de precipitación y comparación entre la escorrentía simulada y medida para el evento de lluvia del 19 de Enero del 2014, utilizado en fase de calibración, sobre la superficie *Natural Roof*.

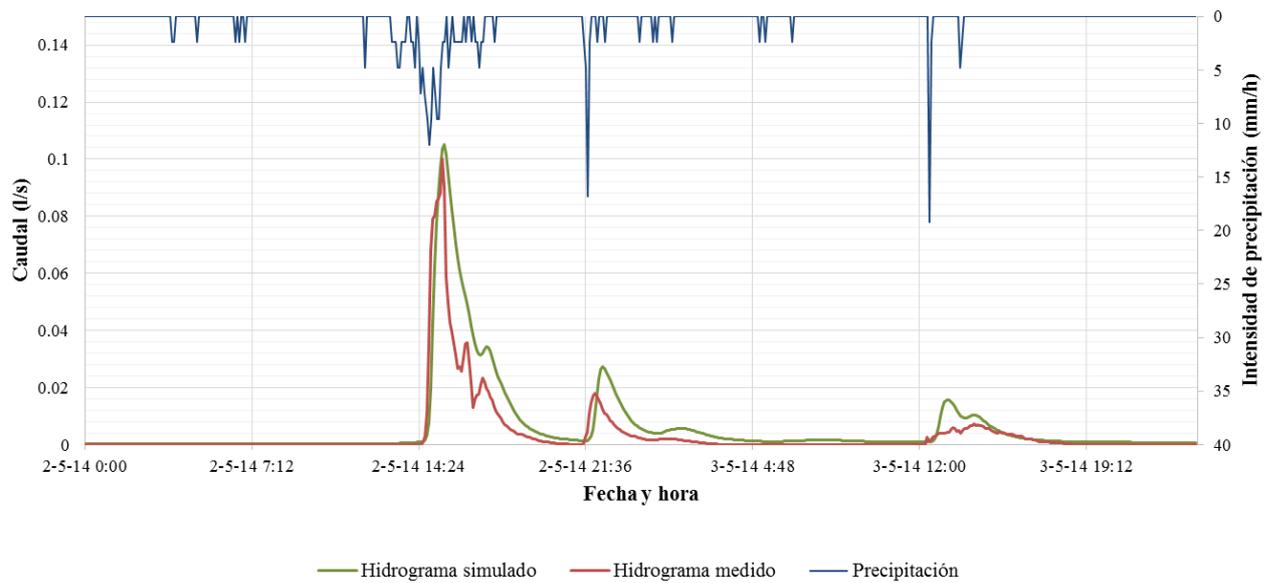


Figura 7.3. Hietograma de precipitación y comparación entre la escorrentía simulada y medida para el evento de lluvia del 2 y 3 de Mayo del 2014, utilizado en fase de calibración, sobre la superficie *Natural Roof*.

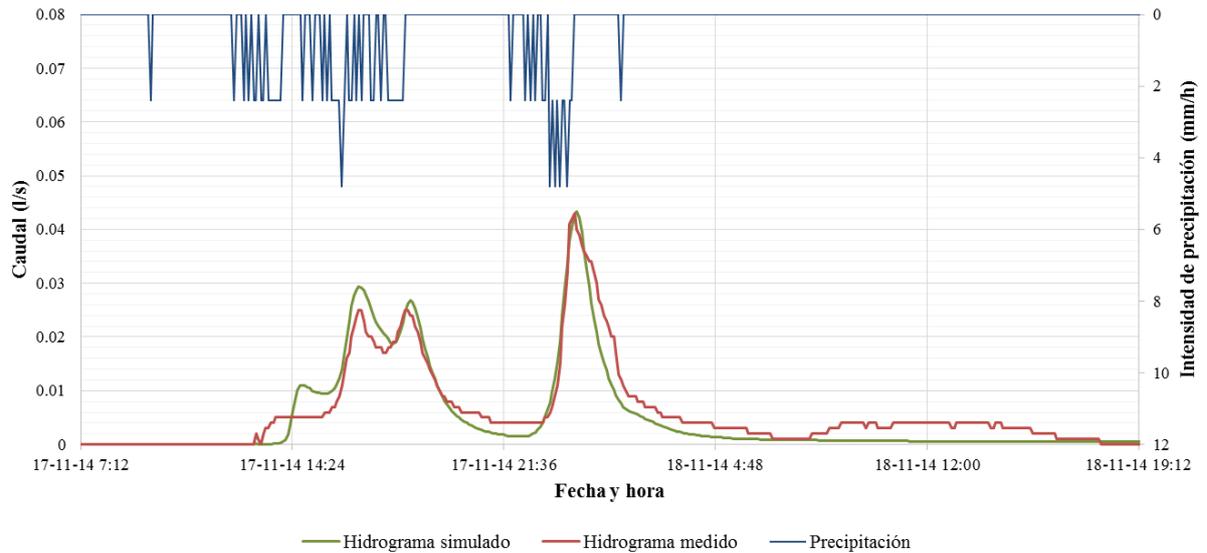


Figura 7.4. Hietograma de precipitación y comparación entre la escorrentía simulada y medida para el evento de lluvia del 17 y 18 de Noviembre del 2014, utilizado en fase de calibración, sobre la superficie Natural Roof.

De igual manera se exponen a continuación tanto los resultados gráficos como numéricos derivados del proceso de validación del sistema.

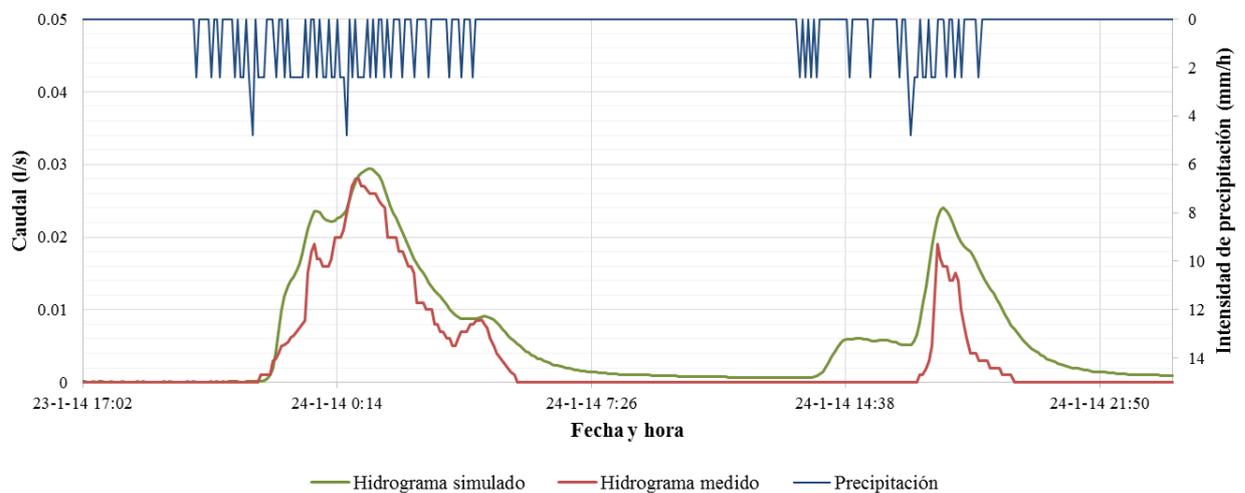


Figura 7.5. Hietograma de precipitación y comparación entre la escorrentía simulada y medida para el evento de lluvia del 23 y 24 de Enero del 2014, utilizado en fase de validación, sobre la superficie Natural Roof.

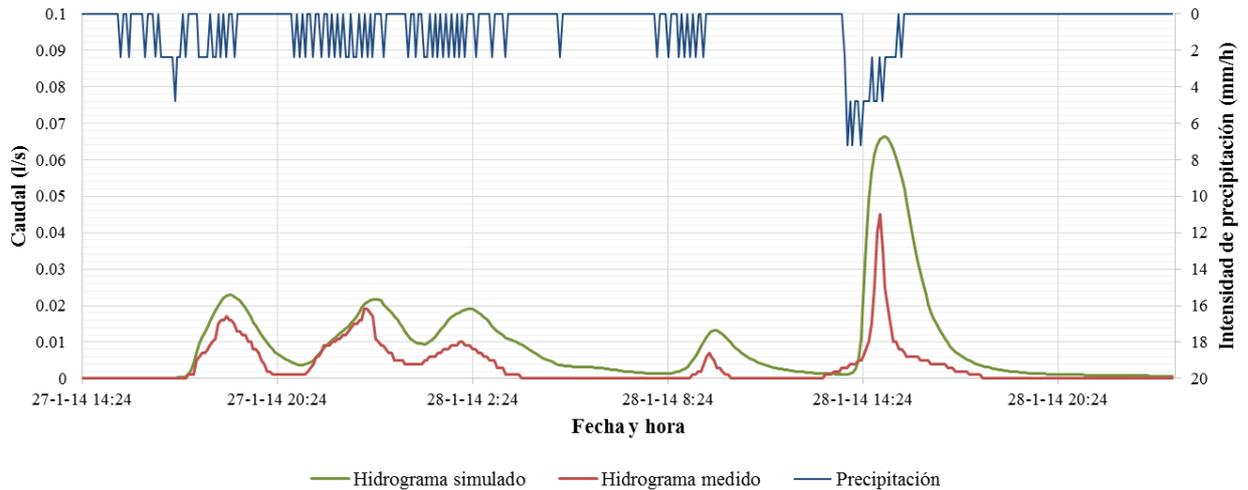


Figura 7.6. Hietograma de precipitación y comparación entre la escorrentía simulada y medida para el evento de lluvia del 27 y 28 de Enero del 2014, utilizado en fase de validación, sobre la superficie *Natural Roof*.

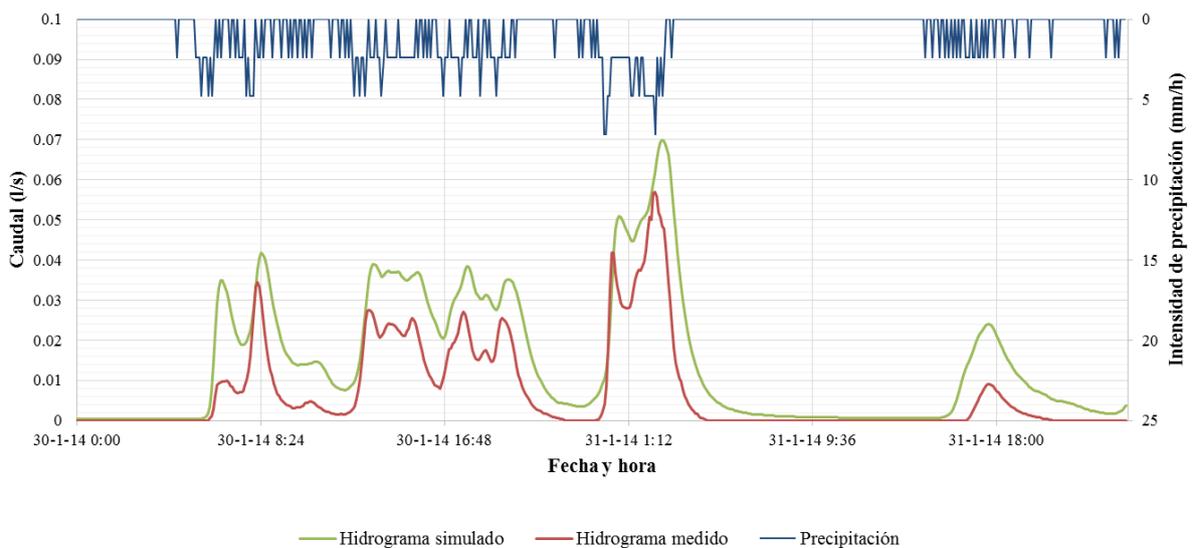


Figura 7.7. Hietograma de precipitación y comparación entre la escorrentía simulada y medida para el evento de lluvia del 30 y 31 de Enero del 2014, utilizado en fase de validación, sobre la superficie *Natural Roof*.

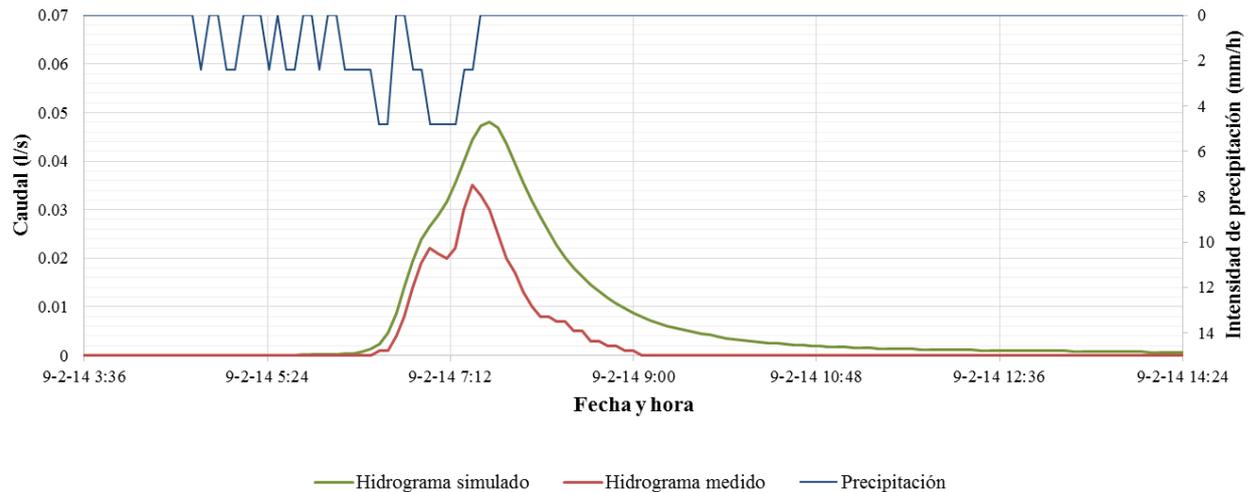


Figura 7.8. Hietograma de precipitación y comparación entre la escorrentía simulada y medida para el evento de lluvia del 9 de Febrero del 2014, utilizado en fase de validación, sobre la superficie Natural Roof.

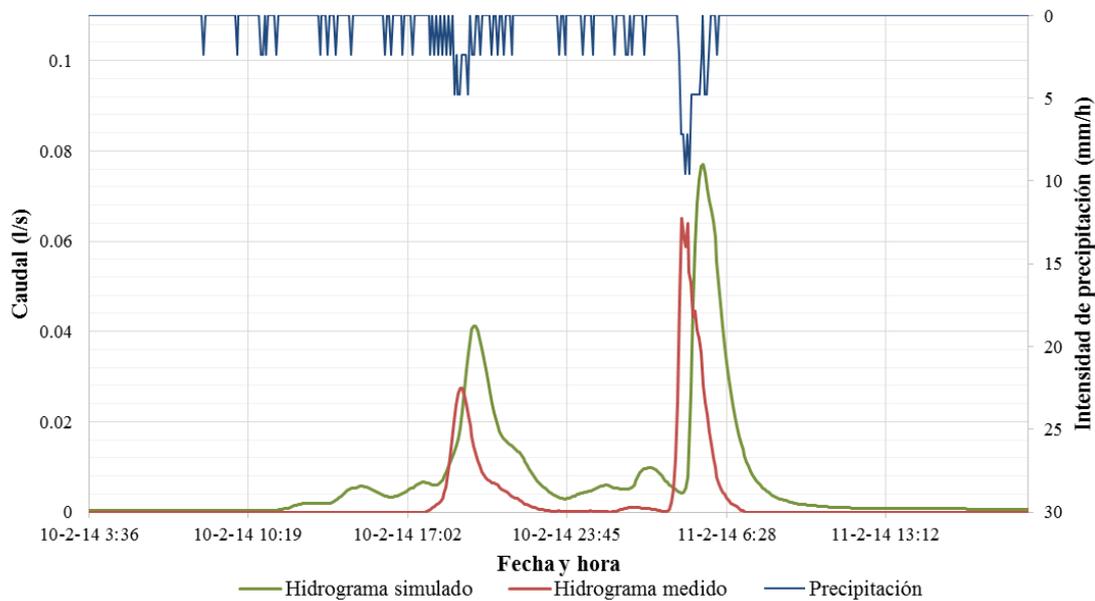


Figura 7.9. Hietograma de precipitación y comparación entre la escorrentía simulada y medida para el evento de lluvia del 10 y 11 de Febrero del 2014, utilizado en fase de validación, sobre la superficie Natural Roof.

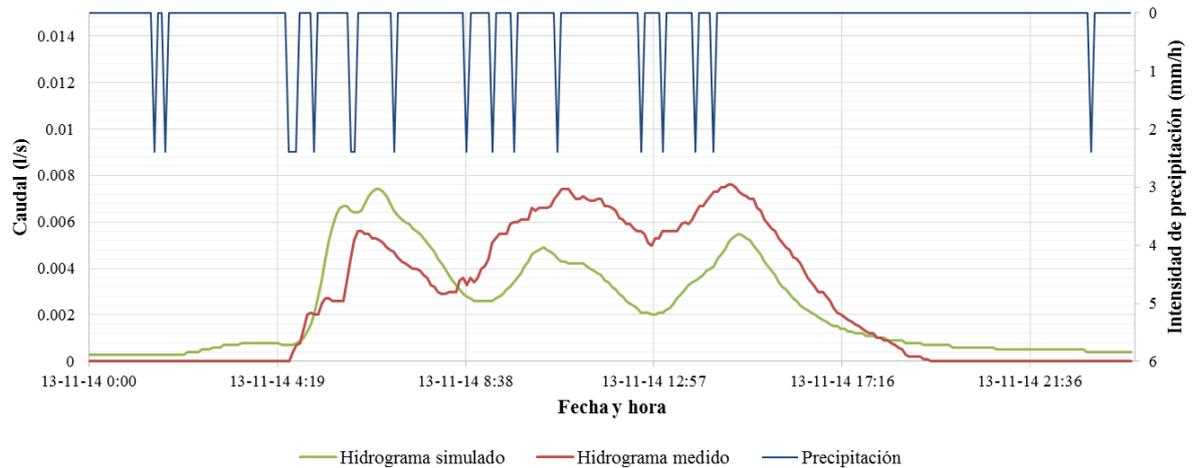


Figura 7.10. Hietograma de precipitación y comparación entre la escorrentía simulada y medida para el evento de lluvia del 13 de Noviembre del 2014, utilizado en fase de validación, sobre la superficie *Natural Roof*.

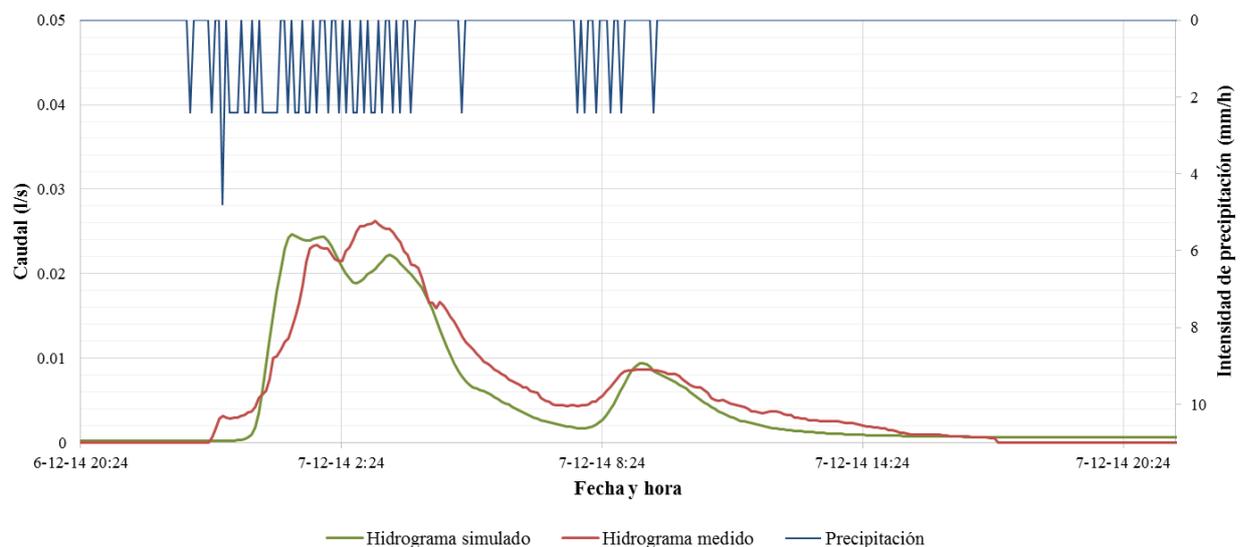


Figura 7.11. Hietograma de precipitación y comparación entre la escorrentía simulada y medida para el evento de lluvia del 6 y 7 de Diciembre del 2014, utilizado en fase de validación, sobre la superficie *Natural Roof*.

De manera numérica se puede apreciar con mayor detalle los resultados obtenidos mediante los cuales se ha dado conformidad tanto al proceso de calibración como de validación del sistema.

Cobertura	Evento	NSE	PBIAS	RSR
Native Roof	19 Enero ^{Cal}	0.97	0.05	0.17
	23-24 Enero ^{Val}	0.65	0.50	0.59
	27-28 Enero ^{Val}	-1.98	3.15	1.73
	30-31 Enero ^{Val}	0.25	1.39	0.87
	9 Febrero ^{Val}	0.21	1.57	0.89
	10-11 Febrero ^{Val}	-0.70	5.14	1.30
	2-3 Mayo ^{Cal}	0.61	0.05	0.17
	13 Noviembre ^{Val}	0.62	0.11	0.62
	17-18 Noviembre ^{Cal}	0.89	0.13	0.33
	3-4 Diciembre ^{Cal}	0.94	0.08	0.25
	6-7 Diciembre ^{Val}	0.91	0.11	0.30

Tabla 7.4. Valores obtenidos para los índices de Nash-Sutcliffe, PBIAS y RSR los cuales dan conformidad a los procesos de calibración y validación del sistema.

