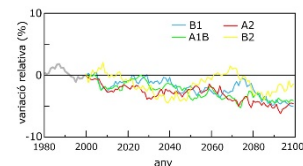
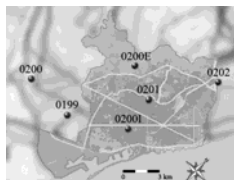
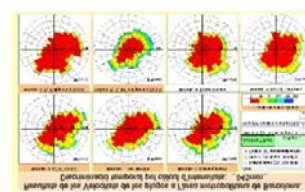
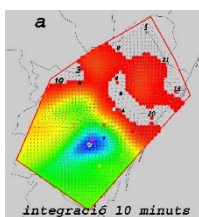
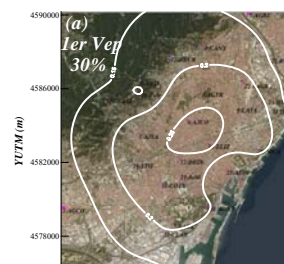


Organització espacial i temporal de la pluja a l'àrea metropolitana de Barcelona



Director:

Dr. Raúl Rodríguez Sola

Codirectora:

Dra. María del Carmen Casas Castillo

Memòria presentada per obtenir el títol de Doctor per la Universitat Politècnica de Catalunya

Doctorand:

Javier Navarro Bosque

Universitat Politècnica de Catalunya

Programa de doctorat: Física Computacional i Aplicada

Departament de Física, Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú. EPSEVG

Vilanova i la Geltrú, 13/10/2021

Organització espacial i temporal de la pluja a l'àrea metropolitana de Barcelona

Javier Navarro Bosque



Programa de doctorat: Física Computacional i Aplicada

Departament de Física, Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú. EPSEVG

Vilanova i la Geltrú, 13/10/2021

RESUM

És raonable pensar que per evitar les catàstrofes ocasionades per les pluges intenses, o fins i tot moderadament intenses, és imprescindible tenir un coneixement, tan exhaustiu com sigui possible, del comportament de les mateixes. Una font d'informació, per poder fer els estudis d'aquests comportaments, la tenim amb les dades que ens proporcionen els pluviòmetres. El nostre treball es fonamenta en les dades obtingudes de la xarxa densa de pluviòmetres que les empreses CLABSA i BCASA han estat gestionant a la zona metropolitana de Barcelona. Actualment disposem de series cronològiques de dades pluviomètriques des del 1994 fins el 2019, una mica més de 25 anys, que suposa que els resultats obtinguts amb les mateixes comencen a tenir significació climàtica i robustesa estadística. Amb aquestes informacions hem fet tres tipus d'estudis, temporals, espacials i cinemàtics. Amb els dos primers hem completat estudis anteriors amb més dades i els estudis cinemàtics són els primers que s'han obtingut per l'àrea barcelonina. Els estudis de temporalitat es fan amb l'obtenció de les corbes d'intensitat-duració-freqüència (IDF) on presentem la intensitat de la pluja en funció de la duració de la mateixa per diferents períodes de retorn. Això ho fem individualment per cadascuna de les estacions de la xarxa així com per determinades agrupacions de les mateixes, per exemple agrupacions de valor màxim. En tots els casos podem afirmar que els resultats obtinguts són compatibles i complementen els resultats obtinguts amb anterioritat amb menys quantitat de dades.

Disposar de les dades d'una xarxa de pluviòmetres permet, entre d'altres coses, estudiar l'estructura espacial de les tempestes. En relació amb aquest estudi hem calculat el nombre d'estacions independents i equivalents a la xarxa per les diferents durades de les pluges. Es veu que és un valor que decreix exponencialment amb la durada de les tempestes cap al valor 1 (una estació independent) i que per durades curtes es tenen cinc estacions independents. Hem dissenyat una xarxa de punts, amb un espaiat de 300 m entre ells, de forma que amb el mètode d'interpolació de Barnes assignem a cadascun d'ells un valor de precipitació. Fent ús de les dades experimentals de les estacions hem estudiat els factors de reducció areal (areal reduction factors: ARF) que també ens ha de permetre obtenir estimacions de la precipitació a una determinada zona en funció del valor de la mateixa a un punt. Aquests càlculs tornen a ser fonamentalment compatibles amb els resultats obtinguts amb anterioritat.

Continuem el nostre treball, aprofitant de nou que tenim dades de la xarxa de pluviòmetres, amb un estudi de la cinemàtica de les tempestes. Suposem que les tempestes estan dotades d'una velocitat constant i que les diferents propietats estudiades, com per exemple el “començament de la pluja” o el “primer màxim d'intensitat”, tenen aquesta mateixa velocitat. Els resultats ens indiquen que no totes les propietats estudiades tenen exactament la mateixa velocitat i pensar que una pluja presenta una velocitat constant és només una aproximació.

Finalitzem el nostre treball extrapolant els mètodes d'estudi temporals a les dades proporcionades per diferents models climàtics, aplicats a la zona barcelonina i pel segle XXI. Aquests models proporcionen dades per intervals temporals diaris i hem fet ús de tècniques de downscaling per obtenir estimacions temporals sots-diàries de forma que hem pogut fer un estudi temporal de les IDF complet.

ABSTRACT

In order to avoid the catastrophes caused by intense or even moderately intense, rainfall episodes, it is essential to have as exhaustive a knowledge as possible of the behaviour of the same. We have a source of information to study these behaviours with the data provided by rain gauges. Our work is based on data obtained from the dense network of rain gauges that the companies CLABSA / BCASA have been managing in the metropolitan area of Barcelona. Chronological series of rainfall data from 1994 to 2019, over 25 years, are currently available. This means that the results obtained with them are beginning to have climatic significance and statistical robustness. With this information we have done three types of studies, temporal, spatial and kinematic. With the first two we have completed and updated previous studies with more data, while the kinematic studies are the first to be obtained in the Barcelona area. Temporality studies are made by obtaining the intensity-duration-frequency (IDF) curves where we present the rainfall intensity as a function of its duration for different return periods. We do this individually for each of the stations in the network as well as for certain groupings of them, for example maximum value groupings. In all cases we can say that the results obtained are compatible and complement the results obtained previously with less data.

Having the data from a network of rain gauges allows, among other things, to study the spatial structure of storms. In relation to this study we have calculated the number of independent stations which are equivalent to the network for the different rainfall durations. It is seen that this number is a value that decreases exponentially with the duration of the storms towards the value 1 (an independent station) and that for short durations five independent stations are enough to represent the urban network. We have designed a network of points, with a spacing of 300 m between them, so that with the Barnes interpolation method we assign to each of them a precipitation value. Using the experimental data of the stations we have studied the areal reduction factors (ARF) which should also allow us to obtain estimates of precipitation in a given area as a function of its value at a point. These calculations are again fundamentally compatible with the results obtained previously.

We continue our work, taking advantage again that we have data from the network of rain gauges, with a study of the kinematics of rainfall. We assume that the storms are endowed with a constant speed and that the different properties studied, such as the "beginning of the rain" or the "first maximum intensity", have the same speed. The results indicate that not all the properties studied have exactly the same speed and to think that a rain has a constant speed is only an approximation.

We end our work by extrapolating the temporary study methods to the data provided by different climate models applied in the Barcelona area and for the 21st century. These models provide data for daily time intervals, and we used downscaling techniques to obtain sub-daily time estimates so that we were able to perform a complete IDF time study.

Paraules Clau	Keywords
● IDF: corbes intensitat-duració-freqüència	● IDF: intensity-duration-frequency curves
● ARF: factors de reducció areal	● ARF: areal reduction factors
● Cinemàtica de pluges	● Rain kinematics
● Canvi Climàtic	● Climate change
● Zona metropolitana de Barcelona	● Barcelona metropolitan area
● Xarxa densa de pluviòmetres	● Dense network of rain gauges
● Models climàtics i downscaling	● Climate models and downscaling

Agraïments

Vull agrair als directors, companys i amics, de la tesi, el Raul i la M^a Carmen, la seva determinació, treball i esforç per que aquesta tasca hagi arribat a bon port. També vull fer extensiu l'agraïment als companys de la Secció, l'Arcadi, el Manel i el Joan que sempre han estat disposats a facilitar-me el temps que em feia falta per realitzar el present treball.

Agrair a l'empresa pública BCASA la seva col·laboració i les seves dades, imprescindibles per poder fer aquest treball.

No em puc oblidar de la meva família, i en especial als meus fills, el Pol i la Maria, per la seva paciència i comprensió pel fet de tenir un pare absorit en la feina d'elaboració de la tesi i no poder compartir amb elles tot el temps que es mereixien.

Finalment, a la Joana, la meva parella, pels bons consells, pel seu sacrifici i per l'empenta fonamental que ha fet que pugui terminar aquest treball.

A tots, de tot cor, gràcies.

Xavier

Organització espacial i temporal de la pluja a l'àrea metropolitana de Barcelona

Índex

1. Relacions Intensitat-Duració-Freqüència (IDF) de les pluges a l'àrea metropolitana de Barcelona	5
1.1. Introducció	5
1.2. Els registres de les pluges.....	6
1.2.1. Els pluviòmetres de balancí.....	8
1.2.2. La xarxa de pluviòmetres de Barcelona	8
1.2.3. Obtenció de les dades operatives	12
1.3. Programari desenvolupat per la construcció de les IDF's.....	17
1.3.1. FiltresPlujes	18
1.3.2. DeteccioPluja	22
1.4. Les funcions <i>mnp</i>	32
1.5. Mètodes de màxims anuals: GE1 (Gumbel) i GEV	43
1.5.1. Distribució de probabilitat de valors extrems de tipus 1 o de Gumbel	44
1.5.2. Distribució de probabilitat general de valors extrems (GEV).....	45
1.6. El mètode dels moments lineals (l-moments)	46
1.6.1. Introducció als l-moments	46
1.6.2. Diagrama de l-moments	48
1.7. Resultats	49
1.8. Comparativa amb les IDF actuals	57
1.9. Conclusions	65
2. Organització espacial de la pluja a la zona urbana de Barcelona.....	67
2.1. Introducció	67
2.2. Estudi de la correlació espacial entre els pluviòmetres de la xarxa i el nombre equivalent d'estacions independents.....	68
2.2.1. Anàlisi prèvia de les dades i dels primers resultats de correlacions.....	69
2.2.2. Anàlisi factorial de components principals (PCA).....	72
2.3. Anàlisi espacial de la pluja a Barcelona.....	84
2.3.1. Factors de reducció areal (ARF) de l'àrea metropolitana de Barcelona	89
3. Seguiment cinemàtic de tempestes a Barcelona	95
3.1. Introducció	95
3.2. La zona de càlcul.....	95
3.3. Test dels mètodes de càlcul	96
3.4. Els diferents mètodes de càlcul	101
3.4.1. Els mètodes del centre de masses.....	102
3.5. Descripció del mètode de càlcul de la velocitat	104
3.5.1. Mètodes directes: obtenció dels instants t_k	105
3.5.2. Obtenció dels instants t_k amb els mètodes de correlacions.....	106
3.6. El càlcul de les velocitats	108
3.6.1. Càlcul dels paràmetres a , b i c	109
3.6.2. La velocitat, interpretació física dels paràmetres del pla; valors a , b i c	115
3.6.3. La bondat de l'ajust	118
3.7. Resultats	120
3.7.1. Les pluges de disseny o de test.....	120

3.7.2. Les pluges reals	125
3.7.3. Filtres temporals	129
3.7.4. Pluges extremes	142
3.7.5. Discussió de resultats	144
3.7.6. Conclusions	148
4. Els efectes del canvi climàtic en les intensitats extremes de pluja a l'àrea metropolitana de Barcelona	151
4.1. Introducció	151
4.2. Obtenció de sèries futures pel segle XXI de precipitació a Barcelona: <i>downscaling</i> espacial	153
4.3. Anàlisi de les sèries de precipitació diàries simulades a Barcelona pel segle XXI	156
4.4. Generació de les corbes IDF de Barcelona sota els diferents escenaris climàtics futurs	163
5. Conclusions	171
6. Annexos	175
6.1. <i>Annex A</i> : Valors dels paràmetres m , n i p , pels diferents pluviòmetres i duracions. També mostrem el número de punts utilitzats per fer els ajustos i l'estadístic χ^2	175
6.2. <i>Annex B</i> : Corbes IDF calculades amb la funció de probabilitat mnp de la regió metropolitana de Barcelona	182
6.3. <i>Annex C</i> : Corbes IDF calculades amb la funció de Gumbel de la regió metropolitana de Barcelona	191
6.4. <i>Annex D</i> : Corbes IDF calculades amb la funció GEV de la regió metropolitana de Barcelona	199
6.5. <i>Annex E</i> : Dades numèriques de tres fitxers amb les dades temporals i per tant de profunditat de precipitació, igual.	207
6.6. <i>Annex F</i> : Assignació del temps pels diferents mètodes de càlcul de les velocitats	208
6.7. <i>Annex G</i> : Resum de resultats de les desviacions i del S.R. mitjanats per les diferents direccions de propagació i per un temps d'estudi de les pluges de 5 minuts.	214
6.8. <i>Annex H</i> : Exemple d'aplicació dels mètodes de càlcul de les velocitats a una pluja real.	217
6.9. <i>Annex I</i> : Data, velocitat i direcció estimades de les pluges extremes registrades a Barcelona entre 1994 i 2019	227
7. Bibliografia	229
8. Índex de taules, figures i imatges	235
8.1. Taules	235
8.2. Figures	237
8.3. Imatges	239

1. Relacions Intensitat-Duració-Freqüència (IDF) de les pluges a l'àrea metropolitana de Barcelona

Intensitat [<https://www.enciclopedia.cat>] del llatí *intensitas*. Qualitat d'intens. Magnitud d'un fenomen.

- *intensitat de camp elèctric*: vector de magnitud igual al quocient entre la força exercida sobre una càrrega elèctrica i aquesta càrrega, i de la mateixa direcció i el mateix sentit que la força.
- *intensitat de corrent (o simplement intensitat)*: càrrega elèctrica que travessa, per unitat de temps, la secció d'un conductor pel qual flueix un corrent elèctric.
- *intensitat energètica (o radiant)*: quocient entre el flux energètic, emès en un angle sòlid sobre una direcció determinada, i aquest angle sòlid.
- *intensitat lluminosa*: quocient entre el flux lluminós emès per una font lluminosa, en un angle sòlid sobre una direcció determinada, i aquest angle sòlid.
- *intensitat sonora (o acústica)*: quantitat d'energia sonora, present en un punt determinat, referida a la unitat de superfície i en una direcció determinada.

Duració [La gran enciclopèdia en català. Vol.7] del llatí *duratio*. Durada. Acció i efecte de durar.

- *espai de temps, període mesurable durant el qual té lloc un esdeveniment, un fenomen, una acció, un estat.*
- *segons Kant, determinació temporal d'allò que és permanent en l'existència de les coses.*

Freqüència [La gran enciclopèdia en català. Vol.9] del llatí *frequentia*. Quantitat de freqüent, repetició. Mesura del nombre de vegades que ocorre un esdeveniment per unitat de temps.

- *freqüència de basculació (electrònica)*: en un circuit digital, quantitat de vegades per segon que canvia d'estat.
- *freqüència pròpia*: freqüència en la qual es pot produir una oscil·lació lliure en un dispositiu donat
- *freqüència absoluta*: en una distribució estadística, nombre de dades que pertanyen a una classe determinada.
- *freqüència infrasonica*: freqüència situada per sota de la gamma de freqüències de possible audició humana.

1.1. Introducció

Per estudiar les pluges a la zona metropolitana de Barcelona hem de tenir present que aquestes es generen, fonamentalment, de dos maneres diferents. La precipitació pot procedir de sistemes nuvolosos d'escala sinòptica (mida típica de les depressions a zones mitjanes; 1000 km o més) o bé de sistemes convectius de molta menor extensió i menor durada, d'escala local o de meso-escala. Els primers presenten precipitacions febles o moderades anomenades generalitzades o estratiformes. Això és degut a que es donen ascensos forçats de velocitat verticals petites. En els segons es poden donar ascensos verticals amb grans acceleracions i solen produir xàfecs d'intensitat moderada o forta; precipitació que sol denominar-se convectiva. Tan uns com els altres solen ser el producte del pas de sistemes depressius frontals, però els xàfecs convectius poden tenir també unes característiques locals molt destacades, essent la interacció mar-atmosfera una de les més destacades.

En general, la manca d'homogeneïtat dels instruments de mesura de la intensitat de precipitació, així com els diferents tipus d'informació necessària segons quina sigui l'aplicació concreta de les dades de pluja, fan que en moltes ocasions sigui difícil disposar de dades adequades que permetin

comparar les característiques climatològiques més significatives de la intensitat en diferents llocs o classificar, de la forma més objectiva possible, les pluges registrades en un mateix lloc atenent al comportament d'aquestes variables característiques (Gajić-Čapka, 1991).

Normalment, a partir de les dades proporcionades per pluviòmetres totalitzadors se sol estudiar el comportament de la intensitat de pluja en intervals de temps de 24 hores o superiors (Rakhecha, et al., 1992) mentre que quan es requereix un coneixement més fi de la intensitat, com és en el nostre cas, s'han d'utilitzar els pluviòmetres d'intensitat que permetin triar la durada de l'interval en el qual es vol fer la mitjana de la intensitat de la pluja (Unkašević, 1991); (Urcikán, et al., 1984). Entre els treballs dedicats a l'obtenció de corbes teòriques de distribució de freqüències dels valors de la intensitat de pluja mitjanada en diferents intervals de temps (Gajić-Čapka, 1990) (Gajić-Čapka, 1991); (Koutsoyiannis, et al., 1998); (Willems, 2000), n'hi ha que estudien la relació entre aquests valors per a una mateixa pluja (Sumner, 1978); (Eicher, 1991); (Lorente, et al., 1991) essent aquesta una informació de gran importància relacionada amb l'origen i l'evolució de la situació meteorològica que provoca la precipitació.

Al present estudi s'utilitzen les dades obtingudes per la xarxa pluviomètrica que la empresa BCASA té a la zona metropolitana de Barcelona amb registres des de 1994. Aquestes dades ens han estat subministrades des de 2008 fins l'actualitat. A partir d'aquestes informacions s'ha calculat la precipitació màxima per diferents intervals de temps amb la finalitat d'investigar la relació entre les intensitats màximes de precipitació, la seva durada i la seva freqüència per tres mètodes diferents, i així fer una revisió de les corbes d'intensitat-durada-freqüència (IDF) de Barcelona (Casas, et al., 2004); (Casas, et al., 2010)

El càlcul d'aquestes corbes intensitat-durada-freqüència (corbes IDF) segueix sent una eina important per l'anàlisi de riscos naturals i dissenys hidrològics, en el nostre cas, per exemple, per adequar les mides dels dipòsits de recollida d'aigües pluvials i les del propi clavegueram de la ciutat de Barcelona.

1.2. Els registres de les pluges

El primer lloc, explicarem les característiques de la xarxa de pluviòmetres de l'àrea metropolitana de Barcelona i com són i com treballen els pluviòmetres de balanci, que són els aparells amb els què es realitza la recollida de les precipitacions. Encara que sembli un obvietat cal fer esment de les unitats amb què designarem la quantitat d'aigua recollida pels pluviòmetres; de forma natural parlarem de volum de precipitació recollit i el què volem dir és volum de precipitació per metre quadrat. Per tant, si parlem de litres per metre quadrat recollits, les unitats associades a aquest *volum* poden ser L/m^2 . Queda clar que estem fent un abús de llenguatge a l'anomenar a aquesta

quantitat volum. Els nostres volums V tindran unitats de longitud. Per exemple “un litre per metre quadrat” d’aigua recollida no és més que

$$V = 1 \frac{L}{m^2} = 1 \frac{dm^3}{m^2} = \frac{(100 \text{ mm})^3}{(1000 \text{ mm})^2} = 1 \text{ mm}$$

1.2.1. Els pluviòmetres de balancí

Les dades que utilitzarem en els nostres càlculs procedeixen d'una xarxa de pluviòmetres automatitzats, anomenats de balancí. Aquest tipus de pluviòmetres mesuren de forma precisa la quantitat de pluja caiguda mitjançant un balancí de buidatge automàtic. Disposa d'un interruptor que s'obre cada vegada que el pes de l'aigua acumulada fa bascular el balancí, el que produeix un pols que pot ser registrat mitjançant un comptador de polsos.

Els pluviòmetres de balancí que s'utilitzen per efectuar la recollida d'aigua de pluja són del tipus LAMBRECHT 15188 amb una precisió d'1 dmm (Imatge 1-1). Cada cop que l'aigua caiguda omple un dels "platerets del balancí" queda enregistrat l'instant de temps en què s'ha produït. El conjunt de registres de les diferents bolcades de tots els pluviòmetres de la zona formaran les dades de les nostres pluges.



Imatge 1-1 Aspecte d'un dels pluviòmetres LAMBRECHT 15188 utilitzats a la xarxa urbana de Barcelona

1.2.2. La xarxa de pluviòmetres de Barcelona

Per fer els estudis sobre les diferents propietats de les pluges, a la regió metropolitana de Barcelona, hem treballat amb les dades obtingudes de la xarxa de pluviòmetres, propietat de la societat BCASA (Barcelona Cicle de l'Aigua, S.A.). Aquesta societat té participació pública amb la presència de l'Ajuntament de Barcelona als seus òrgans de gestió. Aquesta xarxa de pluviòmetres és hereva de la que inicialment gestionava una altra societat, CLABSA (Clavegueram de Barcelona, S.A.) també amb participació de l'ajuntament barceloní.



Imatge 1-2 Seu de l'empresa CLABSA (esquerre) Dipòsit per recollir aigües pluvials del clavegueram a la ciutat de Barcelona (dreta)

Des de 2008 fins ara mateix s'han rebut les dades de les dues societats municipals. Malgrat que la nomenclatura dels diferents pluviòmetres ha anat canviant, això no ha suposat grans dificultats per fer la corresponent traçabilitat entre les diferents designacions de les estacions pluviomètriques. Hem respectat la primera notació que ens van donar dels aparells, de manera que les primeres assignacions, anomenades PL, són les que han perdurat en tots els nostres treballs (Taula 1-1) i hem adaptat els noms de les noves estacions a noves notacions, anomenades P, i fins i tot respectem les nomenclatures de les estacions que han desaparegut.

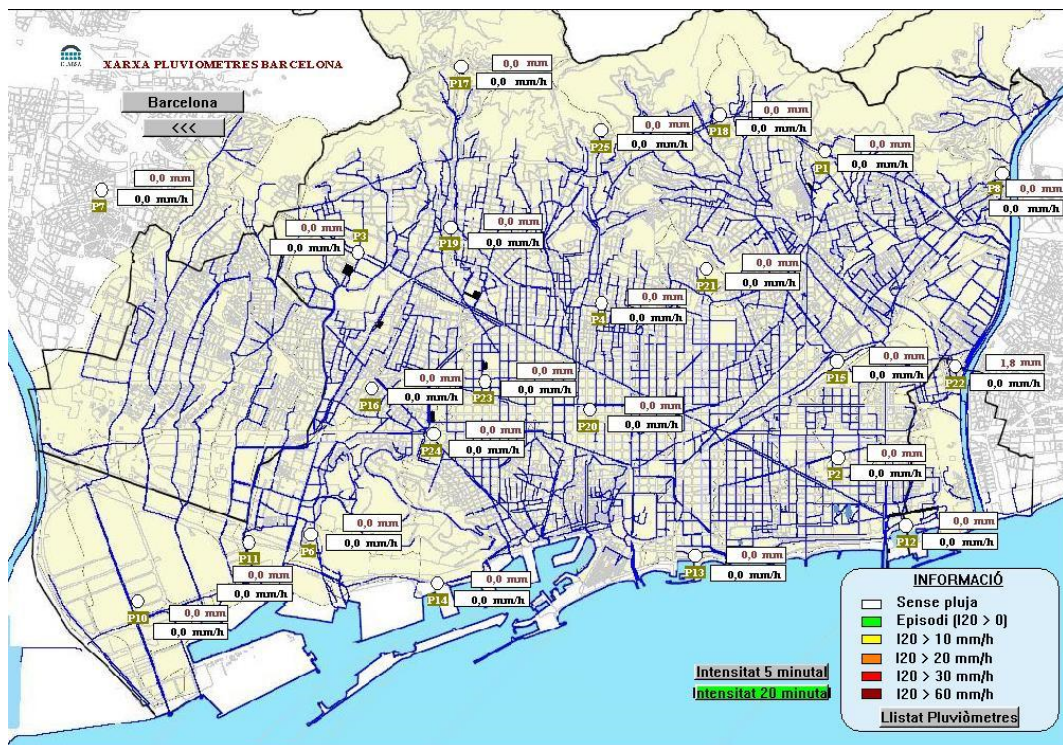
Els pluviòmetres de la nostra xarxa de treball, amb els seus números d'identificació, amb el seu nom, la seva descripció i situació així com la posició UTM es presenten a la Taula 1-1. Es pot veure que han desaparegut diferents pluviòmetres (PL13 i PL23) El PL13 es pot considerar que ha tingut continuïtat amb el PL24 que està molt a prop del primer.

