



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Efectes sobre el flux al carrer dels coeficients de desguàs d'una reixa

Treball realitzat per:

Marina Salas Mantaràs

Dirigit per:

Martí Sánchez Juny i Jackson Téllez-Álvarez

Grau en:

Enginyeria Civil

Barcelona, 27 de juny de 2023

Departament DECA

TREBALL FINAL DE GRAU

Índex

1. Introducció	6
2. Objectius.....	8
3. Conceptes inicials	9
3.1. Cicle hidrològic	9
3.2. Creixement urbanístic en el procés d'escolament.....	9
3.3. Sistemes de captació.....	9
3.3.1. Definició dels sistemes de drenatge	9
3.3.2. Mecanisme de captació.....	10
3.3. Eficiència dels elements de captació.....	12
3.4. Criteris de perillositat	14
3.5. Processos de transformació pluja - escolament.....	15
4. Àrea d'estudi.....	18
4.1. Geometria.....	18
4.2. Pluviometria.....	19
4.3. Corba de derivació de cabals.....	22
5. Elaboració del model en HEC-HMS	25
5.1. Model en HEC-HMS	25
5.2. Dades a importar al programa	25
5.2.1. Modelització de les conques	25
5.2.2. Model meteorològic.....	30
5.2.3. Especificacions de control.....	31
5.2.4. Dades de la sèrie temporal	32
5.2.5. Dades aparellades	34
5.3. Resultats obtinguts	35
6. Elaboració del model en SWMM	38
6.1. Model en SWMM.....	38
6.2. Dades a importar al programa	38
6.2.1. Modelització de les conques	38
6.2.2. Model meteorològic.....	43
6.2.3. Especificacions de control.....	43
6.2.4. Dades de la sèrie temporal	46
6.2.5. Dades aparellades	47
6.3. Resultats obtinguts	47
7. Comparació de resultats obtinguts.....	51

8. Conclusions	54
9. Referències.....	60

Índex de taules

Taula 1. Dades utilitzades per la geometria del carrer.....	18
Taula 2. Dades utilitzades per la construcció del hietograma	21
Taula 3. Resultats obtinguts per al càlcul de la corba d'eficiència.	23
Taula 4. Dades geomètriques de les subconques.....	27
Taula 5. Dades a introduir del canal.....	28
Taula 6. Sèrie temporal introduïda en HEC-HMS.....	33
Taula 7. Cabals punta obtinguts per a diferents separacions de reixes.	35
Taula 8. Cabals punta obtinguts per a diferents separacions de reixes.....	48
Taula 9. Cabals punta obtinguts per a diferents separacions de reixes per ambdós programes.....	51

Índex de figures

Figura 1. Esquema de drenatge urbà dual (elaboració pròpia).....	10
Figura 2. Gràfic de l'evolució del cabal punta en funció de l'espaiament de les reixes de captació.	11
Figura 3. Esquema del cabal frontal i lateral que forma el cabal total circulant en un carrer (elaboració pròpia).	11
Figura 5. Esquema de la secció transversal completa.....	18
Figura 6. Gràfic de la corba IDF de la zona d'estudi.....	19
Figura 7. Hietograma sintètic resultant del mètode dels blocs alternats.	22
Figura 8. Gràfic corba de derivació (Cabal circulant – Cabal interceptat).	24
Figura 9. Interfície del model hidrològic d'HEC-HMS.....	25
Figura 10. Model de conques.....	26
Figura 11. Dades de la subconca.....	27
Figura 12. Dades del pla 1 de la subconca.	27
Figura 13. Dades del pla 2 de la subconca.	28
Figura 14. Dades del canal de la subconca.....	29
Figura 15. Dades dels elements de derivació.....	29
Figura 16. Dades de l'element de derivació.....	30
Figura 17. Corba introduïda de la funció del cabal.	30
Figura 18. Pestanya d'opcions dels elements de derivació.	30
Figura 19. Quadre del model meteorològic.	31
Figura 20. Pestanya de selecció de models de conques.....	31
Figura 21. Pestanya d'opcions del model meteorològic.....	31
Figura 22. Quadre d'especificacions de control.....	32
Figura 23. Quadre d'especificacions de control.....	32
Figura 24. Pestanya de selecció de la finestra de temps de la tempesta.....	32
Figura 25. Representació del hidrograma en HEC-HMS.	34
Figura 26. Informació de les dades aparellades.	34
Figura 27. Taula de la funció del cabal.....	34
Figura 28. Gràfic de la corba de derivació inserida en HEC-HMS.	35
Figura 29. Gràfic dels cabals punta per a diferents separacions de reixes obtinguts amb HEC-HMS.....	36

Figura 30. Gràfic representatiu del cabal circulant en el carrer per a la separació de 60 metres.....	37
Figura 31. Modelització de les conques.	39
Figura 32. Informació a incorporar en les subconques representant els paviments.....	39
Figura 33. Informació a inserir en les subconques representant les voreres.	40
Figura 34. Informació dels elements d'unió.	40
Figura 35. Dades a introduir pels conductes.	41
Figura 36. Selecció de la geometria del carrer.	42
Figura 37. Dades de la geometria del carrer.	42
Figura 38. Selecció de la reixa en cada carrer.	43
Figura 39. Opcions de simulació de SWMM.....	44
Figura 40. Dades de la simulació en SWMM.....	45
Figura 41. Passos de tems a considerar.	45
Figura 42. Sèrie temporal inserida al programa.....	46
Figura 43. Gràfic de la corba de derivació presentada en SWMM.....	47
Figura 44. Gràfic dels cabals punta per a diferents separacions de reixes obtinguts amb SWMM.....	49
Figura 45. Gràfic representatiu del cabal circulant en el carrer per a la separació de 55 metres.....	50
Figura 46. Gràfic dels cabals punta obtinguts amb HEC-HMS i SWMM per a una separació de reixes de 50 metres.....	51
Figura 47. Gràfic dels cabals punta obtinguts amb HEC-HMS i SWMM per a una separació de reixes de 55 metres.....	52
Figura 48. Gràfic dels cabals punta obtinguts amb HEC-HMS i SWMM per a una separació de reixes de 60 metres.....	52
Figura 49. Gràfic de la corba de derivació obtinguda.	55
Figura 50. Hietograma sintètic resultant del mètode dels blocs alternats.	56
Figura 51. Gràfic dels cabals punta per a diferents separacions de reixes obtinguts amb HEC-HMS.....	57
Figura 52. Gràfic dels cabals punta per a diferents separacions de reixes obtinguts amb SWMM.....	58

1. Introducció

Durant les últimes dècades s'ha impulsat la investigació en el marc del drenatge urbà amb l'objectiu d'evitar les inundacions en les ciutats que poden suposar un gran perill per la seguretat de les persones.

El gran creixement urbanístic de les ciutats ha provocat la impermeabilització del terreny i, en conseqüència, en limita l'absorció del terreny i provoca un augment del temps de concentració de les conques. En augmentar l'escolament, s'han de dissenyar les infraestructures de captació de les aigües pluvials de forma que puguin disminuir els cabals punta i augmentar la capacitat de la xarxa de drenatge per desallotjar ràpidament la major quantitat d'aigua possible (Cosco et al., 2020).

A més, a causa del canvi climàtic, s'ha observat com en la vessant mediterrània les pluges torrencials tenen cada vegada més intensitat i són més esporàdiques, la qual cosa suposa quantitats d'aigües pluvials inusualment més grans en curts períodes de temps (Agència Estatal de Meteorologia, s.f.). Per això és important dissenyar òptimament els sistemes de captació per interceptar els màxims volums d'aigua possible i assegurar que l'aigua circulant pels carrers compleix uns criteris de perillositat que no posin en risc als ciutadans i no malmetin el funcionament dels carrers.

En principi, es va plantejar que podria haver sigut un problema de disseny dels sistemes de col·lectors (xarxa de drenatge) de la ciutat que no havien estat dissenyats per conduir volums tan grans d'aigua. Es va comprovar llavors que els col·lectors no assolien la seva capacitat màxima i que es trobaven buits. Atenent als estudis hidrològics realitzats, es preveien uns cabals o hidrogrames d'entrada a les xarxes de col·lectors dissenyats d'acord amb la pluviometria de la zona, per això es va plantejar que, al no ser el sistema de clavegueram el factor causant de les inundacions de la ciutat, el problema consistia en que no s'aconseguia introduir tota l'aigua d'escolament a la xarxa en els llocs programats, per la qual cosa es va començar a investigar pel funcionament del sistema de drenatge superficial (els carrers), el qual està format pels elements de captació de la ciutat: les reixes de drenatge i els embornals (Gómez et al, 2011).

Per tal de resoldre el problema concernent a la introducció de l'aigua pluvial en la xarxa, es va estudiar el funcionament d'aquests sistemes de captació i es van realitzar una sèrie d'assaigs en el Laboratori d'Hidràulica de l'Escola de Camins. Els resultats obtinguts van permetre caracteritzar el funcionament hidràulic de les reixes i va aprofundit en l'estudi del drenatge superficial.

Actualment aquests processos hidrològics de transformació de pluja a cabal es modelitzen amb programes informàtics, entre ells el programa HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center- Hydrologic Modeling System), el programa EPA SWMM (Storm Water Management Model), el programa InfoWorks ICM (Integrated Catchment Modeling), Mike Urban, XPSWMM, etc.

Aquests softwares permeten la modelització hidrològica i de drenatge pluvial d'una zona d'estudi determinada per analitzar el comportament de l'aigua en xarxes de clavegueram i recentment els programes van incorporant durant els últims anys funcions per modelitzar la captació de l'escolament dels carrers.

Aquestes noves funcions inclouen la incorporació d'elements de captació d'aigües pluvials com reixes i embornals i innovacions en les geometries del carrer que permeten modelitzar els paviments, voreres i canalons.

2. Objectius

Arran de la incorporació de noves funcions del programa de llicència lliure EPA SWMM 5.2 que permetien modelar la captació de l'escolament dels carrers mitjançant nous elements de captació i incorporaven una nova geometria per representar les dimensions dels carrers, es va proposar realitzar una comparació dels resultats obtinguts amb aquest programa amb els resultats obtinguts amb el programa HEC-HMS, un altre programa de modelització hidrològica de llicència lliure, i que és el que s'havia estat utilitzant fins ara.

En aquest treball es proposa modelitzar la resposta hidrològica d'un carrer d'una geometria determinada per a un episodi de pluja torrencial de Barcelona en aquests dos programes diferents. S'explicarà la metodologia per introduir les dades en ambdós models i s'analitzaran els resultats obtinguts.

Prèviament a la realització dels models, s'explicaran els conceptes relacionats amb el funcionament dels sistemes de captació i els paràmetres que intervenen en la transformació pluja cabal. També s'explicaran els criteris de perillositat aplicats en el treball, així com les conseqüències del creixement urbanístic en el procés d'escolament.

Primer es realitzarà una modelització en HEC-HMS en la qual s'obtingui una separació de reixes adequada que assegurï els criteris de perillositat que s'explicaran en la següent secció. Un cop obtinguda aquesta separació de reixes òptima, es modelitzarà en EPA SWMM la mateixa situació i s'estudiaran els resultats obtinguts.

En resum, els objectius del treball són:

- Anàlisi del comportament de l'aigua als carrers sota un episodi de pluja.
- Aplicació de dos models diferents: HEC-HMS i SWMM, per la simulació dels processos hidràulics i hidrològics que condicionen en drenatge urbà.
- Obtenció de la separació de reixes adequada sota uns criteris de perillositat per al model del programa HEC-HMS.
- Representació i simulació i comparació de la modelització duta a terme amb HEC-HMS en el programa SWMM.

3. Conceptes inicials

3.1. Cicle hidrològic

La hidrologia urbana i la ciència del drenatge urbà gira entorn l'estudi del cicle hidrològic. S'anomena cicle hidrològic perquè és un procés que no té fi ni final i succeeix contínuament. En aquest cicle, l'aigua s'evapora dels oceans i de la superfície terrestre i passa a formar part de l'atmosfera. Un cop a l'atmosfera, es condensa i precipita a la superfície terrestre o als oceans. Aquesta aigua pot ser interceptada per la vegetació, formant les aigües superficials; infiltrada pel terra, formant les aigües subterrànies; o bé abocar als rierols com a esorrentia superficial (Chow, 1988).

De la totalitat de l'aigua circulant, una part d'ella s'evapora retornant a l'atmosfera. La resta, abocarà als oceans i tornarà a evaporar-se novament, repetint el cicle.

La comprensió del cicle hidrològic resulta essencial per al disseny de les infraestructures del drenatge urbà.

3.2. Creixement urbanístic en el procés d'escolament

Com s'ha comentat en la secció anterior, el cicle hidrològic és un fenomen natural complex de circulació de l'aigua a la Terra. Aquest cicle, però, es veu afectat per l'activitat humana i una de les accions que pertorba el cicle hidrològic a les ciutats és el gran creixement urbanístic que ha succeït durant les últimes dècades.

La urbanització de les conques modifica el cicle natural hidrològic davant d'un episodi pluviomètric. Aquesta urbanització altera les xarxes de drenatge urbà natural a l'incrementar les zones impermeables en superfície, el que suposa una disminució de l'aigua interceptada per la vegetació i una disminució de l'aigua infiltrada en el sòl. Aquesta impermeabilització modifica els hidrogrames i provoquen un augment del volum d'escolament, un augment del cabal màxim i una disminució del temps de concentració, complicant el disseny per drenar de la manera més eficient i ràpida les aigües pluvials per evitar problemes per inundacions.

És per això que resulta important dissenyar de forma eficient els sistemes de captació del drenatge superficial per atenuar aquestes modificacions degudes al creixement urbanístic.

3.3. Sistemes de captació

3.3.1. Definició dels sistemes de drenatge

Durant els episodis de pluja torrencial en les grans ciutats, els sistemes de captació presents, com reixes i embornals, recullen una part de l'escolament i la introdueixen en els sistemes de sanejament.

La ciència del drenatge urbà dual estudia la interacció entre aquests dos sistemes: el drenatge superficial i el drenatge subterrani.

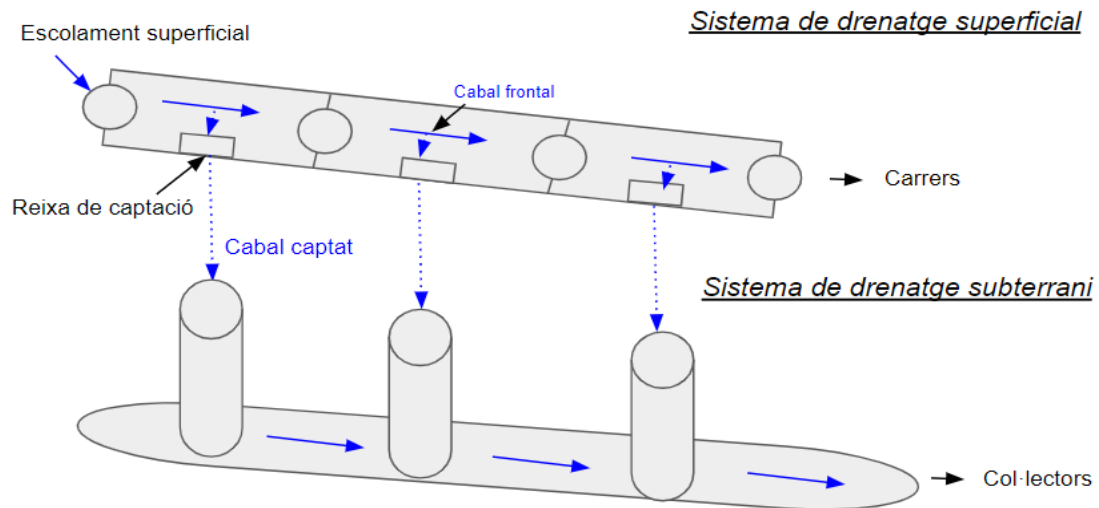


Figura 1. Esquema de drenatge urbà dual (elaboració pròpia)

L'anàlisi de la interacció entre aquests dos sistemes abasta l'estudi tant dels processos hidrològics que tenen lloc en entorns urbans com el disseny òptim de les infraestructures per tal de gestionar les aigües pluvials i minimitzar els problemes d'inundacions (Russo et al. 2019).

Aquest treball es centrarà únicament en la resposta hidràulica del sistema de drenatge superficial per on circula l'aigua en superfície, amb la finalitat d'analitzar el funcionament dels sistemes de captació en diferents models hidràulics, com l'HEC-HMS i el SWMM.

3.3.2. Mecanisme de captació

En aquest treball es proposa estudiar la resposta del sistema de drenatge superficial format per reixes com a elements de captació per analitzar la resposta hidràulica de les aigües circulants pels carrers.

Com s'ha mencionat, la pluja sobre els paviments i voreres és recollida per les reixes de captació, la qual la introdueix en la xarxa de sanejament. En el procés de disseny d'una xarxa de drenatge, es fa la hipòtesi implícita que la pluja caiguda que es transforma en escolament superficial, entra en la xarxa de drenatge en la mateixa zona on cau (Gómez, 2007). Aquestes zones, en un model hidrològic, corresponen a les subconques hidrològiques que drenen les àrees del terreny en un punt comú. En la hidrologia urbana superficial, el punt de drenatge correspon als punts de captació.