Cabe mencionar que para alguno de los eventos seleccionados, los resultados obtenidos de los distintos índices utilizados, pueden diferir en relación con los valores descritos como aceptables para dar conformidad al proceso ya sea de calibración o validación. Para el caso concreto del evento de validación del 27-28 de Enero, en caso de considerar que el evento finaliza a las 11:00 del día 28 (excluyendo el último aporte de precipitaciones), el valor de los índices utilizados mejora considerablemente, reduciéndose el NSE de -1.98 a 0.14, donde se evidencia que la parte final del chaparrón, que coincide con la más intensa, es la que reduce los valores obtenidos. Debido a los diversos errores de medición encontrados durante la campaña de medición del año de toma de muestras, a pesar de no poder afirmarlo con total certeza, se llega a la conclusión de la existencia de errores para estos eventos con valores del índice NSE negativos. Debido por tanto a que el modelo es capaz de reproducir con cierta precisión parte del hidrograma medido, suponiendo algún tipo de error de medición en la fase final del hidrograma, se toman como buenos los resultados obtenidos..

Por otro lado, a modo de disponer de la mayor cantidad de información posible, se han realizado los cálculos de la diferencia porcentual relativa (DPR) del volumen de escorrentía y el pico del hidrograma, entre los hidrogramas medidos y simulados para los distintos eventos utilizados en las fases de calibración y validación del sistema.

Cobertura	Evento	DPR	
		Pico (%)	Volumen (%)
Native Roof	19 Enero ^{Cal}	-2.47	-14.46
	23-24 Enero ^{Val}	-4.88	-58.97
	27-28 Enero ^{Val}	-38.27	-91.25
	30-31 Enero ^{Val}	-20.36	-66.82
	9 Febrero ^{Val}	-31.33	-84.81
	10-11 Febrero ^{Val}	-2.47	-14.46
	2-3 Mayo ^{Cal}	-16.74	-87.16
	13 Noviembre ^{Val}	2.67	16.30
	17-18 Noviembre ^{Cal}	-0.70	16.39
	3-4 Diciembre ^{Cal}	18.44	6.51
	6-7 Diciembre ^{Val}	6.27	8.16

Tabla 7.5. Valores DPR del volumen de escorrentía y el pico del hidrograma, entre los hidrogramas medidos y simulados para los distintos eventos utilizados en las fases de calibración y validación del sistema



8. OBTENCIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES MEDIANTE EL MODELO MATEMÁTICO

Tras la finalización del proceso de calibración y validación del sistema y la obtención de los distintos resultados, se concluye que el modelo es capaz de reproducir con cierta fidelidad la respuesta hidrológica de la cubierta vegetada.

Tal y como se desprende de los resultados obtenidos, en fase de calibración el valor del NSE se encuentra siempre por encima del 0.5, mientras que el SRS se encuentra por debajo de la unidad, lo cual significa que el modelo se caracteriza por disponer de un nivel prestacional aceptable. Las distintas representaciones gráficas de los eventos utilizados en la fase de calibración demuestran que el modelo se encuentra, tal y como se ha mencionado, capacitado para simular con una buena precisión la forma de los hidrogramas sea cual sea la forma de los mismos (refiriéndose a la variedad de hidrogramas con respecto a los picos que presenta y la magnitud de los mismos).

Mediante el cálculo de la DPR se puede concluir la idoneidad del modelo para la reproducción de los picos y del volumen total de los hidrogramas simulados. Tras el análisis de los resultados se observa que el modelo reproduce con mayor fidelidad los picos de aquellos eventos caracterizados por unas intensidades de precipitación media y alta. Por otro lado, la diferencia existente entre la fidelidad mediante la cual el sistema reproduce el volumen total del hidrograma, no es tan clara con respecto a los eventos de baja y alta intensidad de precipitación, siendo en todo caso un volumen calculado infravalorado en la gran mayoría de los casos. Finalmente, en fase de validación se confirma que el modelo se encuentra en condiciones de reproducir la realidad. Simplemente hay que mencionar que para la fase de validación del sistema los errores referentes a la estimación de los picos y los volúmenes son por lo general más altos que en fase de validación, pero siempre aceptables para dar conformidad al modelo.

Al igual que se encuentran por lo general resultados infravalorados, también existen algunos de ellos sobrevalorados en función de los eventos analizados. Dicho fenómeno se debe probablemente a la existencia y variación del coeficiente de cultivo que se ha descrito en el apartado 6.5 para realizar la estimación de la evapotranspiración.

A modo de interpretación final de los datos, se considera conveniente introducir un concepto, el cual tiene gran importancia en la actualidad en Italia. Se habla de “invariancia hidráulica”, concepto el cual ya se contempla en las leyes más modernas, y básicamente dice que las nuevas

urbanizaciones deben garantizar que el volumen de escorrentía generado en las mismas hacia los sistemas de alcantarillado o sistemas fluviales, al igual que los tiempos de concentración existentes, debe ser igual (o en su defecto aproximados) a los existentes previamente a la urbanización de la zona. Ante estas exigencias resulta prácticamente obligatorio disponer algún sistema de drenaje sostenible en la urbanización.

Debido a lo anteriormente expuesto, se considera interesante realizar una síntesis de la variación del volumen acumulado generado por la cubierta vegetada. Dicho volumen es el que se debería comparar con el generado previamente a la realización de las actuaciones para verificar que se cumple la invariancia hidráulica. Como resulta lógico, en el presente caso no es posible realizar dicha comparativa, pero tal y como se ha mencionado resulta interesante para la mejor comprensión de los resultados.

En el siguiente gráfico, aparte de representarse la intensidad de precipitación durante la totalidad del año 2014, se confronta el volumen acumulado de escorrentía generado por la cubierta NR frente al volumen acumulado de precipitación caído sobre el mismo.

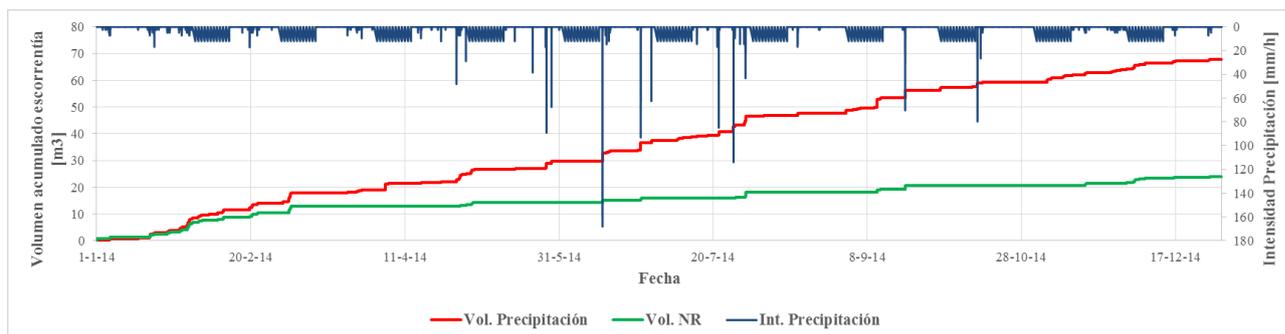


Figura 8.1. Hietograma de precipitación anual y comparación entre el volumen acumulado de lluvia sobre la superficie NR y el generado por el sistema de cubierta vegetada de dicha superficie.

Ya que se dispone del modelo completo, el cual aparte de contemplar el sistema NR contempla el sistema SR y el RR, se realiza una comparativa entre la totalidad del conjunto del sistema de cubierta vegetada. Cabe mencionar que como los distintos sistemas presentan superficies diversas, se presentan los resultados uniformizados mediante la división de los volúmenes acumulados y la superficie del sistema de cubierta vegetada.

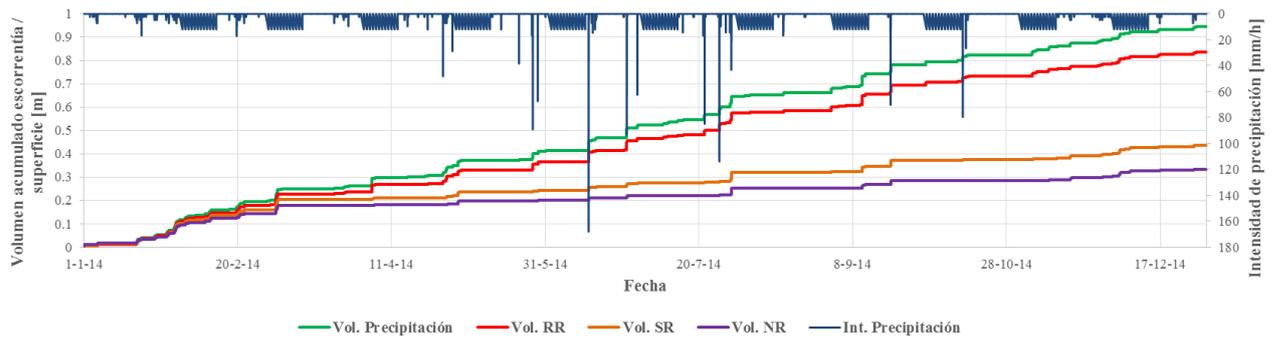


Figura 8.2. Hietograma de precipitación anual y comparación entre el volumen acumulado uniformizado con respecto la superficie de cada uno de los sistemas de cubierta vegetada NR y SR, al igual que la superficie RR.

Tras la obtención de los resultados se obtienen de manera clara las conclusiones: obviamente existe una mínima diferencia entre el total precipitado y el escurrido del sistema RR, debido a la evaporación que se produce sobre dicha superficie. En cuanto a la disminución del volumen de agua generada por la cubierta vegetada, la reducción del mismo es clara ya sea en referencia al sistema SR o al sistema NR, observándose que éste último dispone de unas mayores capacidades de retención de agua y por tanto genera un menor volumen de escorrentía frente al sistema SR.

A modo de cuantificar numéricamente el porcentaje de reducción del volumen de escorrentía se expone la siguiente tabla, en donde cabe aclarar que el porcentaje de reducción absoluto se refiere al que existen entre el volumen total acumulado de lluvia sobre las superficies y el generado por cada una de ellas, mientras que el relativo hace referencia a la reducción de volumen existente entre la superficie RR cada uno de los sistemas de cubierta vegetada, el cual es realmente el que interesaría a la hora de verificar el criterio de invariancia hidráulica.

Superficie	Área (m ²)	Vol. total	Vol. total	% Retención	
		precipitación (m ³)	escorrentía (m ³)	Absoluto	Relativo
Reference Roof	57	53.81	47.55	11.64	-
Sedem Roof	57	53.81	24.88	53.77	42.13
Native Roof	72	67.97	24.04	64.63	53.00

* Precipitación total 2014: 944 mm

Tabla 8.1. Cuantificación numérica y comparación del volumen total acumulado generado por cada una de las superficies que conforma el sistema de cubierta vegetada.

A partir de los resultados expuestos, se puede afirmar que a pesar del buen funcionamiento del sistema que contempla la vegetación Sedum, la cual es ampliamente utilizada, resulta más efectiva la implementación de cubiertas vegetadas las cuales se encuentren constituidas por la adecuada vegetación local, dado que a largo plazo, son las especies que mejor se adaptan al clima donde se encuentren implantadas.

Finalmente simplemente queda exponer que en periodos invernales, dadas las bajas capacidades de evapotranspiración del sistema, la eficiencia de la cubierta vegetada disminuye considerablemente. Por el contrario, durante el periodo estival y debido al aumento de la evapotranspiración, el sistema se presenta como un óptimo agente de laminación. En conjunto, a lo largo del periodo del año, tal y como se observa en los resultados numéricos anteriormente expuestos, la capacidad de retención de la escorrentía es muy considerable para ambos tipos de cubierta vegetada, obteniendo valores comprendidos entre el 42.13 y el 53.00 %.

A modo de observación, se considera interesante incluir la siguiente gráfica, en la cual se contemplan los valores medios mensuales referentes a precipitación y temperatura, el valor medio mensual referente a la evaporación, la cual según la modelación realizada debería representar la evapotranspiración del sistema, reflejando como el efecto de la misma es más pronunciado en los meses más cálidos del año.

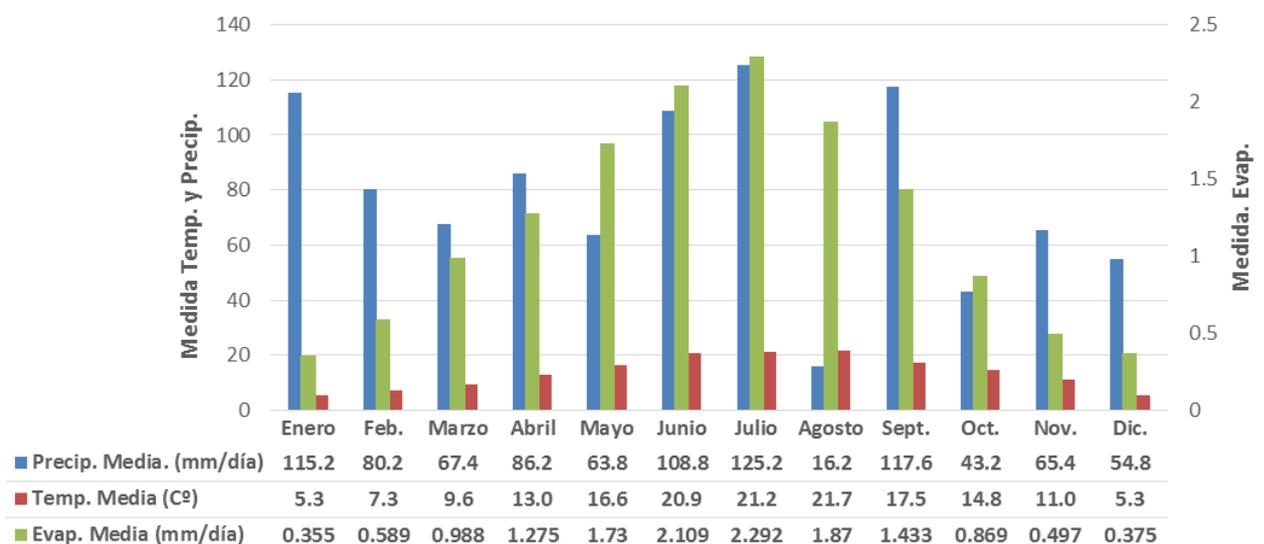


Figura 8.3. Confrontación entre los valores de precipitación y evaporación medios mensuales junto con los datos de temperatura media mensual.

Tal y como se puede observar, la presencia de la cubierta vegetada incrementa notoriamente el efecto de la evapotranspiración en el sistema, lo cual permite el menor ingreso de agua al sistema de drenaje.

A pesar de que ya ha sido mencionado en el momento de la descripción general de las cubiertas vegetadas, cabe remarcar un aspecto fundamental con respecto al funcionamiento de la cubierta vegetada en función de la época del año. La cubierta presenta mayores rendimientos de reducción de la escorrentía en periodos estivales que invernales, estando este efecto directamente relacionado con la evapotranspiración. Existe por tanto una proporcionalidad directa entre el aumento de la evapotranspiración y el aumento del rendimiento de la cubierta vegetada.

Con la totalidad de los resultados anteriormente expuestos, aparte de concluir con la modelación matemática de la cubierta vegetada al completo, se han expuesto diversos resultados referentes a la notoria mejora existente en el sistema tras la implantación de la cubierta, haciendo referencia en todo momento a criterios de cantidad de agua. Para “explotar” el modelo de una manera más exhaustiva, se profundiza un paso más en la obtención de resultados del modelo, para describir de una manera más detallada el funcionamiento del mismo.

A la hora de realizar el diseño de cualquier infraestructura de drenaje sostenible, tal y como se ha expuesto en anteriores capítulos, se tienen en cuenta criterios de cantidad. Sabiendo que los objetivos del diseño se enfocan por un lado hacia el control de los volúmenes frecuentes, es decir, se propone un objetivo de escorrentía nula para los eventos de precipitación más frecuentes (normalmente entre el umbral 5-10 mm), y por otro lado se basan en el control de volúmenes externos, con el objetivo de que los vertidos al medio natural se encuentren por debajo de un cierto umbral (recordar el concepto de “retorno hídrico ya introducido”), se analiza el rango de precipitaciones, en términos de volumen por evento, que es capaz de retener la cubierta vegetada, generando por tanto una escorrentía nula tras el evento de precipitación.

Tras realizar el análisis de los distintos eventos de precipitación, se extrae el volumen de dichos eventos y la frecuencia de excedencia (y de manera indirecta de no excedencia), al igual que se analizan las escorrentías generadas por la cubierta NR, obteniéndose el volumen de precipitación a partir a partir del cual genera escorrentía la cubierta. De la manera que se ha conceptualizado el modelo de la cubierta, es posible tal y como se sabe la extracción de datos diferenciados para cada uno de los subsistemas que conforman la cubierta tipo NR, por tanto en este caso resulta de especial interés el diferenciar dentro de la cubierta NR los distintos

espesores de la misma. Se exponen en la siguiente tabla los resultados obtenidos con respecto al volumen del evento de precipitación que es capaz de absorber cada uno de los subsistemas de la cubierta vegetada.

Cubierta NR	
Espesor (cm)	Vol. Evento (mm)
8	5.6
10	6.6
12	7.4

Tabla 8.2. Volúmenes de escorrentía capaces de retener la cubierta NR

En base a los valores expuestos en la tabla anterior, junto con el análisis de los volúmenes de los eventos de precipitación y sus probabilidad de no excedencia es posible obtener una serie de resultados muy interesantes como los siguientes.

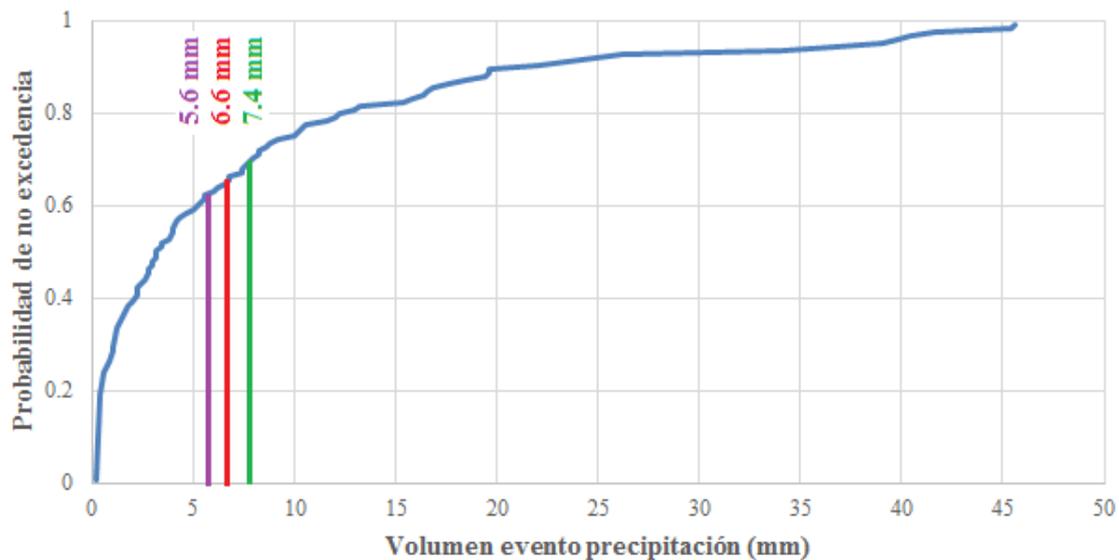


Figura 8.4. Control del volumen de escorrentías sobre la cubierta vegetada.

Mediante la gráfica anteriormente expuesta queda reflejado el porcentaje de eventos capaces de ser retenidos en su totalidad por la cubierta NR, no generando escorrentía alguna. Tal y como se observa, los volúmenes de precipitación capaces de ser retenidos por la cubierta, independientemente del espesor que se analice, se encuentran dentro del umbral de 5-10 mm. mencionado. En la siguiente tabla se expone de manera numérica, con tal de disponer los resultados de manera más clara, la interpretación de la gráfica anterior.

Cubierta NR	
Espesor (cm)	% Eventos capaces de absorber sin generar escorrentía
8	62.48
10	65.52
12	67.64

Tabla 8.3. Porcentaje de eventos con escorrentía nula absorbidos por la cubierta NR para en el periodo anual de estudio.

En la tabla anterior queda reflejada la gran utilidad de los SUDS, concretamente de las cubiertas vegetadas. Como se puede observar, a pesar de tratarse de eventos con volúmenes de precipitación pequeños, estos representan más del 60% de los registrados para el año de estudio 2014, es decir, la cubierta vegetada NR, independientemente del espesor de la misma, es capaz de no generar ningún tipo de escorrentía para el rango del 62-68% de la totalidad de los eventos anuales, lo cual resulta ser una cifra más que significativa. No quiere decir esto que para eventos de mayor volumen no tenga efecto la cubierta, sino que a su efecto de retención hay que sumarle el de laminación de los eventos, ya que en este caso si se producirá escorrentía.

Llegados a este punto, en base a los resultados anteriormente analizados, resulta interesante considerar la influencia existente entre el espesor del sustrato de la cubierta y el porcentaje de eventos capaces de retener generando escorrentía nula. Antes de eso cabe aclarar que los resultados serán aproximados y no válidos para la totalidad de las cubiertas vegetadas de igual manera, debido a que los resultados obtenidos para el presente estudio se realizan en base a unos eventos de precipitación concretos y característicos (refiriéndose con característicos y concretos a que son los registrados en el año 2014, en el emplazamiento donde se sitúa la cubierta). A pesar de disponer datos referentes únicamente a 3 espesores diversos, se puede observar que como resulta obvio, al aumentar el espesor es tanto mayor el volumen de agua de precipitación capaz de retener la cubierta, como el porcentaje de eventos de escorrentía nula, pero dicho aumento no se produce de una manera gradual, sino que disminuye progresivamente, tal y como se observa en la siguiente tabla.

Espesor (mm)	Vol. máx. evento retenido (mm)	Δ espesor (mm)	Δ vol. retenido (%)
80	5.6	-	-
100	6.6	20	17.86
120	7.4	20	12.12

Tabla 8.4. Incremento del volumen retenido tras eventos de precipitación en función del espesor de la capa.