PL N°	P N°	Nom	Descripció i Situació (2008)	$X_{UTM} (m)$	$Y_{UTM} (m)$
1	8	AGBE	AGBAR-Central Besòs Central al costat riu Besòs sota Nus de la Trinitat	432571.50	4590189.02
2	7	AGCO	AGBAR-Central Cornellà Carretera de Sant Joan Despí, 1 Cornellà	422530.02	4579548.85
3	9	AGTI	AGBAR-Tibidabo Carretera de Vallvidriera	426690.31	4586494.09
4	21	AGTR	AGBAR- Turó de la Rovira C. Maria Lavernia s/n	430033.71	4585877.61
5	19	AJSA	Ajuntament, Sarrià-Sant Gervasi Plaça Consell de la Vila, 7	426648.22	4583627.20
6	4	AJUO	Ajuntament, UOAS Torrent de l'Olla, 218-220	429269.86	4584410.49
7	6	BARK	Escola Bàrkeno Passeig Zona Franca , 56	428484.87	4578697.91
8	1	CANY	Centre Pau Casals (Canyelles) Ronda de la Guinegueta Vella, 10-14	430181.35	4588414.30
9	2	CATA	Escola Catalònia C. Perú, 195	433278.54	4585022.51
10	11	CLAB	CLABSA C. Acer, 16	427986.67	4578246.70

11	16	COTX	Cotxeres de Sants C.Olzinelles, 7	427878.79	4580946.15
12	23	DEIN	Dipòsit Escola Industrial(pluviòmetre) C.Viladomat/C.Rosselló	428882.80	4582235.76
13		DEPU	Depuradora Besos Desaparegut a l'actualitat	435184.29	4584975.35
14	20	ELIZ	Casa Elizalde Valencia, 302	430373.13	4583077.04
15	10	FCCF	FCC- Zona Franca Zona Franca, Carrer D, 49-51, Sector B	427443.14	4576149.36
16	3	FISI	Facultat de Físiques Av. Diagonal, 647	426341.33	4582030.28
17	18	HEUR	Palau de les Heures Parc Les Heures	428356.66	4587775.00
18	14	MONT	Castell Montjuïc Vivenda Militar del Castell de Montjuïc	430431.21	4579648.86
19	17	NABI	Escola Nabí (Vallvidrera) C. Reis Catòlics,38	425041.98	4585528.75
20	13	NICA	Poliesportiu Nova-Icària Av. Icària, 129	433034.54	4582822.33
21	22	ROLI	Torrent Estadella Ronda Litoral Tram 9, Sant Andreu	434116.78	4587438.68
22	15	SAGR	Centre Cívic Sagrera C. Martí Molins, 29	432334.28	4586331.75
23		AJNO	Ajuntament, edifici Novíssim Plaça de Sant Miquel Desaparegut a l'actualitat	431350.99	4581678.24
24	12	DTAU	Dipòsit de Taulat (pluviòmetre) C. Taulat	435057.25	4585170.89
25	24	JOMI	Dipòsit de Joan Miró (pluviòmetre) C. Tarragona/C. Diputació	428879.67	4581116.72
26	25	Fabr	Observatori Fabra Camí de l'observatori	426783.18	4585860.10
28	26	BEMO	Besòs-Montcada. Primera aparició al 2017	432591.53	4592834.77
29	27	DAHG	Ajuntament Horta Guinardó. Primera aparició al 2017	430345.63	4584938.66

Taula 1-1 Els pluviòmetres d'intensitat de la xarxa metropolitana. A la columna PL N° indiquem l'índex associat des de l'inici del nostre treball. A la columna on mostrem el nom i la situació mostrem com aquesta nomenclatura numèrica ha canviat (P N°) A les dues últimes columnes indiquem la posició del pluviòmetre en coordenades UTM.

A la Imatge 1-3 (cortesia de BCASA) es pot veure la localització dels pluviòmetres sobre el plànol de la zona urbana de Barcelona.



Imatge 1-3 Mapa de la zona de Barcelona amb la localització dels pluviòmetres subministrat per BCASA el 2008. BCASA ja utilitzava la nomenclatura (Pnn) per identificar-los.

A la Imatge 1-3 es pot apreciar que, encara que no sigui una xarxa distribuïda de forma regular, aquesta pot reflectir adequadament qualsevol pluja que es produeixi a la ciutat de Barcelona i fins i tot a la seva àrea d'influència; la distància mitjana entre pluviòmetres és de l'ordre de 1800 m. Es pot observar que a la xarxa tenim un pluviòmetre, el PL2 (P7), al municipi de Cornellà, que acaba de tancar l'aresta d'una mena de rectangle imaginari amb el segon vèrtex a la Zona Franca, pluviòmetre PL15 (P10) Hem de destacar que a prop d'aquesta aresta, al municipi de l'Hospitalet de Llobregat, no tenim cap informació procedent dels seus pluviòmetres, com tampoc dels municipis de Sant Just Desvern i Esplugues de Llobregat (Imatge 1-4).



Imatge 1-4 Mapa (obtingut de la Diputació de Barcelona) dels municipis del Barcelonès i del Baix Llobregat. Amb dades pluviomètriques de l'Hospitalet, Esplugues de Llobregat, Sant Just Desvern i de la ciutat de Barcelona, disposariem de les informacions pluviomètriques d'una zona pràcticament rectangular

1.2.3. Obtenció de les dades operatives

Les dades originals

Les dades de precipitacions captades pels pluviòmetres han estat gestionades per les societats CLABSA i BCASA, a les quals hem d'agrair la seva col·laboració.

Quasi sempre hem obtingut els fitxers amb les dades de les pluges en el format d'instantes en què el balancí del pluviòmetre estava ple i feia la bolcada, per tant havia recollit $0.1 L$ per metre quadrat de precipitació ($1 dmm$ de quantitat de precipitació). Hi ha hagut ocasions, però, en què la informació ens ha arribat en la forma de "volum recollit cada 5 minuts" per tots i cada un dels intervals de 5 minuts del període en qüestió, que solen ser anys sencers o part d'aquests. Amb la informació ordenada d'aquesta forma esperàvem poder treballar "directament" amb aquestes dades.

Està àmpliament acceptat que en treballar amb un interval de temps de 5 minuts, les dades d'una xarxa pluviomètrica de la mida de la nostra, es poden considerar sincronitzades i amb les incerteses temporals prou petites com per considerar-les menyspreables.

Els dos tipus de fitxers es poden reconstruir, de forma quasi exacta, un a partir de l'altre. Quedant clar que a partir de les dades dels instants de les bolcades, simplement comptant quants instants hi ha en els 5 minuts en què estem interessats, tindrem els volums recollits en aquests 5 minuts. Aquest recompte és pot fer, si fos necessari el seu estudi, per intervals de temps diferents a 5 minuts. La funció contrària, reconstruir els fitxers de bolcades a partir dels de volums de 5 minuts, no és pot fer exactament. Dit això, sempre es poden estimar tants instants de temps, dins dels 5 minuts que estiguem estudiant, com el valor del volum, en *dmm*, que ens doni la dada del fitxer. Aquesta tria es pot fer de manera, per exemple, uniforme en tot l'interval. Sembla raonable que es triï una distribució uniforme ja que amb la informació que disposem no podem fer cap conjectura de com ha estat aquesta distribució en el temps.

Els dos tipus de fitxers tenen aspectes (operatius) positius i negatius, de forma pràcticament complementària. Els fitxers amb els instants de les bolcades són la informació pura, la mínima, la que genera l'aparell de mesura, pràcticament sense cap tractament. Tots els "bytes" d'aquests tipus de fitxers són informacions rellevants, encara que les dates d'aquestes bolcades no estan seriades amb un increment temporal fix. En canvi les dades seriades cada 5 minuts tenen informacions fonamentalment nul·les i els fitxers on tenim les dades són molt més grans que les dels instants de bolcades.

Hem realitzat mitjanes anuals de les mides dels fitxers de bolcades i dels de volums cada 5 minuts (Taula 1-2) i es pot veure que els fitxers de volums de 5 minuts (183 Mbytes/any) tenen una mida aproximadament dos ordres de magnitud superior als fitxers de bolcades (2.3 Mbytes/any)

Fitxers de bolcades		Fitxers de Volums 5 minuts	
Període	Mbytes	Període	Mbytes
1994 fins 2004	23.60		
2005	2.56	2005	178.9
2006	1.96	2006	178.9
2007	1.90	2007	128.9
2008	2.79	2008	184.2
2009	2.35	2009	187.7
2010	2.90		
2011	3.64		
2012	1.92		
2013	2.30		
2014	2.61		
<i>2.3 Mbytes/any</i>		<i>183 Mbytes/any</i>	

Taula 1-2 Mides dels fitxers de dades pels fitxers de bolcades i pels de volums de 5 minuts. La mida dels fitxers de volums de 5 minuts és dos ordres de magnitud més gran que la dels fitxers de bolcades.

A la Taula 1-3 presentem els registres originals rebuts de les societats gestores de la xarxa i a la Figura 1-1 mostrem una representació gràfica de les informacions i els seus formats. Es pot veure que hi ha intervals contigus què no hem agrupat ja que procedeixen d'informacions disjunctes, per exemple del 1994 fins el 2005 i del 2005 fins el 2010 pels fitxers de bolcades i del 2002 fins el 2010 i del 2010 fins el 2015 a les dades de 5 minuts. Durant una part del 2018 tenim la informació doblada; i del 2002 fins el 2010 tenim els dos tipus de dades que, hem de dir, que son coherents.

Període	Format
1994 fins 2010	Bolcades
2002 fins 2015	5-minutals
2015 fins 2019	Bolcades

Taula 1-3 Informacions rebudes per les Societats gestores dels pluviòmetres i els seus formats.

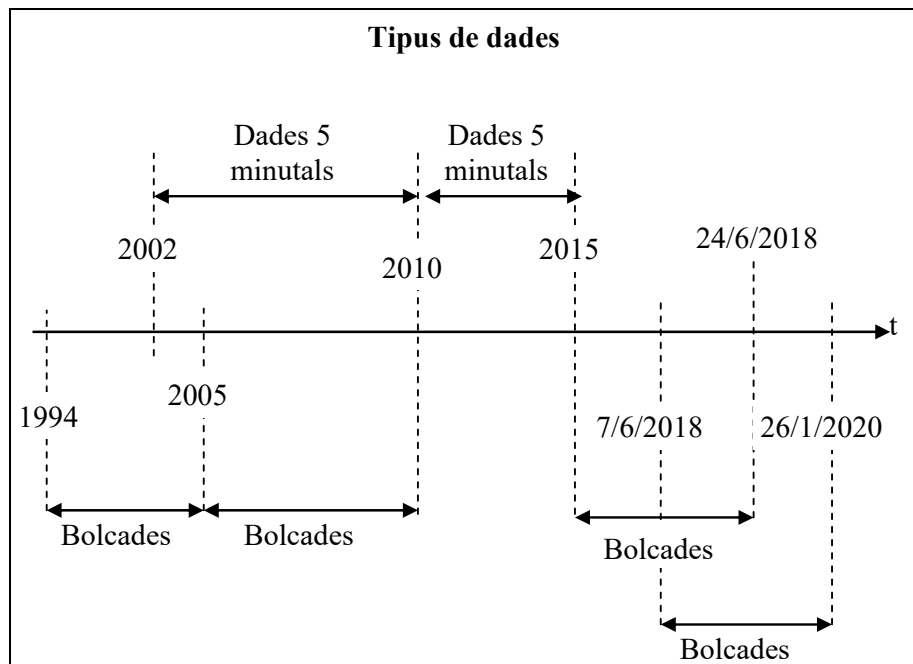


Figura 1-1 Representació cronològica de les informacions rebudes per les Societats gestores dels pluviòmetres i els seus formats: Bolcades i 5-minutals.

Tractament de les dades originals.

Al llarg dels nostres treballs hem rebut informacions sobre les pluges en diferents formats. Acompanyant aquestes dades, sempre tenim un descriptor de continguts que ens proporciona la pròpia empresa propietària de la xarxa. Seguint aquestes instruccions i per tots i cada un dels fitxers amb informacions rebudes, hem elaborat uns programaris específics per estandaritzar les informacions pel seu posterior tractament. Tot seguit mostrem un d'aquests fitxers amb les instruccions necessàries per extreure les informacions sobre les quantitats de pluja recollida:

Nota informativa

Esta distribución consta de los siguientes ficheros :

- *Datos: aaaa.txt* Fichero que contiene los datos de lluvia recogidos por un pluviómetro a lo largo de un año expresados en volcadas. [1 volcada = 0.1 mm] Los datos van desde el año 1994 al 1999. Contiene tres columnas de datos ordenadas de la primera a la última que son :
(Nombre del Pluviómetro); (Fecha, hora, minuto y segundo de la volcada); (Décima de segundo de la volcada);
- *Anomalies.txt* Fichero que contiene rangos de tiempo en los cuales un pluviómetro presentaba anomalías de funcionamiento, y por lo tanto los datos de lluvia que pudiese haber medido no han de ser tenidos en cuenta. Contiene tres columnas de datos ordenadas de la primera a la última que son :
(Nombre del Pluviómetro); (Fecha de inicio de la anomalía); (Fecha de final de la anomalía);
- *Revisions.txt* Fichero que contiene rangos de tiempo en los cuales un pluviómetro estaba en fase de revisión y por lo tanto los datos de lluvia que pudiese haber medido no han de ser tenidos en cuenta, ya que pueden haber sido provocados artificialmente. Contiene tres columnas de datos ordenadas de la primera a la última que son :
(Nombre Pluviómetro); (Fecha de inicio de la revisión); (Fecha de final de la revisión);

- *Pluviometres.txt* Fichero que contiene los datos de ubicación física de los pluviómetros expresados en coordenadas UTM. Aparte también contiene una descripción sobre la ubicación de los mismos. Contiene cuatro columnas de datos ordenadas por la primera columna que son : (Nombre Pluviómetro); (Descripción sobre la ubicación del mismo); (Coordenada X UTM del pluviómetro); (Coordenada Y UTM del pluviómetro);
Atentamente, CLABSA.

A tall d'exemple, mostrem les primeres línies d'un d'aquests fitxers de bolcades original i la seva transformació (Taula 1-4)

Dades originals de la bolcada			Dades tractades per poder fer els estudis	
Nom Pluv	data	dècima de segon	Codi Pluv	Instant de la bolcada (s)
"AGBE"	3/2/94 14:42:24	7	1	2904144.7
"AGBE"	3/2/94 14:53:24	6	1	2904804.6
"AGBE"	3/2/94 15:02:28	3	1	2905348.3

Taula 1-4 Tres primeres línies d'un fitxer de dades proporcionat per les societats BCASA i la transformació en dades preparades pels diferents càlculs.

Hem establert un instant inicial en la data del 1/1/1994 00:00:00 i el "instant de la bolcada" és el nombre de segons transcorreguts entre aquest instant inicial i la data de la bolcada (Taula 1-4)

Per fer aquest càlcul, en què s'han de tenir presents els diferents anys de traspàs i els diferents dies del mes, utilitzem la instrucció estàndard del nostre software de càlcul:

$$\text{DateDiff}(\text{interval}, \text{Data1}, \text{Data2})$$

on *interval* fa referència a la unitat en la mesura del temps, segons (s) en el nostre cas i *Data1* i *Data2* són les dates entre les que calcularem l'interval de temps en segons. Per exemple

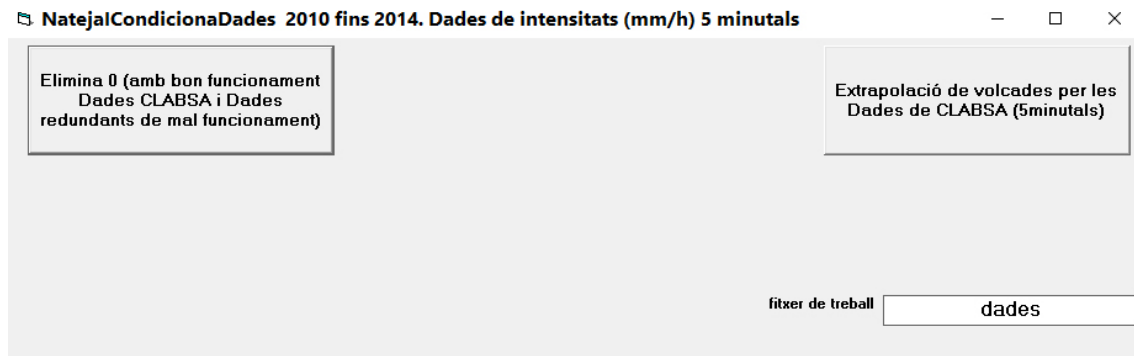
$$\text{DateDiff}("s", 1/1/1994\ 00:00:00, 1/1/1994\ 00:00:15.5) = 15.5$$

i

$$\text{DateDiff}("s", 1/1/1994\ 00:00:00, 3/2/94\ 14:42:24.7) = 2904144.7$$

(veure la primera línia de la Taula 1-4)

L'algorisme d'assignació de bolcades pels fitxers 5 minutats és una mica diferent. També, encara que sigui a tall d'exemple, mostrem el mètode que utilitzem per fer l'assignació les bolcades falses en funció de les dades originals que fem servir. Per fer aquesta tasca hem confeccionat el programari *NatejaICondicionaDades_2010_2014.VBP*. A la Imatge 1-5 presentem la finestra de treball del programa.



Imatge 1-5 Pantalla principal (operativa) per adaptar les dades de cada 5 minuts, proporcionades per les societats propietàries de la xarxa pluviomètrica, de forma que siguin operatives pels nostres estudis.

En aquest període tenim les informacions per cada pluviòmetre per separat. El primer que fem (botó superior esquerre a la Imatge 1-5) és eliminar el nombre d'informacions amb zeros; de forma que entendrem que si una data no hi és, és que el valor que representa serà 0. Mostrem aquest primer filtre a la Taula 1-5. Aprofitem aquest filtre per eliminar les informacions que ens han comunicat com de “mal funcionament” atribuïbles, per exemple, a feines de manteniment dels pluviòmetres.

Informació original		Informació filtrada; sense zeros	
Instant	Intensitat5minutal	Instant	Intensitat5minutal
01/01/2010 0:00	0	02/01/2010 20:30	1.2
01/01/2010 0:05	0	02/01/2010 20:35	1.2
...	...	02/01/2010 20:45	1.2
02/01/2010 20:25	0	...	...
02/01/2010 20:30	1.2	...	...
02/01/2010 20:35	1.2	...	...
02/01/2010 20:40	0	...	...
02/01/2010 20:45	1.2	...	...

Taula 1-5 Eliminació dels zeros de les taules amb les dades de cada 5 minuts originals.

En segon lloc (botó superior dret a la Imatge 1-5) calcularem el nombre de bolcades que hem d'assignar a l'interval estudiat i els diferents instants, dins d'aquest interval, als què associem les bolcades. El resultat final són fitxers amb continguts similars als anterior, com els de la Taula 1-4.

Una vegada tenim totes les dades “normalitzades” ja podem fer córrer els nostres programaris per fer els diferents estudis (IDF's, ARF's i Velocitats)

1.3. Programari desenvolupat per la construcció de les IDF's

Hem confeccionat una sèrie de programes per realitzar els diferents càlculs sobre les pluges dels nostres estudis. La realització dels nostres propis programes ens ha de permetre poder automatitzar els càlculs, de forma que quan rebem noves informacions, per exemple els propers anys, sigui

pràcticament automàtic l'obtenció de resultats actualitzats. Per construir les IDF's hem confeccionat tres programes

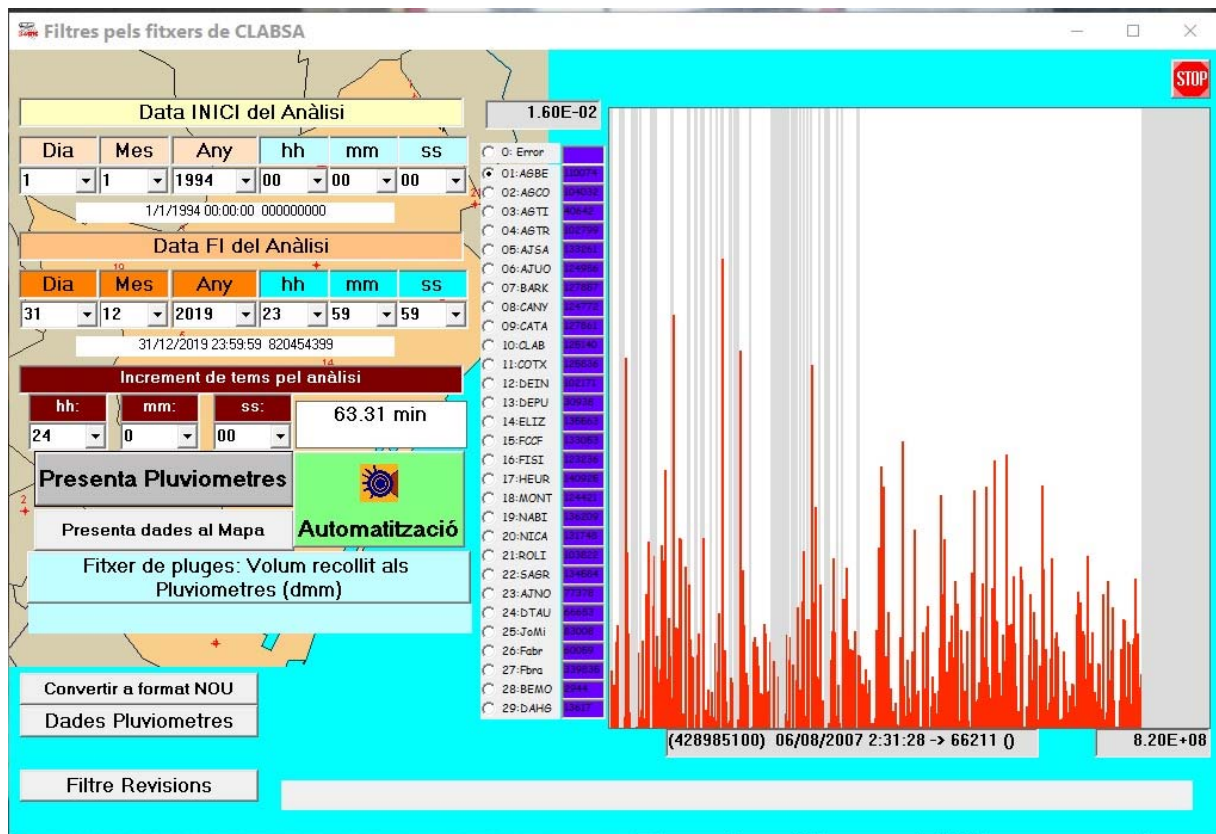
- FiltresPlujes.VBP
- DeteccioPluja.VBP
- LFIT.VBP

Igual que els programes anteriors, els hem elaborat dins de l'entorn de programació Visual Basic 6 – SP6 amb el suport de subrutines científiques proporcionades per Numerical Recipes en Fortran 77 (Press, et al., 1992). Hem triat aquest llenguatge de programació per la seva versatilitat en mostrar informacions gràfiques i per suposat, per la seva capacitat per realitzar càlculs. El fet de ser un entorn “visual” permet fer fàcilment seguiments de resultats intermedis, fet que aporta seguretat extra per obtenir els resultats finals. Les subrutines científiques proporcionades pel Numerical Recipes, han estat traduïdes al nostre llenguatge, el què ens proporciona seguretat sobre la seva utilització. És una tasca que s'ha de realitzar des del coneixement dels dos llenguatges informàtics però no requereix més que una mica de paciència. A continuació farem una petita descripció dels tres programes i també explicarem els mètodes matemàtics que hem utilitzat en els càlculs.