Aquests elements tenen per objectiu captar l'aigua que drena en aquest punt, però una part de l'escolament que hauria de ser introduït en un primer punt de captació no és captat i aquest volum d'aigua passa al segon punt de captació. De la mateixa manera, el cabal que no és

captat pel segon element serà passat al tercer element i així successivament, per la qual cosa els cabals circulants pels carrers creixen fins a un punt màxim que depèn de la pluja, la geometria del carrer i la distància entre reixes.

Fixada una pluja i una geometria determinada, es pot limitar el cabal que discorre per un carrer canviant la separació de les reixes. El següent gràfic mostra com evoluciona el cabal punta per a un episodi de pluja determinat a mesura que circula pel carrer.

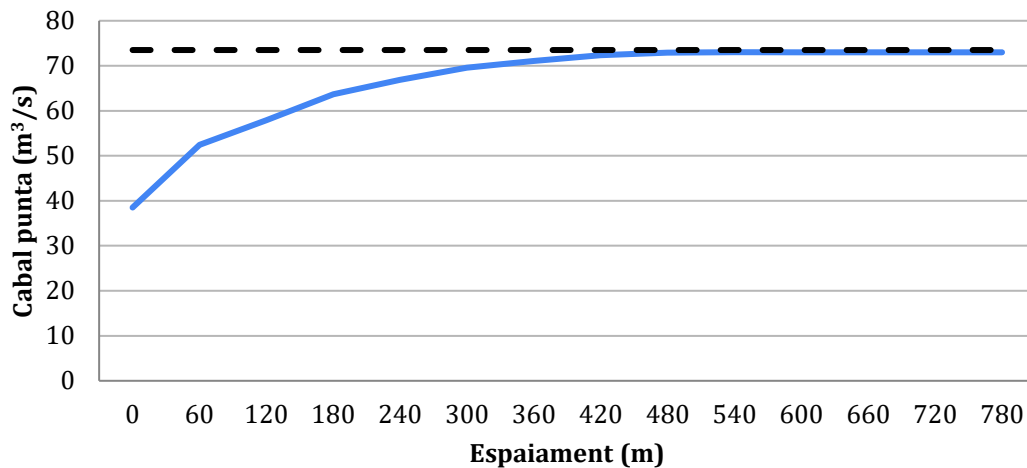


Figura 2. Gràfic de l'evolució del cabal punta en funció de l'espaiament de les reixes de captació.

Per tant, els sistemes de captació recullen l'aigua que circula pel pendent transversal de les voreres i paviments, definit com el cabal transversal; i també recullen l'aigua circulant pel pendent longitudinal que circula d'aigües amunt a aigües avall del carrer. El cabal total serà expressat com:

$$Q_{carrer} = Q_{frontal} + Q_{transversal}$$

Aquest cabal total es representa gràficament en la figura següent:

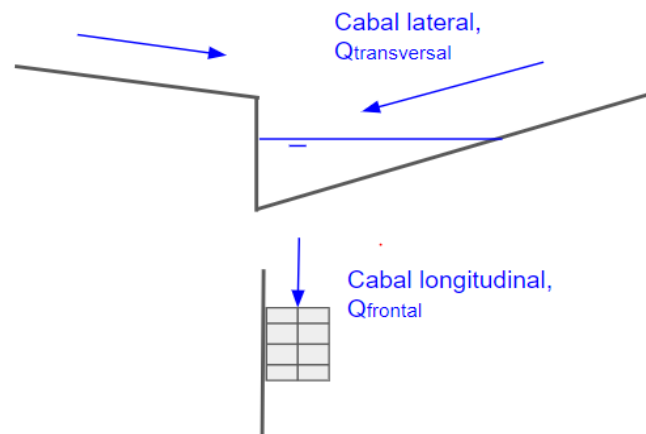


Figura 3. Esquema del cabal frontal i lateral que forma el cabal total circulant en un carrer (elaboració pròpia).

3.3. Eficiència dels elements de captació

El comportament de les reixes va ser estudiat mitjançant assajos experimentals al Laboratori d'Hidràulica de l' E.T.S d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Aquests estudis van proporcionar resultats referents a l'eficiència que presenten els elements de captació (Gómez & Russo 2011; Tellez-Alvarez et al 2020; Gómez et al 2019).

Es defineix l'eficiència de la reixa com el quocient del cabal interceptat entre el cabal del carrer esmentat anteriorment, expressat com:

$$E = \frac{Q_{interceptat}}{Q_{carrer}}$$

on,

- E : Eficiència hidràulica de la reixa de captació.
- $Q_{interceptat}$: Cabal interceptat per la reixa.
- Q_{carrer} : Cabal circulat pel carrer, suma del cabal transversal i longitudinal.

Els resultats experiments portats a terme van mostrar com les reixes tenen una eficiència molt pobre sota condicions crítiques, al voltant d'un 10-20 % (Russo, 2021).

Es va concloure que l'eficiència hidràulica de les reixes de captació depenien de la geometria de la reixa, del cabal circulat pel carrer immediatament abans de la reixa i del calat de l'aigua. Es defineix amb la següent llei potencial desenvolupada per (Martínez & Gómez, 2000):

$$E = A \cdot \left(\frac{Q}{y}\right)^{-B}$$

on,

- E : Eficiència hidràulica de la reixa de captació.
- Q : Cabal circulat aigües amunt de la reixa, expressat en litres / segon.
- y : Calat, expressat en metres.
- A : Paràmetre d'ajust. És un coeficient que depèn de la reixa assajada, vàlid per reixes fins a 2 metres de longitud i 2 metres d'amplada. Es defineix com (Gómez & Russo, 2011):

$$A = \frac{1,988 A_g^{0,405}}{p^{0,190}(n_t + 1)^{0,088}(n_l + 1)^{0,012}(n_d + 1)^{0,082}}$$

- B : Paràmetre d'ajust. És un coeficient que depèn del model de reixa escollida, vàlid per reixes fins a 2 metres de longitud i 2 metres d'amplada. Es defineix com (Gómez & Russo, 2011):

$$B = 1,346 \frac{L^{0,179}}{W^{0,394}}$$

on,

- A_g : Àrea dels forats de la reixa (m^2)
- p : Percentatge de l'àrea de forats respecte l'àrea total de la reixa (%).
- N_t : Nombre de barres transversals.
- N_l : Nombre de barres longitudinals.
- N_d : Nombre de barres diagonals.
- L : Longitud de la reixa (cm).
- W : Amplada de la reixa (cm).

3.4. Criteris de perillositat

A l'Institut de Recerca FLUMEN s'han portat a terme estudis per analitzar la perillositat a la que es veuen exposades les persones durant episodis en inundacions en zones urbanes, estudiant els límits d'estabilitat d'aquests, quan creuen a través d'una corrent d'aigua, a partir d'assajos experimentals (Martínez, 2016). Juntament amb els resultats d'aquests estudis experimentals i els resultats obtinguts de les simulacions numèriques realitzades, s'ha estudiat quines variables influeixen en la perillositat de les inundacions. Diferents autors han analitzat els factors influents i la gran majoria d'ells conclou que els paràmetres que defineixen la perillositat són el calat (y) i la velocitat (v).

Els criteris de perillositat per a inundacions són aplicats de forma diferent en diferents països i en aquest treball s'exposen quatre criteris diferents per establir el nivell de risc.

Aquests quatre criteris de perillositat a aplicar són:

1. Calat màxim
2. Velocitat màxima
3. Estabilitat al bolcament, expressat com $[v \cdot y]$
4. Estabilitat al lliscament, expressat com $[v^2 \cdot y]$

D'una banda, en aquest treball es proposa implementar el criteri del PICBA06 (Pla Integral de Clavegueram de Barcelona), CLABSA (2006), el qual recomanava els dos següents nivells de servei per els carrers urbans (Martínez, 2016):

- Calat màxim : $y_{max} = 6 \text{ cm}$
- Velocitat màxima : $v_{max} = 1,5 \text{ m/s}$

Amb aquests dos nivells de servei es limiten els dos primers criteris de perillositat a incorporar. Es consideraran els nivells d'aigua per sota de sis centímetres i les velocitats en el sistema de drenatge superficial inferiors a 1,5 metres per segon, amb l'objectiu d'avaluar la perillositat durant els episodis de pluja torrencials, els quals més tard limitaran l'espaiament de les reixes de captació.

D'altra banda, s'aplicaran els dos últims criteris de perillositat, els quals es recomanen els següents valors:

- Estabilitat al bolcament : $[v \cdot y]_{max} < 0,45 \text{ m}^2/\text{s}$
- Estabilitat al lliscament : $[v^2 \cdot y]_{max} < 1 \text{ m}^3/\text{s}$

3.5. Processos de transformació pluja - escolament

L'anàlisi del procés de transformació pluja - escolament es pot efectuar a partir de diferents metodologies. L'escolament de l'aigua sobre un pla es descriu amb les equacions de Saint Venant, un conjunt d'equacions diferencials parcials que descriuen el flux de l'aigua en canals oberts, les quals es basen en l'equació de continuïtat i l'equació de la quantitat de moviment.

Com la seva utilització suposa un excés de càlcul i un cost computacional important, aquestes equacions es simplifiquen formant altres metodologies que aproximem el càlcul de l'escolament. Entre d'altres, s'apliquen mètodes d'encaminament distribuïts unidimensionalment com l'ona cinemàtica, l'ona difusiva o l'ona dinàmica.

Les equacions de Saint Venant venen definides per (Bladé et al. 2009; Bladé and Gómez-Valentín 2006; Chanson 2004):

- Equació de continuïtat:
 - Forma conservativa

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

- Forma no conservativa

$$v \frac{\partial y}{\partial x} + y \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0$$

- Equació de la continuïtat de moviment
 - Forma conservativa

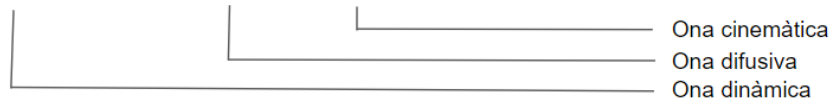
$$\frac{I}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{I}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial t} - g(S_o - S_f) = 0$$

on,

- $\frac{I}{A} \frac{\partial Q}{\partial t}$: terme d'acceleració local
- $\frac{I}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right)$: terme d'acceleració convectiva.
- $g \frac{\partial y}{\partial t}$: terme de força de pressió.
- gS_o : terme de força de gravetat.
- gS_f : terme de força de fricció.

- Forma no conservativa

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial t} - g(S_o - S_f) = 0$$



En aquest apartat s'expliquen les dues metodologies seleccionades en els models hidrològics: la transformació pluja - escolament mitjançant l'ona cinemàtica, utilitzada en el programa HEC-HMS; i la transformació pluja - escolament mitjançant l'ona dinàmica, utilitzada en el programa SWMM.

Per una banda, el procés de transformació per l'ona cinemàtica es basa en la utilització conjunta d'una informació topogràfica de bona qualitat i de suficient detall espacial i d'una descripció matemàtica el més precisa possible del moviment de l'aigua en la superfície de la conca (Gómez, 2007).

L'aproximació basada en l'ona cinemàtica considera les forces del moviment de l'aigua, la gravetat i la fricció com les forces més importants, i s'assumeix que si s'analitza el flux en un pla inclinat, en una amplada unitària, el cabal unitari és proporcional al calat, expressat com (Gómez, 2007):

$$q = \alpha y^n$$

on,

- q : Cabal unitari.
- y : Calat.
- α : coeficient que depèn del pendent del pla i de la rugositat.

Com s'ha vist en les equacions de Saint Venant, l'aproximació de l'ona cinemàtica negligeix l'acceleració local, l'acceleració convectiva i els termes de pressió, és a dir, assumeix que $S_o = S_f$ i les forces de fricció i gravetat es balancen entre si (Chow, 1988).

Aquest enfoc simplificat considera que la velocitat del flux predomina sobre l'acceleració i la resistència del flux. A més, s'assumeix que la precipitació es distribueix de forma uniforme sobre les conques i que aquesta es desplaça de forma immediata cap els punts de sortida de la conca. L'ona d'escolament resultant viatja sense canvis en aquest procés de transformació i en determina d'aquesta manera el temps de concentració de la conca.

D'altra banda, l'aproximació pel mètode de l'ona dinàmica és un mètode més complet que considera tant la velocitat, l'acceleració del flux i els processos de resistència i emmagatzematge que tenen lloc en la conca hidrològica.

Com s'ha vist en les equacions de Saint Venant exposades en la secció anterior, el model d'ona dinàmica incorpora tots els termes d'acceleració i pressió per a l'equació de quantitat de moviment (Chow, 1988).

D'igual forma que pel mètode de l'ona cinemàtica, s'assumeix que la precipitació es distribueix de forma uniforme sobre les conques i que aquesta es desplaça cap els punts de sortida de la conca.

4. Àrea d'estudi

En aquest treball es modelitza una secció de carrer tipus que es pot trobar a qualsevol nucli urbà, com la ciutat de Barcelona.

Per descriure la zona d'anàlisi, es definiran les característiques geomètriques del carrer a analitzar, la pluviometria que s'introduirà en el model, uns valors de precipitacions típics de Barcelona; i la corba de diversió (cabal circulat – cabal capturat) que s'haurà d'introduir a les reixes.

4.1. Geometria

La zona d'estudi consisteix en una secció de carrer de pendent longitudinal constant que contarà amb una amplada de carrer de 22 metres, distribuïts en dues amplades de voreres de 5 metres i dues amplades de paviments de 6 metres.

S'analitzarà mig carrer al ser aquest simètric i s'introduiran les dades geomètriques següents:

Dades de mitja secció de carrer	Valor
Amplada de la vorera	5 m
Amplada del paviment	6 m
Pendent transversal vorera	0.015
Pendent transversal paviment	0.02
Coefficient de Manning de la vorera	0.020
Coefficient de Manning del paviment	0.016
Pendent longitudinal	0.01

Taula 1. Dades utilitzades per la geometria del carrer.

La següent figura exemplifica la secció transversal a estudiar:

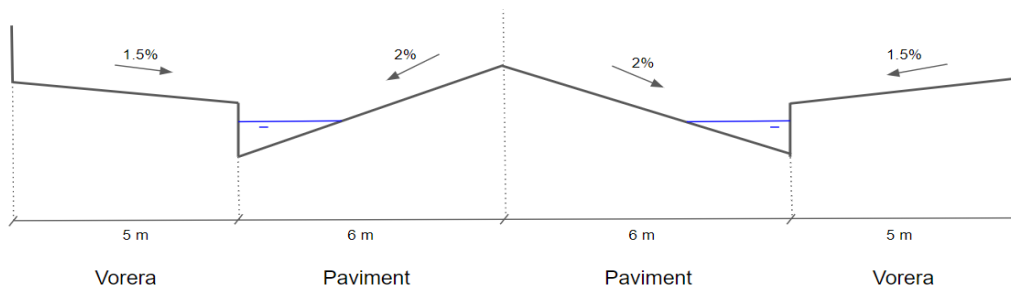


Figura 4. Esquema de la secció transversal completa.

4.2. Pluviometria

La pluviometria utilitzada en aquest treball correspon a una corba IDF (Intensitat- Durada- Freqüència) emprada a la ciutat de Barcelona per a representar episodis de pluja torrencials de període de retorn de 10 anys (Nanía et al, 2006). Aquesta corba IDF té la següent expressió:

$$I \text{ (mm/h)} = \frac{4200}{D \text{ (min)} + 15}$$

on:

- I : Intensitat de la precipitació, expressada en mil·límetres / hora.
- D : Durada de la precipitació, expressada en minuts

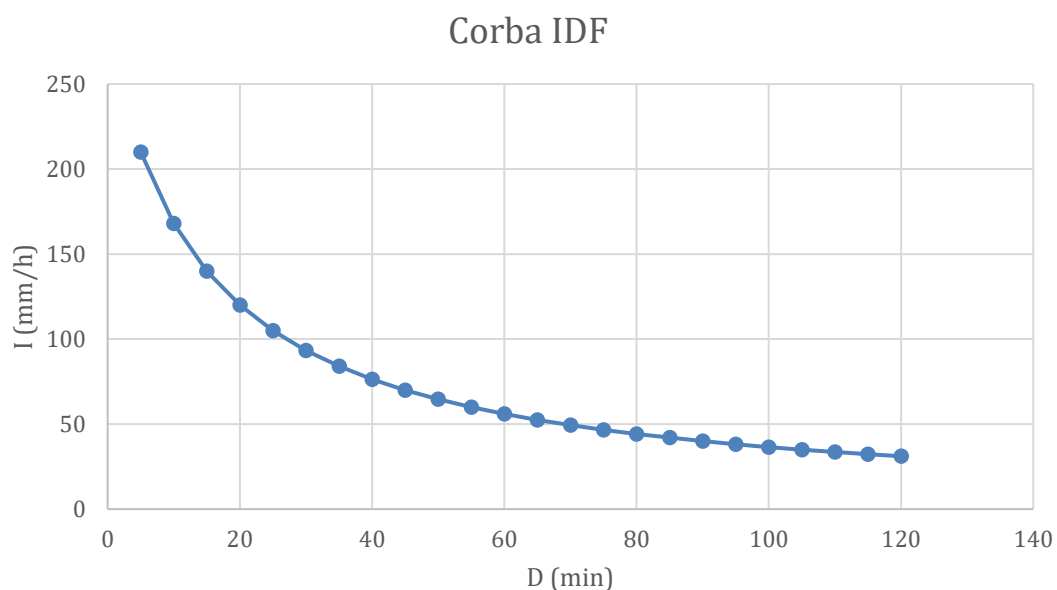


Figura 5. Gràfic de la corba IDF de la zona d'estudi.

