



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

MODELACIÓ HIDROLÒGICA DISTRIBUIDA EN ÀMBITOS RESIDENCIALES DE VIVIENDAS UNIFAMILIARES

*Tesina presentada como requisito parcial para optar al título de Máster
en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente*

Autor: J.Nicolás Martín Ojeda

Director: Juan B.Marco Segura

Codirector: Ignacio Andrés Doménech

Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Valencia, Enero de 2010

Esta tesina de máster, si bien ha requerido de esfuerzo y mucha dedicación, no hubiese sido posible su finalización sin la desinteresada de todas y cada una de las personas que a continuación citaré y muchas de las cuales han sido un soporte muy fuerte en momentos de angustia y desesperación.

Primero antes que nada, dar gracias a Dios, por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

Agradecer hoy y siempre a mi familia porque a pesar de no estar presentes físicamente, se que procuran mi bienestar desde mi tierra, mi madre Pilar, a mi tía Margarita, a mi abuela y a mis hermanos Saúl, Samuel y Joanna, porque a pesar de la distancia, el ánimo, el apoyo y alegría que me brindan me dan la fortaleza necesaria para seguir adelante.

Así también al departamento de ingeniería hidráulica, en especial a los compañeros del área de hidrología y de hidráulica que siempre han aportado su ayuda y su colaboración.

Aquellos profesores que me han ayudado en la medida de lo posible, en especial al coordinador del máster, Jorge García Serra García por su dedicación implicación y por supuesto consejos y conocimientos adquiridos en hidráulica.

Finalmente a mi director Juan B. Marco Segura, por la colaboración, paciencia, apoyo brindados desde siempre y por supuesto a mi codirector Ignacio Andrés Doménech por su ayuda, implicación y constancia.

En general quisiera agradecer a todas y cada una de las personas que han vivido conmigo la realización de esta tesina de máster, con sus altos y bajos y que no necesito nombrar porque tanto ellas como yo sabemos que desde los mas profundo de mi corazón les agradezco el haberme brindado todo el apoyo, colaboración, ánimo y sobre todo cariño y amistad.

RESUMEN

En este documento se presenta una investigación basada en la modelación hidrológica de ciertas zonas urbanas, concretamente de ámbitos residenciales caracterizados por viviendas unifamiliares. Se presenta un estudio comparativo entre el enfoque tradicional del problema (por ejemplo, el contemplado en la normativa vigente para el diseño de obras de saneamiento propuesta por la Ayuntamiento de Valencia) y un modelo con mayor grado de detalle, en el que se incorporan elementos que dicha normativa no contempla (procesos que ocurren dentro de la parcela).

La normativa está basada en el concepto de cuenca global, caracterizado por la falta de representatividad de las superficies existentes en la zona, la cual contempla la producción de escorrentía a través de modelos de producción simples basados en coeficientes de escorrentía fijados para un determinado período de recurrencia. En cambio, una aproximación al estudio a nivel de parcela (como principal elemento de producción de escorrentía) supone un mayor grado de detalle de la geomorfología de la cuenca, implicando un ajuste más realista de la producción de escorrentía. Con todo esto, el objetivo de este trabajo es realizar una comparativa para cuencas urbanas de ámbitos residenciales entre la modelación como cuenca global y la modelación detallada de parcela.

Para tal efecto, se emplea un modelo hidrológico distribuido de estructura ramificada de la escorrentía urbana (URBS-MO). Para poder hacer uso de éste, es necesario conocer la ocupación del suelo. Para ello, se ha recopilado información utilizando técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

El estudio se realiza en ámbitos residenciales formados por viviendas unifamiliares, generalmente casas de una planta con zonas ajardinadas, piscinas y pistas deportivas. La zona seleccionada está compuesta por una serie de urbanizaciones en Campolivar, término municipal de Godella (Valencia).

La comparativa demuestra que el análisis con los procesos detallados en la parcela genera caudales pico en la red del orden de la tercera parte de los obtenidos con el enfoque simplificado. Esto implica que un diseño de la red con la metodología simplificada conduce a un sobredimensionamiento innecesario de la misma, ya que en las zonas residenciales el efecto de las zonas permeables adquiere mucha importancia.

RESUM

En este document es presenta una investigació basada en la modelació hidrològica de certes zones urbanes, concretament d'àmbits residencials caracteritzats per vivendes unifamiliars. Es presenta un estudi comparatiu entre l'aproximació tradicional del problema (per exemple, el contemplat en la normativa vigent per al disseny d'obres de sanejament proposada per l'Ajuntament de València) i un model amb major grau de detall, en el que s'incorporen elements que aquesta normativa no contempla (processos que ocorren dins de la parcel·la)

La normativa està basada en el concepte de conca global, caracteritzat per la falta de representativitat de les superfícies existents en la zona, la qual contempla la producció d'escolament a través de models de producció simples basats en coeficients d'escolament fixats per a un determinat període de recurrència. En canvi, una aproximació a l'estudi a nivell de parcel·la (com a principal element de producció d'escolament) suposa un major grau de detall de la geomorfologia de la conca, implicant un ajust més realista de la producció d'escolament. Amb tot açò, l'objectiu d'este treball és realitzar una comparativa per a conques urbanes d'àmbits residencials entre la modelació com a conca global i la modelació detallada de parcel·la.

Per a tal efecte, s'utilitza un model hidrològic distribuït d'estructura ramificada de l'escolament urbà (URBS-MO). Per a poder fer ús d'aquest, és necessari conèixer l'ocupació del sòl. Per a això, s'ha recopilat informació utilitzant tècniques de Sistemes d'Informació Geogràfica (SIG).

L'estudi es realitza en àmbits residencials formats per vivendes unifamiliars, generalment cases d'una planta amb zones enjardinades, piscines i pistes esportives. La zona seleccionada està composta per una sèrie d'urbanitzacions en Campolivar, terme municipal de Godella (València).

La comparativa demostra que l'anàlisi amb els processos detallats en la parcel·la genera cabals màxims en la xarxa de l'orde de la tercera part dels obtinguts amb l'aproximació simplificada. Açò implica que un disseny de la xarxa amb la metodologia simplificada conduïx a un sobredimensionament innecessari de la mateixa, ja que en les zones residencials l'efecte de les zones permeables adquirix molta importància.

SUMMARY

A research is presented based on hydrology modelling for urban areas, namely a residential area of single-family houses is a comparative study of the traditional approach for hydrological modelling (i.e. the one considered in the current legislation for the drainage works design as proposed by the Valencia's city council), and a detailed-in-depth model, in which elements not considered in the current legislation are incorporated (processes that occur inside the parcel)

Standard procedure is based on the concept of global basin, characterized by the lack of representativeness of surfaces within the area. This procedure considers runoff production through simple production models, based on runoff coefficients, which are set for a determined period of recurrence. On the other hand, an approach to the study on a plot basis (as the main element of runoff production) involves deeper detail of the basin's geomorphology. This implies a more realistic adjustment of the runoff production.

The objective of this study is the comparison between global basin modelling and plot detailed modelling for urban basins in residential areas.

For such purpose, urban runoff branching structure model (URBS-MO) was used. In order to make use of this model, it was necessary to assess land use occupation, by using Geographic Information Systems (GIS) techniques.

The study was carried out in residential areas made up by single-family houses, generally one-floor houses with landscaped areas, swimming pools and sports courts. The chosen area is located in Campolivar, a district of the township of Godella (Valencia)

The present study proved that plot analysis through detailed processes reduces by one third the sewer network peak flows, in comparison with results obtained with a simplified approach. This means that sewer network design using simplified methodology can lead to an unnecessary oversizing of such network. The main reason is the effect of permeable surfaces within residential areas.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	1
RESUM	1
SUMMARY	1
ÍNDICE DE CONTENIDOS	1
ÍNDICE DE GRÁFICOS	1
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	6
ÍNDICE DE ECUACIONES	7
1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO GENERAL	1
1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.2 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	2
2 MODELACIÓN HIDROLÓGICA DETALLADA DE PARCELA: ESTADO DEL ARTE	2
2.1 ANTECEDENTES EN LA HIDROLOGÍA URBANA	3
2.2 SITUACIÓN ACTUAL	4
2.3 METODOLOGÍA PARA LA FORMULACIÓN DE LA MODELACIÓN DETALLADA DE PARCELA	4
2.3.1 <i>MORFOLOGÍA URBANA Y MODELACIÓN HIDROLÓGICA</i>	<i>5</i>
2.3.2 <i>MODELACIÓN DE LOS PROCESOS HIDROLÓGICOS EN LA PARCELA</i>	<i>7</i>
2.3.3 <i>PROPAGACIÓN EN LA SUPERFICIE Y EN LA RED DE ALCANTARILLADO</i>	<i>9</i>
2.3.4 <i>MODELACIÓN DE LOS PROCESOS EN LA CUENCA GLOBAL</i>	<i>12</i>
2.3.5 <i>DISCUSIÓN</i>	<i>13</i>
3 DATOS DE PARTIDA	13
3.1 MARCO DESCRIPTIVO DE LA ZONA	14
4 BASES TEÓRICAS	16
4.1 DISEÑO SEGÚN LA NORMATIVA	16
4.1.1 <i>ESTRUCTURA GENERAL DE LA RED</i>	<i>17</i>
4.2 DIMENSIONAMIENTO HIDRÁULICO	17
4.2.1 <i>DIMENSIONAMIENTO HIDROLÓGICO</i>	<i>18</i>
4.3 CÁLCULO HIDRÁULICO	20
4.3.1 <i>COMPROBACIÓN DE LAS VELOCIDADES PARA COLECTORES CIRCULARES</i>	<i>22</i>
4.3.2 <i>COMPROBACIÓN DE LA LÍNEA DE ENERGÍA</i>	<i>22</i>
4.4 ELEMENTOS SINGULARES	23
4.5 MODELACIÓN CON INFOWORK	23
4.5.1 <i>DEFINICIÓN DE MODELO MATEMÁTICO</i>	<i>24</i>
4.5.2 <i>CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL SOFTWARE</i>	<i>25</i>
4.5.3 <i>INTERFACE</i>	<i>26</i>
4.5.4 <i>ELEMENTOS ESPECIALES MODELADOS</i>	<i>27</i>
4.5.5 <i>INPUTS DE PRECIPITACIÓN</i>	<i>29</i>
4.5.6 <i>MODELOS DE PRODUCCIÓN</i>	<i>30</i>
4.5.7 <i>MODELO DE PROPAGACIÓN EN SUPERFICIE</i>	<i>31</i>
4.5.8 <i>MODELACION DEL FLUJO EN LA RED DE COLECTORES: PROPAGACIÓN EN LA RED</i>	<i>32</i>

5	<i>DISEÑO DE LA RED DE PLUVIALES</i>	39
5.1	DISEÑO CON LA NORMA	39
5.1.1	<i>CARACTERÍSTICAS TOPOLÓGICAS DE LA RED</i>	39
5.1.2	<i>CÁLCULO</i>	40
5.1.3	<i>RESULTADOS EN EL DISEÑO DE LOS COLECTORES</i>	42
5.2	OPTIMIZACIÓN DE LA RED	43
5.3	PERFILES LONGITUDINALES DE LOS COLECTORES	47
6	<i>ESTUDIO COMPARATIVO</i>	48
6.1	MODELO DE CUENCA GLOBAL	48
6.2	MODELO DETALLADO DE PARCELA	49
6.3	COMPARATIVA ENTRE AMBAS METODOLOGÍAS	52
6.3.1	<i>PARCELAS CON CONEXIÓN DE LAS BAJANTES A LOS POZOS</i>	53
6.3.2	<i>PARCELAS SIN CONEXIÓN DE LAS BAJANTES A LOS POZOS</i>	55
6.4	MODELO DETALLADO DE PARCELA CON IMBORNALES	57
6.4.1	<i>PARCELAS CON CONEXIÓN DE LAS BAJANTES A LOS POZOS</i>	58
6.4.2	<i>PARCELAS SIN CONEXIÓN DE LAS BAJANTES A LOS POZOS</i>	59
7	<i>RESULTADOS EN EL PUNTO DE SALIDA</i>	61
8	<i>CONCLUSIONES Y APORTES DE LA TESINA</i>	63
8.1	CONCLUSIONES DEL TRABAJO	63
8.2	APORTES DE LA INVESTIGACIÓN	66
9	REFERENCIAS	67
10	<i>APÉNDICE 1:PERFILES LONGITUDINALES DELOS COLECTORES</i> ..	69
11	<i>APENDICE 2: HIDROGRAMAS GENERADOS POR CADA COLECTOR</i>	74
12	<i>APÉNDICE 3:FOTOGRAFÍAS DE LAS SUPERFICIES ANALIZADAS</i> ...	96

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1.- Mapa representativo de los diferentes elementos de hidrología urbana, así como las capas usada para realizar el modelo este estudio.	6
Gráfico 2.- Detalle de la estructura ramificada de escorrentía urbana (RBS) desde la captación hasta el punto de salida de la red.	7
Gráfico 3.- Esquema conceptual de los procesos hidrológicos en la parcela según (Berthier, 2004).	8
Gráfico 4.- Representación esquemática de la conexión de dos elementos Hidrológicos	9
Gráfico 5.- Mapa de las áreas de influencia de cada uno de los elementos de hidrología urbana (UHE), escala 1:3510.	10
Gráfico 6.- Mapa de las áreas de influencia, de cada uno de los embalses dinámicos que representan el jardín y la producción de escorrentía de los tejados, escala 1 3510.	10
Gráfico 7.- Detalle de las áreas de influencia de los elementos de hidrología urbana (UHE), escala 1:3510.	11
Gráfico 8.- Mapa de las áreas de influencia del modelo detallado de parcela, escala 1:3075.	12
Gráfico 9.- Ecuación de continuidad, elemento de control.	33
Gráfico 10.- Ecuación de cantidad de movimiento: elemento de control.	34
Gráfico 11.- Áreas de influencia de los 11 colectores.	39
Gráfico 12.- Porcentajes de las superficies que representan la cuenca, función del uso del suelo.	40
Gráfico 13.- Hietograma de bloques alternos, suavizados por medio de los splines .Esto es para evitar los efectos indeseados de la modelación hidráulica fruto de las discontinuidades que supone pasar de un bloque al siguiente en el hietograma original de bloques alternos.	44
Gráfico 14.- Optimización de la red, escala 1:4260, sólo los conductos en azul llegan con un estado de carga óptimo. Es decir, la relación Q_0/Q lleno es de 0,8, siendo este el valor óptimo que debe presentar una red para su correcto diseño y posterior funcionamiento. Para el resto de los conductos, la capacidad de estado presión /carga están próximos a este valor, también se pueden diferenciar los dos usos del suelo, los terrenos edificables de color marrón y el asfalto de color azul.	46
Gráfico 15.- Diámetros interiores de cada uno de los conductos que conforman los colectores.	46
Gráfico 16.- Perfil longitudinal dinámico del Colector 1.	47
Gráfico 17.- Modelo de producción del SCS para un umbral de escorrentía $P_0 = 40$ mm.	49
Gráfico 18.- Detalle de los porcentajes de las superficies diferenciadas en la cuenca urbana para el modelo detallado de parcela.	50
Gráfico 19.- Hietogramas de bloques alternos con las diferentes intensidades pico. Con la forma final del hietograma suavizada con splines.	51
Gráfico 20.- Hidrogramas a la salida del colector 1 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	54
Gráfico 21.- Hidrogramas a la salida del colector 1 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	56

Gráfico 22.- Hidrogramas a la salida del colector 1 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	59
Gráfico 23.- Hidrogramas a la salida del colector 1 para las metodologías comparativas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	60
Gráfico 24.- Comparativa final en el punto de desagüe, para los diferentes modelos conceptuales propuestos y el modelo de cuenca global propuesto por la normativa Valenciana para el diseño de redes de saneamiento, para la tormenta de diseño de periodo de retorno de 25 años.	62
Gráfico 25.- Perfil longitudinal dinámico del Colector 2.	69
Gráfico 26.- Perfil longitudinal dinámico del Colector 3.	69
Gráfico 27.- Perfil longitudinal dinámico del Colector 4.	70
Gráfico 28.- Perfil longitudinal dinámico del Colector 5.	70
Gráfico 29.- Perfil longitudinal dinámico del Colector 6.	71
Gráfico 30.- Perfil longitudinal dinámico del Colector 7.	71
Gráfico 31.- Perfil longitudinal dinámico del Colector 8.	72
Gráfico 32.- Perfil longitudinal dinámico del Colector 9.	72
Gráfico 33.- Perfil longitudinal dinámico del Colector 10.	73
Gráfico 34.- Perfil longitudinal dinámico del Colector 11.	73
Gráfico 35.- Hidrogramas a la salida del colector 1 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	74
Gráfico 36.- Hidrogramas a la salida del colector 2 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	74
Gráfico 37.- Hidrogramas a la salida del colector 3 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	75
Gráfico 38.- Hidrogramas a la salida del colector 4 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	75
Gráfico 39.- Hidrogramas a la salida del colector 5 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	76
Gráfico 40.- Hidrogramas a la salida del colector 6 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	76
Gráfico 41.- Hidrogramas a la salida del colector 7 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	77

Gráfico 42.- Hidrogramas a la salida del colector 8 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	77
Gráfico 43.- Hidrogramas a la salida del colector 9 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	78
Gráfico 44.- Hidrogramas a la salida del colector 10 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	78
Gráfico 45.- Hidrogramas a la salida del colector 11 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	79
Gráfico 46.- Hidrogramas a la salida del colector 1 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	79
Gráfico 47.- Hidrogramas a la salida del colector 2 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	80
Gráfico 48.- Hidrogramas a la salida del colector 3 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	80
Gráfico 49.- Hidrogramas a la salida del colector 4 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	81
Gráfico 50.- Hidrogramas a la salida del colector 5 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	81
Gráfico 51.- Hidrogramas a la salida del colector 6 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	82
Gráfico 52.- Hidrogramas a la salida del colector 7 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	82
Gráfico 53.- Hidrogramas a la salida del colector 8 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	83
Gráfico 54.- Hidrogramas a la salida del colector 9 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y sin	

<i>imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).</i>	83
Gráfico 55.- <i>Hidrogramas a la salida del colector 10 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).</i>	84
Gráfico 56.- <i>Hidrogramas a la salida del colector 11 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).</i>	84
Gráfico 57.- <i>Hidrogramas a la salida del colector 1 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).</i>	85
Gráfico 58.- <i>Hidrogramas a la salida del colector 2 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).</i>	85
Gráfico 59.- <i>Hidrogramas a la salida del colector 3 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).</i>	86
Gráfico 60.- <i>Hidrogramas a la salida del colector 4 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).</i>	86
Gráfico 61.- <i>Hidrogramas a la salida del colector 5 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).</i>	87
Gráfico 62.- <i>Hidrogramas a la salida del colector 6 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).</i>	87
Gráfico 63.- <i>Hidrogramas a la salida del colector 7 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).</i>	88
Gráfico 64 <i>Hidrogramas a la salida del colector 8 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).</i>	88
Gráfico 65.- <i>Hidrogramas a la salida del colector 9 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).</i>	89
Gráfico 66.- <i>Hidrogramas a la salida del colector 10 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).</i>	89

Gráfico 67.- Hidrogramas a la salida del colector 11 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	90
Gráfico 68.- Hidrogramas a la salida del colector 1 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	90
Gráfico 69.- Hidrogramas a la salida del colector 2 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	91
Gráfico 70.- Hidrogramas a la salida del colector 3 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	91
Gráfico 71.- Hidrogramas a la salida del colector 4 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	92
Gráfico 72.- Hidrogramas a la salida del colector 5 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	92
Gráfico 73.- Hidrogramas a la salida del colector 6 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	93
Gráfico 74.- Hidrogramas a la salida del colector 7 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	93
Gráfico 75.- Hidrogramas a la salida del colector 8 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	94
Gráfico 76.- Hidrogramas a la salida del colector 8 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	94
Gráfico 77.- Hidrogramas a la salida del colector 10 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	95
Gráfico 78.- Hidrogramas a la salida del colector 11 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Velocidades exigidas por la normativa de diseño empleada.....	21
Tabla 2.- Detalle de los resultados de la aplicación del método racional calibrado....	41
Tabla 3.- Detalle del cálculo del diámetro de diseño para cada colector.....	41
Tabla 4.- Cálculo de los parámetros del tiempo de concentración para el colector 1..	41
Tabla .- 5 Resultados de los parámetros del método racional calibrado de Témez.	42
Tabla 6.- Resultados de los diámetros interiores de los colectores.....	42
Tabla 7.- Resultados de los parámetros de tiempo de concentración para cada colector.	42
Tabla 8.- Resultados de la comprobación de autolimpieza de los colectores, cuya velocidad debe estar entre el rangos permitido por la normativa.	43
Tabla 9.- Velocidades de cada uno de los conductos que forman los colectores para el diseño optimizado.	45
Tabla 10.- Restantes valores de las velocidades en cada conducto optimizado.....	45
Tabla 11.- Detalles de los valores de los diferentes coeficientes de escorrentía utilizados.....	50
Tabla 12.- Rugosidades de las superficies presentes en la modelación de parcela.	52

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.- Forma típica de una parcela, sección UHE.	6
Ilustración 2.- Mapa del modelo digital del terreno del noroeste de la provincia de Valencia, que engloba la zona de estudio, término municipal de Godella, del que se han extraído diversos datos. Escala 1:57600.....	14
Ilustración 3.- Detalle de la ortofoto utilizada para la extracción de polígonos que determinan el uso del suelo.	15
Ilustración 4.- Detalle de las coberturas geográficas de la urbanización Campolivar en el pueblo de Godella.....	16
Ilustración 5.- Diagrama de flujo del programa Infoworks.	26
Ilustración 6.- Entorno de trabajo del programa.	27
Ilustración 7.- Detalle de la bajante y del embalse dinámico en superficie que recogen todo el caudal de cada parcela.	27
Ilustración 8.- Detalle de las opciones del menú de los pozos de registro.....	28
Ilustración 9.- Detalle de las opciones del menú de los embalse dinámicos en superficie.	29
Ilustración 10.- Detalle de las conexiones de los conducciones que conducen la escorrentía hacia el pozo de registro, como se aprecia en la superficie.	29
Ilustración 11.- Detalle gráfico uno de los elementos de captación del modelo de parcela, un imbornal.	29
Ilustración 12.- Esquema de resolución implícito.	37
Ilustración 13.- Ranura de Preissmann.	38
Ilustración 14.- Detalle de las pendientes pronunciadas de las calles de la urbanización de estudio.....	48
Ilustración 15.- Detalle explicativo de los diferentes elementos de hidrología urbana (UHE) que forman el modelo detallado de parcela con las bajantes conectadas a la red.	53

Ilustración 16.- Detalle del modelo conceptual, caracterizado por la ausencia de las conexiones a la red de los tejados mediante las bajantes.	56
Ilustración 17.- Detalle del modelo conceptual de la parcela con las bajantes conectadas a la red principal, los embalses dinámicos representativos del jardín y la inclusión de los imbornales en las calles.	58
Ilustración 18.- Detalle del modelo conceptual caracterizado por la ausencia de bajantes y la inclusión de los imbornales.	60
Ilustración 19.- Detalle de una de las piscinas de la zona	96
Ilustración 20.- Jardines de la parcelas	96
Ilustración 21.- Tejados a dos aguas de una de las viviendas	96
Ilustración 22.- Asfalto de una de las carreteras	96
Ilustración 23.- Pavimentos internos	96
Ilustración 24.- Detalle de otra carreteras de la urbanización.	96
Ilustración 25.- Zonas verdes dentro de la parcela.	97
Ilustración 26.- Tejados planos, azoteas.	97
Ilustración 27.- Detalle de un tejado a dos aguas	97
Ilustración 28.- Pistas deportivas	97

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.- Tiempo de concentración en minutos.	18
Ecuación 2.- Expresión algebraica de la curva IDF.	19
Ecuación 3.- Expresión de K_p si $t_d < a$	20
Ecuación 4.- Expresión de K_p si $t_d \geq a$	20
Ecuación 5.- Valores para a y b en función del caudal medio	20
Ecuación 6.- Expresión matemática del caudal para el método de Témez	20
Ecuación 7.- Expresión matemática del diámetro de diseño.	21
Ecuación 8.- Expresión de la velocidad	22
Ecuación 9.- Expresión iterativa para el ángulo de la superficie mojada.	22
Ecuación 10.- Expresión cota de energía.	22
Ecuación 11.- Producción de escorrentía.	30
Ecuación 12.- Ecuación de continuidad	30
Ecuación 13.- Ecuación de la escorrentía acumulada.	31
Ecuación 14.- Variación de la escorrentía acumulada frente a precipitación bruta....	31
Ecuación 15.- Ecuación de continuidad.	33
Ecuación 16.- Ecuación de cantidad de movimiento.	34
Ecuación 17.- Ecuación reducida de cantidad de movimiento.	36
Ecuación 18.- Sistema de Saint Venant.	36
Ecuación 19.- Condición de Courant.	38
Ecuación 20.- Velocidad de la onda cinemática.	38
Ecuación 21.- Ecuación para el cálculo del coeficiente medio de escorrentía.	40
Ecuación 22.- Abstracciones para el modelo SCS.	51

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO GENERAL

Las ciudades no se asemejan a entornos que podamos encontrar en las cuencas naturales pero pueden tener un comportamiento hidrológico sujeto a los mismos fenómenos meteorológicos. Una cuenca urbana puede definirse en los mismos términos hidrológicos que una cuenca natural, aunque tengan características geomorfológicas propias. En estas líneas vamos a ocuparnos de los procesos hidrológicos que tienen lugar en la superficie de una cuenca urbana y de su aportación a la red de saneamiento.

La modificación de los terrenos naturales en los ámbitos urbanos por parte del hombre, para la construcción de viviendas, zonas de recreo, etc. (superficies mayoritariamente impermeables), implica una modificación de las características propias de los terrenos vegetados existentes anteriormente. Esto genera que las escorrentías generadas sean mayores y por tanto más difícil su captación y posterior transporte a la red. Esto unido al carácter aleatorio de la variable lluvia nos lleva a la conclusión de que, para una adecuada captación es necesaria la correcta definición de las superficies existentes y sus respectivos umbrales de escorrentía.

La gestión tradicional de las aguas de tormenta en ámbitos residenciales unifamiliares se basa en el control de la escorrentía superficial mediante dos métodos principalmente: superficies permeables que favorecen la infiltración y disminuyen la producción de escorrentía, y de la captación de los posibles caudales generados en superficie para su posterior transporte en la red. Esto último ha llevado a que se diseñen sistemas de conducción subterráneos, como por ejemplo los conductos de los imbornales en las calles, las redes de bajantes y las conducciones que conectan el agua recogida en los tejados hasta los pozos de registro..

Con todo lo expuesto, el objetivo general de esta investigación es establecer una comparativa para ámbitos residenciales entre la modelación propuesta por la normativa del ayuntamiento de Valencia, modelo de cuenca global, y un modelo detallado de parcela que incluya una discretización de procesos hidrológicos e hidráulicos mucho mayor, mediante el empleo del programa InfoWorks CS.

1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS DE LA INVESTIGACIÓN

Para llegar al objetivo antes comentado, se requieren, a su vez, unos objetivos específicos, que se detallan a continuación:

- Analizar los posibles procesos y elementos físicos que pueden encontrarse al modelar las parcelas con mayor detalle.
 - Definir la hidráulica en la parcela, es decir, tener en cuenta las conducciones que canalizan la escorrentía superficial hasta la red principal, como son las bajantes de los tejados o los imbornales de las calles.
 - Definir un modelo representativo para ámbitos residenciales formados por viviendas unifamiliares.
-

1.2 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

A lo largo del capítulo 2 se presenta una revisión del estado del arte sobre la importancia de la modelación hidrológica urbana en ámbitos residenciales caracterizados por viviendas unifamiliares. Se exponen los antecedentes y se revisan tanto los principales métodos empleados para la formulación del modelo representativo de los ámbitos residenciales, como los resultados de diversas investigaciones relacionadas con la temática.

En el capítulo 3 se aborda la parte descriptiva de la cuenca residencial analizada y la información necesaria para la correcta edición del modelo. Se realiza una descripción detallada del entorno que comprende la zona de estudio, así como las características físicas de la zona residencial en concreto.

En el capítulo 4 se establecen las bases teóricas necesarias para el dimensionamiento propuesto por la normativa del Ayuntamiento de Valencia, las metodologías y modelos utilizados por el software empleado (InfoWorks CS) para la simulación y optimización de la red.

En el capítulo 5 se establece el diseño de la red según la normativa del ayuntamiento de Valencia (diseño convencional).

En el capítulo 6 se hace una comparativa entre la modelación de tipo cuenca global y el modelo detallado de parcela.

En el capítulo 7 se presentan los resultados correspondientes a la comparativa entre la modelación de la cuenca global y el modelo detallado de parcela.

En el capítulo 8 se establece una discusión de los resultados, así como las conclusiones y recomendaciones finales.

2 MODELACIÓN HIDROLÓGICA DETALLADA DE PARCELA: ESTADO DEL ARTE

En la modelación hidrológica de áreas urbanas, un parámetro de difícil cuantificación es el porcentaje de áreas impermeables. Un aspecto que complica la tarea de estimar este parámetro es la dificultad intrínseca de las áreas urbanas donde es posible encontrar varios tipos de uso del suelo en espacios muy reducidos, siendo el porcentaje de áreas impermeables en una cuenca urbana un parámetro muy sensible en cualquier modelo de producción de escorrentía superficial.

Por tanto, la correcta definición de las superficies es un aspecto importante para la determinación de las áreas que contribuyen a la producción de escorrentía y, para el dimensionamiento de los elementos de evacuación necesarios ante la respuesta de la cuenca frente a una tormenta.

2.1 ANTECEDENTES EN LA HIDROLOGÍA URBANA

El rápido crecimiento urbano que se inició en la segunda mitad del siglo XX dio lugar a graves déficits de infraestructuras urbanas para el drenaje de las aguas de lluvia, lo que motivó grandes problemas de inundación. Todo ello impulsó la aplicación de los conceptos clásicos de la hidráulica y la hidrología al medio urbano: estudio de la lluvia, estudio de la transformación de lluvia en escorrentía y del comportamiento hidráulico del alcantarillado. De este modo, hizo su aparición una nueva disciplina: la hidrología urbana. A partir de los años setenta, una vez ya realizado un notable avance de los fenómenos ligados a la cantidad (caudales) se han imputado otros estudios de los fenómenos ligados a la calidad (carga contaminante) en el drenaje urbano. El interés de este nuevo enfoque ambientalista en el estudio de drenaje urbano, es motivado por los graves problemas de contaminación que pueden crear las aguas de escorrentía urbana vertidas directamente al medio receptor. Observamos, pues, que en el estudio y realización de infraestructuras de drenaje urbano ha existido una evolución en la problemática a resolver: higiénicas, hidráulicas y ambientales. El problema general de drenaje urbano resulta de lo más complejo y, por este motivo, se requiere una herramienta de cálculo sencilla y ágil, a la vez que rigurosa para el diagnóstico del estado actual de nuestras redes o para el diseño de nuevas infraestructuras.

Los problemas de modelación hidrológica urbana, han sido reconocidos por los investigadores de la ciencia desde hace varias décadas. El grado de información que pueden proporcionar las bases de datos (UDB) sirve de gran ayuda para la reconstrucción de la respuesta hidrológica de una cuenca urbana frente a una tormenta, obteniendo la forma del hidrograma en un punto analizado.

La idea de vincular la respuesta hidrológica de una cuenca hidrográfica a su geomorfología ha dado lugar a un vuelco completo de los estudios en las últimas dos décadas. El Hidrograma Unitario Geomorfológico Instantáneo (GIUH) se introdujo por primera vez utilizando conceptos probabilísticos (*Rodríguez – Iturbe y Valdés, 1979, Gupta 1980*). La propuesta de la teoría, asume que la estructura de la red de drenaje y los viajes de partículas de agua se representan mediante funciones de distribución. Posteriormente, han dado avances considerables en nuestra comprensión del escurrimiento del terreno y su interacción (*Rodríguez – Iturbe y Rinaldo, 1997*) y la regionalización de la escorrentía (*Gupta y Waymire, 1998*). Más recientemente, estudios similares de GIUH, se han basado en la descripción explícita del flujo en la red, derivadas de modelos digitales de elevación del terreno (*Maidment y Olivera (1999)*).

Los SIG han supuesto una gran ayuda para relacionar la información, y ayudar a reproducir el proceso: precipitación – escorrentía y su modelación, (*Grayman, 1982; Djokic y Maidment, 1991; Greene y de Crucero, 1995*). El flujo del agua en sus cauces preferentes se deriva a partir de modelos digitales de elevación de la superficie (*Smith y Brilly, 1992*).

La mayoría de autores que formulan el problema de la modelación hidrológica urbana han utilizado modelos de simulación para analizar el comportamiento de la red, algunos de libre distribución, tales como los proporcionados por la agencia americana de protección del medio ambiente (EPA), el programa Storm Water Management Model (SWMM), o modelos comerciales, como el Mouse (*Instituto Hidráulico de Dinamarca,*

1998), que combina un módulo hidrológico que simula los hidrogramas de las cuencas urbanas, con la propagación de estos hidrogramas en la tubería principal, generalmente sobre la base de las ecuaciones de Saint – Venant (propagación en la red de colectores) o la utilización de una de sus simplificaciones, como es la teoría de onda cinemática.

2.2 SITUACIÓN ACTUAL

El crecimiento de las zonas impermeables en las ciudades modifica los flujos naturales del ciclo hidrológico, tanto desde el punto de vista cualitativo como cuantitativo. La reducción de espacios verdes reduce en primera instancia la intercepción natural del suelo. Este aumento de la impermeabilidad, redundando en una reducción de la infiltración, como consecuencia de todo ello, se generan volúmenes de escorrentía netamente mayores, acelerando los tiempos de respuesta y por tanto, incrementando el riesgo de inundaciones. De ahí la importancia en la correcta cuantificación de la posible producción de escorrentía que puedan generar las superficies presentes en la cuenca urbana.

La situación actual en España para resolver el problema de la producción de la escorrentía en los ámbitos residenciales viene reflejada en las normativas empleadas para el diseño de redes de saneamiento, las cuales son aprobadas por los diferentes ayuntamientos municipales de cada Comunidad Autónoma. Dichas normativas están caracterizadas por la falta de detalle y de representatividad de la zona analizada (ámbitos residenciales) para la modelación hidrológica, y en las que se suelen contemplar la producción de escorrentía a través de modelos de producción simples basados en coeficientes de escorrentía fijados para un determinado período de recurrencia. Así, suelen ser habituales para las zonas residenciales o de edificación abierta, donde predominan las viviendas unifamiliares con jardín, coeficientes de escorrentía en el entorno de 0.40 ó 0.50.

2.3 METODOLOGÍA PARA LA FORMULACIÓN DE LA MODELACIÓN DETALLADA DE PARCELA

La documentación que existe en usos del suelo y la delimitación de zonas permeables e impermeables en zonas urbanas tiende a ser algo incompleta, es decir, las herramientas de libre acceso que suelen facilitar las administraciones y organismos públicos, no tienen el nivel de detalle necesario para la correcta interpretación del uso del suelo en los entornos urbanos; lo mismo sucede con la información topográfica (desniveles, pendientes) generalmente disponible, aunque algo simplificada,. El desarrollo de bases de datos urbanas (UDB) ha proporcionado los medios convenientes para tener acceso a esta información, pudiendo procesarla y editarla para un mejor entendimiento, con el fin de modelar los fenómenos que se estudian en este documento.

El modelo simula la producción de escorrentía de cada una de las superficies presentes en la parcela; dichas superficies son representadas en función a su naturaleza y las características geomorfológicas de la cuenca. Definida la cuenca, para la formulación del problema, es necesario definir los procesos físicos que tienen lugar en la superficie de cada parcela.

La modelación consiste en tratar de simular las contribuciones a la escorrentía urbana que aporta cada UHE, con el cálculo a cada parcela urbana. La sección UHE incluye tres componentes de la infraestructura en la captación de la escorrentía urbana:

- La escorrentía superficial procedente de los tejados, la cual es conducida hasta la red mediante las bajantes (sino carecen de ellas).
- Las calles, en la que se propaga la escorrentía procedente de las parcelas que carecen de desagües conectados a la red o del propio pavimento. En este caso el elemento principal de captación es el imbornal, que conduce el caudal hasta la red principal.
- Los embalses dinámicos, que se utilizan para representar los procesos físicos que ocurren en el jardín de cada parcela, reproduciendo la producción de escorrentía de éste en cada parcela y conduciendo estos caudales hasta la red mediante unos canales artificiales, de dimensiones suficientemente adecuadas para no influir en el resultado final.

Los componentes en la simulación de la escorrentía están representados por la escorrentía superficial de las superficies impermeables, por el escurrimiento de las superficies naturales y por la escorrentía de aguas subterráneas procedentes del drenaje a través de los defectos en la red de alcantarillado (grietas), que no es el caso en el ejemplo analizado, ya que los niveles freáticos están muy por debajo de la cota de la red de pluviales.

Por otra parte, para un determinado nivel de precipitaciones en la superficie de una sección UHE; existen dos modos de escorrentía:

- la producida sobre la superficie impermeable, por ejemplo en las calles y en los tejados.
- la escorrentía producida por las superficies naturales y permeables, como el jardín, césped, etc.

2.3.1 MORFOLOGÍA URBANA Y MODELACIÓN HIDROLÓGICA

La definición adecuada de las propiedades geométricas de la captación es muy importante para estudiar el fenómeno de la escorrentía en las cuencas urbanas. Las bases de datos (UDB) permiten representar una cuenca urbana como un conjunto de superficies elementales conectadas a una red, cuya finalidad es conducir el caudal hasta el punto de salida. Las bases de datos permiten la delimitación morfológica de las superficies urbanas: parcelas y calles.

El mapa catastral urbano se refiere a los principales elementos geográficos necesarios para describir las cuencas urbanas. Los elementos a identificar son los siguientes (*Berthier, 2004*):

1. Parcelas, casas, calles, vegetación y las secciones correspondientes.
-



Ilustración 1.- Forma típica de una parcela, sección UHE.

2. La topografía de cada uno de los elementos de hidrología urbana.
3. La existencia de posibles cuencas naturales que afecten a la zona de estudio; en el caso analizado no existen cuencas naturales cercanas que puedan afectar a la zona de estudio.

Una descripción geomorfológica de la zona de estudio es necesaria para la modelación hidrológica en ámbitos residenciales urbanos, donde se permite considerar que la cuenca urbana está compuesta de un conjunto de elementos hidrológicos urbanos (UHE) conectados a la toma de captación por medio de una estructura ramificada de escorrentía (RBS).

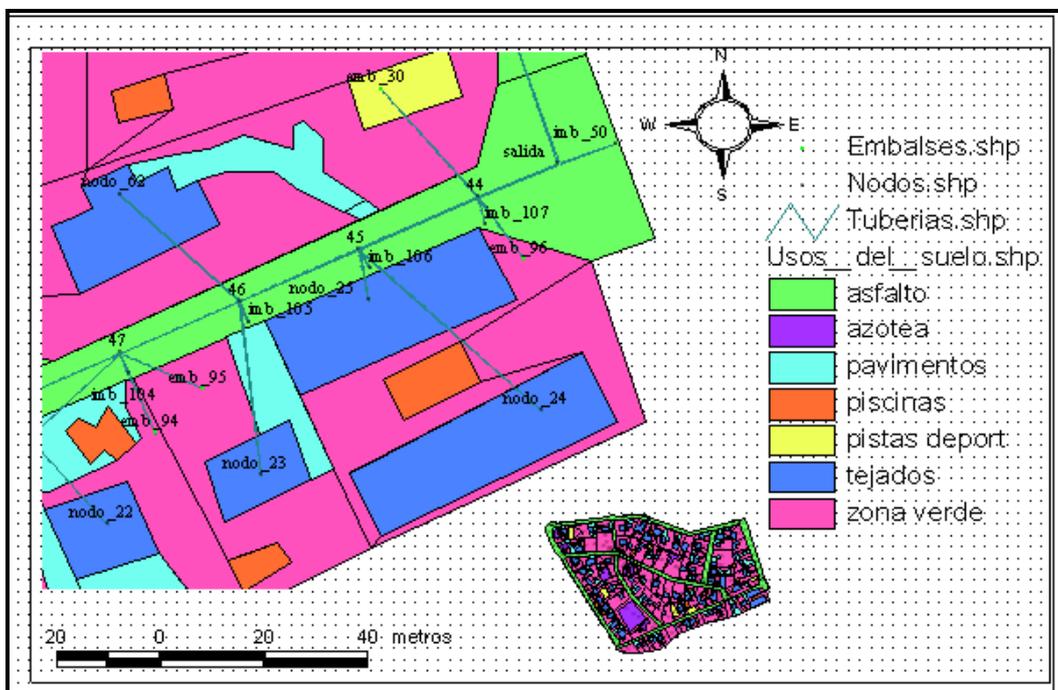


Gráfico 1.- Mapa representativo de los diferentes elementos de hidrología urbana, así como las capas usada para realizar el modelo este estudio.

Una sección UHE abarca una parcela y sus correspondientes segmentos de la calle adyacente. Las características geométricas de cada parcela (UHE sección) se han definido en la base de datos. Los parámetros fundamentales que definen una cuenca quedan representados por los siguientes elementos: la superficie, la fracción impermeable (como tejados y la calle de superficie), la fracción de vegetación, la pendiente y la longitud de las conexiones de los conductos que se conectan a la RBS. Estas características permiten la representación de los UHE, de cada sección transversal. (Berthier, 2004) presenta el modelo hidrológico de los procesos en la sección UHE y da una evaluación detallada de la función de sub – procesos.

El RBS describe el flujo de cada uno de las rutas que sigue la escorrentía producida en cada UHE hasta el punto de salida de la red. Cada UHE está conectada a la calle, y por tanto, a la red de alcantarillado. El RBS es representado por un mapa vectorial de rutas de flujo de agua, compuesto de una serie de calles.

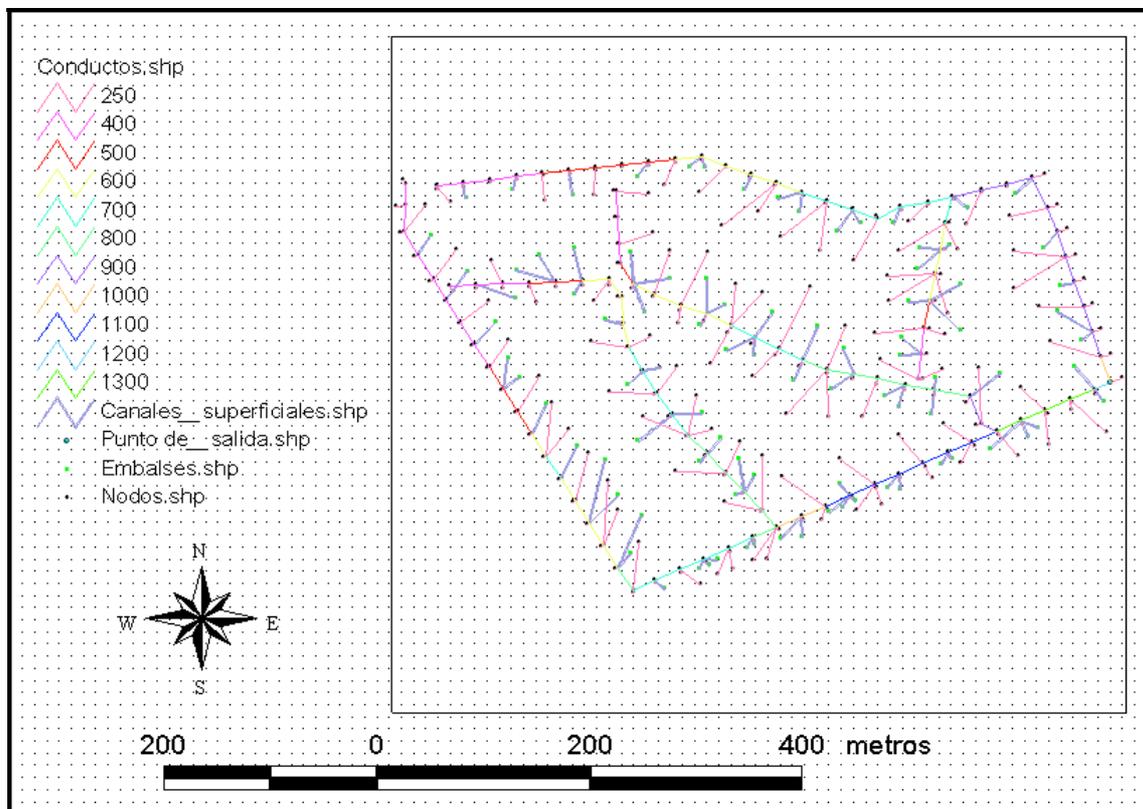


Gráfico 2.- Detalle de la estructura ramificada de escorrentía urbana (RBS) desde la captación hasta el punto de salida de la red.