1.3.1. FiltresPlujes

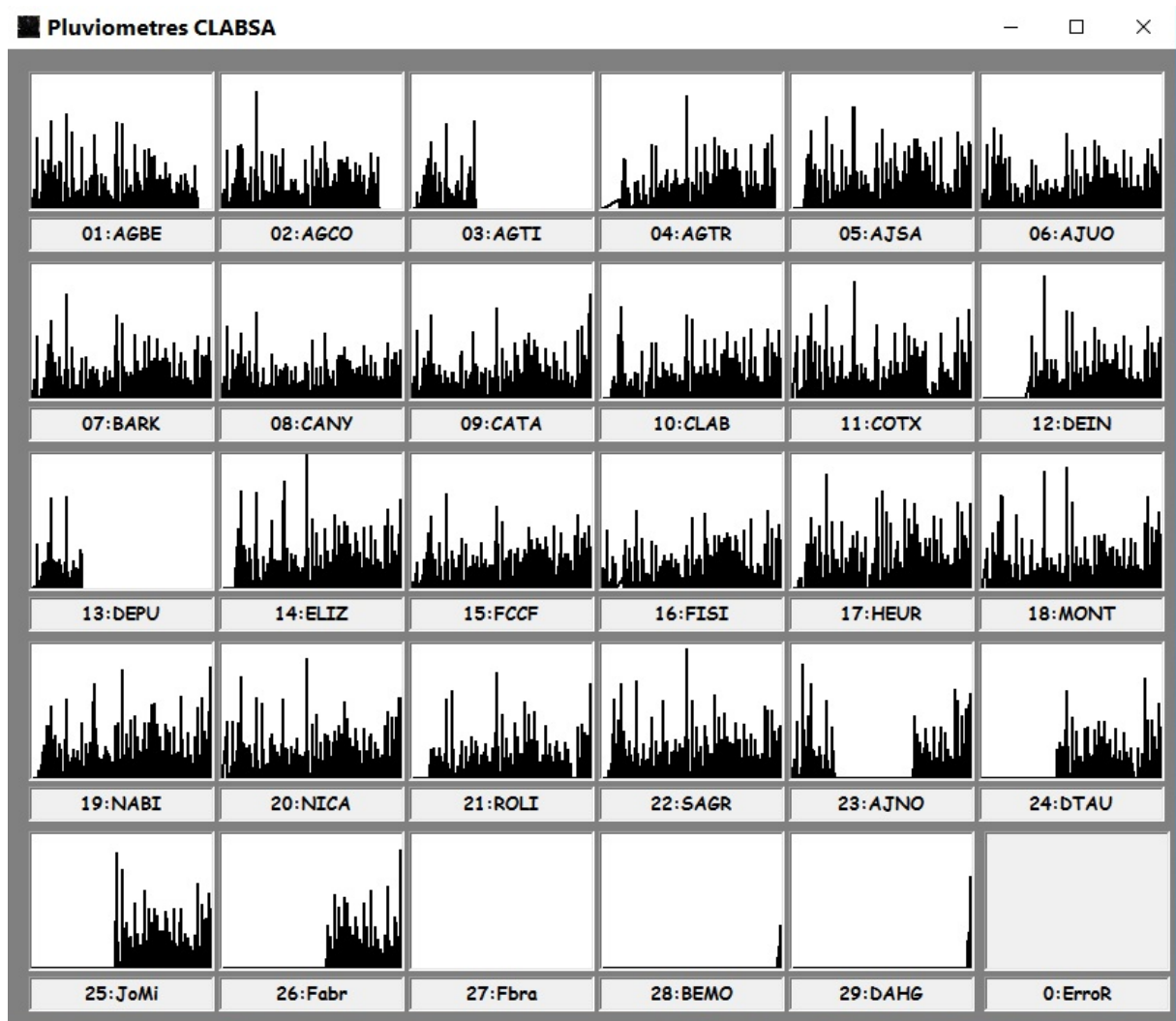
Aquest és el programa recopilatori i inspector de tota la informació prèviament tractada que ens proporcionen els pluviòmetres que ens permeten fixar els límits pels que volem fer els estudis i presentar esquemes operatius de les mateixes dades i dels resultats.

Té tres pantalles, la principal (Imatge 1-6) i dues de secundàries (Imatge 1-7 i Imatge 1-8). A la pantalla principal es pot seleccionar la data inicial (1/1/1994 en el cas que mostrem) per fer l'anàlisi de volums recollits pels pluviòmetres així com la data final (31/12/2019) i l'increment de temps d'aquesta anàlisi (24h; 0min, 0s). A la dreta de la Imatge 1-6 es pot veure una representació esquemàtica (sense cap unitat als eixos) dels volums d'aigua recollits per un determinat pluviòmetre (01; AGBE). En passar el ratolí per la pantalla gràfica, a la línia d'informació de sota de la mateixa, el programa respon mostrant la data associada a la posició del ratolí. Amb aquestes informacions és possible seleccionar intervals de temps de pluges específiques.



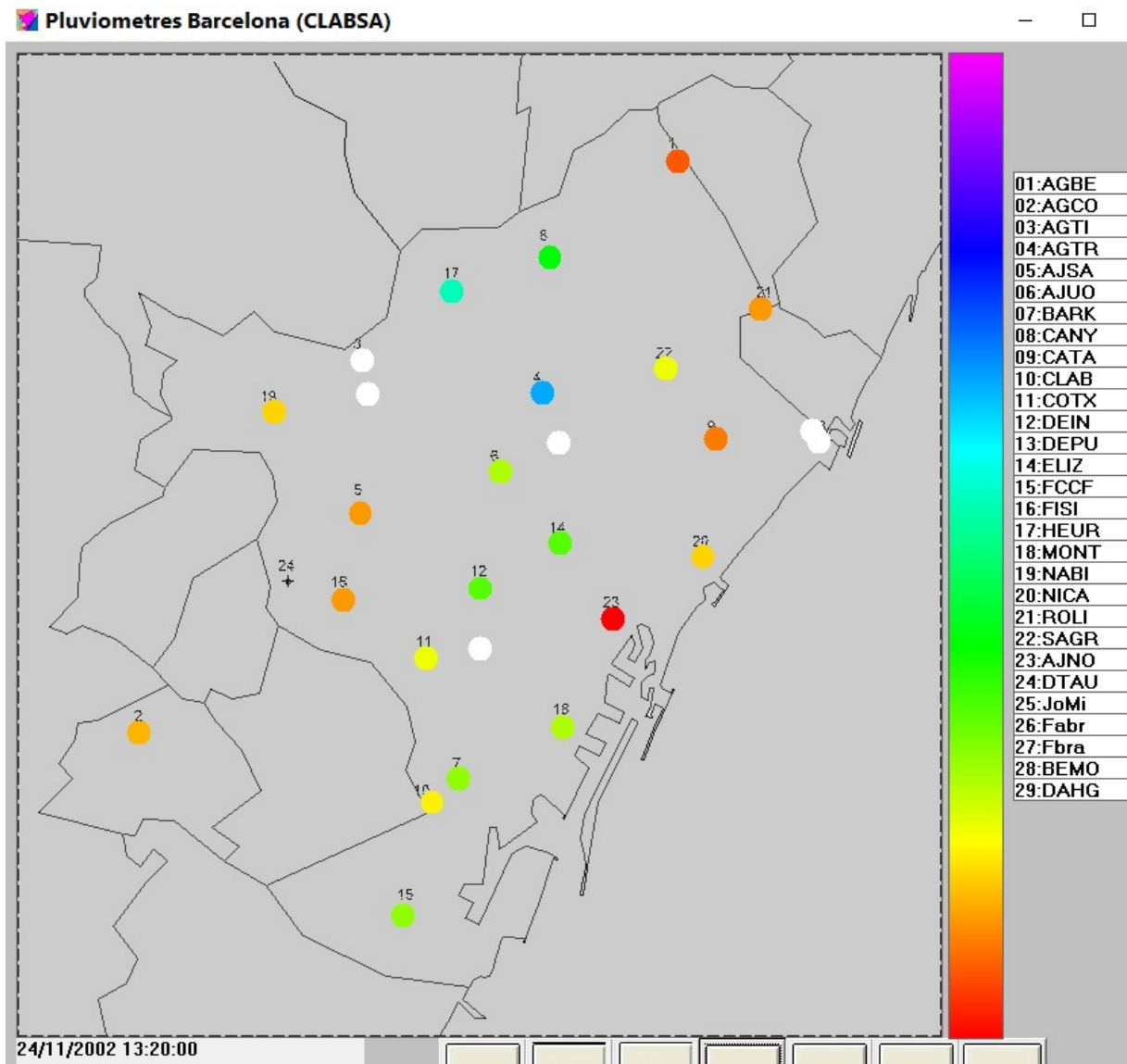
Imatge 1-6 Pantalla principal (de treball) del programa FiltresPlujes.VBP Es pot seleccionar el període d'estudi de les diferents pluges (a la banda esquerra) i presentem esquemàticament els registres que tenim per un pluviòmetre (a la banda dreta)

A la primera de les pantalles auxiliars (Imatge 1-7) es mostren les dades de tots els pluviòmetres de la xarxa. L'interval temporal que presentem és el de totes les dades disponibles (1994 fins 2019). Podem observar que el pluviòmetre PL3 (3:AGTI a la imatge) va desaparèixer aproximadament a la meitat del nostre període d'estudi. El PL13 una mica abans i per d'altres vies d'informació sabem que és reemplaçat pel PL24. El PL23 té una aturada i una nova aparició. Els pluviòmetres PL25 i PL26 s'incorporen a la xarxa una mica abans de la meitat del període total d'estudi i molt recentment s'han incorporat les informacions dels PL28 i PL29.



Imatge 1-7 Primera pantalla auxiliar del programa FiltresPlujes.VBP. Es mostren les informacions de tots els pluviòmetres de la xarxa.

A la segona de les pantalles auxiliars (Imatge 1-8) presentem esquemàticament, sense unitats, la seqüència de les dades d'una determinada pluja. A la posició de cada pluviòmetre associem un petit cercle d'un color diferent en funció del valor del volum de precipitació recollit pel propi pluviòmetre. El valor més petit és a la part inferior de la barra de colors de l'arc de Sant Martí de la dreta de la Imatge 1-8 i el valor més alt és el de la part superior. Els punts de color blanc fan referència als pluviòmetres dels que no tenim informació o que la informació és zero. En presentar seqüencialment aquestes imatges es genera una mena de “pel·lícula” de l'evolució temporal del ruixat seleccionat.



Imatge 1-8 Segona pantalla auxiliar del programa FiltresPlujes.VBP Els diferents colors associats als diferents pluviòmetres fan referència al volum de pluja recollit pels mateixos durant l'increment de temps que hem seleccionat a la pantalla principal (Imatge 1-6) La gradació de colors de dalt a baix indica el volum captat per cada pluviòmetre de més a menys; és una escala sense unitats i serveix per comparar les diferents dades d'un mateix episodi de pluja. El color blanc indica que no tenim dades d'aquest pluviòmetre.

La tasca fonamental del programa és la incorporació de totes les dades de tots els pluviòmetres a una única matriu operativa amb dates i volums de precipitació recollits pels pluviòmetres. Com a segona feina pot generar els diferents “fitxers de pluges” perquè els altres programes puguin processar aquestes informacions.

Un contingut típic d'aquests fitxers és el de la Taula 1-6

0,3000,273

...

"17/01/1994 16:50:00",-1,58,-1,-1,-1,-1,-1,18,-1,-1,-1,-1,-1,-1,26,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,EOL

"17/01/1994 17:40:00",-1,30,-1,-1,-1,-1,40,13,-1,-1,-1,-1,-1,-1,48,47,-1,-1,-1,-1,-1,-1,34,-1,-1,-1,-1,-1,EOL

"17/01/1994 18:30:00",-1,10,-1,-1,-1,-1,6,0,-1,-1,-1,-1,-1,-1,7,4,-1,-1,-1,-1,-1,-1,8,-1,-1,-1,-1,-1,EOL

...

Taula 1-6 Part d'un dels fitxers de sortida del programa FiltresPlujes.VBP. En aquests fitxers està compactada la informació del volums (dmm) de pluja recollits per tots i cada un dels pluviòmetres de la xarxa.

A la primera línia d'aquest fitxers (Taula 1-6) tenim el temps inicial de l'estudi de la pluja que estem caracteritzant (t_0 ; 0 en aquest cas), l'increment de temps o interval de duració, que anomenarem DT a partir d'ara, entre cada informació en segons (3000 s) i per finalitzar en n° de línies d'informació que té el fitxer (273 al cas presentat),

A la resta de línies tenim l'instant de la pluja, que anomenarem t_i , que aquí està presentat en format "dia/mes/any hora:minut:segon" i els volums de tots i cada un dels pluviòmetres de la xarxa per aquest instant de temps: V_{ki} . Finalitzem cada línia amb la marca EOL. Si un pluviòmetre no està actiu en una data li assignem un valor de pluja recollida negatiu (-1).

1.3.2. DeteccioPluja

Aquest programa és l'encarregat de processar les informacions proporcionades pel programa *FiltresPlujes* per detectar i estudiar els diferents ruixats per les diferents duracions (DT) en què estem interessats, i per tots els pluviòmetres de la xarxa. Disposa d'una única pantalla (Imatge 1-9) en què es reflecteixen tots els possibles càlculs que pot fer. Ja que la detecció de la pluja és un element central en els nostres estudis, aquest programa ha estat ampliat varies vegades per aplicar-lo a diferents estudis. Explicarem breument les operacions que fa aquest programa per facilitar el càlcul de les IDF's.

Detecció de Plujes

Lectura del Fibxer PLUJA (PlujaVolums*.DaT → PlujaVolums*.DaTp3F)

Fibxer amb les intensitats:

Detecció Episodis de PLUJA 5 minutals Mètode d'interval·s movils (29plv)

Detecció Episodis de PLUJA DIARIS Mètode d'interval·s movils (1plv)

Detecció Episodis de PLUJA 5 minutals Mètode d'interval·s movils (1plv)

Interval d'estudi (DT[s])

Activitat als pluviòmetres (Nº d'interval·s de 5min/30s) Nº Plujes

Previsió 2100 (6plv)

Nº Períodes d'estudi. (3 → 33 anys) 3

Tanyey Clase (dmm/24h) 2

Any inicial: 2000

Any final: 2100

V.màx(dmm/24h): 2.100

Detecció Episodis de PLUJA (*.DaTp3F → *.Epi5T)

Construcció fibxer d'intensitats màximes per fer la FFT

Lectura De Dades Cálcul pel DT seleccionat Cálcul TOTS els DT (DTo=5min) Cálcul TOTS els DT (DTo=30s)

Lectura De Dades Cálcul pel DT seleccionat Cálcul TOTS els DT (DTo=1dia)

Lectura De Dades Cálcul pel DT seleccionat Cálcul TOTS els DT (DTo=5min) FITXERS MÚLTIPLES

Lec Dades: JARDI +16_17_19 Cálcul pel DT seleccionat Cálcul TOTS els DT (DTo=1min)

Lec Dades: JARDI+FISI Cálcul pel DT seleccionat Cálcul TOTS els DT (DTo=1min)

Interval d'estudi (DT[s])

05 min 02 h 03 min 04 h 05 min 05 h 06 min 06 h 07 min 07 h 08 min 08 h 09 min 09 h 10 min 10 h 11 min 11 h 12 min 12 h 13 min 14 h 14 h 15 min 15 min 16 min 16 h 17 min 18 h 18 h 19 min 20 h 20 h 21 min 22 h 22 h 24 h 24 h (2d) 25 h (3d) 26 h (4d) 27 h (5d) 28 h (6d) 29 h (7d) 30 h (8d) 31 h (9d) 32 h (10d) 33 h (11d) 34 h (12d) 35 h (13d) 36 h (14d) 37 h (15d) 38 h (16d) 39 h (17d) 40 h (18d) 41 h (19d) 42 h (20d) K=10 K=20 K=30 K=60 K=90 K=120 K=240 1 dia (K288) 2 dies 3 dies 4 dies 5 dies 6 dies 7 dies 8 dies 9 dies 10 dies 11 dies 12 dies 13 dies 14 dies 15 dies 20 dies 30 dies 50 dies K=DT/Dto 1

Activitat als pluviòmetres (Nº d'interval·s de 5min/30s) Nº Plujes

Activitat	10000000	10000000	10000000	10000000	10000000
Plu_1	0	10000000	0	10000000	0
Plu_2	0	10000000	0	10000000	0
Plu_3	0	10000000	0	10000000	0
Plu_4	0	10000000	0	10000000	0
Plu_5	0	10000000	0	10000000	0
Plu_6	0	10000000	0	10000000	0
Plu_7	0	10000000	0	10000000	0
Plu_8	0	10000000	0	10000000	0
Plu_9	0	10000000	0	10000000	0
Plu_10	0	10000000	0	10000000	0
Plu_11	0	10000000	0	10000000	0
Plu_12	0	10000000	0	10000000	0
Plu_13	0	10000000	0	10000000	0
Plu_14	0	10000000	0	10000000	0
Plu_15	0	10000000	0	10000000	0
Plu_16	0	10000000	0	10000000	0
Plu_17	0	10000000	0	10000000	0
Plu_18	0	10000000	0	10000000	0
Plu_19	0	10000000	0	10000000	0
Plu_20	0	10000000	0	10000000	0
Plu_21	0	10000000	0	10000000	0
Plu_22	0	10000000	0	10000000	0
Plu_23	0	10000000	0	10000000	0
Plu_24	0	10000000	0	10000000	0
Plu_25	0	10000000	0	10000000	0
Plu_26	0	10000000	0	10000000	0
Plu_27	0	10000000	0	10000000	0
Plu_28	0	10000000	0	10000000	0
Plu_29	0	10000000	0	10000000	0

Imatge 1-9 Pantalla principal del programa *DeteccioPluja.VBP*. Aquest programa és l'encarregat d'establir quantes pluges hi ha en un període de temps, a partir de les informacions generades pel programa *FiltresPlujes.VBP*

En primer lloc carreguem les dades proporcionades pel *FiltresPlujes.VBP*. En aquesta primera càrrega/lectura aprofitem per calcular el número d'interval·s actius que tenim per tots i cada un dels pluviòmetres. Pel fet que els nostres interval·s de treball són de 5 minuts, en comparar el nombre total d'aquests interval·s amb el nombre d'interval·s d'un any tipus de 365.25 dies, podem conèixer el nombre total d'anys que ha estat treballant, de manera efectiva, cada estació pluviomètrica.

$$365.25 \text{ dies} = 105192 \text{ interval·s de 5 minuts} \quad (1.1)$$

A la Taula 1-7 mostrem el recompte d'interval·s actius dels pluviòmetres de la xarxa (IAP) i a la Figura 1-2 els anys efectius de treball de cada estació pel període d'estudi de 1994 fins 2019.

PL	#interval·ls actius	PL	#interval·ls actius	PL	#interval·ls actius
1	2292023	11	2526428	20	2573608
2	2164313	12	2029435	21	2326224
3	668558	13	645865	22	2563904
4	1978657	14	2457627	23	2682612
5	2496773	15	2545116	24	1635664
6	2531220	16	2492881	25	1523683
7	2519500	17	2458062	26	1206511
8	2577891	18	2530632	28	54615
9	2596838	19	2518800	29	164880
10	2382900				

Taula 1-7 Número d'interval·ls de 5 minuts que estan actius els pluviòmetres, identificats amb PL, pel període d'estudi de 1994 fins 2019.

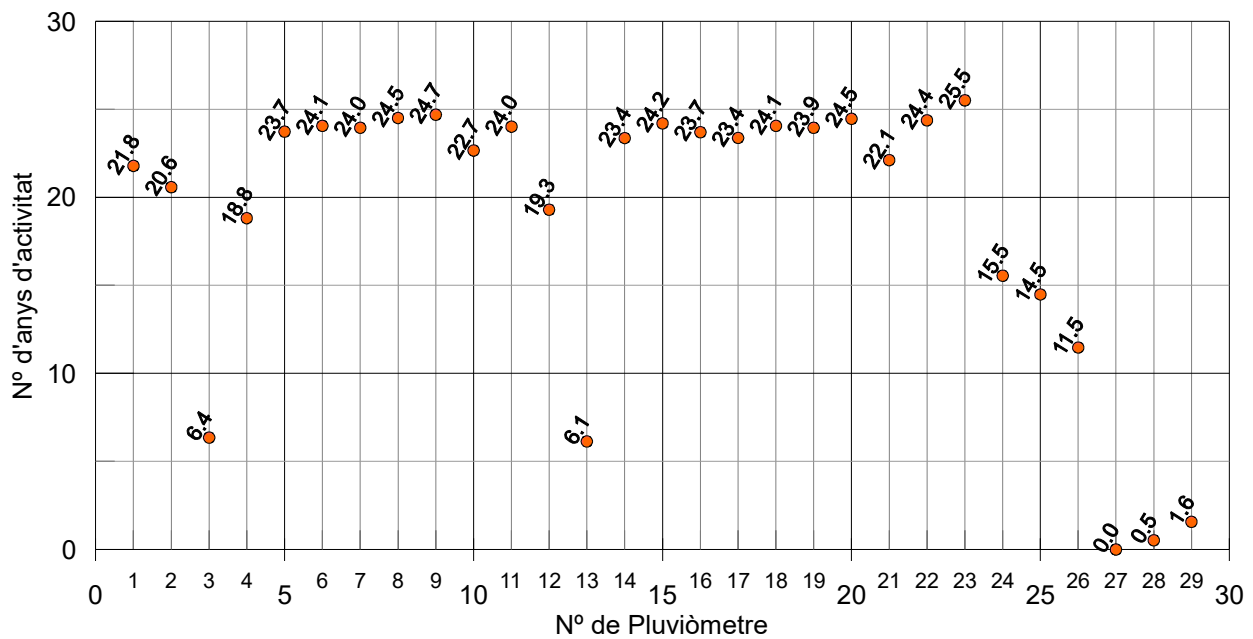


Figura 1-2 Número d'anys efectius de treball de cada estació.

Un cop carregades aquestes dades, el programa analitzarà les pluges per cada estació meteorològica. Assignem una pluja de duració DT al pluviòmetre k si entre l'últim valor de volum de pluja enregistrat diferent de zero i el següent valor de volum de pluja diferent de zero hi ha un interval de temps igual o superior a DT . Il·lustrarem aquest càlcul analitzant un cas concret (hipotètic) que ens permetrà una informatització relativament simple del procés. A la Figura 1-3 presentem unes dades hipotètiques dels volums recollits per una estació pluviomètrica durant 200 minuts.

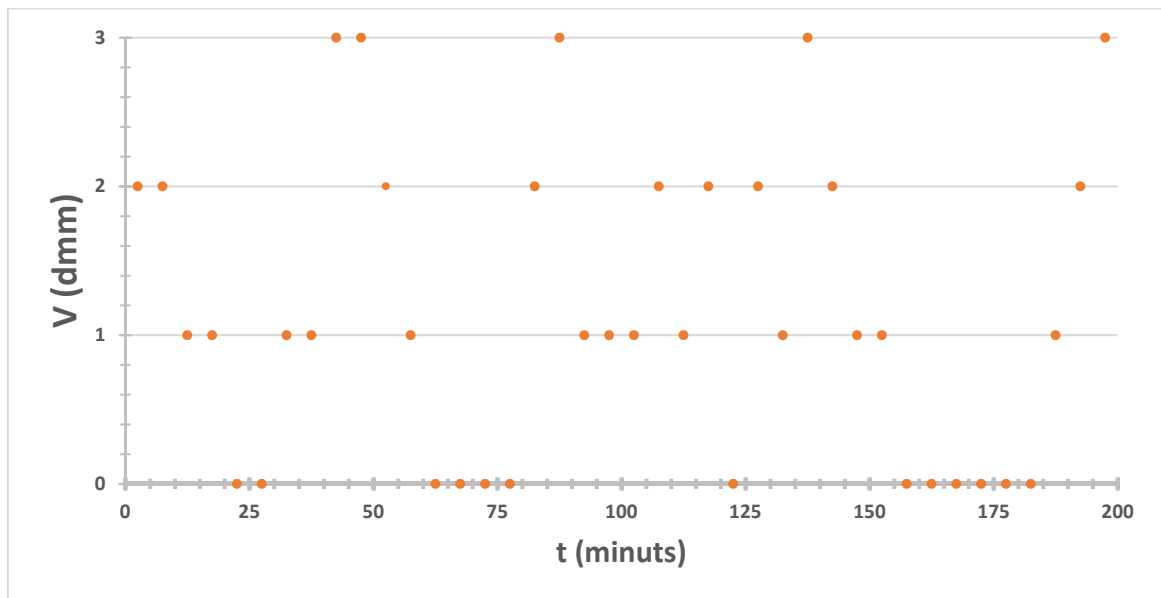


Figura 1-3 Representació dels volums recollits per un hipotètic pluviòmetre durant 200 minuts

Sobre aquesta informació farem dues anàlisis, per increments de temps (DT) de 5 minuts i de 10 minuts (Figura 1-4).

Anàlisi gràfica per $DT = 5$ minuts

La primera tasca que hem de fer és l'assignació dels intervals temporals on no tenim pluja, ja que aquests són els que determinen els començaments i els finals de les pluges. Per aquest interval d'estudi seran intervals de 5 minuts, o de més temps, amb zeros.

Aquests intervals en minuts són $(20, 30]$; $(60, 80]$; $(120, 125]$ i $(155, 175]$ i els hem marcat amb una línia gruixuda de color verd entre les diferents pluges, que són 5 en aquests 200 minuts. Un cop tenim les pluges delimitades podem dedicar-nos a estudiar els paràmetres físics que calguin per obtenir els resultats desitjats. A la part superior de la Figura 1-4 i en color blau, hem marcat les pluges que determinarien aquestes dades. Tindríem un total de 5 pluges.

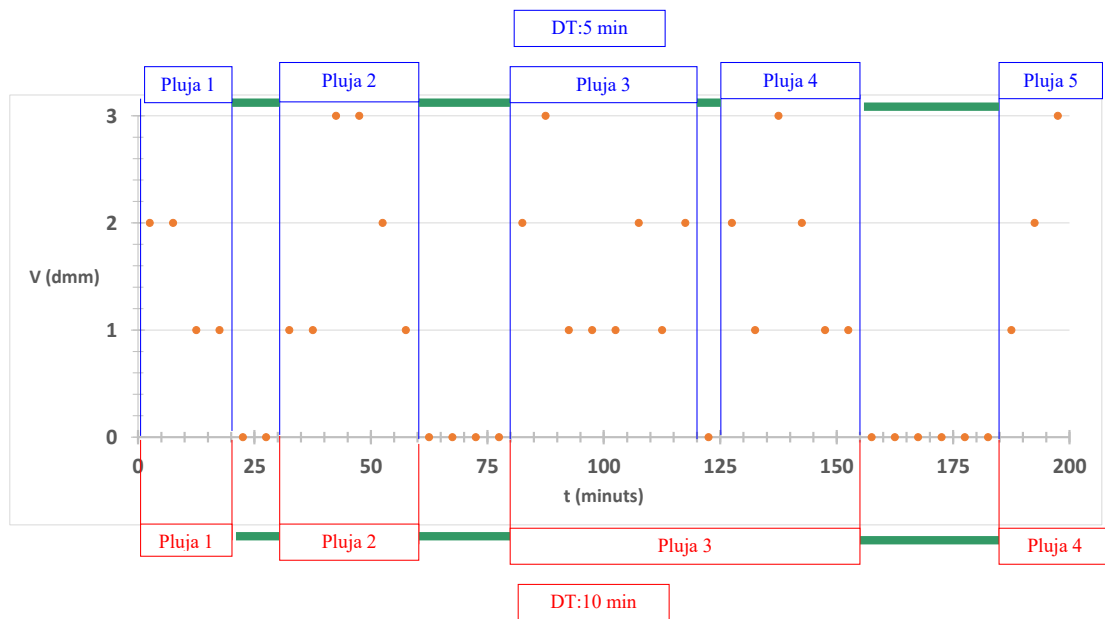


Figura 1-4 Estudi de pluges per intervals de duració (DT) de les mateixes: de 5 minuts a la part superior en blau i de 10 minuts a la part inferior en vermell.