Durant molts anys, en nombrosos mètodes de disseny hidrològic s'ha aplicat el mètode racional, el qual només el cabal punta és considerat. No es tenia en consideració de la distribució temporal de la precipitació (Chow, 1988). Més tard es varen desenvolupar noves metodologies que predeien hietogrames sintètics a partir de corbes IDF més fiables per al disseny de drenatge de les ciutats. Un d'aquests mètodes és el mètode dels blocs alternats, una metodologia senzilla i ràpida que permet representar aproximadament la distribució temporal de la pluja.

En aquest mètode es divideix la durada de l'episodi pluviomètric en intervals de temps curts i s'assignen intensitats constants per a cada període de temps.

En aquest treball s'ha considerat una durada de la pluja de dues hores i s'ha dividit la tempesta en intervals de cinc minuts. Per a cada durada de temps s'assigna una intensitat constant corresponent a la corba IDF descrita i es calcula la pluja com:

$$P = (D/60) \cdot I$$

on:

- P : Pluja caiguda per a un interval de temps, expressada en mil·límetres.
- D : Durada, interval de temps, expressat en minuts.
- I : Intensitat de la precipitació, expressada en mil·límetres / hora.

Es calcula la diferència de la precipitació entre els successius intervals de temps de durada de cinc minuts i s'obté la quantitat de precipitació a afegir per cada interval de temps addicional i durada. Aquests increments, o blocs, són ordenats en una seqüència de temps amb la intensitat màxima localitzada al centre del temps de la tempesta considerada i els blocs restants s'ordenen en un ordre descendent alternatiu de dreta a esquerra del bloc central per formar el hietograma (Chow, 1988).

La taula següent recull els càlculs emprats:

D (min)	I (mm/h)	P(mm)	Dif P (mm)	t (min)	P (mm) alternat	I (mm/h) alternat
0	0	0	0	0	0	0
5	210	17.5	17.5	0	0.323	3.87
10	168	28	10.5	5	0.380	4.56
15	140	35	7	10	0.454	5.45
20	120	40	5	15	0.552	6.63
25	105	43.75	3.75	20	0.686	8.23
30	93.33	46.66	2.91	25	0.875	10.5
35	84	49	2.33	30	1.153	13.84
40	76.36	50.90	1.90	35	1.590	19.09
45	70	52.5	1.59	40	2.33	28
50	64.61	53.84	1.34	45	3.75	45
55	60	55	1.15	50	7	84
60	56	56	1	55	17.5	210
65	52.5	56.87	0.875	60	10.5	126
70	49.4	57.6	0.772	65	5	60
75	46.6	58.3	0.686	70	2.91	35
80	44.2	58.94	0.614	75	1.90	22.9
85	42	59.5	0.552	80	1.34	16.15
90	40	60	0.5	85	1	12
95	38.1	60.4	0.454	90	0.772	9.26
100	36.5	60.8	0.415	95	0.614	7.36
105	35	61.25	0.380	100	0.5	6
110	33.6	61.6	0.35	105	0.415	4.98
115	32.3	61.9	0.323	110	0.35	4.2
120	31.1	62.2	0.299	115	0.299	3.58

Taula 2. Dades utilitzades per la construcció del hietograma

A continuació es troba el hietograma sintètic resultant:

Hietograma sintètic pel mètode dels blocs alternats

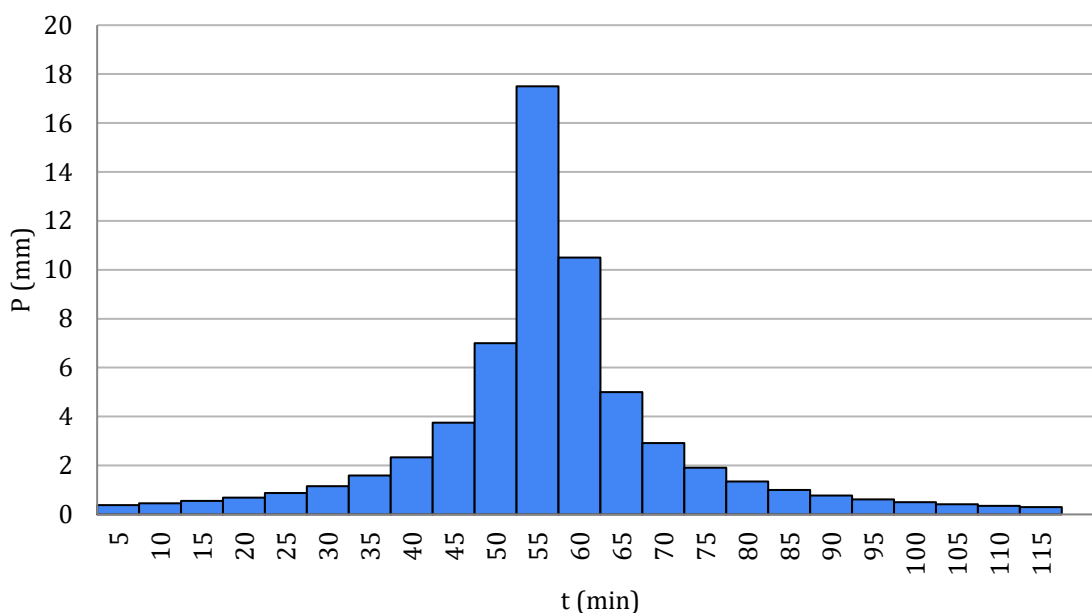


Figura 6. Hietograma sintètic resultant del mètode dels blocs alternats.

4.3. Corba de derivació de cabals

Amb la finalitat de calcular la corba de derivació, la corba que dona la relació entre el cabal circulant immediatament abans de la reixa i el cabal interceptat per aquesta, es calcula primer el cabal circulant pel carrer segons el calat de la làmina d'aigua per a aquesta geometria de carrer definida anteriorment, amb l'equació d'Izzard (Gómez & Russo, 2010):

$$Q = \frac{C_f}{n} \cdot S_x^{5/3} \cdot T^{8/3} \cdot S_0^{1/2}$$

On,

- Q : Cabal, expressat m³/s.
- C_f : constant (= 0,376 m^{1/3} /s en el Sistema Internacional).
- S_x : Pendent transversal (m/m).
- T : Amplada de la superfície, expressat en metres.
- n: Coeficient de rugositat de Manning.

En funció del calat, es calcula el cabal que circula per aquesta secció de carrer, així com la respectiva velocitat. Amb la fórmula potencial de l'eficiència, es calcula darrerament el cabal interceptat per a cada valor de calat, com es mostra en la figura següent:

Calat (m)	Q circulant (m ³ /s)	Velocitat (m/s)	Eficiència	Q interceptat (m ³ /s)
0	0	0	0	0
0,01	0,000545	0,218	3,944	0,00215
0,02	0,00346	0,346	1,620	0,00561
0,03	0,0102	0,453	0,963	0,00983
0,04	0,0219	0,549	0,665	0,0146
0,05	0,0398	0,637	0,500	0,0199
0,052	0,0442	0,654	0,475	0,0210
0,054	0,0489	0,671	0,452	0,0221
0,056	0,0539	0,687	0,432	0,0233
0,058	0,0592	0,704	0,413	0,0244
0,06	0,0648	0,720	0,395	0,0256
0,07	0,0977	0,798	0,324	0,0317
0,08	0,139	0,872	0,273	0,0381
0,09	0,191	0,943	0,235	0,0449
0,1	0,253	1,012	0,205	0,0520
0,11	0,3264	1,079	0,181	0,0593
0,12	0,411	1,143	0,162	0,0669
0,13	0,509	1,206	0,146	0,0747
0,14	0,620	1,267	0,133	0,0828
0,15	0,746	1,326	0,122	0,0911
0,16	0,886	1,385	0,112	0,0996
0,17	1,0420	1,442	0,103	0,108
0,18	1,213	1,498	0,0966	0,117
0,19	1,401	1,553	0,0901	0,126
0,2	1,607	1,607	0,0843	0,135

Taula 3. Resultats obtinguts per al càlcul de la corba d'eficiència.

Per als calats 0,01 i 0,02 metres s'han obtingut eficiències majors a 1, per la qual cosa s'ha modificat l'eficiència manualment igualant-la al màxim valor, a 1, obtenint que tot el cabal circulant és captat per la reixa.

En resulta el següent gràfic:

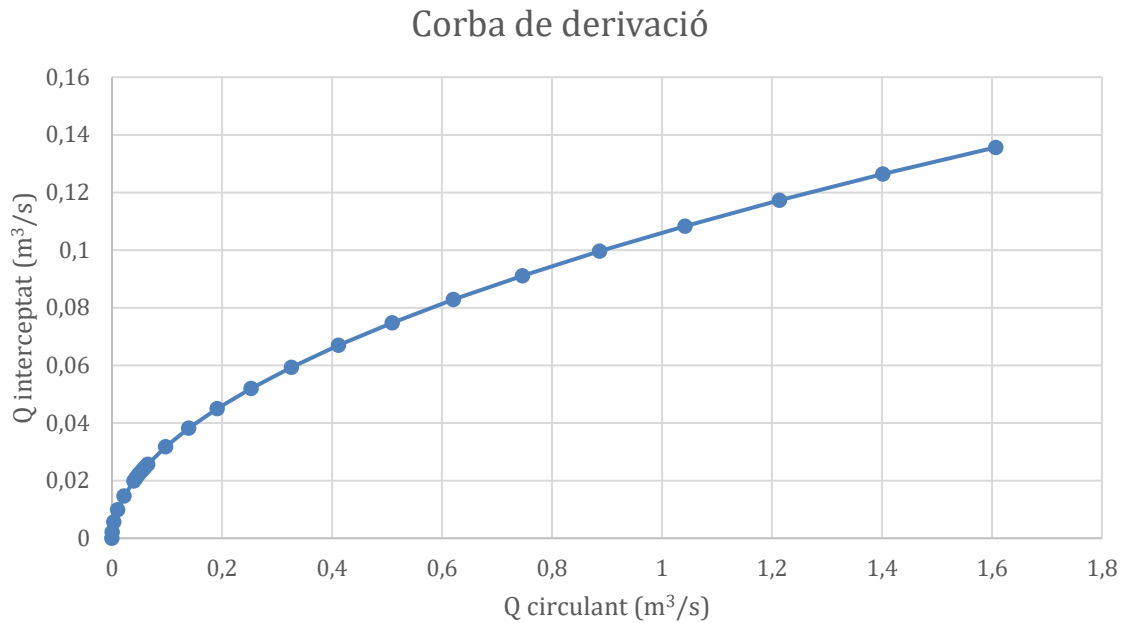


Figura 7. Gràfic corba de derivació (Cabal circulat – Cabal interceptat).

De la taula anterior, s'extreu que el primer criteri que limita el cabal circulat per la secció de carrer és el calat màxim, en 6 centímetres, ja que els valors per als altres tres criteris de perillositat queden per sota dels valors límits:

- Calat màxim : $y = y_{max} = 6 \text{ cm}$
- Velocitat màxima : $v = 0,7203 \text{ m/s} < v_{max} = 1,5 \text{ m/s}$
- Estabilitat al bolcament: $[v \cdot y] = 0,7203 \cdot 0,06 = 0,0431 \frac{\text{m}^2}{\text{s}} < [v \cdot y]_{max} < 0,45 \text{ m}^2/\text{s}$
- Estabilitat al lliscament : $[v^2 \cdot y] = 0,7203^2 \cdot 0,06 = 0,0311 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} < [v^2 \cdot y]_{max} < 1 \text{ m}^3/\text{s}$

Per tant, el cabal límit circulat pel carrer que s'haurà d'obtenir per ambdós models és $0,0648 \text{ m}^3/\text{s}$, és a dir, 64,8 l/s.

5. Elaboració del model en HEC-HMS

5.1. Model en HEC-HMS

El programa HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modelling System) va ser desenvolupat pel Cos d'Enginyers de l'Exèrcit dels Estats Units. És una eina que serveix per modelitzar i simular processos hidrològics de conques hidrogràfiques (Feldman & Center, 2000).

Aquest programa, de distribució lliure, és àmpliament utilitzat en l'àmbit de la hidrologia urbana. És una eina útil per a la gestió de l'aigua, ja que permet simular episodis de pluges i obtenir resultats de les respostes hidrològiques de les conques. A més, el programa possibilita l'anàlisi de la transformació pluja – escolament, permetent l'estudi del drenatge urbà, estudis d'avingudes i estudis de pronòstics de flux, entre d'altres.

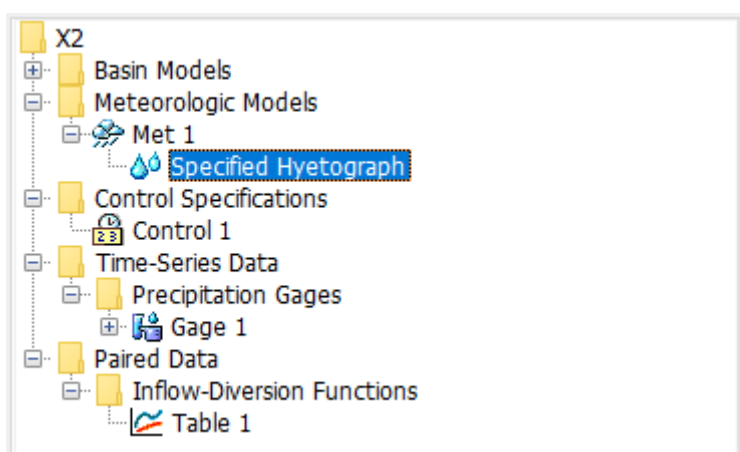


Figura 8. Interfície del model hidrològic d'HEC-HMS.

5.2. Dades a importar al programa

5.2.1. Modelització de les conques

El primer pas ha consistit en definir les conques i les seves característiques mitjançant el model de conques de HEC-HMS (Basin Model).

En aquesta interfície es creen els elements físics de l'estructura de la conca del model hidrològic. Aquest pot està format per:

- Subconques (subbasins)
- Trams de trànsit (routing reach)
- Embassaments (reservoirs)
- Unions (junctions)
- Derivacions (diversions)
- Fonts (sources)
- Embornals (sinks)

L'estructura de la conca està formada per un total de 30 subconques i 30 derivacions. En aquest model es representen els carrers com les subconques i les reixes de captació com elements de derivació. Aquests elements de derivació representen estructures hidràuliques que permeten extreure una certa quantitat de cabal i derivar-ho a altres punts. Per això s'utilitzaran com reixes, per assignar-li les corbes de cabal circulat – cabal interceptat i que el programa corri la simulació tenint en compte aquestes cabal interceptat.

Per tant, cada subconca representarà mig carrer (ja que es considera mitja secció) i el model bàsicament consistirà en 30 conques i 30 elements de derivació connectats alternament. La figura següent mostra la pantalla de visualització del model de conques creat:

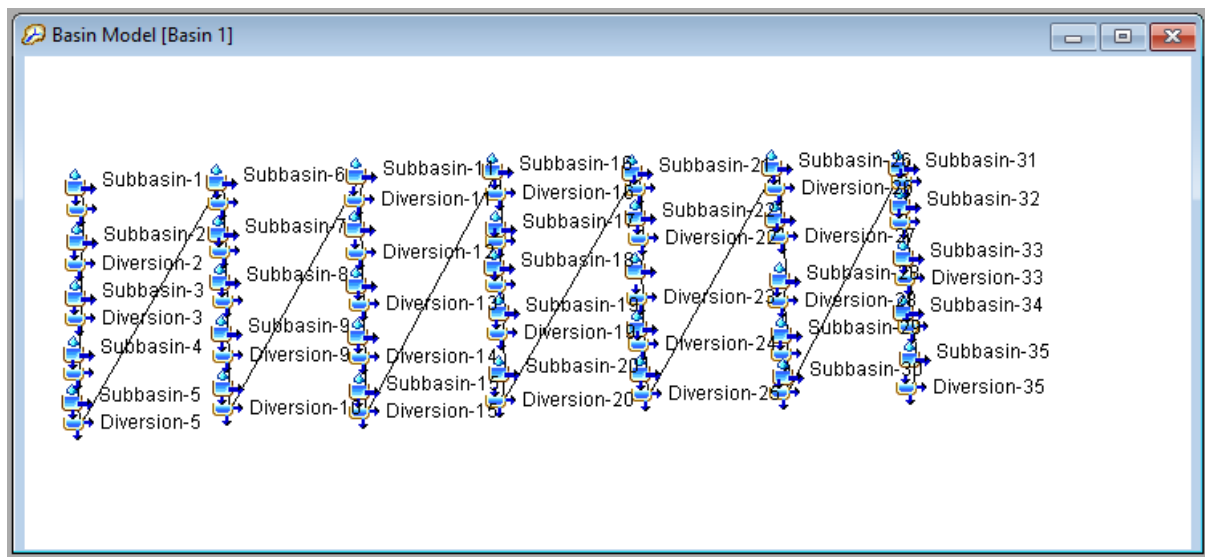


Figura 9. Model de conques.