Los resultados que se pueden observar en la gráfica anterior atienden a una explicación lógica. Sin adentrarse más profundamente en la influencia del espesor del substrato en la retención de agua, se puede observar que a medida que se aumenta el espesor, el volumen retenido crece, pero no de una forma igual, sino que cada escalón del incremento el porcentaje de retención aumenta en menor medida, tendiendo con espesores infinitos a incrementos de la reducción del volumen retenido nulos. Por otro lado, tal y como resulta lógico pensar, existe un espesor óptimo para cada tipo de cubierta, en función de las finalidades que persiga esta misma.

Ya para finalizar con el análisis de los resultados y conclusiones arrojadas por el modelo matemático de la cubierta vegetada caso de estudio, se ha analizado otro efecto básico de este tipo de cubiertas. Partiendo del análisis anterior, el referente a los eventos de precipitación que es capaz de absorber la cubierta, sigue el análisis referente al efecto laminador de la misma sobre los eventos superior al umbral a partir del cual se genera escorrentía.

Se considera necesario realizar una serie de aclaraciones antes de realizar el análisis. Tal y como se sabe, las superficie de la cobertura NR y la superficie impermeable del conjunto del sistema, toman valores distintos, por tanto a la hora de realizar el análisis de los resultados, se uniformizarán los caudales para eliminar la componente superficie, de manera que se puedan confrontar sin problema alguno. Por otra parte, a la hora de analizar la cobertura NR, se obtendrán los resultados en el punto de recogida de las escorrentías, sin diferenciar cada uno de los 3 subsistemas de los que consta, dado que las diferencias existentes entre cada uno de los espesores, a pesar de existir, son realmente insignificantes.

Para proceder con la obtención de resultados, se pretende analizar 2 de los eventos utilizados tanto en fase de calibración como validación, más concretamente se analizan los eventos del 19 de enero del 17-18 de noviembre, presentando los mismos un comportamiento de la precipitación diferenciado, en términos de duración e intensidad, con la finalidad de probar a posteriori si la forma de la precipitación influye también en el comportamiento del hidrograma de salida.

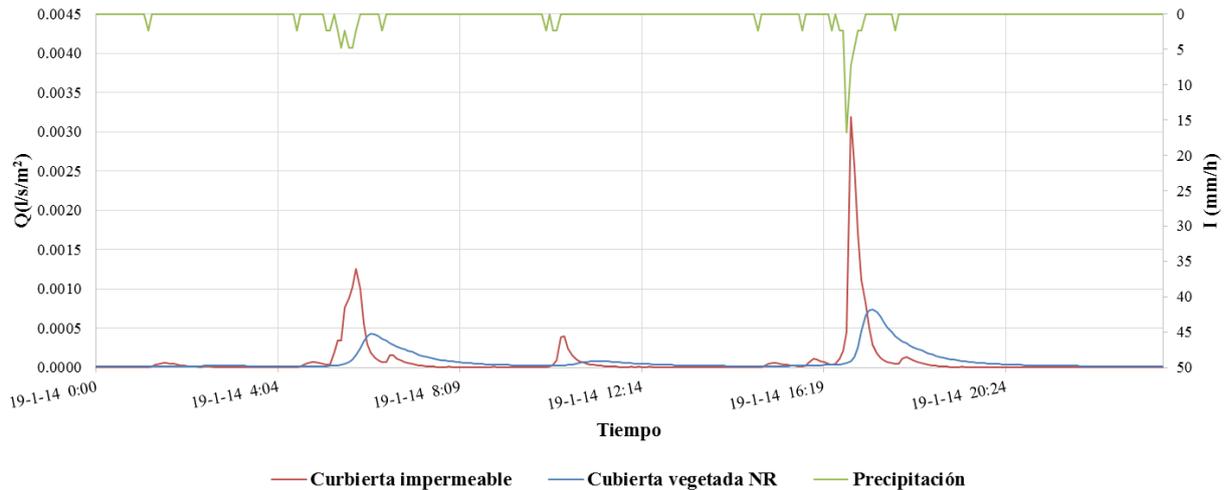


Figura 8.5. Comparación entre los hidrogramas de salida de la cubierta vegetada NR y la cubierta impermeable para el evento de precipitación del 19-01-2014.

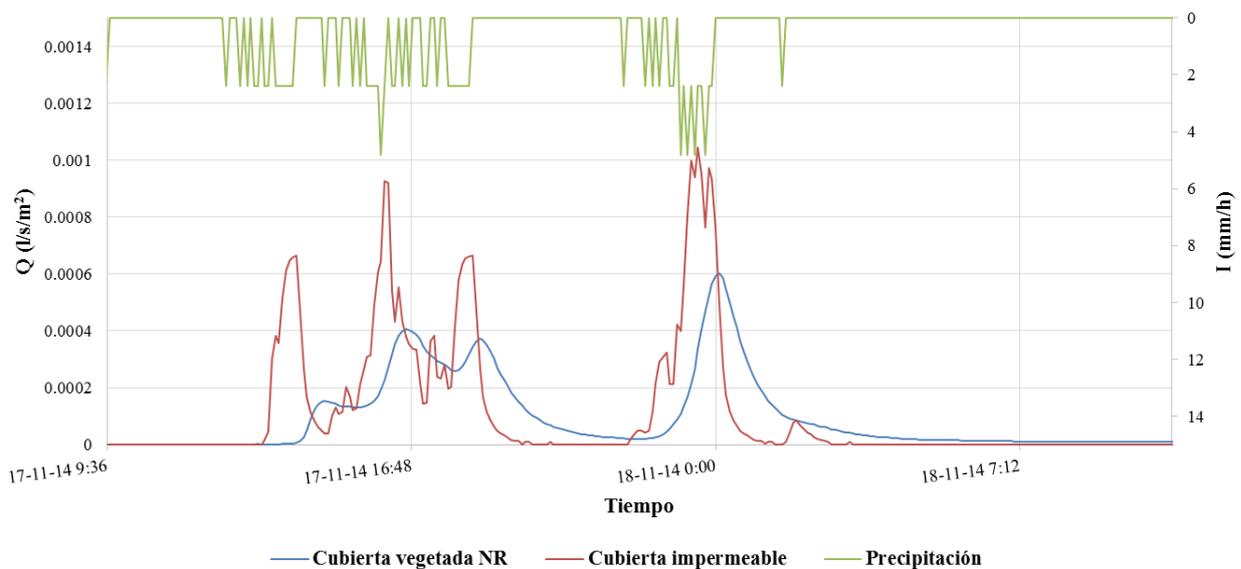


Figura 8.6. Comparación entre los hidrogramas de salida de la cubierta vegetada NR y la cubierta impermeable para el evento de precipitación comprendido entre el 17 y 18-11-2014.

Como se puede visualizar en las gráficas expuestas, el efecto de las cubiertas vegetadas es claro, existiendo como ya se sabe una disminución del volumen de esorrentía generado, y por otra parte se puede observar la atenuación de los caudales pico, el amortiguamiento en el tiempo a la hora de presentarse estos caudales pico y, en general, un comportamiento mucho más suavizado del hidrograma de salida, ausente de picos pronunciados por otra parte.

Si se analizan con más detenimiento los resultados obtenidos se pueden extraer otras conclusiones muy interesantes. En primer lugar cabe exponer las características de cada uno de

los eventos de precipitación, para posteriormente entender con más facilidad el comportamiento del hidrograma. Por una parte, la precipitación del 19 de enero resulta ser, con respecto a la segunda de las analizadas, de corta duración e intensidad moderadamente alta (refiriéndose a los picos alcanzados), mientras que el evento de precipitación del 17-18 de noviembre es característica por ser de larga duración y menor intensidad. Se puede concluir que de forma general, se produce un retardo aproximado de 1 hora en la aparición de escorrentía independientemente de la tipología de evento, mientras que con respecto a la reducción de los caudales pico, el efecto es mayor en eventos de lluvia de corta duración que en los de mayor duración, en donde la disminución de los picos disminuye de manera progresiva. Dicho efecto atiende con total seguridad al efecto de la saturación del sustrato, el cual presenta mayor capacidad de laminación de picos a menor saturación. Ya por último, con respecto al efecto de la reducción de caudales pico en función de la intensidad de la precipitación, cabe indicar que para el análisis realizado no existe sensibilidad notable a la variación de la intensidad (al contrario que con la duración del evento), pero realizando un razonamiento lógico, a igualdad de saturación de suelos, la intensidad del evento de precipitación, cuando sea superior a un determinado rango de valores, influirá en la respuesta de los hidrogramas de salida, presentando estos unos picos menos suaves. Para la cubierta vegetada analizada las reducciones de los picos de escorrentía se encuentra dentro del rango de 23 al 60%, influenciados principalmente, tal y como se ha expuesto, por el tiempo de duración del evento de precipitación (debido a la saturación del sustrato).

Con todo lo expuesto con anterioridad, se concluye el análisis de resultados y conclusiones realizado sobre la cubierta vegetada NR, el cual se ha realizado en base al modelo matemático generado con tal finalidad.

9. APLICACIÓN A UN CASO REAL CON TECNOLOGÍAS DE DRENAJE SOSTENIBLE

9.1. INTRODUCCIÓN

Finalizado el trabajo de calibración y validación del modelo matemático, al igual que la obtención de resultados mediante el mismo que describen el funcionamiento de la cubierta vegetada analizada, se persigue la aplicación de los resultados a un caso de estudio real en el cual se contemplan diversas tecnologías de drenaje sostenible. A priori, partiendo de los parámetros de calibración obtenidos respecto a las cubiertas tipo NR y los ya conocidos de las SR, se pretende evaluar los beneficios de la aplicación de ambos tipos de cubiertas en la urbanización, pero tal y como se ha mencionado, al contemplar la urbanización con un abanico más grande de tecnologías de drenaje sostenible, se pretende analizar no solamente el efecto de las cubiertas vegetadas, sino del conjunto de los SUDS y otros sistemas contemplados.

En el año 2005 se realizó en la ciudad de Bolonia un proyecto de una urbanización que contempla diversas técnicas de drenaje sostenible. En el momento de la concepción de dicho proyecto se contemplaron las técnicas de drenaje sostenible a modo de técnicas innovadoras, que obviamente son mucho más respetuosas con el medio ambiente y, especialmente con el recurso del agua, pero no contemplando el concepto de invariancia hidráulica ya introducido en el anterior capítulo. En la actualidad por tanto, aparte de tratarse de tecnologías innovadoras, son indispensables para cumplir con el criterio mencionado.

El proyecto de urbanización contempla tecnologías de drenaje sostenible de diversos tipos como lo son las cubiertas vegetadas, superficies verdes, cisternas de almacenamiento de las aguas de las cubiertas, etc. También contempla un depósito de recogida de las aguas de primera lluvia y un estanque de retención de las aguas pluviales.

Partiendo de la existencia de un modelo matemático en SWMM de la urbanización, el cual no utiliza los módulos LID existentes en la actualidad y presenta numerosos errores referentes a la configuración del sistema, se realiza una actualización completa del mismo. Actualizado el modelo y tras la posterior obtención de los datos necesarios para la realización de las simulaciones en periodo extendido (26 años de serie histórica), se obtiene finalmente una serie de resultados, los cuales en primer lugar evidencian los beneficios de disponer diversas tecnologías de drenaje sostenible, y en segundo lugar muestran la comparativa referente a los beneficios obtenidos tras la disposición de diversas técnicas de drenaje sostenible, lo cual

servirá en trabajos futuros para la toma de decisiones finales con respecto a la conveniencia o no de disponer cada una de dichas técnicas contempladas en el proyecto.

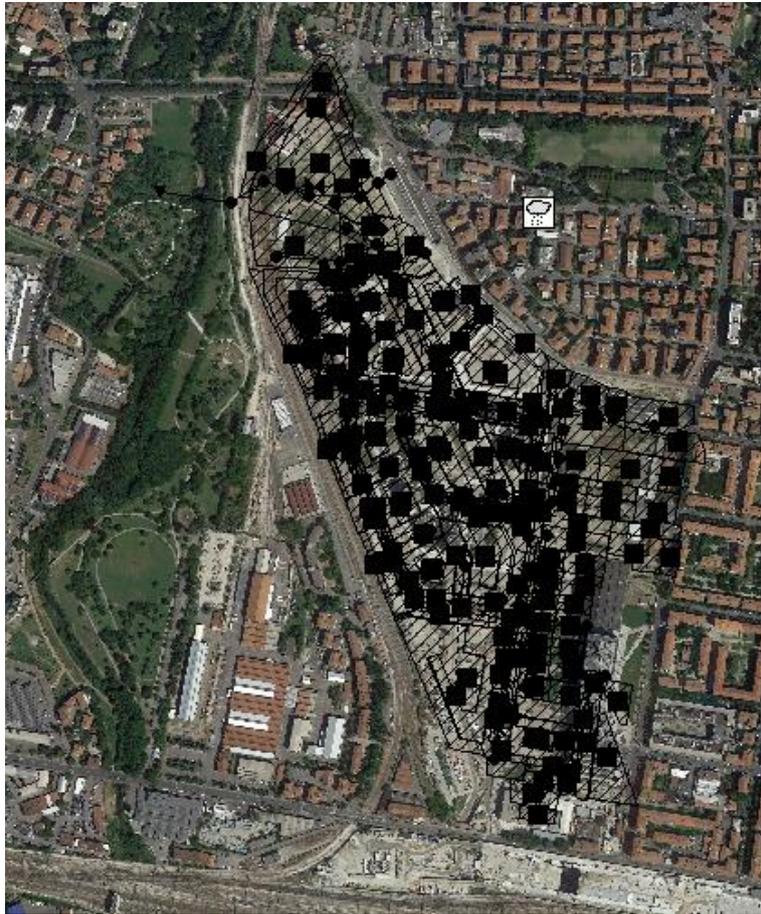


Figura 9.1. Esquema del modelo finalizado sobre ortofoto de la zona de actuación.

9.2. CONTEXTUALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Antes de empezar a trabajar con el modelo matemático, a sabiendas de que el mismo necesita una labor de corrección y actualización, es necesario realizar un análisis previo del proyecto, para de esta manera poder entender cómo funciona la totalidad del sistema de drenaje y aprovechamiento del agua del mismo, y poder posteriormente realizar las modificaciones oportunas de manera más eficiente.

El área objeto de estudio mide 28.50 hectáreas, la cual se encontraba prácticamente en su totalidad urbanizada, por lo que ya en 2005 se realizó la demolición completa de las edificaciones existentes y el levantamiento del suelo pavimentado, todo esto tras la elaboración y aprobación del proyecto. En la siguiente imagen se puede visualizar cual era el aspecto previo

y el resultado futuro al cual se pretende llegar tras la finalización del proyecto, el cual como más adelante se expone, se encuentra paralizado y por tanto por finalizar.



Figura 9.2. Comparativa entre el aspecto del área objeto de estudio previo proyecto y simulación del aspecto futuro tras la realización del mismo (Comune di Bologna)

Las superficies verdes que pueden observarse en la figura anterior, las cuales se incluyen dentro de las tecnologías de drenaje sostenible, juegan un papel fundamental en la concepción de la presente urbanización, tanto a nivel urbanístico como (principalmente) hidráulico. Previo al nuevo proyecto, el área presentaba aproximadamente un 98% de la superficie impermeable, existiendo únicamente un 2% de superficie permeable, la cual se aumenta significativamente con el nuevo proyecto, hasta alcanzar el 40% de superficie permeable.

De la totalidad del sistema de colectores, que se divide en tres partes diferenciadas, para la finalidad del presente proyecto solamente cabe destacar la existencia de colectores específicos para la conducción de las aguas procedentes de la escorrentía de las superficies al nivel del terreno, como lo son las calles, las zonas de aparcamiento y las superficies verdes, y por otra parte el sistema de colectores dispuesto para la recolecta de las aguas procedentes de las cubiertas vegetales, las cuales posteriormente se recuperan para su uso en el sistema de riego.

Cada una de las redes mencionadas se encuentra directamente relacionada con alguno de los sistemas de drenaje sostenible y/o aprovechamiento de agua de la urbanización, lo cual merece ser estudiado con más detenimiento.

Situada en la parte norte del área del proyecto se localiza un embalse de retención (la superficie del mismo es cobertura vegetada) de las aguas provenientes de la superficie a nivel del terreno de la urbanización, donde por tanto descarga el sistema de colectores mencionado destinados a la recogida de estas aguas. La descarga del mismo se produce de manera gradual al río presente al Oeste de la urbanización, de manera que no se superen los 10 litros/segundo y por hectárea vertidos, los cuales corresponden a la escorrentía generada por un terreno agrícola. Aparte del sistema de drenaje, el estanque de retención consta de un aliviadero. La capacidad útil del mismo es de $7.200 m^3$. Resulta importante destacar que la finalidad del embalse es la de retener el agua de la escorrentía generada en la zona, para su posterior vertido al medio natural, es decir, no se contempla la infiltración en el mismo, debido aparte de la propia funcionalidad del embalse, a la poca permeabilidad del terreno donde se sitúa el mismo.

No toda el agua proveniente de la superficie a nivel del terreno es enviada al embalse de laminación. Debido la carga contaminante por la que se caracterizan las primeras aguas de escorrentía de la superficie, el denominado “first-flush”, cierta parte de las mismas no es enviada al embalse de laminación, sino que es recolectada y almacenada en un depósito o tanque de primera lluvia, para posteriormente ser enviada a la EDAR y allí ser tratada. El tanque de tormenta contemplado tiene un volumen total de $930 m^3$. Como curiosidad cabe añadir que previo al proyecto ya existe un tanque de primera lluvia, y el proyecto ubica en la parte superior del mismo el nuevo tanque, pero a nivel de gestión del agua no tiene influencia alguna en el presente trabajo. Por tanto el volumen útil de la parte del tanque de tormenta que incumbe el proyecto es de $315 m^3$.

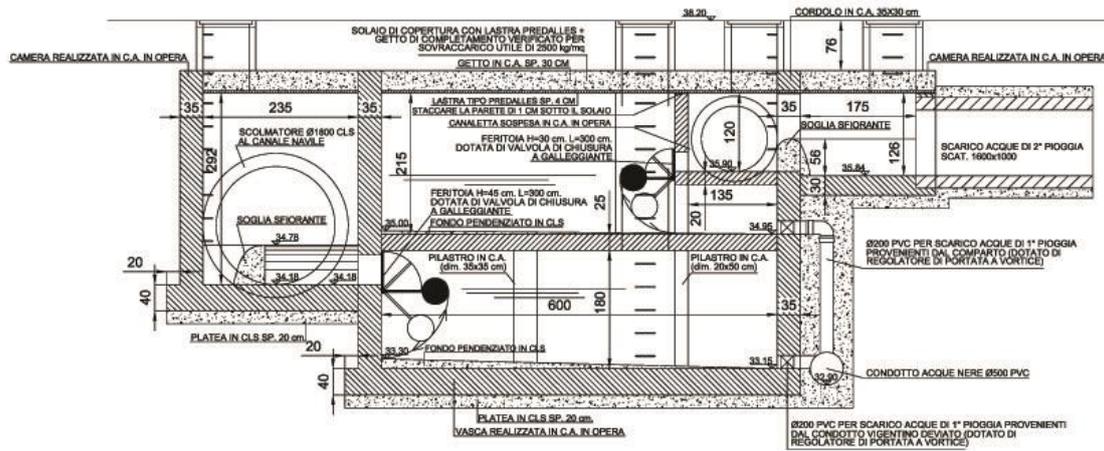


Figura 9.3. Sección transversal del tanque de tormenta proyectado.

Por otra parte, cerca de 45.000 m^2 se materializan en cobertura verde dispuesta en las cubiertas de los edificios. El agua proveniente de la escorrentía de dicha superficie se recogerá mediante otra red de colectores, los cuales conducen el agua hasta dos depósitos de recogida para el posterior aprovechamiento del agua en el riego de las superficies verdes existentes. Dichos depósitos vienen equipados con un sistema de bombeo para satisfacer las necesidades del riego. Se contempla en proyecto la posibilidad de aprovechar el agua tanto para riego como para ornamentación (tras la realización de las simulación se observa que el uso ornamental queda descartado, como posteriormente se expone). La capacidad de cada uno de los depósitos es de 650 m^3 , y ha sido calculada en base a poder albergar (entre ambos depósitos) el agua necesaria para satisfacer las necesidades de riego de los 6 meses en los que se contempla el mismo.

Con respecto a la tipología de cubierta vegetada a disponer se considera la posible implementación de cubiertas del tipo SR y NR.

Por otro lado, centrándose en las tecnologías de drenaje sostenible, el proyecto contempla la disposición de la que denominan diagonal verde y un total de 2 parques. La diagonal verde no es más que un parque lineal, el cual conecta los dos parques existentes.