2.3.2 MODELACIÓN DE LOS PROCESOS HIDROLÓGICOS EN LA PARCELA

Entre los procesos que afectan a la modelación en la hidrología urbana, debemos tener en cuenta la infiltración en las superficies permeables,

La sección UHE se modelan tal y como se define en el apartado 2.3. Se deriva de (Berthier, 2004). Su estudio se centró en la función del suelo en la generación de flujos urbanos y testeó un modelo explícito de los flujos de agua dentro de la capa superior del suelo (zona saturada y zona no saturada), que incluía intercambios con la red de

alcantarillado. Este estudio, sin embargo, hizo inspirar el principio de la modelación del trabajo que se presenta que se ha basado en los siguientes seis puntos clave:

1. Un UHE se basa en su sección transversal, compuesto por tres tipos de uso del suelo, como tejados, calles y los suelos naturales.
2. La sección UHE está representada por tres perfiles verticales correspondientes a los diferentes tipos de uso del suelo.
3. Cada perfil vertical se puede representar por un diagrama, con cuatro embalses que representan la interceptación en la superficie, la superficie, la zona no saturada y la zona saturada, respectivamente. Los principales procesos posibles que se puedan dar en el modelo están representados en el Gráfico 3.
4. Se supone que el intercambio horizontal de agua entre los perfiles verticales de una UHE sólo se producen en la zona saturada.
5. En cuanto a la red de alcantarillado, se supone que su densidad de drenaje es lo suficientemente alta como para tener el control pleno de la circulación horizontal de agua.
6. La contribución de la humedad del suelo debido a las fugas procedentes de la red de abastecimiento no se tienen en cuenta .

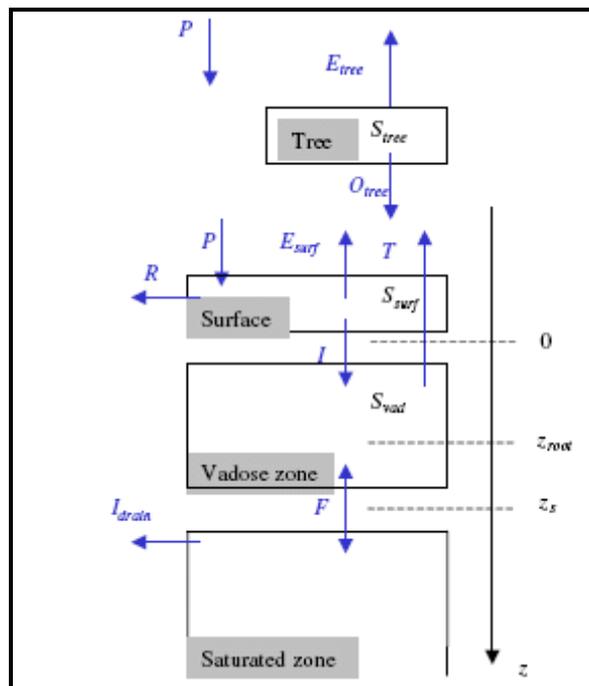


Gráfico 3.- Esquema conceptual de los procesos hidrológicos en la parcela según (Berthier, 2004). Reagrupamiento de los 4 embalses que representan los intercambios Atmósfera-superficie-subsuelo y a las reservas. Los principales procesos posibles que se puedan dar en el modelo están representados.

Los procesos de modelación en la parcela dan lugar a varios fenómenos, como la interceptación de la lluvia por los árboles en la superficie, la evapotranspiración, transpiración de la vegetación, junto con la evaporación directa en las superficies, la infiltración del agua en el suelo, la escorrentía superficial, los procesos del subsuelo, y el drenaje del agua a través de las zanjas y de las grietas del sistema de alcantarillado.

2.3.3 PROPAGACIÓN EN LA SUPERFICIE Y EN LA RED DE ALCANTARILLADO

En este estudio, el objetivo final es la comparativa entre la modelación detallada de parcela y la metodología propuesta por el ayuntamiento de Valencia, analizándose en el punto de concentración de la cuenca la producción de escorrentía generada por ambas metodologías.

Se puede identificar la geometría lineal del flujo de agua a lo largo de calles y líneas de flujo de la red de alcantarillado, o el RBS, bajo condiciones de flujo normal. El hecho de que el sistema de alcantarillado pudiera entrar en carga, es una situación tenida en cuenta, evitándose este fenómeno en el diseño.

El flujo de agua saliente de cada parcela contribuye al flujo de la calle, en el caso de que los tejados no estén conectados a la red, mediante las bajantes. En caso opuesto, la escorrentía de los tejados es conducida hacia los colectores a través de la red de bajantes.

La falta de información sobre las conexiones existentes y el tiempo que implicaría su recopilación, ha obligado a simular dos condiciones: con todos los tejados conectados a la red de bajantes y sin la conexión de estos.

El resto de superficies que no tienen conexión a la red debido a su naturaleza intrínseca, aportarán el flujo de agua a lo largo de las calles hasta llegar a los elementos de captación. La hidráulica de las casas y de las calles puede ser modelada con mayor detalle siguiendo una descripción exhaustiva de la red y sus conexiones, con la ayuda de los SIG.

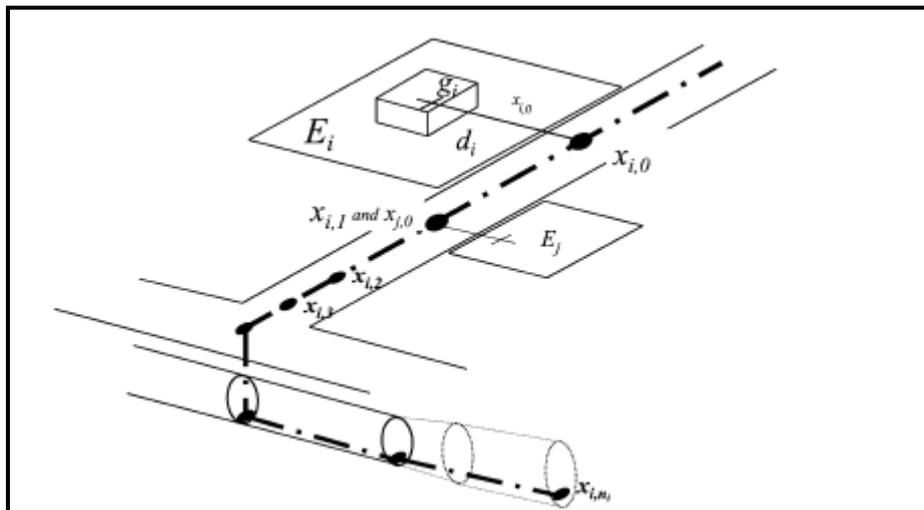


Gráfico 4.- Representación esquemática de la conexión de dos elementos Hidrológicos E_i y E_j a un segmento de la calle y el bajante debajo de la trayectoria del flujo.

La propagación en la superficie de la parcela y alrededor de la calle, dependen de los elementos de hidrología urbana presentes (UHE), superficies, así como las posibles conexiones de las bajantes de los tejados a la red de colectores o la ausencia de éstos, además de los posibles imbornales de cada calle adyacente a cada parcela.

A continuación se presentan las posibles configuraciones de los modelos detallados de parcela que se ha estudiado.

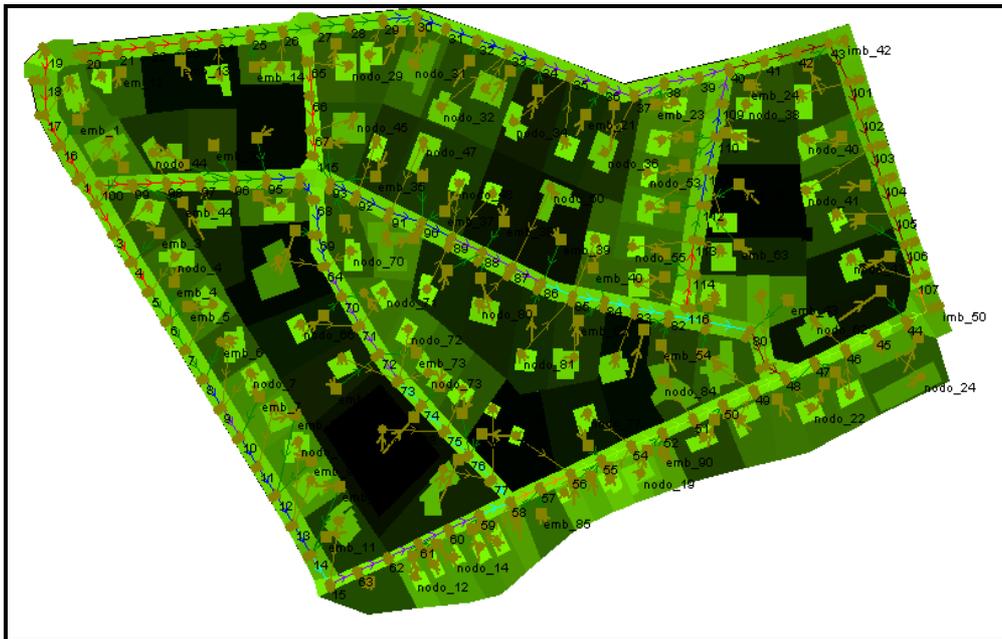


Gráfico 5.- Mapa de las áreas de influencia de cada uno de los elementos de hidrología urbana (UHE), escala 1:3510.

La característica fundamental de esta configuración es la conexión de los tejados con la red principal mediante la red de bajantes que recoge la escorrentía de los tejados. El resto de las superficies presentes en el jardín tienen un comportamiento en forma de almacenamiento dinámico, representados por los embalses en superficie.

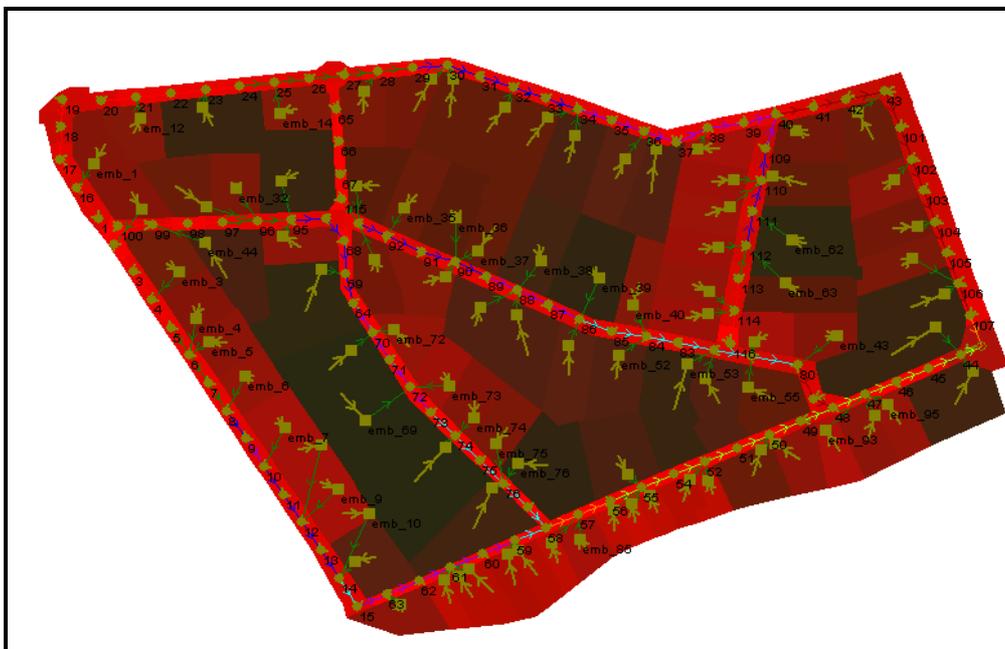


Gráfico 6.- Mapa de las áreas de influencia, de cada uno de los embalses dinámicos que representan el jardín y la producción de escorrentía de los tejados, escala 1:3510.

La ausencia de conexiones de los tejados a la red principal caracteriza esta situación, en la que todos los caudales generados van a parar al jardín de cada parcela. Esto fenómeno se tiene en cuenta con la modelación de los embalses dinámicos, los cuales reproducen los procesos físicos que ocurren en la parcela.

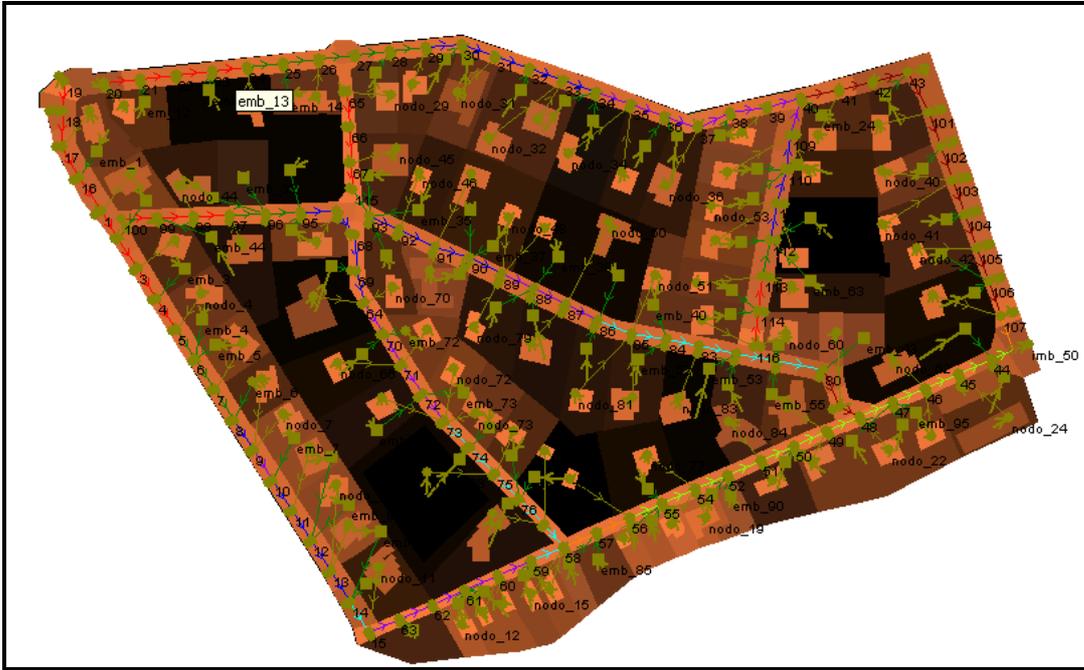


Gráfico 7.- Detalle de las áreas de influencia de los elementos de hidrológica urbana (UHE), escala 1:3510.

Este es modelo detallado de parcela ideal, en la que todos los tejados están conectados a la red principal de colectores, y por tanto la canalización de la producción de escorrentía de los tejados. El resto de superficies de cada parcela se representan como un embalse dinámico, el cual reproduce los procesos físicos que ocurren en la parcela. Además, en este modelo se integran nuevos elementos de captación de escorrentía superficial, los imbornales que conducen la escorrentía que se propaga en el asfalto hasta la red principal mediante su acometida.

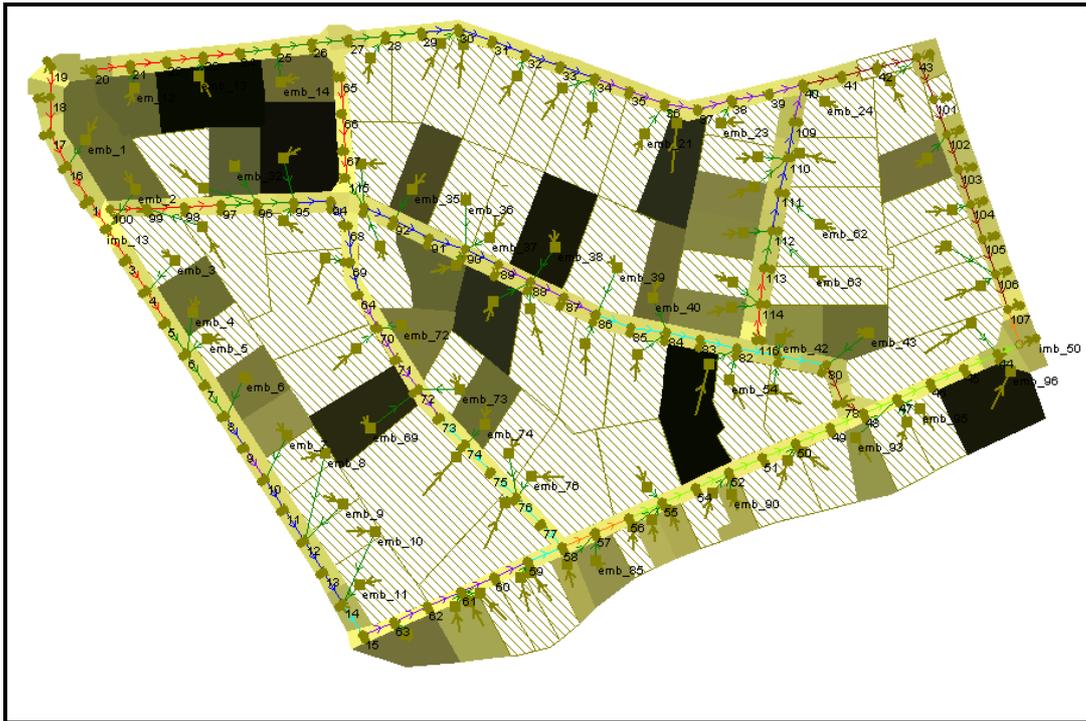


Gráfico 8.-Mapa de las áreas de influencia del modelo detallado de parcela, escala 1:3075.

Esta configuración se caracteriza por la ausencia de conexión de los bajantes de los tejados con la red principal. Los procesos físicos que ocurren en la parcela se tienen en cuenta con la modelación de los embalses dinámicos, además, se incorporan elementos de captación de escorrentía superficial, los imbornales que conectan la producción de escorrentía de la calle a la red principal.

2.3.4 MODELACIÓN DE LOS PROCESOS EN LA CUENCA GLOBAL

En el presente estudio se amplía el artículo de (*Rodríguez, 2008*). El mapa vectorial de flujos, ofrece una base para la propagación del agua de cada UHE hasta la salida de la cuenca y, más en general, para el cálculo del flujo en cualquier punto de captación de la cuenca. El camino que recorre el agua en superficie y la hidráulica que afecta a los colectores se han configurado basándose en:

- La propagación en superficie.
- La propagación en la red de colectores.

Los modelos que representan dichos procesos están implementados en el software utilizado Infoworks CS, cuyas metodologías de cálculo se detallan en el capítulo 4.5 de este documento.

La escorrentía a la salida de cada sección UHE, es igual a la suma de los distintos hidrogramas que aportan cada superficie presente en cada parcela, siendo la escorrentía total, la suma de cada uno de los hidrogramas generados por cada parcela en el punto de salida de la red.

2.3.5 DISCUSIÓN

Se ha desestimado el modelo de cuatro embalses, dos en superficie y dos en el subsuelo. Estos últimos se denominan, uno zona no saturada, cuya caracterización es muy complicada, debido a la dificultad de la estructura del suelo en las ciudades, y otro embalse, situado en una cota menor, llamada zona saturada. Este caso ha sido descartado debido a la lejanía a la que se encuentra del nivel freático y, por tanto, su influencia en la modelación hidrológica.

Las ecuaciones del movimiento de flujos en el subsuelo se han desarrollado para cuencas naturales, donde la estructura del suelo no ha sido modificada en exceso y la ruta del flujo sigue unas leyes de comportamiento que asumen simplificaciones, como el caso de la ecuación de Richards, sólo aplicables a suelos porosos homogéneos no saturados.

La estructura de los suelos en los ámbitos urbanos presentan modificaciones que alteran su continuidad, es decir, las construcciones subterráneas (transportes, conductos de aguas, electricidad, etc.) alteran los flujos y rutas naturales del agua en el subsuelo.

Teniendo en cuenta la lejanía del nivel freático, no es necesario definir una zona no saturada, que en su caso, requeriría de ecuaciones que reproduzcan el movimiento del agua en ésta zona, lo cual no es fácil, debido la complejidad que pueda presentar la estructura del suelo en los entornos urbanos.

Los parámetros de infiltración se podrían haber medido en base a ensayos en una cuenca piloto. El hecho de estar la cuenca constituida por propiedades privadas, la magnitud del tiempo de medida y el enorme presupuesto que supone la monitorización de las variables del terreno, hacen que se haya desestimado ese alcance en el presente estudio.

La ciudad de Valencia posee un modelo de gestión a tiempo real de la red de saneamiento, el cual trabaja con el modelo de producción del SCS (Soil Conservation Service), calibrado en la ciudad con datos reales, el cual ha servido para extrapolar parámetros comunes al modelo de producción empleado para el diseño optimizado de la red.

3 DATOS DE PARTIDA

Como ya se ha comentado anteriormente, el objetivo de este documento es la cuantificación de la producción de escorrentía en el punto de salida de la red, mediante una comparativa entre la modelación propuesta por el Ayuntamiento de Valencia para las obras de saneamiento y un modelo detallado de parcela, caracterizado por la correcta definición de los procesos físicos que ocurren en la cuenca urbana para ámbitos residenciales de viviendas unifamiliares.

La zona seleccionada para el estudio de la modelación hidrológica distribuida en ámbitos residenciales caracterizados por viviendas unifamiliares, que cuenta con las características requeridas, es la urbanización de Campolivar, en el término municipal de Godella, en la provincia de Valencia.

La información de partida con la que se ha elaborado este documento, consta de una ortofoto, con una resolución de píxel de 50 cm, de temas shape (formato vectorial), con las coberturas existentes de la zona de estudio (hidrografía, carreteras, etc.) y un modelo digital de elevación del terreno. Además, se han realizado las consultas pertinentes en la página oficial del catastro de la Comunidad Valenciana para la delimitación de la propiedad catastral a la que pertenece cada vivienda (parcela).

Para la manipulación de la información digital se ha utilizado el Autodesk y Arc View 3.2. Finalmente el diseño optimizado del modelo se ha realizado con el programa de simulación Infoworks CS. En el capítulo 4.5, se detallan las bases teóricas necesarias de los modelos empleados por el programa de simulación.

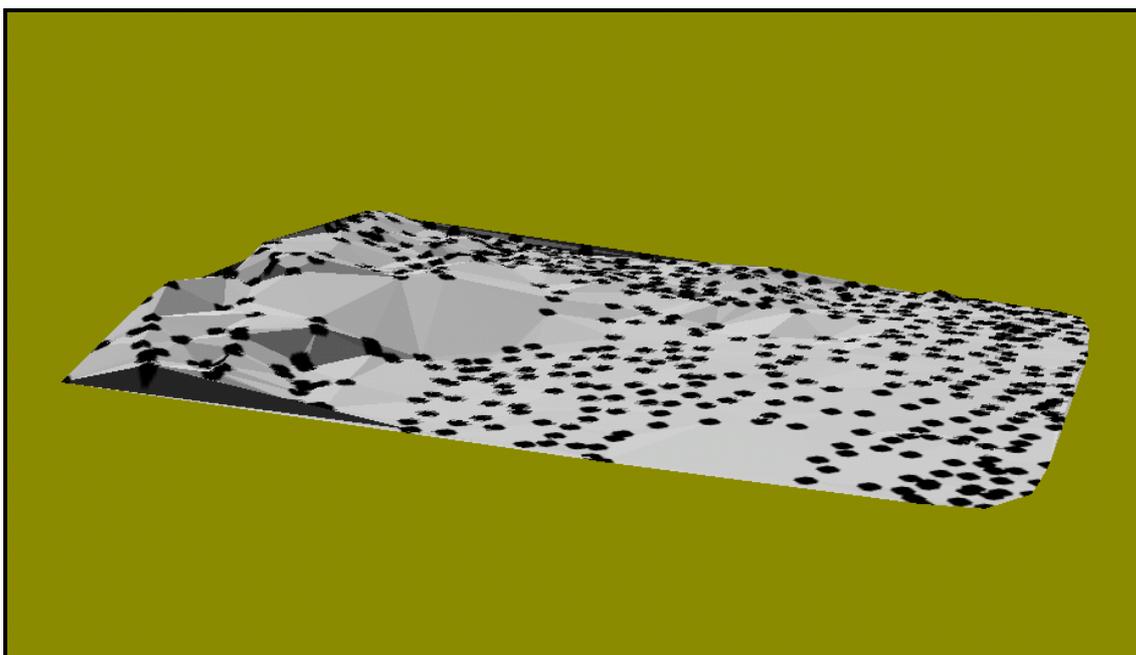


Ilustración 2.- Mapa del modelo digital del terreno del noroeste de la provincia de Valencia, que engloba la zona de estudio, término municipal de Godella, del que se han extraído diversos datos. Escala 1:57600.

3.1 MARCO DESCRIPTIVO DE LA ZONA

La Comunidad Valenciana limita el este con el Mar Mediterráneo, por lo que se desarrolla en la misma un clima típico mediterráneo, semi-árido, con una temperatura media anual de unos 18 °C. Además, la pluviometría se caracteriza por la irregularidad espacial y temporal de las precipitaciones, siendo el promedio anual en la ciudad de Valencia de unos 450 mm/año.

El municipio de Godella se encuentra al noroeste de la capital, Valencia. Situada en la Huerta de Valencia, Godella presenta unos terrenos que forman parte de la llanura de la huerta y de las colinas calcáreas que se elevan hacia el interior hasta alcanzar una altura superior a los 120 metros en el extremo noroeste del término municipal. El relieve es accidentado, constituido por el último espolón del suave anticlinal calizo que separa las cuencas del río Turia y el Barranco del Carraixet.

La zona de estudio se encuentra en Campolivar. Esta es una zona residencial, situada junto a la carretera de Valencia a Bétera. Ocupa los terrenos pertenecientes a los

barones de Campolivar, en cuyo núcleo construyeron su residencia de verano, ocupada por un gran número de chalets y fincas de recreo.



Ilustración 3.- Detalle de la ortofoto utilizada para la extracción de polígonos que determinan el uso del suelo.

Como se puede apreciar en la Ilustración 3, no hay ningún accidente geográfico que pueda afectar a la modelación hidrológica urbana en superficie como pueden ser barrancos o redes hidrográficas de la zona.

Las características son las adecuadas para este estudio, ya que la totalidad del barrio está formado por parcelas de viviendas unifamiliares de una sola planta, con zonas verdes, ajardinadas y las superficies típicas de estas zonas.

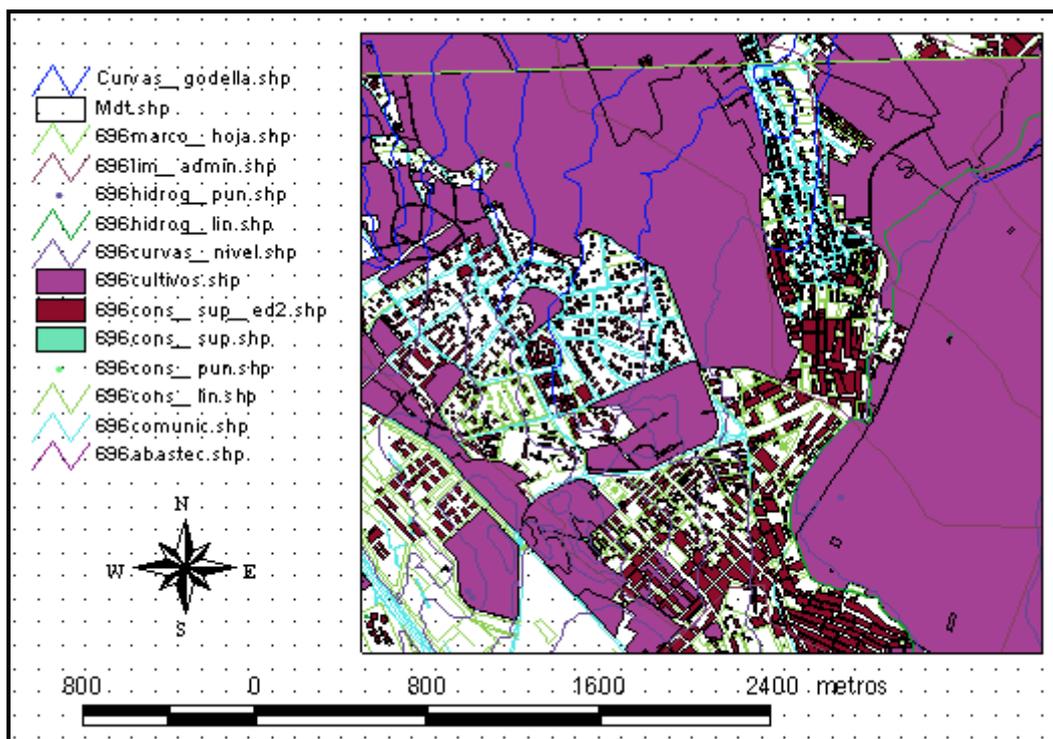


Ilustración 4.- Detalle de las coberturas geográficas de la urbanización Campolivar en el pueblo de Godella.

4 BASES TEÓRICAS

El estudio tiene una parte inicial, el diseño de los grandes colectores según la normativa vigente, sus criterios y sus comprobaciones exigidas para un correcto funcionamiento de la red.

En base a este diseño, la modelación de la normativa analiza la producción de escorrentía a nivel de cuenca global, donde el elemento de captación hidráulica son los pozos de registro. En cambio, en el modelo detallado de parcela, los elementos de captación, tienen un rango de mayor detalle (imbornales, bajantes) y por tanto una mejor definición de la hidráulica. El diseño de dichos elementos, se ha hecho en base a la normativa, la referida a la ejecución de las obras de captación.

En los siguientes puntos del capítulo 4 se establece una descripción de todas las ecuaciones, parámetros y valores de coeficientes empleados en la modelación hidrológica como concepto de cuenca global.

Para un mayor entendimiento de la modelación del problema establecido para la comparativa entre ambas metodologías, se recomienda leer con determinación las bases teóricas que se presentan en el capítulo 4. En cambio si se desea acceder directamente al diseño y a la comparativa, el lector debe seguir en el capítulo 5.

4.1 DISEÑO SEGÚN LA NORMATIVA

El Ayuntamiento de Valencia, a través del Servicio del Ciclo Integral del Agua como unidad operativa, es el responsable del sistema de saneamiento de la ciudad en el

desarrollo de sus tres objetivos fundamentales: higienista, prevención de inundaciones y medioambiental.

El cumplimiento de estos objetivos, en sus diferentes estadios, conlleva un conjunto de tareas sobre temas de muy diversa índole que necesariamente deben estar interrelacionados. En efecto, hoy día no es aceptable la ejecución de un colector sin un enfoque hidrológico adecuado y un plan preconcebido. Prefijados estos aspectos, se revela imperativo el asegurar la funcionalidad de la infraestructura para un mantenimiento mínimo, habida cuenta de lo elevado de los costes operacionales que repercuten directamente sobre el municipio. La Normativa ha sido redactada con las miras puestas sobre estos dos conceptos básicos.

4.1.1 ESTRUCTURA GENERAL DE LA RED

En este caso el estudio se centra sólo en el diseño de la red de pluviales, obviándose por completo los caudales de aguas residuales generados por cada una de las casas pertenecientes a las urbanizaciones de Campolivar.

La red constará de los colectores necesarios para evacuar las aguas pluviales, generando una estructura ramificada de escorrentía urbana.

Los objetivos que debe cumplir la red de alcantarillado de la zona de estudio, en Godella, es evacuar hasta el punto de desagüe, la totalidad de la producción de escorrentía, con un nivel de protección de 25 años de período de retorno.

El sistema de circulación utilizado será por gravedad, la red debe garantizar su funcionamiento en régimen de lámina libre evitando los sistemas de elevación e impulsión continua.

Las pendientes mínimas vendrán impuestas por las condiciones de velocidades mínimas de circulación. Puesto que es deseable un sistema de circulación en régimen lento, junto con las condiciones de velocidades máximas, se establece una limitación de las pendientes.

Independientemente de los recubrimientos mínimos en función del tipo de material del conducto, la línea de energía deberá situarse siempre por debajo de la línea del terreno, de tal forma que sea posible la evacuación de las aguas recogidas por las acometidas e imbornales conectados y no se produzcan reflujos indeseables.

4.2 DIMENSIONAMIENTO HIDRÁULICO

Para el dimensionamiento hidráulico de un tramo de colector o alcantarilla son necesarias tres operaciones: conocer el caudal de diseño, dimensionar el conducto para ese caudal y, por último, comprobar que las velocidades que circulan por el mismo son las adecuadas, además de que la línea de energía no sufra cambios bruscos ni supere la cota del terreno.

El caudal de diseño necesario para el dimensionamiento de un tramo de colector depende del tipo de red en el que se encuentre: pluviales, residuales o unitaria. Para colectores de pluviales y unitarios se utilizará el caudal correspondiente a una

precipitación de 25 años de período de retorno y, por tanto, será necesario un estudio hidrológico.

Para dimensionar el colector se realizará una fuerte simplificación al asumir que el flujo dentro del mismo es uniforme. Esta hipótesis será incorrecta y del lado de la inseguridad en aquellos tramos en donde se puedan producir efectos de remanso. En estos casos, se deberán emplear las ecuaciones de flujo correspondientes a un flujo gradualmente variado.

La comprobación de las velocidades se realiza con la misma hipótesis de flujo y persigue que no se produzcan ni erosiones, ni sedimentaciones en el interior del colector diseñado.

4.2.1 DIMENSIONAMIENTO HIDROLÓGICO

El método que se propone para el cálculo de los caudales de diseño de cada tramo de la red de saneamiento se va a denominar Método Racional Calibrado (MRC), basado en el Método Racional pero adaptado a las características hidrológicas específicas de la Ciudad de Valencia. Las principales hipótesis de este método se enumeran a continuación.

1. La precipitación es uniforme en el espacio y en el tiempo.
2. La intensidad de lluvia es la correspondiente a un aguacero de duración el tiempo de concentración de la cuenca, ya que se considera que esta duración es la más desfavorable.
3. La existencia de un coeficiente de escorrentía constante para cada tipo de uso del suelo.
4. El Método Racional no considera la posible laminación del hidrograma producida en la cuenca vertiente y durante la propagación a lo largo de la red, ya que se asume que se compensa aproximadamente con la no – existencia de picos en la precipitación. El MRC introduce un nuevo coeficiente de propagación que mejora los resultados obtenidos y permite el uso del método hasta tiempos de concentración de 40 minutos.
5. Con carácter general, cada tramo de colector se calcula a partir de toda la cuenca vertiente al punto final del mismo.

A lo largo de toda la trayectoria del flujo, el tiempo de viaje del flujo se define como la suma de los tiempos de viaje a lo largo de cada segmento. Para el cálculo del tiempo de concentración, se ha delimitado la cuenca, las secciones, las pendientes, la rugosidad de cada tramo de colectores, la longitud de cada tramo, y la longitud total de cada uno de los colectores. Empleándose para el tiempo de concentración en minutos la siguiente expresión:

$$t_c = t_s + \frac{\alpha}{60} \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{V_i}$$

Ecuación 1.- Tiempo de concentración en minutos.

Donde:

- n es el número de tramos de colector aguas arriba del punto de desagüe.
- L_i es la longitud de cada tramo de colector en metros.
- V_i es la velocidad en cada tramo de colector en m/s, calculada con la hipótesis de flujo uniforme y con caudal de diseño en cada tramo.
- t_s es el tiempo de recorrido en superficie, que toma el valor mayor de 360 segundos (para las características de la red de la Ciudad de Valencia) o L_0/V_0 .
- L_0 es la longitud en metros desde el punto más alejado de la cuenca hasta el arranque del primer colector.
- V_0 es la velocidad en superficie en m/s. Se puede aproximar por la mitad de la velocidad del primer colector.
- α es el **factor mayorante** del tiempo de recorrido en la red, que tiene en cuenta el hecho que los colectores no circulan en todo momento con el caudal máximo. Se recomienda para las características de la red de la Ciudad de Valencia el valor de 1,2 como valor de α .

Se ha incluido un factor mayorante de 1,2 para tener en cuenta que los colectores no van a circular durante toda la recesión del hidrograma a sección llena. Se adoptará el mayor tiempo de concentración para los diferentes recorridos posibles del agua.

Para el diseño de la red de pluviales se ha escogido una tormenta correspondiente a un periodo de retorno de 25 años, ya que trabajar con periodos de retorno mayores implicarían un coste desorbitado, e inviable de la obra civil. Con los datos de lluvia registrados en el pluviógrafo de Viveros desde 1951 hasta 1993, para el periodo de retorno de 25 años, la curva IDF a emplear para el cálculo de la red es:

$$I = 157,2 - 2,645 \cdot d + 0,02662 \cdot d^2 - 0,0001122 \cdot d^3$$

Ecuación 2.- Expresión algebraica de la curva IDF.

Donde:

- d es la duración de la lluvia en minutos.
- I es la Intensidad de la lluvia en mm/h.

La normativa propone para las urbanizaciones, donde se mezcla la edificación unifamiliar con jardines, sean consideradas como áreas residenciales, asignando un valor de 0,5, como coeficiente de escorrentía, la interpretación queda clara, no difiere entre superficies permeables e impermeables, y asume que su comportamiento frente a un fenómeno de tormenta es el mismo para todas las superficies existentes en este tipo de entornos urbanos.

Para las grandes áreas pavimentadas, las zonas de aparcamiento de gran extensión y grandes plazas sin jardines, en este caso, le asigna un valor de 0,95. Finalmente se distinguen dos coeficientes de escorrentía utilizados para la modelación de la cuenca global, los terrenos edificables 0,5, y 0,95 del asfalto de las calles.

El coeficiente de propagación K_p , es un coeficiente mayorador de la punta de caudal obtenida según el método racional clásico. Dicho aumento del caudal punta reproduce lo observado en simulaciones con modelos complejos y tiene como justificación la transformación del hidrograma durante su transporte en la red (efecto de adelantamiento

de puntas de caudal), circunstancias que provocan hidrogramas resultantes cuya punta es más desfavorable que la obtenida por el Método Racional tradicional.

El valor de dicho coeficiente va a variar para cada tramo, según sea la posición de éste en la red. De manera concreta, el K_p va a estar en función del tiempo de concentración del tramo, así como del coeficiente de escorrentía medio de su cuenca acumulada (C). Si se define para cada tramo, el valor t_d como el tiempo diferencia entre su tiempo de concentración y el tiempo de entrada, el K_p se podrá calcular según las siguientes expresiones.

$$t_d < a \Rightarrow K_p = \frac{a}{a + bt_d}$$

Ecuación 3.- Expresión de K_p si $t_d < a$

$$t_d \geq a \Rightarrow K_p = \frac{1}{1 + b}$$

Ecuación 4.- Expresión de K_p si $t_d \geq a$

Donde:

$$a = 28,3 - 13,1 \cdot C_{medio}$$

$$b = -0,24 + 0,1 \cdot C_{medio}$$

Ecuación 5.- Valores para a y b en función del caudal medio

Para el diseño se ha calculado el caudal con el método racional clásico, para un periodo de retorno de 25 años, por lo que en cada ramal de cada colector (en m^3/s) se tendrá:

$$Q = \frac{K_p \cdot I \cdot (C_1 \cdot A_1 + C_2 \cdot A_2 + C_3 \cdot A_3)}{360}$$

Ecuación 6.- Expresión matemática del caudal para el método de Témez

Donde:

- A_i es el área en Ha de la superficie tipo i .
- C_i es el coeficiente de escorrentía de la superficie i .
- I es la intensidad del chubasco de diseño en mm/h correspondiente a 25 años de periodo de retorno.
- K_p es el coeficiente de propagación de la cuenca.

4.3 CÁLCULO HIDRÁULICO

La sección necesaria del tramo de colector en estudio se obtendrá a partir del caudal de diseño con la hipótesis de funcionamiento a sección llena.

Para colectores de pluviales, el caudal de diseño se corresponde con el caudal de pluviales asociado a 25 años de periodo de retorno Q_{25} .

En cualquier caso, se adoptará como ecuación de pérdida de energía por rozamiento la dada por la fórmula de Manning, tomándose valores de los coeficientes de Manning.

Como regla general, para los colectores objeto, la conversión de caudal a calados en el colector se realizará con la hipótesis de flujo uniforme, es decir, las pérdidas de energía son iguales a la pendiente del colector.

Para el diseño de la red, se han tenido en cuenta los materiales de tuberías que recomienda la normativa. Para los grandes colectores que forman la red de pluviales, se ha optado por tubos de hormigón armado, con un coeficiente de rugosidad de 0,015.

Para la hidráulica de mayor grado de detalle, en la parcela, se han utilizado tanto para las bajantes de los tejados como para los conductos que conectan cada imbornal al pozo de registro correspondiente, tubos de polietileno de alta densidad (PEAD) con un coeficiente de rugosidad de 0,010. Finalmente, los canales que conducen la producción de escorrentía formada en el jardín hasta los pozos de registros se han diseñado de hormigón.

Con la hipótesis de flujo uniforme a sección llena y para tuberías circulares, el diámetro mínimo interior de cada uno de los conductos destinados a evacuar el caudal procedente de la lluvia efectiva, se calcula con la expresión:

$$D_d = 1,548 \left(\frac{n \cdot Q_d}{\sqrt{i}} \right)^{3/8}$$

Ecuación 7.- Expresión matemática del diámetro de diseño.

Donde:

- Q_d es el caudal de diseño en m^3/s (Q_{25}).
- i es la pendiente del tramo en tanto por uno.
- n es el coeficiente de Manning.

Se limita la velocidad máxima para el caudal de diseño Q_{25} . Para garantizar un cierto nivel de autolimpieza del colector con la tormenta máxima, que puede producirse todos los años, se limita la velocidad mínima correspondiente al caudal de diseño Q_{25} . Las velocidades exigidas se proponen en la siguiente tabla.

Caudal	V máxima (m/s)	Velocidad mínima(m/s)
Q_{25}	4	1,2

Tabla 1.- Velocidades exigidas por la normativa de diseño empleada.

4.3.1 COMPROBACIÓN DE LAS VELOCIDADES PARA COLECTORES CIRCULARES

Se podría demostrar que, con la hipótesis de flujo uniforme y haciendo uso de la ecuación de pérdida de energía de Manning, dadas unas características hidráulicas de diámetro, pendiente y rugosidad, la velocidad en m/s correspondiente a un determinado caudal, que no ha sección llena de la tubería se calcula con la expresión:

$$V = \frac{8 \cdot Q}{D^2 \cdot (\theta - \text{sen} \theta)}$$

Ecuación 8.- Expresión de la velocidad

Siendo:

- Q el caudal en m³/s.
- D el diámetro en m.
- θ es el ángulo, medido en radianes, de la superficie mojada, que se obtiene a su vez resolviendo mediante algún método iterativo la ecuación:

$$(\theta - \text{sen} \theta)^5 - \theta^2 \cdot \frac{8192}{D^8} \cdot \left(\frac{Q \cdot n}{\sqrt{i}} \right)^3 = 0$$

Ecuación 9.- Expresión iterativa para el ángulo de la superficie mojada.

Donde:

- n es el número de Manning.
- i es la pendiente del colector en tanto por uno.

4.3.2 COMPROBACIÓN DE LA LÍNEA DE ENERGÍA

En todo momento, la línea de energía del flujo de agua se situará por debajo de la cota del terreno. La cota de energía se evaluará mediante la siguiente expresión:

$$H = z + y + \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Ecuación 10.- Expresión cota de energía.

Donde:

- z es la cota de la solera.
- y es el calado normal correspondiente al caudal de diseño.
- v es la velocidad normal correspondiente al caudal de diseño.
- g es el valor de la gravedad.