A continuació s'assignen les característiques geomètriques de les subconques, que representaran els carrers. En la pestanya d'informació general de la subconca se li assigna l'element de connexió aigües avall, l'àrea total de la subconca (àrea del paviment i àrea de la vorera conjuntament) i el mètode de transformació pluja – escolament.

Quan es comença a iterar l'espaiament de les reixes, s'ha de modificar l'àrea total de les subconques per a cada iteració. Al ser el valor òptim d'espaiament de les reixes 60 metres, l'àrea total de les conques expressada en kilòmetres quadrats resulta:

$$\text{Àrea (Km}^2\text{)} = \text{Àrea paviment} + \text{Àrea vorera} = (6 \cdot 60 + 5 \cdot 60) \cdot 10^{-6} = 6,6 \cdot 10^{-4} \text{ Km}^2$$

Subcollector	Plane 1	Plane 2	Options
Subbasin	Channel		Collector
Element Name: Subbasin-1			
Description:			
Downstream:	Diversion-1		
*Area (KM2)	0.00066		
Latitude Degrees:			
Longitude Degrees:			
Discretization Method:	--None--		
Canopy Method:	--None--		
Snow Method:	--None--		
Surface Method:	--None--		
Loss Method:	--None--		
Transform Method:	Kinematic Wave		
Baseflow Method:	--None--		

Figura 10. Dades de la subconca.

HEC-HMS fa una distinció entre les dades geomètriques transversals a introduir amb les dades geomètriques longitudinals.

Les dades geomètriques transversals de les subconques s'introduiran en dos plans: el pla 1, que representarà la vorera i el pla 2, que representarà el paviment. Als dos plans se'ls assigna la seva amplada corresponent, el pendent, el coeficient de Manning, el qual representa la rugositat, i el percentatge de l'àrea respecte l'àrea.

	Pla 1 : Vorera	Pla 2: Paviment
Amplada (m)	5	6
Pendent (m/m)	0.015	0.02
Rugositat	0.02	0.016
Percentatge d'àrea (%)	45	55

Taula 4. Dades geomètriques de les subconques.

Subcollector	Plane 1	Plane 2	Options
Subbasin	Channel		Collector
Basin Name: Basin 4 - 30 subb (60 m)			
Element Name: Subbasin-1			
*Length (M)	5		
*Slope (M/M)	0.015		
*Roughness:	0.02		
*Area (%)	45		
Routing Steps:	5		

Figura 11. Dades del pla 1 de la subconca.

Subbasin	Channel	Collector
Subcollector	Plane 1	Plane 2
Options		
Basin Name: Basin 4 - 30 subb (60 m)		
Element Name: Subbasin-1		
*Length (M)	6	
*Slope (M/M)	0.02	
*Roughness:	0.016	
*Area (%)	55	
Routing Steps:	5	

Figura 12. Dades del pla 2 de la subconca.

Al calcular la separació de les reixes, el percentatge de les àrees es manté constant.

Les dades geomètriques longitudinals s'introdueixen en el model per mitjà del canal o del col·lector. En aquest cas, els carrers funcionen com a canals per la qual cosa només s'introdueixen les dades en aquesta pestanya del programa.

S'ha d'indicar el procés de transformació pluja – escolament, el pendent longitudinal, la rugositat, la forma, la longitud i el pendent transversal.

La longitud, en aquest cas, representarà la separació entre reixes. Aquesta longitud s'haurà de modificar per a cada iteració.

Pel que fa a la forma del canal, el programa d'HEC-HMS permet inserir únicament 5 formes geomètriques per representar-los : un cercle, una fosa, un rectangle, un trapezoide o un triangle. Per representar el carrer, s'utilitzarà la forma d'un triangle amb un pendent transversal equivalent 50:1.

Dada del model	Dada a inserir
Ruta aigües amunt	No
Procés de transformació pluja - escolament	Ona cinemàtica
Longitud (m)	60
Pendent (m)	0.01
Subtrams	5
Forma	Triangular
Nº Manning	0.016
Pendent transversal (xH:1V)	50

Taula 5. Dades a introduir del canal.

Subcollector	Plane 1	Plane 2	Options
Subbasin	Channel		Collector
<p>Basin Name: Basin 4 - 30 subb (60 m) Element Name: Subbasin-1</p>			
Route Upstream:	No		
Routing Method:	Kinematic Wave		
*Length (M)	60		
*Slope (M/M)	0.01		
Subreaches:			5
Shape:	Triangle		
*Manning's n:	0.016		
*Side Slope (xH:1V)	50		

Figura 13. Dades del canal de la subconca.

A continuació s'introdueixen les dades dels elements de derivació, que representaran les reixes. Aquests elements indicaran la subconca aigües avall i, en l'apartat de connexions, s'indicarà "—Not Connected—", ja que l'element de derivació no està connectat amb cap altre element de derivació.

A més, s'ha d'indicar el mètode de derivació de l'element. El programa permet introduir:

- Cabal constants (constant flow)
- Funció del cabal (inflow function)
- Presa lateral (lateral weir)
- Estació de bombament (pump station)
- Cabal especificat (Specified flow)

En el model s'indica l'opció de "Inflow function", que permet introduir la corba de derivació (cabal circulat – cabal interceptat) calculada. La resta de característiques es deixen en blanc, com es mostra en la figura següent:

Diversion	Divert	Options
<p>Basin Name: Basin 4 - 30 subb (60 m) Element Name: Diversion-1</p>		
Description:		
Downstream:	Subbasin-2	
Connection:	--Not Connected--	
Max Volume (1000 M3)		
Max Flow (M3/S)		
Divert Method:	Inflow Function	

Figura 14. Dades dels elements de derivació.

A la pestanya "Divert" del programa, s'ha d'indicar la taula amb els valors creats de la funció de la corba de derivació, com mostra la figura següent:

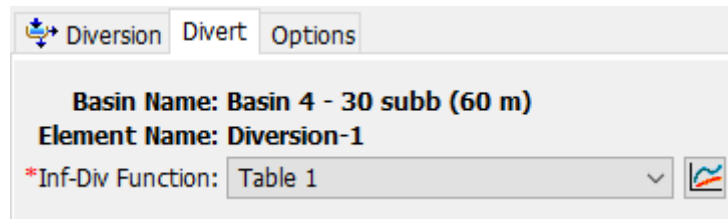


Figura 15. Dades de l'element de derivació.

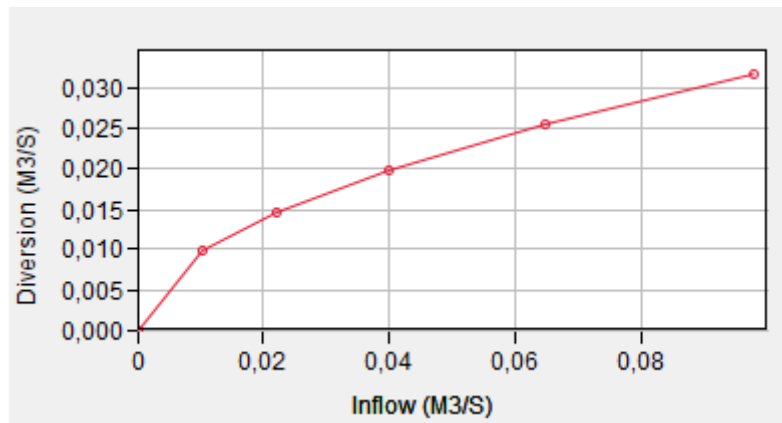


Figura 16. Corba introduïda de la funció del cabal.

Finalment, a la pestanya d'opcions, les característiques es deixen en blanc, com es mostra en la figura següent:

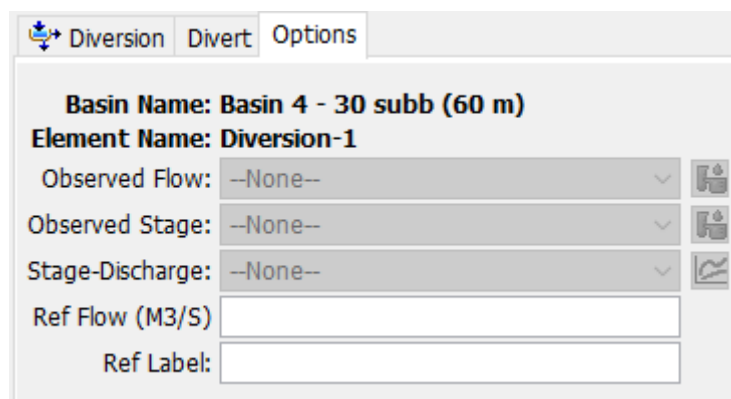


Figura 17. Pestanya d'opcions dels elements de derivació.

5.2.2. Model meteorològic

En aquesta secció s'indica el model meteorològic a utilitzar en el projecte. Per a aquesta modelització, s'indica que la precipitació a córrer és el hietograma especificat que s'incorpora en la secció de les dades de la sèrie temporal.

Meteorology Model Basins Options

Met Name: Met 1

Description:

Unit System: Metric

Shortwave: --None--

Longwave: --None--

Precipitation: Specified Hyetograph

Temperature: --None--

Windspeed: --None--

Pressure: --None--

Dew Point: --None--

Evapotranspiration: --None--

Replace Missing: Abort Compute

Figura 18. Quadre del model meteorològic.

Meteorology Model Basins Options

Met Name: Met 1

Basin Model	Include Subbasins
Basin 1 - 35 subbasin	Yes
Basin 1 - 40 subbasin	Yes
Basin 1 - 45 subbasin	Yes
Basin 4 - 30 subbasin (10 m)	Yes
Basin 4 - 30 subb (50 m)	Yes
Basin 4 - 30 subb (60 m)	Yes
Basin 4 - 30 subb (62.5 m)	Yes
Basin 4 - 30 subb (75 m)	Yes

Figura 19. Pestanya de selecció de models de conques.

Meteorology Model Basins Options

Met Name: Met 1

Total Override: No

Figura 20. Pestanya d'opcions del model meteorològic.

5.2.3. Especificacions de control

En aquesta secció s'indica el període de temps en el qual es vol realitzar la computació del programa. Per a aquesta modelització s'ha indicat una data de començament i finalització aleatòria, l'1 de gener de 2000. S'ha indicat que l'hora de començament i finalització és a les 00:00 i 2:00 respectivament i l'interval de temps de computació és de 5 minuts.

Control Specifications	
Name: Control 1	
Description:	
*Start Date (ddMMMYYYY)	01ene.2000
*Start Time (HH:mm)	00:00
*End Date (ddMMMYYYY)	01ene.2000
*End Time (HH:mm)	02:00
Time Interval:	5 Minutes

Figura 21. Quadre d'especificacions de control.

5.2.4. Dades de la sèrie temporal

En aquesta secció s'indica les dades de la sèrie temporal de la tempesta que es desitja introduir. En aquest cas, s'introdueix el hietograma a mà amb intervals de temps cada cinc minuts, com s'ha calculat en l'apartat d'aquest treball de pluviometria.

Time-Series Gage	
Gage Name: Gage 1	
Description:	
Data Source:	Manual Entry
Units:	Incremental Millimeters
Time Interval:	5 Minutes
Latitude Degrees:	
Longitude Degrees:	

Figura 22. Quadre d'especificacions de control.

Time-Series Gage	
Gage Name: Gage 1	
*Start Date (ddMMMYYYY)	01ene.2000
*Start Time (HH:mm)	00:00
*End Date (ddMMMYYYY)	01ene.2000
*End Time (HH:mm)	02:00

Figura 23. Pestanya de selecció de la finestra de temps de la tempesta.

Time (ddMMYYYY, HH:mm)	Precipitation (mm)
01ene.2000, 00:00	0
01ene.2000, 00:05	0.323
01ene.2000, 00:10	0.380
01ene.2000, 00:15	0.454
01ene.2000, 00:20	0.552
01ene.2000, 00:25	0.686
01ene.2000, 00:30	0.875
01ene.2000, 00:35	1.15
01ene.2000, 00:40	1.59
01ene.2000, 00:45	2.33
01ene.2000, 00:50	3.75
01ene.2000, 00:55	7
01ene.2000, 01:00	17.5
01ene.2000, 01:05	10.5
01ene.2000, 01:10	5
01ene.2000, 01:15	2.91
01ene.2000, 01:20	1.90
01ene.2000, 01:25	1.34
01ene.2000, 01:30	1
01ene.2000, 01:35	0.772
01ene.2000, 01:40	0.614
01ene.2000, 01:45	0.5
01ene.2000, 01:50	0.415
01ene.2000, 01:55	0.35
01ene.2000, 02:00	0.299

Taula 6. Sèrie temporal introduïda en HEC-HMS.

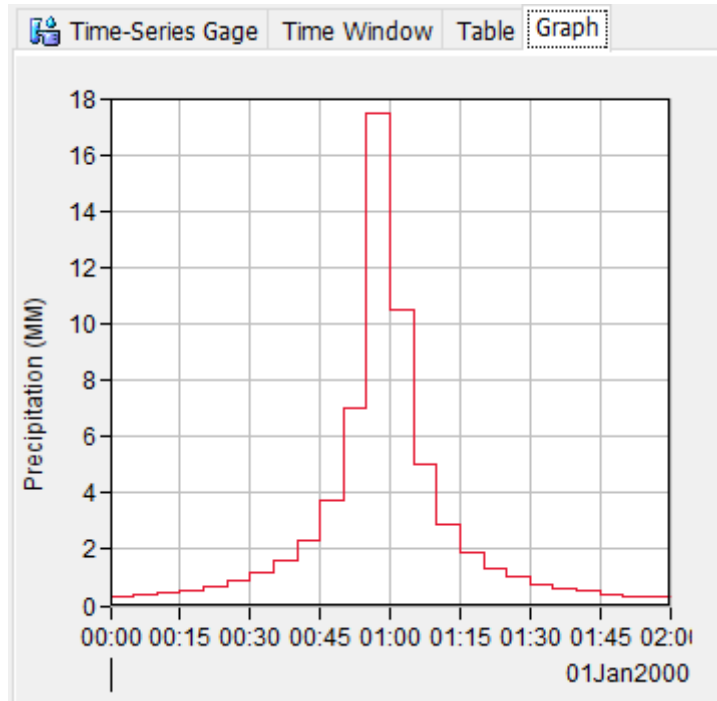


Figura 24. Representació del hidrograma en HEC-HMS.

5.2.5. Dades aparellades

En aquesta secció s'introdueix la corba de derivació calculada, de la qual es farà referència en cada element de derivació.

Figura 25. Informació de les dades aparellades.

Inflow (M3/S)	Diversion (M3/S)
0.0000000	0.0000000
0.0102101	0.0098335
0.0219886	0.0146400
0.0398680	0.0199342
0.0648298	0.0256527
0.0977911	0.0317500

Figura 26. Taula de la funció del cabal.

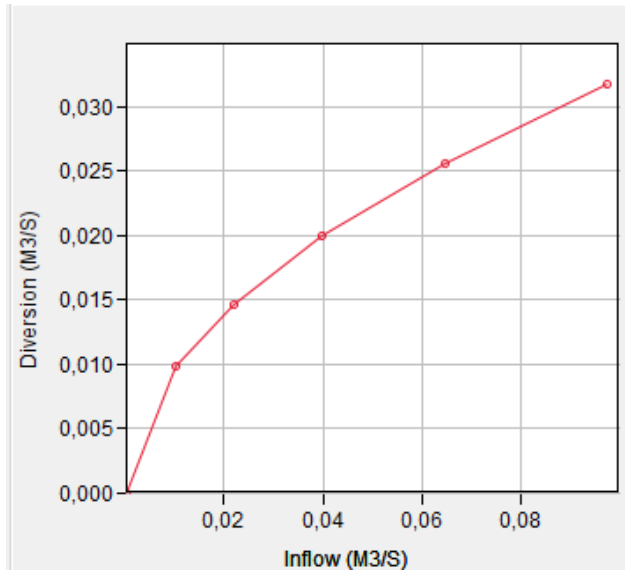


Figura 27. Gràfic de la corba de derivació inserida en HEC-HMS.

5.3. Resultats obtinguts

En l'obtenció de la separació entre les reixes adequada que assegurava els valors límits dels criteris de perillositat esmentats anteriorment, s'ha realitzat un procés iteratiu de prova i error en el qual s'han provat diferents separacions de reixes per obtenir els cabals punta que s'assoleixen per la superfície del carrer.

El primer valor assajat va ser una separació de 10 metres, obtenint un cabal punta de 6,4 l/s, lluny del valor límit de 64,8 l/s.

A continuació es va provar una separació de 100 metres, obtenint un cabal punta de 85,21 L/s, superant el valor límit de cabal de 64,8 l/s.

Sabent que la separació de les reixes es trobava entre aquests dos valors, es va realitzar novament el càlcul amb separacions entre 50, 55, 60 i 62,5 metres.

La taula següent recull els cabals punta obtinguts per a les diferents separacions de reixes:

Separació de reixa (m)	Cabal punta obtingut (m3/s)
10	0,0064
50	0,0470
55	0,0527
60	0,0628
62,5	0,0661
100	0,0852

Taula 7. Cabals punta obtinguts per a diferents separacions de reixes.