Anàlisi gràfica per DT = 10 minuts

Si ens fixem en la Figura 1-4 podem veure que en l'anàlisi de 10 minuts desapareix la separació de pluja (120, 125] que teníem per 5 minuts. En aquests cas les separacions entre pluges han de ser de 10 minuts o més. Per aquesta duració es presenten 4 ruixats, que es poden veure a la part inferior d'aquesta imatge, en color vermell.

Anàlisi numèrica per 20 minuts

Arribats a aquest punt, no continuarem amb aquests estudis "gràfics" de les pluges sinó que ho farem de forma numèrica, de manera que l'extrapolació matemàtica-informàtica serà evident. Analitzarem en detall la durada de 20 minuts i mostrem a la Taula 1-8 aquesta anàlisi, i també les anàlisis des de 5 minuts fins 25 minuts, on quedarà palès la facilitat per l'extrapolació del mètode. Fixem-nos en la columna sota l'epígraf $DT = 20 \text{ min}$ i en els valor de les dades originals del pluviòmetre $DT = 5 \text{ min}$ columna $V \text{ (dmm)}$. A aquests valors el anomenem, per exemple, $V_5(i)$ on l'índex i fa referència a la seva posició a la taula i per tant a l'instant de temps on tenim constància de la lectura de la precipitació: $t_i = 5 i$.

Inicialment i per tots els valors dels volums de la precipitació obtinguts cada 5 minuts (els $V_5(i)$) fem la suma de valors fins a 20 minuts, per intervals mòbils:

$$SumV_{20}(j) = \sum_{i=j}^{j+3} V_5(i) \quad (1.2)$$

on l'índex j també fa referència a la seva posició assignada a la taula i per tant a l'instant de temps: $t_j = 5j$.

Tindrem els intervals de separació de les pluges per aquells temps associats a l'índex " j " tals que $SumV_{20}(j) = 0$.

Ens apareix un primer valor nul per $SumV_{20}(16) = 0$ que fa referència a quatre intervals seguits amb precipitació nul·la, des de 65 min fins 80 min. Tenim uns altres valors consecutius de suma de volums nuls, pels valors de 175 min fins 185 min, que fan referència a un interval sense pluja des de 160 min fins 185 min. Amb aquests intervals determinats, tenim delimitades les pluges, per tant estarem en disposició de fer els estudis que creiem més oportuns sobre les mateixes.

<i>i</i>	<i>t</i> (min)	DT (minuts)				
		5	10	15	20	25
		<i>V</i> ₅	<i>Sum.V</i> ₁₀	<i>Sum.V</i> ₁₅	<i>Sum.V</i> ₂₀	<i>Sum.V</i> ₂₅
		(<i>dmm</i>)	(<i>dmm</i>)	(<i>dmm</i>)	(<i>dmm</i>)	(<i>dmm</i>)
1	5	2	---	---	---	---
2	10	2	4	---	---	---
3	15	1	3	5	---	---
4	20	1	2	4	6	---
5	25	0	1	2	4	6
6	30	0	0	1	2	4
7	35	1	1	1	2	3
8	40	1	2	2	2	3
9	45	3	4	5	5	5
10	50	3	6	7	8	8
11	55	2	5	8	9	10
12	60	1	3	6	9	10
13	65	0	1	3	6	9
14	70	0	0	1	3	6
15	75	0	0	0	1	3
16	80	0	0	0	0	1
17	85	2	2	2	2	2
18	90	3	5	5	5	5
19	95	1	4	6	6	6
20	100	1	2	5	7	7
21	105	1	2	3	6	8
22	110	2	3	4	5	8
23	115	1	3	4	5	6
24	120	2	3	5	6	7
25	125	0	2	3	5	6
26	130	2	2	4	5	7
27	135	1	3	3	5	6
28	140	3	4	6	6	8
29	145	2	5	6	8	8
30	150	1	3	6	7	9
31	155	1	2	4	7	8
32	160	0	1	2	4	7
33	165	0	0	1	2	4
34	170	0	0	0	1	2
35	175	0	0	0	0	1
36	180	0	0	0	0	0
37	185	0	0	0	0	0
38	190	1	1	1	1	1
39	195	2	3	3	3	3
40	200	3	5	6	6	6

Taula 1-8 Il·lustració del mètode per assignar les pluges per diferents intervals temporals (DT) d'estudi

Generalització del mètode numèric

Ja que la unitat temporal més petita de les nostres dades és de 5 minuts (dt), generalitzarem els càlculs per determinar els intervals de separació de les pluges en múltiples d'aquests 5 minuts. Estudiem pluges de duració DT minuts, on

$$DT_n = n dt \quad \text{per } n = 1, 2, 5, 10, 20, 50, \dots \quad (1.3)$$

Sumem volums de pluja recollits pel pluviòmetre, pels n intervals i els assignem l'índex j , associat al temps t_j

$$SumV_n(j) = \sum_{i=j}^{j+n-1} V_{dt}(i) \quad (1.4)$$

on $V_{dt}(i)$ representa el volum recollit pel pluviòmetre en estudi durant l'interval de dt minuts associat a l'índex (temporal) i . Els índexs j pels què $SumV_n(j)$ sigui zero indiquen el final d'una pluja i per tant estem en condicions de cercar el principi del següent ruixat.

Si, per exemple, volguéssim estudiar els volums màxims ho podríem fer seguint l'algorisme següent

$$SumV_n(j)_{MAX} = MAXIM(SumV_n(j)) \quad \text{per tots els } j \text{ d'una pluja} \quad (1.5)$$

o si volguéssim conèixer la pluja total caiguda en un determinat ruixat

$$SumV(Pluja) = \sum_{i=inici_pluja}^{i=fi_pluja} V_{dt}(i) \quad (1.6)$$

Resultats del programa

El nostre programa construeix una sèrie de fitxers amb tres tipus d'informacions que seran rellevants pels càlculs de les IDF's: els fitxers de pluges, els d'histogrames i els de densitat de probabilitat.

Fem una breu descripció dels seus continguts.

Fitxers de pluges: *PlujaNumPlujes*

Aquests fitxers tenen un contingut típic, mostrat a la Taula 1-9

Interval temporal dels estudis [DT0(s)]: 300
Index d'estudi del DT[Kinterval]: 12
Interval de pluja estudiada: 3600 s = 60 minuts = 1 hores = 4.166667E-02 dies

<i>PL</i>	<i>Intervals de 5 Min Actius</i>	<i>Anys</i>	<i>Pljs Detec</i>	<i>Fd (PR 1any)</i>	<i>Fd(PR 2any)</i>	<i>.....</i>	<i>Fd(PR 50anys)</i>	<i>Fd(PR 100anys)</i>
1	2292023	21.788	3151	.993085	.996542		.999861	.999930
2	2164313	20.578	2911	.992932	.996466		.999858	.999929
3	668558	6.3555	1295	.995092	.997546		.999901	.999950
...						...		
28	54615	.5191	84	.993819	.996909		.999876	.999938
29	164880	1.567	189	.991706	.995853		.999834	.999917

Taula 1-9 Contingut obtingut dels fitxers de pluja que proporciona el programa DetecioPluja

Les tres primeres línies són informacions genèriques de tots aquests fitxers. A la primera ens indica l'interval temporal mínim de les dades dels pluviòmetres, en segons $[DT0(s) = 300]$. La segona de les informacions fa referència al valor de l'índex associat a l'estudi temporal DT, esmentat anteriorment. Per aquest cas en particular el valor és de 12 $[Kinterval]$, el què indica que estem estudiant pluges de $12 * 300$ segons. Aquesta informació encara queda més clara a la tercera línia on es mostra l'interval temporal de la pluja estudiada. Ens donen aquest interval en segons, minuts, hores i en dies, per poder facilitar el seguiment dels càlculs posteriors. Les següents files proporcionen informacions específiques per cada pluviòmetre. A la primera columna mostrem el N° de pluviòmetre al què fem referència. A continuació dos informacions independents de la duració temporal que estem estudiant: Intervals de 5 minuts actius i n° d'anys actius. Aquestes informacions coincideixen amb les mostrades a Taula 1-7 i a la Figura 1-2. La quarta columna és la veritablement destacable d'aquest fitxer, el número de pluges detectades per cada pluviòmetre i per la duració en qüestió. La resta d'informacions són les probabilitats FD associades a les funcions densitat per cada estació i pels períodes de retorn de 1, 2, 5, 10, 20, 50 i 100 anys segons l'expressió

$$FD = 1 - \frac{\text{número d'anys de dades} / \text{Periode Retorn (en anys)}}{\text{Número de pluges}} \quad (1.7)$$

Fitxers d'histogrames

Aquests fitxers contenen per totes les duracions estudiades i per tots els pluviòmetres de la xarxa el número de pluges per cada volum seleccionat en dmm. La informació, mostrada a la Taula 1-10 té el següent format: les tres primeres línies tenen la mateixa informació que als fitxers anteriors (Taula 1-9) Les informacions següents es descriuen per columnes. A la primera presentem el volum (en dmm) fixat per determinar el número de pluges de cada pluviòmetre i serien les classes del nostre histograma, a la segona fem un petit càlcul per obtenir la intensitat de pluja associada a

aquests volums (dmm/h) i a la resta de columnes hi mostrem les pluges que hem trobat per cada estació amb el volum prefixat a la primera columna.

<i>Interval temporal dels estudis [DT0(s)]: 300</i>					
<i>Índex d'estudi del DT[Kinterval]: 1440</i>					
<i>Interval de pluja estudiada: 432000 s = 7200 minuts = 120 hores = 5 dies</i>					
		<i>Nº Pluges Al Pluv Nº</i>			
<i>V[dmm]</i>	<i>I[dmm/h]</i>	<i>1</i>	<i>....</i>	<i>29</i>	<i>A Tots</i>
<i>1</i>	<i>0.0083</i>	<i>18</i>	<i>....</i>	<i>0</i>	<i>474</i>
<i>2</i>	<i>0.0167</i>	<i>8</i>	<i>....</i>	<i>2</i>	<i>324</i>
<i>3</i>	<i>0.0250</i>	<i>9</i>	<i>....</i>	<i>0</i>	<i>259</i>
<i>4</i>	<i>0.0333</i>	<i>7</i>	<i>....</i>	<i>1</i>	<i>206</i>
<i>....</i>	<i>....</i>	<i>....</i>	<i>....</i>	<i>....</i>	<i>....</i>
<i>1806</i>	<i>15.0500</i>	<i>0</i>	<i>....</i>	<i>0</i>	<i>1</i>

Taula 1-10 Contingut obtingut dels fitxers d'histogrames que proporciona el programa DetecioPluja

Fitxers de densitat de probabilitat

En aquests fitxers fem una recopilació operativa dels dos anteriors per poder construir les funcions densitat de probabilitat. Amb les dades recopilades als histogrames fem el càlcul de les funcions de probabilitat

$$fd(j, k, DT) = \frac{\text{Histograma}(j, k, DT)}{\text{PlugesTotals}(k, DT) + 1} \quad (1.8)$$

on j representa el volum, k el pluviòmetre i DT la duració estudiada.

$$\text{PlugesTotals}(k, DT) = \sum_{j=1}^{j_{\max}} \text{Histograma}(j, k, DT) \quad (1.9)$$

i el "+1" del denominador s'ha de tenir present ja que les nostres dades de pluja només representen una mostra de totes les pluges. D'aquesta forma en la funció de densitat acumulada (FD) mai tindrem valors de "1" el què indicaria pluges de volums fora de mida.

$$FD(j, k, DT) = \sum_{i=j}^{j_{\max}} fd(i, k, DT) \quad (1.10)$$

Una mostra de la informació continguda en aquests fitxers la presentem a la Taula 1-11. Les tres primeres línies i les dues primeres columnes són idèntiques a les dels fitxers anteriors (Taula 1-10) i la resta de columnes presentem les probabilitats acumulades experimentals per cada volum estudiat i per cada pluviòmetre.

Interval temporal dels estudis [DT0(s)]: 300					
Índex d'estudi del DT[KintervalL]: 60					
Interval de pluja estudiada: 18000 s = 300 minuts = 5 hores = 0.2083333 dies		Probabilitat Acumulada del Pluviòmetre N°			
Vol(dmm)	I(dmm/h)	1	2	...	29
1	0.2	0.138956311	0.140635565	...	0.100000000
2	0.4	0.197815534	0.201487492		0.166666667
3	0.6	0.244538835	0.242055443		0.241666667
...			
1357	271.4	0.999393204	0.999323867	...	0.991666667

Taula 1-11 Contingut obtingut dels fitxers de probabilitats que proporciona el programa DetecioPluja

Ajustem les sèries de densitats de probabilitat acumulada experimentals a diverses funcions de densitat teòriques i construïm les corbes IDF's.

1.4. Les funcions *mnp*

Ajustarem les densitats de probabilitat acumulada experimental a unes funcions de tipus potencial-exponencial (1.13) empíriques, funcions *mnp* a partir d'ara (Casas, 2005) que són una correcció i millora de la funció de probabilitat Gamma. Amb aquestes funcions pretenem ajustar matemàticament tan bé com sigui possible les cues de les funcions densitat, ja que són aquestes cues les que es corresponen als ruixats més intensos. La millora l'aconsegim ja que mentre la funció Gamma intenta ajustar a tots els punts experimentals de les funcions densitat, les funcions *mnp* ajusten tan sols els valors d'intensitat màxima. Un cop fet l'ajust, obtindrem els paràmetres empírics que defineixen les *mnp* i podrem establir els valors d'intensitat que permetran construir les IDF's.

Introduïrem breument la funció de probabilitat Gamma per poder comprendre suficientment les modificacions que farem amb les funcions *mnp*. La funció Gamma, per valors positius i amb asimetria, té una àmplia aplicació en enginyeria i en particular s'utilitza per descriure fenòmens associats a les quantitats de pluja recollides per les diferents estacions. La funció és la següent:

$$f(x, k, \lambda) = \frac{\lambda(\lambda x)^{k-1}}{\Gamma(k)} e^{-\lambda x} \quad \text{per } x \geq 0 \quad (1.11)$$

On λ i k són els dos paràmetres que defineixen la funció i s'obtenen amb els valors de la mitjana \bar{X} i de la desviació estàndard σ_x dels valors experimentals, que en el nostre cas seran els volums màxims, per l'interval temporal estudiat (DT) de cada pluja. Aquests valors s'obtenen segon les expressions,

$$\begin{cases} \bar{X} = \frac{k}{\lambda} \\ \sigma_x = \frac{k}{\lambda^2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lambda = \frac{\bar{X}}{\sigma_x} \\ k = \frac{\bar{X}^2}{\sigma_x} \end{cases} \quad (1.12)$$

Com es pot observar en (1.11) la funció Gamma és de tipus potencial exponencial i podem suposar que la seva integral també tindrà un comportament similar.

Es proposa una funció de densitat acumulada (*FD*) potencial exponencial amb tres paràmetres lliures, m , n i p (d'aquí el nom de les funcions)

$$FD(x) = 1 - m x^n e^{-px} \quad (1.13)$$

es pot apreciar que aquesta funció densitat està inspirada en la funció Gamma, de forma que el factor $\lambda (\lambda)^{k-1} = \lambda^k$ estarà relacionat amb la constant d'amplitud m . La part potencial $(x)^{k-1}$ inspira el terme x^n i clarament les parts exponencials estan directament connectades. Tanmateix, els paràmetres d'aquestes funcions no estan relacionats amb els moments com en el cas de la Gamma.

Per triar quins punts experimentals de gran intensitat utilitzarem per fer els ajustos mnp hem imposat un límit al seu valor (funció *FD*) de 0.75. Degut a que la funció densitat pren valors entre 0 i 1, triar un valor de 0.75 indica que utilitzarem les dades associades a intensitats grans. A la Figura 1-5 (a) mostrem la representació dels valors experimentals pel PL16 i per una integració temporal d'una hora i la funció mnp corresponent amb el límit de càlcul de 0.75. Els valors de la funció mnp , la bondat de l'ajust i el nombre de punts que intervenen a l'ajust són els següents

Límit càlcul	m	n	p	χ^2	Nº punts de l'ajust
0.75	5.2 ± 0.4	-0.86 ± 0.02	0.0066 ± 0.0001	0.996	181

Es pot apreciar un bon ajust gràfic entre la funció i els punts experimentals. A la Figura 1-5 (b) també representem l'ajust per un límit de la *FD* de 0.99. Amb aquest límit, molt més gran, garantiríem que només els punts experimentals associats a intensitats molt grans formin part de l'ajust. Els valors de la funció mnp , la bondat de l'ajust i el nombre de punts que intervenen a l'ajust són els següents

Límit càlcul	m	n	p	χ^2	Nº punts de l'ajust
0.99	$(2.0 \pm 0.6) \times 10^6$	-3.4 ± 0.7	0.0004 ± 0.0020	0.365	29

Els dos conjunts de valors són numèricament molt diferents. Podem veure que tenim una millor bondat d'ajust amb una χ^2 de 0.365 amb el límits de 0.99. Augmentar el límit de *FD* per fer el càlcul porta implícit la reducció del Nº de punts de l'ajust, el que el fa menys fiable estadísticament,

i (molt probablement) és el responsable de l'augment dels errors de l'ajust. Amb aquest nou límit ajustem millor la funció als punts experimentals, però reduïm el domini d'actuació de l'ajust; i com que les diferències entre els ajustos i els punts no són excessives, prendrem 0.75 com límit de la FD per fer els ajustos.

Amb les dades de les densitats de probabilitat, com les de la Taula 1-11 i per totes les funcions experimentals obtingudes s'obtenen els paràmetres de cada funció pel mètode de mínims quadrats (Press, et al., 1992) Annex A.

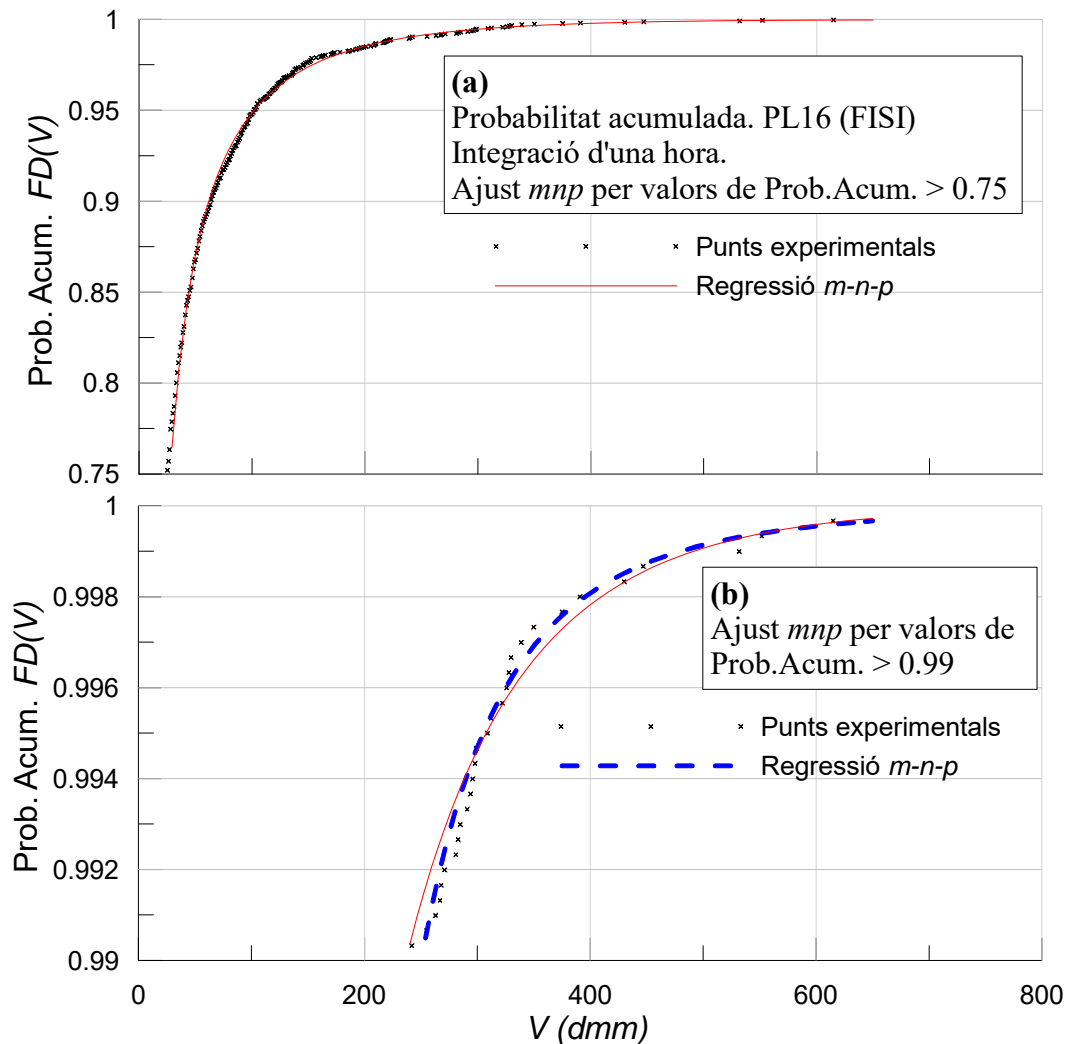


Figura 1-5 Representació de les probabilitats acumulades (FD) experimentals i les seves regressions mnp , pel pluviòmetre PL16 (FISI) i per una durada de les pluges d'una hora. (a) comparativa entre els valors experimentals (les creuetes) i la funció mnp associada (línia vermella contínua) amb un càlcul a partir d'un valor de FD de 0.75. (b) en línia discontinua de color blau representem la funció mnp associada als punts experimentals a partir d'un valor de FD de 0.99

En fer un estudi de les funcions densitat obtingudes, hem observat que hi ha valors del paràmetre m molt dispersos, $10^{-19} < m < 10^3$. Malgrat això tots els ajustos semblen raonables ja que per tots tenim valors de l'estadístic χ^2 molt semblants tal com podem veure a la Figura 1-6. Tan sols 10

valors, dels 299 ajustos fets, superen el valor 3 i cap supera el 5. La mitjana d'aquests ajustos val 1.2 amb una desviació estàndard de 0.7.

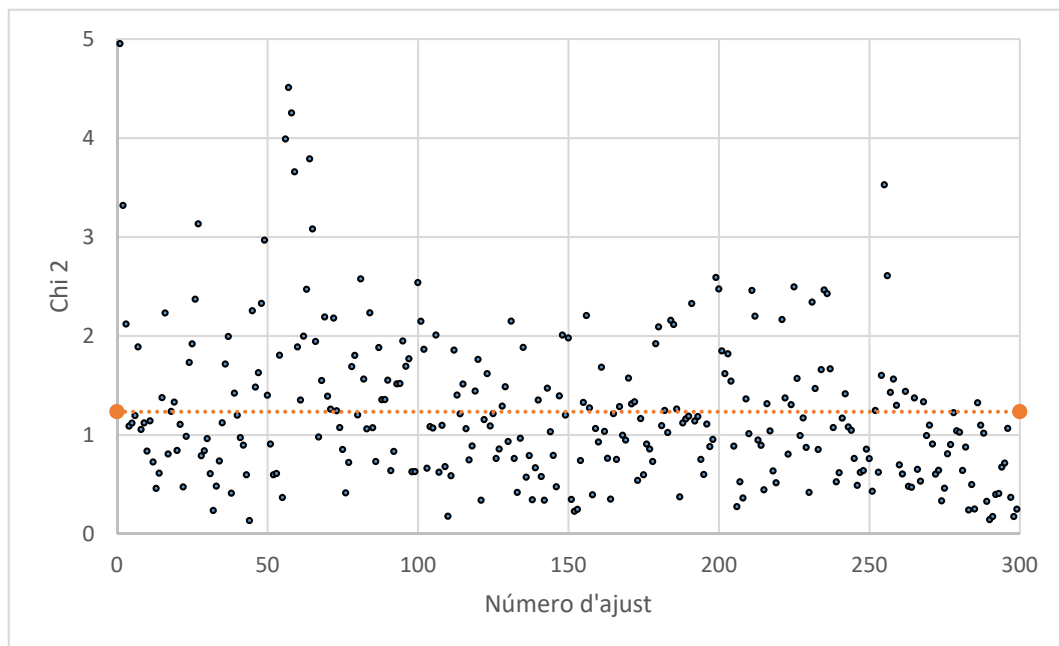


Figura 1-6 Valors de l'estadístic χ^2 per tots els ajustos fets a les pluges. De color taronja el valor mitja.