La comprobación se realizará comparando las cotas de energía al inicio y al final de cada tramo con las cotas del terreno correspondientes.

4.4 ELEMENTOS SINGULARES

Para este caso, sólo se incluyen los elementos especiales utilizados en la modelación detallada de parcela que se contemplan en la normativa para el modelado de la red de pluviales.

Los pozos de registro utilizados en este diseño se han optado por secciones circulares de diámetro interior de 1 metro. Cada pozo se ha colocado alineado a lo largo de cada calle, distanciados cada 25 metros como indica la normativa. En esta tipología de pozo, los colectores serán pasantes, de tal forma que los pozos de registro no supondrán una interrupción de la tubería.

En el estudio de la modelación detallada de parcela, se incorpora nuevos elementos de la hidráulica, existiendo una conexión directa de los tejados con los pozos de registro mediante las bajantes de distribución que transportan los caudales producidos en los tejados hacia el punto de desagüe.

Las recomendaciones de la normativa establecen un diámetro mínimo de bajante; en este caso se ha diseñado con dichas recomendaciones, diámetros de 250 milímetros. Por simplificaciones de la red y disminuir el impacto de las pérdidas de carga que pueden tener cada bajante que conecta el tejado con la red general, se limita su longitud a 5 metros.

Para la conexión de los imbornales con los pozos de registro se utiliza las recomendaciones de la normativa, que establece diámetros interiores de 250 milímetros y requieren de una pendiente del 3 %. Para cumplir dicho requisito, se ha limitado la longitud de dichos conductos a 3 metros, a la vez que se reducen los posibles efectos generados por las pérdidas de carga debido a la diferencia de longitudes entre las conexiones.

Finalmente para acabar las bases teóricas, se presenta el modelo utilizado para la simulación de la red; con esto se concluirá las bases para el entendimiento de la metodología empleada, y así poder realizar la comparativa entre la modelación realizada como cuenca global y el modelo detallado de parcela.

4.5 MODELACIÓN CON INFOWORK

Para la aplicación del modelo conceptual, se ha utilizado un programa de la casa comercial Wallingford, concretamente uno de sus módulos específicos para la modelación de sistemas de colectores y de canales, llamado Infoworks CS. Este módulo actualmente, es utilizado para la gestión de la red de saneamiento urbano, por parte del Ayuntamiento de Valencia.

Dicho módulo ha servido de ayuda para el análisis de la modelación de la red como cuenca global (modelación exigida por la normativa) así como para la representación de las diferentes situaciones que se pueden encontrar en la realidad. Como puede ser las posibles conexiones a la red de los caudales procedentes de las superficies analizadas, la ausencia de dichas conexiones o la existencia de los imbornales en las calles.

A su vez, el módulo también se ha empleado para generar las diferentes configuraciones de todos los elementos de hidrología urbana. Mejorando la modelación actual y por tanto una gestión más adecuada de estas zonas específicas de ámbitos residenciales cada vez más demandados, en los que la diversidad de superficies presentes difiere de las típicas que se pueden encontrar en los centros de las grandes ciudades. La mayoría gobernadas por superficies artificiales y con carencias de zonas permeables que puedan disminuir los caudales que se generan en la superficie, impidiendo que se puedan infiltrar en el terreno, y por tanto, no contar con un buen sistema sostenible de drenaje urbano (SUDS).

Infoworks CS está desarrollado por Wallingford Software (Reino Unido) y disponible desde mediados del año 1990. El modelo contempla el planteamiento del problema con las ecuaciones completas de Saint – Venant y un esquema numérico en diferencias finitas implícitas con paso variable de tiempo. El modelo se describe con detalle en los siguientes apartados.

4.5.1 DEFINICIÓN DE MODELO MATEMÁTICO

De forma general, un modelo de un sistema físico es una simplificación de la realidad del mismo que preserva sus características primordiales para el fin que se persigue en el estudio. A esta simplificación se la denomina conceptualización del sistema.

Así, son modelos los gráficos, las secuencias experimentales, los modelos físicos reducidos y los modelos matemáticos. Éstos últimos, por su naturaleza, están compuestos por cuatro elementos fundamentales:

- Las entradas o inputs
- Los parámetros.
- Las ecuaciones o restricciones.
- Las variables de estado, entre las que se encuentran las salidas u outputs.

Parámetros (θ)

Son valores numéricos que describen propiedades estacionarias del sistema y supuestamente conocidas. Caracterizan, por tanto, al sistema analizado. En el caso de la modelación del drenaje urbano, algunos parámetros son, como se verá más adelante, la rugosidad de los conductos, el umbral de escorrentía de un determinado uso de suelo, etc.

Variables de estado (Y)

Son valores numéricos que definen el estado del sistema en cada momento. Las variables de estado fundamentales en la modelación del drenaje urbano son los caudales y niveles en cualquier punto de sistema.

Ecuaciones (M)

Son las expresiones matemáticas que describen los procesos analizados y las relaciones entre variables y entre éstas y los parámetros.

Entradas o inputs (X)

Son los datos que son necesarios medir y ante los que el sistema responde y evoluciona. El imputa más característico de un modelo de drenaje urbano es, sin duda, la precipitación, aunque puede haber otros como los caudales de aguas residuales.

Las ecuaciones del modelo matemático deben reproducir los siguientes procesos físicos:

- Producción de escorrentía.
- Transporte de escorrentía en superficie.
- Propagación en la red de colectores.

4.5.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL SOFTWARE

El modelo Infoworks CS permite la modelación de redes separativas de aguas pluviales y residuales, o bien la combinación de ambas en una red unitaria. La red debe contener toda la información necesaria para reproducir el sistema de drenaje: las subcuencas que drenan a los nodos (pozos en general) estando éstos unidos a su vez mediante conductos (o elementos especiales como bombas, vertederos, etc.). En el caso de una red separativa, es posible modelar la superposición de la red de pluviales junto con la de residuales en el mismo modelo.

Infoworks incorpora el motor de cálculo HydroWorks para la simulación del comportamiento de la red frente a numerosas situaciones. Toda la información que conforma el modelo se almacena en una base de datos que incorpora, por una parte, los parámetros, ecuaciones y datos en general que definen el modelo así como los resultados de cada una de las simulaciones que se lleven a cabo. La organización de la base de datos puede efectuarse directamente desde Infoworks CS, si bien, el programa se acompaña de un administrador específico de la base de datos (Infoworks Database Administrator) que permite una gestión mucho más eficiente de la misma. Se pueden además exportar dichas bases de datos a otros soportes (SWMM, por ejemplo) e incluso volcarlas directamente a un sistema de información geográfica.

Igualmente completa es la gestión de los resultados que va más allá de la propia visualización en el propio programa (diversos tipos de gráficos, perfiles y plantas dinámicas, etc); el programa incorpora un módulo de análisis estadístico que extrae datos de las simulaciones a partir de reglas y patrones definidos por el usuario (por ejemplo, los caudales que superan un cierto umbral y la frecuencia con que esto ocurre). Además, la exportación de los mismos a otros soportes (Excel, por ejemplo) para su tratamiento posterior es inmediata.

Por último, señalar que el programa está concebido directamente en un entorno de SIG propio, pero que además, la conexión con sistemas de información geográfica comerciales (MapInfo, Arcview, ArcMap) es automática.

La siguiente figura sintetiza las capacidades fundamentales del programa así como el proceso completo de construcción y simulación del modelo.

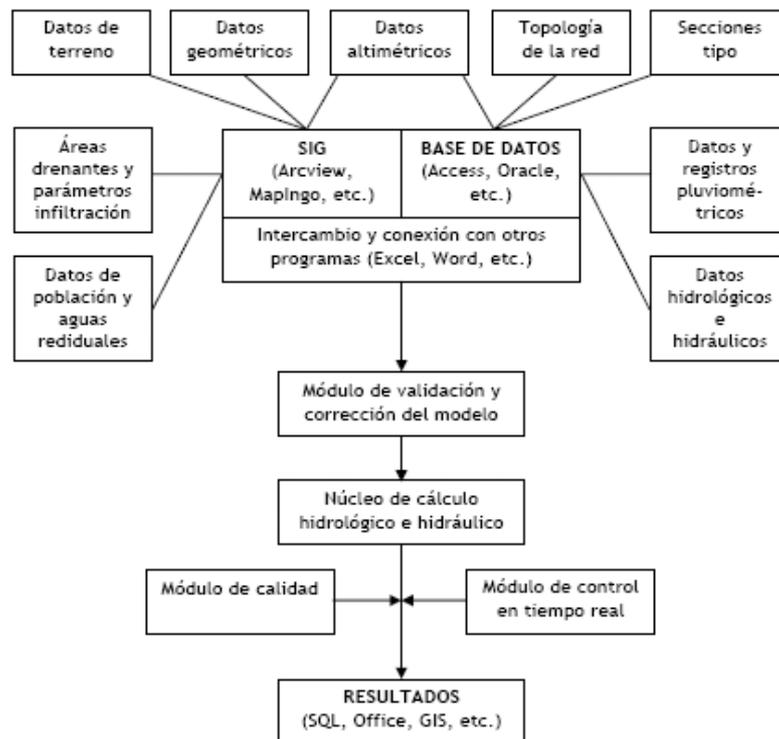


Ilustración 5.- Diagrama de flujo del programa Infoworks.

El programa tiene muchos más modelos, para describir los fenómenos de propagación en la superficie y en la red de colectores, además de modelos de producción, pero sólo se describen los utilizados.

4.5.3 INTERFAZ

Una de las principales ventajas de Infoworks es su interfaz. Integra las potencialidades de un SIG completo con las herramientas específicas del modelo de drenaje, de modo que el usuario tiene en todo momento un control global sobre el modelo construido. Toda la información de la red está georreferenciada de modo que el GeoPlan (vista en planta) constituye el editor del modelo.

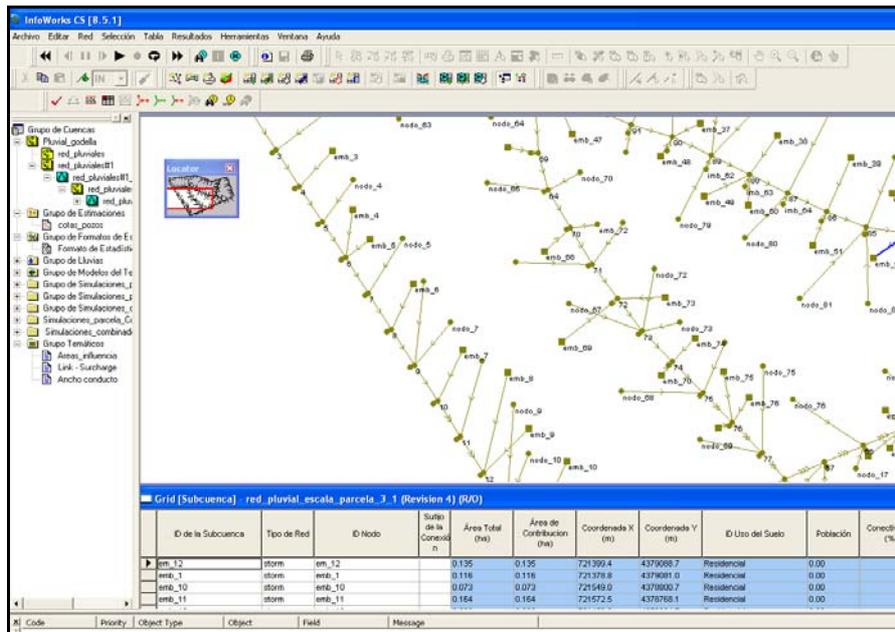


Ilustración 6.- Entorno de trabajo del programa.

4.5.4 ELEMENTOS ESPECIALES MODELADOS

Los elementos fundamentales del modelo son las subcuencas, los nodos y los tramos. A continuación se describen con detalle los principales campos que definen cada uno de estos elementos en Infoworks.

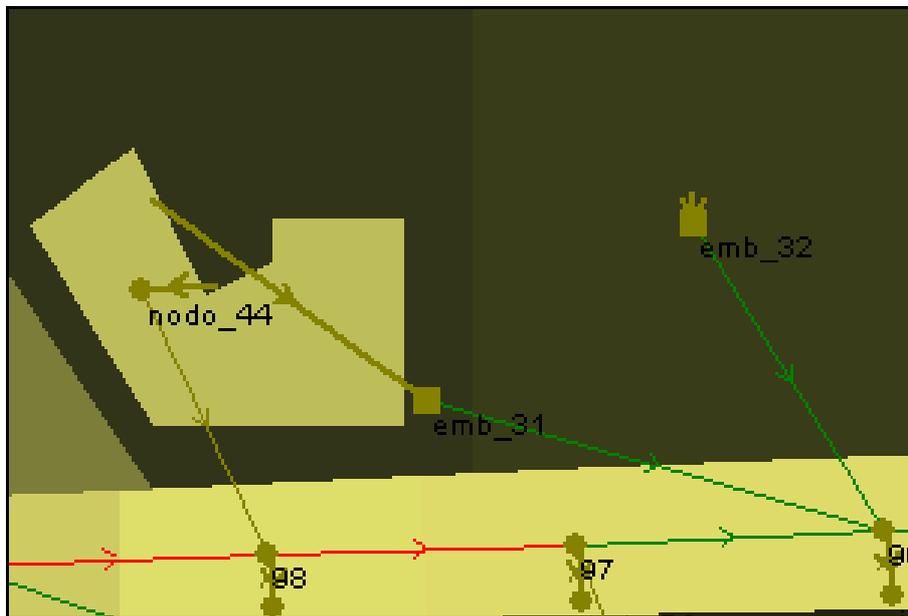


Ilustración 7.- Detalle de la bajante y del embalse dinámico en superficie que recogen todo el caudal de cada parcela.

Subcuenca

La subcuenca queda definida fundamentalmente por un código, el código del pozo al que drena la escorrentía y el área tributaria que le corresponde

En función del modelo de propagación escogido para modelar este fenómeno, deben especificarse parámetros como la pendiente de la cuenca, su dimensión característica o el hidrograma unitario asociado.

Surface ID	Area	Key
1 - piscinas	0.0080	
2 - zona verde	0.2065	
3 - pavimentos	0.0290	
4 - tejados	0.0000	
5 - azotea	0.0000	
6 - pistas deport	0.0550	
7 - asfalto	0.0000	
8	0.0000	
9	0.0000	
10	0.0000	
11	0.0000	
12	0.0000	

Surface information: Percentage of total area [113.39622], Percent of contrib. area [113.32251]. Land use index: Residencial.

Por último, debe especificarse la combinación de usos del suelo en la subcuenca, que a su vez lleva definido su modelo y parámetros de producción de escorrentía.

Pozos

Queda definido por su código, tipo pozo, depósito, conexión o desagüe de la red, coordenadas, cota de la calle y cota a partir de la cual se considera que un desbordamiento. En este caso se han utilizado pozos de registro y depósitos en superficie.

Ilustración 8.- Detalle de las opciones del menú de los pozos de registro.

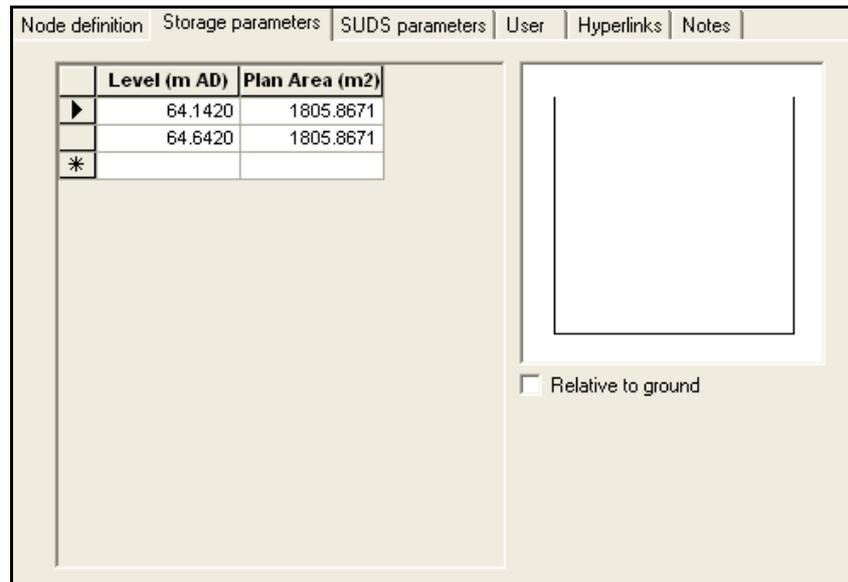


Ilustración 9.- Detalle de las opciones del menú de los embalse dinámicos en superficie.

Conductos

Se han diferenciado dos tipos de conductos los pertenecientes a las secciones circulares de tuberías con sus diferentes diámetros así como los embalses en superficie.

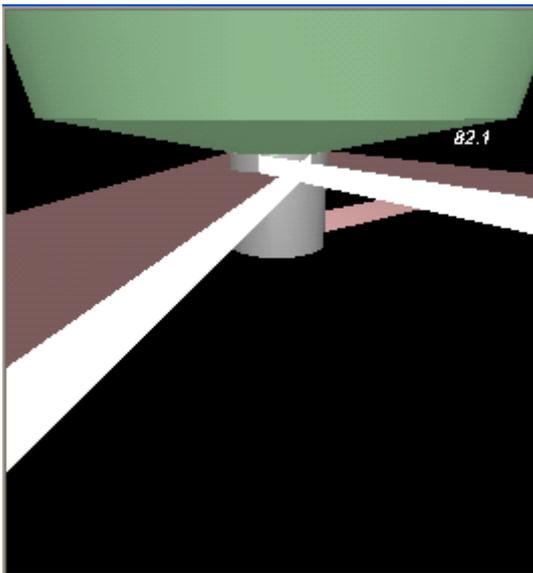


Ilustración 10.- Detalle de las conexiones de los conducciones que conducen la escorrentía hacia el pozo de registro.

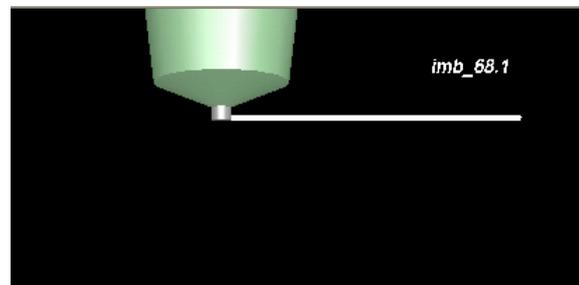


Ilustración 11.- Detalle gráfico uno de los elementos de captación del modelo de parcela, un imbornal.

4.5.5 INPUTS DE PRECIPITACIÓN

Infoworks puede trabajar con dos tipos de entradas de lluvia:

- Registros continuos de lluvia observada, bien de un único evento o bien de un período largo que incluya los tiempos secos entre lluvias.
- Eventos sintéticos de precipitación o lluvias de diseño de una duración determinada y asociadas a un determinado período de retorno.

El programa contiene multitud de eventos sintéticos predefinidos para Reino Unido, así como para Francia. No obstante, el usuario puede definir externamente cualquier evento de precipitación e introducirlo posteriormente como un registro observado de lluvia.

Una posibilidad adicional es la de contemplar la lluvia distribuida espacialmente, asociando hietogramas diferentes según la posición en territorio de una determinada subcuenca. En este caso, hemos escogido el hietograma sintético de bloques de periodo de retorno de 25 años.

4.5.6 MODELOS DE PRODUCCIÓN

Modelo de coeficiente de escorrentía

Los modelos de coeficientes de escorrentía son los más simples, la producción de escorrentía E se relaciona con la precipitación bruta P mediante una relación lineal de coeficiente constante C , el coeficiente de escorrentía.

$$E = C \cdot P$$

Ecuación 11.- Producción de escorrentía.

Esta conceptualización puede ser válida según el alcance del estudio que se desee llevar a cabo, pero al ser tan simplista, se aleja demasiado de la realidad hidrológica, por lo que, en general, no es la más adecuada, siendo este descartado en la modelación a parcela.

Modelo empírico del SCS

La base del modelo de infiltración del SCS es:

$$P = E + F + P_0$$

Ecuación 12.- Ecuación de continuidad

Donde:

- P es la precipitación bruta.
- P_0 es el umbral de escorrentía, es decir, las abstracciones que se producen hasta el comienzo del encharcamiento.
- E es la escorrentía acumulada.
- F es la infiltración acumulada.

Por otra parte, el modelo asume la siguiente relación empírica entre las variables anteriores.

$$\frac{F}{S} = \frac{E}{P - P_0}$$

Donde S es la máxima infiltración acumulada que se puede producir en el suelo. Cambiando ambas ecuaciones, se obtiene,

$$E = \frac{(P - P_0)^2}{(P - P_0 + S)}$$

Ecuación 13.- Ecuación de la escorrentía acumulada.

Para la utilización del modelo en una simulación continua, es necesaria una forma diferencial de la ecuación anterior.

$$\frac{dE}{dt} = \frac{(P - P_0) \cdot (P - P_0 + 2 \cdot S)}{(P - P_0 + S)^2} \frac{dP}{dt}$$

Por lo que, en términos incrementales en un intervalo temporal Δt , se tiene:

$$\frac{\Delta E}{\Delta P} = \frac{(P - P_0) \cdot (P - P_0 + 2 \cdot S)}{(P - P_0 + S)^2}$$

Ecuación 14.- Variación de la escorrentía acumulada frente a precipitación bruta

Los parámetros S y P_0 están relacionados por una expresión del tipo $P_0 = k \cdot S$, donde el valor más habitual del coeficiente es de $k = 0,2$, aunque recientes estudios revelan que los valores más próximos a 0,1 resultan más apropiados.

El modelo del SCS resulta acertado para la modelación de la producción de escorrentía en medio urbano, puesto que:

- Respetar el concepto de umbral de escorrentía, según el cual no hay producción mientras no se supere dicho umbral.
- La producción tiende al valor de la precipitación cuando P tiende a valores infinitos, lo que es completamente cierto en medios urbanos.
- En rangos intermedios, el coeficiente de escorrentía (razón E/P) es creciente con el valor de la precipitación.

Por otra parte, el hecho de que, a efectos prácticos, sólo dependa de un parámetro (P_0), lo hace especialmente atractivo para su inclusión en el modelo completo de drenaje.

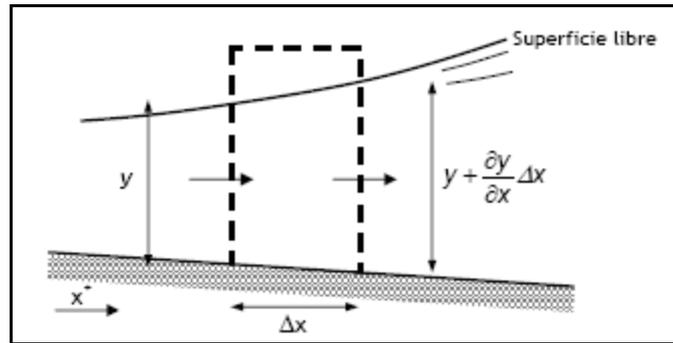
4.5.7 MODELO DE PROPAGACIÓN EN SUPERFICIE

El modelo de reproducción aceptado, el modelo SWMM Infoworks, incorpora algunas de las características del modelo SWMM de la EPA. En la conceptualización de la propagación superficial, SWMM trata las áreas tributarias como depósitos no lineales cuya escorrentía se traslada a los pozos (entrada a la red) mediante una onda cinemática. Los parámetros del modelo son el ancho de la cuenca, la pendiente de la cuenca, la rugosidad superficial (Manning) de la cuenca y las pérdidas iniciales (almacenamiento en depresión).

4.5.8 MODELACION DEL FLUJO EN LA RED DE COLECTORES: PROPAGACIÓN EN LA RED

Las ecuaciones de Saint – Venant (*Jean Claude Saint – Venant, 1871*) son las expresiones que gobiernan el problema del flujo transitorio unidimensional en lámina libre. Las hipótesis fundamentales bajo las que se obtienen dichas ecuaciones son las siguientes:

- Flujo unidimensional según la dirección del eje del conducto.
- Distribución uniforme de velocidades en la sección.
- Variación suave de la superficie libre.
- Distribución de presiones hidrostática en la vertical.
- Pendiente pequeña ($\text{sen}(\theta) \approx \tan(\theta) \approx \theta$).
- Pérdidas por fricción en flujo transitorio asimilables a las del flujo permanente.
- Canal prismático, esto es, con traza rectilínea, pendiente geométrica longitudinal constante y sección transversal constante tanto en geometría como en las características de rugosidad.
- Fluido incompresible (ρ toma un valor constante).

Ecuación de continuidad**Gráfico 9.-** Ecuación de continuidad, elemento de control.

La ecuación de continuidad establece el balance de masas en un determinado elemento de control. Para su deducción, se adopta un elemento diferencial de fluido de dimensión característica Δx en el sentido del movimiento. Así, en la sección x , el área de la sección transversal es A y la velocidad V , y , en la sección de abscisa $x + \Delta x$, el área valdrá $A + \frac{\partial A}{\partial x} \Delta x$ y la velocidad $V + \frac{\partial V}{\partial x} \Delta x$.

Así pues al haberse adoptado ρ constante, el caudal volumétrico entrante menos el caudal saliente tendrá que equivaler a la variación del volumen en el incremento de tiempo.

$$V \cdot A - \left(V + \frac{\partial V}{\partial x} \Delta x \right) \cdot \left(A + \frac{\partial A}{\partial x} \Delta x \right) = \frac{\partial A}{\partial t} \Delta x$$

Operando y simplificando, la ecuación adquiere la forma

$$-A \frac{\partial V}{\partial x} - V \frac{\partial A}{\partial x} - \frac{\partial V}{\partial x} \frac{\partial A}{\partial x} \Delta x = \frac{\partial A}{\partial t}$$

Si se adopta el límite cuando Δx tiende a 0,

$$-A \frac{\partial V}{\partial x} - V \frac{\partial A}{\partial x} = \frac{\partial A}{\partial t}$$

Teniendo en cuenta la derivada del producto $V \cdot A$, se obtiene la ecuación de continuidad para el problema del flujo transitorio unidimensional en lámina libre:

$$\frac{\partial(V \cdot A)}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

Ecuación 15.- Ecuación de continuidad.

Ecuación de cantidad de movimiento

La ecuación de cantidad de movimiento establece el equilibrio dinámico del elemento de control. La forma de dicha ecuación es:

$$F = \iiint_V \frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot \vec{v})dV + \iint_S \rho \cdot \vec{v} dS$$

Ecuación 16.- Ecuación de cantidad de movimiento.

Donde F es la resultante de las fuerzas másicas y de la superficie que actúan sobre el elemento de control, $\iiint_V \frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot \vec{v})dV$ es la aceleración local (variación de la cantidad de movimiento en el elemento de control) y $\iint_S \rho \cdot \vec{v} dS$ es la aceleración convectiva (flujo de cantidad de movimiento a través del contorno del elemento de control).

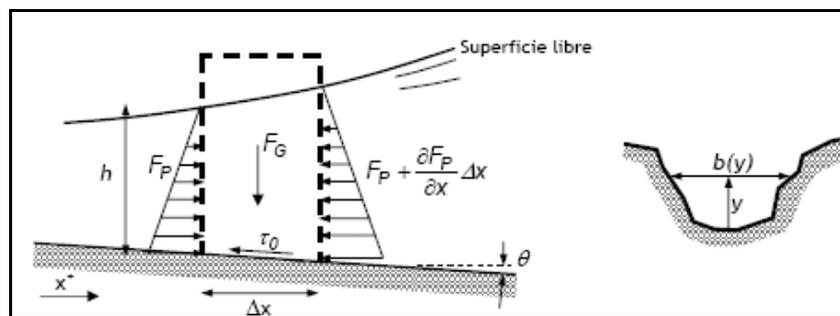


Gráfico 10.- Ecuación de cantidad de movimiento: elemento de control.

El miembro F de la ecuación valdrá:

$$F = F_p - \left(F_p + \frac{\partial F_p}{\partial x} \Delta x \right) + F_{GX} - F_F$$

Donde F_p es la resultante de la distribución hidrostática en la cara entrante del elemento de control, F_{GX} es la componente del peso del elemento de control según la dirección del movimiento y F_F la fricción sobre el contorno.

$$F_p = \int_0^h \rho \cdot g \cdot (h - y) \cdot b(y) dy$$

Por lo que la resultante de las distribuciones hidrostáticas es:

$$F_p - \left(F_p + \frac{\partial F_p}{\partial x} \Delta x \right) = -\frac{\partial}{\partial x} \left[\int_0^h \rho \cdot g \cdot (h - y) \cdot b(y) dy \right] \Delta x$$

$$F_p - \left(F_p + \frac{\partial F_p}{\partial x} \Delta x \right) = -\Delta x \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{dh}{dx} \cdot \int_0^h b(y) dy + \Delta x \cdot \rho \cdot g \cdot \int_0^h (h - y) \cdot \frac{\partial b(y)}{\partial x} dy$$

Recordando la hipótesis de conducto prismático, se cumple $\frac{\partial b(y)}{\partial x} = 0$, finalmente,

$$F_p - \left(F_p + \frac{\partial F_p}{\partial x} \Delta x \right) = -\Delta x \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \cdot A(h)$$

La componente del peso del elemento de control según la dirección del movimiento es:

$$F_{GX} = \rho \cdot g \cdot A(h) \cdot \Delta x \cdot \text{sen} \theta = \rho \cdot g \cdot A(h) \cdot \Delta x \cdot I_0$$

Donde I_0 es la pendiente geométrica longitudinal del conducto. Por último la resultante de las fuerzas de fricción en el contorno será:

$$F_F = \tau_0 \cdot P_m \cdot \Delta x = \gamma \cdot R_h \cdot I \cdot P_m \cdot \Delta x = \rho \cdot g \cdot A(h) \cdot \Delta x \cdot I$$

Donde I es la pendiente motriz del flujo. Por otra parte, la variación total de la cantidad de movimiento vale:

$$\iiint_V \frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot g) dV + \iint_S \rho \cdot V dS = \rho \cdot \left(V + \frac{\partial V}{\partial x} \cdot \Delta x \right)^2 \cdot \left(A + \frac{\partial A}{\partial x} \cdot \Delta x \right) - \rho \cdot V^2 \cdot A + \rho \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial (V \cdot A)}{\partial t}$$

Así la ecuación de cantidad de movimiento queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} -\Delta x \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{\partial h}{\partial x} A + \Delta x \cdot \rho \cdot g \cdot I_0 \cdot A - \Delta x \cdot \rho \cdot g \cdot I \cdot A = \\ = \rho \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial (VA)}{\partial t} + \rho \cdot \left(V + \frac{\partial V}{\partial x} \cdot \Delta x \right)^2 \cdot \left(A + \frac{\partial A}{\partial x} \Delta x \right) - \rho \cdot V^2 \cdot A \end{aligned}$$

Operando, dividiendo por Δx y haciéndolo tender a 0, resulta:

$$\begin{aligned} \rho \cdot g \cdot A \cdot (I_0 - I) - \rho \cdot g \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \cdot A = \rho \cdot 2 \cdot V \cdot A \cdot \frac{\partial V}{\partial x} + \rho \cdot V^2 \cdot \frac{\partial A}{\partial x} + \rho \cdot \frac{\partial (V \cdot A)}{\partial t} \\ \frac{\partial (V \cdot A)}{\partial t} + V^2 \cdot \frac{\partial A}{\partial x} + A \cdot \frac{\partial (V^2)}{\partial x} + g \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = g \cdot A \cdot (I_0 - I) \end{aligned}$$

Desarrollando y agrupando convenientemente los términos, nos queda:

$$\begin{aligned} A \cdot \frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial (A \cdot V^2)}{\partial x} + g \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = g \cdot A \cdot (I_0 - I) \\ A \cdot \frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot A \cdot \frac{\partial V}{\partial x} + V \cdot \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial (A \cdot V)}{\partial x} \right) + g \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = g \cdot A \cdot (I_0 - I) \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta que en virtud de la ecuación de continuidad se cumple que

$$\frac{\partial (VA)}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0, \text{ finalmente queda:}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g \cdot (I_0 - I)$$

Ecuación 17.- Ecuación reducida de cantidad de movimiento.

Siendo ésta la ecuación reducida de cantidad de movimiento para el problema de flujo transitorio unidimensional en lámina libre.

Ecuación de Saint – Venant

El sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que constituyen las ecuaciones de Saint – Venant es el siguiente:

$$\frac{\partial(V \cdot A)}{\partial t} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \frac{\partial V}{\partial x} + g \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = g \cdot (I_0 - I)$$

Ecuación 18- Sistema de Saint Venant.

La interpretación física de la ecuación de equilibrio dinámico es la siguiente:

- $\frac{\partial V}{\partial t}$ representa el término inercial que corresponde a la aceleración local.
- $V \cdot \frac{\partial V}{\partial x}$ representa el término inercial correspondiente a la aceleración convectiva.
- $g \cdot \frac{\partial h}{\partial x}$ representa la componente debido a la resultante de las presiones hidrostáticas.
- $g \cdot I_0$ representa la componente debido al peso del agua (a favor del movimiento).
- $g \cdot I$ representa la componente debida a la fricción en el contorno (en contra del movimiento).

Resolución de las ecuaciones de Saint – Venant

Los métodos en diferencias finitas explícitos producen para cada nodo tantas ecuaciones como incógnitas. Los más utilizados son el esquema difusivo (llamado también esquema de Lax – Friedrichs o simplemente esquema de Lax), el esquema Leap – Frog, el esquema de McCormack y el esquema Lambda. Los esquemas explícitos presentan el inconveniente de requerir incrementos de tiempo muy pequeños en el proceso de cálculo para cumplir la condición de estabilidad de Courant y, por lo tanto, son más caros computacionalmente respecto de los métodos implícitos, aunque esta desventaja se atenúa cuando el flujo es rápidamente variado.

Los métodos en diferencias finitas implícitos producen un sistema de ecuaciones para cada nivel temporal. Entre los métodos en diferencias finitas implícitos destaca en primer lugar el esquema de Preissmann, también llamado esquema de los cuatro puntos, extensamente utilizado desde su formulación en los años 60. Es un esquema que

proporciona resultados extraordinariamente precisos en régimen lento, con una gran velocidad de cálculo y que permite utilizar grandes incrementos de espacio y de tiempo. Otros esquemas en diferencias finitas implícitas son el esquema de Beam and Warming y el esquema de Vasiliev.

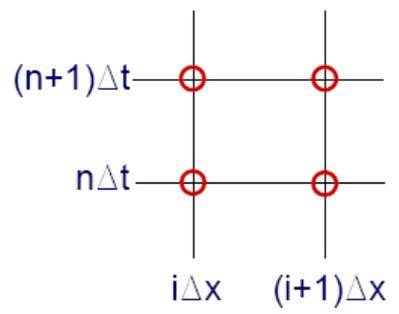
$$\left\{ \begin{array}{l} f = \frac{\theta}{2} (f_{i+1}^{n+1} + f_i^{n+1}) + \frac{1-\theta}{2} (f_{i+1}^n + f_i^n) \\ \frac{\partial f}{\partial x} = \frac{\theta}{\Delta x} (f_{i+1}^{n+1} - f_i^{n+1}) + \frac{1-\theta}{\Delta x} (f_{i+1}^n - f_i^n) \\ \frac{\partial f}{\partial t} = \frac{1}{2\Delta t} (f_{i+1}^{n+1} + f_i^{n+1} - f_{i+1}^n - f_i^n) \end{array} \right.$$


Ilustración 12.- Esquema de resolución implícito.

Condiciones iniciales y de contorno

Como en todo problema físico matemático, la resolución del problema exige el establecimiento de:

- La condición inicial para $t = 0$: velocidad y calados conocidos.
- Las condiciones de contorno en los extremos del sistema, normalmente, hidrogramas aguas arriba y controles aguas abajo.

Los controles más comunes en la modelación del drenaje urbano son:

- Calado conocido: $y(t)$ (nivel constante del río, mar o lago, nivel variable de un colector principal).
- Sección crítica: $y(Q)$ (Desembocadura en río, mar o lago, caída o cambio brusco de pendiente)

El concepto de ranura de Preissmann

Una situación muy frecuente en el problema del drenaje urbano es la entrada en carga de los colectores de sección cerrada. El concepto de ranura de Preissmann establece la base teórica para poder abordar la resolución del flujo en presión sin dejar de utilizar las ecuaciones de la lámina libre de Saint – Venant.

La idea consiste en considerar que el conducto cerrado está en realidad abierto por la clave a través de una fina ranura que se denomina ranura de Preissmann. Al ser muy fina en comparación con la sección del conducto, no perturba la continuidad, y el nivel alcanzado en la misma representa el nivel de carga o sobrepresión a que está sometido el conducto.

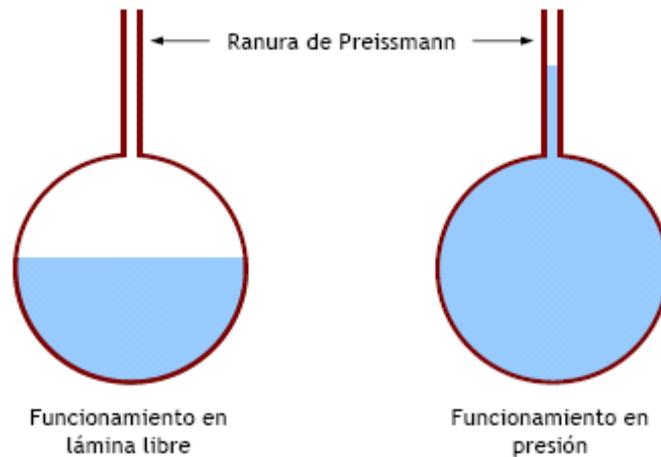


Ilustración 13.- Ranura de Preissmann.

Convergencia y estabilidad numérica

La calidad de la solución obtenida mediante resolución numérica está condicionada a la resolución de la malla (x, t) utilizada, siendo evidentemente mejor la solución obtenida con la malla de mayor resolución.

Debido al crecimiento de los errores de redondeo y truncamiento durante el proceso de cálculo, pueden aparecer en la solución inestabilidades que la distorsionen. La estabilidad de un esquema numérico se detecta analizando si un error crece o decrece conforme avanza el proceso de resolución.

Una condición que debe cumplirse en la definición de la malla de cálculo para garantizar la estabilidad es la llamada condición de Courant, según la cual Δx e Δt deben satisfacer la relación:

$$|c + v| \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1$$

Ecuación 19.- Condición de Courant.

Donde c es la velocidad de la onda cinemática y v la velocidad del agua. La velocidad de la onda c puede estimarse mediante:

$$c = \frac{dQ}{dA} = \left(\frac{g \cdot A}{B} \right)^{1/2}$$

Ecuación 20.- Velocidad de la onda cinemática.

Pueden aparecer además problemas localizados de convergencia y estabilidad en resaltos hidráulicos, cambios bruscos de sección, etc. Éstos deben ser resueltos con esquemas numéricos especiales.

5 DISEÑO DE LA RED DE PLUVIALES

El objetivo de este capítulo es el diseño optimizado de la red de pluviales. La metodología empleada para tal efecto es la propuesta por la normativa del Ayuntamiento de Valencia, siendo ésta, el criterio final para el dimensionamiento de los grandes colectores.

La norma tiene el concepto de cuenca a escala de pozo de registro (denominado en el presente trabajo modelo de cuenca global), para la modelación de las cuencas urbanas. En la hidráulica fundamental, su principal elemento de captación es el pozo de registro, donde cada uno capta la escorrentía generada en su respectiva área de influencia, y cuya finalidad es captar toda la lluvia efectiva que se propaga en la superficie y conducirla hasta la red principal de colectores.

Teniendo en cuenta la norma, a medida que avanzamos en este capítulo se citan los valores y la metodología empleada en el capítulo 4.

5.1 DISEÑO CON LA NORMA

5.1.1 CARACTERÍSTICAS TOPOLÓGICAS DE LA RED

La urbanización consta de poco más de 20 ha, tiene un desnivel máximo de 22 metros, desde el punto más alto de la captación hasta el punto de desagüe. La red planteada es sólo de pluviales, no se ha tenido en cuenta la evacuación de las aguas residuales de cada vivienda que se considera solventada en otra red independiente.

Siguiendo la normativa que exige que se deben colocar los pozos de registro cada 25 metros, finalmente, con el número de calles que forman la urbanización, se tiene un total de 117 pozos de registro, todos con sección circular de 1 metro de diámetro interior. Las áreas de influencia son calculadas en función del número de pozos y del radio de afección que tiene cada uno de ellos respecto a la cuenca global (método de los polígonos de Thiessen).

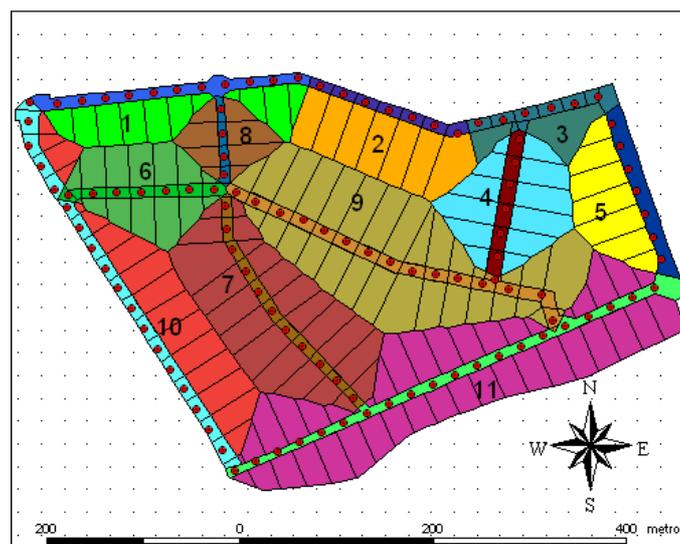


Gráfico 11.- Áreas de influencia de los 11 colectores.

5.1.2 CÁLCULO

En cuanto a la metodología de cálculo, se ha empleado la descrita en el capítulo 4.1, la cual analiza la red por cada colector, obteniéndose los parámetros individualmente de cada uno de estos.



Gráfico 12.- Porcentajes de las superficies que representan la cuenca, función del uso del suelo

Los coeficientes de escorrentía que recomienda la normativa para este tipo de zonas residenciales es de 0,5, el cual incluye todas las superficies presentes en la cuenca: tejados, jardines asfalto, etc. A las zonas asfaltadas se le ha reasignado un valor de 0.95, mientras que a los terrenos que forman la parcela, se ha calculado en base a una media ponderada, es decir, obtenido a partir del valor medio de 0,5 que asigna la normativa y el 0.95 asignado al asfalto. Finalmente nos queda un valor de coeficiente de escorrentía de 0.4, para los terrenos que forman cada parcela.

$$C_{\text{ESCORRENTÍA}} = \frac{\text{Area}_{\text{casas}} \cdot C_{\text{casas}} + \text{Area}_{\text{asfalto}} \cdot C_{\text{asfalto}}}{A_{\text{TOTAL}}} = 0,5$$

Ecuación 21.- Ecuación para el cálculo del coeficiente medio de escorrentía

Diferenciados los usos del suelo y las áreas de influencia de cada uno de los colectores, el siguiente paso es aplicar el método de Témez, siendo necesaria la asignación de una tormenta de diseño de una determinada intensidad pico. Para el caso de la ciudad de Valencia se obtiene de la curva IDF (Intensidad-duración-frecuencia), Ecuación 2. Las áreas de influencia que contribuyen a la producción de escorrentía de cada colector tienen un área menor de 4 ha; normalmente esto dará lugar a tiempos de concentración inferiores a 10 minutos, correspondiendo este tiempo a la duración de la tormenta más desfavorable para el diseño de cada gran colector. Con esto, se obtiene una intensidad máxima de 133 mm/hr para cada una de las subcuencas que forman los grandes colectores.

El siguiente parámetro importante en el método de Témez es el coeficiente de propagación, su valor queda definido por la Ecuación 5, que depende de las constante a y b, y del t_d , que se define para cada tramo, como el tiempo diferencia, entre su tiempo de concentración y el tiempo de entrada, Ecuación 3, obteniéndose un t_d de 4 minutos (la diferencia entre el tiempo de concentración, que suponemos inicialmente de 10 minutos,

y el tiempo de entrada a la red, que es lo que tarda en recorrer la escorrentía producida en cada área de influencia de cada colector hasta su entrada a la red es supuesta de 360 segundos).