El següent gràfic mostra l'evolució del cabal per a diferents separacions de reixes:

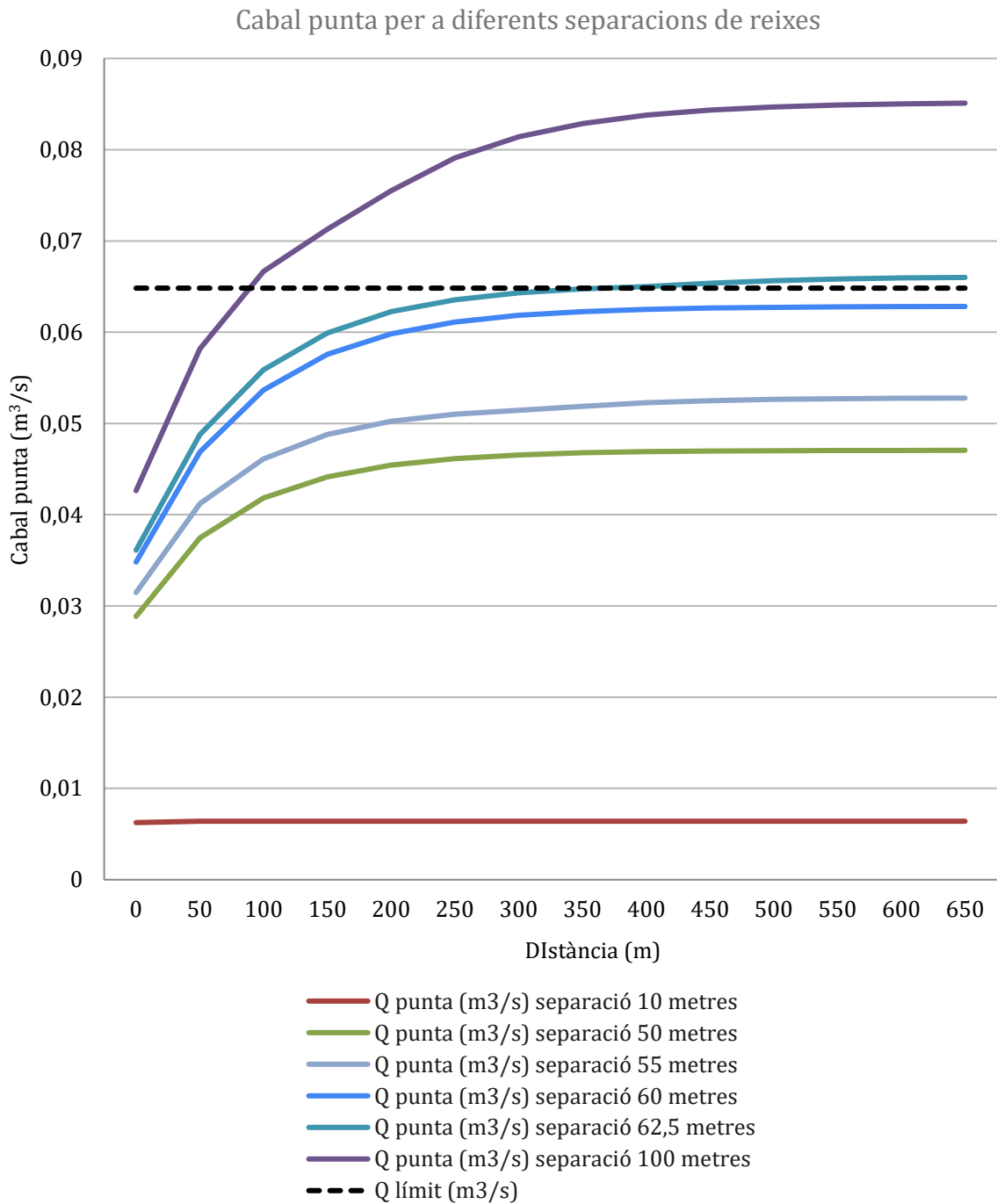


Figura 28. Gràfic dels cabals punta per a diferents separacions de reixes obtinguts amb HEC-HMS.

Com es pot observar tant en el gràfic com en la taula anterior, la separació adequada de les reixes ha de ser de 60 metres per no superar el cabal límit de 0,0648 m³/s.

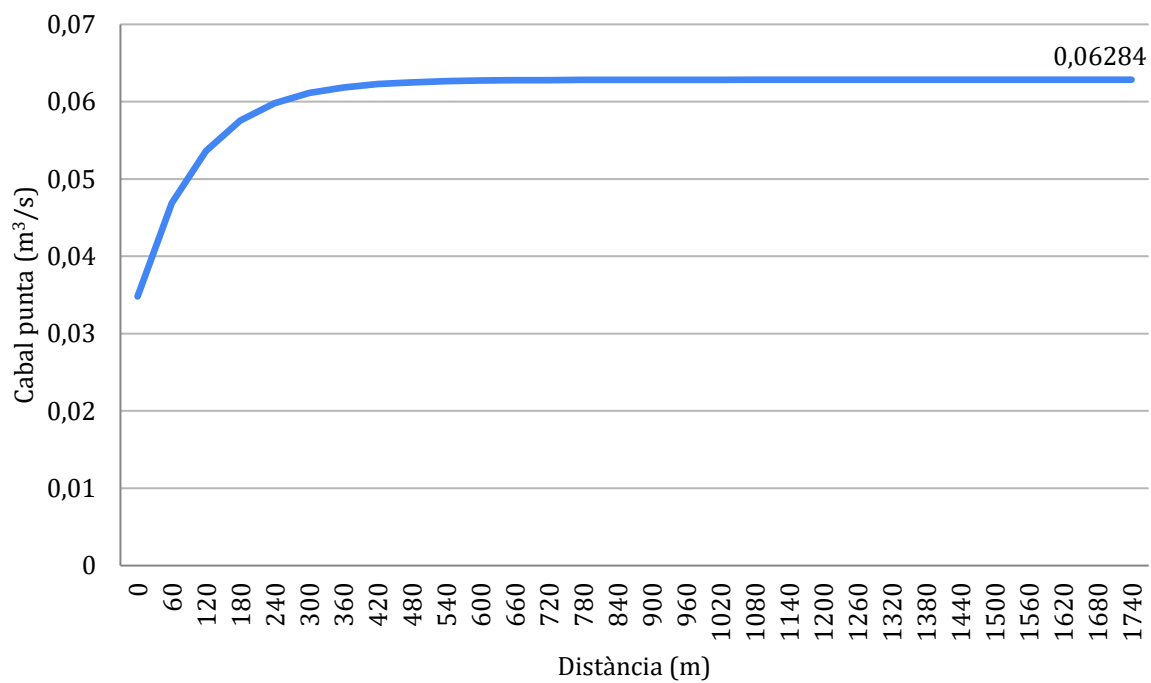


Figura 29. Gràfic representatiu del cabal circulant en el carrer per a la separació de 60 metres.

6. Elaboració del model en SWMM

6.1. Model en SWMM

El programa SWMM (Stormwater Management Model) va ser desenvolupat per l'EPA (United States Environmental Protection Agency). És una eina que serveix per modelitzar i simular processos hidrològics de conques hidrogràfiques (James & Rossman, 2010).

Aquest programa, de distribució lliure, és àmpliament utilitzat en l'àmbit de la hidrologia urbana. És una eina útil per a la gestió de l'aigua, ja que permet simular episodis de pluges i obtenir resultats de les respostes hidrològiques de les conques. A més, el programa possibilita l'anàlisi de la transformació pluja – escolament, permetent l'estudi del drenatge urbà, estudis d'avingudes i estudis de pronòstics de flux, entre d'altres.

6.2. Dades a importar al programa

En SWMM s'importaran les dades necessàries per a reproduir la mateixa situació que s'ha representat prèviament en HEC-HMS.

6.2.1. Modelització de les conques

De la mateixa manera que amb HEC-HMS, el primer pas ha consistit en definir les conques i les seves característiques mitjançant el model de conques de SWMM.

En aquesta interfície es creen els elements físics de l'estructura de la conca del model hidrològic. Aquest pot està format per:

- Subconques (subcatchments)
- Conductes (conduit links)
- Embassaments (reservoirs)
- Unions (junctions)
- Fonts (sources)
- Embornals (sinks)
- Dipòsits (storage nodes)

L'estructura de la conca està formada per un total de 15 subconques i 15 elements d'unió. Veient els resultats d'HEC-HMS i com convergia el cabal per a 10 conques aproximadament, en la reproducció del model en SWMM s'han creat menys conques per agilitzar el procés de modelització.

En aquest model ja no es representen els carrers com les subconques i les reixes de captació com elements de derivació, sinó que SWMM permet inserir la geometria del carrer en els conductes i definir en aquests conductes les reixes de captació.

Per tant, cada conducte representarà mig carrer (ja que es considera mitja secció). La figura següent mostra la pantalla de visualització del model de conques creat:

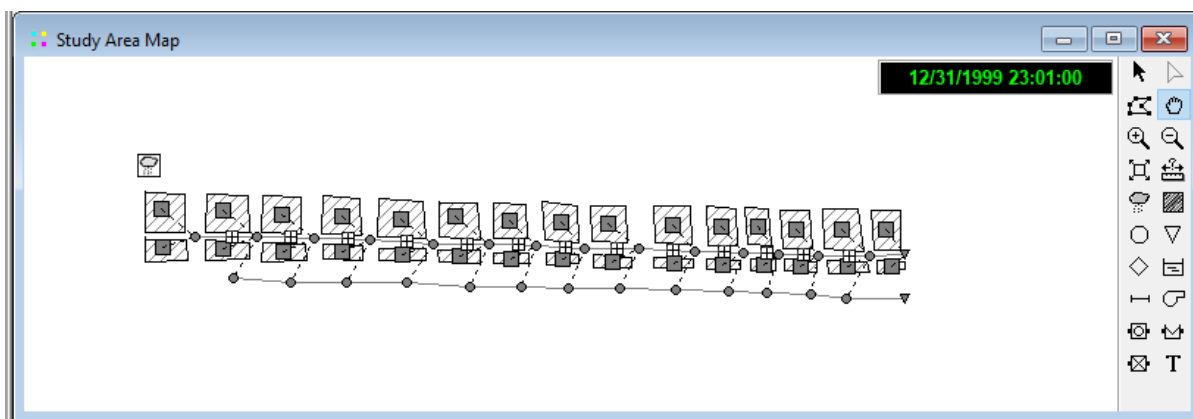


Figura 30. Modelització de les conques.

A diferència de la modelització en HEC-HMS, en SWMM s'ha d'afegir una línia de clavegueram per a que el cabal interceptat per les reixes es divideixi adequadament segons la corba de derivació.

A continuació es mostren les dades de les conques a proporcionar:

Property	Value
Name	Paviment_1
X-Coordinate	0.000
Y-Coordinate	0.000
Description	
Tag	
Rain Gage	Pluviòmetre
Outlet	2
Area	0.033
Width	6
% Slope	2
% Imperv	100
N-Imperv	0
N-Perv	0
Dstore-Imperv	0
Dstore-Perv	0
%Zero-Imperv	0
Subarea Routing	OUTLET

Percent Routed	100
Infiltration Data	HORTON
Groundwater	NO
Snow Pack	
LID Controls	0
Land Uses	0
Initial Buildup	NONE
Curb Length	0
N-Perv Pattern	
Dstore Pattern	
Infil. Pattern	

User-assigned name of subcatchment

Figura 31. Informació a incorporar en les subconques representant els paviments.

Subcatchment Vorera_1	
Property	Value
Name	Vorera_1
X-Coordinate	27.015
Y-Coordinate	-1502.573
Description	
Tag	
Rain Gage	Pluviòmetre
Outlet	2
Area	0.0275
Width	5
% Slope	1.5
% Imperv	100
N-Imperv	0
N-Perv	0
Dstore-Imperv	0
Dstore-Perv	0
%Zero-Imperv	0
Subarea Routing	OUTLET

Percent Routed	100
Infiltration Data	HORTON
Groundwater	NO
Snow Pack	
LID Controls	0
Land Uses	0
Initial Buildup	NONE
Curb Length	0
N-Perv Pattern	
Dstore Pattern	
Infil. Pattern	

Groundwater flow parameters (click to edit)

Figura 32. Informació a inserir en les subconques representant les voreres.

L'àrea de les subconques s'ha anat canviant per a cada iteració. Les altres dades s'han mantingut sense canvis.

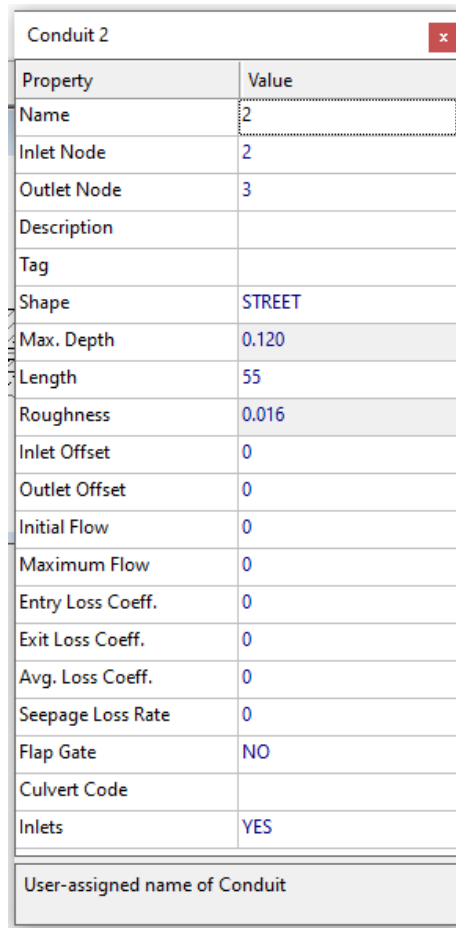
Junction 2	
Property	Value
Name	2
X-Coordinate	1308.972
Y-Coordinate	-1090.476
Description	
Tag	
Inflows	NO
Treatment	NO
Invert El.	100
Max. Depth	0
Initial Depth	0
Surcharge Depth	0
Ponded Area	0

User-assigned name of junction

Figura 33. Informació dels elements d'unió.

En contraposició amb HEC-HMS, en SWMM s'ha hagut d'inserir una elevació pels nodes per establir el pendent longitudinal de forma indirecta. Per això, en l'obtenció de l'espaiament de les reixes, s'ha hagut de modificar aquest paràmetre per a cada iteració. La resta d'elements s'han mantingut sense alteracions.

A continuació es presenta la pestanya on s'indiquen les dades a introduir pels conductes. De la mateixa forma que amb HEC-HMS, la longitud s'ha hagut de modificar per a cada iteració.



Property	Value
Name	2
Inlet Node	2
Outlet Node	3
Description	
Tag	
Shape	STREET
Max. Depth	0.120
Length	55
Roughness	0.016
Inlet Offset	0
Outlet Offset	0
Initial Flow	0
Maximum Flow	0
Entry Loss Coeff.	0
Exit Loss Coeff.	0
Avg. Loss Coeff.	0
Seepage Loss Rate	0
Flap Gate	NO
Culvert Code	
Inlets	YES

User-assigned name of Conduit

Figura 34. Dades a introduir pels conductes.

En aquesta pestanya es selecciona la nova geometria que ha introduït el programa SWMM: la secció de tipus carrer, on s'indiquen les dades de la secció transversal del model a estudiar.

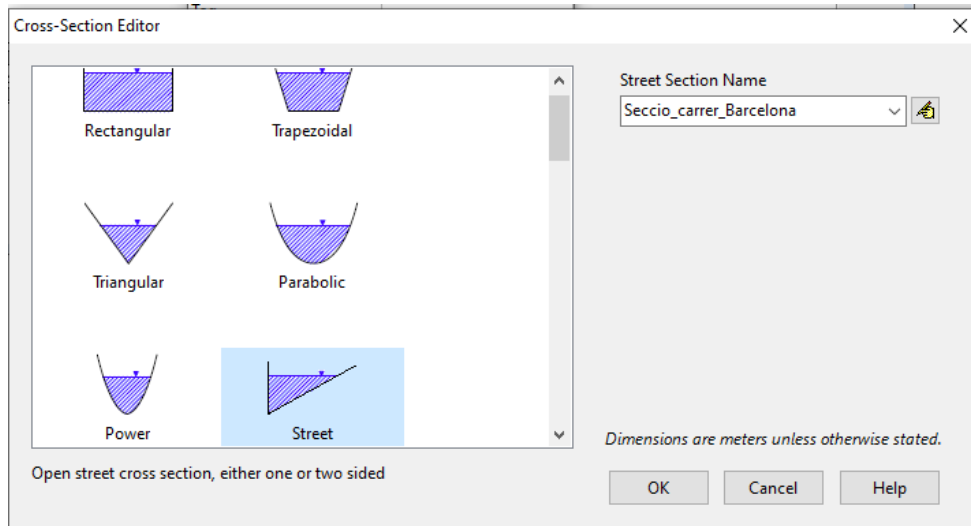


Figura 35. Selecció de la geometria del carrer.