En aquests ajustos hem observat uns comportaments semblants de les funcions per dos tipus de valors de m : petits: $10^{-19} < m < 10^{-4}$ i grans (o no petits): $10^{-3} < m < 10^3$. A la Figura 1-7 hem representat tres de les funcions mnp per valors petits de m on es pot veure que si bé tenen la part asimptòtica cap a 1, el comportament per valors del volum petit pot ser decreixent i fins i tot prendre valors inferiors a 0. També hem de destacar que pels valors grans, dins d'aquesta classe, les funcions no tenen per que cobrir el rang (0, 1) A la Figura 1-8 hem representat unes altres tres funcions mnp per valors no petits de m . Podem veure que la part que pot fer de funció densitat es dona per valors més petits del volum.

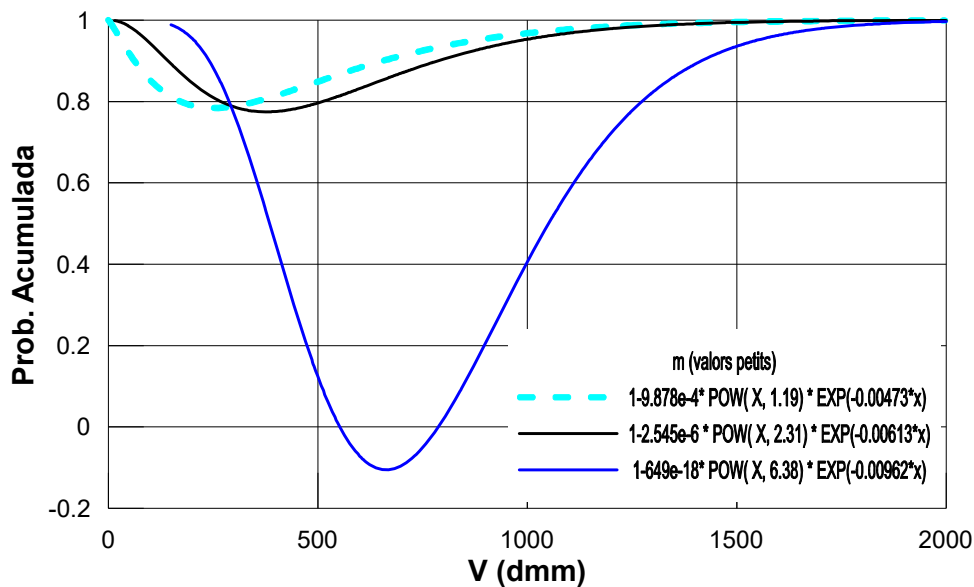


Figura 1-7 Representació de funcions potencials-exponencials per valors petits de m

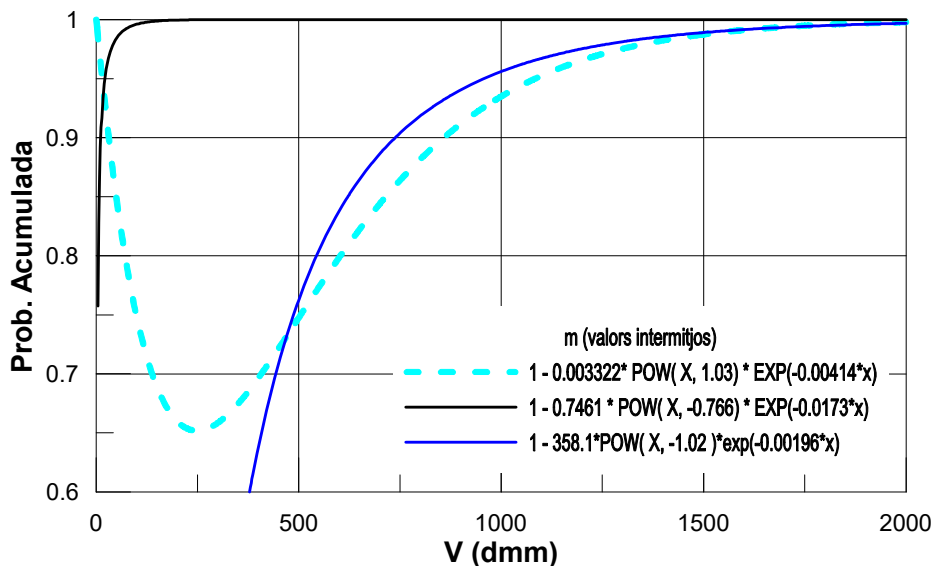


Figura 1-8 Representació de funcions potencials-exponencials per valors no petits de m

A les següents imatges (Figura 1-9, Figura 1-10 i Figura 1-11) presentem els valors dels paràmetres m , n i p respectivament en funció de la duració de la pluja estudiada. Es pot observar que per valors grans de la duració de les pluges el paràmetre m pren valors petits i aquest efecte queda compensat amb valors positius i grans del paràmetre n . Els valors del paràmetre p no segueix aquest comportament. Tots els valors de p són positius i relativament moderats, els valors més grans es donen per duracions dels ruixats petits. Podem veure una relació lineal entre els paràmetres m i n a la Figura 1-12. A la Figura 1-13 relacionem el paràmetre p amb el m , es pot apreciar una relació lineal per valors petits de m i comportament extraordinari a partir de valors de $m = 0.1$ on sembla que entri de cop el comportament exponencial de l'ajust.

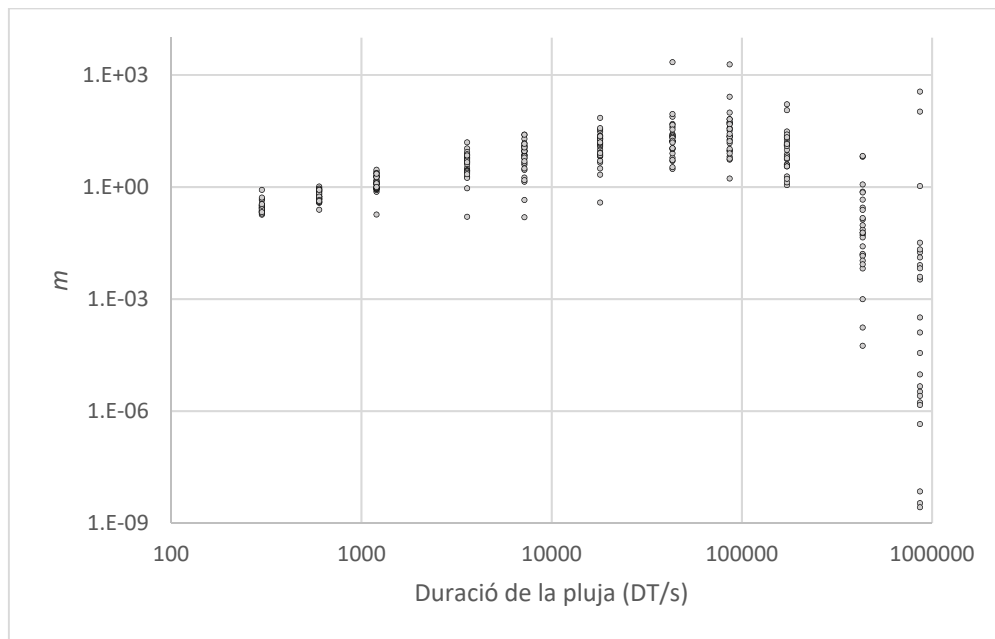


Figura 1-9 Representació dels valors de m de les funcions potencial-exponencial mnp

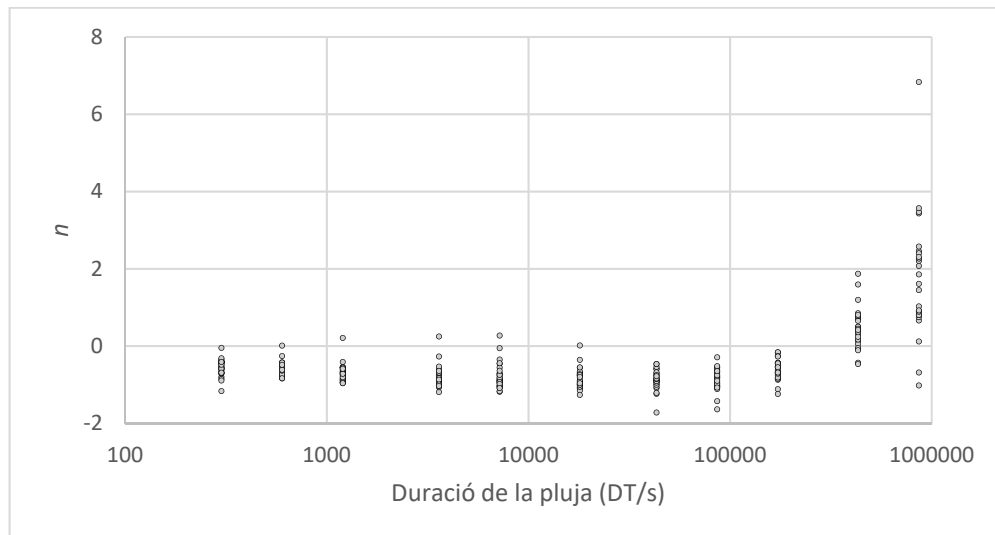


Figura 1-10 Representació dels valors de n de les funcions potencial-exponencial mnp

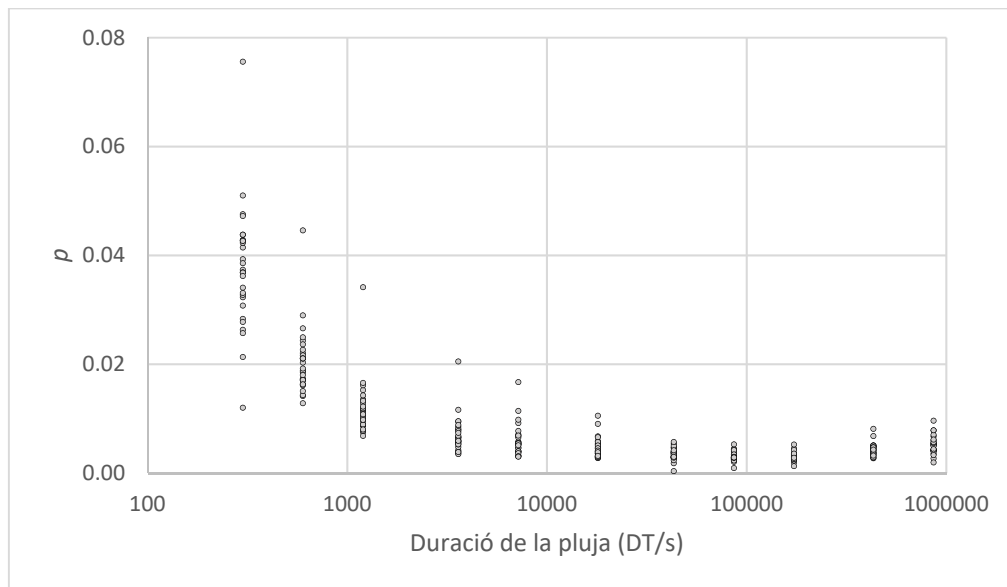


Figura 1-11 Representació dels valors de p de les funcions potencial-exponencial mnp

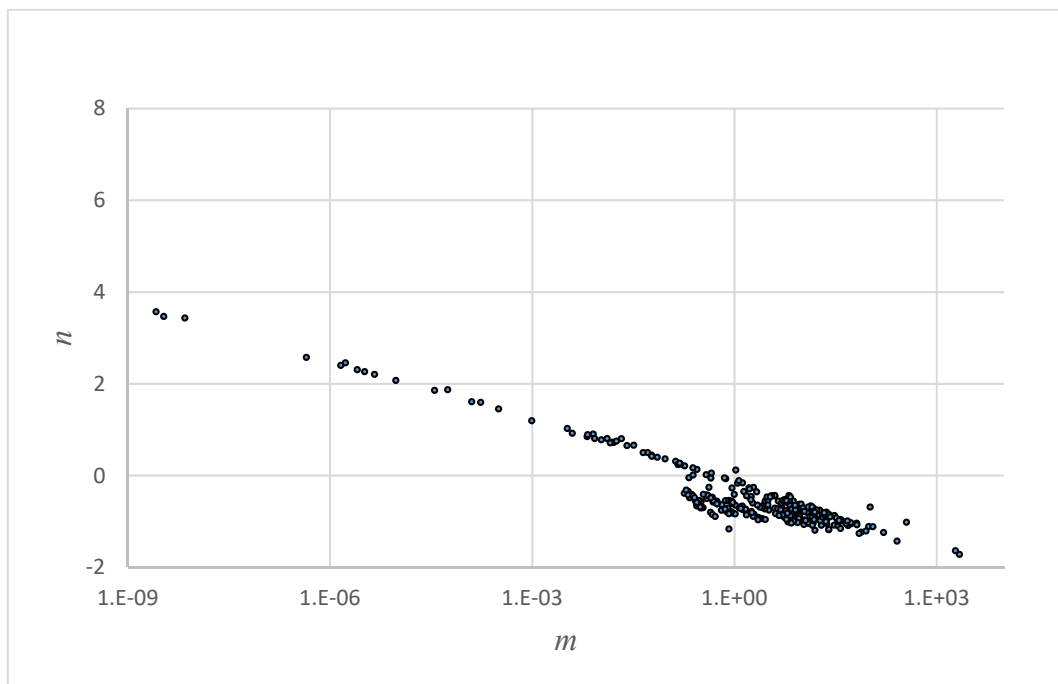


Figura 1-12 Relació entre els valors dels paràmetres m i n

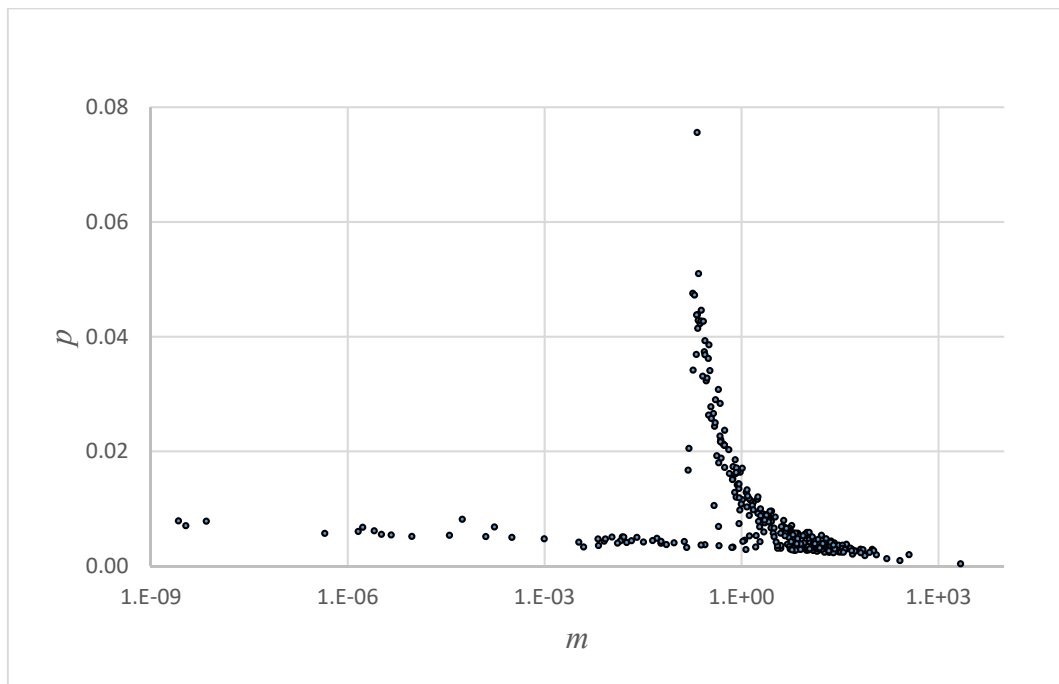


Figura 1-13 Relació entre els valors dels paràmetres m i p

Un cop obtinguts els paràmetres m , n i p per confeccionar les corbes IDF essencialment cal associar a cada valor de la probabilitat una determinada intensitat. Per tots els pluviòmetres, coneixem el nº d'anys amb informacions i el número de dades associades a cada duració de les diferents pluges.

Fixem els períodes de retorn dels ruixats, amb un espaiat logarítmic, en $\{1, 2, 5, 10, 20, 50, 100\}$ anys.

Estudiarem les duracions de les pluges, també amb un espaiat gairebé logarítmic, de 5 min, 10 min, 20 min, 1 hora (en lloc de 50 min), 2 hores, 5 hores, 12 hores (en lloc de 10 hores) 1 dia, 2 dies, 5 dies i 10 dies.

Per assignar les intensitats procedirem de la forma següent: fixem un pluviòmetre, un període de retorn de la pluja i una duració de pluja i calculem la densitat de probabilitat per medi de la relació (mostrada anteriorment)

$$FD = 1 - \frac{N/T}{D} \quad (1.14)$$

on N és el número d'anys de dades disponibles, T és el període de retorn, en anys i D el número de pluges disponibles.

Un cop conegut el valor de la probabilitat FD i amb els paràmetres m , n i p pel pluviòmetre i duració triada, trobem el volum de pluja recollit, que transformem en intensitat de precipitació i ens proporciona un punt de la corba IDF (Figura 1-13). En iterar aquest procés pels diferents

períodes de retorn, diferents durades de les precipitacions i els diferents pluviòmetres obtenim la totalitat de les corbes IDF de tots els pluviòmetres, que mostrem a l'annex B

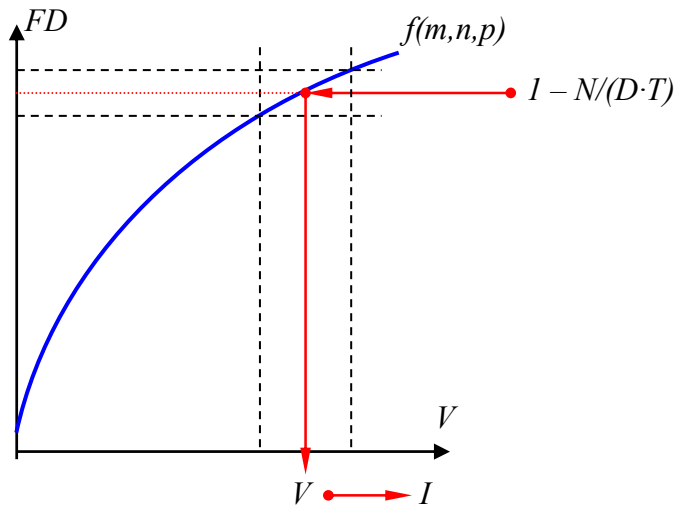


Figura 1-14 Mètode per assignar les intensitats a les probabilitats

A la majoria de les corbes podem veure un doble comportament lineal (les representacions estan en doble eix logarítmic) un fins els 20 minuts i un altre a partir d'una hora, on tenim uns pendents negatius i més pronunciats per les duracions grans. També es pot apreciar que a les estacions amb poques dades les gràfiques no s'han pogut construir en la seva totalitat i tenim valors poc coherents, en conseqüència no tindrem en compte els resultats obtinguts pels pluviòmetres 28 i 29. Destaquem que els resultats de les altres estacions són coherents amb els valors obtinguts per (Casas, 2005).

Un cop obtingudes les corbes IDF per les diferents estacions, i pensant en la seva utilització en la tasca de prevenir inundacions, podem seleccionar els valor màxim per cada durada i període de retorn obtingut a la xarxa, de forma que reflecteixin les condicions més adverses que poden produir les pluges. Amb aquests valors màxims podem construir unes corbes IDF per la zona metropolitana de Barcelona pel mètode de les funcions mnp. També hem calculat els valors mínims i els valors mitjos que presentem a la Figura 1-15. A la Imatge 1-10 presentem els pluviòmetres que han intervingut en la confecció d'aquestes corbes i la seva freqüència d'aparició, amb el número que figura després de "Màx" o "mín" al costat de cada estació. Podem veure que les estacions que més informacions aporten a les corbes dels màxims es troben davant del port de Barcelona, P118 i P125 amb 19 aportacions cadascuna, i a les corbes de mínim l'aportació és fonamentalment d'una estació situada al nord; P18 amb 56 aportacions.

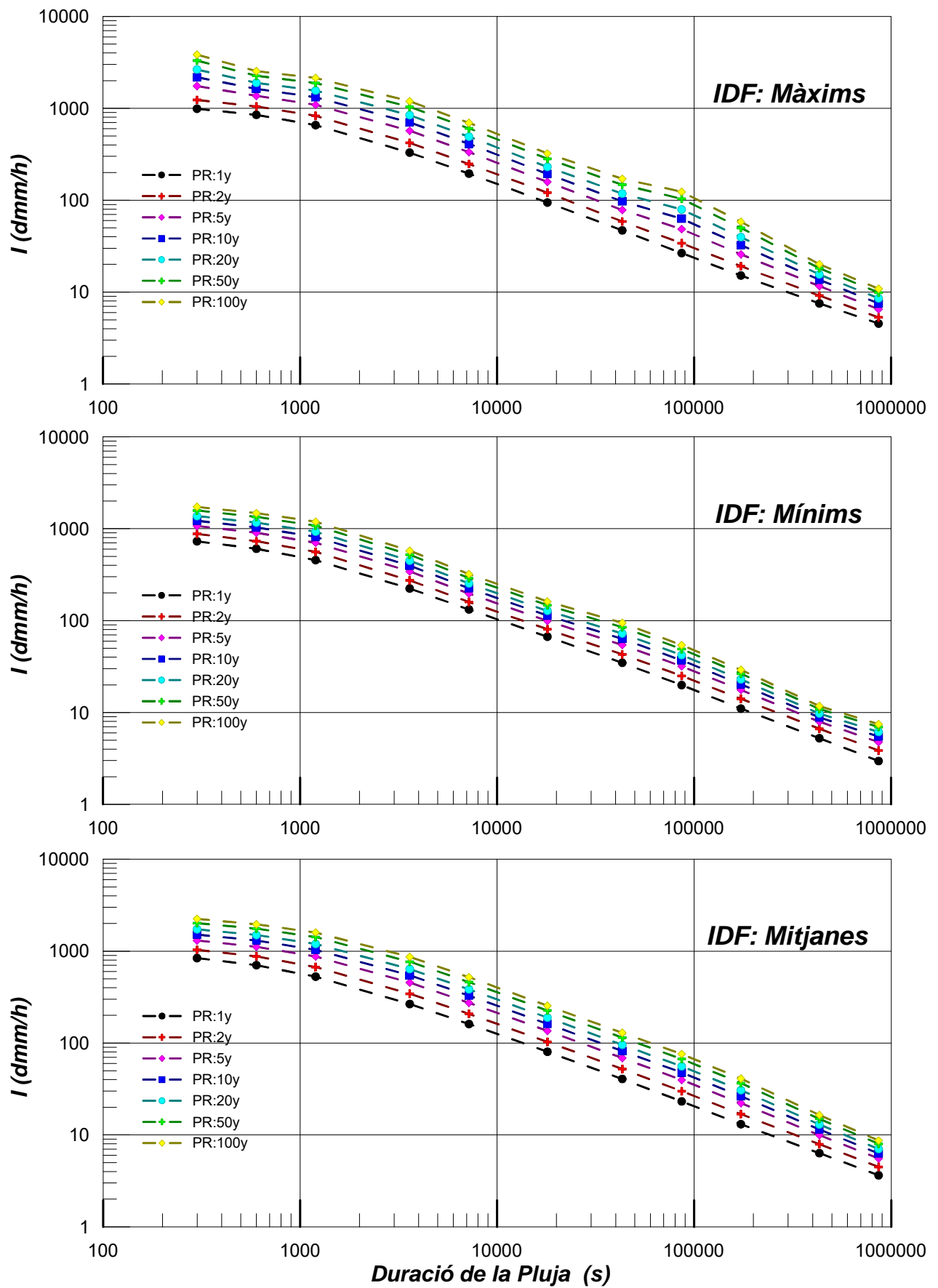
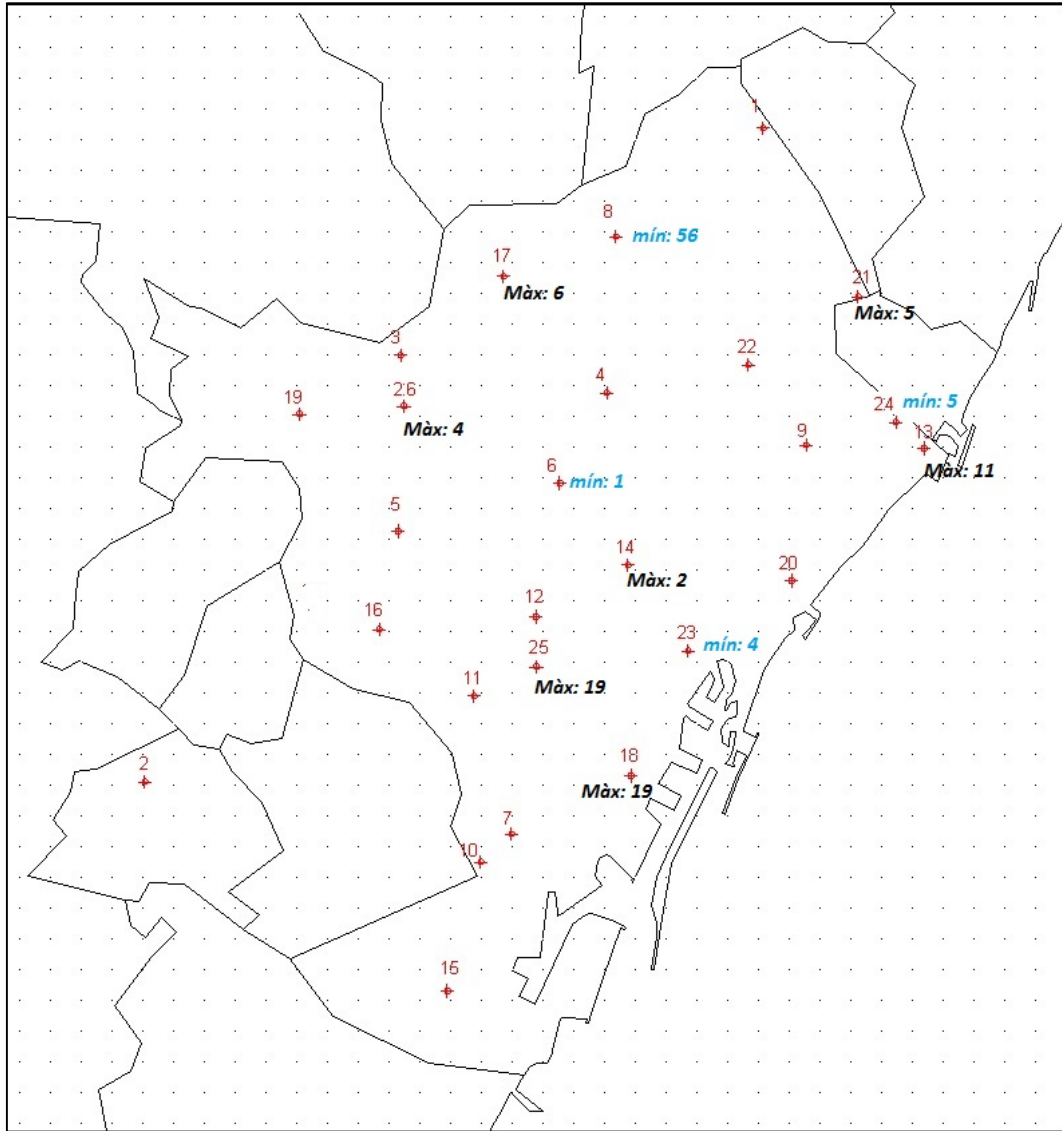


Figura 1-15 Valors màxims, mínims i mitjos de les IDF calculades amb el mètode de la funció mnp de totes les estacions estudiades



*Imatge 1-10 Pluviòmetres que han intervingut en la confecció de les corbes de “màxims” i de “mínims”
La seva freqüència d’aparició està al costat de cada estació, amb el número que figura després de
“Màx” o “mín”*

1.5. Mètodes de màxims anuals: GE1 (Gumbel) i GEV

Altres mètodes utilitzats per construir les corbes IDF es basen en ajustar les sèries dels valors màxims de les precipitacions per determinats períodes temporals, en el nostre cas períodes anuals a una funció de distribució teòrica. La simplicitat d'aquests mètodes els fan ser els més utilitzats per la majoria d'autors. També existeixen els mètodes anomenats d'excedències, que utilitzen els valors de precipitació que superen un determinat valor llindar.