Finalmente se obtienen los caudales que deben conducir cada uno de los colectores hasta el punto de desagüe, Ecuación 6. Se detallan a continuación los cálculos para el colector 1.

COLECTOR	$A_{calles}(ha)$	$A_{casas}(ha)$	$Qp(m^3/s)$
1	0.363	0.892	0.28

Tabla 2.- Detalle de los resultados de la aplicación del método racional calibrado.

Ahora se puede calcular el diámetro de cada uno de los colectores, función del caudal a evacuar. Se emplea Ecuación 7, como se detalla en la siguiente tabla.

COLECTOR	pendiente	Longitud(m)	$V_{sección\ llana}(m/s)$	Diámetro(m)	$D_{comercial}(m)$
1	0,045	250	3,06	0,35	0,4

Tabla 3.- Detalle del cálculo del diámetro de diseño para cada colector.

Los diámetros calculados son los mínimos interiores. Una vez particularizada cada sección de cada gran colector, se comprueba el tiempo de concentración real; este no debe ser superior a los 10 minutos supuestos inicialmente para poder validar las simplificaciones realizadas.

La mayoría de los colectores cumplen, con excepción de los colectores 5,10 y 11, pero en ningún caso llegan a alcanzar los 11 minutos, por lo que se asume que los caudales calculados inicialmente corresponden a los valores máximos con la tormenta de duración más desfavorable, de 10 minutos.

COLECTOR	T concentración					
	$T_c\ real$ (minutos)	a	b	t_d (minutos)	$K_p=t_d < a$	I (mm/h)
1	7.63	21.75	-0.19	4	1.0368	138.51

Tabla 4.- Cálculo de los parámetros del tiempo de concentración para el colector 1

5.1.3 RESULTADOS EN EL DISEÑO DE LOS COLECTORES

COLECTOR	$A_{calles}(ha)$	$A_{casas}(ha)$	$Qp(m^3/s)$
1	0.3636	0.8924	0.28
2	0.2000	1.2067	0.54
3	0.2432	0.3472	0.95
4	0.2383	1.1603	0.27
5	0.3184	0.8362	0.79
6	0.2066	1.0069	0.24
7	0.5520	2.3078	0.80
8	0.0861	0.5139	0.11
9	0.5096	3.2469	0.79
10	0.6022	1.4812	0.44
11	0.5483	3.4999	2.76

Tabla 5.- Resultados de los parámetros del método racional calibrado de Témez.

COLECTOR	pendiente	Longitud(m)	$V_{sección\ llena}(m/s)$	Diámetro(m)	$D_{comercial}(m)$
1	0,045	250	3,06	0.35	0.4
2	0,043	150	3,50	0.46	0.5
3	0,049	125	4,10	0.55	0.6
4	0,016	175	1,44	0.49	0.5
5	0,043	490	2,64	0.64	0.7
6	0,019	475	3,07	0.33	0.4
7	0,045	150	2,96	0.59	0.6
8	0,024	250	1,00	0.43	0.5
9	0,042	355	3,89	0.53	0.6
10	0,002	75	2,34	0.49	0.5
11	0,007	172	5,13	0.84	0.9

Tabla 6.- Resultados de los diámetros interiores de los colectores.

COLECTOR	T concentración					
	$T_c\ real$ (minutos)	a	b	t_d (minutos)	$K_p=t_d < a$	I (mm/h)
1	7.61	21.75	-0.19	4	1.036	138.51
2	8.50	21.75	-0.19	4	1.036	136.59
3	9.16	21.75	-0.19	4	1.036	135.27
4	8.38	21.75	-0.19	4	1.036	136.83
5	10.48	21.75	-0.19	4	1.036	132.42
6	6.97	21.75	-0.19	4	1.036	140.01
7	8.66	21.75	-0.19	4	1.036	136.21
8	7.70	21.75	-0.19	4	1.036	138.37
9	9.51	21.75	-0.19	4	1.036	134.34
10	10.05	21.75	-0.19	4	1.036	133.19
11	10.76	21.75	-0.19	4	1.036	131.83

Tabla 7.- Resultados de los parámetros de tiempo de concentración para cada colector.

COLECTOR	$V(m/s)_{sección_mojada}$	$Q(m^3/s)$	n	i	D
1	3.66	0.28	0.015	0.05	0.4
2	2.70	0.54	0.015	0.04	0.5
3	3.32	0.95	0.015	0.05	0.6
4	1.35	0.27	0.015	0.01	0.5
5	2.04	0.79	0.015	0.02	0.7
6	1.90	0.24	0.015	0.05	0.4
7	2.80	0.80	0.015	0.02	0.6
8	1.05	0.11	0.015	0.00	0.5
9	2.80	0.79	0.015	0.04	0.6
10	2.22	0.44	0.015	0.02	0.5
11	4.11	2.76	0.015	0.04	0.9

Tabla 8.- Resultados de la comprobación de autolimpieza de los colectores, cuya velocidad debe estar entre el rango permitido por la normativa.

La pendiente general de cada colector corresponde al desnivel del terreno. Tras las comprobaciones de las velocidades, se aprecia que en el colector 8 no se cumple la normativa, su velocidad se encuentra por debajo del mínimo permitido de 1,2 m/s .

En este caso, es un colector de sólo 100 metros, situado al comienzo de uno de los ramales de mayor cota de la red y unido a la naturaleza de captación de la red, sólo aguas de pluviales (menos problema con la acumulación de sedimentos), y que las velocidades máximas están en el rango permitido, no es necesaria la modificación de la pendiente del colector 8. El resto de colectores cumple de sobra las exigencias de la normativa.

5.2 OPTIMIZACIÓN DE LA RED

El prediseño anterior se ha hecho en régimen estacionario y uniforme, mientras que un análisis en régimen transitorio puede llevar a una optimización del diseño de la red

El verdadero funcionamiento de los colectores, es el transitorio, representativo de los fenómenos que ocurren en la red de alcantarillado, siendo necesaria la simulación de la red.

En el programa Infoworks CS se ha recreado la red en su estado según el prediseño anterior abordado con el MRC, y se ha simulado con una tormenta sintética, más desfavorable, el histograma de bloques alternos, tal y como se aprecia en el Gráfico 13, con una punta mayor, que la propuesta por las curvas IDF del método de Témez.

El modelo de producción utilizado es el propuesto por el SCS, basado en los umbrales de escorrentía Sólo se diferencian dos tipos de superficies, a nivel de cuenca global, el asfalto y los terrenos que forman la parcela (terrenos mixtos). Éste es un modelo más representativo de la zona, donde se tienen en cuenta las abstracciones iniciales, y no hay producción de escorrentía hasta que se rebasen dichos umbrales de escorrentía.

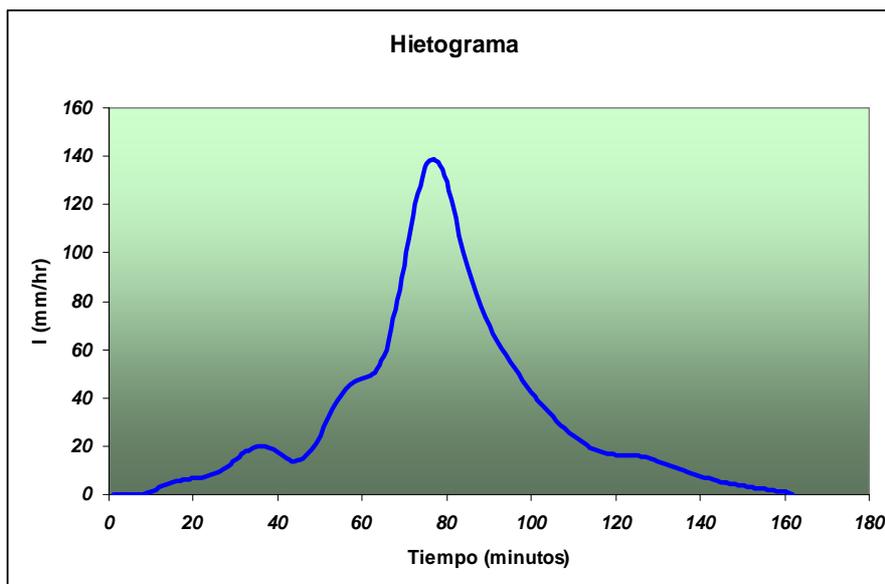


Gráfico 13.- Hietograma de bloques alternos, suavizados por medio de los splines .Esto es para evitar los efectos indeseados de la modelación hidráulica fruto de las discontinuidades que supone pasar de un bloque al siguiente en el hietograma original de bloques alternos.

Con las simulaciones oportunas realizadas con la red, en su estado dinámico y régimen transitorio, se consigue la optimización de la red; finalmente se obtienen las envolventes de las velocidades máximas como se puede apreciar en la Tabla 9 y Tabla 10.

Teniendo en cuenta la geomorfología de la red y la topografía que indica elevadas pendientes para cada colector general, se han escalonado los perfiles longitudinales de la red, colocando los saltos en los pozos de registro. Además con esto se garantiza que, para caudales mayores se necesite menos pendiente para lograr la misma velocidad.

Las velocidades son crecientes a medida que descendemos aguas abajo de cada colector. Esto evita la sedimentación concentrada en los conductos, además esta distribución ascendente de la velocidad aguas abajo, implica que no existan grandes variaciones de velocidad que puedan causar importantes pérdidas de carga.

ID_tubería	V (m/s)	ID_tubería	V (m/s)	ID_tubería	V (m/s)
1	1.27	21	1.23	41	2.64
2	1.25	22	1.40	42	2.67
3	1.30	23	1.61	43	2.68
4	1.44	24	1.60	44	4.21
5	1.51	25	1.70	45	3.62
6	1.62	26	1.73	46	3.60
7	1.76	27	1.75	47	3.55
8	1.90	28	1.84	48	3.50
9	1.85	29	1.80	49	3.24
10	1.93	30	1.84	50	3.20
11	2.04	31	1.94	51	3.16
12	2.16	32	2.07	52	3.20
13	2.26	33	2.21	54	3.07
14	2.07	34	2.08	55	3.02

15	2.17	35	2.18	56	2.96
16	1.17	36	2.30	57	3.20
17	1.00	37	2.45	58	3.14
18	0.80	38	2.50	59	2.35
19	0.50	39	2.52	60	2.56
20	0.94	40	2.60	61	2.42

Tabla 9.- Velocidades de cada uno de los conductos que forman los colectores para el diseño optimizado.

ID_tubería	V (m/s)	ID_tubería	V (m/s)	ID_tubería	V (m/s)
62	2.27	83	2.67	103	2.82
63	2.14	84	2.57	104	2.88
64	2.05	85	2.45	105	2.95
65	1.03	86	2.33	106	3.00
66	1.44	87	2.40	107	2.73
67	1.70	88	2.20	109	2.07
68	1.93	89	2.07	110	2.10
69	2.16	90	2.05	111	1.94
70	2.17	91	1.86	112	1.73
71	2.32	92	1.73	113	1.57
72	2.48	93	1.61	114	1.26
73	2.35	94	2.01	115	1.70
74	2.50	95	1.87	116	0.84
75	2.61	96	1.95	-	-
76	2.72	97	1.66	-	-
77	2.77	98	1.55	-	-
78	3.06	99	1.23	-	-
80	2.56	100	0.80	-	-
81	2.77	101	2.71	-	-
82	2.73	102	2.75	-	-

Tabla 10.- Restantes valores de las velocidades en cada conducto optimizado.

Finalmente, tras varias simulaciones y ajustar el funcionamiento de los colectores, para que sea en lámina libre y con la sección optimizada, los valores máximos en estado de carga/presión se detalla en el Gráfico 14.

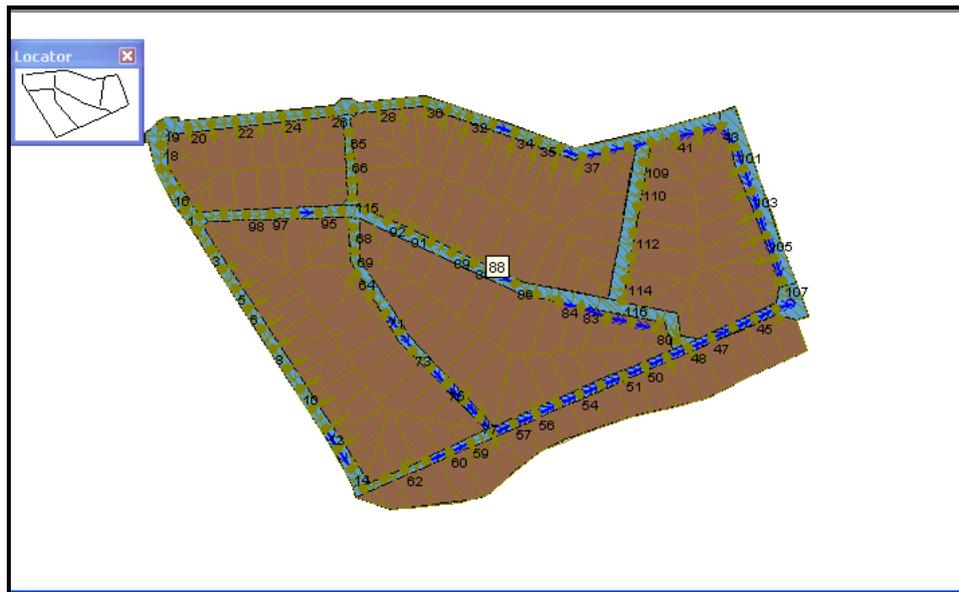


Gráfico 14.- Optimización de la red, escala 1:4260, sólo los conductos en azul llegan con un estado de carga óptimo. Es decir, la relación Q_0/Q lleno es de 0,8, siendo este el valor óptimo que debe presentar una red para su correcto diseño y posterior funcionamiento. Para el resto de los conductos, la capacidad de estado presión /carga están próximos a este valor, también se pueden diferenciar los dos usos del suelo, los terrenos edificables de color marrón y el asfalto de color azul.

El diseño final de la red de pluviales optimizada con los once colectores con todos los conductos que conforman cada uno de ellos; se obtienen finalmente los diámetros interiores que se pueden apreciar en el Gráfico 15.

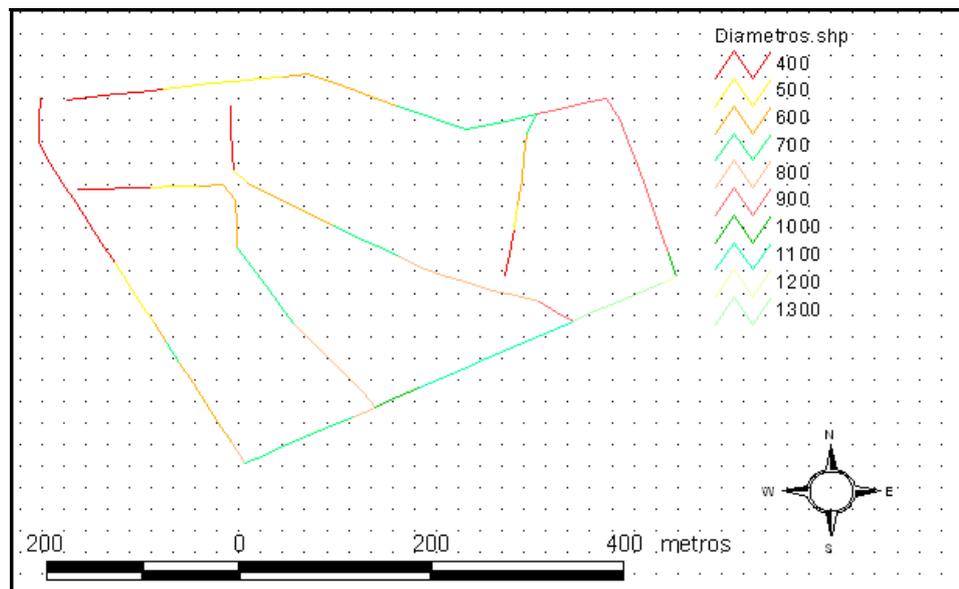


Gráfico 15.- Diámetros interiores de cada uno de los conductos que conforman los colectores.

5.3 PERFILES LONGITUDINALES DE LOS COLECTORES

A continuación se presenta uno de los perfiles longitudinales dinámicos correspondientes al primer gran colector, como se aprecia en el Gráfico 16, el desnivel que se observa es considerable, esto implicaría un exceso de velocidad del fluido aguas abajo del colector. Con el escalonamiento de cada uno de los grandes colectores se evita este hecho disipando la pendiente innecesaria del conducto.

Cada tramo está formado por conductos con pendiente positiva de 0.008 m/m, la longitud de cada uno es de 25 metros, correspondientes al distanciamiento entre pozos de registro exigidos por la normativa. Debido a la morfología de algunas calles, no se ha permitido el distanciamiento de los 25 metros exigido a todos los conductos que forman cada gran colector, siendo la pendiente y longitud de algunos de ellos próximos a las características físicas predominantes del resto de tramo que forman la red de pluviales.

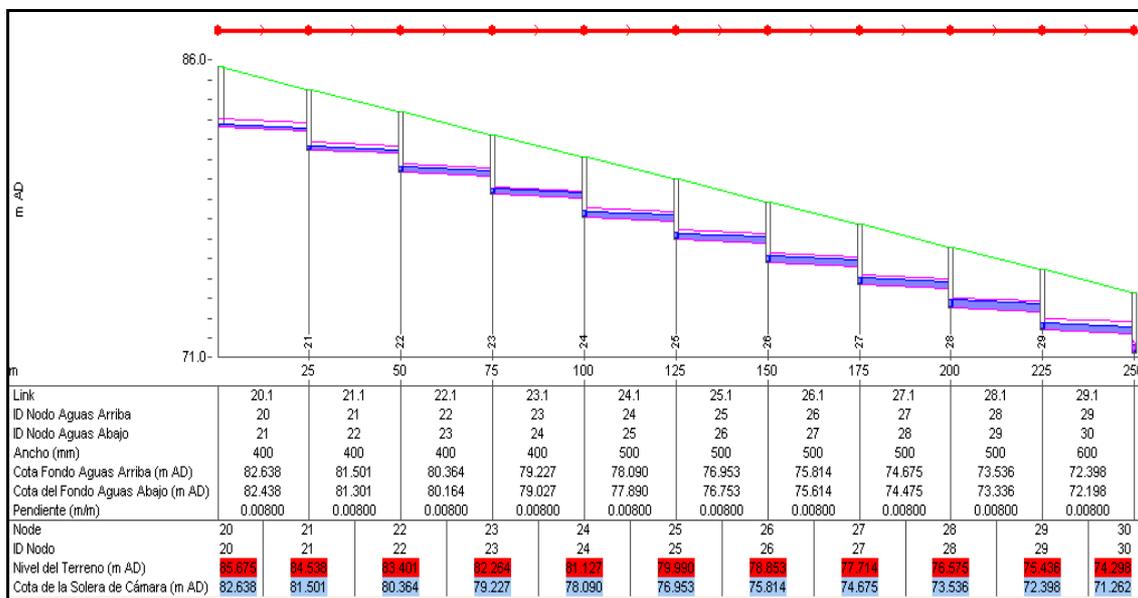


Gráfico 16.- Perfil longitudinal dinámico del Colector 1.

En el perfil longitudinal dinámico, se aprecia como la capacidad de cada conducto que forma cada colector están próximos al funcionamiento óptimo, buscando el mejor aprovechamiento de la sección como se puede apreciar en Gráfico 16.

Es evidente que el escalonamiento del perfil longitudinal de cada colector tiene los siguientes efectos positivos en el funcionamiento de la red: evita que las variaciones fuertes de velocidad causen importantes pérdidas de carga, compensa el exceso de pendiente que tiene la red, mediante la caída en cada pozo de registro, como se aprecia en el Gráfico 16, provocando que la velocidad vaya en aumento progresivamente aguas abajo en cada colector, así evitando la sedimentación concentrada que se pueda acumular en los conductos, además de evitar la posible formación de resaltos hidráulicos que disminuyan la sección óptima.



Ilustración 14.- Detalle de las pendientes pronunciadas de las calles de la urbanización de estudio.

6 ESTUDIO COMPARATIVO

Analizada y optimizada la red a nivel de cuenca global (diseño convencional mediante el Método Racional Calibrado propuesto por la normativa), este capítulo se centra en el funcionamiento de la red con la modelación detallada de parcela, cuya metodología se explicó en el Capítulo 2.

En el modelo de cuenca global se definen los colectores que transportan el agua desde los pozos de registro hasta el punto de desagüe (propagación en la red), mientras que en el modelo detallado de parcela, el mecanismo de transferencia que resume la propagación de la escorrentía en superficie hasta la red principal se basa en el concepto de parcela como principal componente en la producción de la escorrentía superficial.

Este modelo detallado requiere la incorporación de nuevos elementos de captación de la escorrentía superficial, los cuales definen mejor la hidráulica para estos ámbitos residenciales formados por viviendas unifamiliares.

6.1 MODELO DE CUENCA GLOBAL

Para la optimización del diseño propuesto por la normativa se han introducido algunos matices en la representación del modelo de la red de pluviales. Estas diferencias se comentan a continuación.

Se ha mejorado el coeficiente de escorrentía propuesto por la normativa de 0,5, reagrupando en dos usos del suelo, el asfalto de las carreteras, con un coeficiente de 0,95 y los terrenos que forman la parcela (mixtos), con un coeficiente de 0,4, además de la utilización de una tormenta más desfavorable e irregular en el tiempo y de periodo de retorno de 25 años, como se aprecia en el Gráfico 13. Finalmente se ha realizado un escalonamiento del perfil longitudinal de la red, para así evitar el exceso de pendiente de la red entre otras.

La normativa utiliza el método racional calibrado, el cual sólo determina los caudales pico para una tormenta de un determinado periodo de retorno, sin embargo para la

correcta optimización del sistema en estado transitorio, se ha utilizado el modelo de producción, propuesto por el SCS, basado en los umbrales de escorrentía. La metodología en la que se basa éste modelo se ha explicado en el capítulo 4.5.6.

El MRC es un método y el del SCS es un modelo, pero sin embargo se pueden relacionar por medio del número de curva (CN), ya que para obtener este parámetro en el modelo de producción es necesario conocer el coeficiente de escorrentía asignado.

El método racional utiliza valores de coeficientes de escorrentía fijos, en cambio el modelo de producción utilizado para el diseño en régimen transitorio utiliza los umbrales de escorrentía, los cuales producirán escorrentía cuando se sobrepase dicho valor, como detallan las siguientes características de dicho modelo de producción, el cual:

- Respetar el umbral de escorrentía, según el cual no hay producción mientras no se supere dicho valor.
- La producción tiende al valor de la precipitación cuando P tiende a infinito, lo que en medios urbanos es muy cierto.

En rangos intermedios, el coeficiente de escorrentía (E/P) es creciente con el valor de la precipitación.

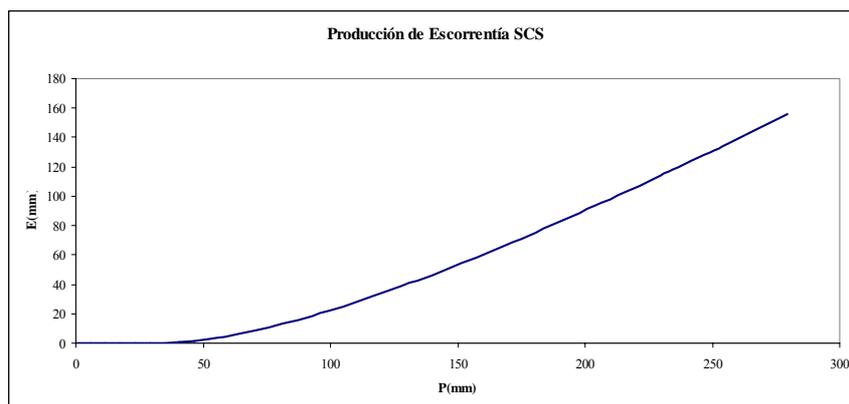


Gráfico 17.- Modelo de producción del SCS para un umbral de escorrentía $P_o = 40$ mm.

6.2 MODELO DETALLADO DE PARCELA

Este modelo detallado de parcela tiene un mayor grado de detalle, donde se define como elemento de hidrología urbana (sección UHE) la parcela. El resultado final para la comparativa entre ambas metodologías en el punto de desagüe pasa por la convolución de cada uno de los hidrogramas generados por las diferentes parcelas.

Teniendo en cuenta este grado de definición, se han estudiado las diferentes situaciones posibles que se puedan encontrar en estos ámbitos residenciales formados por viviendas unifamiliares, de las cuales se diferencian 4 posibles configuraciones:

1. con las bajantes de los tejados conectadas a la red principal y con imbornales conectados a los pozos de registro.

2. con las bajantes de los tejados conectadas a la red principal pero sin imbornales conectados a los pozos de registro.
3. sin las bajantes de los tejados pero con imbornales conectados a los pozos de registro.
4. sin las bajantes de los tejados y sin imbornales conectados a los pozos de registro.

La propuesta se basa en definir cada una de las superficies presentes en cada una de las parcelas.

Como trabajo previo a la modelación hidrológica e hidráulica, se ha hecho un trabajo de tratamiento de imágenes para determinar la naturaleza de las superficies, de las que se diferencian siete. Teniendo en cuenta ésta característica y la tormenta utilizada (Gráfico 19), se han utilizado diferentes valores de coeficientes de escorrentía para analizar el comportamiento de dichos coeficientes frente a varias tormentas sintéticas.

<i>Coefficiente de Escorrentía</i>	<i>valor medio</i>	<i>valores mínimos</i>	<i>valores máximos</i>
<i>pavimentos</i>	0.78	0.70	0.85
<i>asfalto</i>	0.83	0.70	0.95
<i>tejados</i>	0.85	0.75	0.95
<i>azoteas</i>	0.63	0.50	0.75
<i>piscinas</i>	0	0	0
<i>pistas deportivas (hormigón)</i>	0.83	0.70	0.95
<i>jardines</i>	0.16	0.10	0.22

Tabla 11.- Detalles de los valores de los diferentes coeficientes de escorrentía utilizados.

Los diferentes umbrales de escorrentía que se utilizan en el modelo de producción están en función de la naturaleza de las superficies que forman la cuenca urbana, de la cual se distinguen hasta siete tipos, representativos de las superficies de la zona de estudio, Godella (Valencia), cuyos porcentajes se representan en el Gráfico 18.

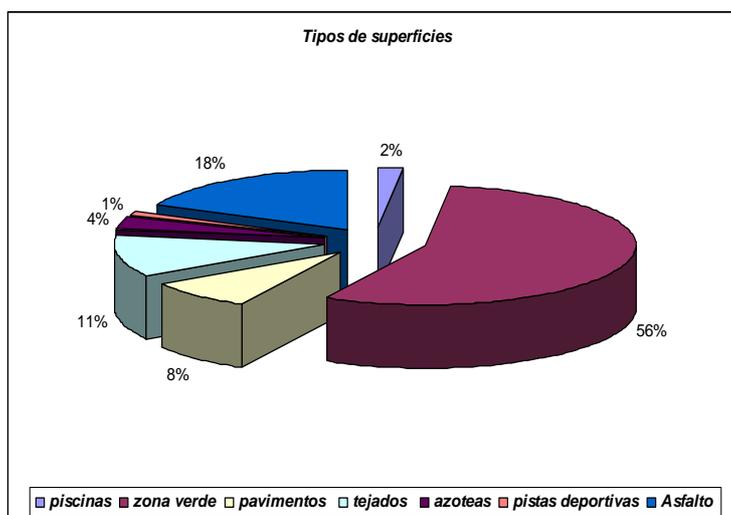


Gráfico 18.- Detalle de los porcentajes de las superficies diferenciadas en la cuenca urbana para el modelo detallado de parcela.

Definidas las posibles configuraciones que puedan encontrarse en los ámbitos residenciales de viviendas unifamiliares, se ha realizado un análisis de sensibilidad del modelo frente a tormentas de diferente magnitud, es decir, dada la cantidad de volumen que genera la tormenta sintética empleada en el diseño (hietograma de bloques alternos), generará mayores diferencias entre el modelo de cuenca global y el modelo detallado de parcela. Manteniendo la forma del hietograma sintético, se ha escalado el mismo reduciendo su intensidad, en un 20 y un 50 %, y por tanto el periodo de retorno de cada tormenta suavizada será menor de 25 años. Tales tormentas utilizadas se aprecian en el siguiente gráfico:

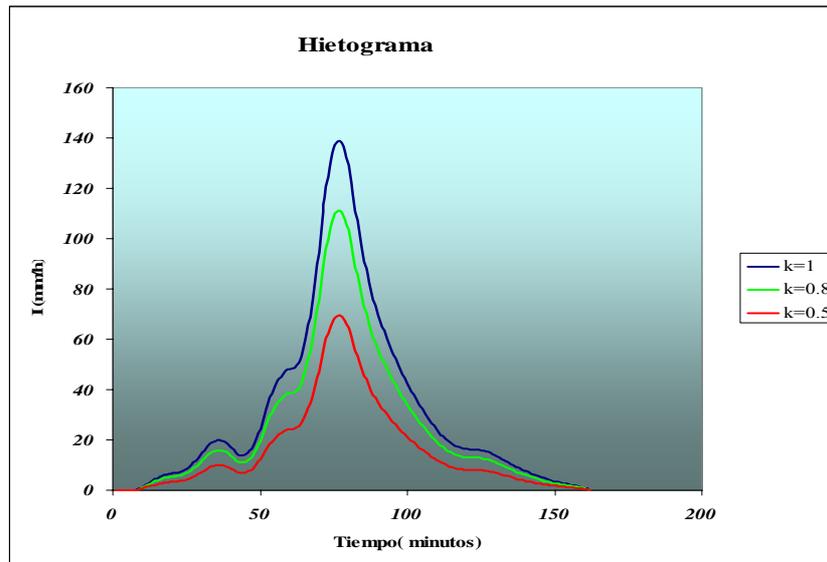


Gráfico 19.- Hietogramas de bloques alternos con las diferentes intensidades pico. Con la forma final del hietograma suavizada con splines.

Dicho modelo de producción utilizado, el propuesto por el “Soil Conservation Service” (SCS), basado en los umbrales de escorrentía, no presenta las carencias que puede generar el método racional, siendo su parámetro el número de curva, expresado en siguiente ecuación:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Ecuación 22.- Abstracciones para el modelo SCS.

Las superficies diferenciadas están caracterizadas por su diversidad en cuanto a la naturaleza de éstas, a las cuales se le han asignado los siguientes coeficientes de rugosidad que se detallan en la tabla.

SUPERFICIE	n (Manning)
<i>Piscinas</i>	-
<i>Zona verde</i>	0,200
<i>Pavimentos internos</i>	0,025
<i>Azotea</i>	0,015
<i>Pistas deportivas</i>	0,010
<i>Tejados</i>	0,010
<i>Asfalto</i>	0,010

Tabla 12.- Rugosidades de las superficies presentes en la modelación de parcela.

6.3 COMPARATIVA ENTRE AMBAS METODOLOGÍAS

En los siguientes apartados se detalla uno de los hidrogramas de salida aguas abajo del colector 1, presentándose los resultados generados por el modelo de producción utilizado, basado en los umbrales de escorrentía, de los cuales se han escogido los máximos que se detallan en la Tabla 11.

Una de las diferencias entre ambos modelos, es la distribución de los caudales en superficie, es decir, debido a que cada colector tiene asignadas áreas de influencia diferentes, inevitablemente generará a la salida de cada colector grandes diferencias entre los caudales aportados por ambas metodologías, y por tanto, resultando una gran disparidad de diámetros en el diseño de los colectores si se emplea el modelo de cuenca global o el modelo detallado de parcela.

La determinación de las áreas de influencia de cada colector por un método u otro, proceden de conceptos diferentes; es decir, en el modelo de cuenca global las áreas son determinadas en función del radio de afección que representa cada pozo sobre el total de la cuenca, calculado por el método de los polígonos de Thiessen, como se observa en el Gráfico 11. Sin embargo, el modelo detallado de parcela tiene un concepto diferente, se basa en una distribución ramificada de la estructura de la red, como en el Gráfico 2, donde las áreas de influencia son asignadas en función del tipo de elemento de hidrología urbana que representa, por ejemplo: los tejados, las calles y el jardín, como se aprecia en el Gráfico 7. Esto dejará diferencias significativas, que son ratificadas en las conclusiones.

Pero la diferencia más significativa entre ambos modelos es la caracterización de la geomorfología de la cuenca y de las superficies existentes en ella para este tipo de entornos urbanos. El modelo de cuenca global sólo tienen en cuenta dos tipos de superficie: las calles y los terrenos mixtos, estos últimos están representados en su totalidad por cada parcela, mientras que el modelo detallado de parcela diferencia hasta siete tipos de superficies existentes en la zona de estudio.

6.3.1 PARCELAS CON CONEXIÓN DE LAS BAJANTES A LOS POZOS

Una de las posibles configuraciones analizada es con las bajantes de todas las casas conectadas a la red general de alcantarillado, las cuales conducirán la escorrentía que se produce en los tejados hasta llegar a su conexión con los pozos de registro.

Siempre y cuando estos conductos no entren en carga, este caudal será laminado en la red y no directamente en la superficie de la parcela.

En cada sección UHE, la escorrentía se propaga en ella a través de dos sistemas: las bajantes que conducen la escorrentía de los tejados y los embalses dinámicos en superficie que canalizan toda la lluvia efectiva que se produce en el jardín de cada parcela hasta la red principal. El esquema conceptual queda de la siguiente manera, tal y como se aprecia en la Ilustración 15.

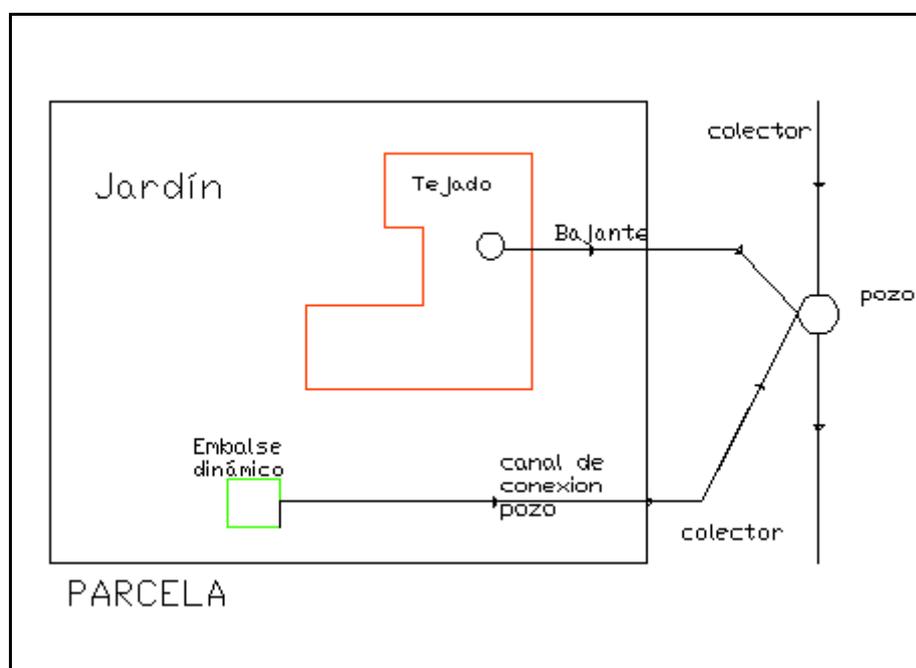


Ilustración 15.- Detalle explicativo de los diferentes elementos de hidrología urbana (UHE) que forman el modelo detallado de parcela con las bajantes conectadas a la red.

Las bajantes de cada parcela se modelan del siguiente modo. Un elemento de tipo pozo de registro recoge la escorrentía de los tejados que se conduce a la red mediante los conductos de PEAD (polietileno de alta densidad) de sección circular y de 250 mm de diámetro interior, que se conectan al primer pozo de registro adyacente a cada parcela. Con esto queda controlada la producción de escorrentía de los tejados, propagándose en la red y no en el jardín de la parcela.

Como se ha comentado en el capítulo 4.4, todas las longitudes de las bajantes se han limitado a 5 metros para minimizar el efecto de las pérdidas de carga en el resultado final.

El resto de superficies que ocupan el jardín de cada parcela se representan como un embalse dinámico, el cual reproduce los procesos físicos que ocurren en el jardín.

Dicho embalse tiene forma rectangular, con calado equiparable a la profundidad del terreno, 500 milímetros y de perímetro y áreas correspondiente al tamaño del jardín. Finalmente cada embalse queda definido por el espesor del terreno, las superficies presentes en el jardín, caracterizadas por su área y su perímetro. Así queda representado este tipo de elemento de hidrología urbana, el cual no produce escorrentía hasta que no se rebasen los umbrales de escorrentía de cada una de las superficies presentes en el jardín. Si esto llegara a suceder, indicaría que la capacidad de retención del jardín se ha superado y la escorrentía será transportada desde el embalse dinámico hasta la red mediante un canal rectangular (2500 x 500) milímetros, de dimensiones lo suficientemente adecuadas para no influir en el resultado final, además de limitar su longitud a 5 metros para disminuir el impacto de las pérdidas sobre el resultado. Este canal representa la conexión hidráulica de la parcela con la calle a través del acceso a la misma.

La finalidad de estos embalses, es reproducir los procesos físicos que ocurren en el terreno, simulando el comportamiento natural del suelo frente a una tormenta.

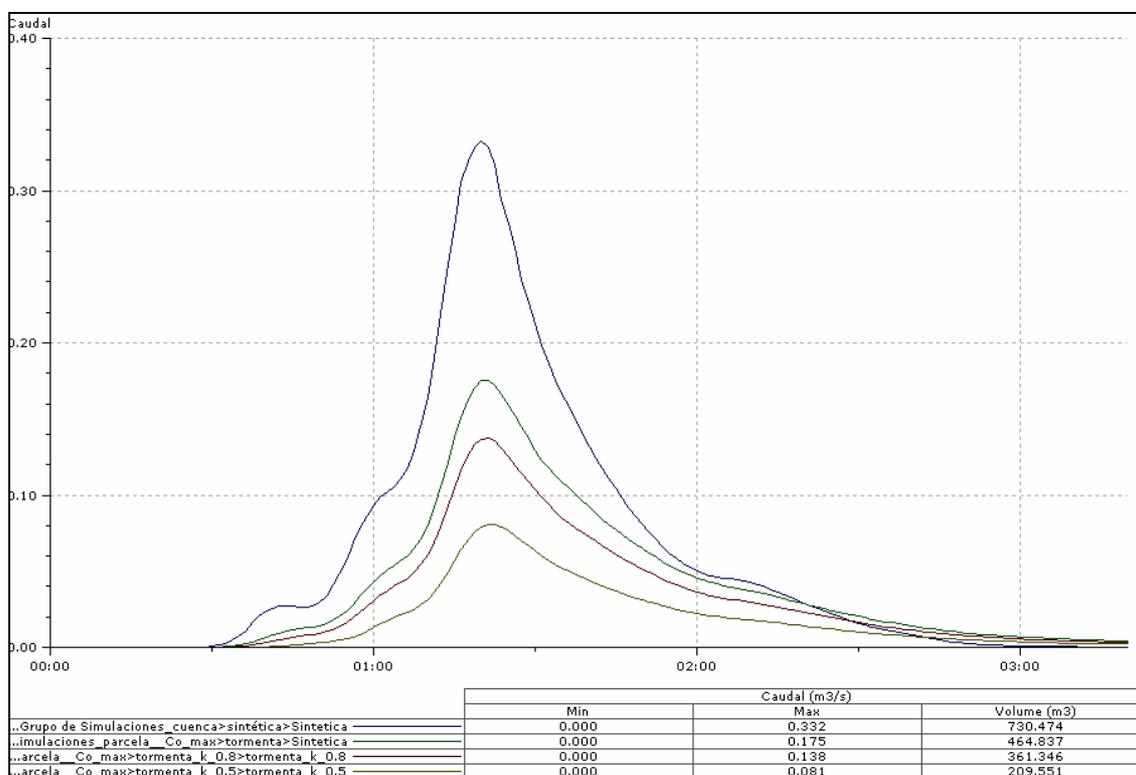


Gráfico 20.- Hidrogramas a la salida del colector 1 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$)

6.3.1.1 DISCUSIÓN

Se aprecia un gran distanciamiento entre las puntas de los hidrogramas generados por los modelos comparados, simulados con la tormenta de magnitud $k = 1$ (de periodo de retorno 25 años), esto supone una diferencia de más del 60 % en el caudal pico propagado por el colector 1 si se diseña con el modelo de cuenca global o por el contrario con el modelo detallado de parcela con bajantes.

A medida que vamos sumando los caudales de cada uno de los colectores, (convolución de los hidrogramas propagados a lo largo de la red de alcantarillado), la diferencia entre los caudales pico será más significativa entre el modelo detallado de parcela con bajantes y el modelo de cuenca global.

Esto genera hidrogramas con menores caudales punta a la salida de cada colector en el modelo detallado de parcela con bajantes.

Los hidrogramas generados están combinados, es decir, los generados por las bajantes conectadas a la red general, caracterizados por un pico más definido y los hidrogramas generados por los jardines de cada parcela, con una forma más plana en la punta del hidrograma, esto deja el resultado que se aprecia en el Gráfico 20.

Los hidrogramas resultantes tienen una punta muy suavizada, respecto al hidrograma generado por el modelo de cuenca global, con una curva de decaimiento más lenta, producida por los embalses dinámicos que representan al jardín de cada parcela, y que provocan que el caudal punta sea menor en la red, pero sin embargo que la curva decaimiento del hidrograma a la salida sea menor, retrasando la finalización de la propagación de la escorrentía en la red .

Teniendo en cuenta que la punta del hidrograma para ambos modelos ocurre en el mismo instante, la mayor diferencia entre ambos es el caudal pico. El modelo de cuenca global genera caudales pico del orden de tres veces mayor al generado por el modelo detallado de parcela con bajantes..

6.3.2 PARCELAS SIN CONEXIÓN DE LAS BAJANTES A LOS POZOS

La falta de información y el trabajo que requiere recopilar la información de cada una de las parcelas, verificando qué viviendas tienen las bajantes de los tejados conectadas a la red y las que no, ha obligado a tener que asumir dos configuraciones diferentes para tener en cuenta ambos aspectos en el modelo detallado de parcela.

Este modelo se caracteriza por la ausencia de conexiones de los tejados a la red principal mediante las bajantes, propagándose la escorrentía desde los tejados al jardín hasta llegar a la red principal. Por tanto, en este modelo cada embalse será el principal elemento de producción de escorrentía, dentro de la parcela, el cual queda definido por las superficies que lo formen con sus respectivas áreas y perímetros.

Este elemento conducirá la escorrentía desde el jardín hasta la red principal, mediante un canal rectangular de dimensiones y características iguales al modelo anteriormente descrito (modelo detallado de parcela con bajantes).