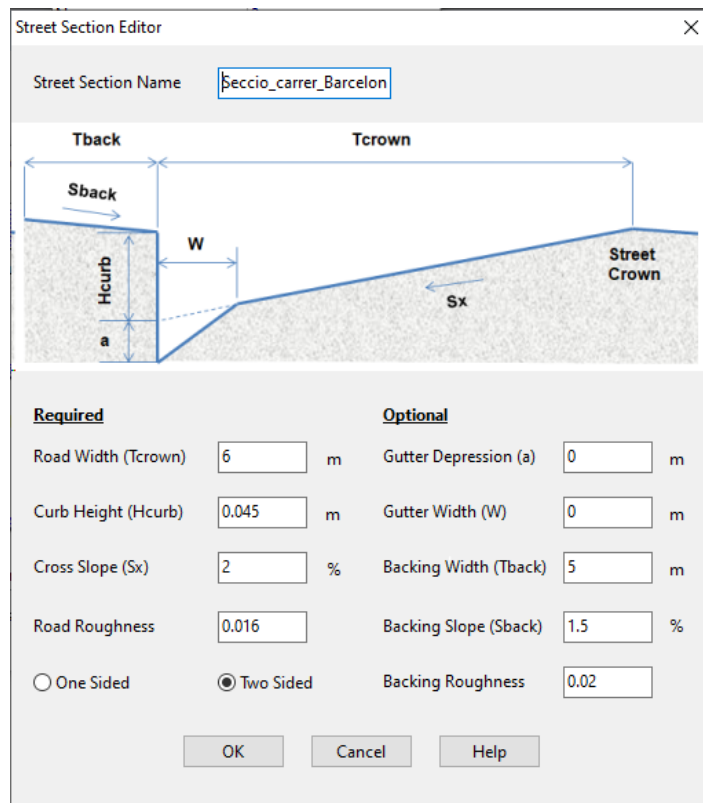


Figura 36. Dades de la geometria del carrer.

Finalment, es selecciona en els conductes les reixes per on es diversificarà el cabal, assenyalant en aquest el node de la xarxa de clavegueram que rebrà el cabal interceptat, com es mostra en la figura següent:

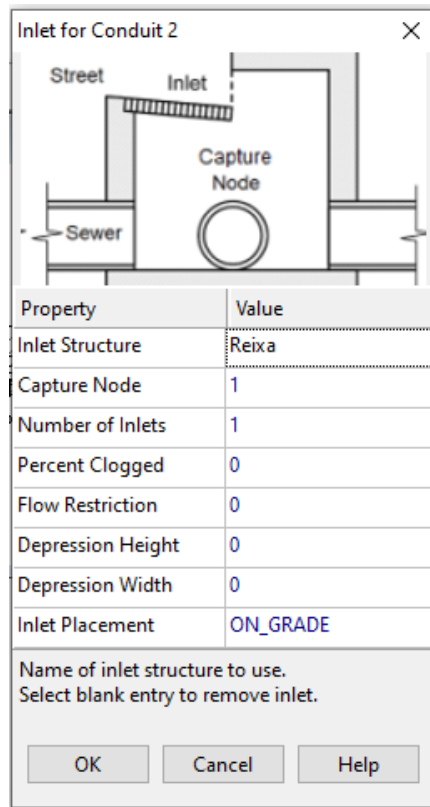


Figura 37. Selecció de la reixa en cada carrer.

6.2.2. Model meteorològic

En aquesta secció s'indica el model meteorològic a utilitzar en el projecte. Per a aquesta modelització, s'indica que la precipitació a córrer és el hietograma especificat que s'incorpora en la secció de les dades de la sèrie temporal.

En SWMM s'indica per a cada subconca el pluviòmetre del qual rebrà la precipitació i aquest es representa gràficament en el mapa de l'àrea d'estudi.

6.2.3. Especificacions de control

En aquesta secció s'indica el període de temps en el qual es vol realitzar la computació del programa. En la pestanya general s'indica que el model d'encaminament del procés transformació pluja – escorrentiu es realitzarà pel mètode de l'ona dinàmica i que no hi haurà ni aigües subterrànies ni fosa de neu.

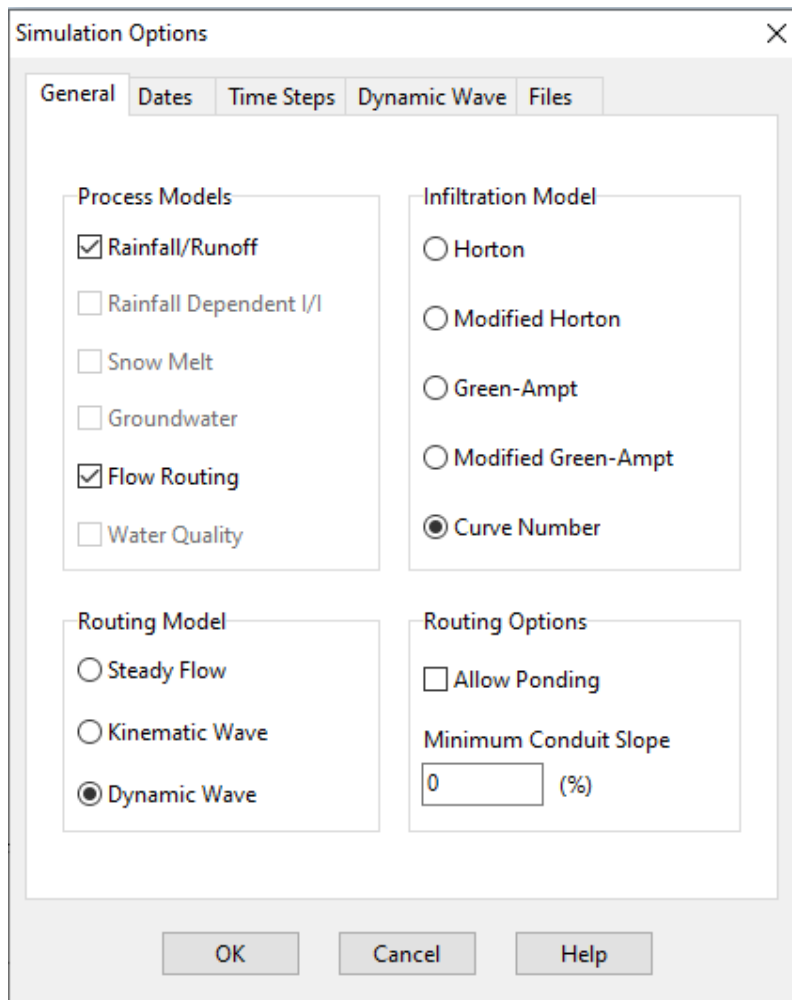


Figura 38. Opcions de simulació de SWMM.

Per a aquesta modelització s'ha indicat una data de començament i finalització aleatòria, el 31 de desembre de 1999 i l'1 de gener de 2000. S'ha indicat que l'hora de començament i finalització és a les 23:00 i 3:00 respectivament i l'interval de temps de computació és de 5 minuts. En comptes de considerar una durada de 2 hores que és la durada de la tempesta a modelitzar, s'ha afegit una hora abans i una hora més tard per assegurar que el programa computi el període de temps considerat.

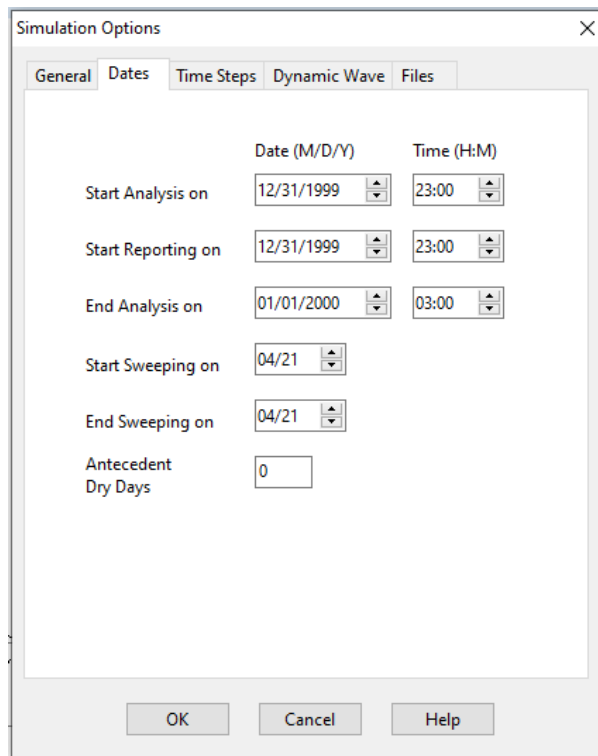


Figura 39. Dates de la simulació en SWMM.

A més, s'han indicat els passos de temps de computació en 60 segons, per aconseguir resultats més precisos, com es mostra en la figura següent:

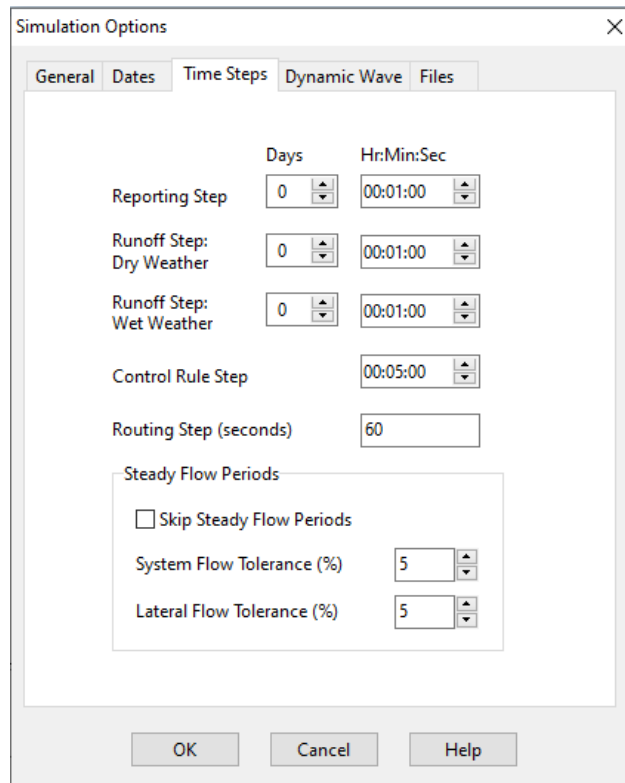


Figura 40. Passos de temps a considerar.

6.2.4. Dades de la sèrie temporal

En SWMM, les dades de la pluviometria s'insereixen en format d'intensitat (mm/h), en contraposició amb HEC-HMS on s'han afegit en forma de precipitació (mm).

Date (M/D/Y)	Time (H:M)	Value
01/01/2000	00:00	0
01/01/2000	00:05	3.87
01/01/2000	00:10	4.56
01/01/2000	00:15	5.45
01/01/2000	00:20	6.63
01/01/2000	00:25	8.23
01/01/2000	00:30	10.5
01/01/2000	00:35	13.84
01/01/2000	00:40	19.09
01/01/2000	00:45	28
01/01/2000	00:50	45
01/01/2000	00:55	84
01/01/2000	01:00	210
01/01/2000	01:05	126
01/01/2000	01:10	60
01/01/2000	01:15	35
01/01/2000	01:20	22.90
01/01/2000	01:25	16.15
01/01/2000	01:30	12
01/01/2000	01:35	9.26
01/01/2000	01:40	7.36
01/01/2000	01:45	6
01/01/2000	01:50	4.98
01/01/2000	01:55	4.2
01/01/2000	00:00	0

Figura 41. Sèrie temporal inserida al programa.

6.2.5. Dades aparellades

Finalment, s'ha inserit la corba de derivació que relacionarà el cabal circulant immediatament abans de la reixa i el cabal interceptat per aquesta:

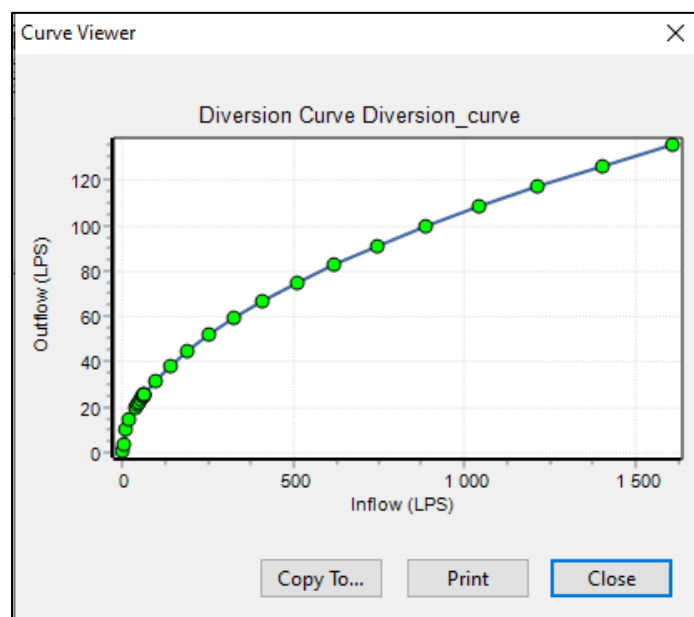


Figura 42. Gràfic de la corba de derivació presentada en SWMM.

6.3. Resultats obtinguts

En la reproducció del model d'HEC-HMS a SWMM, s'ha realitzat novament un procés d'iteració de prova i error en el qual s'han tornat a provar diferents separacions de reixes per obtenir els cabals punta que s'assoleixen per la superfície del carrer, de tal forma que s'assegurin els valors límits dels criteris de perillositat esmentats anteriorment.

Com en l'exercici anterior s'havia obtingut una separació de 60 metres d'espaiament entre reixes, s'ha començat el càlcul en SWMM amb aquesta separació, obtenint un cabal punta de 70,67 L/s, superant el valor límit del cabal calculat.

A continuació s'ha reduït la separació de les reixes per obtenir un valor de cabal punta inferior, provant amb una separació de reixes de 50 metres, obtenint un cabal punta de 60,83 L/s, inferior al valor límit.

S'ha provat amb un valor entremig de 55 metres de separació, obtenint un cabal punta de 61,12 L/s.

S'ha tornat a provar amb un valor entremig de 55 i 60 metres, i per a una separació de 57,5 metres el cabal punta arribava a 65,91 L/s, superant el valor límit del cabal establert.

Per tant, la separació adequada de les reixes calculada amb SWMM ha donat de 55 metres.

La taula següent recull els cabals punta obtinguts per a les diferents separacions de reixes:

Separació de reixa (m)	Cabal punta obtingut (m³/s)
50	0,0608
55	0,0611
57,5	0,0659
60	0,0706

Taula 8. Cabals punta obtinguts per a diferents separacions de reixes.

El següent gràfic mostra l'evolució del cabal per a diferents separacions de reixes:

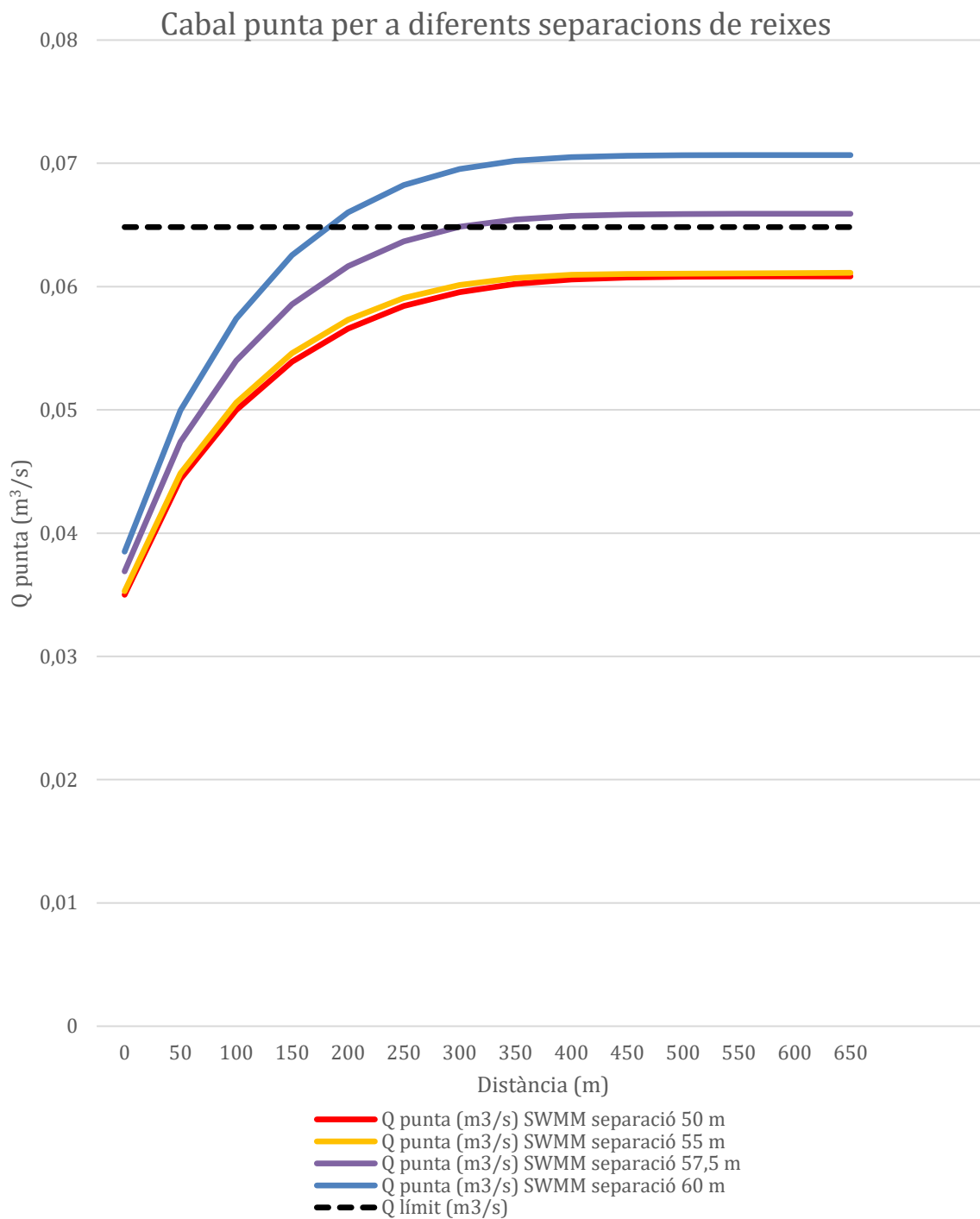


Figura 43. Gràfic dels cabals punta per a diferents separacions de reixes obtinguts amb SWMM.