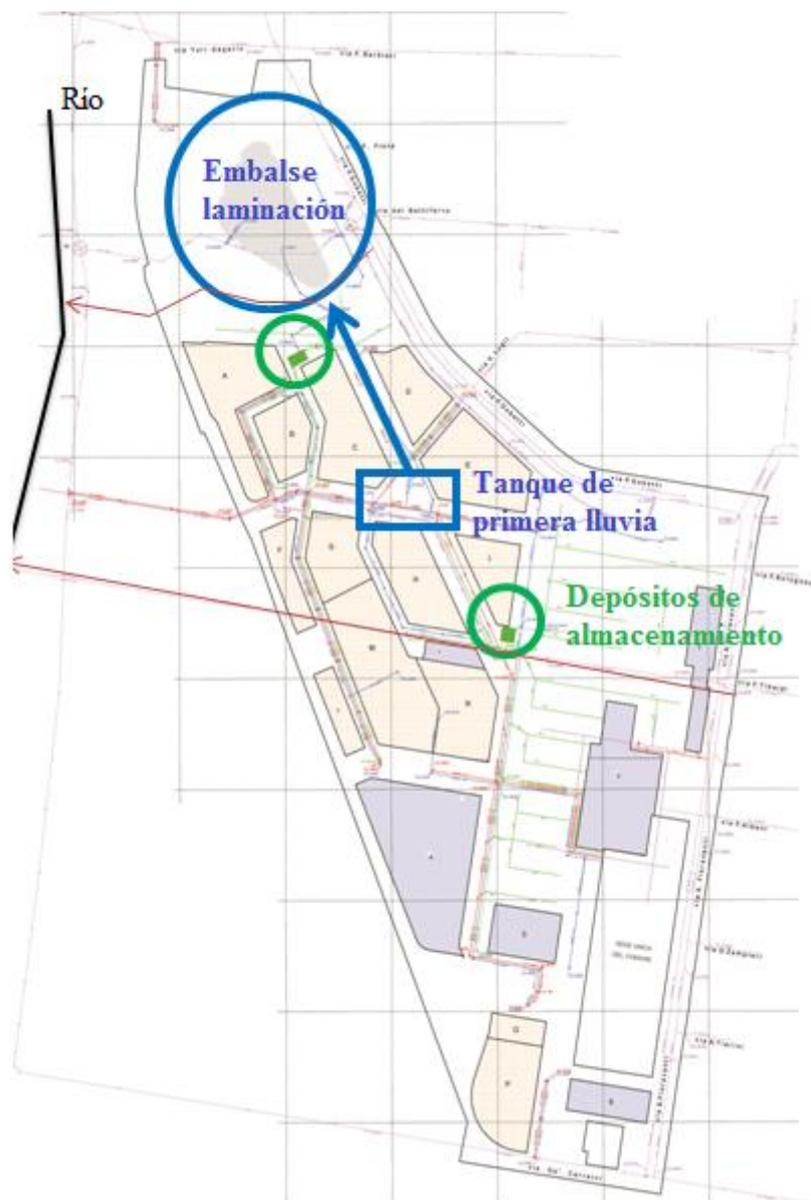


Figura 9.4. Esquema simplificado de la situación de los sistemas de aprovechamiento de agua.

Todo lo anteriormente mencionado es lo que se encuentra contemplado en el proyecto, el cual como ya se ha mencionado, se encuentra paralizado, no significando esto que no se haya realizado ninguna actuación en la zona. Tras realizar una visita a la zona y haber hablado con uno de los ingenieros responsables del proyecto se ha podido saber que en la actualidad ya se ha realizado toda la actuación referente a la demolición de los edificios existentes previo proyecto, al igual que se han construido dos edificios (uno totalmente deshabitado y otro a medias), al igual que un edificio singular de la urbanización como es la residencia de estudiantes. Únicamente se ha dispuesto, aparte de la red de agua potable, la red de aguas negras de la totalidad de la urbanización. En cuanto a los edificios ya construidos, la residencia de

estudiantes no tiene implementada la cubierta vegetada en la actualidad, en cambio, los otros dos edificios, tienen ya implementada la cobertura verde. Dicha cobertura es del tipo SR y fue instalada a mediados del año 2015. Por el momento la escorrentía generada en estos edificios no es aprovechada posteriormente.



Figura 9.5. Cubiertas vegetadas ya instaladas.

9.3. MODELO EXISTENTE

Tal y como se expone por (Gambi, et al., 2011), en el trabajo previo realizado, se llevó a cabo una simulación hidráulica mediante el modelo SWMM, para evaluar el comportamiento de diferentes soluciones de gestión de las aguas de escorrentía urbanas. Particularmente se analizaron diferentes soluciones para la reducción de los picos de escorrentía: estanques de retención, cubiertas vegetadas y tanques de infiltración. La reutilización del agua para el riego también se analizó en dicho estudio con la finalidad de evaluar la reducción del volumen que escurre hacia el sistema de alcantarillado. Por otra parte, las simulaciones se hicieron para series de lluvia de larga duración, concretamente con registros de lluvias de 15 años.

Para realizar dicho trabajo se toma una zona ya estudiada, concretamente en 2011, por la propia Universidad de Bolonia, de la cual ya existe un modelo en SWMM. Dicho estudio consistió también en el análisis de los resultados en términos principalmente de volúmenes de escorrentía tras la implantación de algunas técnicas de drenaje sostenible. Cuando se realizó el estudio, no existía aún el módulo LID utilizado para la realización del modelo de la cubierta vegetada estudiada, y por tanto dicho modelo se conceptualizó mediante la utilización de diversos

elementos que incorpora el software SWMM, tal y como se analiza más detenidamente en los siguientes apartados.

Se adoptó una rugosidad en función del coeficiente de Manning de 0.0125 para el PVC y de 0.0143 para las conducciones de hormigón. Las cubiertas vegetadas fueron modeladas por medio de tanques (unidades de almacenamiento) con una salida del orificio circular igual a 50 mm.

También se incluyeron en el modelo las dos cisternas destinadas al almacenamiento de agua utilizando elementos de almacenamiento de agua, cuyas características a definir son la altura absoluta, el almacenamiento máximo y la propia geometría. Una bomba que lleva a cabo las aguas de drenaje de riego ha sido asociada a cada una de las cisternas. La bomba se regula mediante un control que la mantiene apagada durante los meses de invierno y la enciende durante los meses de verano, de abril a septiembre, de acuerdo con la demanda de agua para el riego. El flujo de la bomba asumido era de $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$.

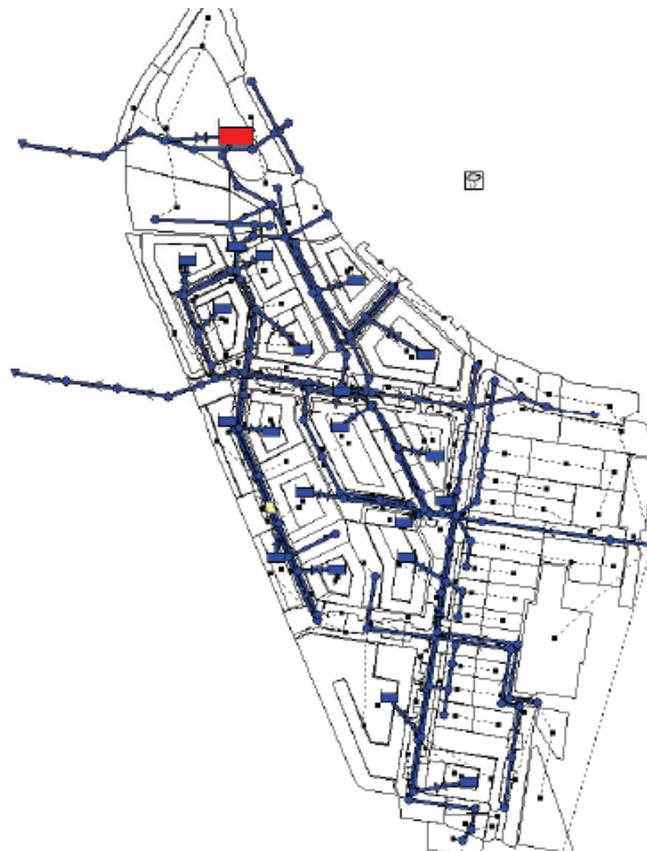


Figura 9.6. Esquema de la red.

Los parámetros de la cuenca que permiten la transformación de la lluvia en escorrentía urbana se han asumido de 0.01 el coeficiente de Manning para el área impermeable, la pendiente media de la superficie de 0.5%, la profundidad de la depresión de almacenamiento de 2 mm en el área impermeable y de 5 mm en el área permeable. La infiltración del área permeable se modeló con la ecuación de Horton con una tasa máxima de infiltración de 120 mm/h y una tasa de infiltración mínima de 10 mm/h, constante de desintegración igual a 4 1/h.

Con el fin de analizar el comportamiento de todo el sistema (26 años de eventos), se registró la lluvia cada 15 minutos. Por otro lado, para poder simular el efecto de la evapotranspiración para las cubiertas vegetadas, se introdujeron los datos de temperatura para ese periodo.

La evaporación y la transpiración se calculan en función de la temperatura y la disponibilidad de agua en el suelo.

9.4. REVISIÓN Y CORRECCIÓN DEL MODELO EXISTENTE

El área objeto de análisis ya fue estudiada hidráulicamente, por tanto se parte de un modelo matemático realizado mediante SWMM. Cuando se realizó dicho modelo, no existían los distintos módulos LID que se han utilizado para la realización de la primera parte del presente trabajo. Las cubiertas vegetadas fueron conceptualizadas mediante la aproximación de los mismos a través de depósitos, los cuales almacenaban el agua de lluvia y la drenaban gradualmente. Existe por tanto una primera labor de actualización del modelo mediante la implementación de las cubiertas vegetadas a través de la utilización de los módulos LID. Por otra parte, debido a la existencia de numerosos errores en la conceptualización del modelo, ha sido necesario realizar una revisión de los planos del proyecto, para posteriormente modificar los errores existentes. Otro de los cambios significativos resulta del hecho de realizar las simulaciones en periodo extendido (del mismo modo que se realiza en la primera parte del trabajo), ya que en el modelo original se realizaban las simulaciones mediante la utilización de tormentas sintéticas- Existe por tanto una labor de búsqueda de la totalidad de la información necesaria para realizar dicha simulación en continuo, la cual consta de una serie histórica de 26 años, desde el 1990 al 2015. Seguidamente se exponen los cambios realizados más significativos:

- Han sido retiradas distintas conducciones existentes en el modelo las cuales no se correspondían con la zona de actuación, y por tanto no interactuaban con en modelo. La

supresión de dichas conducciones incumbe la supresión de las distintas áreas que drenaban a ellas.

- Ha sido incorporada una nueva subcuenca impermeable correspondiente con la superficie del estanque de laminación. Dicha superficie no se contempla en el modelo inicial por lo que conlleva una reducción del área drenante a la misma.
- Se han modificado los coeficientes de descarga (discharge coefficient) en las válvulas de descarga, de 1.77 a 2.66.
- Se han modificado las longitudes de los distintos vertederos (weirs), colocándose longitudes de 0.7 m. tal y como se contempla en el proyecto.
- En tanque de primera lluvia se ha introducido un control adicional, para que el mismo comience a vaciarse únicamente cuando el evento de lluvia haya finalizado y no antes, tal y como se contempla en la normativa italiana en vigor.
- Han sido modificados los diámetros de algunas de las conducciones existentes en función de las indicaciones del proyecto.
- El modelo presentaba multitud de subcuencas conectadas entre ellas mismas o no conectadas, las cuales si forman parte del área de estudio, por tanto se procedió con la corrección de dichos errores, conectando cada una de las subcuencas a los puntos correspondientes.
- Se han introducido distintos módulos LID correspondientes con las cubiertas vegetadas del tipo NR y SR, con los parámetros obtenidos en la primera fase del proyecto. Para la definición de cada una de las cubiertas, ya que cada uno de los mismos contempla parte de estructura verde y parte de grava destinada a las labores de mantenimiento, se ha considerado un 90% la superficie destinada a la cobertura vegetal y un 10% a la grava. Para la definición de las cubiertas correspondientes con el tipo NR, se ha dispuesto para la definición de la cobertura vegetal los parámetros característicos que definen el paquete con 10 cm. de espesor. Dicho modo de proceder viene justificado por la propia configuración de la cubierta NR estudiada en la fase de calibración, ya que el mismo se componía de 3 paquetes diversos con espesores comprendidos entre los 8 y los 12 cm., por tanto se ha tomado el valor intermedio para las simulaciones.

- Sobre el tanque de primera lluvia se han realizado cambios con respecto a los controles del mismo, estableciendo que el mismo empieza a verter una vez finalizado el evento meteorológico y no antes, tal y como preinscribe la norma italiana.
- Modificación de los controles que regulan el funcionamiento de las bombas del sistema. Tras revisar el modelo se pudo observar que las bombas funcionaban durante la totalidad del año, mientras que en proyecto se establece un periodo de riego de 6 meses. Dicho fallo en la conceptualización del sistema provoca grandes variaciones sobre los resultados finales a analizar.

El modelo final consta de un total de 179 subcuencas, 123 conducciones y 128 nodos. Para particularizar los distintos elementos del sistema, el modelo cuenta con un total 4 “Storage Units”, 3 “Pumps”, 3 “Weirs”, 2 “Orifices” y un total de 3 “Controls”.

Los denominadas “Storage Units” son los sistemas de almacenamiento de agua empleados para modelar las dos cisternas de almacenamiento de agua, el tanque de primera lluvia y el estanque de retención y laminación de agua. “Pumps” hace referencia a las bombas contempladas en el modelo, de las cuales 2 de ellas son las existentes junto con los depósitos de almacenamiento de las aguas provenientes de las cubiertas vegetadas y la otra ha sido empleada como instrumento complementario para la modelación del riego, no existiendo esta en proyecto. Los denominados “Weirs” son los utilizados como elementos de descarga, es decir, en el modelo se han dispuesto a modo de vertedero en distintos sistemas. Por otro lado, los elementos tipo “Orifices”, también representan elementos de descarga, los cuales a diferencia de los anteriores, representan “salidas calibradas o taradas”, las cuales permiten por tanto un control más estricto de las descargas, colocadas por tanto en el estanque de laminación y el tanque de laminación. Finalmente cabe destacar los controles introducidos en el sistema. Dichos controles tienen como finalidad la regulación de determinados elementos del sistema. Dos de los controles establecidos hacen referencia al funcionamiento del sistema de bombeo existente en las cisternas de recogida de agua destinada para uso en riego, mientras que el último control sirve para regular la salida del agua del tanque de primera lluvia, el cual tal y como ya se ha expuesto, empieza su vaciado una vez finalizado el evento de precipitación.

Respecto a los controles introducidos para simular convenientemente el sistema de riego cabe realizar algún apunte, ya que el modo de proceder es un tanto atípico. Se ha implantado un “bomba ficticia” en el sistema, a la cual se le introduce un patrón de funcionamiento un función de agua entrante a la misma (correspondiente con los meses donde se contempla el riego). Se

indica posteriormente en los controles de las bombas destinadas a riego, que las mismas deben funcionar, cuando exista caudal entrante a la bomba. Los controles introducidos en el modelo se exponen en la siguiente imagen.

Rule 1	Rule 2	Rule 3
If node n172 inflow > 0	If node n172 inflow > 0	If link 173 flow > 0.1
Then pump 1 status = on	Then pump 2 status = on	Then orifice 3 setting = 0
Else pump 1 status = off	Else pump 2 status = off	Else orifice 3 setting = 1

Tabla 9.1. Controles contemplados en el modelo.

En la siguiente figura se han situado los distintos elementos singular existentes en el modelo, ubicados sobre el esquema del modelo ya corregido y actualizado.

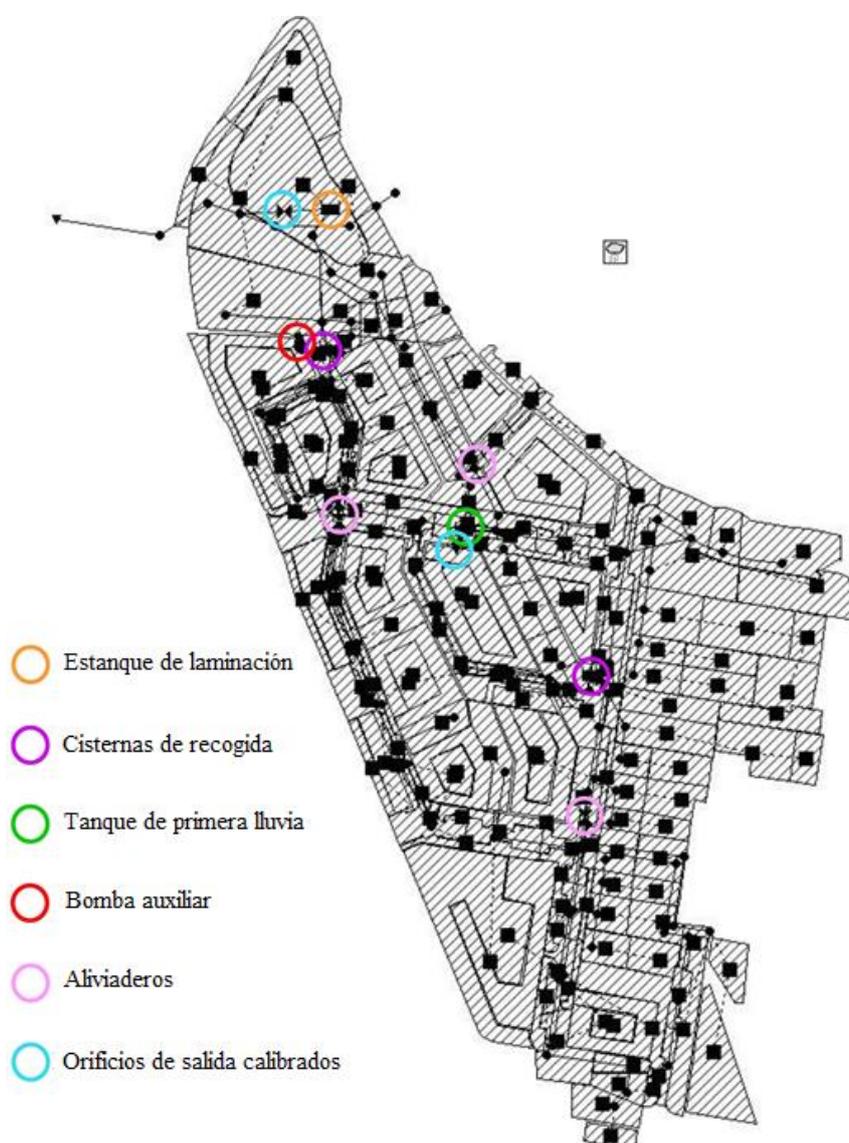


Figura 9.7. Situación de los elementos singulares del modelo.

Otra de las consideraciones a tener en cuenta, es la discretización realizada de las superficies del proyecto, en función de si son las mismas impermeables, semipermeables o permeables. Tal y como ha sido mencionado con anterioridad, el % correspondiente con la superficie permeable toma un valor correspondiente del 40%, incluyéndose en este porcentaje las distintas superficies verdes. Por otra parte con respecto al 60% de la superficie restante, se divide entre superficie semipermeable e impermeable, estando las cubiertas vegetadas consideradas como superficie semipermeable. La situación y descripción de las superficies semipermeables restantes (excluyendo las cubiertas vegetadas), ha sido respetada conforme venía definida en proyecto, donde se ha considerado que para el modelo matemático dichas superficies presentan un 90% de impermeabilidad, según los criterios del software empleado. Según proyecto, dichas áreas definidas como semipermeables son las destinadas a futuras plantaciones. En función por tanto de la existencia o no de cubiertas vegetadas, existe una variación en el porcentaje de superficie tanto impermeable como semipermeable.

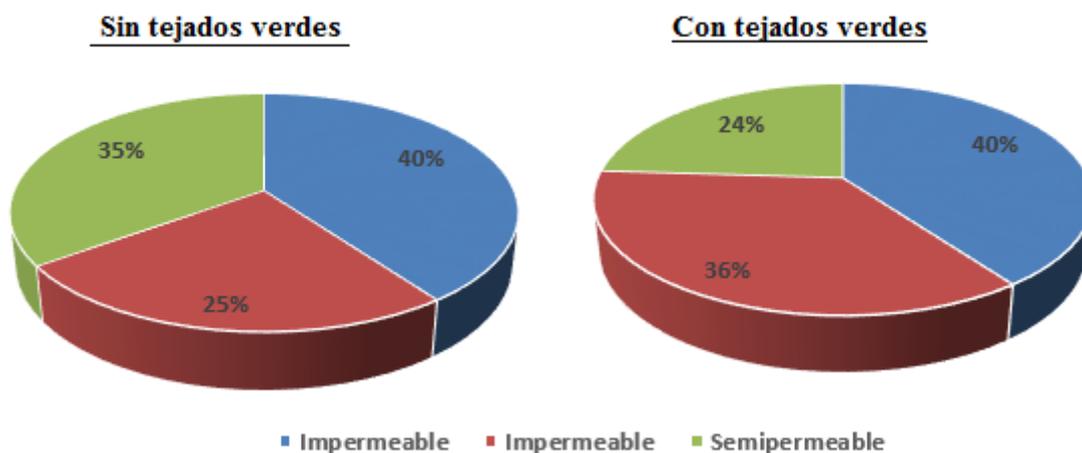


Figura 9.8. Reparto del % de la superficie en función de la permeabilidad de la misma.

Ya por último, un vez actualizado y corregido el modelo, al igual que analizado el funcionamiento del mismo, únicamente falta analizar los distintos datos input introducidos al modelo para la realización de las simulaciones y obtención de los distintos resultados.

9.5. DATOS INPUT

De igual manera que se ha realizado en el apartado 6.5, se procede a analizar los datos input introducidos al modelo. Ya que el emplazamiento de la urbanización se encuentra situado, al

igual que la universidad, en la ciudad de Bolonia, únicamente es necesario describir los datos input referentes a la serie histórica de temperaturas y precipitación.

Como ya es sabido, para el presente caso de estudio, se utiliza una serie histórica de 26 años, del periodo comprendido entre el año 1990 y 2015 inclusive. En este caso, los datos pluviométricos, al tratarse de una serie histórica mucho más larga, han sido introducidos con discretización quinceminutal. Para la obtención de los datos climatológicos, en este caso se ha recurrido mediante el servicio “IdroMeteoClima di Arpa Emilia Romagna”. Dicho sistema es una base de datos tipo SIG, la cual almacena datos históricos climáticos de la región de la Emilia Romagna. Los 26 años de serie histórica contemplan un total de 2445 eventos de precipitación a simular.

Nuevamente hay que resaltar que los cálculos referentes a la evaporación en el sistema, los hace el propio software en base al fichero de datos de temperatura introducido, y mediante la consideración de los coeficientes de cultivo mensuales introducidos y ya mencionados.

Con respecto a los registros de precipitación cabe destacar el año 2004 como el más lluvioso de la serie histórica analizada, llegando a valores de precipitación anual que rozan los 1100 mm, frente a otros años mucho menos lluviosos como el 2000, donde la precipitación acumulada anual apenas supera los 500 mm. Cabe resaltar los eventos de precipitación registrados en 2002, en donde aparte de ser uno de los años con más pluviosidad de la serie, se registran los eventos con mayores intensidades de precipitación, al igual que la mayor variedad entre eventos, refiriéndose a la variedad de intensidad y duración del evento de lluvia. En el siguiente apartado se explica por tanto el interés de identificar este año de eventos de lluvia característico.