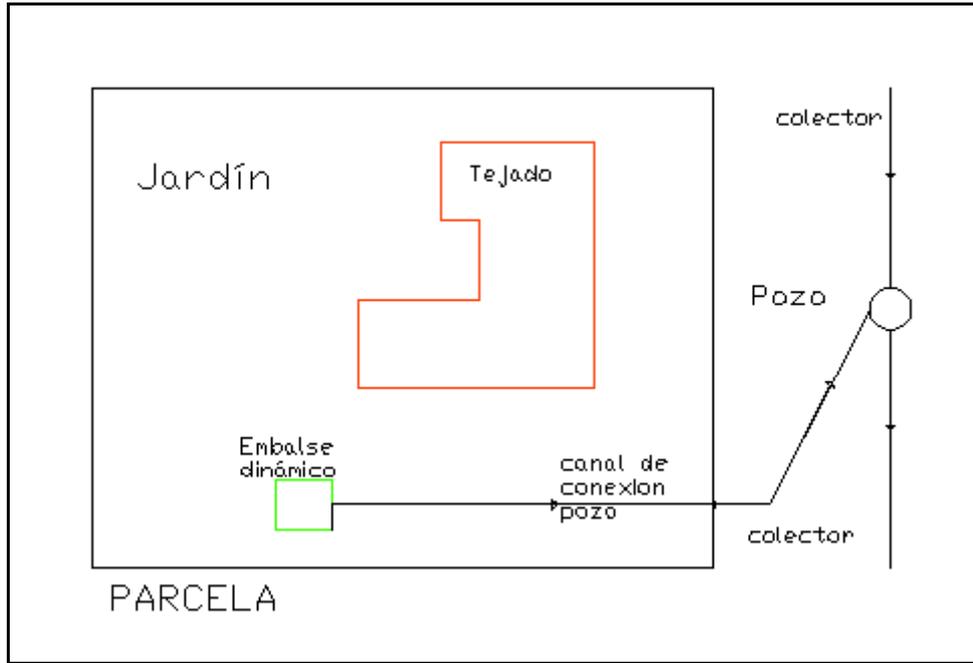


Ilustración 16.- Detalle del modelo conceptual, caracterizado por la ausencia de conexiones a la red de los tejados mediante las bajantes.

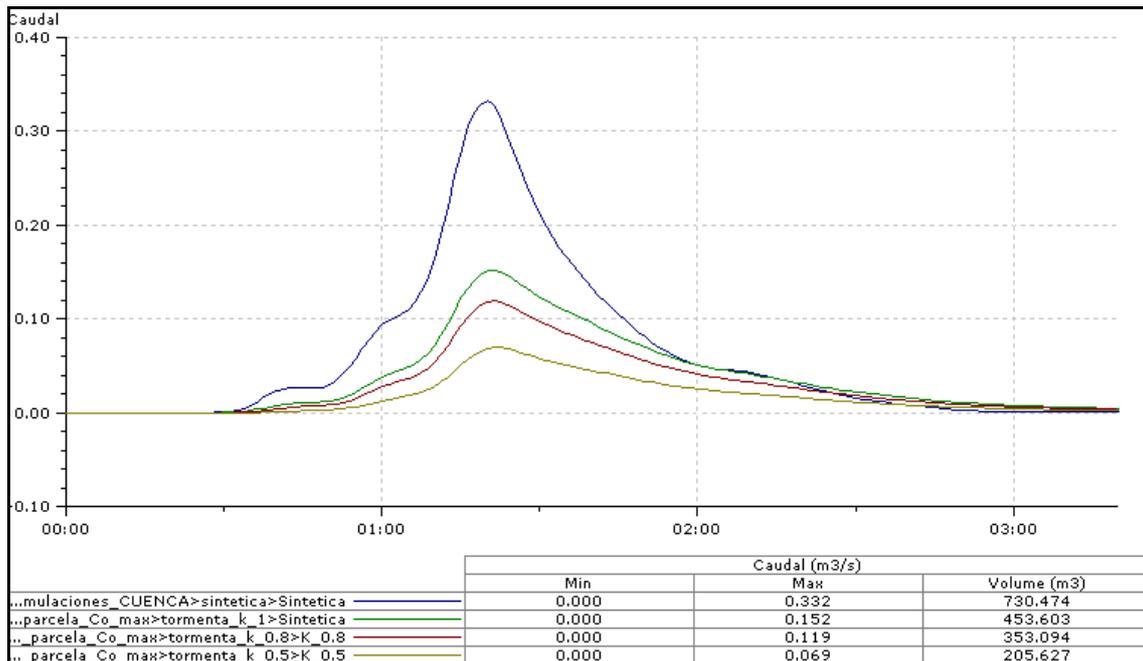


Gráfico 21.- Hidrogramas a la salida del colector 1 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

6.3.2.1 DISCUSIÓN

Este caso se caracteriza por la ausencia de los elementos que conducen la escorrentía desde los tejados mediante las bajantes hasta su conexión con la red principal, lo cual deja cambios importantes en la forma final del hidrograma.

Por tanto el mecanismo de producción de escorrentía en el modelo detallado de parcela sin bajantes son los embalses dinámicos, los cuales representan los procesos físicos que ocurren en la parcela, y que dejan el resultado que se aprecia en el Gráfico 21.

La diferencia entre la punta del hidrograma generado por el modelo de cuenca global y el hidrograma generado por el modelo detallado de parcela sin bajantes (simulado con la tormenta de magnitud $k = 1$) son significativas. Éste último genera menor punta en el hidrograma de salida que el modelo detallado de parcela con bajantes. Ésta diferencia es debida a que la escorrentía producida en los tejados es propagada por las conducciones que forman las bajantes, lo que implica que no tienen que pasar por el embalse dinámico (que representa los procesos físicos que ocurren en el jardín) antes de entrar en la red, generando un caudal punta mayor en el colector 1.

De ahí la importancia de la representación de las bajantes que conectan la escorrentía producida en los tejados con la red principal, en vez de asumir que los tejados de las casas carecen de conexión de las bajantes y por tanto representar sólo los embalses dinámicos como único elemento de producción de escorrentía dentro de la parcela.

La hidrogramas generados a la salida de cada colector por el modelo detallado de parcela sin bajantes, con las diferentes tormentas sintéticas utilizadas ($k = 1, 0,8, 0,5$), dejan un hidrograma característico de este tipo de elemento de hidrología urbana (jardín), caracterizado por una mayor curva de decaimiento, retrasando ligeramente la punta de la respuesta y su llegada a la red de colectores, y por tanto un aumento del tiempo de respuesta de la cuenca frente a la tormenta de diseño.

Este modelo sin bajantes se ha valorado porque es muy factible en este tipo de desarrollos urbanos que algunas de las parcelas no tengan conexión de sus tejados a la red de bajantes generales. Por cuestión de tiempo y facilidad en el manejo de datos se ha tenido en cuenta este caso, planteándose la situación de carecer todas las casas de la urbanización analizada de conexión de las bajantes de los tejados con la red principal.

Como puede verse, esta situación es favorable, viendo la laminación de las tormentas en el hidrograma final, pero podría crearse un problema en superficie. Si se presentara un evento de precipitación que superase la magnitud de la tormenta de diseño, cabe la posibilidad que se generen zonas inundadas dentro del jardín o agua acumulada en superficie, lo cual podría generar molestia a los vecinos de la zona.

6.4 MODELO DETALLADO DE PARCELA CON IMBORNALES

Los dos modelos restantes tienen la misma funcionalidad respecto de las bajantes antes descritas en la modelación de la parcela y los procesos físicos que ocurren en ella.

En este apartado se analizará el efecto que tienen los imbornales (elementos especiales de captación, que se encargan de recoger la escorrentía que se propaga en la calle y en su alrededor) sobre el caudal punta que llega a propagarse en la red.

Cada imbornal se representa como un pozo de registro, el cual conduce el agua captada en la superficie adyacente a cada parcela (asfalto) mediante un conducto de sección circular de 250 mm de diámetro interior hasta su conexión con la red principal.

Dichos elementos se han colocado cada 25 metros en el extremo de la calzada (se considera que ésta tiene una única pendiente transversal), alineados respecto de cada uno de los pozos de registro que delimitan cada calle.

Lo que se pretende con su inclusión en el modelo detallado de parcela es ver el efecto de este elemento de captación sobre el caudal final punta propagado en la red.

La situación se ha valorado tanto para las parcelas que tienen las bajantes de los tejados conectados a la red principal, como las parcelas que carecen de ellas.

6.4.1 PARCELAS CON CONEXIÓN DE LAS BAJANTES A LOS POZOS

Este es el modelo conceptual que se propone para la correcta modelación de los elementos de hidrología urbana que predominan en este tipo de entornos urbanos, un modelo de estructura ramificada de la escorrentía, caracterizado por las bajantes de los tejados conectadas a la red principal, los imbornales que captan la escorrentía que se propaga en los viales y los embalses dinámicos que representan el jardín. Todos estos elementos tienen la finalidad de reproducir los procesos físicos que ocurren en la cuenca urbana de estos ámbitos residenciales.

Para la modelación de los elementos de hidrología urbana se procede de la misma manera descrita que para el modelo detallado de parcela con y sin bajantes (tejados, jardines y las calles). Estas últimas superficies son las áreas de influencia asignadas a cada imbornal y su finalidad es captar la escorrentía propagada en las calles adyacentes a cada parcela.

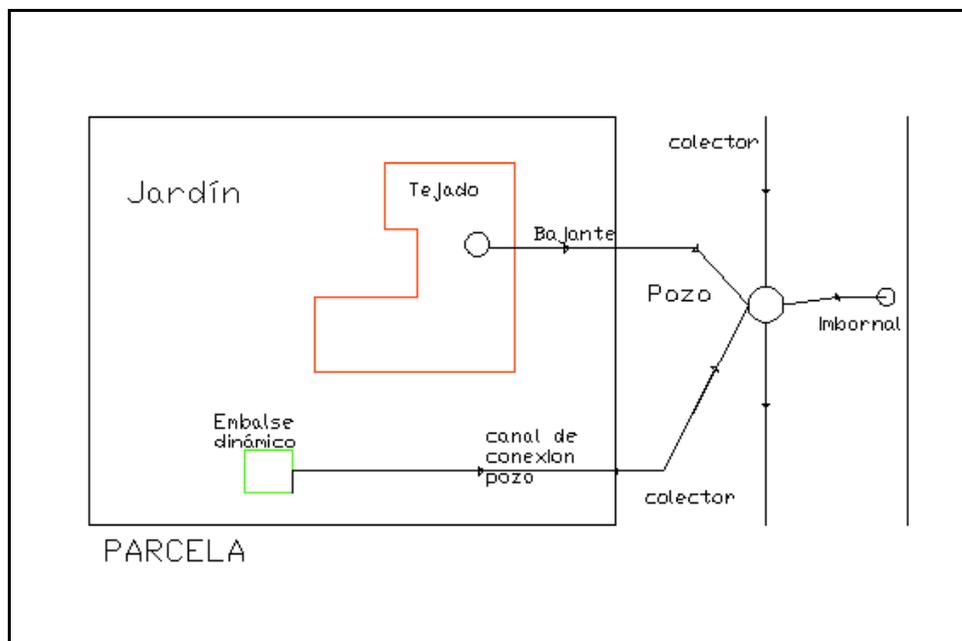


Ilustración 17.- Detalle del modelo conceptual de la parcela con las bajantes conectadas a la red principal, los embalses dinámicos representativos del jardín y la inclusión de los imbornales en las calles.

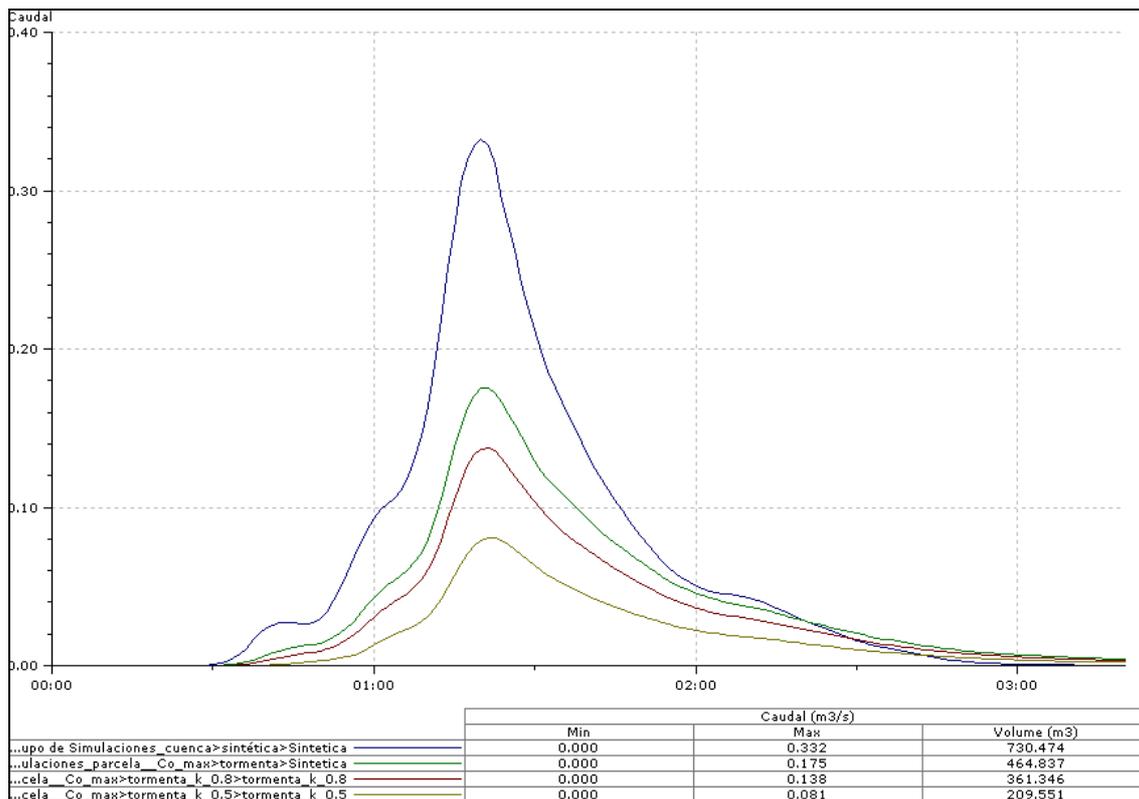


Gráfico 22.- Hidrogramas a la salida del colector 1 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

6.4.1.1 DISCUSIÓN

La comparativa refleja el efecto que producen las bajantes, los embalses dinámicos y los imbornales en el resultado final. El modelo detallado de parcela genera una menor punta del hidrograma de salida que el modelo de cuenca global, ambos simulados con una tormenta de magnitud $k = 1$. Esto es debido a las diferencias en cuanto a la tipología de superficies representadas por un modelo u otro, las cuales tendrán un efecto importante en la producción final de la escorrentía aportada por ambos modelos.

El hidrograma resultante de salida del colector 1 para el modelo detallado de parcela con bajantes e imbornales tiene una curva de decaimiento que se prolonga más en el tiempo. Esto provoca que los tiempos de respuesta de la cuenca sean mayores.

Finalmente se puede apreciar en el Gráfico 23, el efecto de la laminación que producen los imbornales en el caudal propagado en la red.

6.4.2 PARCELAS SIN CONEXIÓN DE LAS BAJANTES A LOS POZOS

En este caso sólo se tienen en cuenta los imbornales que recogen el agua de las calles y los embalses dinámicos en superficie que producen el resto de escorrentía que llega a la red general. Además, se analiza como influye la ausencia de conexiones de las bajantes de los tejados con la red principal y el efecto que tienen los imbornales sobre el caudal punta propagado en la red.

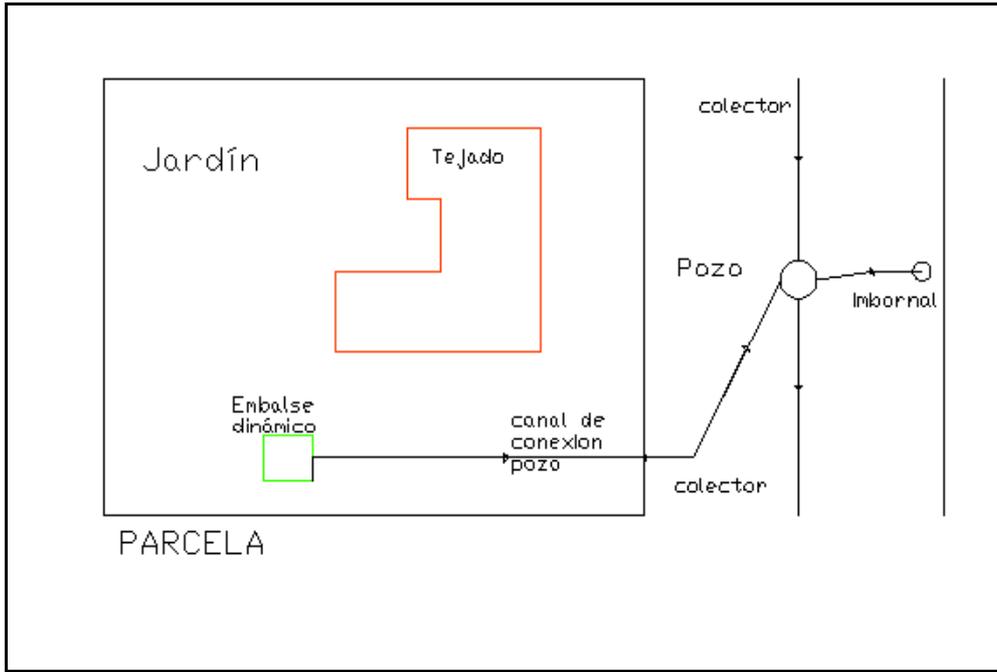


Ilustración 18.- Detalle del modelo conceptual caracterizado por la ausencia de bajantes y la inclusión de los imbornales.

Las características de diseño de cada uno de los elementos de hidrología urbana son comunes a los modelos detallados de parcela simulados anteriormente: el jardín como embalse dinámico, el cual representa los procesos físicos que ocurren dentro de la parcela, incluyendo en este caso la escorrentía de los tejados que se propagará en el jardín antes de entrar en la red, ya que este modelo carece de bajantes conectadas a la red general. El resto de escorrentía producida por el asfalto es captada y conducida a la red mediante los imbornales.

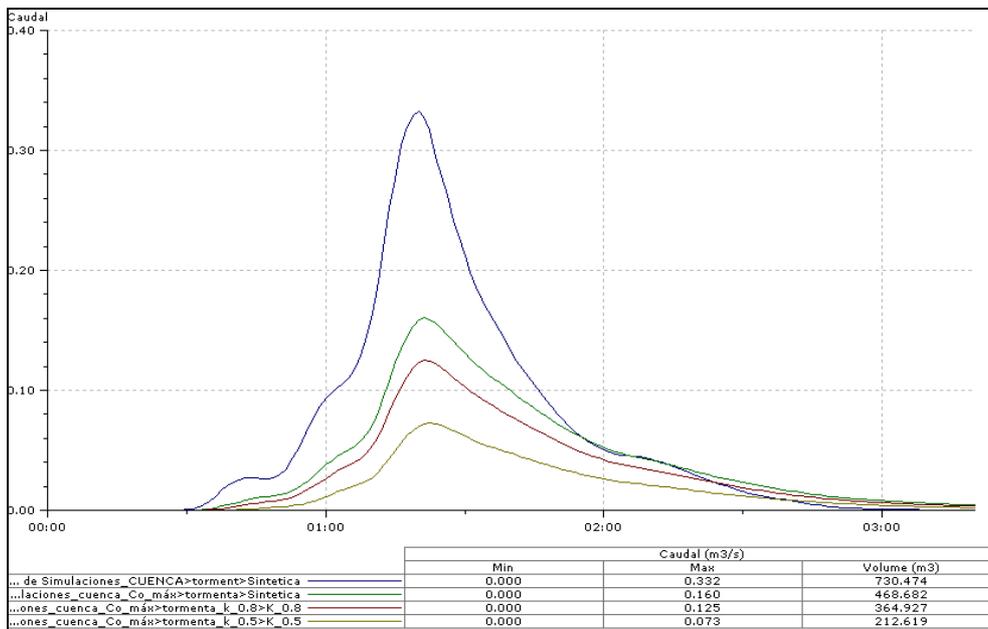


Gráfico 23.- Hidrogramas a la salida del colector 1 para las metodologías comparativas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

6.4.2.1 DISCUSIÓN

Este modelo detallado de parcela es caracterizado por la ausencia de bajantes, en el cual toda la producción de escorrentía es propagada a través del jardín, el cual es representado mediante un embalse dinámico, lo que produce una disminución drástica de la punta del hidrograma de salida en comparación con el modelo detallado de parcela con bajantes. Esto repercute de manera final en el tiempo de respuesta de la cuenca, el cual aumenta y da como resultado una curva decaimiento del hidrograma de salida más lenta, provocando que la escorrentía retrase su entrada en la red.

Finalmente se observa en el

Gráfico 23 la capacidad de laminación que tienen los imbornales sobre el caudal propagado en la red para esta configuración del modelo detallado de parcela, caracterizado por la ausencia de bajantes.

7 RESULTADOS EN EL PUNTO DE SALIDA

Se han tenido en cuenta todas las situaciones posibles que se puedan dar en la realidad en este tipo de entornos urbanos con viviendas unifamiliares. Los cuatro modelos detallados de parcela integran las diferentes configuraciones posibles que se pueden desarrollar en estos ámbitos residenciales: las bajantes de los tejados conectadas o no a la red principal y la incorporación de los imbornales o no en ambas configuraciones. En todos los casos se tienen en cuenta los elementos de hidrología urbana representativos de tejados, jardines y calles.

Unos elementos que el modelo de cuenca global (diseño según la normativa del ayuntamiento de Valencia) no contempla y que se pretenden representar en el modelo detallado de parcela es la caracterización de los procesos físicos que ocurren en la misma. Por tanto, se definen de este modo mejor los mecanismos de producción y transferencia de la escorrentía desde la parcela hasta la red general.

En el caso de la modelación hidrológica distribuida de ámbitos residenciales formados por viviendas unifamiliares, se propone el modelo conceptual detallado de parcela (con bajantes y con imbornal) de estructura ramificada. Este modelo es adecuado para este tipo de viviendas unifamiliares, donde cada parcela debe contar con las bajantes de los tejados conectados a la red principal, la representación del jardín como un embalse dinámico y la captación de la escorrentía que se propaga en la calle mediante los imbornales.

Finalmente, en el Gráfico 24 se aprecia el resultado final de la comparativa propuesta inicialmente entre las dos metodologías analizadas, detallándose el resultado del hidrograma final a la salida de la cuenca en unidades de caudal por hectárea ($m^3/s/ha$), debido a las diferencias entre las áreas de influencia asignadas a cada colector para el modelo de cuenca global y para el modelo detallado de parcela. Se detalla el resultado de la comparativa entre ambas metodologías por hectárea de urbanización analizada.

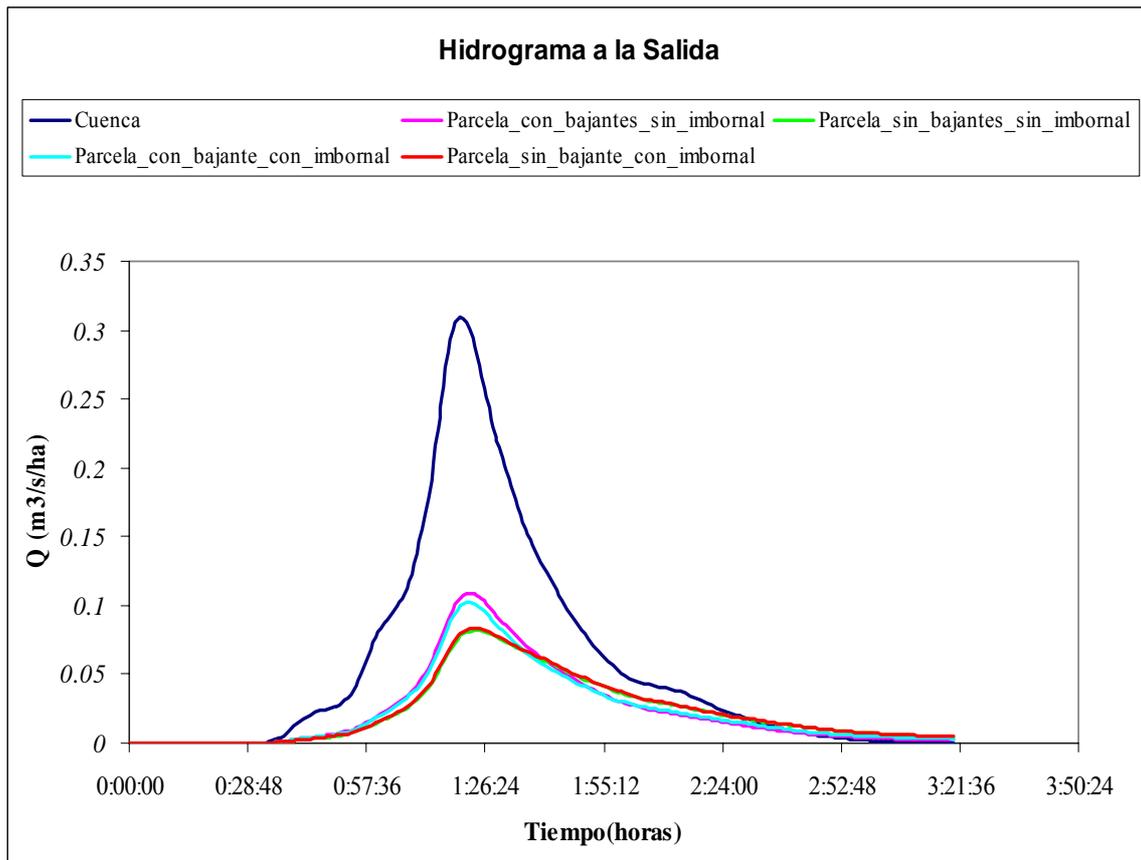


Gráfico 24.- Comparativa final en el punto de desagüe, para los diferentes modelos conceptuales propuestos y el modelo de cuenca global propuesto por la normativa Valenciana para el diseño de redes de saneamiento, para la tormenta de diseño de periodo de retorno de 25 años.

Como se aprecia en el hidrograma final comparativo, el modelo detallado de parcela con bajantes y sin imbornales genera una punta mayor que el resto de las configuraciones. Esto es debido a la ausencia de los imbornales y la capacidad que tienen éstos para laminar la punta del caudal.

En este detalle se aprecia el efecto que tiene los embalses dinámicos sobre el hidrograma final de salida de la cuenca, los cuales retardan el tiempo de respuesta, repercutiendo finalmente en la forma de la curva de decaimiento de los hidrogramas generados a la salida por cada modelo representado, lo cual retrasa la entrada en la red de la escorrentía propagada en la parcela.

La comparativa entre los modelos detallados con bajantes (azul y morado) respecto de los sin bajantes (verde y rojo) que se aprecian en el Gráfico 24, generan diferencias significativas entre las puntas de los hidrogramas. Los modelos con bajantes generan una mayor punta respecto a los modelos que carecen de ellas, porque éstos vehiculan directamente la escorrentía generada en los tejados a la red, mientras que los casos que carecen de bajantes, dicha escorrentía se propaga por el jardín antes de su entrada en la red.

Si se observan los hidrogramas generados por los modelos detallados con bajantes sin imbornal (morado) y con imbornales (azul). Se aprecia que el modelo sin imbornal genera una punta levemente mayor que el otro, porque la escorrentía generada en la calzada se integra en la red de colectores directamente, mientras que en el otro caso, atraviesa un elemento hidráulico más, el imbornal y su acometida.

Si se comparan los modelos detallados sin bajantes con imbornales (rojo) y sin imbornales (verde) se puede observar que las diferencias son inapreciables, y están enmascaradas por el efecto tan importante que juega la laminación en el propio jardín.

Respecto a las velocidades de respuesta de los hidrogramas de salida, se observa como la respuesta en los casos sin bajantes, es más lenta que en los casos con bajantes, puesto que el caso sin bajantes, toda la esorrentía generada en la parcela discurre por el jardín.

8 CONCLUSIONES Y APORTES DE LA TESINA

8.1 CONCLUSIONES DEL TRABAJO

Las diferencias significativas en el resultado final entre el modelo de cuenca global y el modelo detallado de parcela se deben a la naturaleza heterogénea de las características del medio físico presente en los tipos de viviendas unifamiliares. Esto, además, está unido a la fuerte variabilidad asociada a los procesos hidrológicos, pues, la no – linealidad presente en dichos procesos constituyendo un factor importante en el desarrollo final del resultado.

El aumento creciente de las zonas residenciales formadas por viviendas unifamiliares típicas de ámbitos residenciales supone un aliciente para realizar un estudio más detallado de la modelación hidrológico-hidráulica en el diseño de redes y obras de saneamiento. Esto implica una mayor profundización de los procesos y características definitorias de estos entornos urbanos.

Con el análisis de los resultados obtenidos se pueden extraer una serie de puntos que determinan la justificación de los resultados obtenidos, los cuales se detallan a continuación.

Por un lado, tal y como se comenta en la sección 5.2, en el diseño optimizado de la red se utilizó el modelo de producción del SCS (no el modelo racional calibrado, como propone la normativa), basado en los umbrales de esorrentía.

Por otro lado como se indica en las bases teóricas, para evitar posibles errores en la comparativa final, la metodología empleada por el software en la simulación de la red de colectores para cada uno de los modelos analizados fue la misma, es decir, la propagación en superficie y la hidráulica en los colectores explicadas en el capítulo 4.5, que tienen la misma base teórica.

La normativa trata a la cuenca como concepto global, en el que todas las superficies se comportan igual ante un fenómeno aleatorio como es una tormenta, ya que analiza las superficies por igual, independientemente de su naturaleza, asignando un valor medio de coeficiente de esorrentía para todas las superficies existentes que forman la cuenca urbana en los ámbitos residenciales de viviendas unifamiliares. En cambio, el modelo detallado de parcela no realiza promedios de los coeficientes de esorrentía para la representación de la cuenca, sino que difiere cada una de las superficies presentes y asigna a cada una de ellas un coeficiente de esorrentía representativo, el cual depende de las características propias de las superficies analizadas.

Esto lleva a la primera conclusión. La diferencia entre los umbrales de esorrentía (modelo de producción del SCS) empleados para un modelo u otro son diferentes (el

modelo de cuenca global utiliza dos valores, sin embargo el modelo detallado de parcela emplea siete). Esto provoca que las abstracciones sean un factor determinante en el resultado final, generando la disparidad de caudales que se aprecian en el Gráfico 25, de ahí la diferencia excesiva de caudal transportado de un modelo a otro. Por tanto, las zonas verdes diferenciadas en el modelo detallado de parcela desempeñan un papel fundamental, ya que éstas tienen un umbral de escorrentía elevado, y por tanto las abstracciones juegan un papel fundamental en la producción final de escorrentía superficial.

La distribución de los volúmenes que se propagan en la red difiere mucho entre el modelo de cuenca global y el modelo detallado de parcela. Esto es debido a la diferencia entre las áreas de influencia asignada a cada uno de los grandes colectores para el modelo de cuenca y para el modelo de parcela, lo cual esto generará una disparidad de diámetros importante entre los modelos comparados. En el modelo detallado de parcela, la distribución de los caudales en la red es más uniforme, consecuencia de una mayor homogeneidad de diámetros en el modelo distribuido de estructura ramificada (Gráfico 2). Sin embargo las áreas asignadas al modelo de cuenca global se basan en métodos puramente geométricos, lo que deja a colectores con cargas innecesarias de posible caudales producidos por las áreas asignadas. Finalmente esto deja para un mismo colector áreas de influencia diferentes, si se emplea en el diseño de la red de pluviales un modelo u otro.

La comparación en el punto final de salida de la red hace que las diferencias antes mencionadas sean más pronunciadas. Por la teoría de la convolución, el hidrograma de salida es la suma de cada uno de los hidrogramas generados por cada una de las parcelas que forman la cuenca. Así, se acumulan las diferencias entre los hidrogramas de salida de cada colector dejando una diferencia importante entre el caudal punta que genera el modelo de cuenca global y el que genera el modelo detallado de parcela con sus respectivas configuraciones.

Las parcelas sin bajantes conectadas a la red, en las cuales el principal elemento de producción de escorrentía dentro de la parcela es el jardín (modelado como un embalse dinámico), provocan que la punta del hidrograma de salida sea mucho más suave que con bajantes, pero por el contrario, este efecto genera que la curva de decaimiento del hidrograma generado por los embalses sea de menor pendiente y de mayor duración, retrasando la entrada de la escorrentía en la red de colectores (Gráfico 21).

Es evidente que la punta de caudal del hidrograma es menor, pero no sería correcto que las viviendas y sus alrededores puedan estar en riesgo de inundación. Dada la magnitud de los tejados de las urbanizaciones estudiadas, se puede generar gran cantidad de escorrentía, la cual se propagará en la parcela antes de entrar en la red, lo cual debe añadirse a la posibilidad que en un determinado momento se presente un evento de precipitación que supere la magnitud de la tormenta de diseño.

El análisis de la modelación hidrológica como cuenca global indica que los coeficientes de escorrentía, no se pueden tomar al azar, ni valores medios ni aproximados, deben escogerse en función de la magnitud de la tormenta. Por tanto para tormentas de diseño que generan gran cantidad de volumen de escorrentía, deben adoptarse valores altos, pero en cambio para tormentas de poco volumen, los coeficientes deben ser bajos.

La capacidad de la red viene limitada por su respuesta y la eficiencia de cada uno de los elementos encargados de conducir los caudales a la red. En este caso, se ha observado que para tormentas de gran duración y magnitud, la entrada en carga de las bajantes y de los imbornales limitaría la capacidad de laminación de la red respecto a los posibles caudales que puedan entrar en la red. Esto unido a que las bajantes y conductos de los imbornales arrastren aire limita todavía más la capacidad de estos conductos.

Finalmente, el modelo representativo para las viviendas unifamiliares es el modelo de estructura ramificada URBS-MO, donde el principal elemento de producción de escorrentía es la parcela.

La producción de escorrentía dentro de la parcela se debe a los tejados y al jardín. El primer elemento de hidrología urbana (los tejados), están conectados al red principal mediante los bajantes, estos conductos conducen el caudal propagado en ésta superficie hasta la red de colectores. El segundo elemento de hidrología urbana, es el jardín, el cual recogerá la escorrentía de los tejados que carezcan de bajantes conectadas a la red y la escorrentía generada por las propias superficies existentes en este UHE.

Finalmente, fuera de la parcela, el tercer UHE que afecta a la modelación hidrológica, son las calles adyacentes a cada parcela. Dicho elemento de hidrología urbana incluye los imbornales cuya finalidad es captar la escorrentía propagada en la carretera y conducirla hasta la red mediante las acometidas de éstos.

La introducción de los imbornales en el modelo detallado de parcela con bajantes deja como resultado una menor punta en el hidrograma final de salida. Esto es debido a la capacidad de laminar cierto caudal por parte de los conductos que conectan los imbornales con los pozos de registro.

En el hidrograma de salida generado por el modelo detallado de parcela sin bajantes se observa que la subida del caudal punta no es significativa al introducir los imbornales, luego los imbornales no van a repercutir decisivamente en el diseño final de los diámetros interiores de las conducciones encargadas de la propagación de la tormenta en la red. Sin embargo con las bajantes de los tejados conectadas a la red general, si que se aporta una caudal importante a tener en cuenta para el diseño optimizado de los diámetros finales de cada uno de los colectores que forman la red, como se aprecia en el Gráfico 24.

8.2 APORTES DE LA INVESTIGACIÓN

Los principales aportes a la investigación son:

- En la investigación se comprobó que la distribución de los caudales para el diseño de cada colector es mejor con el modelo conceptual, URBS – MO, generando diámetros de colectores más homogéneos.
- La diferencia entre la naturaleza de las superficies existentes en los ámbitos residenciales formados por viviendas unifamiliares queda demostrada, por lo que no se puede tomar un valor medio del coeficiente de escorrentía representativo de las superficies presentes, las cuales no tienen un comportamiento igual ante los fenómenos aleatorios que representan las tormentas.
- En el diseño final de la red han de tenerse en cuenta las bajantes de los tejados que estén conectadas a la red principal, ya que influyen de manera determinante en el caudal punta del hidrograma de salida. Sin embargo, la laminación del caudal punta propagado en la red general por parte de los imbornales no es tan determinante, ya que las diferencias generadas por su inclusión en el modelo de parcela no son tan significativas en el resultado final. Todo esto tiene como objetivo buscar la correcta optimización de los colectores principales.
- Queda demostrada la importancia del jardín en la modelación hidrológica para el diseño de redes de pluviales. La modelación detallada de este UHE es la que realmente reduce la punta de los hidrogramas generados respecto a los obtenidos con el modelo de cuenca global .
- Se ha demostrado que el diseño de la red de pluviales para este tipo de viviendas, según la normativa del Ayuntamiento de Valencia para obras de saneamiento, generará una red sobredimensionada y no representativa de la zona.
- El modelo propuesto, además de ser un modelo representativo de estas zonas, optimiza la red, lo que implica un ahorro económico importante en el diseño de la red de pluviales (diámetros).

9 REFERENCIAS

Andrés Doménech, Ignacio; Marco Segura, Juan B. (2008). *La caracterización multivariada del régimen de precipitaciones. Influencia en el dimensionamiento de depósitos de retención de aguas de tormenta*. Aeas.

Ayuntamiento de Valencia (2004) .*Normativa para las obras de saneamiento de la ciudad de Valencia.2004”*, *Manual de Normalización de los Elementos de Saneamiento de la Ciudad de Valencia*, publicado en el B.O.P. con fecha 27 de Febrero de 1.997.

Belhad N.; Joannis, C.; Raimbault, G (1995). *Modelling of rainfall induced infiltration into separate sewerage*. *Water Science and Technology* 32 (1), 161–168.

Berthier, E.; Andrieu, H.; Creutin, J.D. (2004). *The role of soil in the generation of urban runoff: development and evaluation of a 2D model*. *Journal of Hydrology* 299 (3–4), 252–266.

Berthier, E.; Dupont, S.; Mestayer, P.; Andrieu, H. (2006). *Comparison of two evapotranspiration schemes on a sub-urban site*. *Journal of Hydrology* 328: 635–646.

Berthier, E.; Rodriguez, F.; Andrieu, H. (1999). *The Reze´ urban catchments database*. *Water Resources Research* 35, 1915–1919.

Delleur, J.W. (2003). *The evolution of urban hydrology: past, present, and future*. *Journal of Hydrologic Engineering* 129 (8), 563–573.

Greene, R.G.; Cruise, J.F. (1995). *Urban watershed modelling using GIS*. *Journal of Water Resources Planning and Management* 121(4), 318–325.

Grimmond, C.S.B.; Oke, T.R. (1991). *An evapotranspiration–interception model for urban areas*. *Water Resources Research* 27 (7), 1739–1755.

Marco Segura, Juan B.; Monte Hernández, V. (1992). *Formación de la escorrentía urbana. Procesos físicos y métodos de cálculo*. Libro: *Inundaciones y redes de drenaje urbano*. J.Dolz. Universidad Politécnica de Cataluña.

Olivera F.; Maidment, D. (1999). *Geographic information Systems (GIS)-based spatially distributed model for runoff routing*. *Water Resources Research* 35 (4), 1155–1164.

Rodriguez, F.; Andrieu, H.; Zech, Y. (2000). *Evaluation of a distributed model for urban catchments using a 7 years continuous data series*. *Hydrological Processes* 14 (5), 899–914.

Rodriguez, F.; Andrieu, H.; Creutin, J.D. (2003). *Surface runoff in urban catchments: morphological identification of unit hydrographs from urban databanks*. *Journal of Hydrology* 283 (1–4), 146–168.

Rodriguez, Fabrice ; Herve', Andrieu; Morena, Floriane (2008). A distributed hydrological model for urbanized areas – Model development and application to case studies Journal of Hydrology 351, 268– 287.

Rodriguez, F.; Cudennec, C.; Andrieu, H. (2005). Application of morphological approaches to determine unit hydrographs of urban catchments. Hydrological Processes 19 (5), 1021–1035.

Smith, M.B. (1993). A GIS-based distributed parameter hydrologic model for urban areas. Hydrological Processes 7, 45–61.

Wallingford Software Ltd. Infoworks CS versión 8.5. Manual de usuario (2007).

10 APÉNDICE 1: PERFILES LONGITUDINALES DE LOS COLECTORES

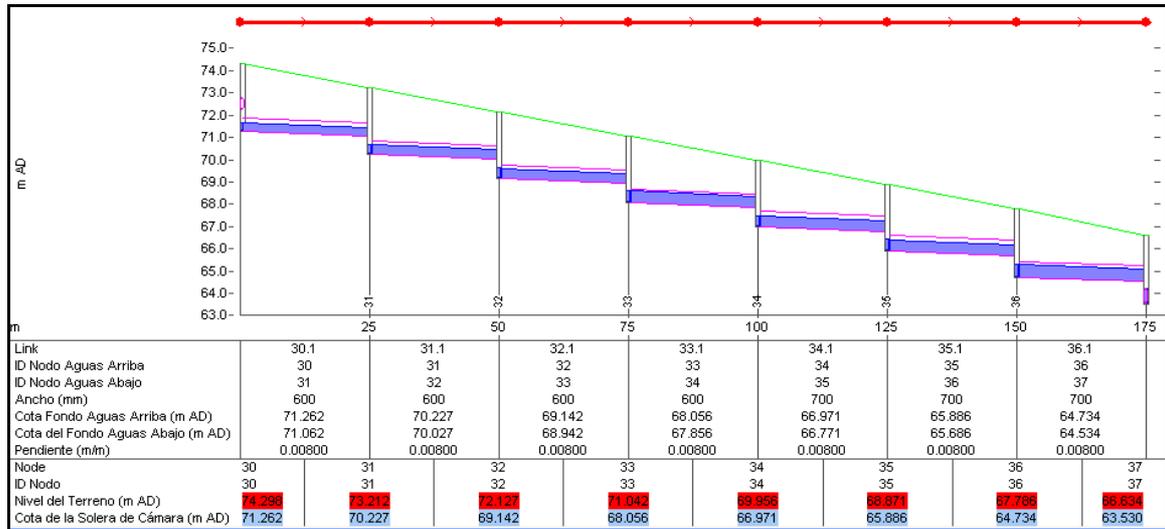


Gráfico 25.- Perfil longitudinal dinámico del Colector 2.

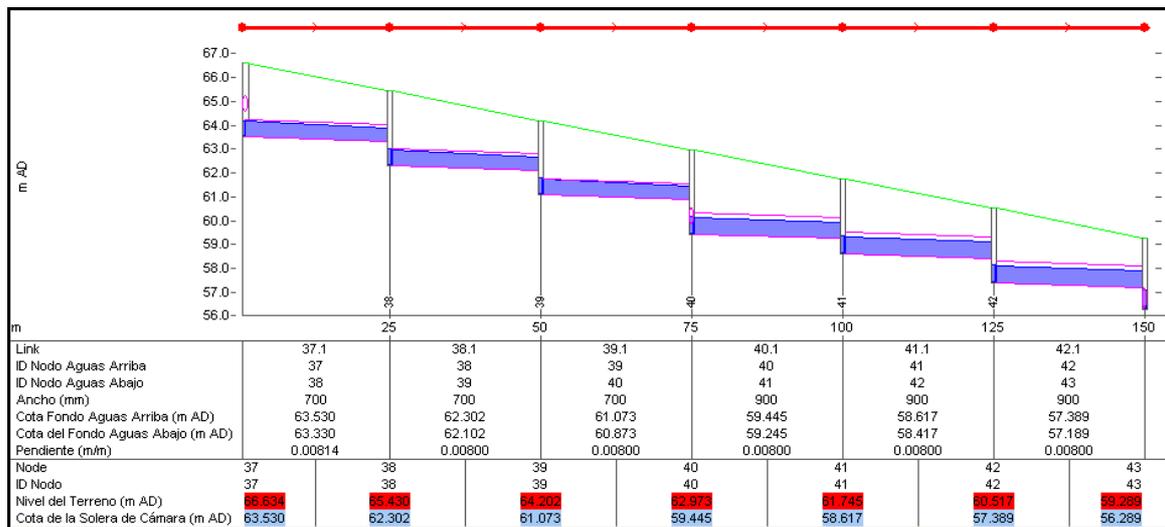


Gráfico 26.- Perfil longitudinal dinámico del Colector 3.