Com es pot observar tant en el gràfic com en la taula anterior, la separació adequada de les reixes ha de ser de 55 metres per no superar el cabal límit de 0,0648 m³/s, representada continuació:

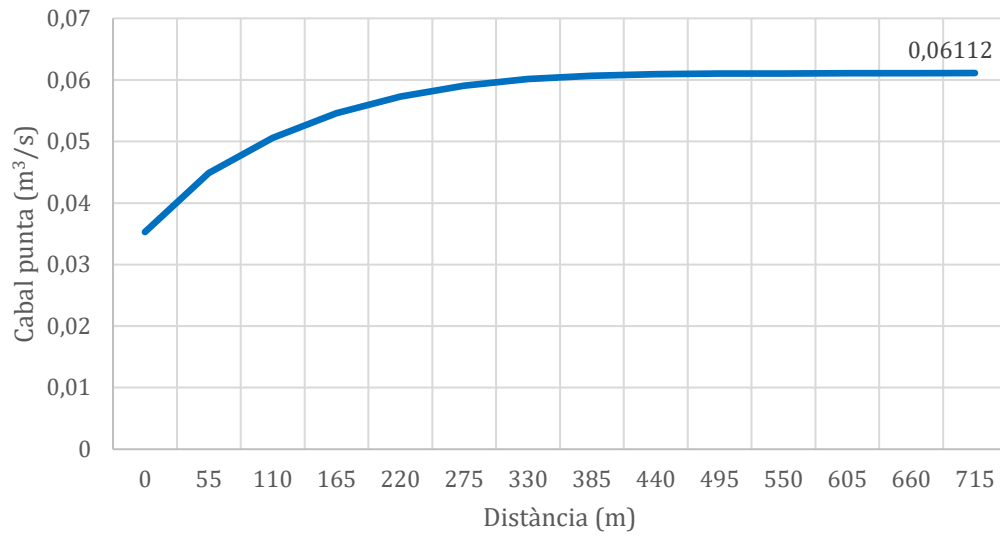


Figura 44. Gràfic representatiu del cabal circulant en el carrer per a la separació de 55 metres.

7. Comparació de resultats obtinguts

Atès la diferent disposició de la geometria de les seccions transversals utilitzades en ambdós programes (una secció triangular en HEC-HMS i una secció tipus carrer en SWMM), s'han obtingut resultats bastant similars pel que fa als cabals punta calculats.

Els dos programes tenen en comú la mateixa pluviometria, corba de derivació i les dades de la secció transversal i longitudinal de la secció.

A diferència del programa HEC-HMS, SWMM requeria la creació d'una línia de sanejament que captés l'aigua interceptada per les reixes.

Els resultats obtinguts per a separacions entre 50, 55 i 60 metres es presenten en la taula següent:

Separació de reixa (m)	Cabal punta obtingut en SWMM (m ³ /s)	Cabal punta obtingut en HEC-HMS (m ³ /s)
50	0,06083	0,04706
55	0,06112	0,05278
60	0,07067	0,06282

Taula 9. Cabals punta obtinguts per a diferents separacions de reixes per ambdós programes.

Els següents gràfics mostren l'evolució dels cabals per a aquestes separacions de reixes per ambdós programes:

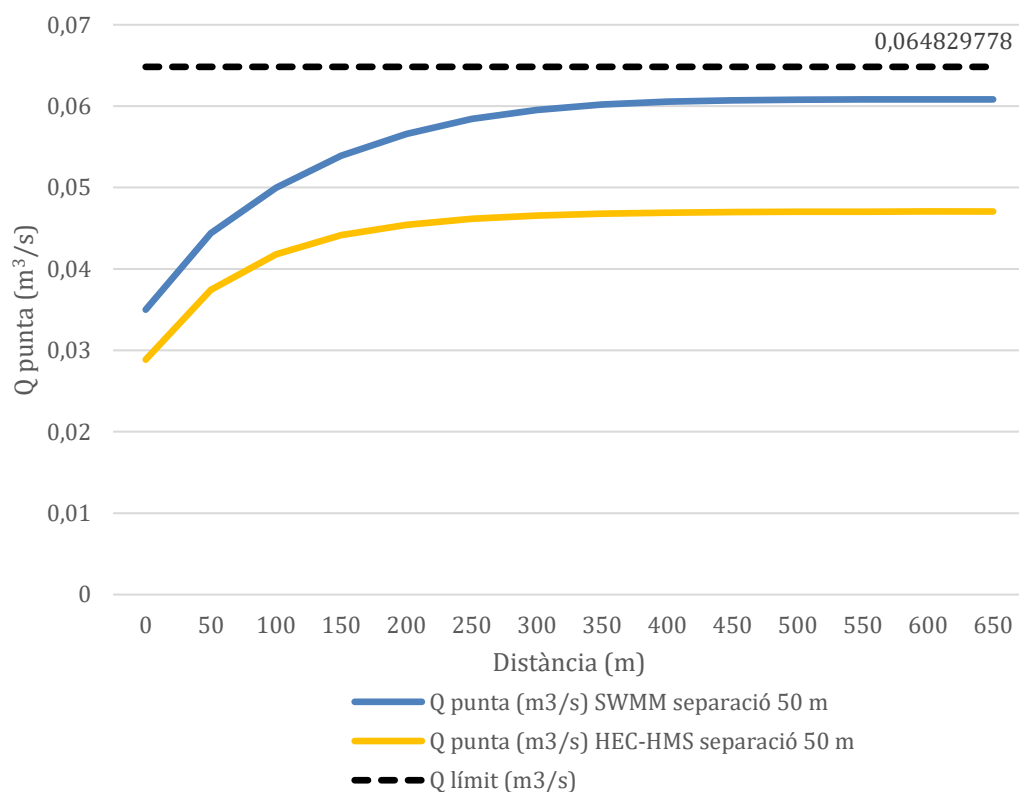


Figura 45. Gràfic dels cabals punta obtinguts amb HEC-HMS i SWMM per a una separació de reixes de 50 metres.

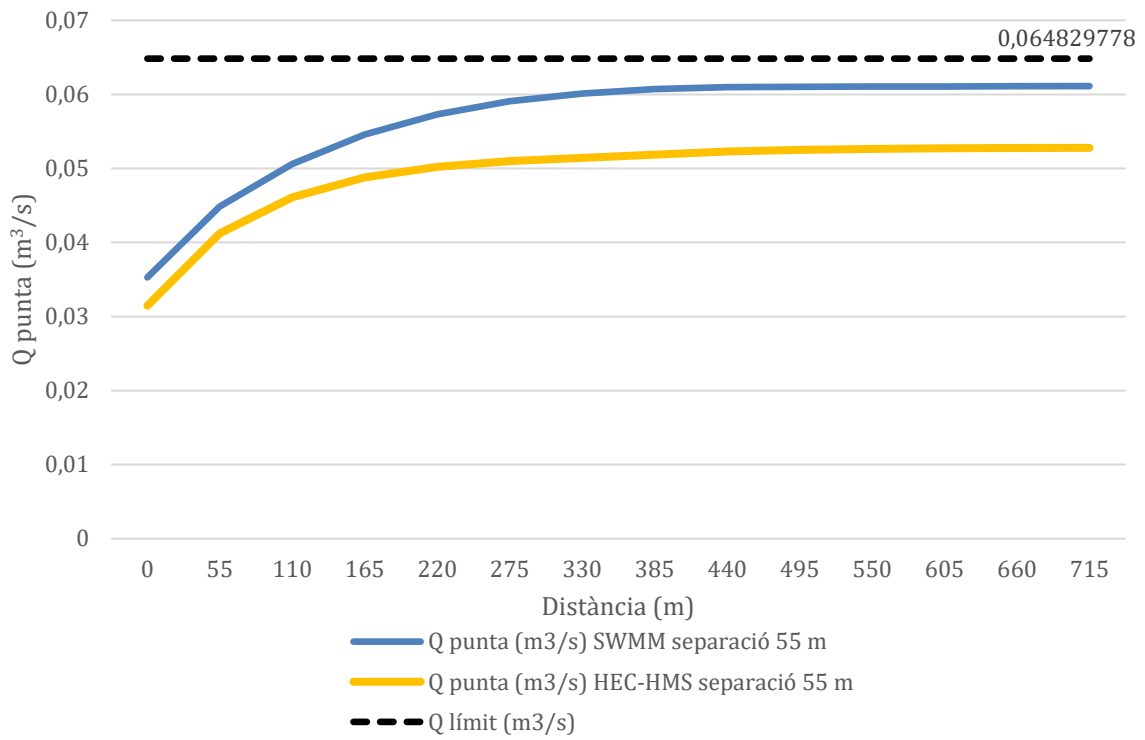


Figura 46. Gràfic dels cabals punta obtinguts amb HEC-HMS i SWMM per a una separació de reixes de 55 metres.

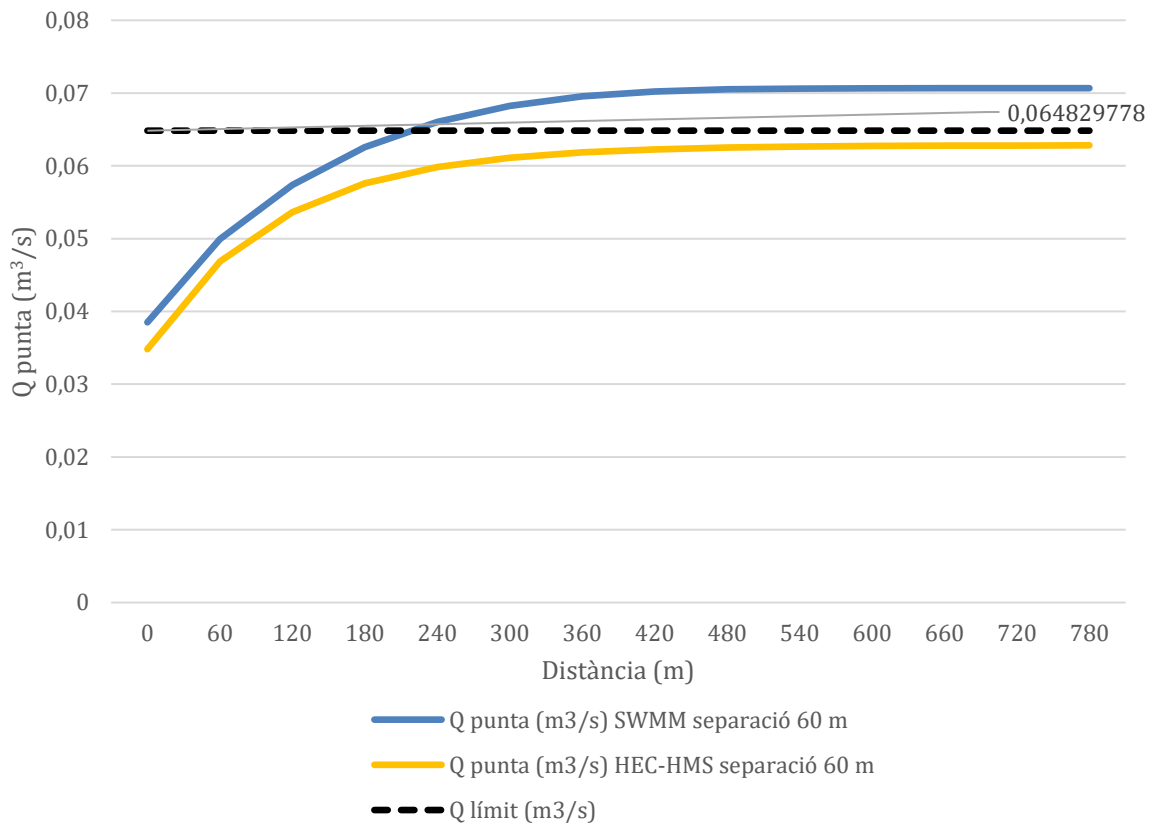


Figura 478. Gràfic dels cabals punta obtinguts amb HEC-HMS i SWMM per a una separació de reixes de 60 metres.

Es conclou veient els resultats obtinguts que, per a un cabal límit fix, el programa SWMM requereix de menor separació de reixes i el programa d'HEC-HMS permet una major separació de reixes per assegurar els criteris de perillositat esmentats.

Per aquest cas estudiat, en SWMM es requerirà d'una separació de 55 metres mentre que a HEC-HMS es requerirà de 60 metres de separació, un 9,16% més que en SWMM.

8. Conclusions

En aquest treball s'ha analitzat el funcionament hidràulic dels sistemes de captació d'aigües pluvials com són les reixes de captació i s'han analitzat les variables que intervenen.

S'ha fet una revisió de l'estat de l'art en relació als conceptes relacionats amb aquests sistemes de captació i el drenatge urbà. A partir d'aquí s'ha assolit l'objectiu fonamental del treball que consistia en modelitzar la resposta hidrològica d'un carrer d'una geometria determinada per a un episodi de pluja torrencial de Barcelona incorporant reixes com a elements de captació d'aigua de pluja i comparar les diferències usant dues eines diferents: el model HEC-HMS que s'havia estat usant fins ara i el model EPA-SWMM 5.2 que ha incorporat noves funcionalitats per aquets casos.

Ambdós programes són àmpliament utilitzats en l'àmbit de la hidrologia urbana, ja que resulten eines útils per a estudiar la resposta hidrològica de conques sota episodis de pluges i possibiliten realitzar estudis d'avingudes, estudis de drenatge urbà i pronòstics de fluxos, entre altres.

Estudiat el funcionament de les noves funcions que ha llençat el programa SWMM, s'ha aconseguit reproduir de forma similar la resposta hidràulica en un carrer d'una geometria determinada davant d'una tempesta determinada per als dos programes de llicència lliure HEC-HMS i SWMM.

En ambdós programes s'ha hagut d'introduir una sèrie de dades a importar per a la modelització, comunes en ambdós: la modelització de les conques, el model meteorològic, les especificacions de control, les dades de la sèrie temporal i les dades aparellades.

En modelitzar en HEC-HMS i SWMM s'ha pres constància de les diferències entre ells:

- En primer lloc, HEC-HMS permet modelitzar la resposta hidràulica dels sistemes de captació mitjançant elements de derivació, els quals no és necessari que estiguin connectats a una xarxa de clavegueram. En canvi, en SWMM és necessari dissenyar una xarxa de clavegueram per a que els elements de derivació com són els sistemes de captació d'aigües pluvials (p. e. embornals amb reixes) recullin una part de l'aigua que passa sobre ells. En conclusió, SWMM modelitza el comportament de l'aigua pel sistema de drenatge urbà superficial juntament amb el sistema de drenatge urbà subterrani, el qual correspon a la xarxa de clavegueram.
- En segon lloc, el programa SWMM permet definir la geometria de les reixes de captació amb molta més precisió que el programa d'HEC-HMS, on només es pot utilitzar una representació de la reixa com un element de derivació del cabal ("diversions"). En SWMM, les reixes poden ser modelitzades en funció del número de barres que la formen o bé la seva disposició en l'espai, ja sigui col·locades de manera horitzontal o bé vertical. A més a més, també permeten assignar a cada reixa una corba de derivació del cabal.

La corba de derivació del cabal relaciona el cabal circulant pel carrer i el cabal captat pels elements de captació. Per tant, aquesta corba s'ha elaborat, com s'ha vist en la secció 4.3.

Corba de derivació de cabals d'aquest treball, a partir de les dades geomètriques de la secció longitudinal i transversal del carrer estudiat, així com de la llei potencial que defineix l'eficiència dels elements de captació.

La corba d'eficiència calculada en aquest treball ha presentat la següent forma (Figura 48):

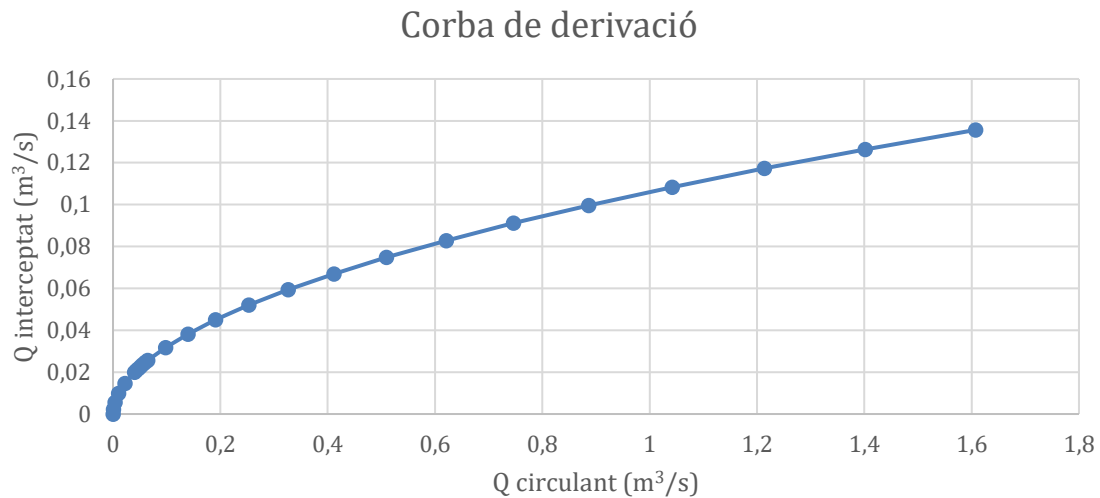


Figura 489. Gràfic de la corba de derivació obtinguda.