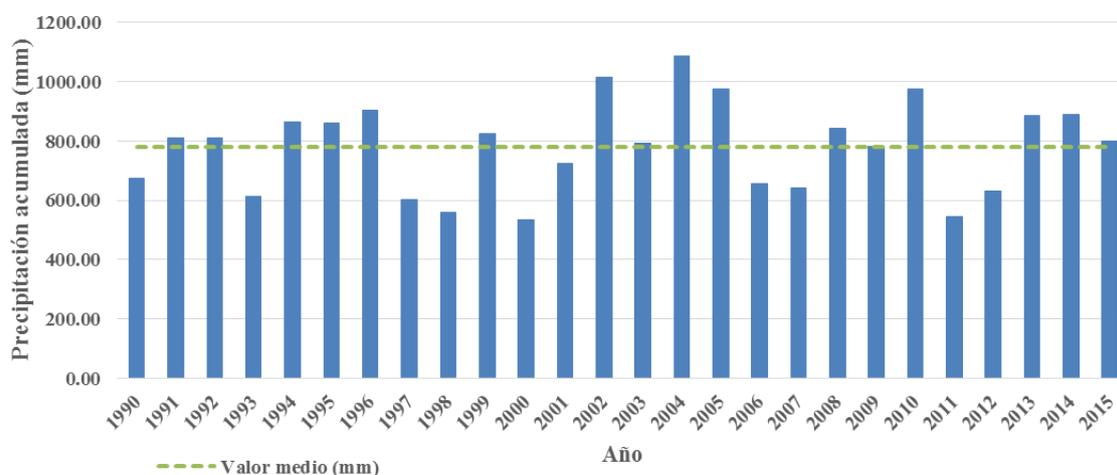


Figura 9.9. Precipitación anual acumulada para la totalidad de la serie histórica contemplada.

Con respecto al análisis de las temperaturas, no cabe resaltar ningún dato en particular, presentando la variación tanto de temperaturas máximas y mínimas una evolución normal, habiéndose realizado una análisis que llega a una discretización diaria en la totalidad de la serie histórica analizada.

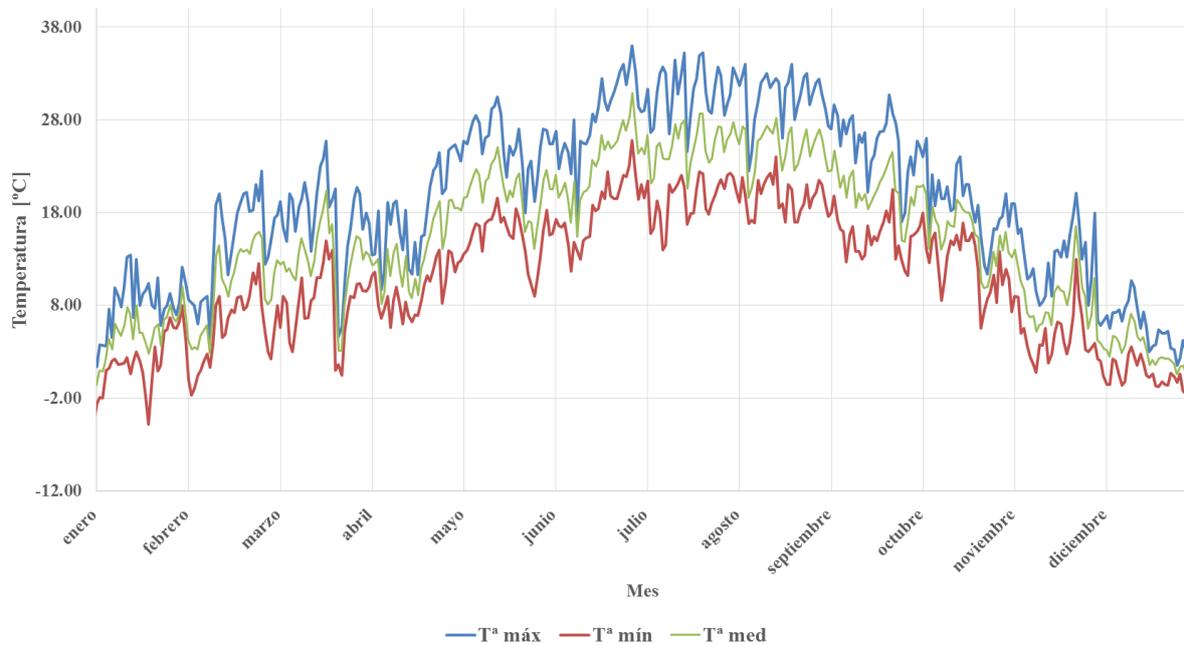


Figura 9.10. Variación anual de temperaturas típica (año 1990).

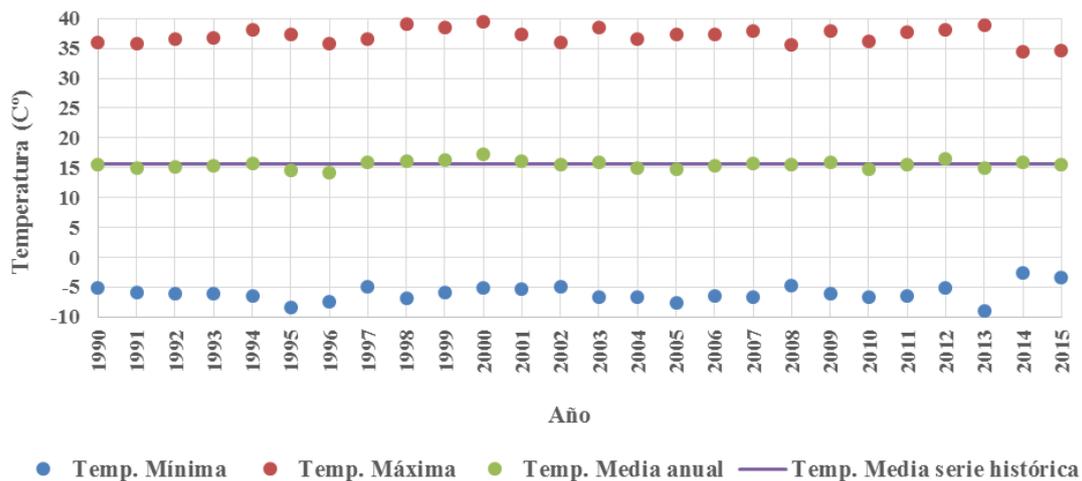


Figura 9.11. Análisis de valores extremos de temperatura anuales de la serie histórica.

Nuevamente resulta necesario introducir el coeficiente de cultivo definido como “krop” para considerar los efectos de la evapotranspiración. Los valores correspondientes con la cubierta vegetada tipo NR toman el valor ya introducido con anterioridad, introduciéndose como

novedad, los valores del coeficiente cultural para el tipo de cubierta vegetada SR, de los cuales ya se disponía.

	Coeficiente Cultural	
	NR	SR
Enero	0.25	0.05
Febrero	0.25	0.05
Marzo	0.75	0.15
Abril	3	0.6
Mayo	5	1
Junio	5.75	1.15
Julio	5.75	1.15
Agosto	5.75	1.15
Septiembre	1.5	0.3
Octubre	1	0.2
Noviembre	0.75	0.15
Diciembre	0.25	0.05

Tabla 9.2. Valores mensuales del coeficiente cultural para los distintos tipos de cubierta vegetada.

9.6. SIMULACIONES REALIZADAS

Se pretende a continuación describir las distintas simulaciones realizadas, en base a la combinación de SUDS contempladas en las mismas. Como ya se sabe, la finalidad primera de la presente parte del trabajo es la de analizar el efecto positivo en materia hidráulica tras la implantación de los sistemas de cubiertas vegetadas. Dado que existen otras tecnologías destinadas al aprovechamiento y gestión de las aguas pluviales, se toma la decisión de incluir, además de las cubiertas vegetadas, simulaciones en las que se combinen distintas configuraciones (de sistemas de aprovechamiento y gestión del agua), para de esta manera poder tener una visión más global del sistema, de los beneficios de los SUDS, y finalmente, poder establecer una serie de mejoras de manera más óptima al conjunto de todo el sistema.

Combinación	ESCENARIOS		
	Tejado verde	Riego	Tanque de tormenta
1	NO	NO	NO
2	SI	NO	NO
3	NO	SI	NO
4	SI	SI	NO
5	NO	NO	SI
6	SI	NO	SI
7	NO	SI	SI
8	SI	SI	SI

Tabla 9.3. Distintos escenarios contemplados en las simulaciones.

Hay que tener en cuenta que cuando se presenta un escenario de simulación con cualquier combinación que incluya las cubiertas vegetadas, esta se realiza para los tipos de cubierta tanto NR como SR, por tanto se han realizado un total de 12 combinaciones diversas en periodo extendido para una serie histórica de 26 años de eventos de precipitación.

Con respecto a las combinaciones 3 y 7, las cuales combinan la no existencia de cubiertas vegetadas con la presencia de riego, cabe matizar que la misma carece de sentido en el contexto el cual ha sido planteado el proyecto, ya que el agua reutilizada en riego es la que proviene de las cubiertas vegetadas. A pesar de ello, con el propósito de obtener un abanico más amplio de resultados que manifiesten el funcionamiento de cada uno de los sistemas contemplados en el proyecto, dichas situaciones son igualmente analizadas. En cuanto al esquema de funcionamiento del sistema en SWMM, para las situaciones mencionadas, no se produce una desconexión entre la escorrentía de las cubiertas y las cisternas de recolección de agua, lo cual influye mínimamente en los resultados, como se puede concluir tras el análisis de los mismos.

Muy importante resulta el tener claro que debido a las limitaciones del software empleado, no contempla la posibilidad de considerar algún escenario en el que se combinen las distintas tipologías de cubierta vegetada. Como ya es sabido, uno de los instrumentos utilizados para modelar con mayor precisión las cubiertas vegetadas, es la consideración de un coeficiente de cultivo mensual, el cual varía en función del tipo de cubierta. SWMM únicamente permite introducir una serie de coeficientes de cultivo y, por tanto no es posible considerar ambas tipologías de cubierta vegetada en una misma simulación. Hay que ser consciente de que la introducción del coeficiente de cultivo denominado como “krop”, no únicamente afecta a las cubiertas vegetadas, sino que afecta a cualquier superficie sobre la cual se pueda producir fenómenos de evaporación, por tanto hay que tener esto en cuenta a la hora de interpretar los resultados obtenidos tras realizar las distintas simulaciones, tal y como se verá más adelante.

En el apartado anterior se mencionaba la gran variedad de eventos de precipitación existentes durante el año 2002, haciendo referencia tanto a intensidades de precipitación como a duración de los eventos. Dado que la serie histórica de 26 años requería de un tiempo computacional considerable, durante los primeros trabajos de análisis del sistema y modelo hidráulico, al igual que durante los trabajos de actualización y corrección del mismo, se realizaron las simulaciones únicamente considerando el año 2002. De esta manera se pudo ir analizando el comportamiento del sistema, y verificando que los distintos elementos que lo conforman realizan correctamente

sus funciones. Una vez dado por bueno el modelo, ya se pasó a realizar las simulaciones con la serie histórica de 26 años de eventos.

Finalmente solo cabe mencionar, que se han realizado las simulaciones mediante el mismo modo de proceder seguido en el proceso de calibración y validación del sistema implantado en la Universidad de Bolonia, es decir, simulaciones en periodo extendido, en las que la saturación de terreno se considera inicialmente del 100%.

9.7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Una vez realizadas la totalidad de las simulaciones contempladas para el sistema analizado, se analizan los distintos resultados obtenidos. Para de analizar de manera ordenada los resultados obtenidos tras la realización de las distintas simulaciones, se divide el presente punto en diversos apartados, estando cada uno de ellos centrado en un aspecto diverso.

9.7.1. ANÁLISIS GLOBAL DEL SISTEMA

Tal y como ya se sabe, el último elemento existente previo al vertido de la escorrentía al medio natural (la totalidad de las escorrentías se dirigen a dicho elemento previo a su vertido al medio natural, el cual es el río), es la balsa de retención existente, por tanto, para poder extraer una serie de resultados desde un punto de vista general sobre el funcionamiento del sistema en los distintos escenarios contemplados, se analizan los resultados en el propio estanque.

Para la interpretación de los resultados en referencia a las entradas en el embalse, se ha evaluado la frecuencia relativa del volumen anual que ingresa al embalse (Figura 9.12). Mediante el análisis de la frecuencia relativa es posible evaluar el porcentaje de valores que supera un determinado valor. Gráficamente se interpreta con mucha facilidad la sensibilidad que presenta el volumen que ingresa al estanque en función del escenario simulado.

En primer lugar se exponen los resultados obtenidos tras el análisis de la frecuencia relativa para los distintos escenarios contemplados, para cubiertas vegetadas del tipo SR en el caso de que estas se encuentran presentes.

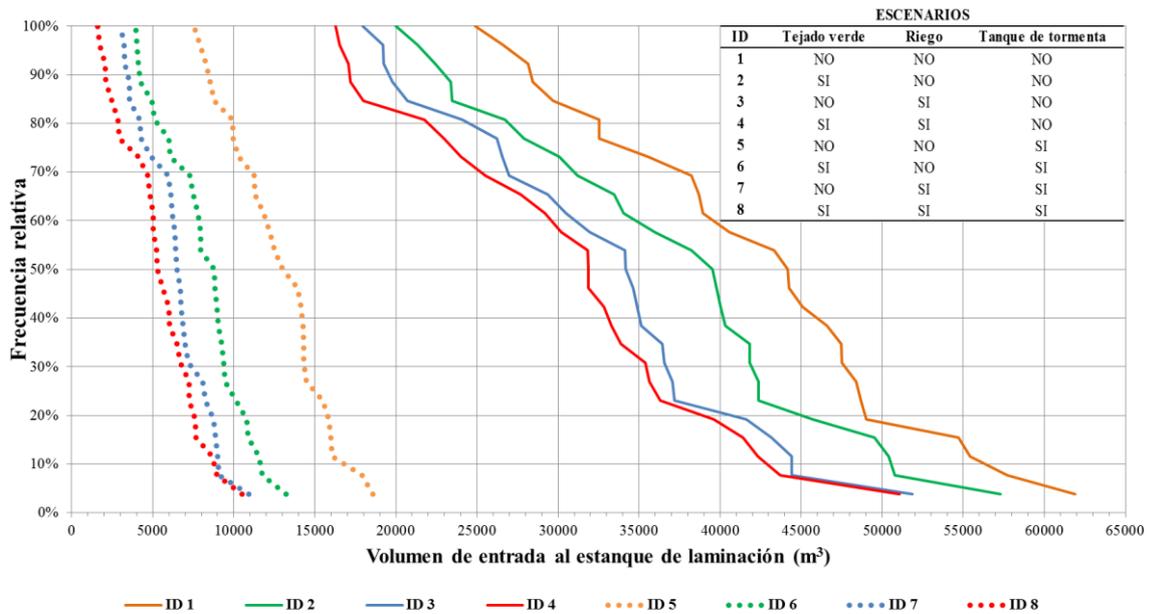


Figura 9.12. Frecuencia relativa del volumen anual ingresado al embalse (cubiertas tipo Sedum)

A continuación se exponen los resultados del análisis de la frecuencia relativa de los distintos escenarios contemplados, siendo esta vez las cubiertas vegetadas del tipo NR.

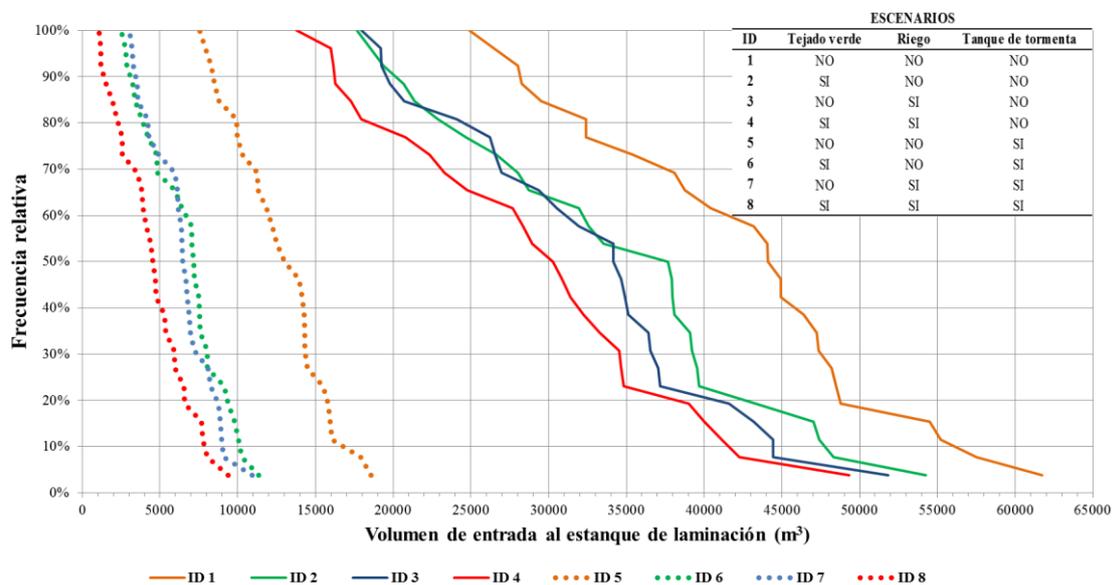


Figura 9.13. Frecuencia relativa del volumen anual ingresado al embalse (cubiertas tipo Native)

Para la mejor interpretación de los resultados, seguidamente se muestran las gráficas anteriores por partes, exponiéndose en primer lugar los resultados obtenidos para las simulaciones en las

que no se contempla tanque de tormenta, y posteriormente para las que si se considera, tanto para las cubiertas tipo SR como para las NR.

En primer lugar se exponen las gráficas para la cubierta tipo SR.

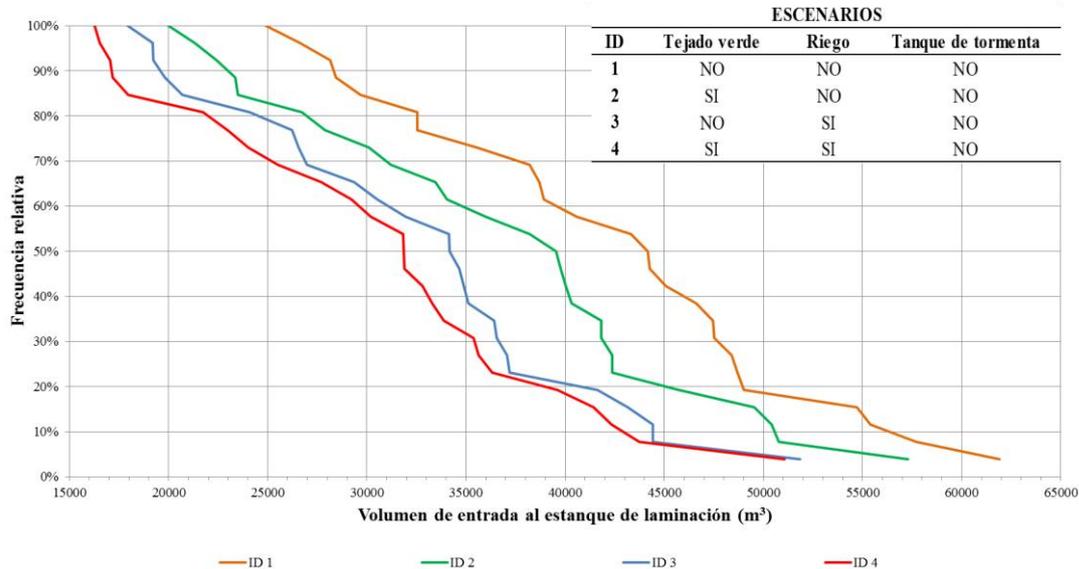


Figura 9.14. Frecuencia relativa del volumen anual ingresado al embalse para escenarios sin tanque de tormenta (cubiertas tipo Sedum)

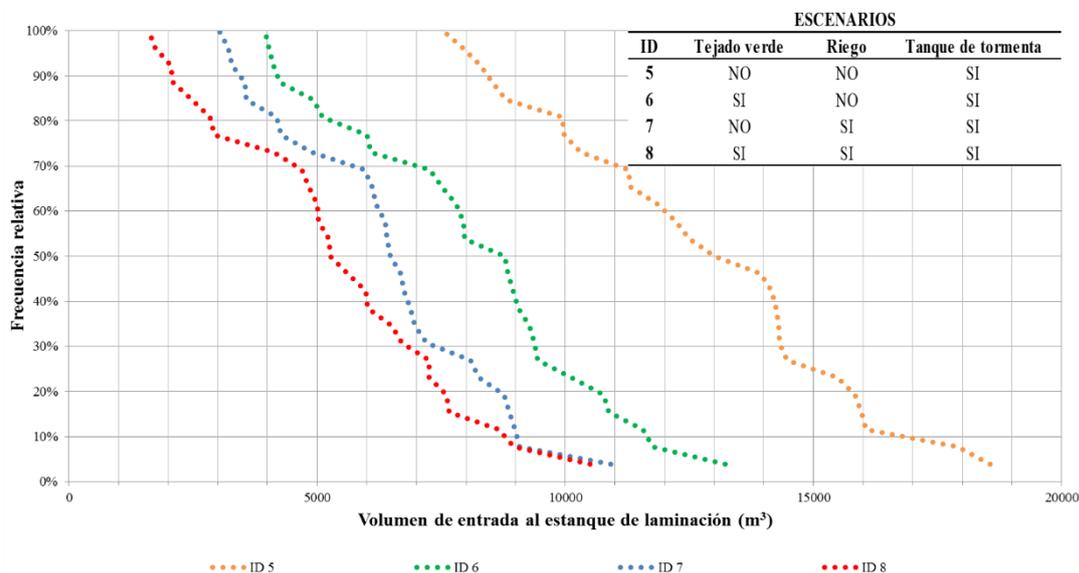


Figura 9.15. Frecuencia relativa del volumen anual ingresado al embalse para escenarios con tanque de tormenta (cubiertas tipo Sedum)

Seguidamente se exponen las gráficas para los distintos escenarios con cubiertas tipo NR (en los escenarios donde se contemplan).