Aquest mètodes es basen en tres hipòtesis teòriques fonamentals (Beguiría, 2002)

- Els successos climàtics extrems es poden descriure com una variable aleatòria que pot ser descrita per una funció de probabilitat.
- Les sèries de esdeveniments extrems són independents, els valors que formen aquestes sèries no estan inter-correlacionats.
- Les funcions de probabilitat que descriuen els processos extrems són invariants temporals i invariants per qualsevol valor de les magnituds de la variables estudiades.

Com és sabut, les funcions de probabilitat ens permeten relacionar la magnitud d'una variable aleatòria amb la seva probabilitat d'ocurrència. És del nostre interès expressar aquesta probabilitat d'ocurrència en forma de freqüència per medi de l'anomenat Període de Retorn que és pot definir com el temps esperat (temps mitjà) entre l'ocurrència de dos successos de baixa probabilitat.

Si $F(x \geq X)$ és la probabilitat que la variable aleatòria x prengui valors iguals o superiors a X i $T(x)$ és el període de retorn corresponent, tindrem que

$$T(x) = \frac{1}{F(x \geq X)} \quad (1.15)$$

Recordem que

$$F(x \geq X) + F(x \leq X) = 1 \Rightarrow F(x \leq X) = 1 - \frac{1}{T(x)} \quad (1.16)$$

Es pot veure que l'equació (1.16) no és més que la particularització de la (1.14) quan el número total d'anys coincideix amb el total de les dades $N = D$.

Existeixen diferents funcions de probabilitat teòriques per descriure les sèries extremes de màxims (Hosking & Wallis, 1997) nosaltres treballarem amb dos d'aquestes; Valors Extrems Generalitzats (GEV) i Valors Extrems de Tipus 1 o de Gumbel.

La funció Gumbel és utilitzada extensament per la majoria d'autors i es tracta d'una distribució de dos paràmetres d'utilització molt simple. La funció GEV és una distribució de tres paràmetres que en principi ha de permetre un ajust més acurat als punts experimentals que la Gumbel. La funció Gumbel és una particularització de la GEV.

1.5.1. Distribució de probabilitat de valors extrems de tipus 1 o de Gumbel

La funció de distribució de dos paràmetres més utilitzada per ajustar sèries de valors extrems màxims anuals és la de Valors Extrems de Tipus 1 també anomenada de Gumbel. La seva funció de probabilitat és

$$f_{\alpha,\beta}(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left(-\frac{x-\beta}{\alpha}\right) \exp\left(-\exp\left[-\frac{x-\beta}{\alpha}\right]\right) \text{ amb } -\infty < x < +\infty \quad (1.17)$$

on α i β són els dos paràmetres, d'escala i d'origen respectivament. α pot prendre qualsevol valor real $-\infty < \alpha < +\infty$.

La funció de probabilitat acumulada és

$$F_{\alpha,\beta}(x \leq X) = \exp\left(-\exp\left[-\frac{x-\beta}{\alpha}\right]\right) \text{ amb } -\infty < x < +\infty \quad (1.18)$$

aïllant la x (quantil)

$$x(F_{\alpha,\beta}) = \beta - \alpha \ln(-\ln[F_{\alpha,\beta}(x \leq X)]) \quad (1.19)$$

$$x(T) = \beta - \alpha \ln\left(-\ln\left[1 - \frac{1}{T}\right]\right) \quad (1.20)$$

A la Figura 1-16 podem veure com afecten els valors dels paràmetres α i β en la forma de la funció de probabilitat acumulada.

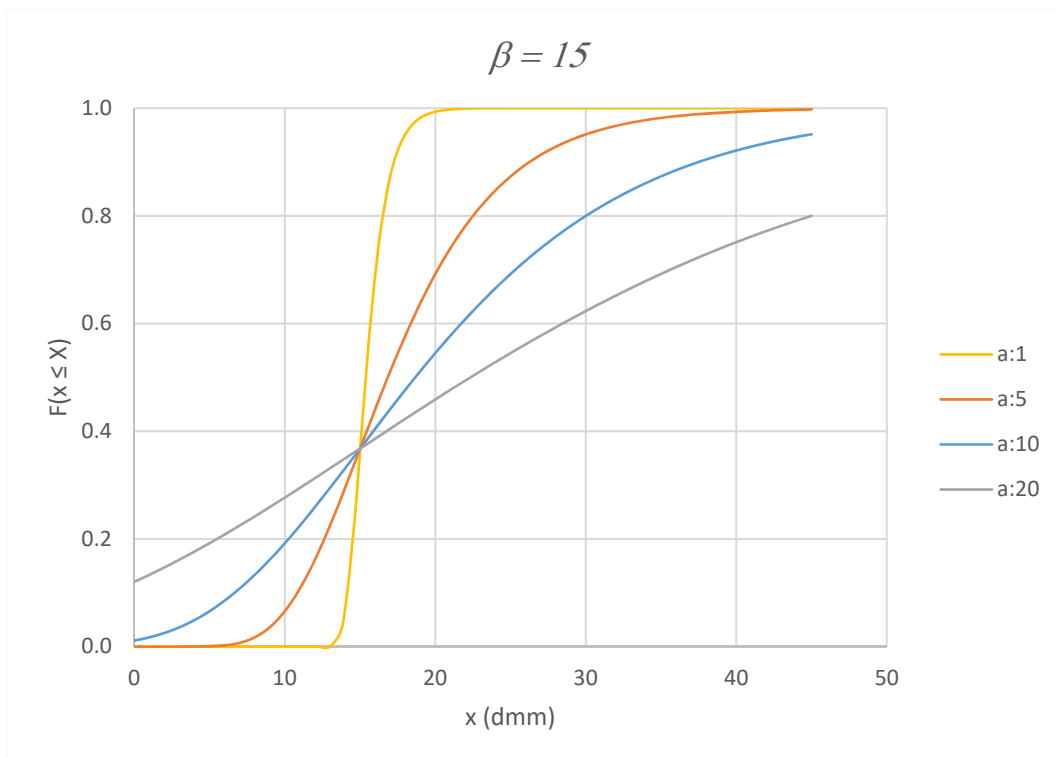


Figura 1-16 Representació de la probabilitat acumulada de la funció de Gumbel per un valor de origen de 15 i quatre valors de escala (a): 1, 5, 10 i 20

1.5.2. Distribució de probabilitat general de valors extrems (GEV)

Tal com el seu nom indica, aquesta és la distribució general per estudiar els valors extrems i de la qual s'obtenen, com a mínim, tres funcions particulars, de les quals la primera és la de Gumbel presentada anteriorment. Aquestes són les seves funcions de probabilitat (f) de densitat (FD) i el quantil

$$f_{\alpha,\beta,\kappa}(x) = \frac{1}{\alpha} \exp(-[1 - \kappa]y - \exp[-y]) \quad (1.21)$$

amb

$$y = -\frac{1}{\kappa} \ln \left(1 - \kappa \frac{x - \beta}{\alpha} \right) \quad \text{si } \kappa \neq 0 \quad (1.22)$$

on α , β i κ són els tres paràmetres, d'escala, origen i forma, respectivament. Per $\kappa = 0$ i amb $y = \frac{x - \beta}{\alpha}$ tenim la distribució de Gumbel. El domini de la funció és el següent

$$\text{Domini de } x: \begin{cases} -\infty \leq x \leq \beta + \alpha/\kappa & \text{si } \kappa > 0 \\ -\infty \leq x \leq +\infty & \text{si } \kappa = 0 \\ \beta + \alpha/\kappa \leq x \leq +\infty & \text{si } \kappa < 0 \end{cases} \quad (1.23)$$

i la funció de probabilitat acumulada és

$$F_{\alpha,\beta,\kappa}(x \leq X) = \exp(-\exp[-y]) \quad (1.24)$$

i aïllant la x (quantil)

$$x(F_{\alpha,\beta,\kappa}) = \beta + \frac{\alpha}{\kappa} \left(1 - \{-\ln F_{\alpha,\beta,\kappa}(x \leq X)\}^{\kappa} \right) \quad \text{si } \kappa \neq 0 \quad (1.25)$$

$$x(T) = \beta + \frac{\alpha}{\kappa} \left(1 - \left\{ -\ln \left[1 - \frac{1}{T} \right] \right\}^{\kappa} \right) \quad \text{si } \kappa \neq 0 \quad (1.26)$$

A la Figura 1-17 podem veure els efectes dels paràmetres α i κ en la forma de la funció de probabilitat acumulada per un valor fixat del paràmetre d'origen.

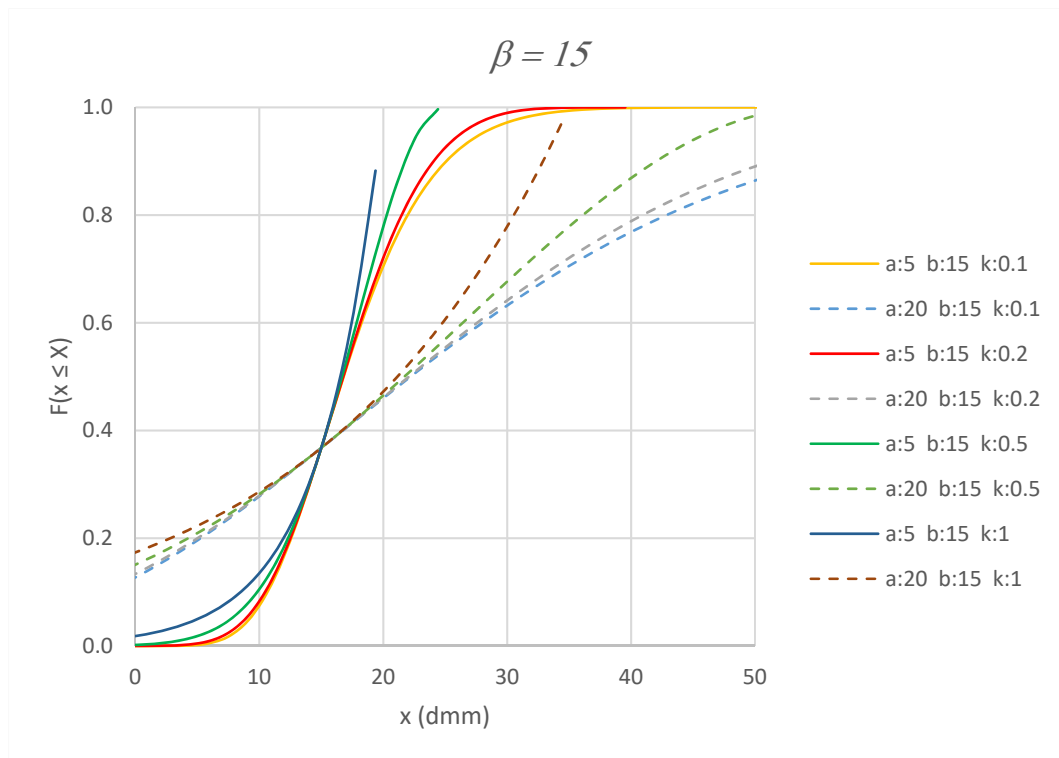


Figura 1-17 Representació de la probabilitat acumulada de la funció GEV per un valor d'origen de $\beta = 15$ [b a la llegenda] i diferents valors d'escala (α) i forma (κ) [a i k a la llegenda]

1.6. El mètode dels moments lineals (l-moments)

L'ajust dels paràmetres de les distribucions a les sèries experimentals el farem pel mètode dels moments lineals, anomenats l-moments. La tècnica dels moments ordinària es basa en el fet que a partir del coneixement de les potències dels valors experimentals d'una sèrie de dades $\{x_i; x_i^2; x_i^3; x_i^4 \dots\}$ podem fer una descripció molt precisa de la distribució. Amb el mètode dels l-moments també volem descriure tan bé com sigui possible la distribució estadística de la sèrie experimental, però sense fer les potències dels valors experimentals, només agafant combinacions lineals dels mateixos $\{\sum_i \alpha_{i1} \cdot x_i; \sum_i \alpha_{i2} \cdot x_i; \dots\}$. Això fa que els valors extrems i grans de la sèrie (outliers) no tinguin un pes excessiu en la distribució, ja que no intervenen les seves potències. De la mateixa manera aquest mètode està indicat com més òptim per la descripció de sèries curtes.

1.6.1. Introducció als l-moments

Farem una breu introducció a la teoria dels l-moments, fent incidència en els aspectes que siguin fonamentals pels càlculs que realitzarem.

Els l-moments (Hosking, 1990), (Hosking & Wallis, 1997) són combinacions lineals dels moments de probabilitat ponderats definits per (Greenwood, et al., 1979) que tenen una interpretació directa

com mesures de la ubicació (location), dispersió i la forma de la mostra de dades. Els primers l-moments estan definits per les expressions següents:

$$\lambda_1 = b_0 \quad (1.27)$$

$$\lambda_2 = 2b_1 - b_0 \quad (1.28)$$

$$\lambda_3 = 6b_2 - 6b_1 + b_0 \quad (1.29)$$

$$\lambda_4 = 20b_3 - 30b_2 + 12b_1 - b_0 \quad (1.30)$$

on b_0 , b_1 , b_2 i b_3 són els valors estimats dels moments de probabilitat ponderats per a una mostra de dades finita i ordenada $\{x_1; x_2; \dots; x_n\}$ amb $x_1 < x_2 < \dots < x_n$.

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (1.31)$$

$$b_r = \frac{1}{n} \sum_{j=r+1}^n \frac{(j-1)(j-2) \dots (j-r)}{(n-1)(n-2) \dots (n-r)} x_j \quad (1.32)$$

particularitzant pels tres primers

$$b_1 = \frac{1}{n} \sum_{j=2}^n \frac{(j-1)}{(n-1)} x_j \quad (1.33)$$

$$b_2 = \frac{1}{n} \sum_{j=3}^n \frac{(j-1)(j-2)}{(n-1)(n-2)} x_j \quad (1.34)$$

$$b_3 = \frac{1}{n} \sum_{j=4}^n \frac{(j-1)(j-2)(j-3)}{(n-1)(n-2)(n-3)} x_j \quad (1.35)$$

- λ_1 (l-location) és la mitjana de la mostra.
- λ_2 (l-escale) és una mesura de la dispersió de les dades respecte de la mitjana.

Dividint els l-moments d'ordre superior per la mesura de la dispersió (λ_2) s'obtenen els l-moments-ràtio, que són quantitats adimensionals i per tant, independents de les unitats de mesura.

$$\tau_r = \frac{\lambda_r}{\lambda_2} \quad (1.36)$$

$$\text{l-asimetria (l-skewness)} \quad \tau_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \quad (1.37)$$

$$\text{l-curtosi (l-kurtosis)} \quad \tau_4 = \frac{\lambda_4}{\lambda_2} \quad (1.38)$$

El coeficient de variació en l-moments es defineix com

$$\text{coeficient de l-Variació (L-CV)} \quad \tau = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (1.39)$$

Els l-moments (especialment L-asimetria i L-curtosi) permeten definir qualsevol tipus de distribució. Per exemple, segons (Hosking & Wallis, 1997) els paràmetres de les distribucions que utilitzarem es troben a partir dels l-moments de la següent manera:

distribució GE1 (Gumbel) (1.17)

$$\text{Escala: } \alpha = \frac{\lambda_2}{\ln(2)} \quad (1.40)$$

$$\text{Origen: } \beta = \lambda_1 - 0.5772157 \alpha \quad (1.41)$$

distribució GEV (1.21)

$$\text{Forma: } \kappa = 7.8590 c + 2.9554 c^2 \quad \text{amb} \quad c = \frac{2}{3+\tau_3} - \frac{\ln(2)}{\ln(3)} \quad (1.42)$$

$$\text{Escala: } \alpha = \frac{\kappa \lambda_2}{\Gamma(1+\kappa)(1-2^{-\kappa})} \quad (1.43)$$

$$\text{Origen: } \beta = \lambda_1 + \frac{\alpha}{\kappa} (\Gamma(1 + \kappa) - 1) \quad (1.44)$$

1.6.2. Diagrama de l-moments

Hi ha relacions específiques entre l-asimetria i l-curtosi que depenen de la distribució estudiada. El diagrama de l-moments-ràtio (l-asimetria vs l-curtosi) compara els l-moments de les mostres (dades de les estacions) amb les corbes teòriques dels l-moments de les funcions de distribució candidates a ajustar aquestes dades. La proximitat del punt $(\tau_3; \tau_4)$ de la mostra experimental a la corba teòrica és interpretable com una indicació que la distribució ajusta convenientment les dades experimentals.

Per les distribucions amb què treballem tenim:

distribució GE1 (Gumbel) (1.17)

$$\tau_3 = \frac{\ln(9) - \ln(8)}{\ln(2)} = 0.169925001; \quad \tau_4 = \frac{16\ln(2) - 10\ln(3)}{\ln(2)} = 0.1503749928 \quad (1.45)$$

distribució GEV (1.21)

$$\begin{aligned} \tau_4 \approx & 0.10701 + 0.1109 \tau_3 + 0.84838 \tau_3^2 - 0.06669 \tau_3^3 + 0.00567 \tau_3^4 - 0.04208 \tau_3^5 \\ & + 0.03763 \tau_3^6 \end{aligned} \quad (1.46)$$

$$\left(\begin{array}{c} \tau_3 = \frac{2(1 - 3^{-\kappa})}{(1 - 2^{-\kappa})} - 3 \\ \tau_4 = \frac{5(1 - 4^{-\kappa}) - 10(1 - 3^{-\kappa}) + 6(1 - 2^{-\kappa})}{(1 - 2^{-\kappa})} \end{array} \right)$$

A la Figura 1-18 mostrem la representació dels paràmetres (τ_3, τ_4) per les distribucions GEV i Gumbel. També mostrem les corbes o punts teòrics associades a distribucions d'excidents; Generalitzada de Pareto $(\tau_4 = \frac{\tau_3(1+5\tau_3)}{5+\tau_3})$ i Exponencial $(\tau_3 = 1/3; \tau_4 = 1/6)$ i la distribució Normal $(\tau_3 = 0; \tau_4 = \frac{30 \arctan\sqrt{2}}{\pi} - 9 = 0.12260172)$

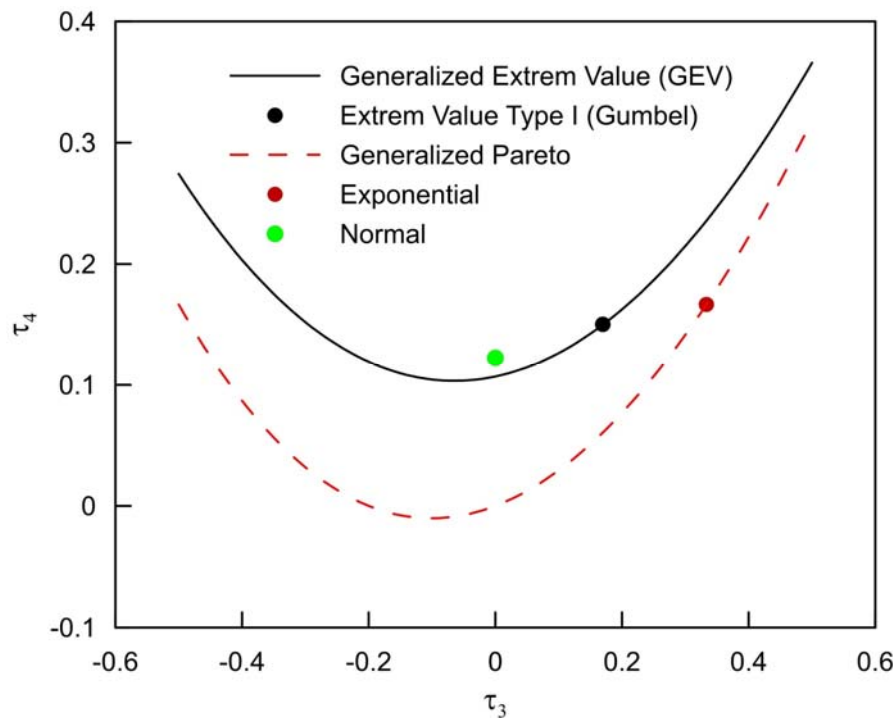
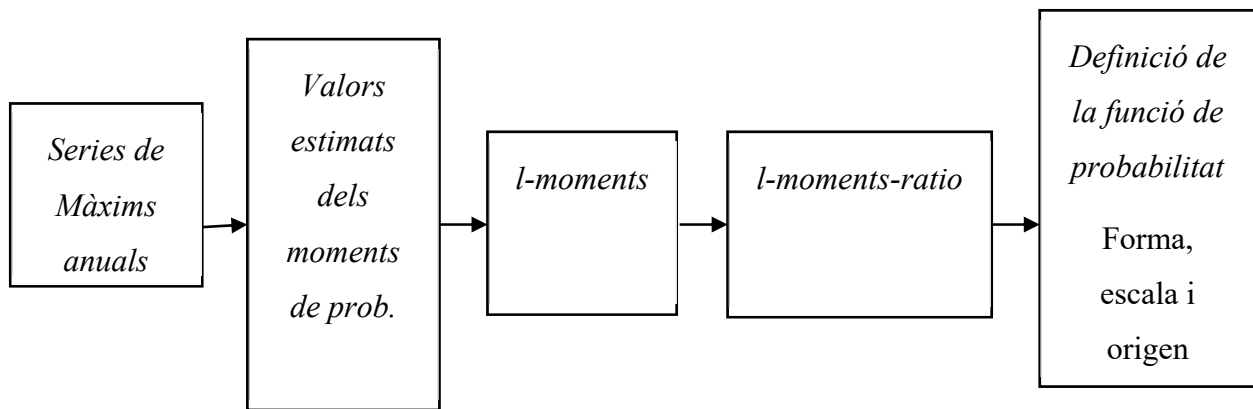


Figura 1-18 Gràfica de l-moments. Es mostren tant les distribucions utilitzades pels valors extrems (GEV i Gumbel) com les d'excidents (GP i Exp) i la distribució normal

1.7. Resultats

Per la construcció de les IDF's hem de procedir a calcular els valors de precipitació màxima anual, amb el mètode d'interval·ls mòbils amb pas mínim de 5 minuts, recollida per cada pluviòmetre durant tots els anys dels que tenim informació i per les diferents agrupacions temporals (DT) que interessen. En aquest cas hem estudiat les agrupacions temporals següents: de 5 minuts fins a 120 minuts en increments de 5 minuts; de 2 hores fins a 24 hores en increments d'una hora; d'un dia fins a 15 dies en increments d'un dia

El procés de càlcul el presentem al següent esquema



i un cop definits els paràmetres de les funcions de probabilitat procedirem a obtenir les dues famílies de corbes IDF's

A tall d'exemple, presentem tot el mètode per dos estacions pluviomètriques i dues durades: SAGR:5 minuts; FISI: 20 minuts; FISI: 960 minuts i SAGR:21600 minuts

Volums de precipitació màxima anual

Any	V (dmm)			
	SAGR: 5 min	FISI: 20 min	FISI: 960 min	SAGR: 21600 min
1994	-	190	687	-
1995	86	196	375	1193
1996	91	-	-	1389
1997	87	280	476	849
1998	62	136	806	1164
1999	115	311	574	1224
2000	58	97	178	839
2001	98	147	443	743
2002	76	265	997	1352
2003	51	184	526	1353
2004	63	202	325	940
2005	108	190	416	1903
2006	84	307	1152	1235
2007	74	202	386	978
2008	55	218	578	964
2009	76	253	470	1017
2010	53	184	465	1422
2011	87	237	648	1758
2012	38	127	634	941
2013	78	226	391	1328
2014	97	179	816	890
2015	66	155	272	533
2016	74	253	402	998
2017	78	136	1041	1140
2018	92	256	754	1235
2019	93	318	503	1440

Taula 1-12 Sèries de volums màxims anuals per dues estacions i dues durades diferents per cada estació de l'exemple.