A més a més, en aquest treball s'han presentat les diferents metodologies que es porten a terme per a l'elaboració dels hietogrames sintètics per a l'elaboració i definició de la pluja, la qual s'ha d'incorporar en ambdós programes per mitjà d'una precipitació (mm) per interval de temps (min) o bé per mitjà d'una intensitat de pluja (mm/h) per cada interval de temps (min).

El hietograma elaborat en aquest treball es presentava en la secció 4.2. *Pluviometria*, adjuntat a continuació (Figura 5049):

Hietograma sintètic pel mètode dels blocs alternats

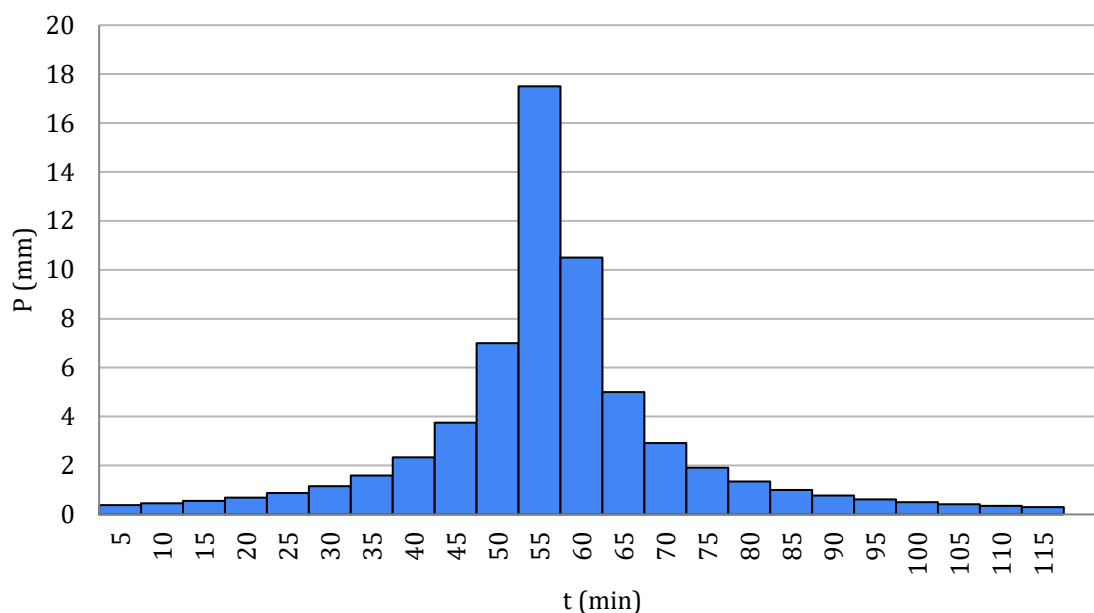


Figura 5049. Hietograma sintètic resultant del mètode dels blocs alternats.

D'altra banda, s'han esmentat els criteris de perillositat utilitzats en aquest treball, definits en la secció 3.4. *Criteris de perillositat*. Aquests depenen essencialment de dos variables: el calat (y) i la velocitat (v). Per això en aquest treball s'han aplicat quatre criteris per establir un calat i velocitat límit, obtenint un cabal límit que no es pot superar per garantir la seguretat i estabilitat dels vianants. El cabal límit obtingut per al carrer definit en aquest treball i per a les reixes escollides ha sigut de $0,0648 \text{ m}^3/\text{s}$.

Un cop definits els criteris de perillositat que pretenen cerciorar la seguretat dels ciutadans davant les inundacions causades per episodis de pluja torrencials, s'ha realitzat el procés d'iteració de prova i error per obtenir la separació de reixes òptima que garantia aquests criteris.

Per a HEC-HMS s'han provat les separacions de 10, 50, 55, 60, 62.5 i 100 metres, obtenint que la separació adequada que estableix el cabal en el sistema de drenatge urbà superficial per sota del cabal límit és d'una separació de 60 metres.

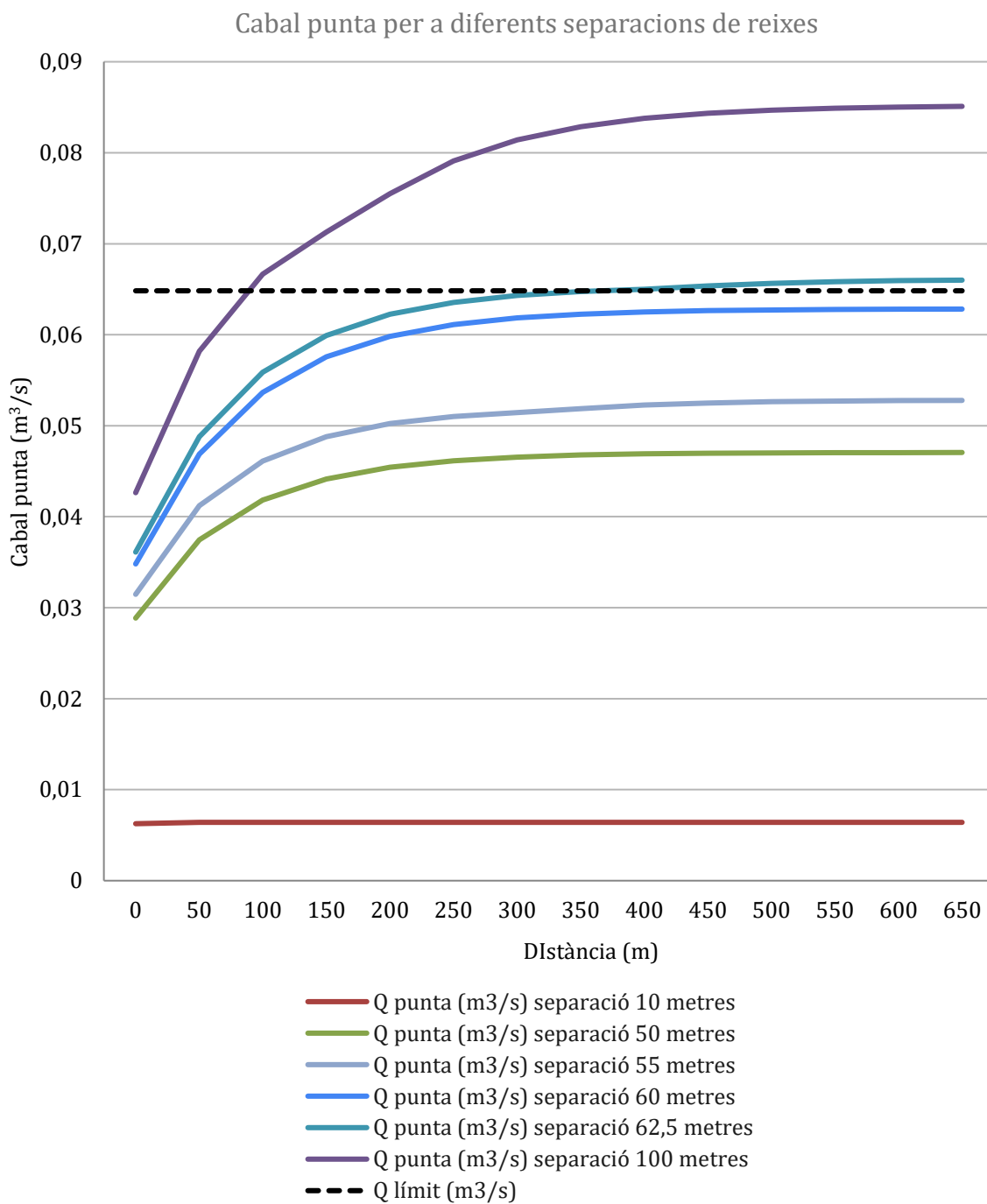


Figura 501. Gràfic dels cabals punta per a diferents separacions de reixes obtinguts amb HEC-HMS.

Per contra, per a SWMM s'han provat les separacions de 50, 55, 57.5 i 60 metres, obtenint que la separació adequada que estabilitza el cabal en el sistema de drenatge urbà superficial per sota del cabal límit és d'una separació de 55 metres.

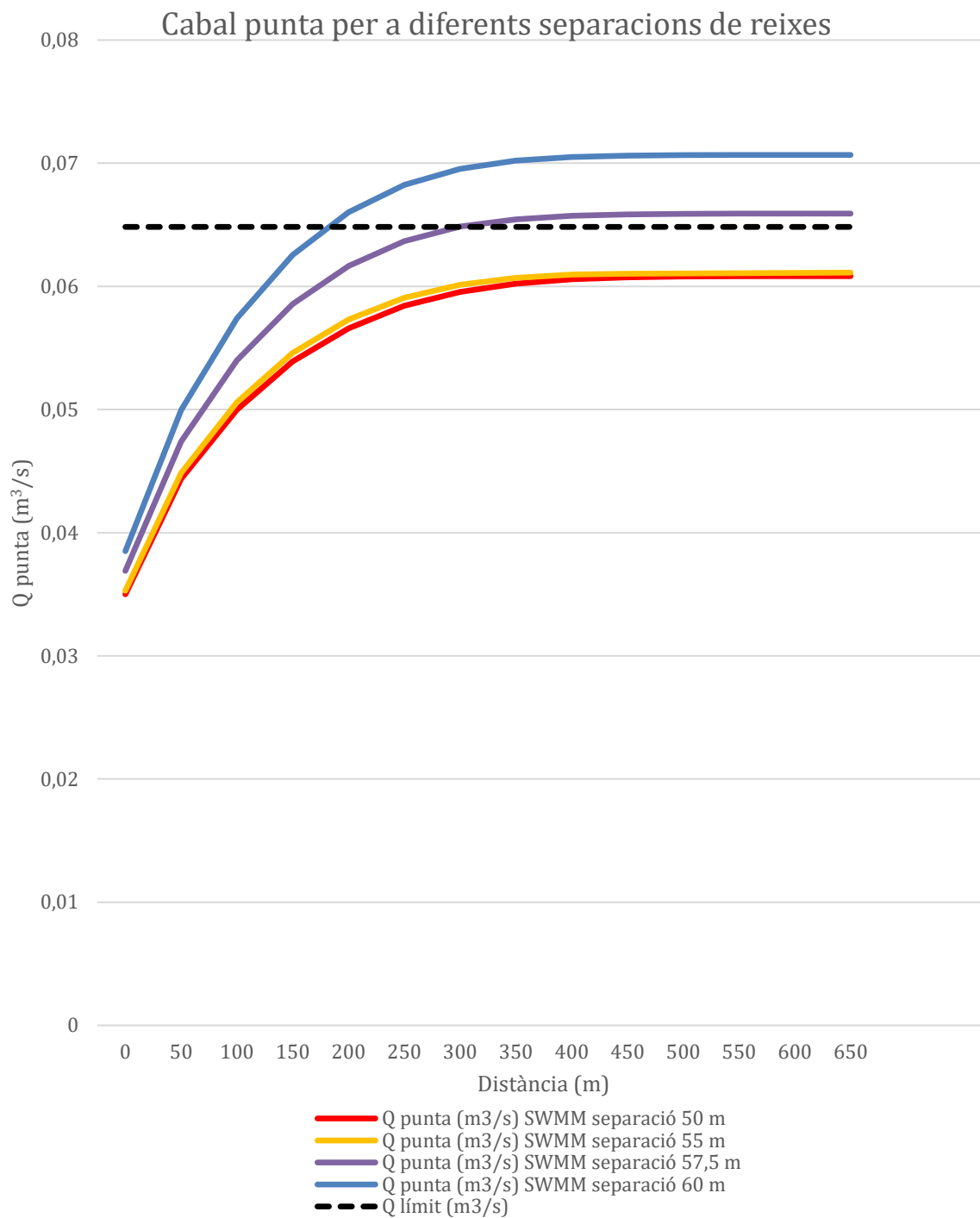


Figura 512. Gràfic dels cabals punta per a diferents separacions de reixes obtinguts amb SWMM.

Observant els resultats obtinguts, es conclou que en HEC-HMS són més permissius pel que fa a les separacions de reixes obtingudes que en SWMM, caient aquest més al costat de la seguretat. Per aquest cas estudiat, en SWMM es requerirà d'una separació de 55 metres mentre que a HEC-HMS es requerirà de 60 metres de separació, un 9,16% més que en SWMM.

Es conclou que, en el cas estudiat i per a un cabal límit fix, el programa SWMM requereix de menor separació de reixes i el programa d'HEC-HMS permet una major separació de reixes per assegurar els criteris de perillositat esmentats.

D'aquesta manera, en aquest treball s'han presentat les variables a introduir i els conceptes necessaris, així com els paràmetres a modificar per tal de reproduir en SWMM els estudis que s'han realitzat durant els últims anys a l'Escola de Camins de la Universitat Politècnica de Catalunya per a l'estudi de la hidrologia urbana.

Es conclou en aquest treball que la nova incorporació de la funció dels sistemes de captació de SWMM funciona de forma semblant que en HEC-HMS i que la metodologia per al càlcul i disseny del drenatge urbà estudiada dona resultats òptims per al disseny dels sistemes de captació d'aigua pluvial.

9. Referències

Martínez Gomariz, E. (2016, November 4). *Inundaciones urbanas : criterios de peligrosidad y evaluación del riesgo para peatones y vehículos* (Tesi doctoral). UPC, Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2117/106280>

Hamill, L. (2017). *Understanding Hydraulics*. Bloomsbury Publishing.

Concha, R., & Gomez, M. (2009). *Una aproximación a la modelización del drenaje dual urbano mediante EPA SWMM 5.0*. Jornadas de Ingenieria del Agua 2009 (pp. 165–166). Comunicació de congrés presented at the Jornadas de Ingenieria del Agua 2009, Madrid: International Association for Hydro-Environment Engineering and Research. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2117/6980>

Chow, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill Book Company.

Bladé, E., and M. Gómez-Valentín. 2006. *Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado en una y dos dimensiones*. Barcelona: Monografía CIMNE.

Bladé, E., M. Sánchez-Juny, H. Sanchez, D. Niñerola, and M. Gómez-Valentín. 2009. *Modelación numérica en ríos en régimen permanente y variable: una visión a partir del modelo HEC-RAS*. Barcelona: Edicions UPC.

Chanson, H. 2004. *Hydraulics of open channels*. Elsevier Butterworth-Heinemann.

James, W. R. C., & Rossman, L. A. (2010). *User's Guide to SWMM 5*.

Feldman, A. D., & Center, H. E. (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual*.

Cosco, C.; Gómez, M.; Russo, B.; Tellez-Alvarez, J.; Macchione, F.; Costabile, P.; Costanzo, C. *Discharge coefficients for specific grated inlets. Influence of the Froude number*. Urban Water J. 2020, 17, 656–668

Tellez-Alvarez, J.; Gómez, M.; Russo, B. *Quantification of energy loss in two grated inlets under pressure*. Water 2020, 12, 1601.

Gómez, M.; Russo, B.; Tellez-Alvarez, J. *Experimental investigation to estimate the discharge coefficient of a grate inlet under surcharge conditions*. Urban Water J. 2019, 16, 85–91.

Gómez, M.; Russo, B. *Methodology to estimate hydraulic efficiency of drain inlets*. Water Manag. 2011, 164, 81–90.

Tellez-Alvarez, J. *Image Processing and Experimental Techniques to Characterize the Hydraulic Performance of Grate Inlet*. Ph.D. Thesis, Technical University of Catalonia, Barcelona, Spain, 2019.

Russo, B.; Valentín, M.; Tellez-Álvarez, J. *The relevance of grated inlets within surface drainage systems in the field of urban flood resilience*. A review of several experimental and numerical simulation approaches. *Sustainability* 2021, 13, 7189.

Tellez-Alvarez, J.D.; Gómez, M.; Russo, B. *Modelling of surcharge flow through grated inlet*. In *Advances in Hydroinformatics*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2020; pp. 839–847.

Russo, B.; Gómez, M.; Tellez, J. *Methodology to estimate the hydraulic efficiency of nontested continuous transverse grates*. *J. Irrig. Drain. Eng.* 2013, 139, 225–230.

Tellez-Alvarez, J.; Gómez, M.; Russo, B. *Quantification of Energy Loss in Two Grated Inlets under Pressure*. *Water* 2020, 12, 1601.

Nanía, L.S., Escobar, L.S.N., & Valentín, M. G. (2006). *Ingeniería hidrológica*.

Agencia Estatal de Meteorología (s. f.). *Informe del estado del clima en España en 2019* - Agencia Estatal de Meteorología - AEMET. Govern d'Espanya. Agencia Estatal de Meteorología - AEMET. Govern d'Espanya. Retrieved from: https://www.aemet.es/ca/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/estudios/detalles/informe_clima_2019