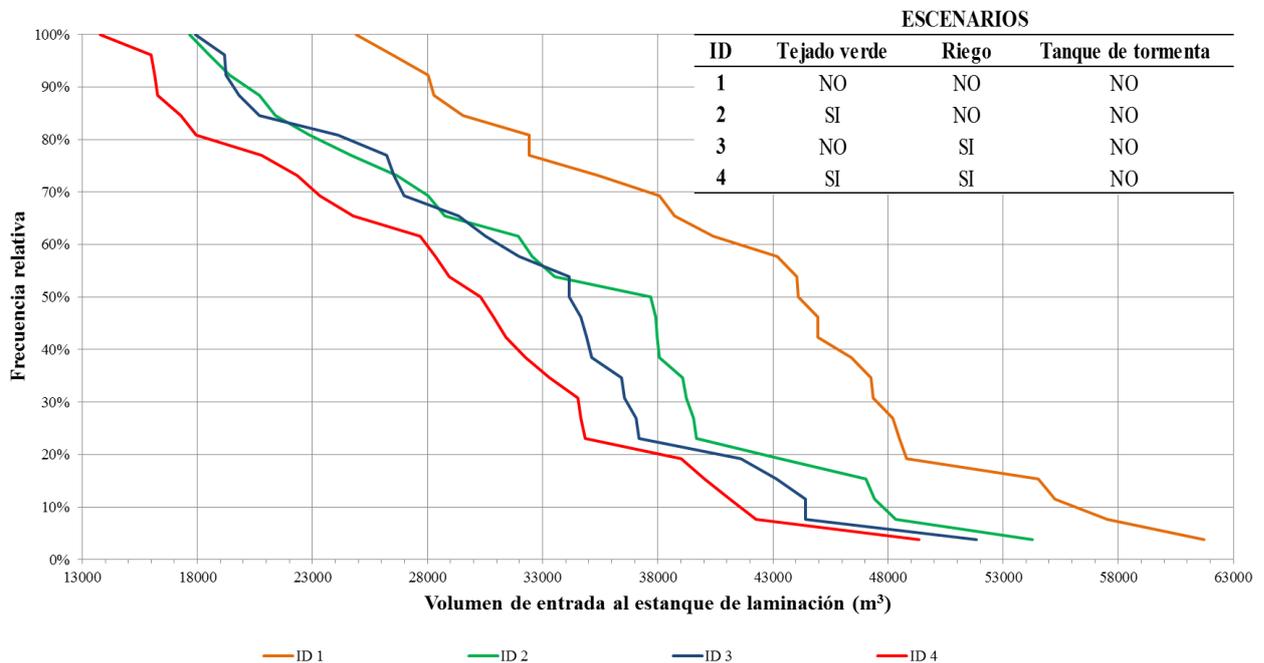


Figura 9.16. Frecuencia relativa del volumen anual ingresado al embalse para escenarios sin tanque de tormenta (cubiertas tipo Native)

Es importante matizar el comportamiento observado en la gráfica anterior, en la cual se observa que las gráficas correspondientes con ID2 e ID3 llegan a cruzarse en varias ocasiones, cuando esto no debería ocurrir. Dicho comportamiento se justifica por la presencia del coeficiente de cultivo para la cubierta NR, el cual resulta ser significativamente mayor al de la cubierta del tipo SR. Tal y como se ha expuesto en anteriores capítulos, el coeficiente de cultivo afecta a la totalidad de la superficie permeable (error asumido a la hora de conceptualizar el modelo), por tanto esto justifica el comportamiento observado.

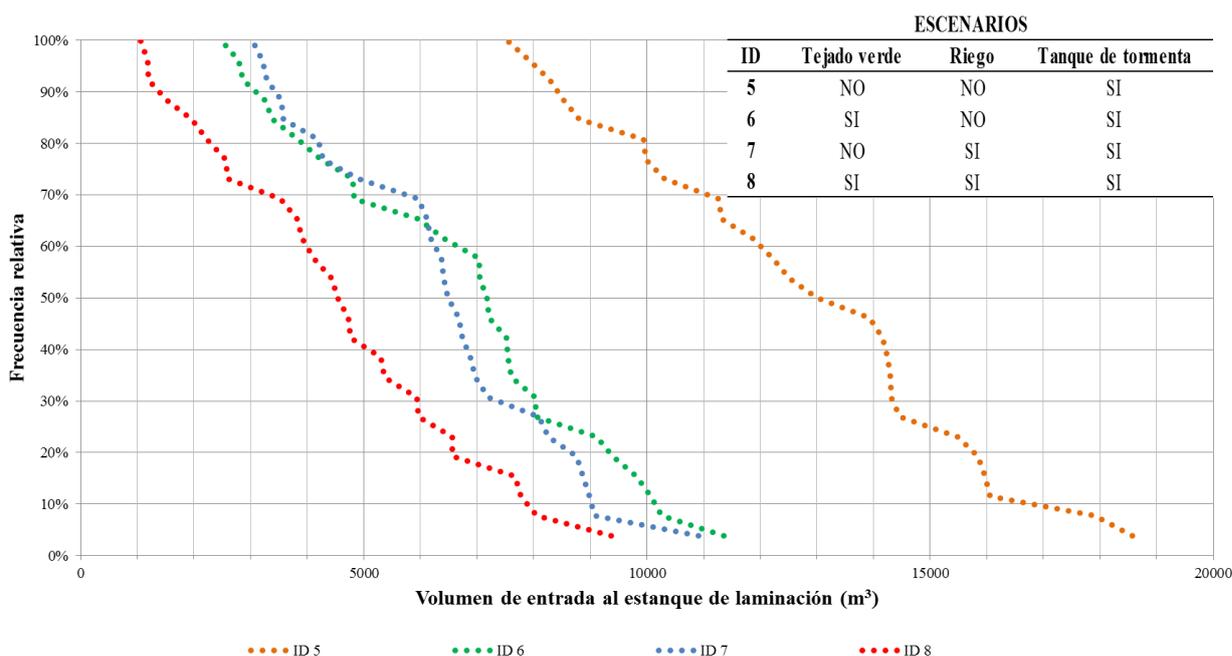


Figura 9.17. Frecuencia relativa del volumen anual ingresado al embalse para escenarios con tanque de tormenta (cubiertas tipo Native)

Tras la obtención de los distintos resultados, se exponen a continuación las distintas conclusiones arrojadas por los mismos:

- Cabe recordar que de la manera que se ha realizado el análisis es posible tener una visión global del funcionamiento del sistema.
- Como era de esperar, para las distintas soluciones en las que se contemplan cubiertas vegetadas, si estas son del tipo NR, el volumen anual que ingresa en el estanque de retención resulta ser menor que el que ingresa con respecto a las cubiertas del tipo SR, debido como ya se sabe, a la mayor capacidad de retención de las primeras.
- Existe una diferencia importante nuevamente con respecto al volumen ingresado anualmente en el estanque, independientemente del tipo de cubierta dispuesta, entre los escenarios en los que se contempla la implementación del tanque de tormenta y los que no se contempla.
- La influencia del tanque de tormenta tiene una explicación razonable. Se podría pensar que la contemplación del sistema de riego, el cual incluye las cisternas de recogida de agua con una capacidad total de 1300 m^3 , frente a los 315 m^3 del tanque de tormentas, debería tener mayor influencia en la reducción del volumen ingresado al estanque de retención. Dicha menor

influencia en la reducción del volumen anual entrante al estanque se debe a que el sistema de riego únicamente se encuentra activo un total de 6 meses al año, por tanto existe un periodo prolongado en el cual la totalidad de las agua de lluvia que provienen de las cubiertas, y que podría ser reutilizada, ingresan directamente al estanque de retención.

- En cuanto a la influencia de los distintos elementos en la reducción del volumen anual ingresado al estanque, el que más influencia tiene es el tanque de tormenta, seguido de las cubiertas vegetadas y el sistema de riego.

9.7.2. BENEFICIOS DE LAS CUBIERTAS VEGETADAS

En primer lugar, para cuantificar de manera directa los beneficios que supone la implementación de las cubiertas vegetadas, se analizan las salidas de agua ocurridas en diversos escenarios (sin cubierta vegetada y con cubierta tipo NR y SR), en dos cubiertas vegetadas, una elegida de manera aleatoria y la otra correspondiente con el edificio destinado a una residencia de estudiantes (simplemente por tratarse de un edificio singular). Dicho análisis se ha realizado de igual manera tras la calibración del primer modelo objeto del presente trabajo, por tanto tras obtener los resultados se podrá verificar si los mismos son acordes con los del primer modelo realizado. Hay que mencionar que las dos cubiertas analizadas presentan superficies distintas, con la finalidad de poder cuantificar a posteriori si existe relación entre retención y volumen. La cubierta vegetada de la residencia de estudiantes tiene una superficie total de 2700 m², mientras que la elegida de manera aleatoria presenta una superficie de 2200 m².

Al pretender cuantificar aspectos de cantidad, se analiza el volumen acumulado a la salida de la cubierta para la serie histórica de 26 años, en primer lugar para la cubierta vegetada tipo SR y posteriormente para la cubierta tipo NR.

Se pueden observar en el siguiente gráfico los resultados obtenidos.

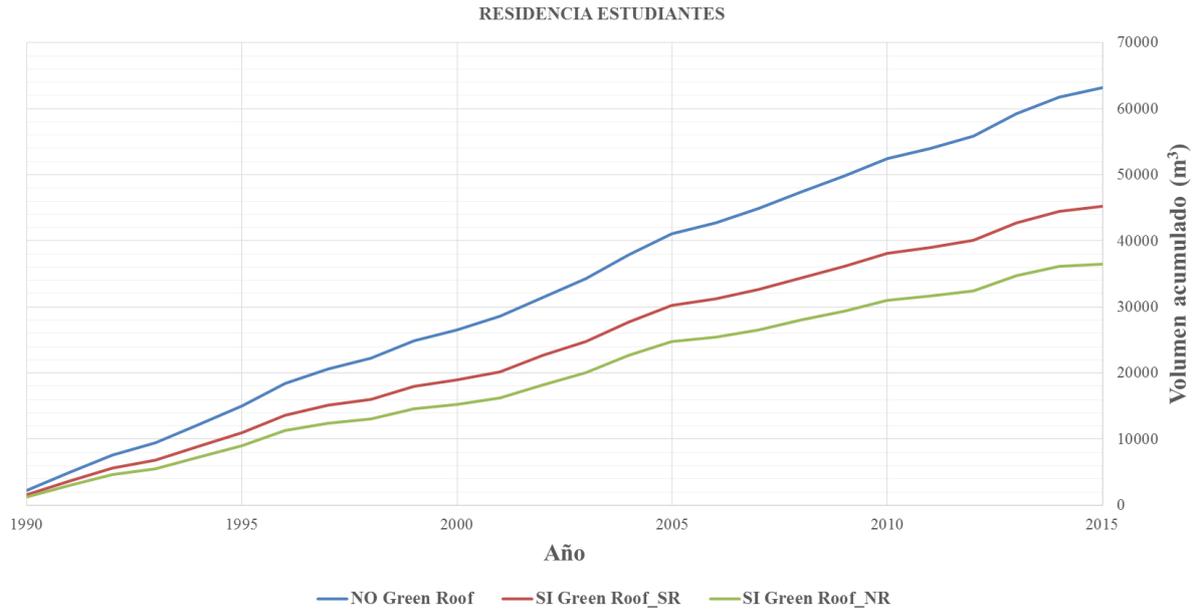


Figura 9.18. Volumen acumulado a la salida en la residencia de estudiantes.

Tal y como se observa, aparte de la notable disminución existente con la implementación de cubiertas vegetadas, existió también una diferencia sustancial entre los valores obtenidos para los distintos tipos de cubierta. Si bien para una cubierta vegetada del tipo SR la disminución del volumen acumulado a la salida de la misma, con respecto a la situación en la que no se contempla cubierta vegetada, es del 28.4%, para una cubierta del tipo NR se alcanza el 42.2%.

Procediendo de igual manera se analizan los volúmenes acumulados para las distintas situaciones en el caso de la cubierta vegetada elegida de manera aleatoria.

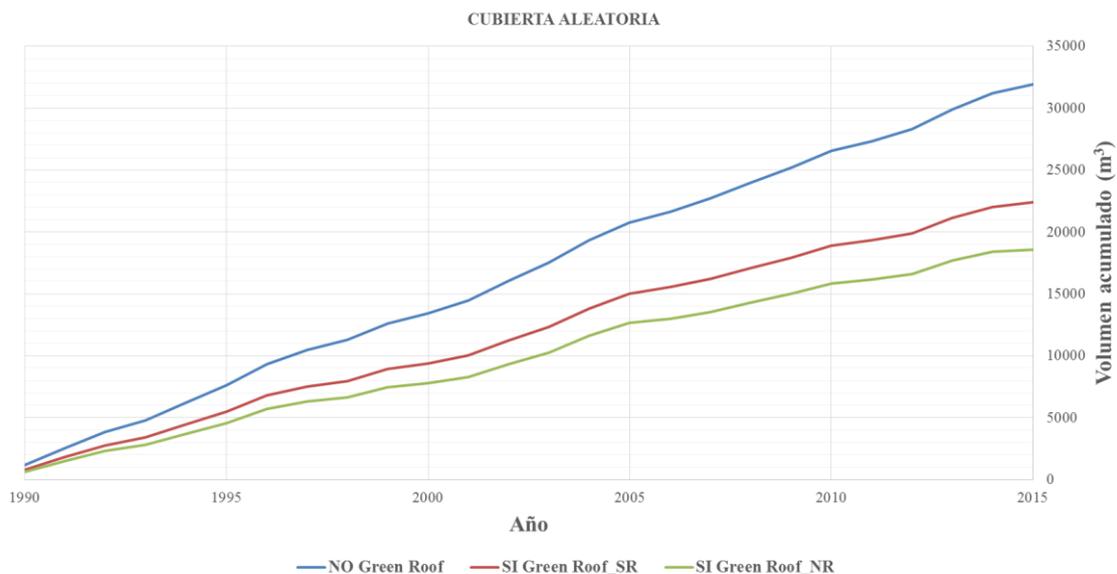


Figura 9.19. Volumen acumulado a la salida en cubierta vegetada aleatoria.

En este caso los valores alcanzados por el tipo de cubierta vegetada SR muestran una reducción del volumen acumulado del 29.8%, mientras que la cubierta NR presenta una reducción de 41.7%.

Si con los resultados obtenidos, tal y como se observa, se cuantifica de manera independiente para cada tipo de cubierta los valores acumulados de agua a la salida de las mismas, resulta necesario el poder confrontar los resultados de ambas cubiertas.

Para confrontar los resultados se decide analizar la reducción del volumen acumulado en función de la tipología de cubierta implantada con respecto a la situación sin cubierta vegetada. Se requiere en primer lugar la uniformización de la variable acumulada anteriormente analizada, es decir, dado que cada una de las cubiertas presenta una superficie diversa, es necesaria la creación de un valor que represente la acumulada en metros de agua. Dicho valor se obtiene al dividir la acumulada anual (m^3) entre el área de la cubierta (m^2). Procediendo de este modo se ha podido cuantificar por tanto la reducción de agua a la salida de las cubiertas, en este caso anual, para ambas cubiertas tanto para SR como para NR.

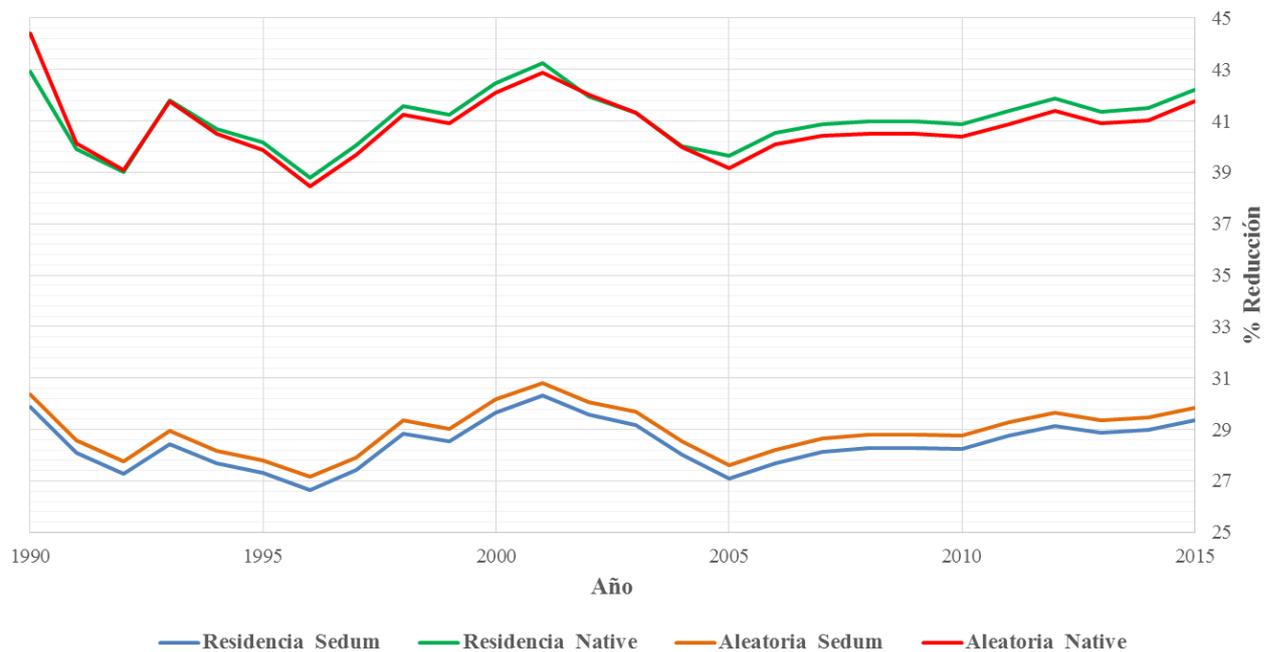


Figura 9.20. Reducción en % del agua a la salida de las cubiertas en función para NR y SR.

Tras analizar los resultados obtenidos, se pueden realizar una serie de conclusiones de manera directa:

- A pesar de ser un resultado lógico, la retención resulta ser proporcional al área de la propia cubierta, independientemente de la tipología analizada.
- El comportamiento (en términos de reducción) de ambas tipologías de cubierta vegetada resulta ser prácticamente igual, ya que se observa un paralelismo claro entre los resultados.
- La tipología de cubierta NR resulta ser claramente más eficiente que la tipo SR, en términos de cantidad de agua retenida.

Analizando más detalladamente los resultados obtenidos, se obtiene que en término medio, la cubierta vegetada NR es capaz de retener un 20% más de agua que la cubierta tipo SR, siendo por tanto más eficiente la primera de estas en términos de retención de agua. A pesar de ser las cubiertas tipo NR más eficiente, hay que pensar en la conveniencia de implantar un tipo u otro sobre las cubiertas de la urbanización. Tal y como se ha expuesto con anterioridad, el agua reutilizada para riego apenas alcanza un 20% de la necesaria en los meses más lluviosos en el caso de cubiertas SR, siendo esta cifra menor en el caso de cubiertas tipo NR, por tanto, si la finalidad es la de reutilizar la mayor cantidad de agua puede resultar conveniente la implementación de cubiertas del tipo SR, siempre que existan cambios referentes a las cisternas de almacenamiento. Se podría pensar que siguiendo esta filosofía (reutilizar la mayor cantidad de agua proveniente de las cubiertas posible), realmente convendría disponer cubiertas impermeables ya que generan mucha más escorrentía, pero obviamente esta opción queda totalmente descartada, ya sea por calidad del agua excedente (la cual es inferior), o por la propia concepción de la “filosofía sostenible” de la cual consta el proyecto, en donde se favorece mediante las cubiertas, aparte de la disminución de las escorrentías generadas en las mismas, el incremento sustancial de la evaporación del agua.

9.7.3. SISTEMA DE APROVECHAMIENTO DE AGUA

Otro de los aspectos a tener en cuenta en el análisis de los resultados es el del funcionamiento del sistema destinado al aprovechamiento del agua de lluvia, es decir, las dos cisternas de recogida de agua de las cubiertas.

Se analiza en el presente punto por tanto la eficiencia del aprovechamiento del agua. Hay que considerar que en proyecto se contempla la reutilización del agua para su uso tanto en riego como en usos ornamentales. Tras realizar el análisis se establece la viabilidad de las consideraciones contempladas en proyecto.

Se muestra a continuación el volumen medio mensual, únicamente de los meses en los que se considera al riego, a la salida de las dos cisternas de almacenamiento.

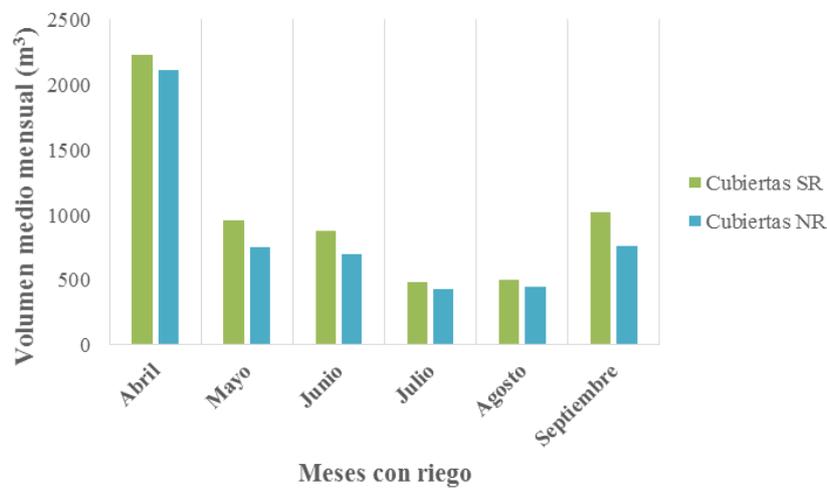


Figura 9.21. Volumen medio mensual a la salida de las cisternas para uso en riego.