Ordenació i càlculs de freqüències acumulades

Ordenem cada una de les sèries de menor a major. Com és d'esperar, ordenar les sèries segons els volums desordena els anys d'ocurrència dels mateixos i ja no els mostrem. Agrupen les dades

segons la seva ocurrència que indiquem a la columna H (histograma) i la probabilitat corresponent a la columna $P[v < V]$ (Taula 1-13)

V(dmm) SAGR 5 min			V(dmm) FISI 20 min			V(dmm) FISI 960 min			V(dmm) SAGR 21600 min		
H	$P[v < V]$		H	$P[v < V]$		H	$P[v < V]$		H	$P[v < V]$	
38	1	0.038	97	1	0.040	178	1	0.038	533	1	0.038
51	1	0.077	127	1	0.078	272	1	0.077	743	1	0.077
53	1	0.115	136	2	0.155	325	1	0.115	839	1	0.115
55	1	0.154	147	1	0.194	375	1	0.154	849	1	0.154
58	1	0.192	155	1	0.232	386	1	0.192	890	1	0.192
62	1	0.231	179	1	0.271	391	1	0.231	940	1	0.231
63	1	0.269	184	2	0.348	402	1	0.269	941	1	0.269
66	1	0.308	190	2	0.425	416	1	0.308	964	1	0.308
74	2	0.385	196	1	0.463	443	1	0.346	978	1	0.346
76	2	0.462	202	2	0.540	465	1	0.385	998	1	0.385
78	2	0.538	218	1	0.578	470	1	0.423	1017	1	0.423
84	1	0.577	226	1	0.617	476	1	0.462	1140	1	0.462
86	1	0.615	237	1	0.655	503	1	0.500	1164	1	0.500
87	2	0.692	253	2	0.732	526	1	0.538	1193	1	0.538
91	1	0.731	256	1	0.771	574	1	0.577	1224	1	0.577
92	1	0.769	265	1	0.809	578	1	0.615	1235	2	0.654
93	1	0.808	280	1	0.848	634	1	0.654	1328	1	0.692
97	1	0.846	307	1	0.886	648	1	0.692	1352	1	0.731
98	1	0.885	311	1	0.925	687	1	0.731	1353	1	0.769
108	1	0.923	318	1	0.963	754	1	0.769	1389	1	0.808
115	1	0.962				806	1	0.808	1422	1	0.846
						816	1	0.846	1440	1	0.885
						997	1	0.885	1758	1	0.923
						1041	1	0.923	1903	1	0.962
						1152	1	0.962			

Taula 1-13 Volums màxims ordenats de menor a major i agrupats segons les seves ocurrències (H)
Càlcul de les probabilitats per cada valor del volum $P[v < V]$

Valors estimats dels moments de probabilitat (b), els l-moments (λ) i els l-moments-ratio (τ)

Amb les equacions de la (1.31) fins la (1.34) obtenim els paràmetres b 's, els l-moments amb les (1.27) fins (1.30) i els l-moments-ratio amb les (1.37) (1.38) i (1.39)

	SAGR: 5 minuts	FISI: 20 minuts	FISI: 960 minuts	SAGR: 21600 minuts
b_0	77.60	209.96	572.60	1153.12
b_1	44.21	122.49	354.58	663.47
b_2	31.22	87.73	263.83	473.54
b_3	24.25	68.76	212.69	371.27
λ_1	77.6000	209.9600	572.6000	1153.1200
λ_2	10.8267	35.0133	136.5600	173.8233
λ_3	-0.3513	1.4348	28.1209	13.5057
λ_4	1.2703	3.0274	21.0774	27.8321
τ	0.139519	0.166762	0.238491	0.150742
τ_3	-0.032448	0.040978	0.205923	0.077698
τ_4	0.117329	0.086465	0.154345	0.160117

Taula 1-14 Paràmetres estadístics per determinar els moments de probabilitat (b), els l-moments (λ) i els l-moments-ratio (τ) per les quatre estacions/durada de mostra.

Paràmetres de les funcions de probabilitat

Amb els valors mostrats a la Taula 1-14 i les equacions (1.40) (1.41) (1.42) (1.43) i (1.44) estem en condicions de definir els paràmetres que determinen les funcions de probabilitat associades a les sèries experimentals de màxims.

	SAGR: 5 minuts	FISI: 20 minuts	FISI: 960 minuts	SAGR: 21600 minuts
<i>Gumbel</i>				
α (escala)	15.6196	50.5136	197.0144	250.7741
β (origen)	68.5841	180.8028	458.8802	1008.3693
<i>GEV</i>				
κ (forma)	0.3436	0.2124	-0.0555	0.1496
α (escala)	19.6827	59.3703	186.6642	282.9151
β (origen)	71.4033	186.1918	454.0472	1026.7507

Taula 1-15 Valor de les funcions de Gumbel i GEV associades a les quatre estacions/durada de la nostra mostra

A la Figura 1-19 representem els valors que s'han obtingut amb les dades experimentals de la Taula 1-13 columna $P[v < V]$ i les corresponents funcions de probabilitat que es determinen amb els paràmetres mostrats a la Taula 1-15. Es pot apreciar el bon acord entre les dades experimentals i les corbes teòriques.

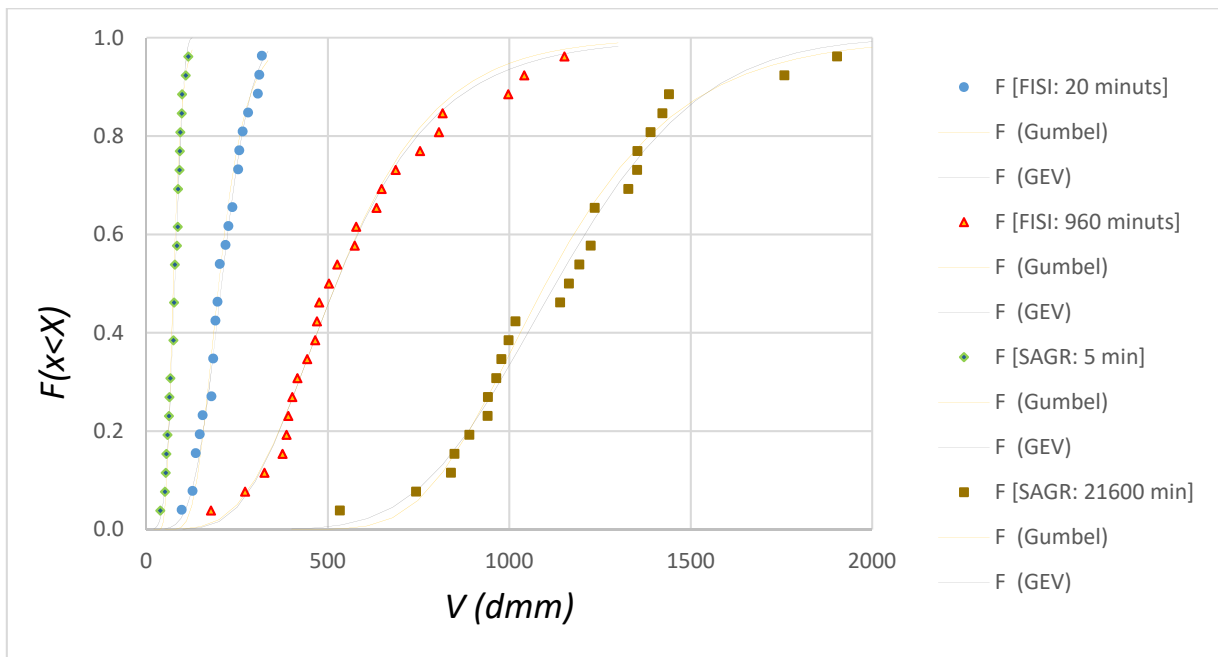


Figura 1-19 Representació dels valors de probabilitat acumulada per les quatre estacions/durada de la mostra. Els punts aïllats representen els valors obtinguts directament de les dades experimentals (Taula 1-13: $P[v < V]$) i en continu les respectives funcions de Gumbel i la GEV.

Per garantir que les dades experimentals ajusten a les funcions teòriques representem al diagrama de 1-moments (Figura 1-20) els valors (τ_3, τ_4) per totes les nostres dades experimentals i podem veure que s'acosten raonablement tant a la corba de la funció GEV com al punt representant de la distribució de Gumbel. En aquest cas estem en condicions de dir que les dues distribucions proporcionaran valors (molt) similars per les IDF's.

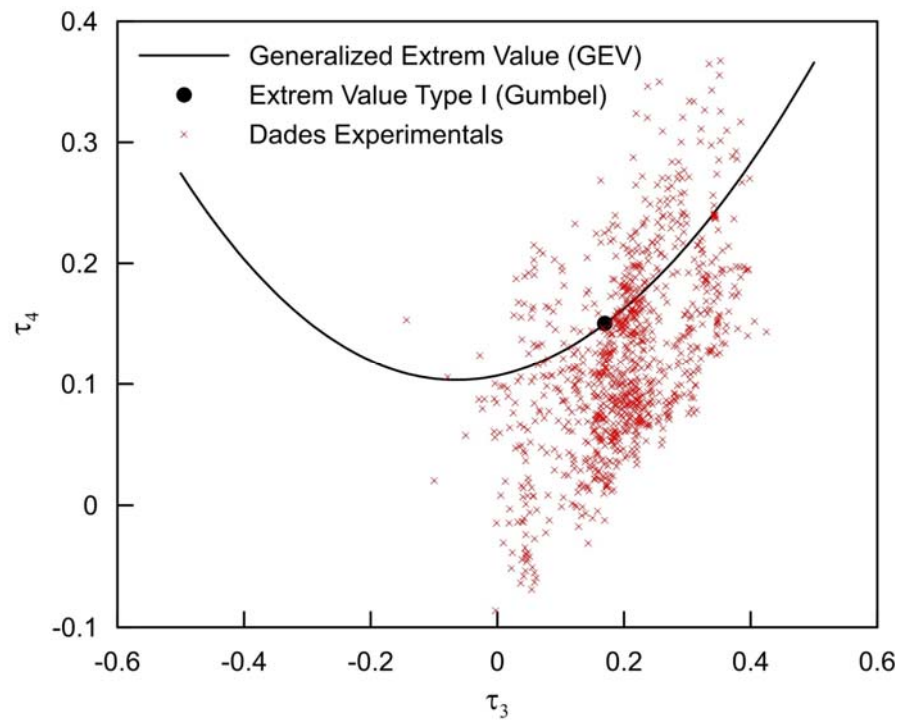


Figura 1-20 Representació dels punts experimentals (τ_3, τ_4) per poder fer comparacions amb les corbes teòriques de les funcions de probabilitat.

Les representacions de les IDF's calculades per totes les estacions amb les distribucions de Gumbel i GEV les mostrem a les figures dels annexos C i D.

També calculem els valors màxims, mínims i mitjos per totes les estacions, tal com hem fet amb les corbes obtingudes pel mètode de les funcions *mnp* (Figura 1-21 i Figura 1-22)

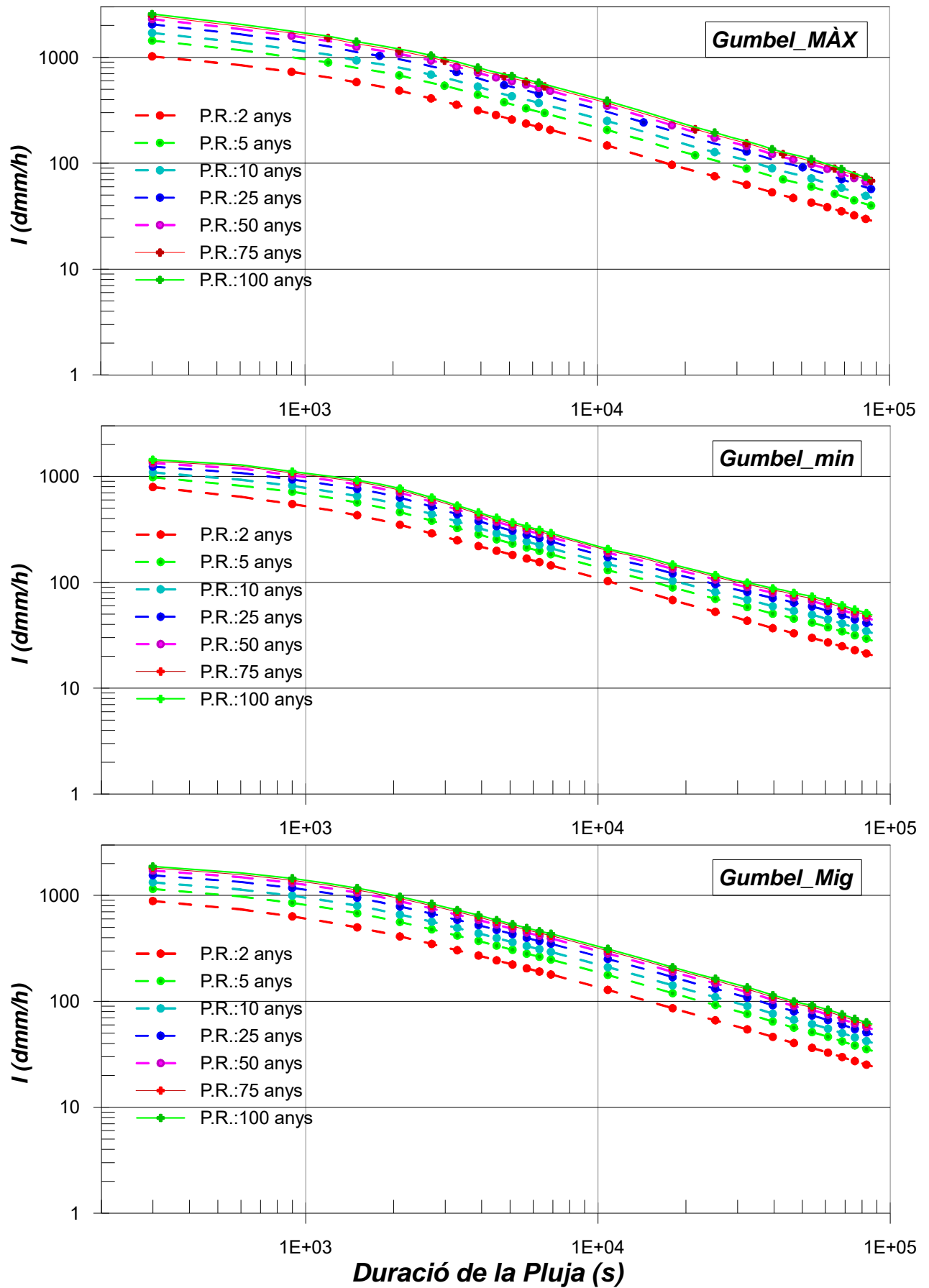


Figura I-21 Valors màxims, mínims i mitjos de les IDF calculades amb la distribució de Gumbel de tots els resultats de totes les estacions estudiades.

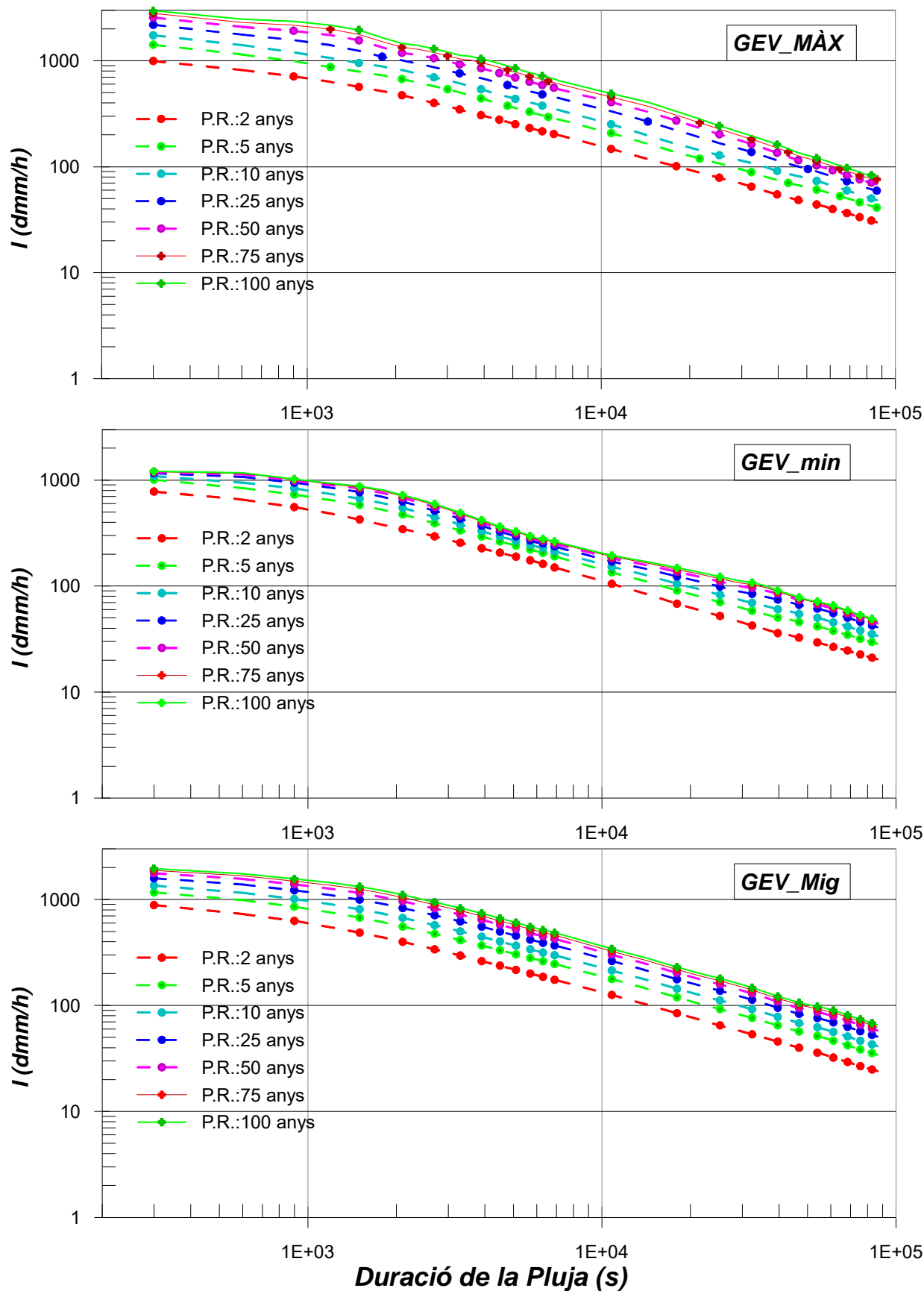


Figura 1-22 Valors màxims, mínims i mitjos de les IDF calculades amb la distribució GEV de tots els resultats de totes les estacions estudiades.

1.8. Comparativa amb les IDF actuals

Fins el moment les corbes IDF que s'han estat utilitzant per la ciutat de Barcelona han estat calculades per (Casas, 2005) a la seva tesi doctoral al 2005 utilitzant el mètode de les funcions *mnp* amb les dades històriques obtingudes de l'estació situada a l'observatori Fabra (Imatge 1-11) molt a prop de l'estació 26 de la xarxa de BCASA. Les gràfiques d'aquestes corbes es mostren a la Figura 1-23



Imatge 1-11 Observatori Fabra. Camí de l'observatori, s/n 08035 Barcelona

A la Taula 1-16 presentem els valors de les precipitacions calculades per cada duració de la pluja i pels diferents períodes de retorn. Per calcular les intensitats associades, que les anomenarem I_{Fabra} , només cal dividir els valors de les precipitacions pels valors temporals que figuren a la primera columna de la Taula 1-16

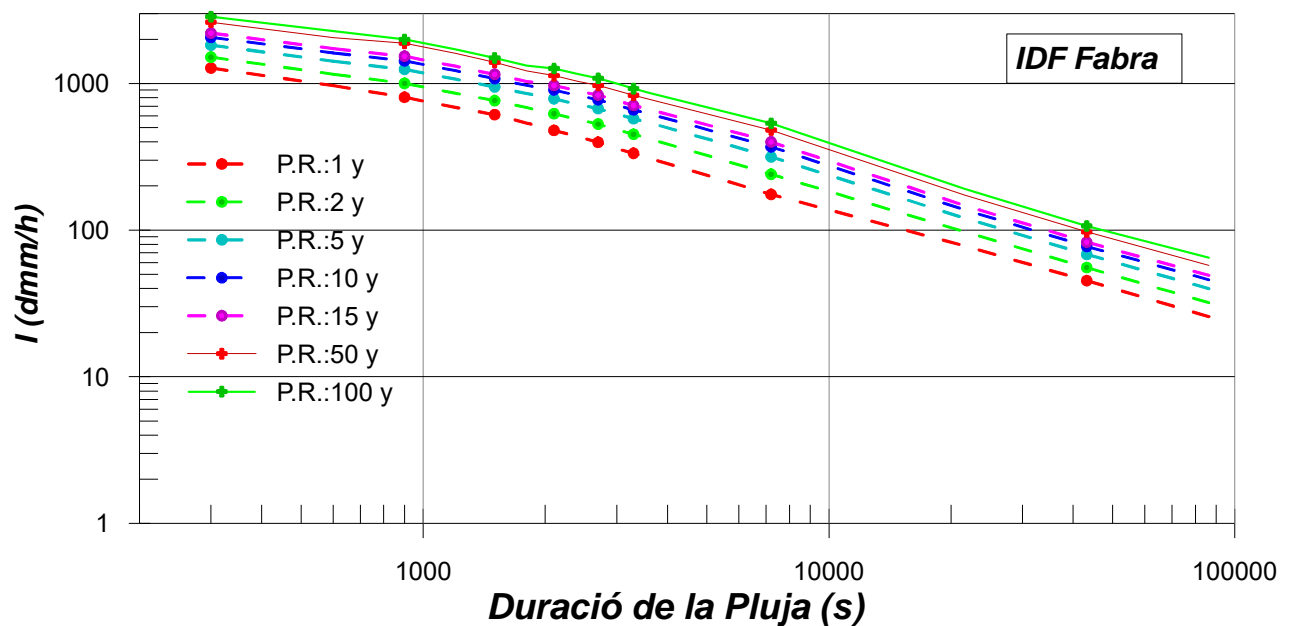


Figura 1-23 Corbes IDF obtingudes per (Casas, 2005) amb les dades del pluviòmetre JARDI de l'observatori Fabra

mm t(min)	T(anys)						
	1	2	5	10	15	50	100
5	10.6	12.6	15.2	17.2	18.4	21.8	23.8
10	16.1	19.3	23.6	26.9	28.8	34.3	37.8
15	20.1	25	31.2	35.7	38.3	47	50
20	22.9	28.6	35.7	40.8	43.7	53.4	57
25	25.5	31.8	39.4	45	48.1	58.1	62.3
30	26.9	34.2	42.6	48.4	51.6	61	66.1
35	27.9	36.2	45.9	52.7	56.6	65.9	73.9
40	29	37.9	48.1	55.3	59.4	68.8	77.4
45	29.8	39.6	50.5	58.1	62.4	72.6	81.5
50	30	40.3	51.6	59.4	63.8	74.4	83.1
55	30.6	41.2	52.7	60.6	65	76.1	84.6
60	31	42.1	54	62.1	66.6	78.2	86.6
120	35	48	63.1	73.8	79.8	96.3	107.2
360	46.8	58.4	72.4	82.5	88.3	104.2	114.4
720	54.2	66.6	81.9	93.0	99.4	116.7	128.3
1440	61.8	76.8	95.9	110	118.1	138.1	155.4

Taula 1-16 Valors de les precipitacions (mm) obtingudes a l'observatori Fabra amb les que (Casas, 2005) construeix les corbes IDF per la ciutat de Barcelona

Farem una comparativa de les diferents corbes IDF que hem calculat (I) en aquests estudi i les corbes IDF obtingudes per Casas 2005 (I_{Fabra}) calculant l'error relatiu respecte de les mateixes

$$e_{IDF} = \frac{I - I_{Fabra}}{I_{Fabra}} = \frac{I}{I_{Fabra}} - 1 \quad (1.47)$$

Valors negatius de e_{IDF} indicarà que la I calculada és més petita que I_{Fabra} i valors positius que és més gran.