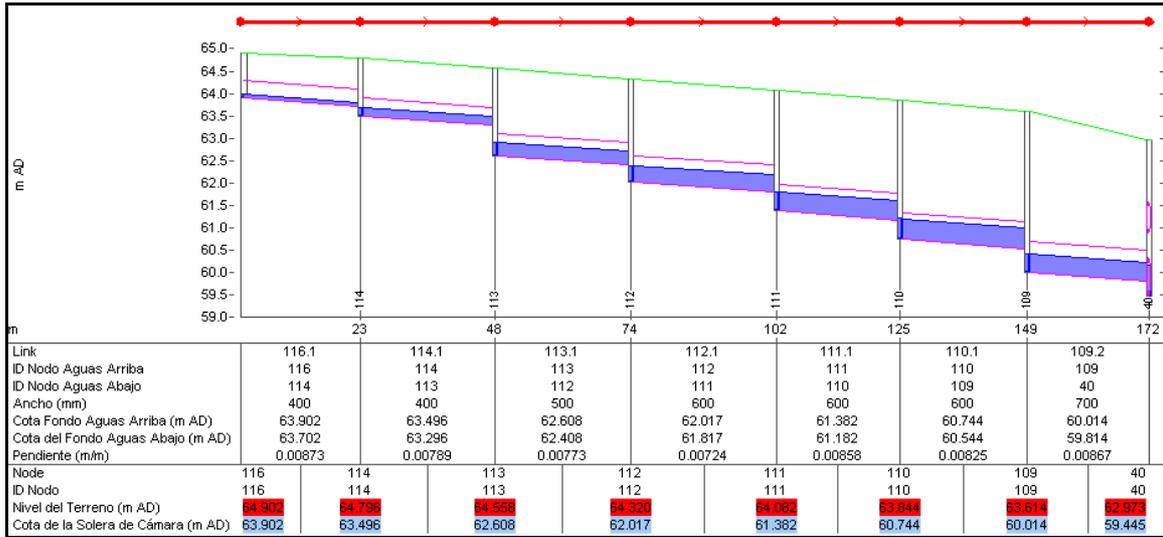


Gráfico 27.- Perfil longitudinal dinámico del Colector 4.

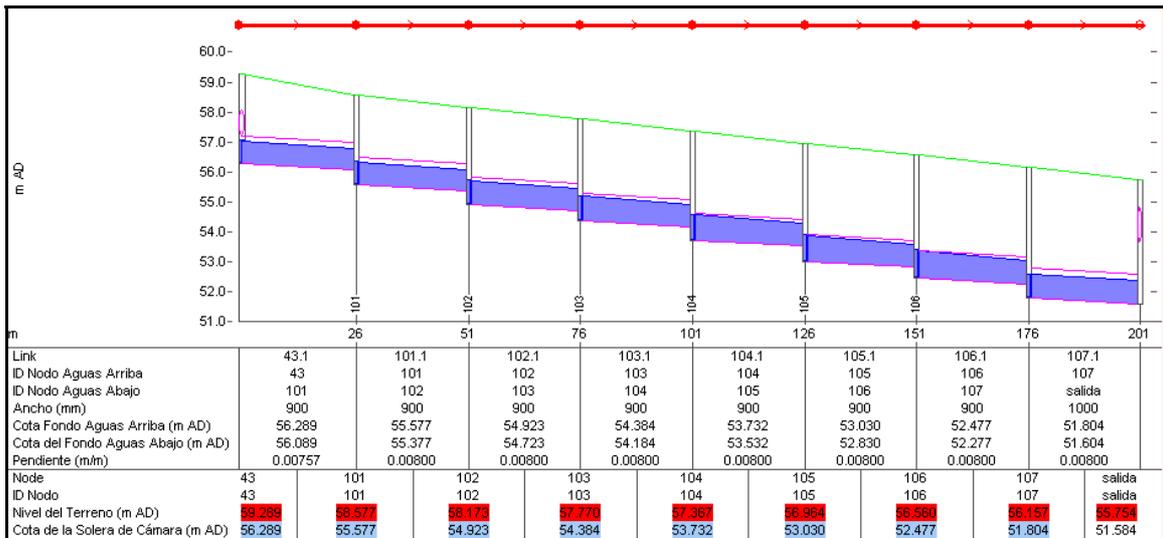


Gráfico 28.- Perfil longitudinal dinámico del Colector 5.

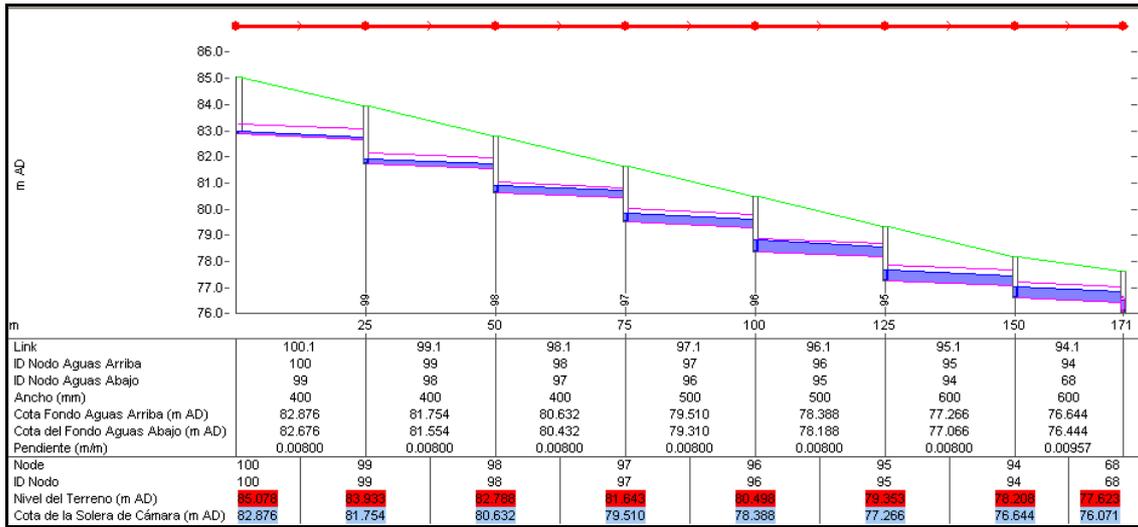


Gráfico 29.- Perfil longitudinal dinámico del Colector 6.

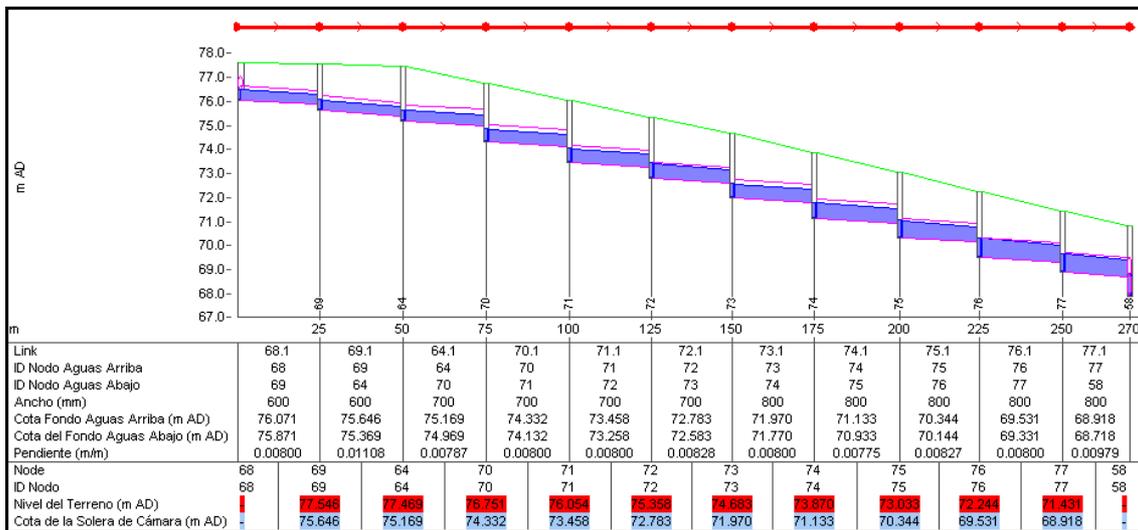


Gráfico 30.- Perfil longitudinal dinámico del Colector 7.

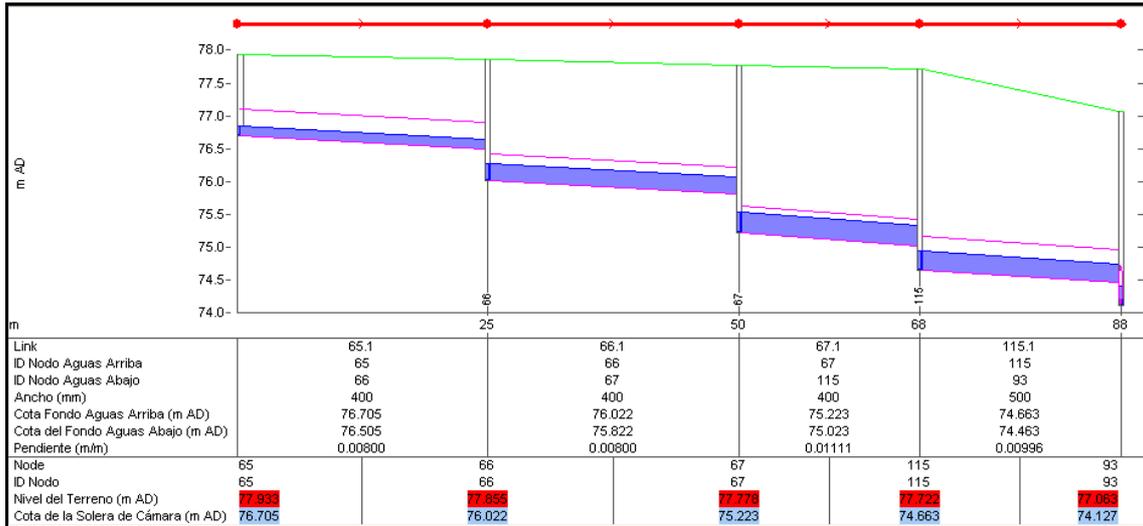


Gráfico 31.- Perfil longitudinal dinámico del Colector 8.

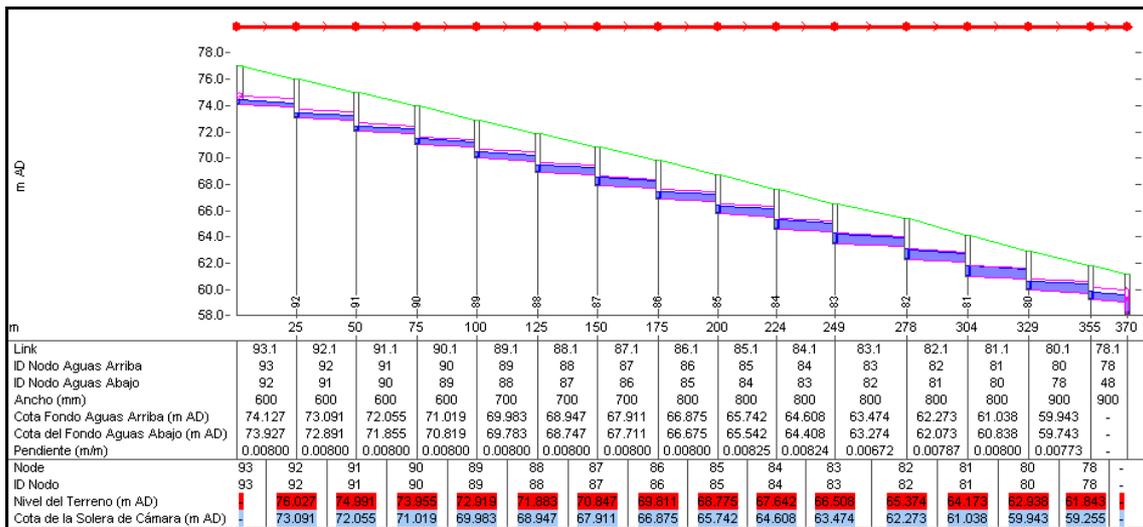


Gráfico 32.- Perfil longitudinal dinámico del Colector 9.

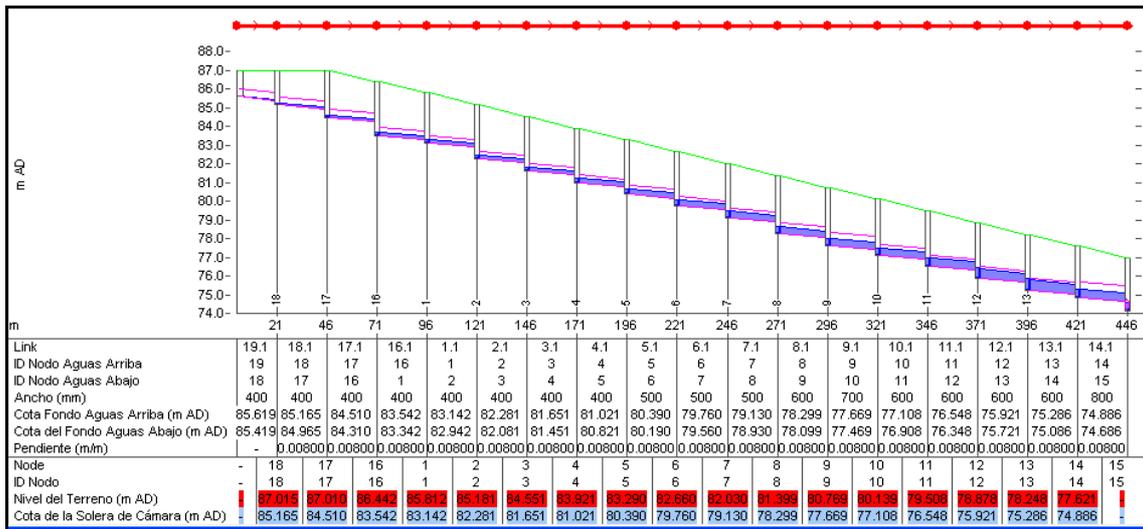


Gráfico 33.- Perfil longitudinal dinámico del Colector 10.

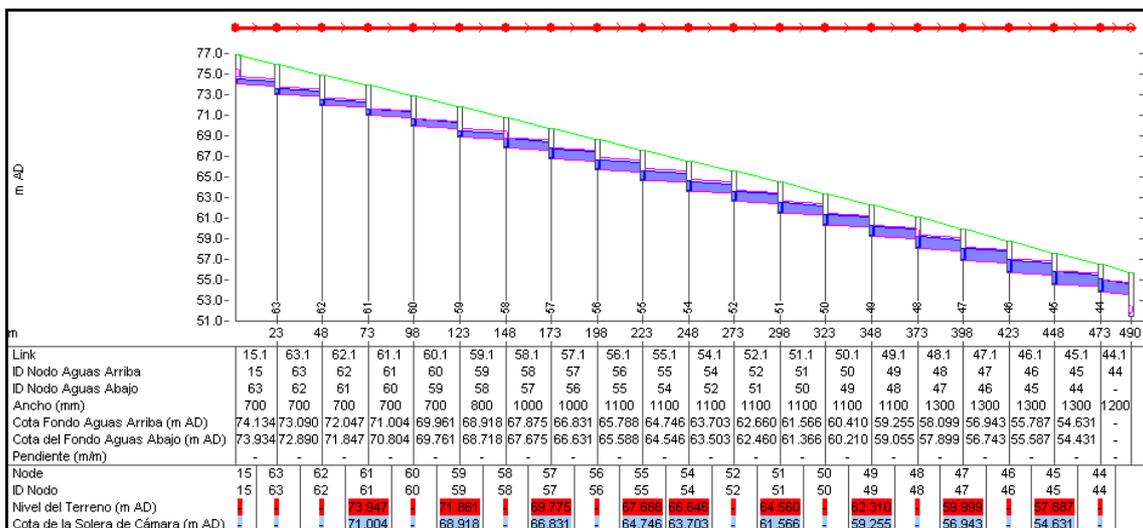


Gráfico 34.- Perfil longitudinal dinámico del Colector 11.

11 APENDICE 2: HIDROGRAMAS GENERADOS POR CADA COLECTOR

Modelo de Parcela con bajantes

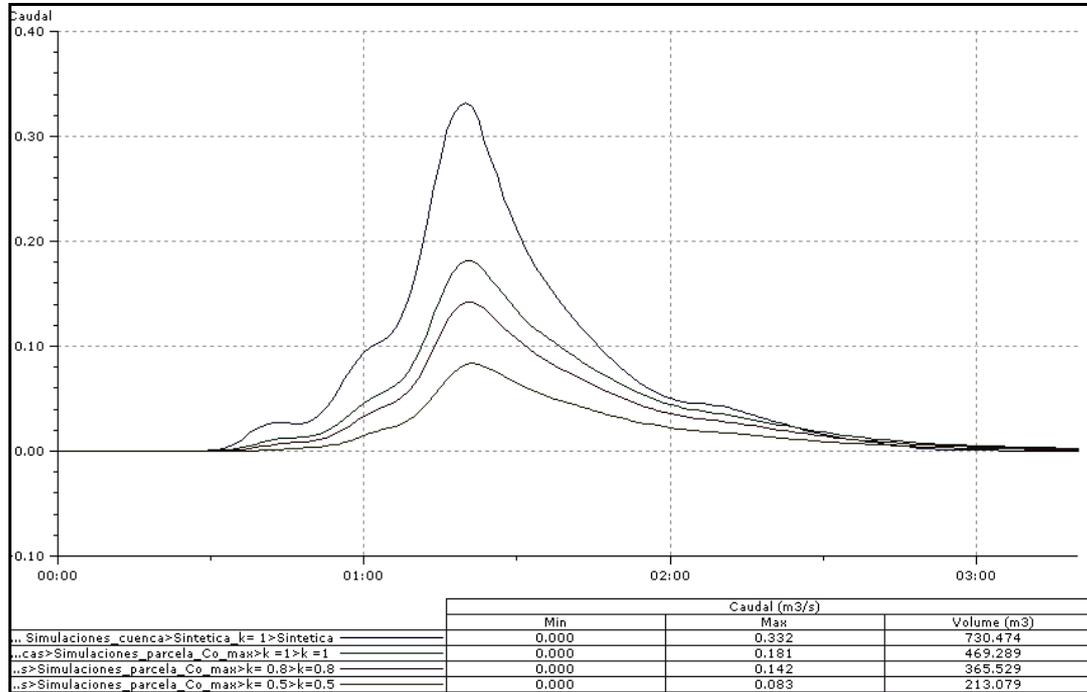


Gráfico 35.- Hidrogramas a la salida del colector 1 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

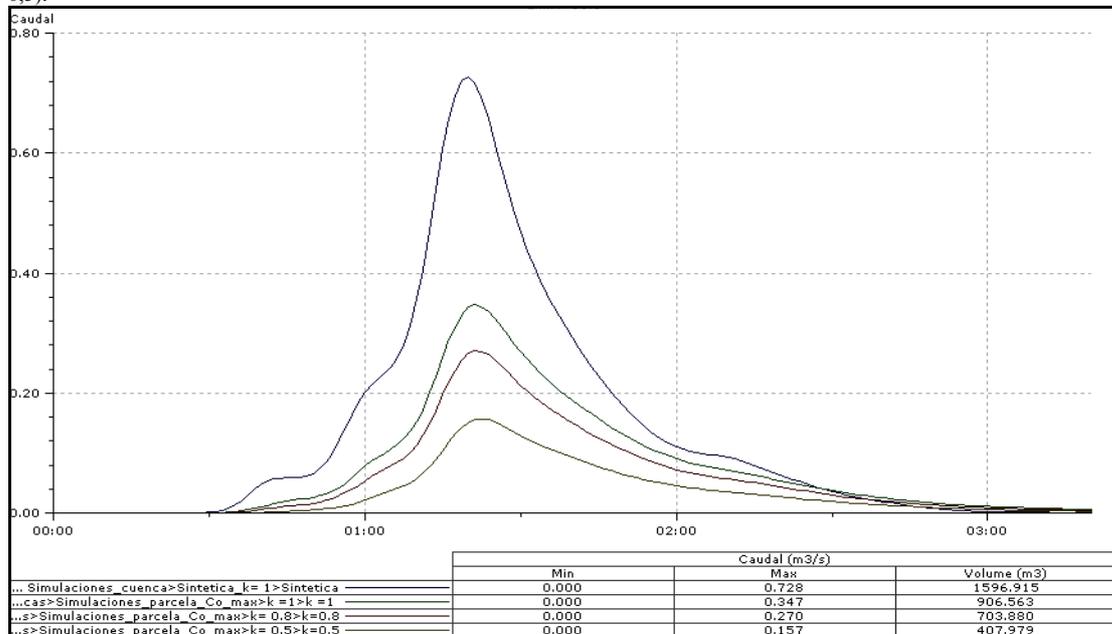


Gráfico 36.- Hidrogramas a la salida del colector 2 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

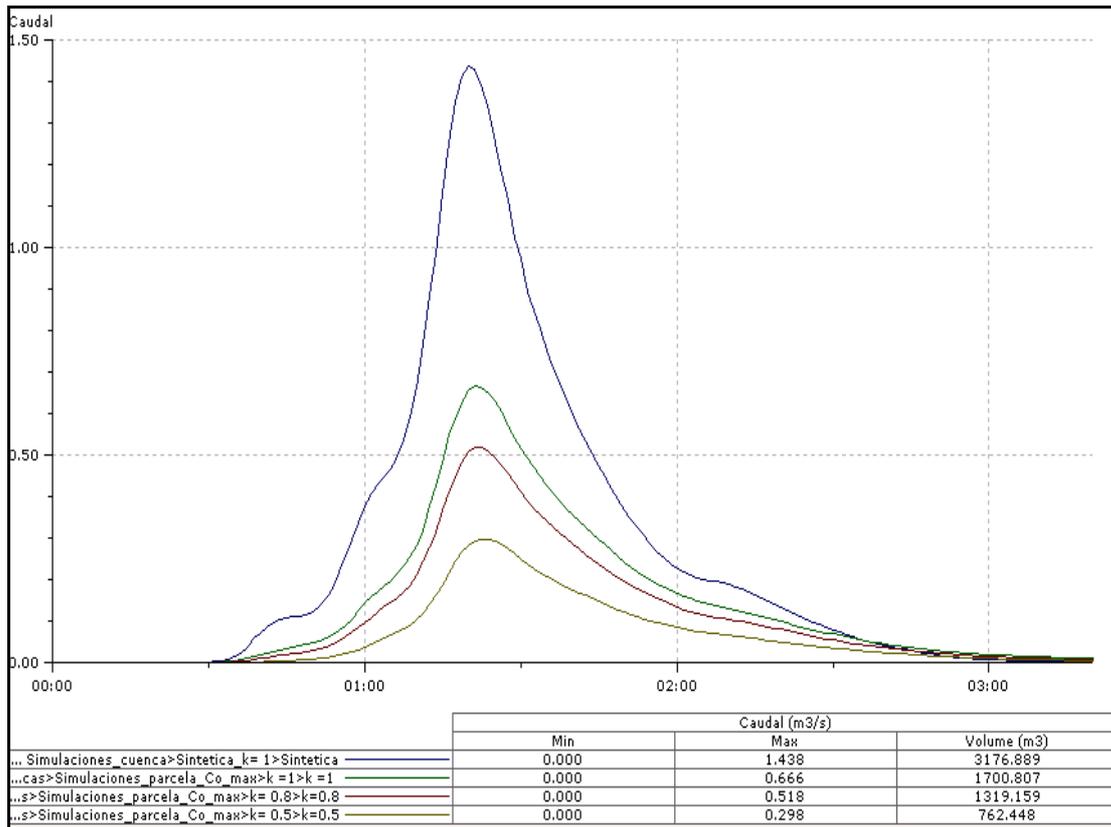


Gráfico 37.- Hidrogramas a la salida del colector 3 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0.8, 0.5$).

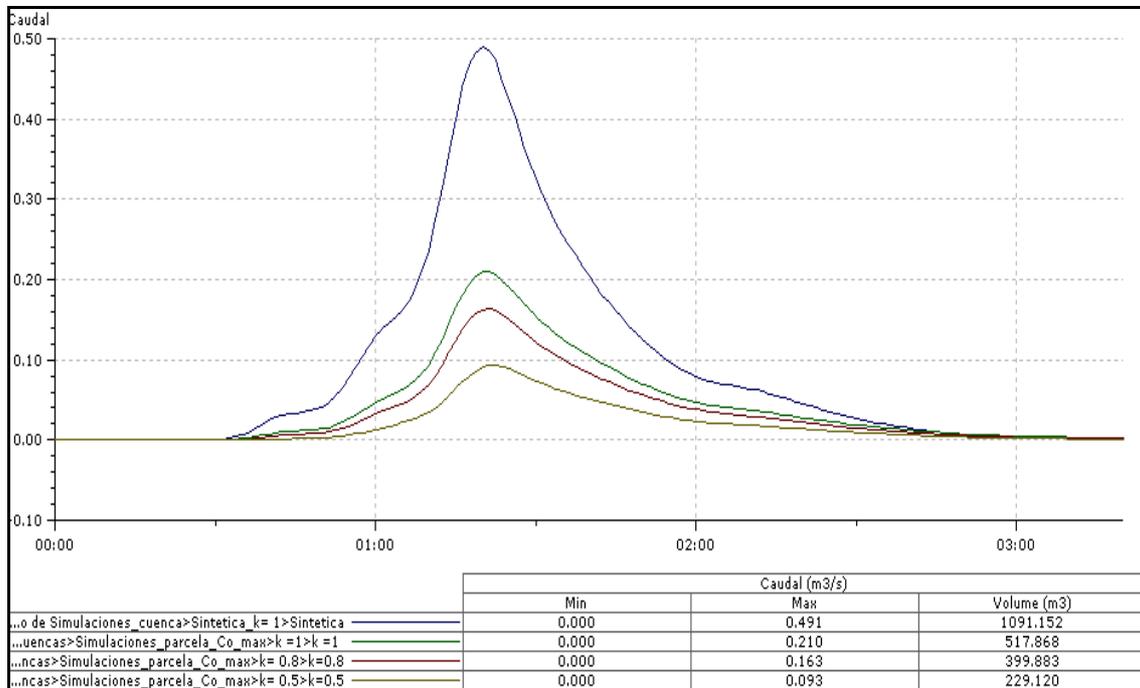


Gráfico 38.- Hidrogramas a la salida del colector 4 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0.8, 0.5$).

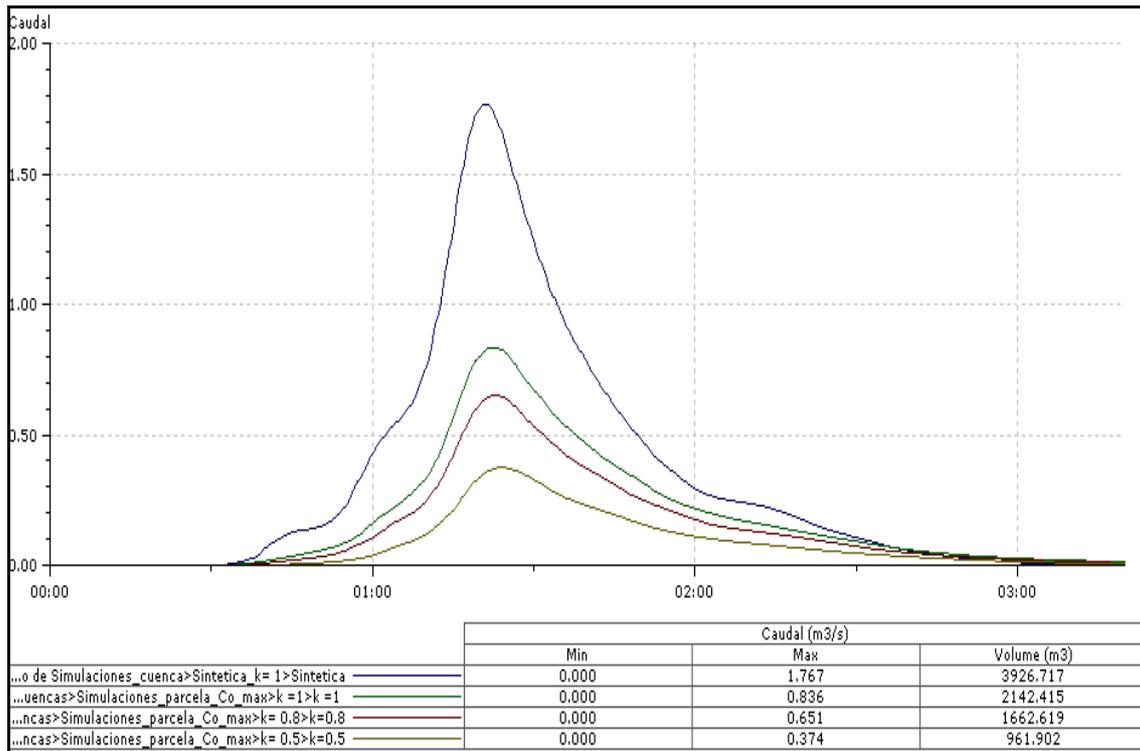


Gráfico 39.- Hidrogramas a la salida del colector 5 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

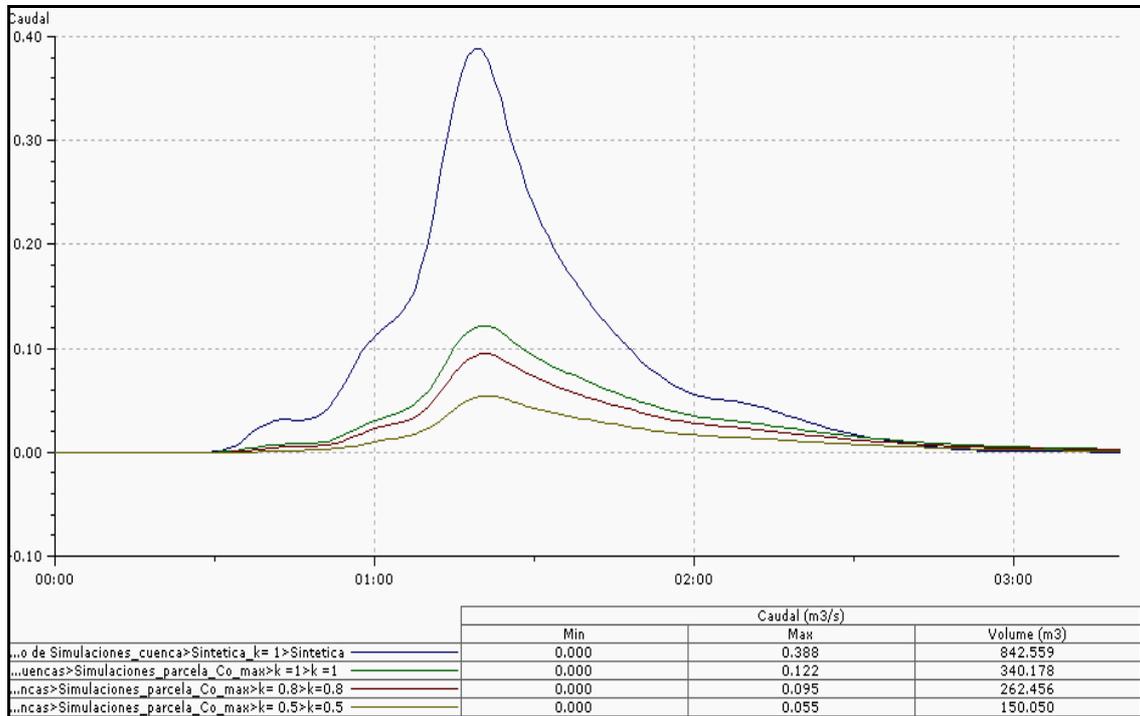


Gráfico 40.- Hidrogramas a la salida del colector 6 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8,$

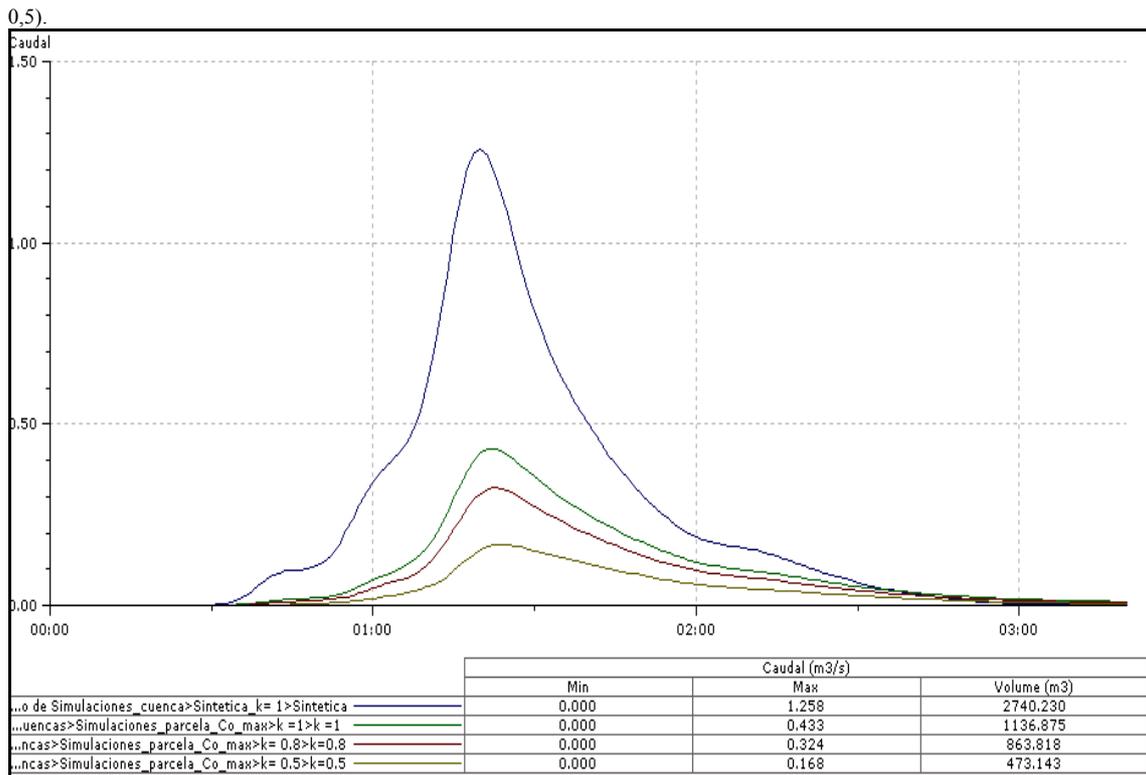


Gráfico 41.- Hidrogramas a la salida del colector 7 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0.8, 0.5$).

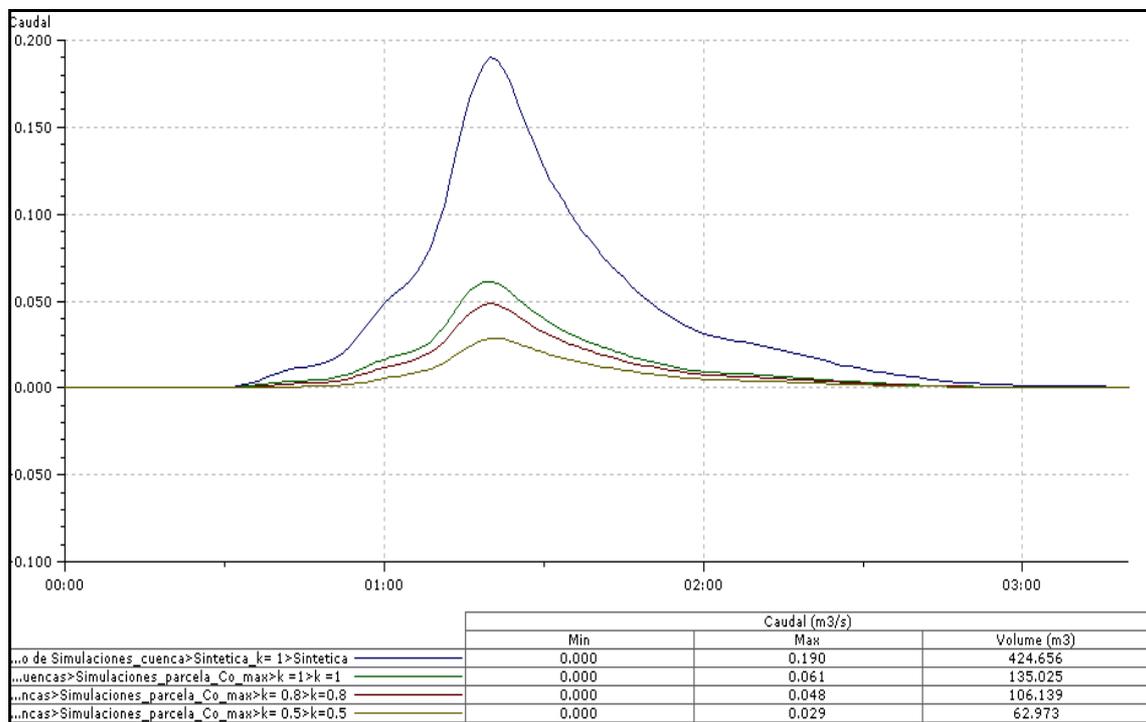


Gráfico 42.- Hidrogramas a la salida del colector 8 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0.8, 0.5$).

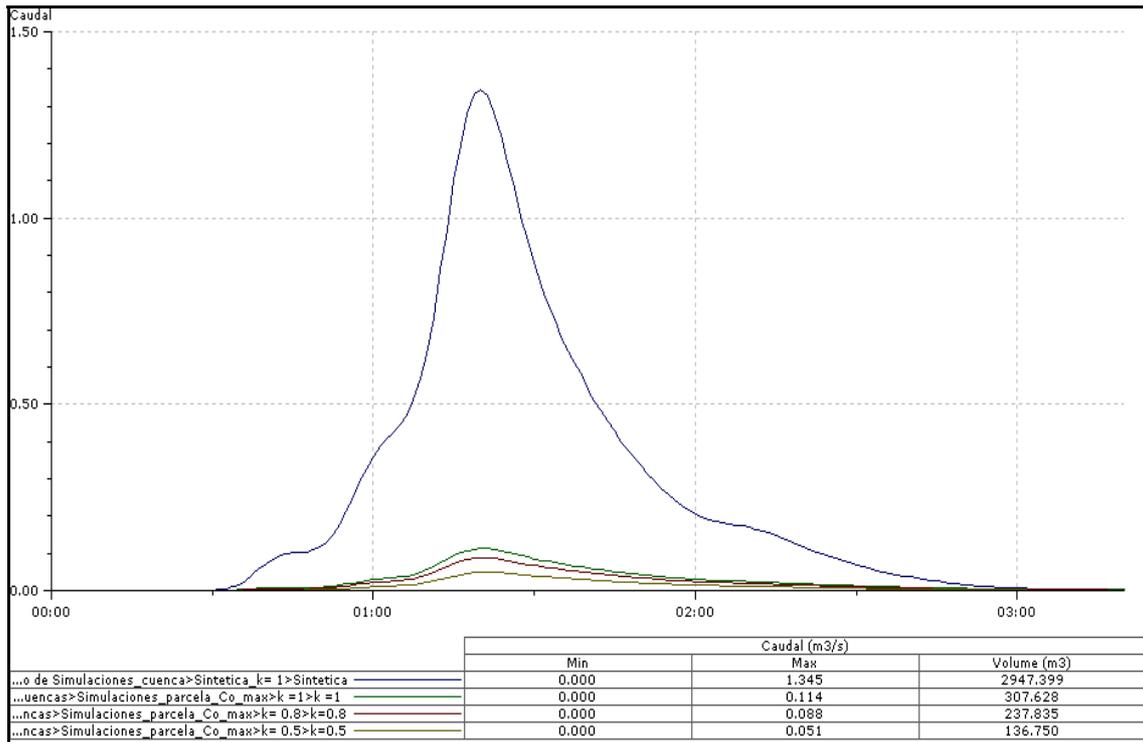


Gráfico 43.- Hidrogramas a la salida del colector 9 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

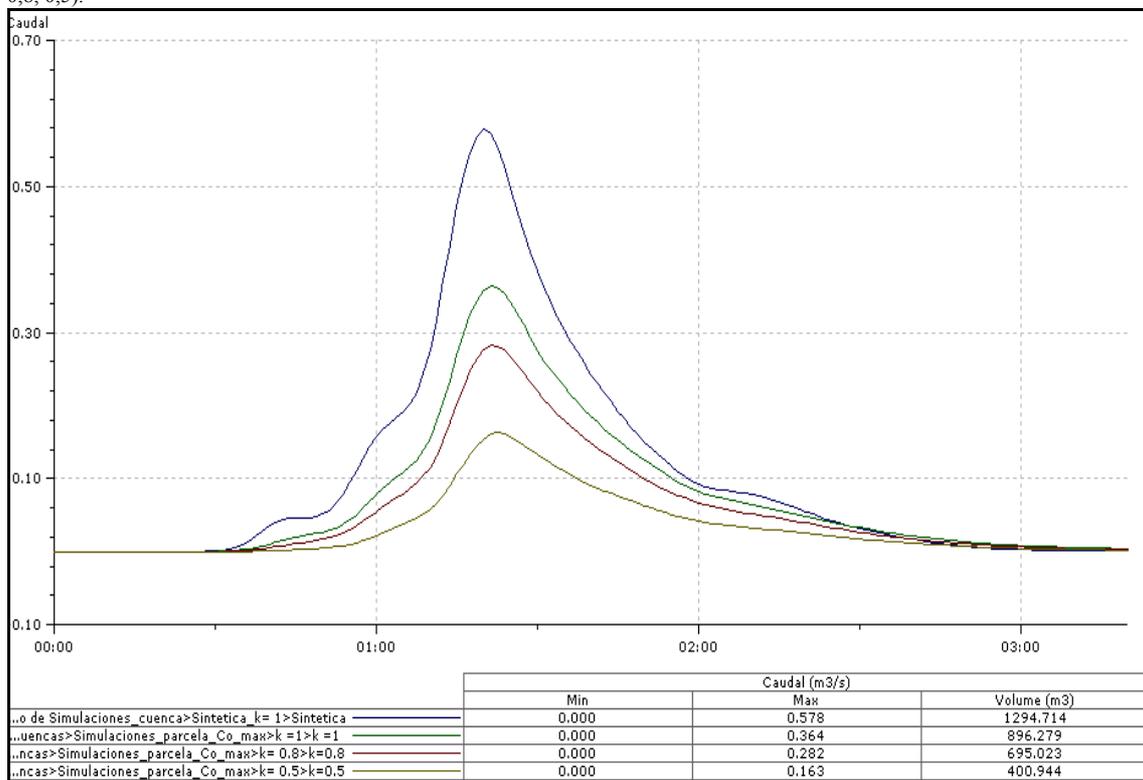


Gráfico 44.- Hidrogramas a la salida del colector 10 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

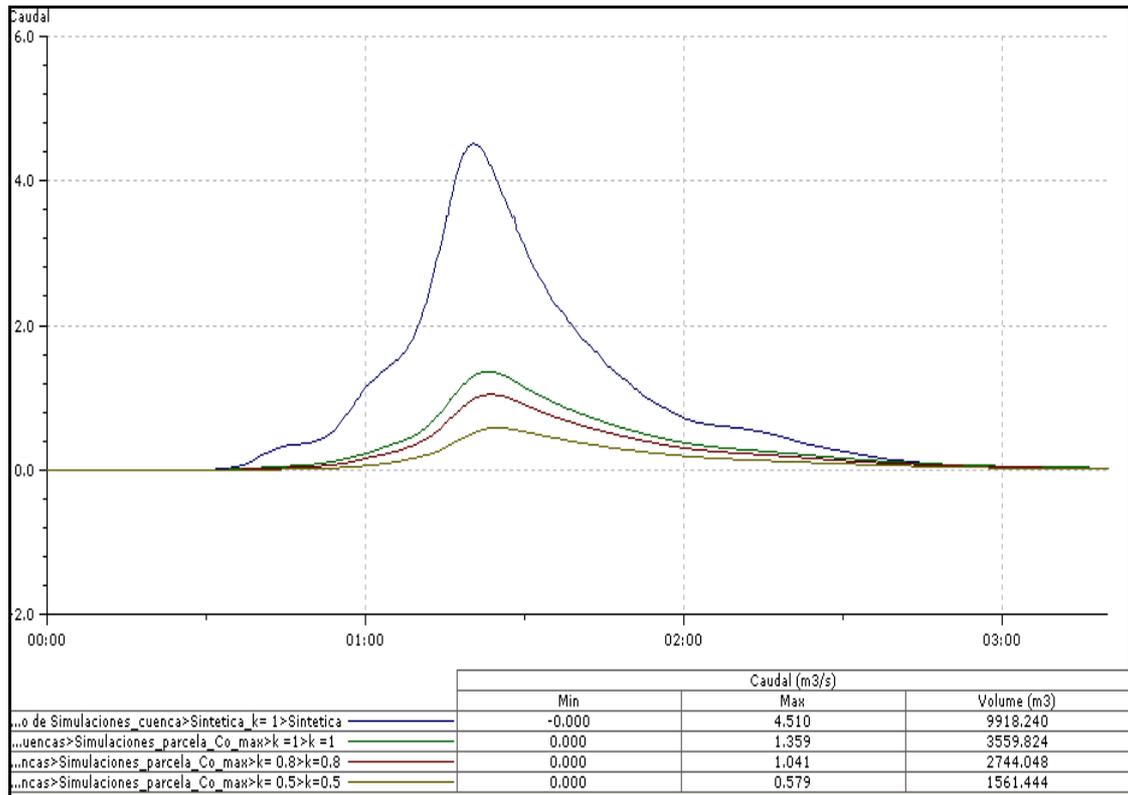


Gráfico 45.- Hidrogramas a la salida del colector 11 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