Mediante la hipótesis de un riego de 3 mm de agua para toda la superficie a regar (la permeable, con un total de 120000 m²) resulta necesario un volumen mensual de agua para riego de 10800 m³ para los meses de abril, junio y septiembre, y de 11160 m³ para los meses de mayo, julio y agosto. Estimado el volumen mensual de agua necesario para satisfacer las necesidades de riego, y calculado el volumen medio mensual a la salida de las cisternas de almacenamiento de agua, es posible estimar la media mensual aproximada de agua a aportar al sistema para satisfacer la demanda de riego.

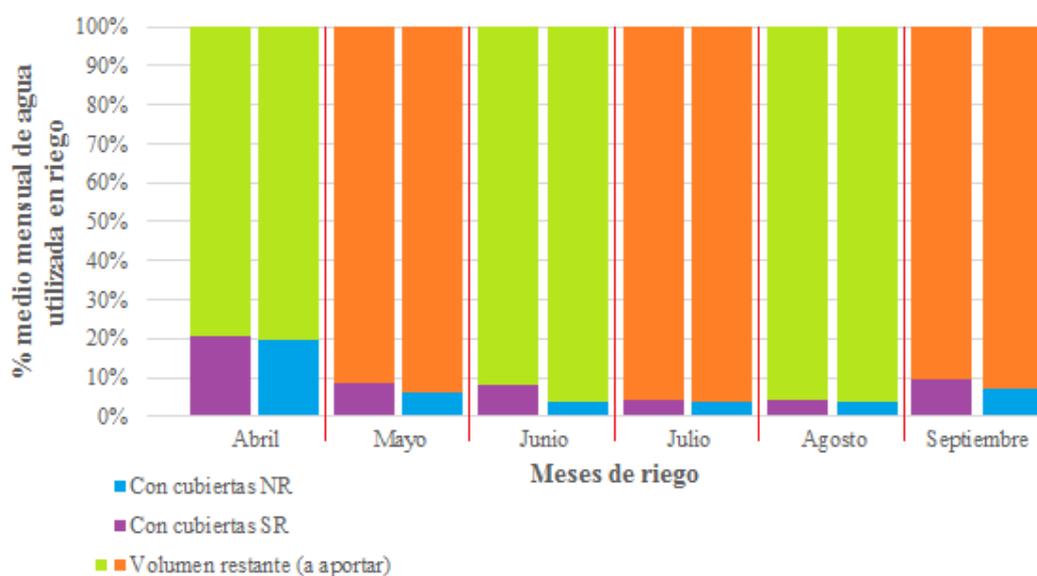


Figura 9.22. Porcentual media mensual de agua disponible para riego.

En el gráfico anterior evidencia lo ya mencionado con anterioridad, es decir, es necesario contemplar un aporte de agua externo para satisfacer las necesidades de riego. En el gráfico se ha representado en % el total del agua reutilizada con respecto al total necesario, partiendo de los datos de volúmenes a la salida de las cisternas y volumen mensual necesario. Tal y como se observa, el volumen de agua reutilizada para riego apenas alcanza el 20% (de media) en el mes de abril, no llegando a superar el 5% en meses como julio y agosto. Del gráfico se puede observar como de manera lógica, existe un mayor aprovechamiento del agua en los meses más pluviosos, mientras que por otro lado, para un mismo mes, es mayor la reutilización del agua para el caso de las cubiertas del tipo SR, ya que estas son capaces de retener una menor cantidad de agua.

Al analizar de esta manera el sistema de aprovechamiento de agua, se justifica de una manera clara y sencilla la incapacidad de contemplar el uso de agua reutilizada para usos ornamentales, ya que como se ha visto, el agua disponible para ser reutilizada no es capaz de satisfacer en el mejor de los casos el 20% de la demanda.

Existe por tanto un gran margen de mejora con respecto a la reutilización del agua para su uso en riego. Las consideraciones oportunas de mejora (propuestas de mejora) quedan expuestas en el apartado 9.8.

9.7.4. INVARIANCIA HÍDRICA

Es importante recordar el concepto de “invariancia hídrica” ya introducido en capítulos anteriores, hace referencia a la escorrentía que se devuelve al medio natural tras un proceso de urbanización, indicando que esta no debe ser superior a la existente con anterioridad al proceso de urbanización, “obligando” a la implementación de tecnologías de drenaje sostenible, como es el caso de la urbanización analizada en el presente trabajo.

Para garantizar el cumplimiento de la “invariancia hídrica” al sistema, el embalse dispone, aparte del aliviadero superior, de un sistema de drenaje de fondo. Dicho sistema de drenaje regulado controlado por una válvula permite la evacuación de las aguas al medio receptor con caudales que pueden llegar hasta los 10 litros/segundo y por hectárea. Dicho caudal es el establecido en la normativa italiana para caracterizar la escorrentía generada por un terreno agrícola. Siempre y cuando el embalse de retención tenga la capacidad suficiente para almacenar el agua que ingresa al mismo, mediante el normal funcionamiento del desagüe del mismo se garantiza el cumplimiento del concepto de “invariancia hídrica”. Es necesario por

tanto realizar únicamente el análisis correspondiente al nivel de agua alcanzado en el embalse, analizando de esta manera si la capacidad del mismo es suficiente. Por otra parte, a raíz del análisis es posible discutir a posteriori si las dimensiones del estanque proyectado son óptimas o existe posibilidad de mejora en el mismo.

Para analizar la capacidad del embalse, se extraen los datos referentes al caudal pico acumulado mensualmente, confrontando los valores de volumen referentes a la situación donde todos los SUDS están presentes, incluyendo el tanque de tormentas y siendo las cubiertas vegetadas del tipo NR, frente a la situación en donde no se contempla ningún tipo de SUDS ni el tanque de tormentas. Ambas situaciones son las que determinan los extremos de volumen almacenado en el estanque, siendo la primera de ellas la situación donde menor caudal ingresa y la última la que mayor entrada de caudal presenta.

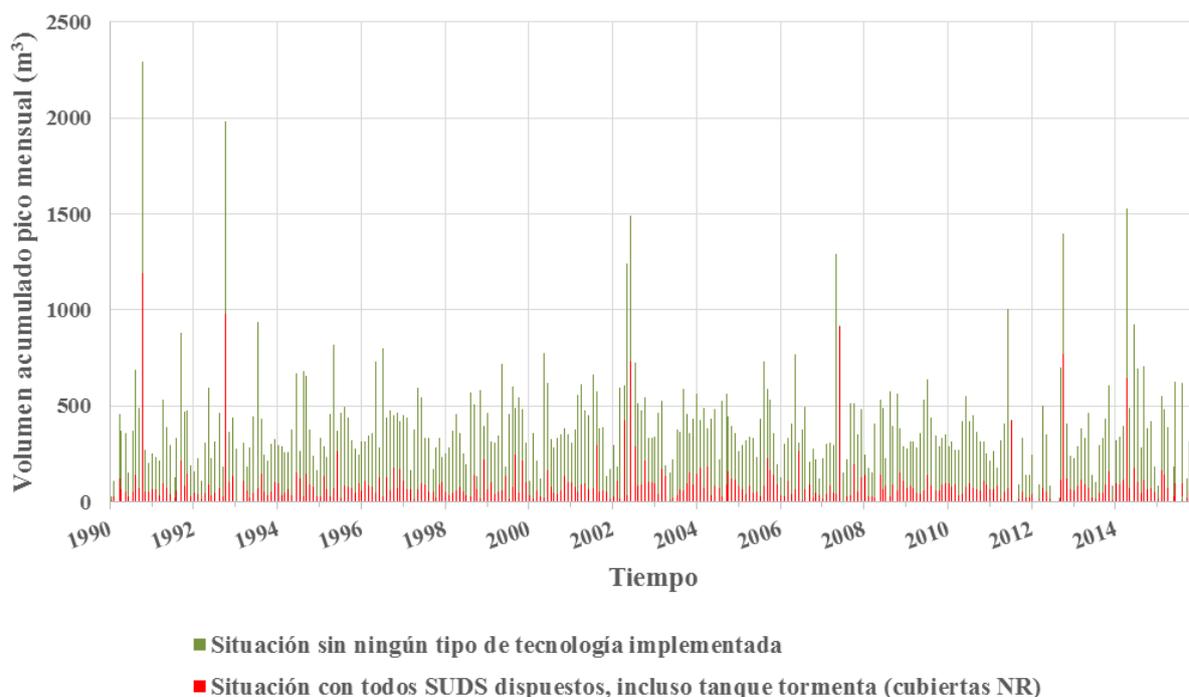


Figura 9.23. Variación mensual del volumen pico (m^3) del embalse de retención.

Como era lógico esperar, el volumen pico alcanzado es mayor para la situación donde no se contemplan tecnologías de drenaje sostenible ni el tanque de tormentas, alcanzando en esta situación un volumen pico de cercano a los $2250 m^3$. Cabe recordar que el volumen total del embalse es de $7200 m^3$, por tanto es totalmente capaz de almacenar holgadamente los caudales que ingresan en el mismo, por tanto de igual manera como ocurre con el sistema de aprovechamiento de agua, puede realizarse alguna propuesta de mejora.

9.7.5. OTROS

Dado que la finalidad principal de la presente parte del trabajo versa sobre el análisis, en términos de cantidad de agua, de la influencia o efecto de disponer las distintas configuraciones de sistema establecidas (aparte de la actualización y mejora del modelo matemático), se incluyen en el presente apartado el análisis y consideración de otras partes del sistema, de carácter hidráulico, las cuales a pesar de quedar fuera del objeto del presente estudio, deben ser consideradas para la correcta concepción del sistema analizado.

Un aspecto importante en cualquier sistema de carácter hidráulico, es el análisis de las conducciones existentes en el mismo. Hasta el momento no se ha mencionado prácticamente ningún aspecto relacionado con el funcionamiento de las mismas. Las distintas conducciones existentes en el modelo se han dispuesto según las indicaciones expuestas en el proyecto, sin modificar las dimensiones de las mismas, a excepción de aquellas que lo requerían en la fase de actualización del modelo. Se considera por el análisis de las mismas para la situación donde se implementan la totalidad de las tecnologías, es decir, a priori la situación óptima para la cual se han proyectado, al igual que por otro lado se pretende analizar el funcionamiento de las mismas en las situaciones más desfavorables.

Se analizan en primer lugar la capacidad máxima en el conjunto de conducciones del sistema, para la situación más favorable, es decir, la que menos escorrentía se genera en el sistema.

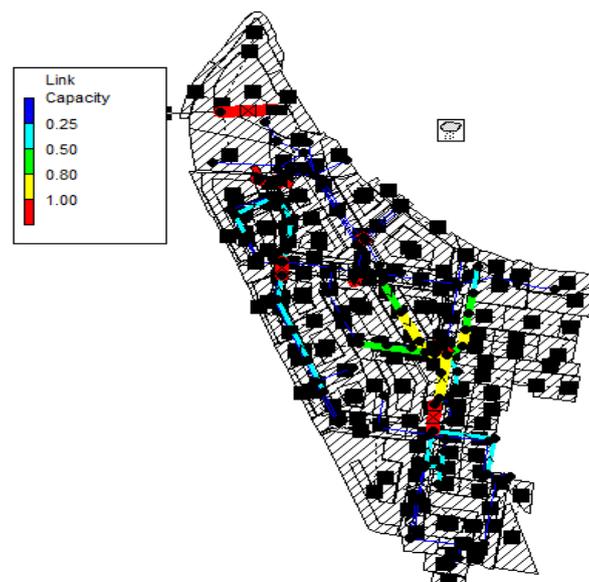


Figura 9.24. Mapa de capacidades en conducciones para la situación más favorable.

Por otro lado se procede de igual manera analizando la situación más desfavorable, en este caso, la que no contempla implementación de medidas alguna.

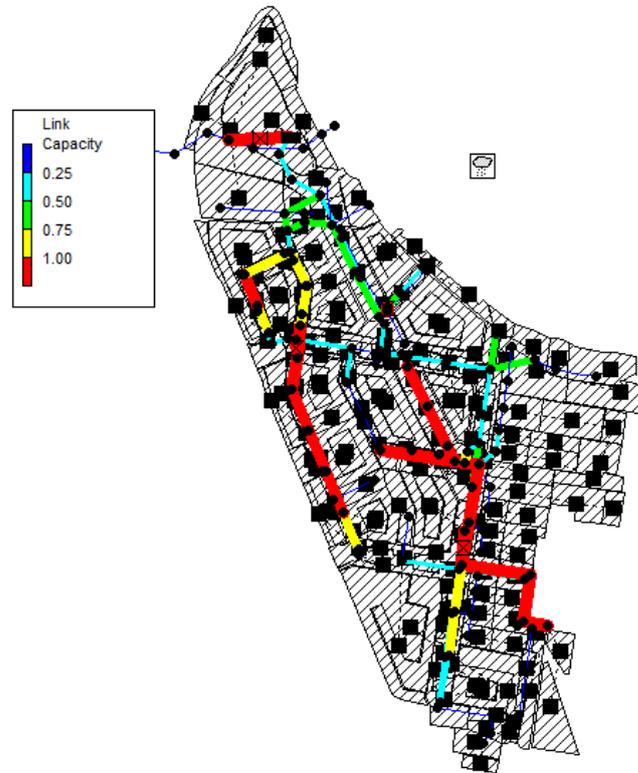


Figura 9.25. Mapa de capacidades en conducciones para la situación más desfavorable.

Para la primera de las situaciones expuesta, cabe excluir los elementos como bombas y válvulas para la interpretación de los resultados, por tanto se puede observar con claridad que el sistema se presente aparentemente sobredimensionado, a pesar de que las conducciones habían sido calculadas para un escenario similar. Por otra parte, para la situación más desfavorable, las conducciones se presentan como insuficientes en algunos puntos, lo cual es lógico, ya que el sistema no ha sido concedido para contemplar una situación tan desfavorable. Hay que tener presente que los tramos donde se sitúan los problemas de capacidad en las conducciones, se caracterizan por ser los tramos de menor pendiente del sistema, lo cual junto a la no óptima selección de diámetros produce los problemas de capacidad mencionados. Con respecto a la capacidad de las conducciones, únicamente cabe mencionar, que en ninguno de los casos la línea de energía llega a alcanzar la cota del terreno.

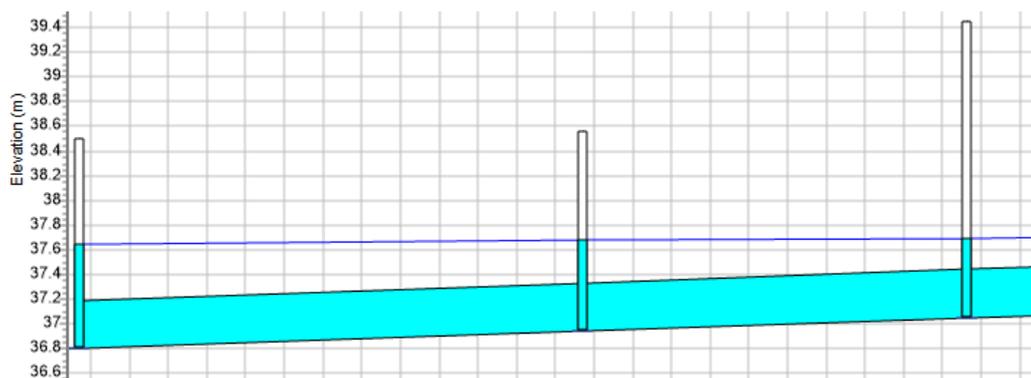


Figura 9.26. Tramo con mayores problemas de capacidad en la situación más desfavorable.

Por otro lado, con respecto al análisis del funcionamiento de las conducciones del sistema, se exponen seguidamente los extremos de velocidades alcanzados.

Escenario	Vel. max (m/s)	Vel. min (m/s)
Menor escorrentía	4.1	0.08
Mayor escorrentía	8.13	0.26

Tabla 9.4. Rango de velocidades en función del escenario simulado.

La diferencia entre el rango de velocidades observado es muy grande, a la hora que no cumple con los criterios de velocidades establecidos, lo cual pone en evidencia la necesidad de revisar el dimensionado del sistema de conducciones. En el siguiente apartado se expondrán las consideraciones consideradas necesarias con respecto este tema.

Finalmente, se plantea el análisis de distintos puntos sobre los cuales se debería profundizar con más detenimiento a la hora de llevar a cabo el proyecto de la urbanización, al igual que a la hora de realizar un análisis hidráulico del sistema el cual no se centre en los SUDS. Se plantea en primer lugar la conveniencia de analizar los caudales enviados a la EDAR por el tanque de tormenta. Por otro lado habría que considerar el análisis de las diferentes estaciones de bombeo de las que se compone el sistema, dado que el correcto y óptimo funcionamiento de las mismas tiene influencia tanto en aspectos hidráulicos como energéticos, y por tanto finalmente económicos. A la hora de realizar el modelo se han dispuesto las bombas para que las mismas sean capaces de satisfacer las exigencias especificadas en proyecto (según los datos disponibles), es decir, para satisfacer las necesidades de riego especificadas y para la evacuación de las aguas del tanque de tormenta, sin adentrarse, tal y como se ha mencionado, en la optimización de dichas bombas.

9.8. PROPUESTAS DE MEJORA

Tras finalizar con el análisis de los resultados que se han considerado convenientes, resulta oportuno introducir una serie de propuestas de posibles mejoras y consideraciones, para de esta manera mejorar la eficiencia del sistema.

En primer lugar, con respecto al funcionamiento del sistema de aprovechamiento de agua, tal y como se ha podido observar, de la manera que se ha concebido el mismo, resulta ser poco eficiente. Con independencia del volumen de las cisternas de almacenamiento de agua, estas permanecen llenas los meses en los que no existe riego, vaciándose rápidamente en los meses estivales para satisfacer las demandas de riego, no permitiendo un llenado de las mismas que permita ser más eficiente, es decir, en invierno donde se presentan más episodios de lluvia y no existe riego alguno, las cisternas permanecen totalmente llenas, mientras que los meses de riego, se consume el agua almacenada en las mismas sin posibilidad de llenado total de las mismas (aparte del riego por la disminución de los eventos de precipitación). Hay que tener en cuenta por otra parte, que la totalidad del caudal de escorrentía proveniente de las cubiertas que se envía a las mismas, cuando estas están llenas, termina en el estanque de retención. La propuesta de mejora pasa por contemplar un aumento en volumen de las cisternas de almacenamiento de agua, ya sea mediante cisternas de mayor volumen o incrementando el número de cisternas a disponer (lo cual implicaría una modificación en el diseño del sistema de conducciones). En este caso habría que verificar si la mejora producida (mayor reutilización), compensa con el coste del aumento de la capacidad de almacenamiento. Otro modo de mejorar la eficiencia del sistema sería cambiar el modo en el cual se ha concebido el mismo, con referencia al sistema de riego. Se especifica que existe riego únicamente 6 meses al año, por tanto, si se contemplase un riego de las superficies verdes para un periodo más prolongado, se podría aprovechar con total seguridad una cantidad más elevada de agua. Para ello sería necesario realizar un estudio más detallado de las necesidades de riego específicas de la vegetación presente en las superficies verdes.

En cuanto al volumen del embalse de retención, tal y como se ha visto en el capítulo anterior, a lo largo de la serie histórica de eventos analizada, presenta una capacidad máxima de aprovechamiento del 31.25 % (para la situación sin ninguna tecnología de drenaje sostenible), por tanto la propuesta de mejora pasa por la reducción del volumen del mismo. Reduciéndolo hasta un 50%, seguiría siendo capaz de albergar el volumen pico ingresado en el mismo incluso para la situación más desfavorable, por tanto el sistema pasaría a ser más eficiente, y se habría

conseguido por otra parte una reducción del coste de ejecución importante. Cabe mencionar que el excesivo volumen de la balsa es debido al criterio que se siguió para su dimensionamiento, el cual indica que el volumen útil ha de ser de 500 m³ por hectárea de suelo impermeable. A pesar del evidente sobredimensionado existente con el criterio establecido, aplicando estrictamente el mismo, se obtiene que el volumen útil debería ser un 20.1% al establecido. Debido a la falta de información no se ha podido profundizar más en este aspecto.

Otra de las propuestas de mejora consideradas, la cual resulta evidente tras analizar los resultados resulta ser la de rediseño de las conducciones. Claro queda que en el momento de redacción del proyecto no se disponía de la herramienta de cálculo utilizada, lo cual repercute en la calidad de los datos y en la precisión del análisis realizado. De la manera que fue concebido el modelo, funcionaba de manera aceptable, a pesar de los fallos que presentaba el mismo. Tras la actualización del modelo y la realización de las distintas simulaciones, se puede observar con claridad que la gran parte de las conducciones se encuentran sobredimensionadas, para la situación en donde se implementan las tecnologías de drenaje sostenible. La propuesta de mejora versa sobre la reducción de las dimensiones de las conducciones, es decir, un rediseño, apoyado en este caso por los datos de caudal arrojado por el modelo matemático generado. Para finalizar con lo que respecta a las conducciones, cabe introducir que resulta muy conveniente la revisión del cálculo de las mismas considerando los entronques por clave, ya que la totalidad de las conducciones se entroncan por solera.

Para finalizar, se propone la introducción de diversos sistemas de medición de caudales, ya que el proyecto no los contempla. Introduciendo caudalímetros en puntos determinados, como por ejemplo la entrada al estanque, o a la salida de alguna cubierta vegetada, podría analizarse más detalladamente el funcionamiento del sistema, al igual que serviría al mismo tiempo como herramienta para la mejora del modelo matemático creado, para proceder si cabe con la realización de futuras mejoras y optimización del sistema implementado.

10. CONCLUSIONES GENERALES

Finalizado el trabajo, se recoge a continuación una síntesis de los resultados obtenidos para cada uno de los grandes bloques de la tesina. De igual modo se analizan las aportaciones de la misma y las líneas de trabajo futuras con relación a los trabajos realizados. Cabe mencionar que aparte de la totalidad del trabajo realizado para la redacción del presente trabajo, el cual se sintetiza en los siguientes puntos, para la redacción de la tesina ha sido posible profundizar más allá de conceptos teóricos y problemas numéricos, ya que ha sido posible la realización de visitas insitu a la cubierta vegetada, para el control y supervisión de la misma, al igual que para la recolección de datos, lo cual completa más si cabe la formación y el conocimiento adquiridos en materia de SUDS, más específicamente sobre cubiertas vegetadas.

10.1. SÍNTESIS DE RESULTADOS

10.1.1. DE LA REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

En primer lugar, tras la revisión del estado del arte, se evidencia la problemática del aumento de las escorrentías urbanas producida por la expansión urbanística experimentada años atrás. Con tal de mitigar el impacto negativo de la impermeabilización del suelo, surgen nuevas técnicas de drenaje urbano, capaces de adaptarse a la fuerte consolidación que presentan los núcleos urbanos, reduciendo las escorrentías generadas tras episodios lluviosos. Dichas técnicas son las denominadas LID (Low Impact Development) o BMP (Best Management Practices), y conocidas más comúnmente como SUDS (Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible).

Por otra parte queda reflejada la constante evolución histórica que han experimentado los sistemas de drenaje urbanos, estando en la actualidad evolucionando paulatinamente del denominado drenaje convencional a los SUDS (los cuales no pretenden ser un sustituto del drenaje convencional, sino más bien un complemento). El concepto más importante que cabe resaltar, el cual es el que permitirá la evolución hacia los SUDS, es el denominado cambio de paradigma, refiriéndose al modo de gestionar las escorrentías urbanas (en términos de cantidad y calidad), donde actualmente se aborda el problema de manera centralizada, pasando mediante este cambio de paradigma a la gestión descentralizada con un enfoque integrado del problema (gestionar el agua desde el momento en que la misma se pone en contacto con la superficie).

Incluso a pesar del conocimiento de los beneficios que aportan los SUDS, a la hora de implantar los mismos resulta importante poder cuantificarlos. Con dicha finalidad construyen modelos

matemáticos de dichos sistemas. Para la modelación matemática de SUDS, tras la revisión de la literatura científica existente, se observa que uno de los softwares más empleados es el utilizado para la redacción de la tesina, el SWMM 5.1, que en su versión más reciente incluye módulos específicos para la modelación de SUDS, lo cual de nuevo pone en evidencia la creciente importancia en el panorama del drenaje urbano de los mismos.

Finalmente, a pesar de existir, no son numerosas las publicaciones científicas referentes a la modelación de SUDS mediante el uso del SWMM, lo cual pone de manifiesto la posibilidad de realizar trabajos de investigación en este campo.

10.1.2. DEL MODELO MATEMÁTICO DE CUBIERTA VEGETADA

El modelo matemático final se encuentra en grado de reproducir la respuesta hidrológica de la cubierta vegetada, tras la obtención final de los parámetros de calibración.

Mediante el análisis correspondiente a una serie anual de precipitaciones, en el que se analiza la escorrentía de la cubierta vegetada, donde se pone de manifiesto el claro beneficio proporcionado por la misma en cuanto a reducción de los volúmenes de escorrentía. Dado que se analizan dos tipos de cubierta vegetada, siendo una la que presenta una vegetación del tipo Sedum (la más extendida y utilizada) y la otra la que presente vegetación nativa de la zona de estudio (Bologna, Italia), se ha podido observar y cuantificar que a pesar de ser las cubiertas Sedum las más extendidas por su buen funcionamiento y adaptación al clima, una cubierta con vegetación autóctona convenientemente seleccionada, resulta ser más eficiente (en términos de reducción de la escorrentía).

Por otro lado el modelo matemático reproduce la reducida eficiencia de las cubiertas vegetadas en periodos invernales, al igual que su mayor rendimiento en los periodos estivales, todo ello relacionado directamente con la capacidad de evapotranspiración de las especies vegetales.

Analizada la capacidad de retención de las cubiertas vegetadas, ya no a nivel anual, sino a nivel de simple evento de precipitación se ha podido cuantificar que resultan muy significativos los eventos de precipitación de escorrentía nula, los cuales a pesar de tratarse de eventos de poco volumen de precipitación, son los que más se repiten a lo largo del año, lo que resalta los beneficios de la introducción de las cubiertas vegetadas los sistemas de drenaje.

10.1.3. DE LA APLICACIÓN A UN CASO REAL

Mediante el análisis de la frecuencia relativa del volumen de agua ingresada al embalse ha sido posible la evaluación y cuantificación de los beneficios introducidos por cada una de las técnicas de drenaje sostenible contempladas en el proyecto de la urbanización, al igual que se han identificado aquellos sistemas que tienen una mayor influencia con respecto a los volúmenes de escorrentía generados, evidenciándose indirectamente aquellos sistemas que, a pesar de funcionar correctamente, no lo hacen de una manera óptima, y por tanto es posible realizar algún tipo de mejoras en los mismos.

Por otra parte ha sido posible analizar de manera más detallada el funcionamiento de cada uno de los sistemas contemplados en proyecto, mediante el análisis individual de estos. Se ha dado conformidad a los resultados obtenidos en la fase de calibración del modelo de la cubierta vegetada, mediante la realización de un análisis de volúmenes de escorrentía sobre distintas cubiertas de la urbanización. Contando esta vez con una serie histórica de 26 años, frente la anual de la primera fase del trabajo, se han obtenido disminuciones de los volúmenes de escorrentía a la salida de las cubiertas en % similares a las de esta primera fase, al que resultados muy similares con respecto a la diferencia de volumen retenido entre las cubiertas vegetadas del tipo SR y NR, mostrando de nuevo el mayor efecto de retención de las últimas. A pesar de las diferencias entre ambos tipos de cubiertas, tras el análisis de los resultados se aprecia un claro paralelismo en cuanto al comportamiento de las mismas, al igual que se pone de manifiesto la proporcionalidad entre superficie vegetada y volumen de agua retenido.

Con el análisis del sistema de reutilización del agua para riego, se aprecia que el mismo presenta claras deficiencias, ya que como se ha cuantificado, el mes de riego que presenta un máximo aprovechamiento del agua, necesita un aporte adicional del 80% con respecto al volumen mensual empleado, lo que muestra que a pesar de las simplificaciones realizadas en la hipótesis de riego, el sistema resulta ser deficiente, lo cual impide el poder aprovechar el agua reutilizada en usos como el ornamental, como establece el proyecto original. Se propone por tanto la mejora del sistema de aprovechamiento de agua mediante el aumento del volumen de almacenamiento, al igual que modificando el propio sistema de riego (ampliando por ejemplo los periodos de riego).

Uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta en el aspecto hidrológico, sobre todo en las nuevas urbanizaciones, es el introducido como “invariancia hídrica”, el cual establecía la no superación de los volúmenes de escorrentía enviados al medio natural tras la urbanización de

suelo, frente los que eran enviados previa a la actuación sobre el mismo. Analizados los resultados obtenidos se concluye que los sistemas implementados en la urbanización permiten no superar estos volúmenes, mostrándose por otro lado, que a pesar del cumplimiento de la “invariancia hídrica”, el último elemento existente previo el vertido al medio natural como es el embalse, resulta estar claramente sobredimensionado.

Aspectos más puramente hidráulicos analizados, como el funcionamiento de las conducciones, evidencian la necesidad de redimensionar las mismas, apoyando este nuevo cálculo con el modelo matemático del sistema actualizado.

10.2. APORTACIONES DE LA TESINA

Las aportaciones fundamentales de esta tesina han sido las siguientes:

- Finalización del modelo matemático de la cubierta vegetada existente en las instalaciones de la Universidad de Bolonia.
 - Caracterización física del sistema.
 - Realización de la parte correspondiente del modelo matemático.
 - Calibración y validación del modelo.
- Obtención de resultados que muestran el análisis detallado del funcionamiento de la cubierta vegetada.
- Posibilidad de analizar el comportamiento hidráulico de la parte de la cubierta vegetada con vegetación autóctona de la zona, de lo que se carecía de experiencias previas.
- Comparación entre el funcionamiento de los distintos tipos de cubierta vegetada.
- Actualización y mejora de un modelo matemático existente sobre el que se consideraban tecnologías de drenaje sostenible.
- Disposición de una herramienta tipo (el modelo matemático) para la toma de decisiones referentes a la implantación de SUDS en urbanizaciones de nueva planta.
- Propuesta de acciones para la mejora del funcionamiento del sistema hidráulico-hidrológico sobre el que versan los SUDS contemplados en el proyecto de la urbanización.
- Evidenciar el potencial del software de libre distribución empleado para la modelación de SUDS.

10.3. LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS

Con respecto al modelo matemático del sistema de cubierta vegetada de la Universidad de Bolonia, se contempla la continua explotación de este, al igual que la actualización del mismo, a medida que se obtengan más datos climatológicos a lo largo del tiempo, pudiendo llegar a realizar una posible nueva calibración del sistema. Actualmente la cubierta no dispone de sistemas de medida de los parámetros de calidad del agua, dado que se trata de un proyecto joven el cual tiene expectativas de crecer paulatinamente con el paso del tiempo, por tanto, tras la implementación de este tipo de sistemas de medida, se debe proceder a completar del modelo matemático, para que el mismo sea capaz de contemplar aspectos tanto cualitativos como cuantitativos.

En referencia a la segunda parte del trabajo, queda abierta la posibilidad de continuar con las labores de mejora del mismo, llevando a cabo las distintas propuestas de mejora que han sido contempladas. Dicho modelo puede servir de ejemplo para trabajos futuros en urbanizaciones similares, especialmente en el proceso de toma de decisiones, referentes estas a la implantación de SUDS.

Especialmente en el panorama nacional, los SUDS son considerados como tecnologías “jóvenes” y por tanto carentes de experiencias y resultados que los avalen, por tanto mediante estudios como el presente, se pretende dar valor y resaltar sus numerosos beneficios, para poder en un futuro haber evolucionado hacia el mencionado como cambio de paradigma en la gestión de las escorrentías urbanas.



11.REFERENCIAS

- Ahiablame, L. & Engel, B., 2012. Effectiveness of Low Impact Development Practices: Literature Review and Suggestions for Future Research. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223(7), pp. 4253-4273.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D. & Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements.. *Irrigation and Drainage Paper*, Volumen 56, pp. 87-90.
- Andrés Doménech, I., 2010. *Evaluación probabilística de indicadores de eficiencia para el dimensionamiento volumétrico de tanques de tormenta para el control de la contaminación de escorrentías urbanas*, Doctorado: Universidad Politécnica de Valencia.
- Bengtsson, L., Grahn, L. & Olsson, J., 2005. Hydrological function of a thin extensive green roof in southern Sweden.. *Nord Hydrol*, 36(3), pp. 259-268.
- Berardi, U., GhaffarianHoseini, A. & Ghaffarian Hoseini, A., 2014. State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*, Volumen 115, pp. 411-428.
- Berghage, R. y otros, 2009. *Green Roofs for Stormwater Runoff Control*.. EPA/600/R-09/026. ed. s.l.:Technical report.
- Berndtsson, J., 2010. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality : A review.. *Ecological Engineering*, 36(4), pp. 351-360.
- Berretta, C., Poë, S. & Stovin, V., 2014. Reprint of “Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods: The influence of vegetation and substrate characteristics”.. *Journal of Hydrology*, Volumen 511, pp. 374-386.
- Bonoli, A. & Cappellaro, F., 2013. Implementing sustainability process into University of Bologna.. *Congr. Ital. Univ. Netw. Dev. Coop.*, pp. 19-21.
- Burszta Adamiak, E. & Mrowiec, M., 2013. Modelling of green roofs hydrologic performance using EPA’s SWMM. *Water Science & Technology*, 68(1), pp. 36-42.
- Carbone, M., Garofalo, G., Nigro, G. & Piro, P., 2014. A Conceptual Model for Predicting Hydraulic Behaviour of a Green Roof.. *Procedia Engineering*, Issue 70, pp. 266-274.

11.REFERENCIAS

- Ahiablame, L., & Engel, B. (2012). Effectiveness of Low Impact Development Practices: Literature Review and Suggestions for Future Research. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223(7), 4253-4273.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. *Irrigation and Drainage Paper*, 56, 87-90.
- Andrés Doménech, I. (2010). *Evaluación probabilística de indicadores de eficiencia para el dimensionamiento volumétrico de tanques de tormenta para el control de la contaminación de escorrentías urbanas*. Doctorado: Universidad Politécnica de Valencia.
- Bengtsson, L., Grahn, L., & Olsson, J. (2005). Hydrological function of a thin extensive green roof in southern Sweden. *Nord Hydrol*, 36(3), 259-268.
- Berardi, U., GhaffarianHoseini, A., & Ghaffarian Hoseini, A. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*, 115, 411-428.
- Berghage, R., Beattie, D., Jarrett, A., Thuring, C., Razaei, F., & O'Connor, T. (2009). *Green Roofs for Stormwater Runoff Control*. (EPA/600/R-09/026. ed.). Technical report.
- Berndtsson, J. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality : A review. *Ecological Engineering*, 36(4), 351-360.
- Berretta, C., Poë, S., & Stovin, V. (2014). Reprint of “Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods: The influence of vegetation and substrate characteristics”. *Journal of Hydrology*, 511, 374-386.
- Bonoli, A., & Cappellaro, F. (2013). Implementing sustainability process into University of Bologna. *Congr. Ital. Univ. Netw. Dev. Coop.*, 19-21.
- Burszta Adamiak, E., & Mrowiec, M. (2013). Modelling of green roofs hydrologic performance using EPA's SWMM. *Water Science & Technology*, 68(1), 36-42.
- Carbone, M., Garofalo, G., Nigro, G., & Piro, P. (2014). A Conceptual Model for Predicting Hydraulic Behaviour of a Green Roof. *Procedia Engineering*, 70, 266-274.

- Carson, T., Marascon, D., Culligan, P., & McGillis, W. (2013). Hydrological performance of extensive green roofs in New York City: observations and multi-year modeling of three full-scale systems. *Environmental Research Letters*, 8(2).
- Carter, T., & Rasmussen, T. (2006). Hydrologic behavior of vegetated roofs. *Journal of the American Water Resources Association*, 42, 1261–1274.
- Castleton, H., Stovin, V., Beck, S., & Davison, J. (2010). Green roofs building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*, 42, 1582–1591.
- Cipolla, S. (2015). *Tetti verdi: Analisi sperimentale*. Doctorado: Università di Bologna.
- Coutts, A., Daly, E., Beringer, J., & Tapper, N. (2013). Assessing practical measures to reduce urban heat: Green and cool roofs. *Building and Environment*, 70, 226-276.
- Dvorak, B., & Volder, A. (2010). Green roof vegetation for North American ecoregions: A literature review. *Landscape and Urban Planning*, 96(4), 197-213.
- Fioretti, R., Palla, A., Lanza, L., & Principi, P. (2010). Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. *Building and Environment*, 45(8), 1890–1904.
- Gambi, G., Maglionico, M., & Tondelli, S. (2011). Water management in local development plans: the case of old Fruit and Vegetable Market in Bologna. *Procedia Engineering*, 21, 1110-1117.
- Getter, K., Rowe, D., & Andresen, J. (2007). Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering*, 31, 225–231.
- Gnecco, I., Palla, A., Lanza, L., & La Barbera, P. (2013). The Role of Green Roofs as a Source/sink of Pollutants in Storm Water Outflows. *Water Resources Management*, 27(14), 4715-4730.
- Gupta, V., Sorooshian, S., & Yapo, P. (1999). Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2), 133-143.
- Hakimdavar, R., Culligan, P., Finazzi, M., Barontini, S., & Ranzi, R. (2014). Scale dynamics of extensive green roofs: Quantifying the effect of drainage area and rainfall

- characteristics on observed and modeled green roof hydrologic performance. *Ecological Engineering*, 73, 494-508.
- Hargreaves, G., & Samani, Z. (1985). Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. *American Society of Agricultural Engineers*, 1(2), 96-99.
- Hilten, R., Lawrence, T., & Tollner, E. (2008). Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D. *Journal of Hydrology*, 358, 288-293.
- Jacobson, J. (2011). Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: A review. *Journal of Environmental Management*, 92(6), 1438–1448.
- Jarrett, A., Hunt, W., & Berghage, R. (2006). Annual and individual storm green roof stormwater response models. *American Society of Agricultural and Biological Engineers Meeting, 062310*, págs. 1-11. Potland.
- Kasmin, H., Stovin, V., & Hathway, E. (2010). Towards a generic rainfall-runoff model for green roofs. *Water Science & Technology*, 62(4), 898–905.
- Lamera, C., Becciu, G., Rulli, M., & Rosso, R. (2014). Green Roofs Effects on the Urban Water Cycle Components. *Procedia Engineering*, 70, 988-997.
- Locatelli, L., Mark, O., Steen, P., Arnbjerg nielsen, K., Bergen, M., & Jhon, P. (2014). Modelling of green roof hydrological performance for urban drainage applications. *Journal of Hydrology*, 519, 3237-3248.
- Morgan, S., Celik, S., & Retzlaff, W. (2013). Green Roof Storm-Water Runoff Quantity and Quality. *Journal of Environmental Engineering*, 138(2), 471-478.
- Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., & Veith, T. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885–900.
- Nagase, A., & Dunnett, N. (2012). Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs: Effects of plant species, diversity and plant structure. *Landscape and Urban Planning*, 97(4), 318–327.

- Nardini, A., Andri, S., & Crasso, M. (2012). Influence of substrate depth and vegetation type on temperature and water runoff mitigation by extensive green roofs: Shrubs versus herbaceous plants. *Urban Ecosystems*, 15, 697–708.
- Nash, J., & Sutcliffe, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I, A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290.
- NYSDEC. (2015). *New York State Stormwater Management Design Manual*. Albany, NY 12233: Department of Environmental Conservation.
- Palla, A., Genaco, I., & Lanza, L. (2012). Compared performance of a conceptual and a mechanistic hydrologic models of a green roof. *Hydrol. Process. Hydrological Processes*, 26, 73-84.
- Palla, A., Gnecco, I., & Lanza, L. (2009). Unsaturated 2D modelling of subsurface water flow in the coarse-grained porous matrix of a green roof. *Journal of Hydrology*, 379(1-2), 193–204.
- Palla, A., Gnecco, I., & Lanza, L. (2010). Hydrologic Restoration in the Urban Environment Using Green Roofs. *Water*, 2, 140-154.
- Penman, L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Water*, 2, 140-154.
- Perales Momparler, S., & Andrés Doménech, I. (2008). Los sistemas urbanos de drenaje sostenible: Una alternativa a la gestión del agua de lluvia.
- Razzaghmanesh, M., Beecham, S., & Kazemi, F. (2014). The growth and survival of plants in urban green roofs in a dry climate. *Science of the Total Environment*, 476-477, 288–297.
- Rodriguez Bayon, J., Rodriguez Hernández, J., Gómez-Ullate Fuente, E., & Castro Fresno, D. (2015). *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. SUDS*. Santander: Escuela de Caminos, Canales y Puertos de Santander.
- Rossman, L. (2010). *Storm Water Management Model User's Manual 5.0*. EPA.
- Schroll, E., Lambrinos, J., Righetti, T., & Sandrock, D. (2011). The role of vegetation in regulating stormwater runoff from green roofs in a winter rainfall climate. *Ecological Engineering*, 37(4), 595-600.

- She, N., & Pang, J. (2010). Physically Based Green Roof Model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15, 458–464.
- Sherrard, J., & Jacobs, J. (2012). Vegetated Roof Water-Balance Model: Experimental and Model Results. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17, 858–868.
- Speak, A., Rothwell, J., Lindley, S., & Smith, C. (2013). Rainwater runoff retention on an aged intensive green roof. *Science of the Total Environment*, 461-462, 28-38.
- Stovin, V., Poë, S., & Berretta, C. (2013). A modelling study of long term green roof retention performance. *Water and Environment Journal*, 24(3), 192–199.
- Stovin, V., Vesuviano, G., & Kasmin, H. (2012). The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions.
- Stovin, V., Vesuviano, G., & Kasmin, H. (2012). The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. *Journal of Hydrology*, 414-415, 148–161.
- Temprano González, J., Gabriel Cervigni, M., Suárez López, J., & Tejero Monzón, J. (1996). Contaminación en redes de alcantarillado urbano en tiempo de lluvia: control en origen. *Revista de obras públicas*(3352), 45-57.
- VanWoert, N., Rowe, D., Andresen, J., Rugh, C., Fernandez, R., & Xiao, L. (2005). Green roof stormwater retention: effects of roof surface, slope, and media depth. *Journal of Environmental Quality*, 34(3), 1036-44.
- Voyde, E., Fassman, E., & Simcock, R. (2010). Hydrology of an extensive living roof under sub-tropical climate conditions in Auckland. *Journal of Hydrology*, 394, 384-395.
- Wong, G., & Jim, C. (2014). Quantitative hydrologic performance of extensive green roof under humid-tropical rainfall regime. *Ecological Engineering*, 70, 366–378.
- Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R., & Shaffer, P. (2015). *The SUDS manual*. London: CIRIA.
- Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferi, C., & Shaffer, P. (2007). *The SUDS manual*. London: CIRIA.
- Yang, W., Li, D., Sun, T., & Ni, G. (2015). Saturation-excess and infiltration-excess runoff on green roofs. *Ecological Engineering*, 74, 327–336.



- Zhang, S., & Guo, Y. (2013). An Analytical Probabilistic Model for Evaluating the Hydrologic Performance of Green Roofs. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18, 19-28.
- Zhao, M., Tabares Velasco, P., Srebric, J., Komarneni, S., & Berghage, R. (2013). Evapotranspiration estimation methods in hydrological models. *Journal of Geographical Sciences*, 23, 359–369.
- Zimmer, U., & Geige, W. (1997). Model for the design of multilayered infiltration. *Water Science & Technology*, 36, 301-306.