Modelo de Parcelas sin bajantes

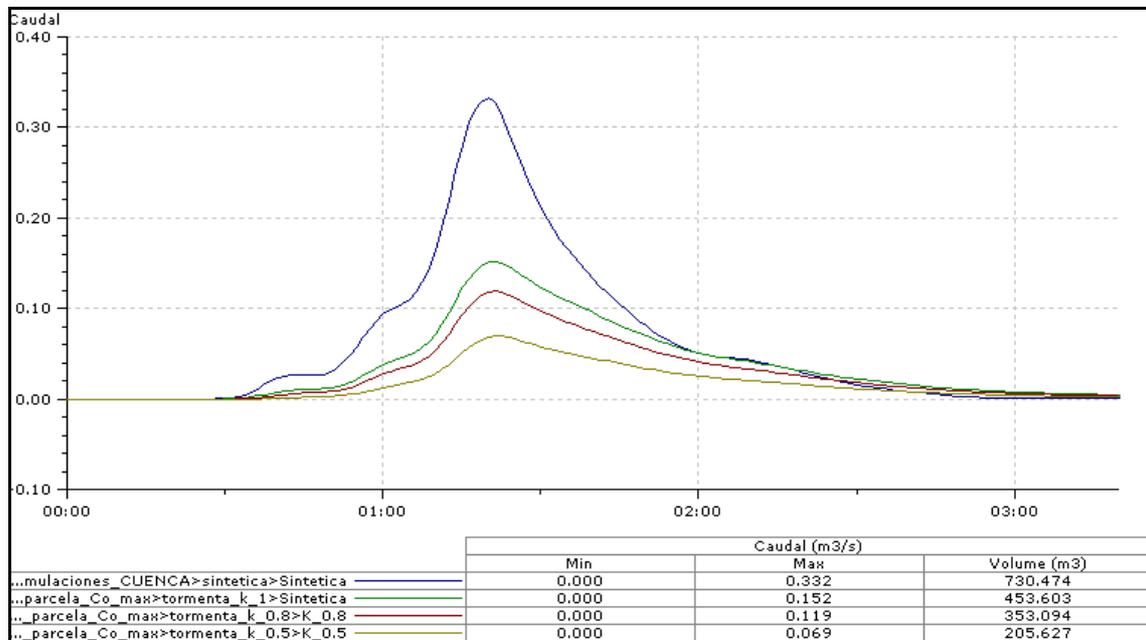


Gráfico 46.- Hidrogramas a la salida del colector 1 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

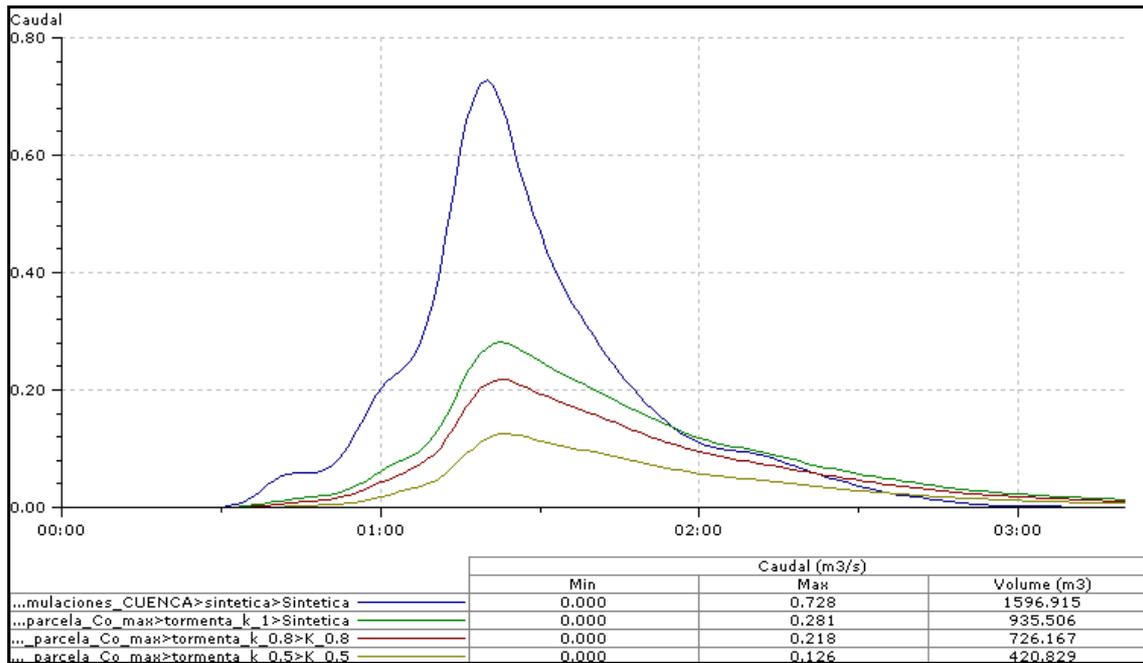


Gráfico 47.- Hidrogramas a la salida del colector 2 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

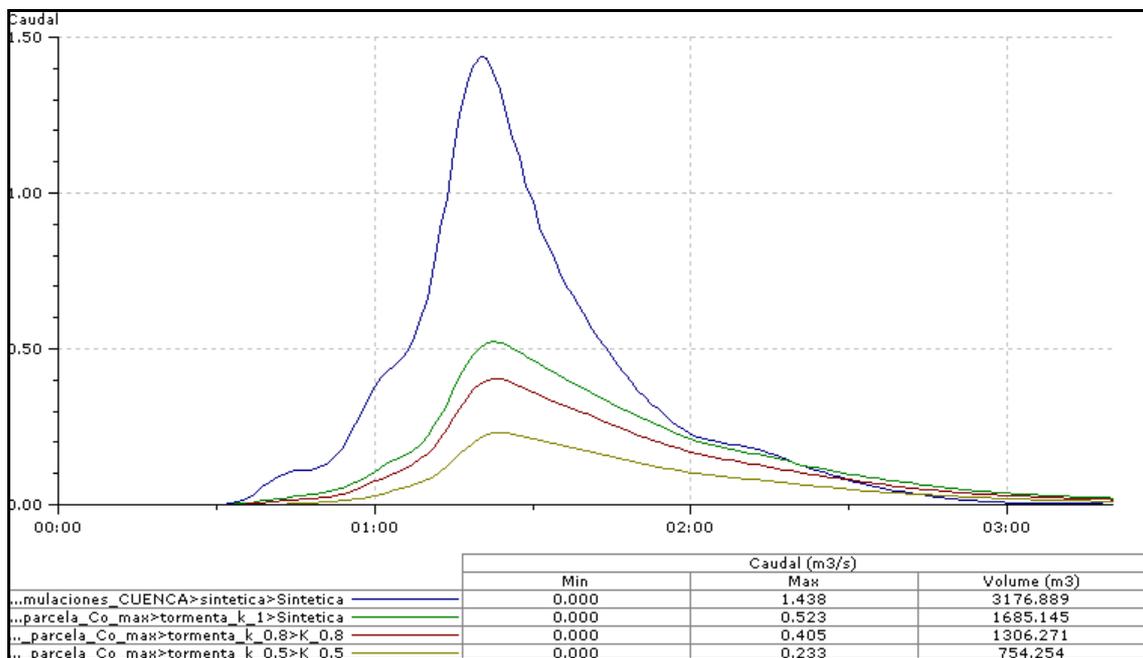


Gráfico 48.- Hidrogramas a la salida del colector 3 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

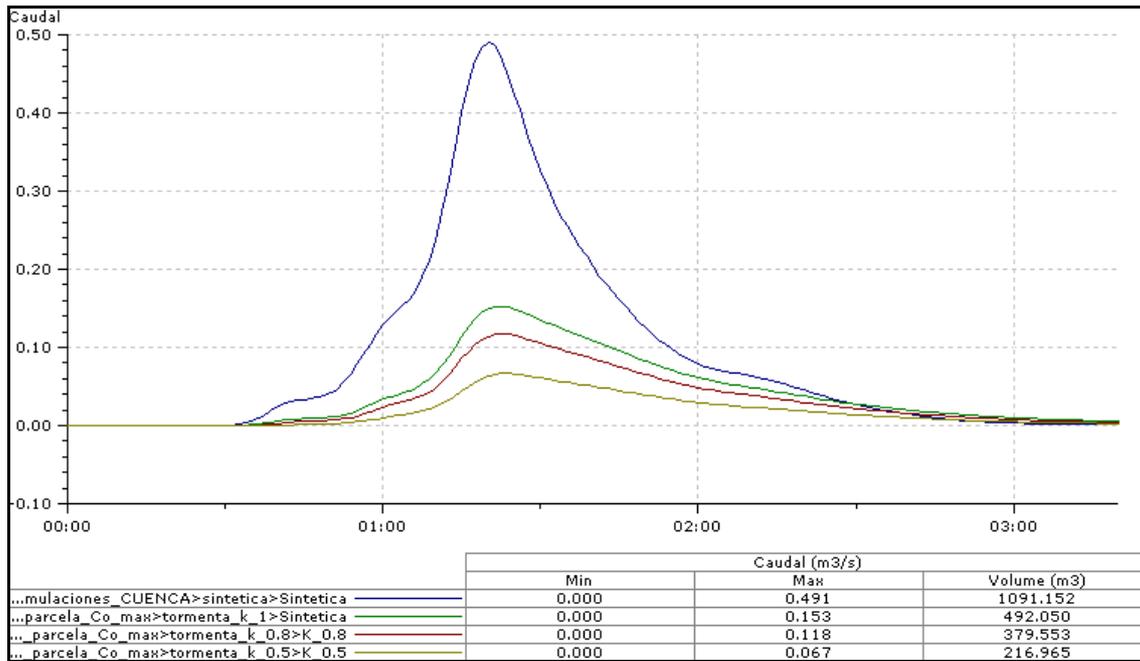


Gráfico 49.- Hidrogramas a la salida del colector 4 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

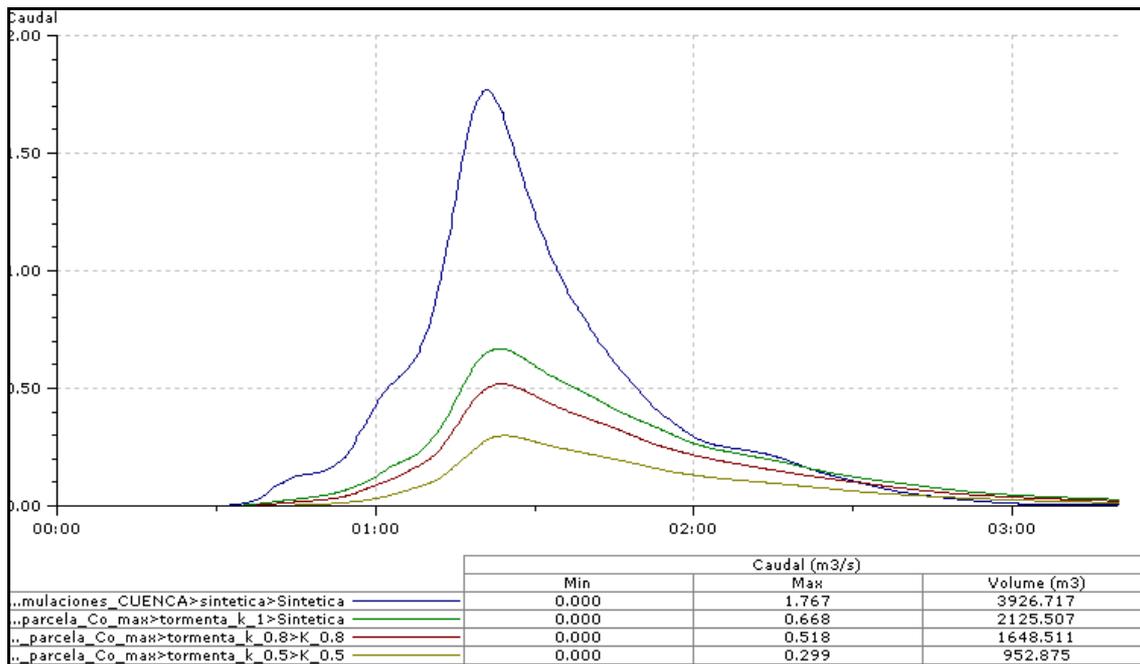


Gráfico 50.- Hidrogramas a la salida del colector 5 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

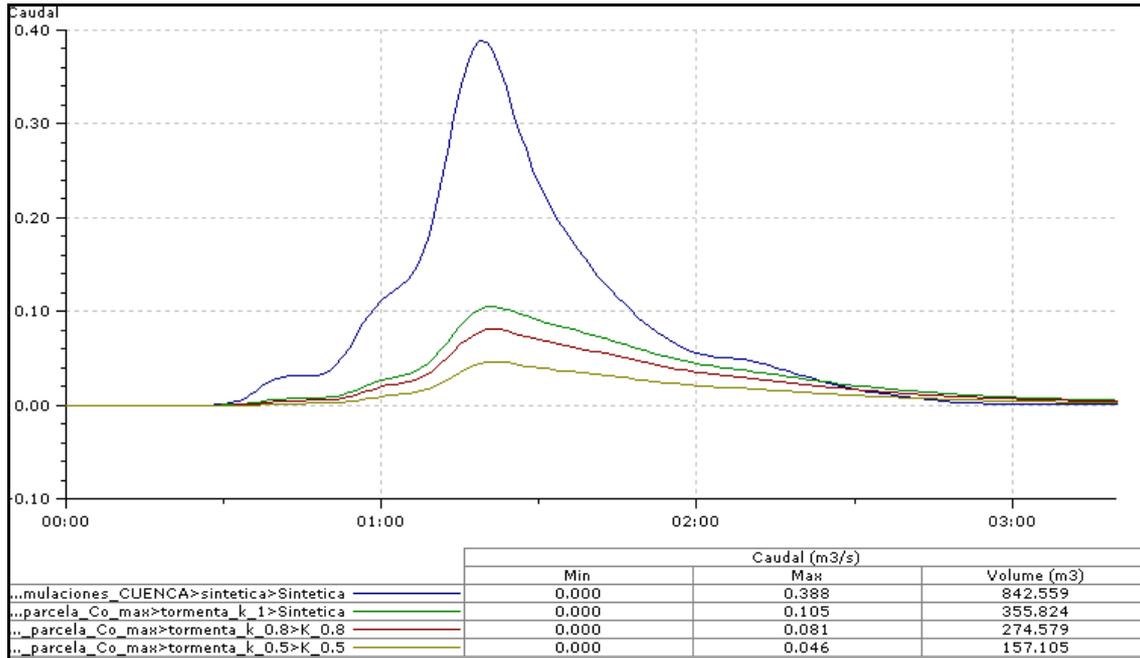


Gráfico 51.- Hidrogramas a la salida del colector 6 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

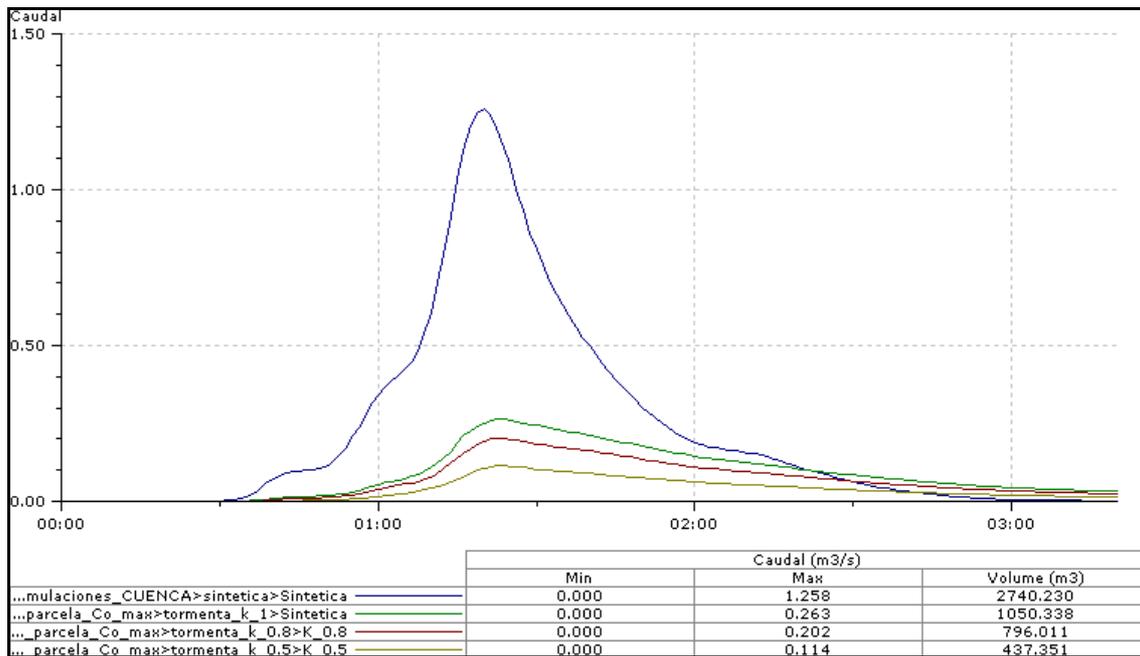


Gráfico 52.- Hidrogramas a la salida del colector 7 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

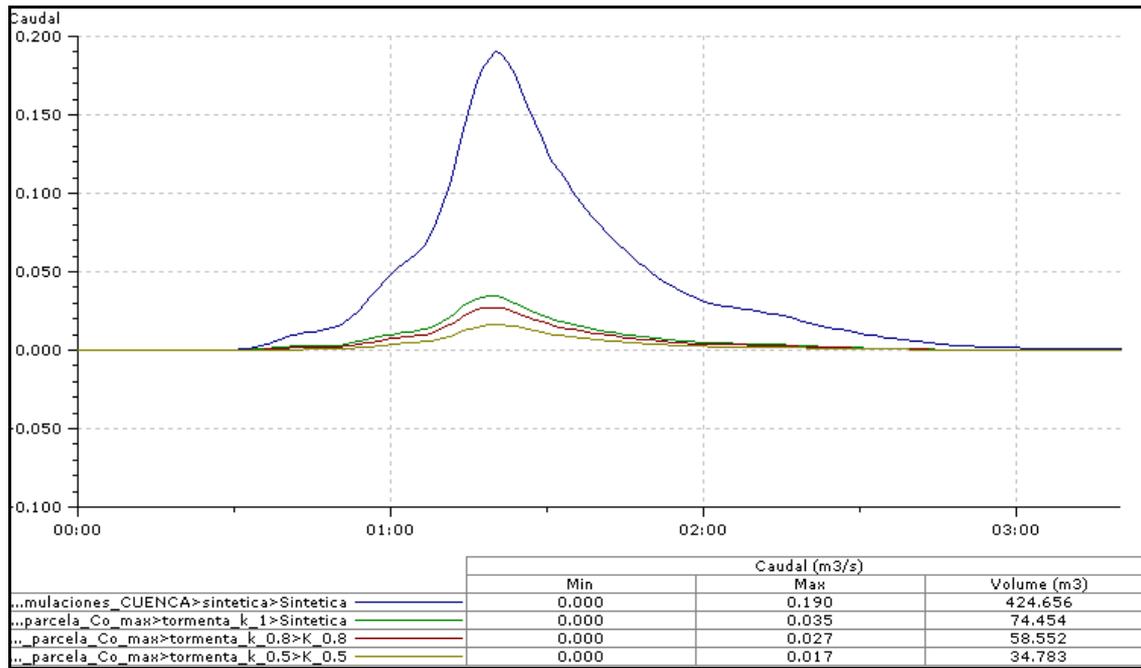


Gráfico 53.- Hidrogramas a la salida del colector 8 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud k = 1, 0,8, 0,5).

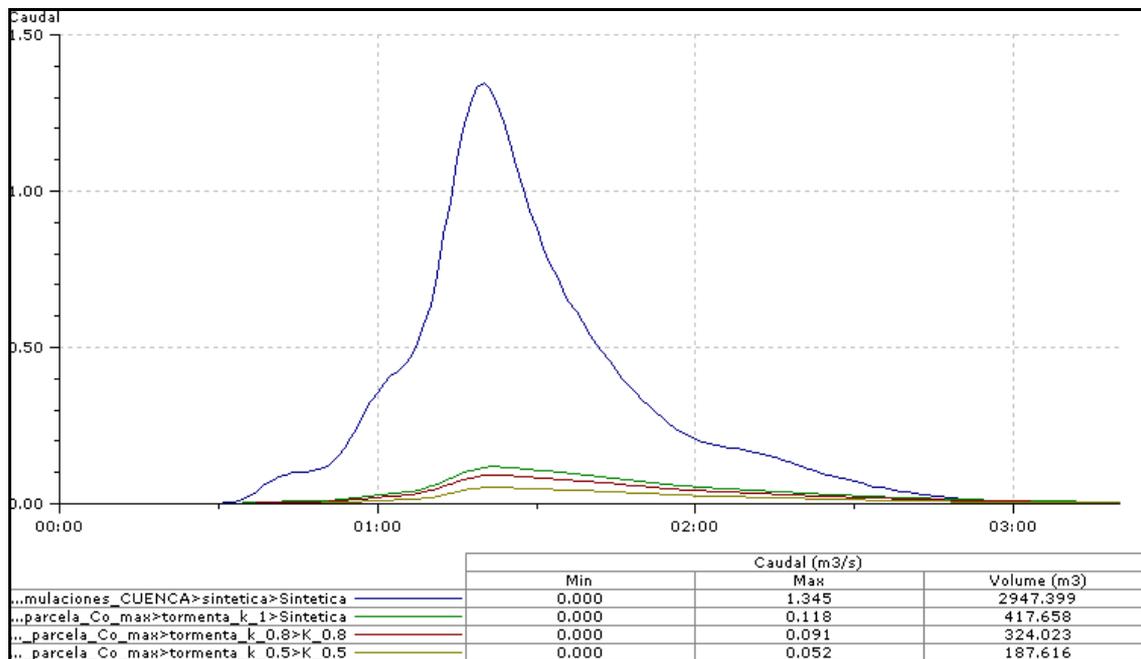


Gráfico 54.- Hidrogramas a la salida del colector 9 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud k = 1, 0,8, 0,5).

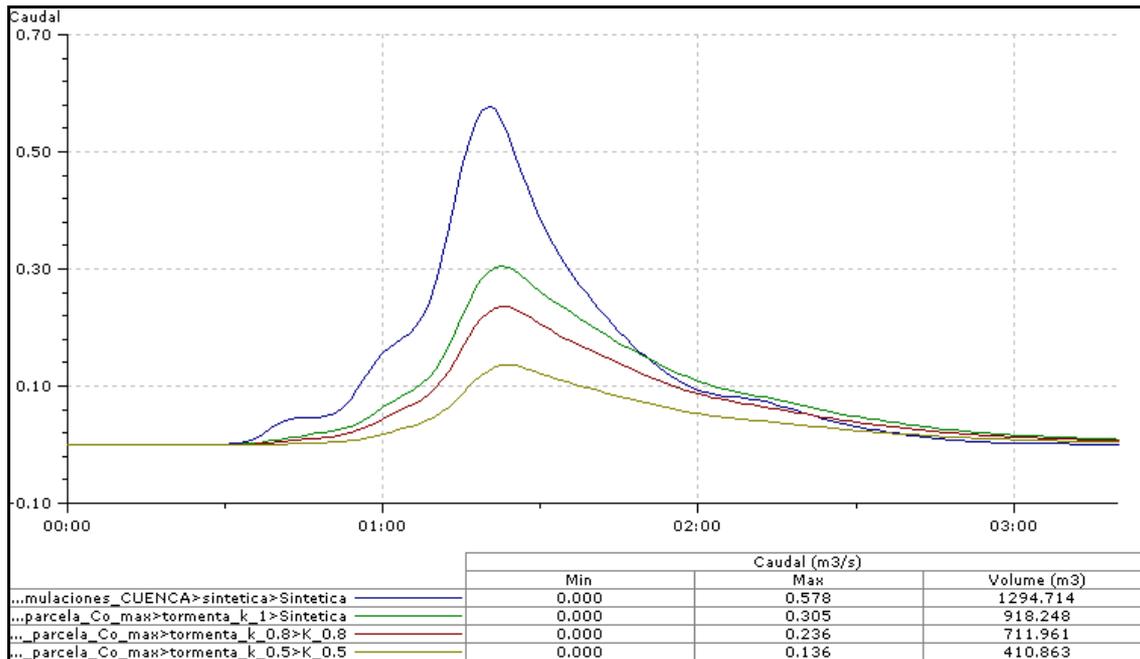


Gráfico 55.- Hidrogramas a la salida del colector 10 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

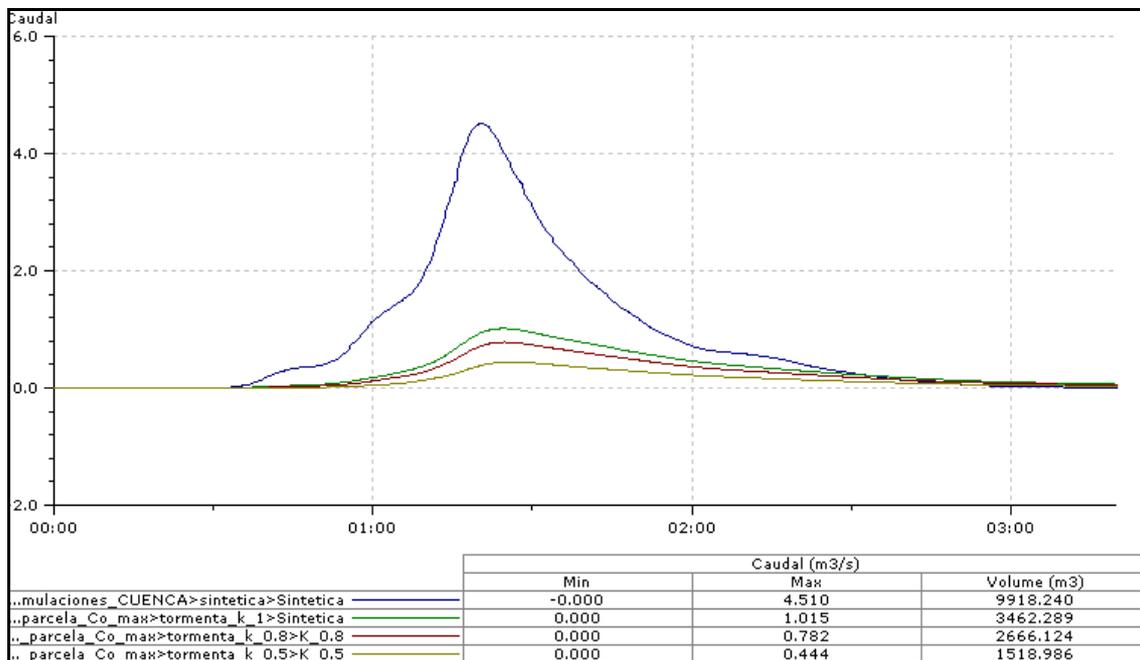


Gráfico 56.- Hidrogramas a la salida del colector 11 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y sin imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

Modelo de Parcelas con bajantes y con imbornales

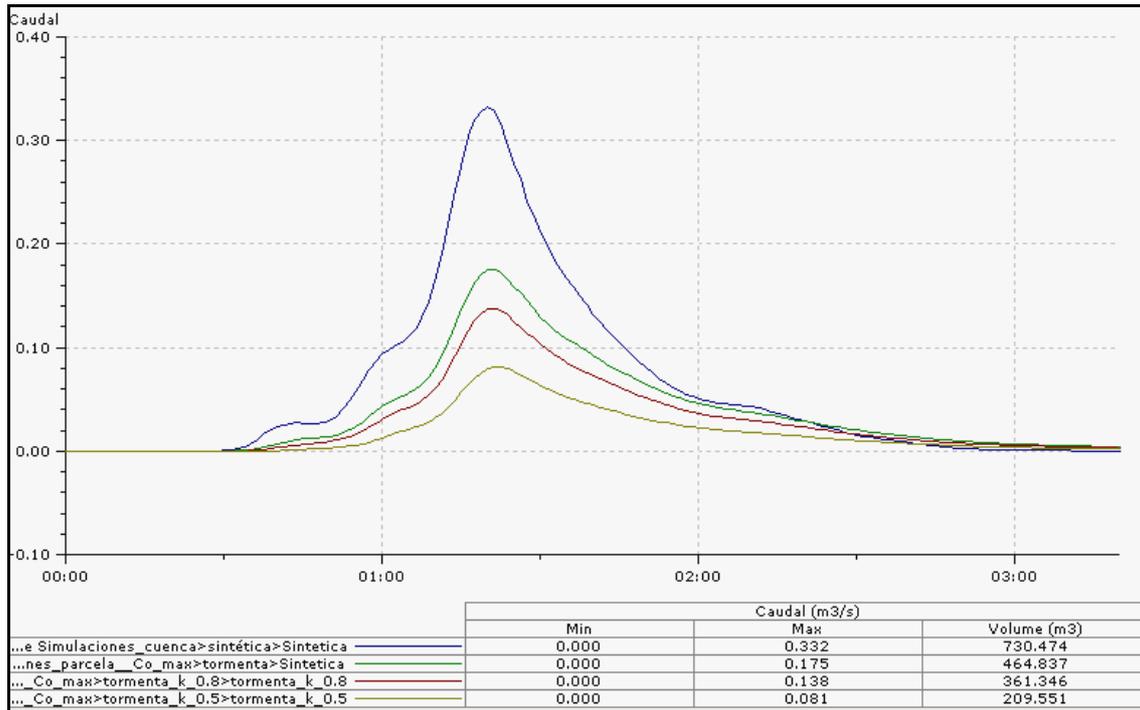


Gráfico 57.- Hidrogramas a la salida del colector 1 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

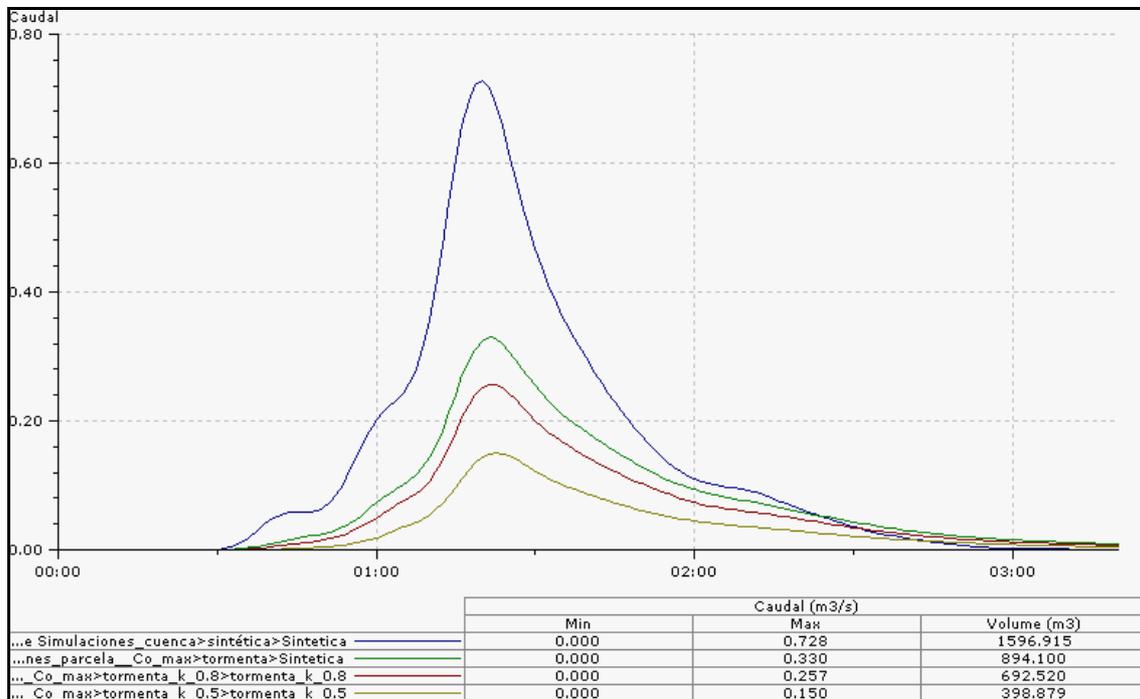


Gráfico 58.- Hidrogramas a la salida del colector 2 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

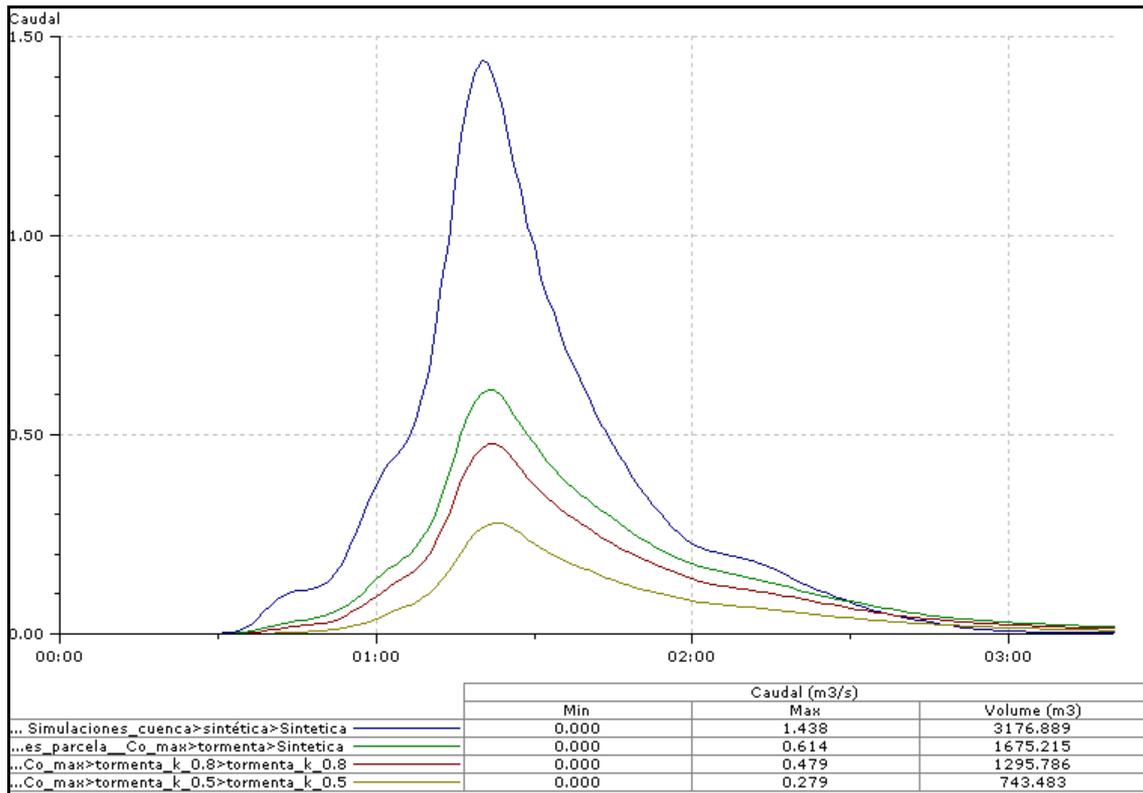


Gráfico 59.- Hidrogramas a la salida del colector 3 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

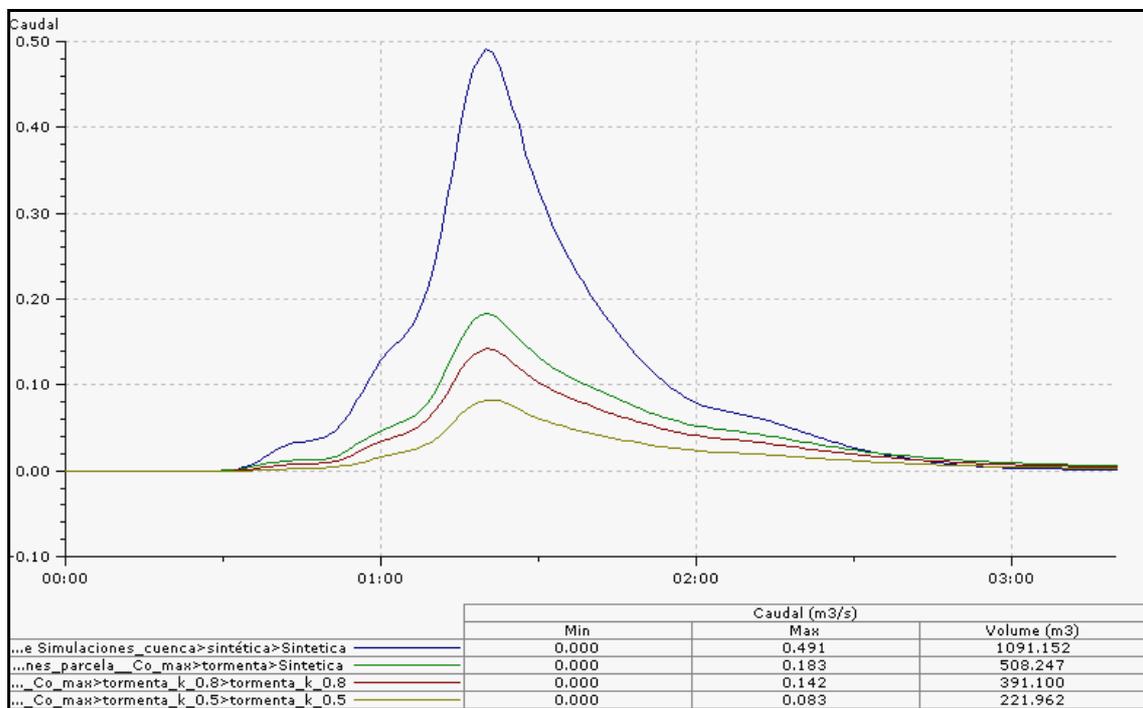


Gráfico 60.- Hidrogramas a la salida del colector 4 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

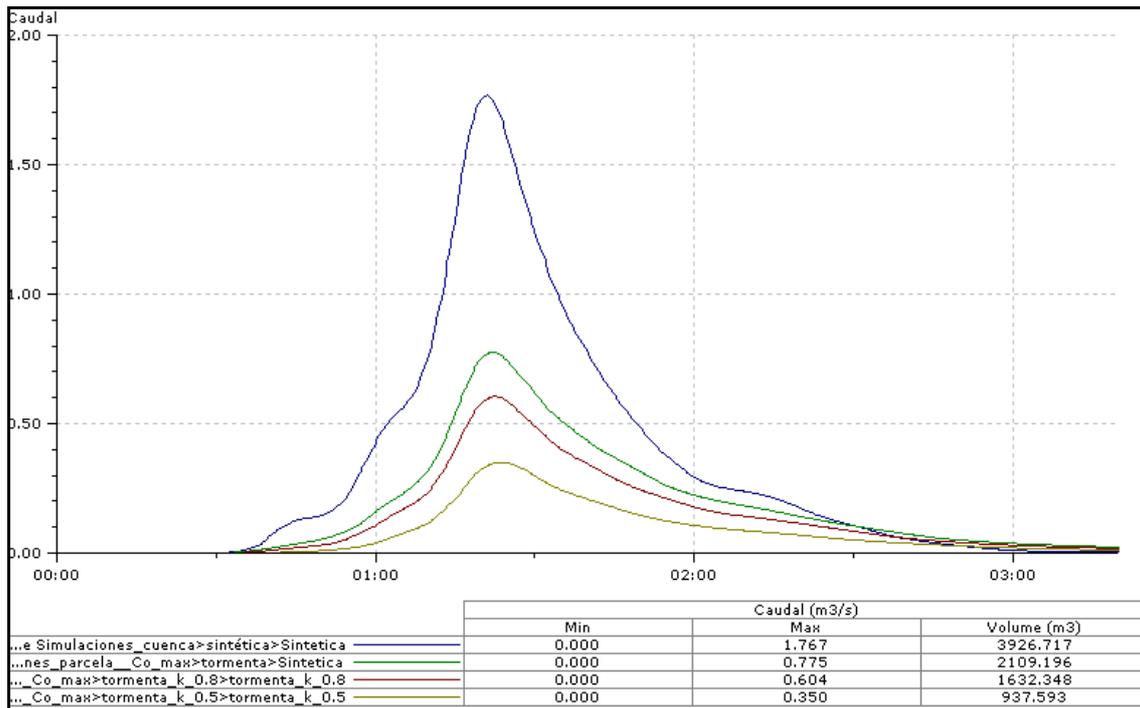


Gráfico 61.- Hidrogramas a la salida del colector 5 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

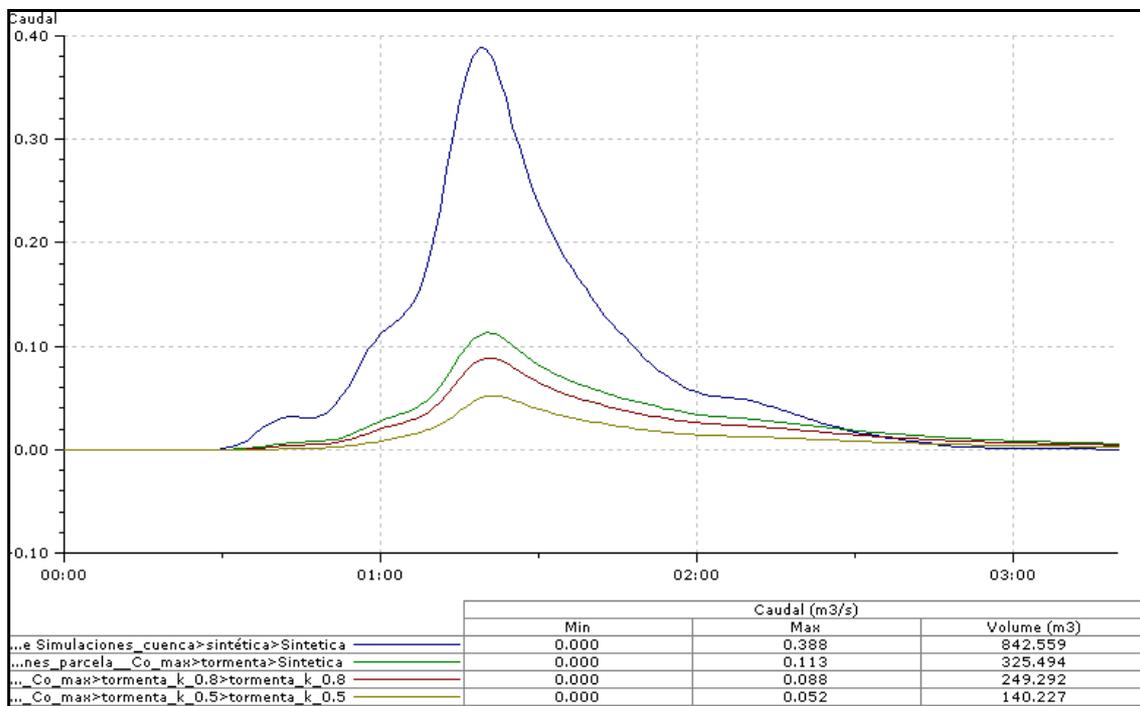


Gráfico 62.- Hidrogramas a la salida del colector 6 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

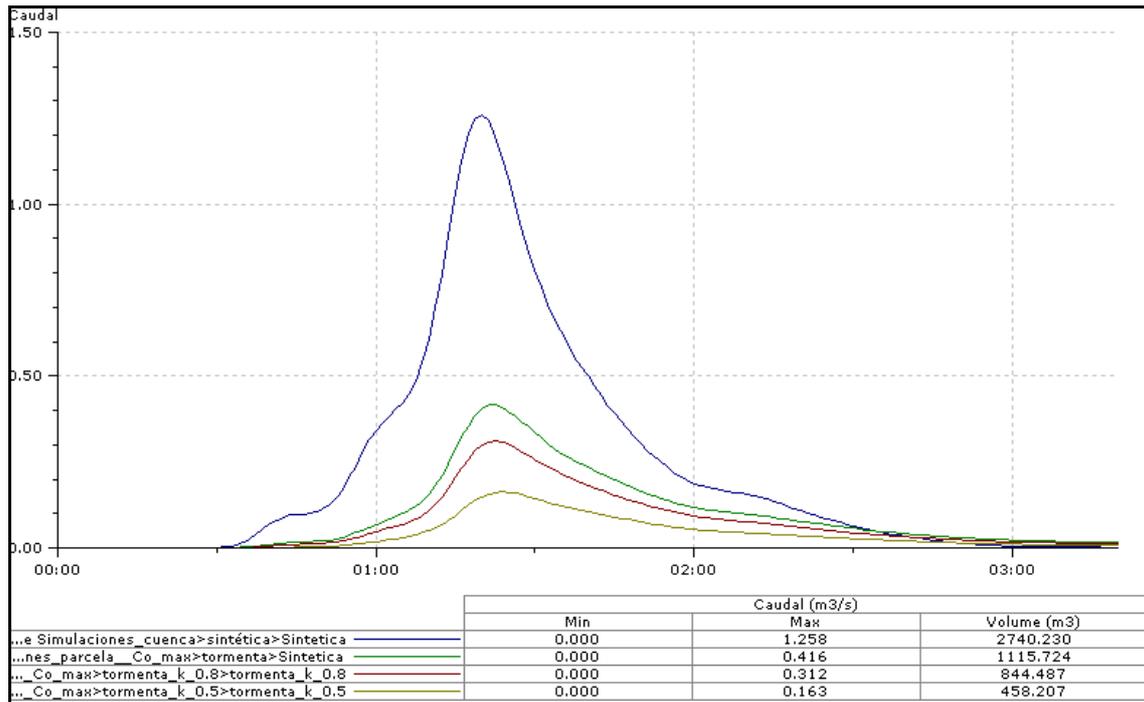


Gráfico 63.- Hidrogramas a la salida del colector 7 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

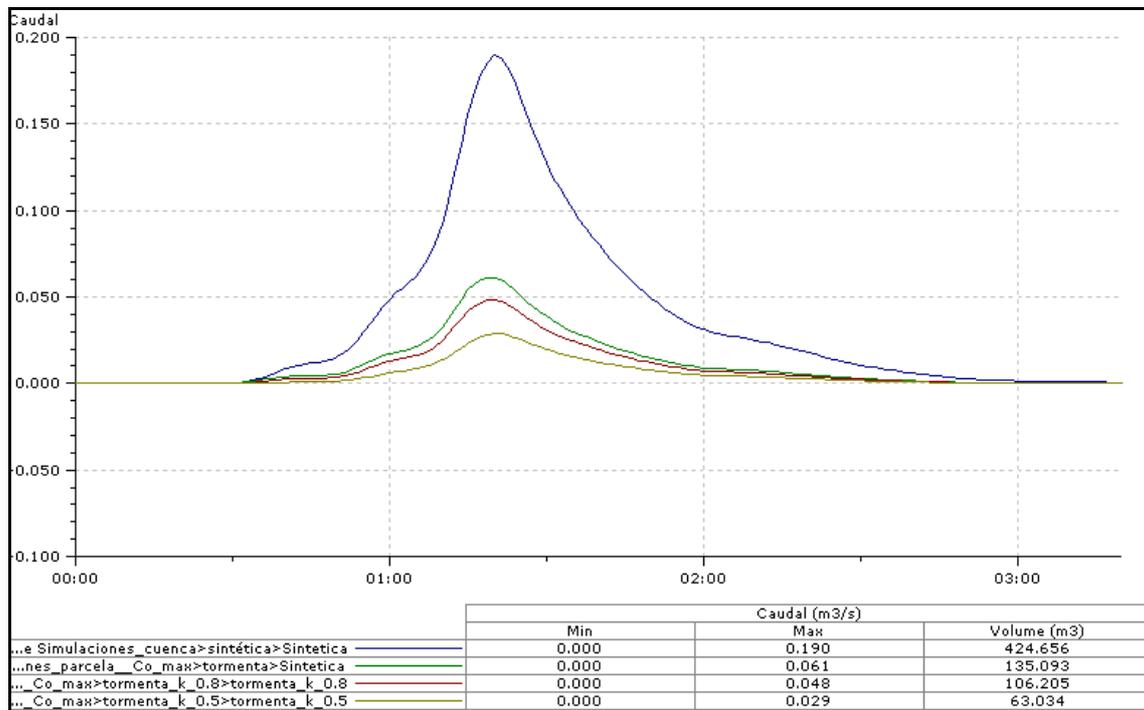


Gráfico 64 Hidrogramas a la salida del colector 8 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

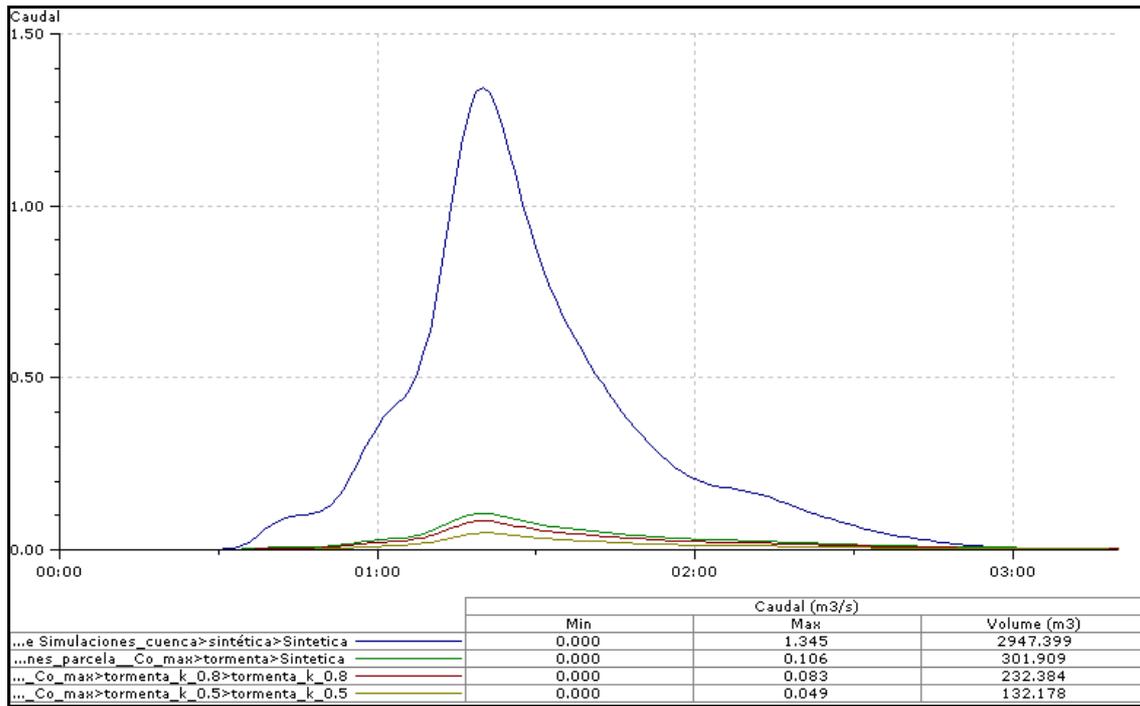


Gráfico 65.- Hidrogramas a la salida del colector 9 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

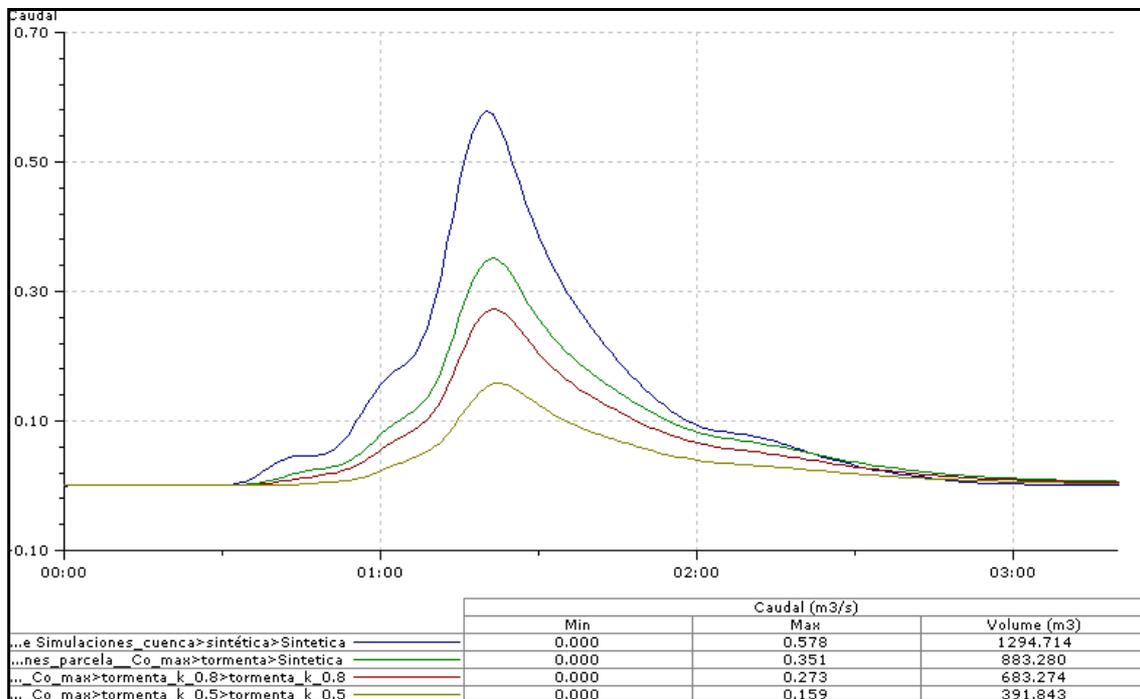


Gráfico 66.- Hidrogramas a la salida del colector 10 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

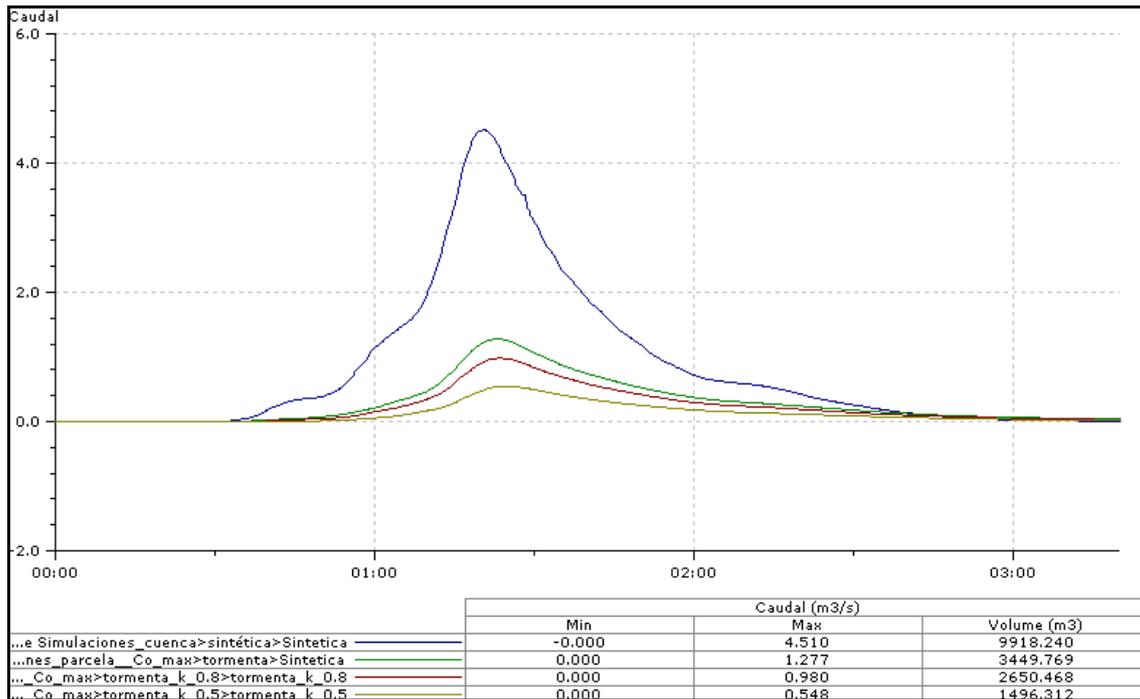


Gráfico 67.- Hidrogramas a la salida del colector 11 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela con bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

Modelo de Parcela sin bajantes y con imbornales

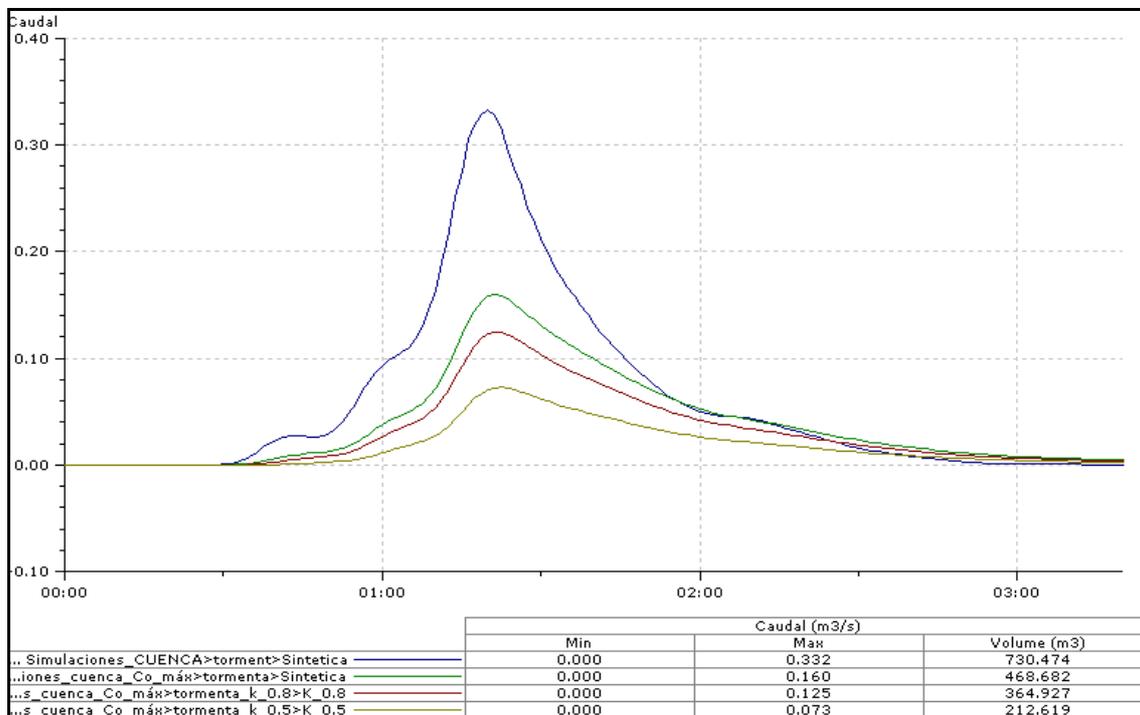


Gráfico 68.- Hidrogramas a la salida del colector 1 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

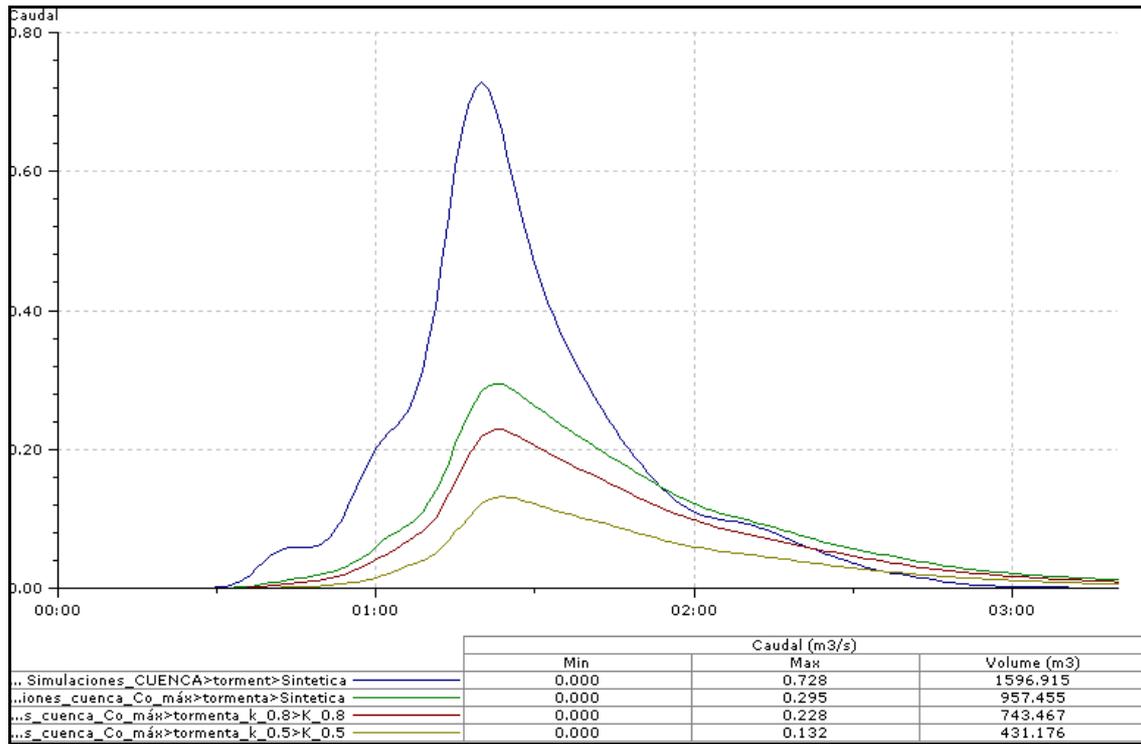


Gráfico 69.- Hidrogramas a la salida del colector 2 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud k = 1, 0,8, 0,5).

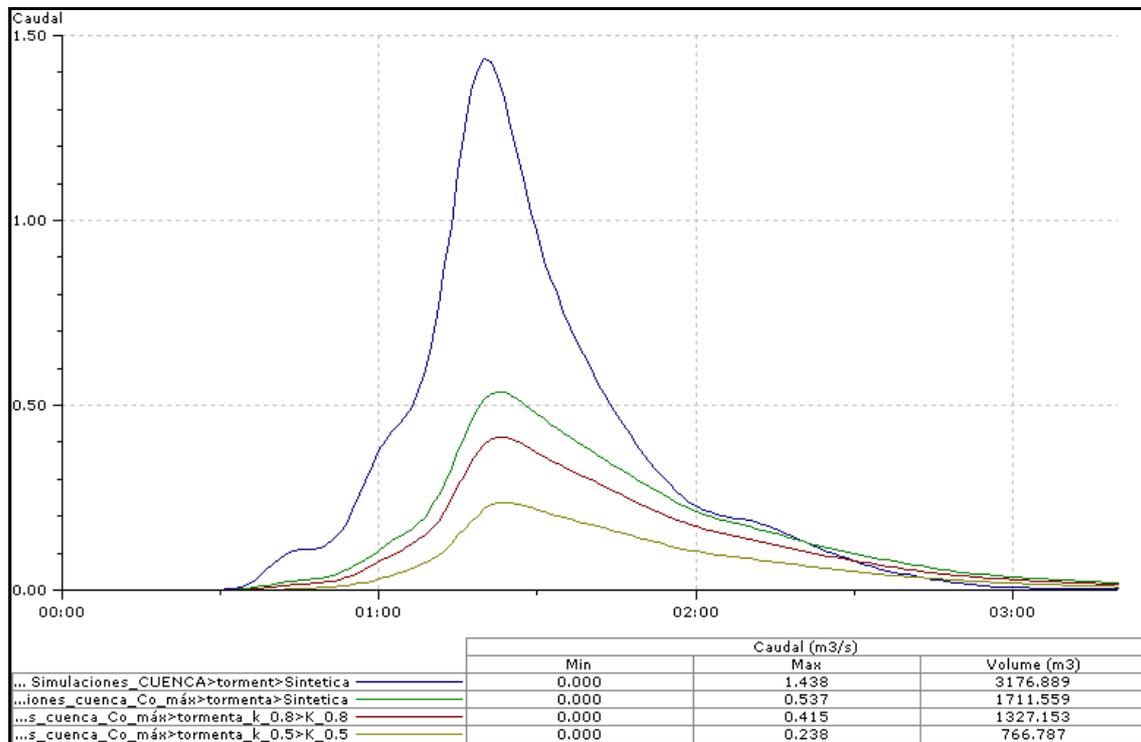


Gráfico 70.- Hidrogramas a la salida del colector 3 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud k = 1, 0,8, 0,5).

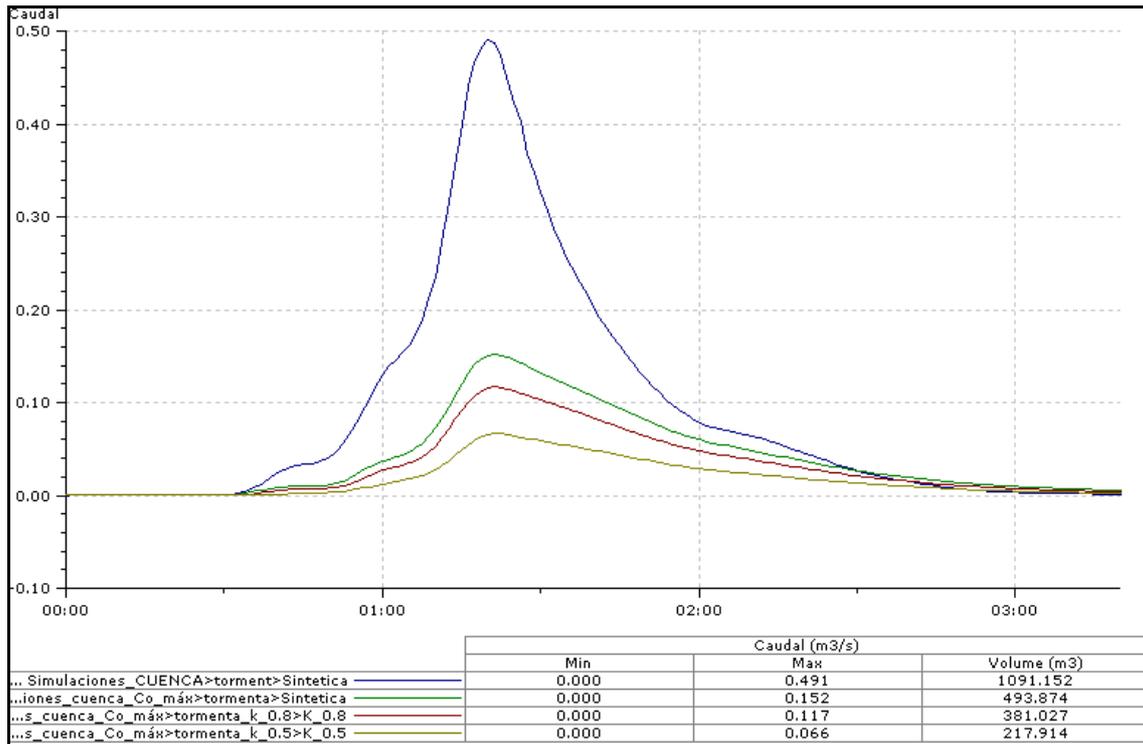


Gráfico 71.- Hidrogramas a la salida del colector 4 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

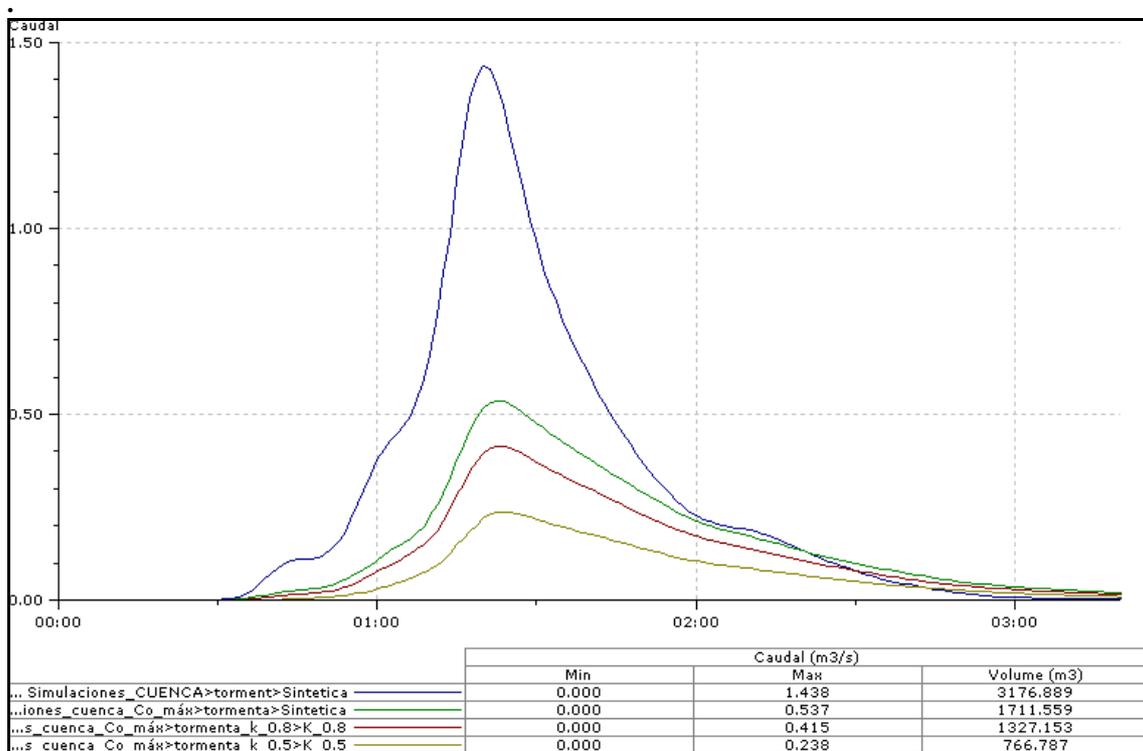


Gráfico 72.- Hidrogramas a la salida del colector 5 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

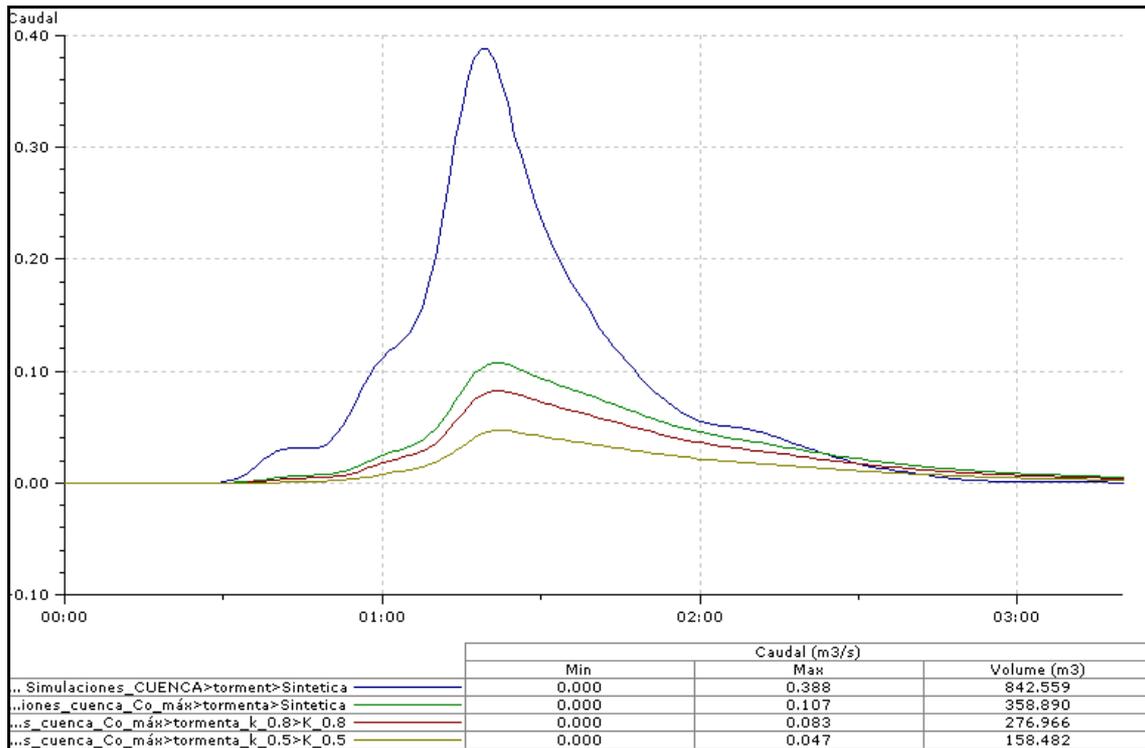


Gráfico 73.- Hidrogramas a la salida del colector 6 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0.8, 0.5$).

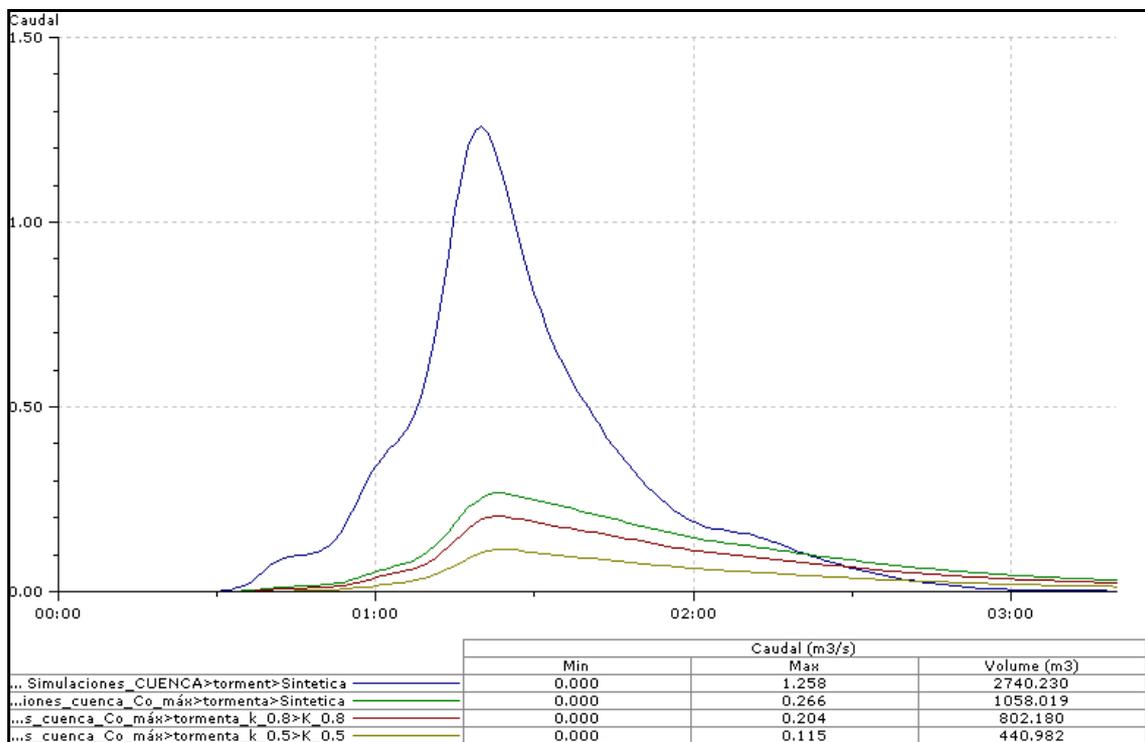


Gráfico 74.- Hidrogramas a la salida del colector 7 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0.8, 0.5$).

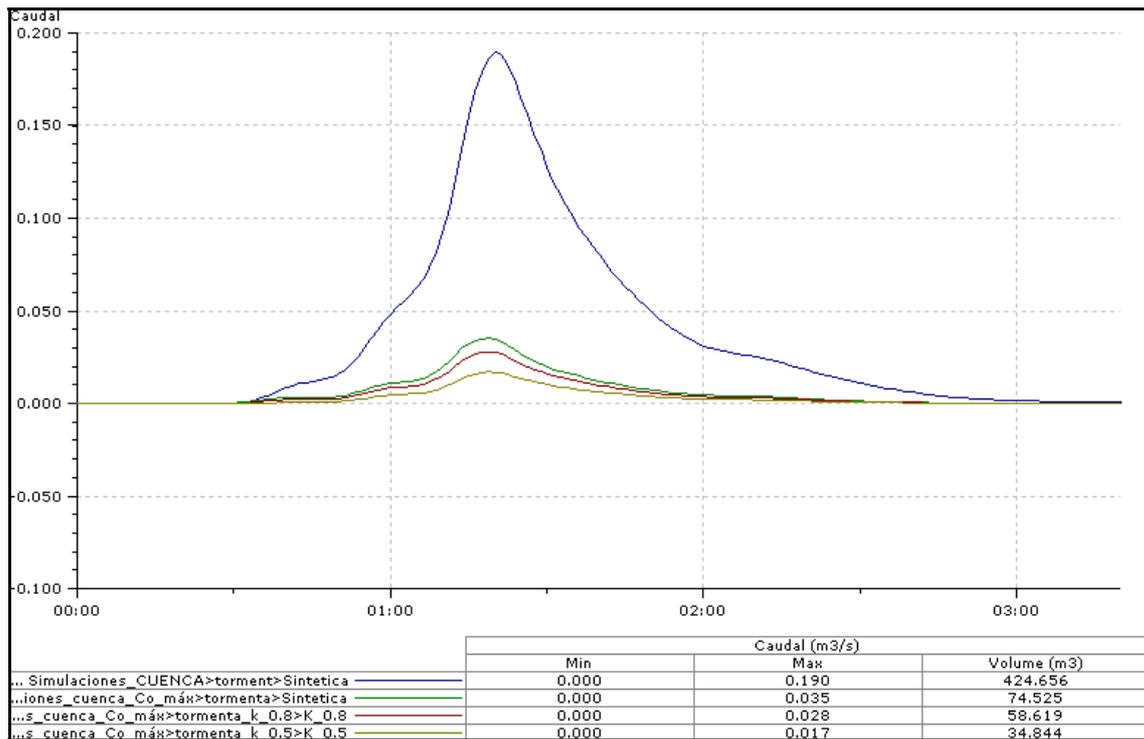


Gráfico 75.- Hidrogramas a la salida del colector 8 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

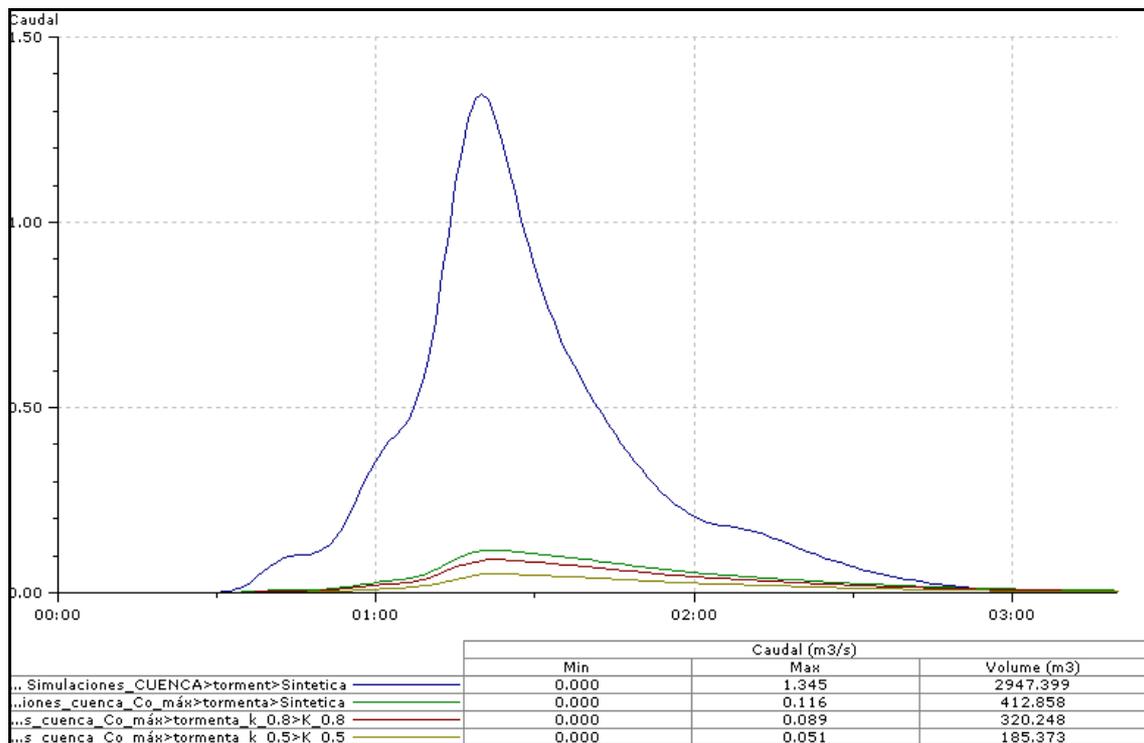


Gráfico 76.- Hidrogramas a la salida del colector 8 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0,8, 0,5$).

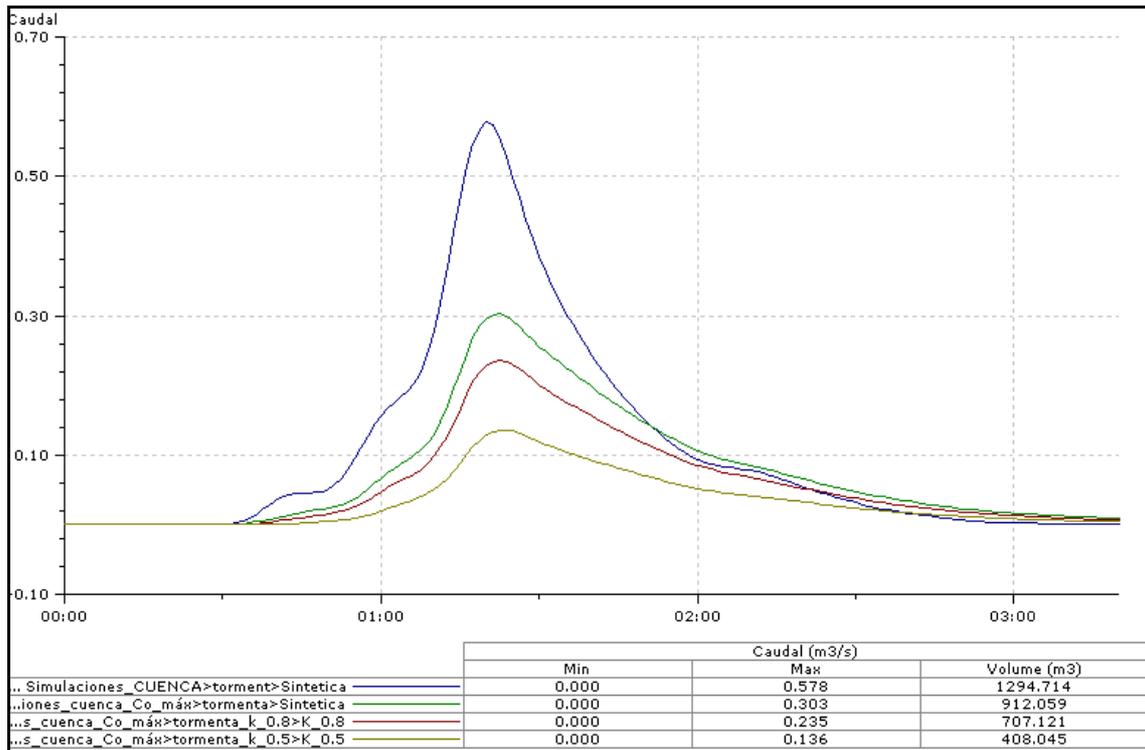


Gráfico 77.- Hidrogramas a la salida del colector 10 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0.8, 0.5$).

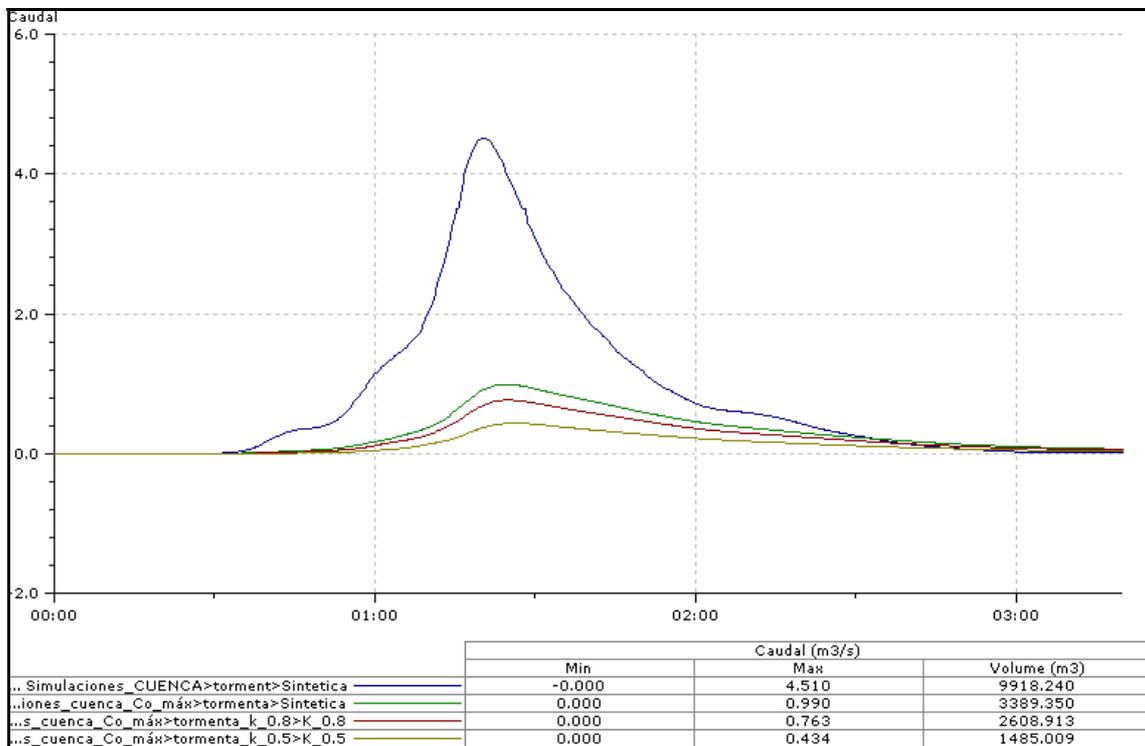


Gráfico 78.- Hidrogramas a la salida del colector 11 para las metodologías comparadas (modelo de cuenca global frente al modelo detallado de parcela sin bajantes y con imbornales, este último simulado con tres tormentas sintéticas de magnitud $k = 1, 0.8, 0.5$).

12 APÉNDICE 3:FOTOGRAFÍAS DE LAS SUPERFICIES ANALIZADAS



Ilustración 19.- Detalle de una de las piscinas de la zona



Ilustración 20.- Jardines de la parcelas



Ilustración 21.- Tejados a dos aguas de una de las viviendas



Ilustración 22.- Asfalto de una de las carreteras



Ilustración 23.- Pavimentos internos



Ilustración 24.- Detalle de otra carreteras de la urbanización.



Ilustración 25.- Zonas verdes dentro de la parcela



Ilustración 26.- Tejados planos, azoteas.



Ilustración 27.- Detalle de un tejado a dos aguas



Ilustración 28.- Pistas deportivas