La primera de les comparatives la fem amb el pluviòmetre número 3, AGTI, que és una estació molt propera a la de 'observatori Fabra; encara que només té una activitat d'uns 7 anys, per tant amb poc valor climatològic. Mostrem dos tipus de gràfics, en el primer fem la comparativa directa, punt a punt i la representació de l'error relatiu en funció de la duració de la pluja i pels diferents períodes de retorn, a la segona presentem un diagrama de caixes (box whisker, o de bigoti) on agrupem totes les durades de la pluja i l'error el presentem en funció del període de retorn (Figura 1-24) remarcar que en aquesta primera representació l'eix vertical ocupa l'interval (-0.6, 0.6)

Podem apreciar un comportament creixent de l'error en funció de la durada de la pluja a les gràfiques superiors i que aquest error és més gran en augmentar el període de retorn, tal i com queda confirmat a les gràfiques inferiors de la Figura 1-24.

L'error associat als càlculs amb el mètode *mnp* és força lineal i presenta uns límits de -0.4 fins a 0.4 Pels mètodes d'extremes es veu un comportament lineal per les duracions baixes, des dels 5 minuts fins a l'hora, amb uns intervals des del -0.4 fins al -0.2 i per valors superiors a l'hora de

durada de la pluja els valors de l'error es dispersen al voltant del 0, des del -0.2 fins al $+0.2$ on la dispersió és lleugerament més gran pel mètode GEV que per Gumbel. Als diagrames de caixes podem veure que tant les caixes com els màxims també són més grans per GEV que per Gumbel. Un altre resultat que podem comentar del diagrama de caixes és que pels mètodes d'extremes totes les caixes estan a la banda d'error negatiu; encara que són molt més baixes que les caixes del mètode mnp. Podem dir que, malgrat les diferències evidents, els càlculs fets amb el mètode mnp són força compatibles amb els càlculs històrics, mentre que els mètodes d'extremes donen resultats indiscutiblement inferiors als històrics.

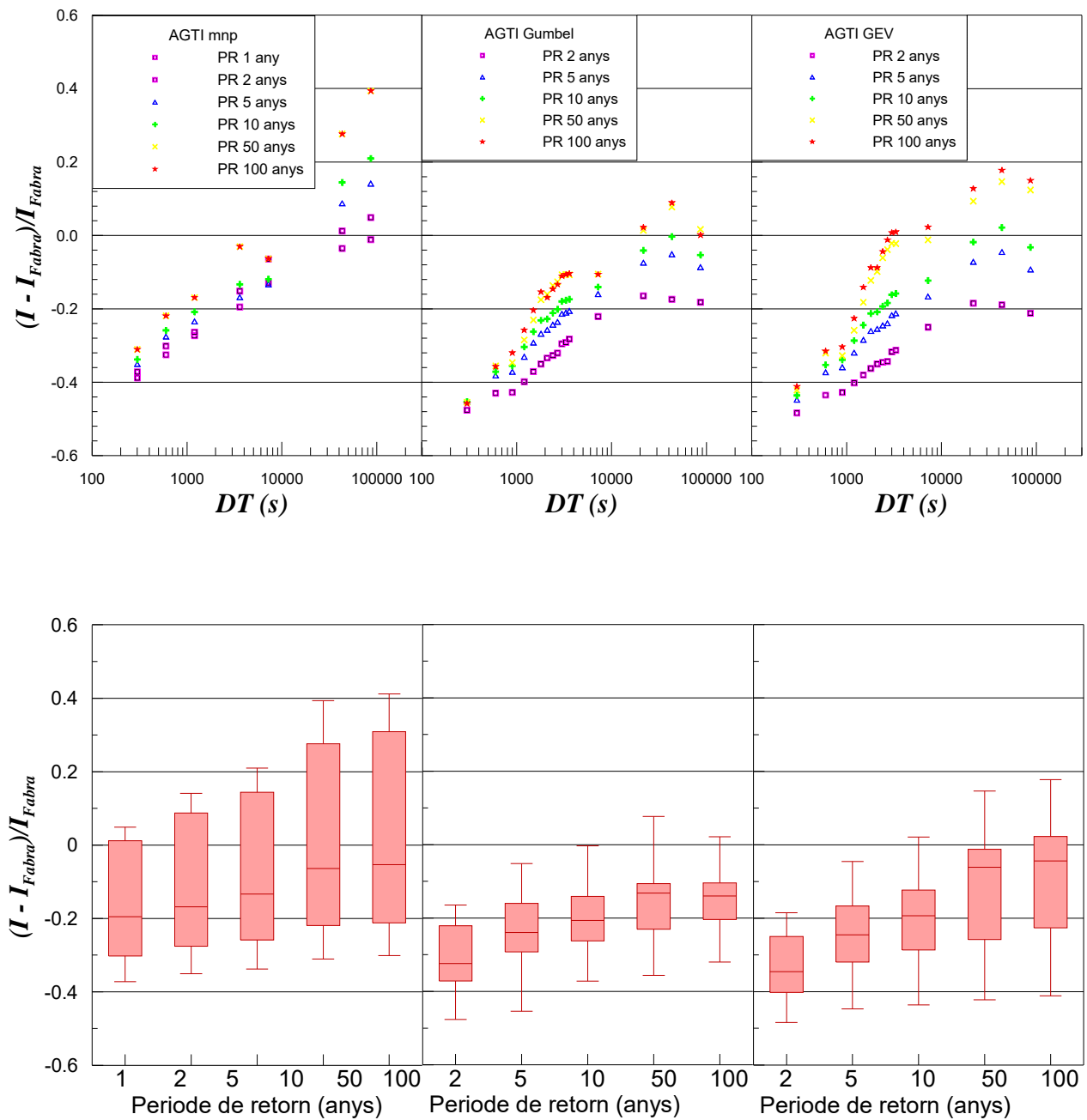


Figura 1-24 Comparativa de resultats de les corbes IDF per l'estació AGTI i pels tres mètodes de càlcul

La propera comparativa (Figura 1-25) la fem amb les dades obtingudes de tots els pluviòmetres de la xarxa; hem canviat l'interval de representació de l'error, ara és $(-0.6, 1)$. Per totes les estacions es veu un comportament lineal i molt dispers pels tres mètodes de càlcul i les gràfiques de caixes ens tornen a fer veure que els resultats del mètodes d'extremes són fonamentalment negatius i és pel mètode mnp i per períodes de retorn grans quan alguns dels errors es fan positius.

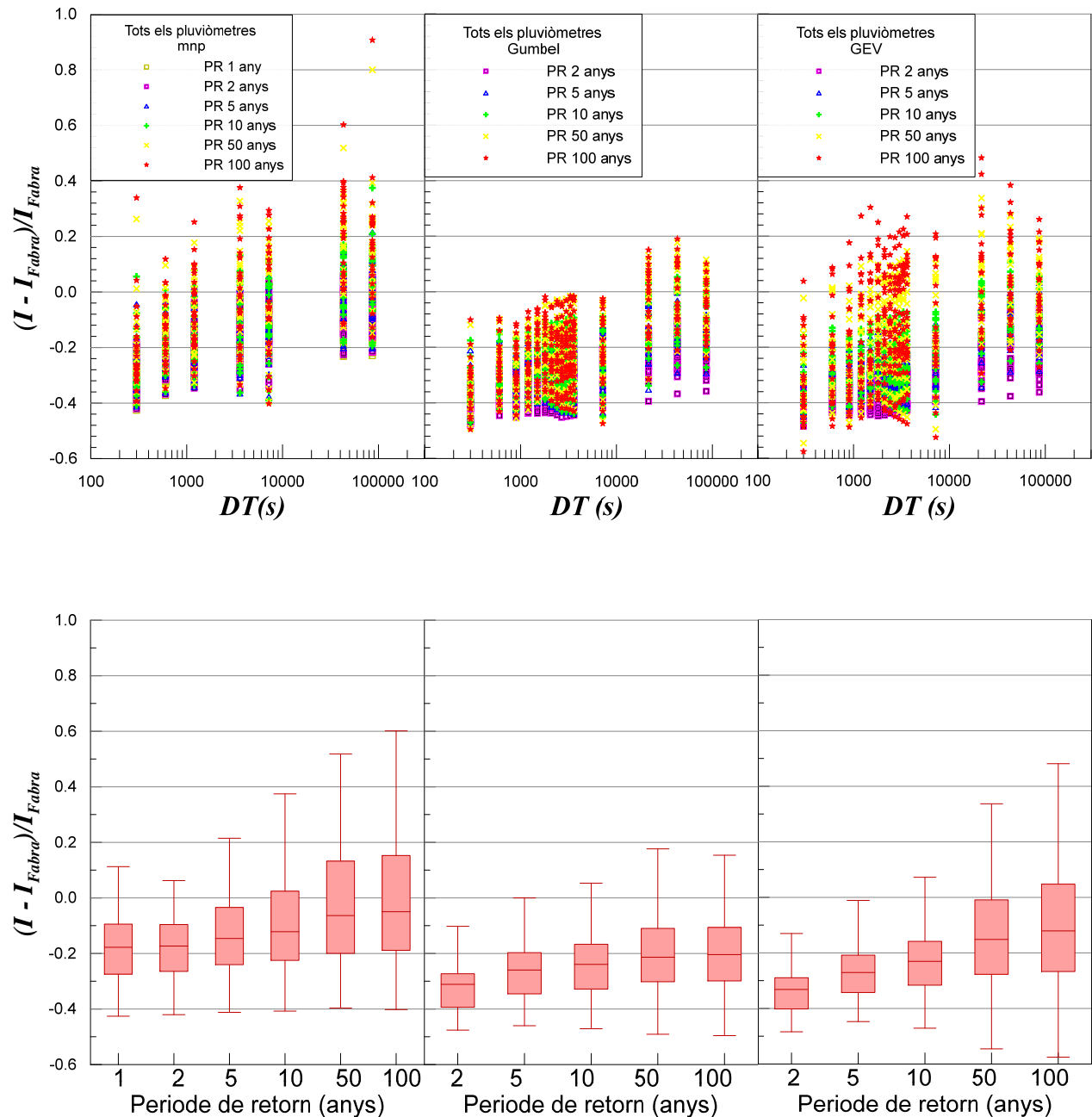


Figura 1-25 Comparativa de resultats de les corbes IDF per tots els pluviòmetres de la xarxa i pels tres mètodes de càlcul

L'última de les comparatives que farem és la de les corbes resum (Màxims, mitjanes i mínims) pels tres mètodes de càlcul. A la Figura 1-26 el mètode de la funció mnp, a la Figura 1-27 el mètode de Gumbel i a la Figura 1-28 el de la GEV. En aquestes comparatives caldria esperar que

els errors relatius estiguin escalats per la pròpia construcció de les corbes i per tots els mètodes de càlcul

$$e_{IDF;Màx} > e_{IDF;Mitg} > e_{IDF;mín} \quad (1.48)$$

De nou observem que les caixes del mètode mnp són més altes (més dispersió) que pels mètodes d'extremes el què confirma el mateix comportament de les comparatives anteriors. Les dispersions per als mètodes d'extremes resulten molt petites, el què confirmaria que són mètodes més robustos. Es pot apreciar el comportament lineal de l'error amb la duració de la pluja per tots els mètodes a les corbes de màxims i de mitjanes en canvi els mínims estan en la franja entorn del -0.4 on és natural que sigui negatiu encara que és sorprenent que no es segueixi el comportament de creixement lineal.

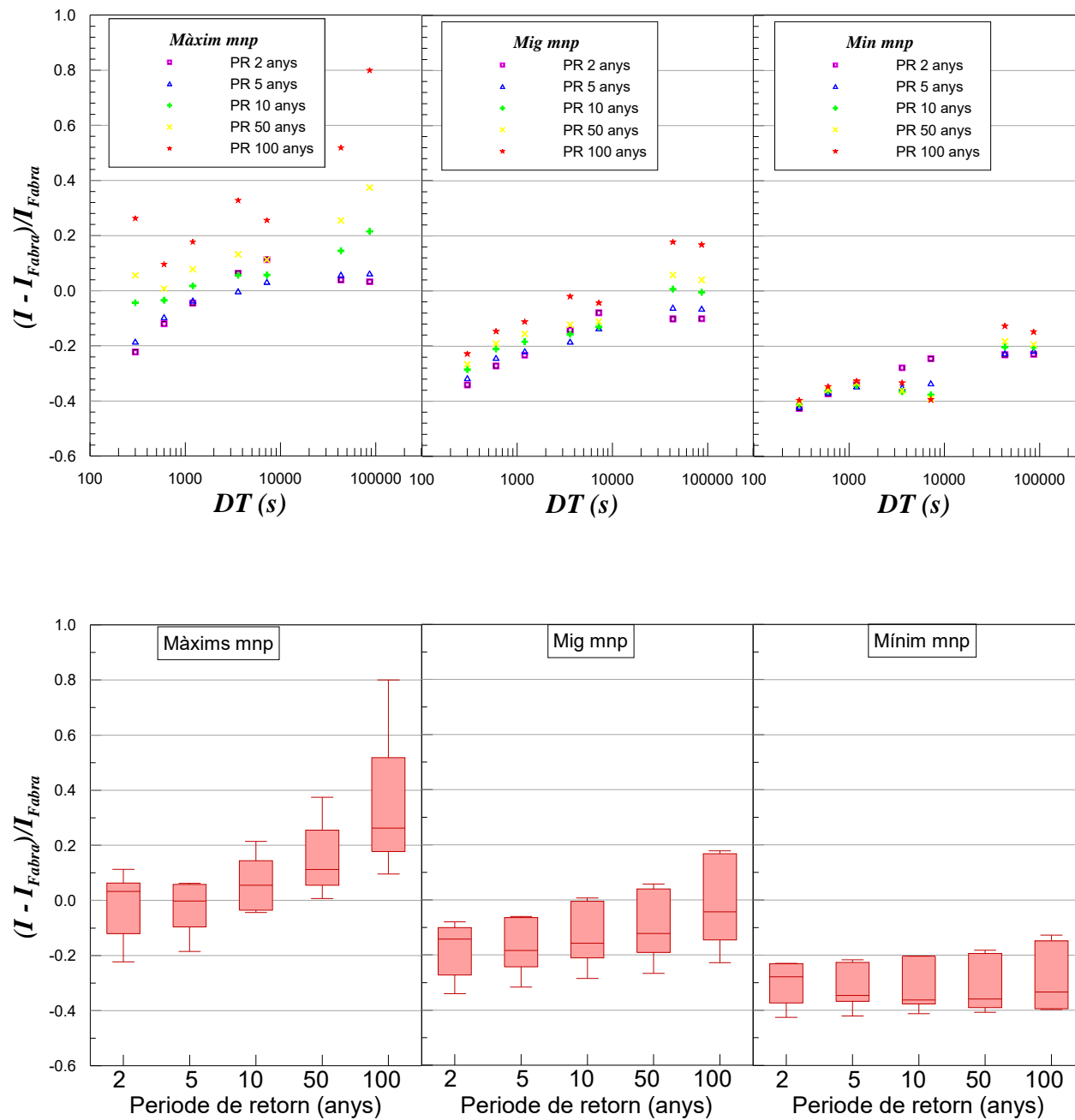


Figura 1-26 Comparativa de resultats de les corbes IDF de Màxim, de Mitjanes i de Mínims per tots els pluviòmetres de la xarxa i pel mètode de càlcul de la funció mnp

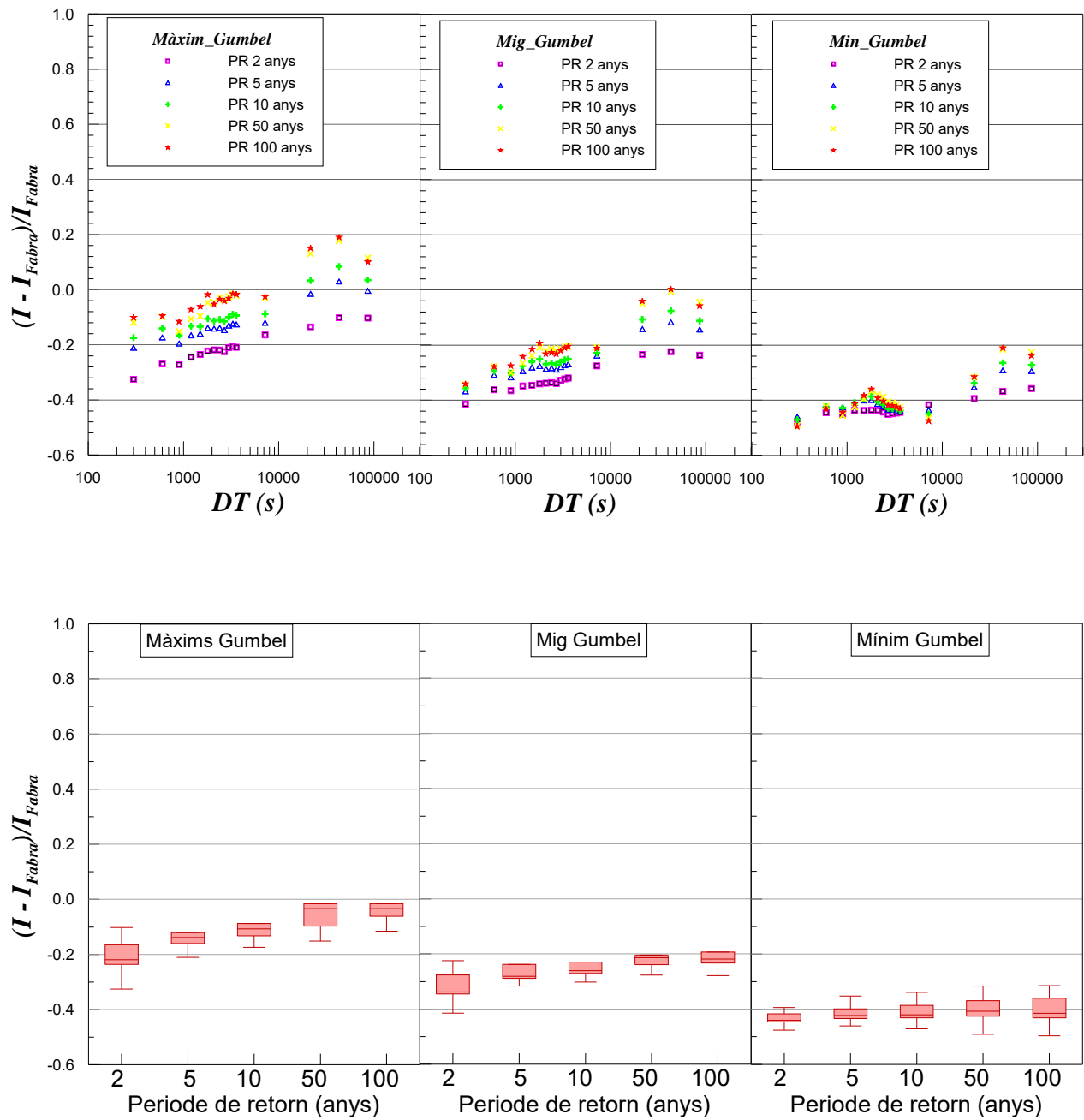


Figura 1-27 Comparativa de resultats de les corbes IDF de Màxim, de Mitjanes i de Mínims per tots els pluviòmetres de la xarxa i pel mètode de càlcul de Gumbel

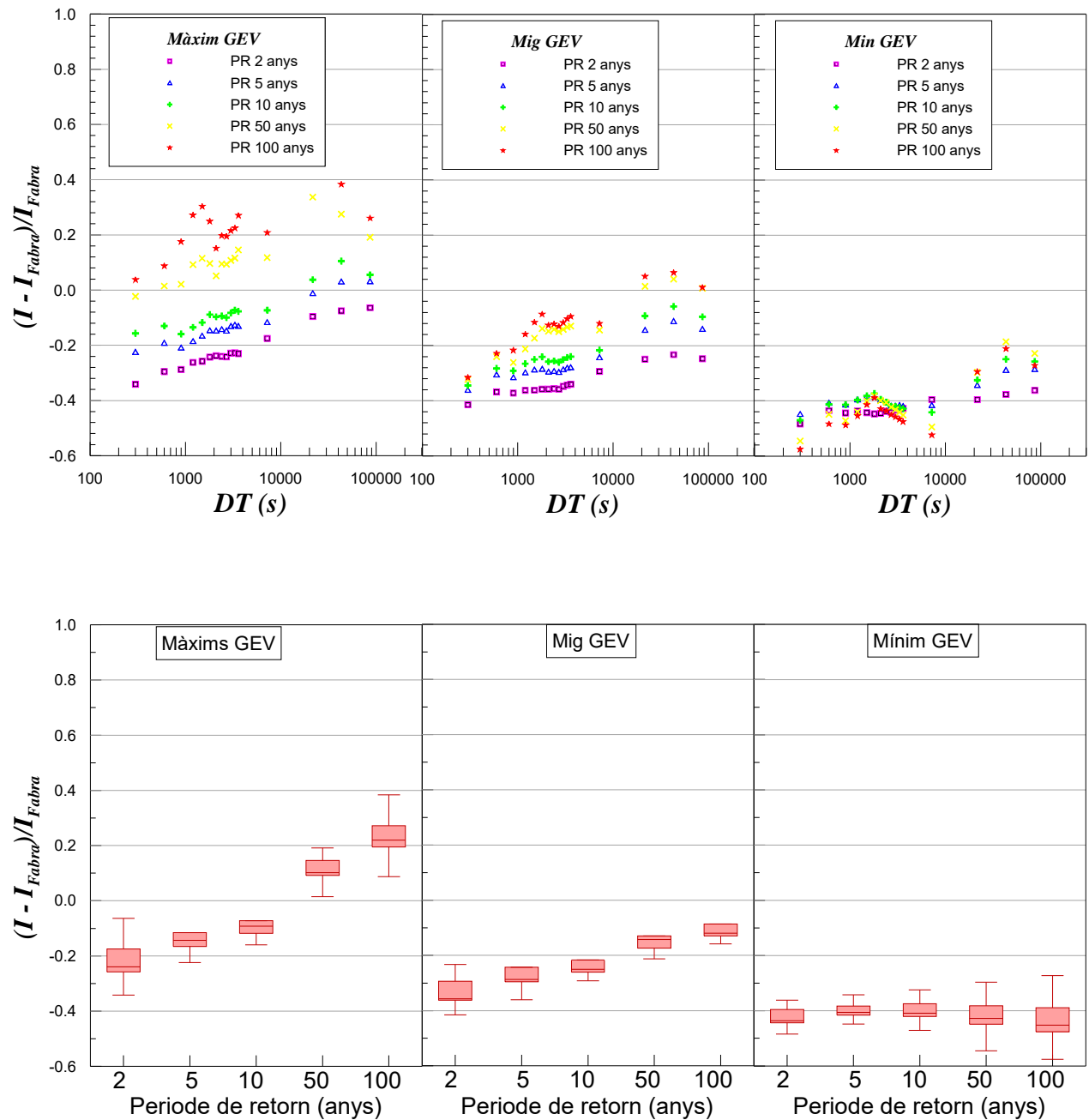


Figura 1-28 Comparativa de resultats de les corbes IDF de Màxim, de Mitjanes i de Mínims per tots els pluviòmetres de la xarxa i pel mètode de càlcul de la GEV

1.9. Conclusions

Tenint present que les corbes IDF s'utilitzen principalment com una eina de prevenció de riscos deguts a xàfecs extrems, i després de mostrar aquesta comparativa i reconeixen el pes climàtic dels resultats obtinguts per (Casas, 2005) proposem com a corbes IDF per la zona metropolitana de Barcelona les que hem obtingut amb el mètode de la funció empírica de tres paràmetres mnp i amb el criteri de màxim valor a tots els pluviòmetres: Figura 1-15 i

V(mm)										
Dt				Període de Retorn (anys)						
(s)	(min)	(hores)	(dies)	1	2	5	10	20	50	100
300	5			8.2	10.3	14.5	18.2	22.1	27.5	31.9
600	10			14.2	17.4	22.8	27.1	31.6	37.6	42.3
1200	20			21.9	27.6	36.3	44.0	52.0	62.9	71.4
3600	60	1		33.0	42.0	57.0	70.3	84.3	103.8	119.2
7200	120	2		38.9	49.5	66.7	82.1	98.3	120.9	138.7
	300	5		47.3	60.5	79.1	96.6	115.2	141.0	161.3
	720	12		56.3	70.5	93.8	116.7	141.8	177.2	205.5
	1440	24	1	63.8	81.6	116.5	151.2	190.5	248.6	296.4
	2880	48	2	72.7	91.8	123.7	155.8	190.7	240.3	280.1
		120	5	90.6	110.2	139.8	163.3	186.9	218.3	242.0
		240	10	109.3	127.4	155.9	181.1	205.6	237.3	261.0

Taula 1-17.

V(mm)										
Dt				Període de Retorn (anys)						
(s)	(min)	(hores)	(dies)	1	2	5	10	20	50	100
300	5			8.2	10.3	14.5	18.2	22.1	27.5	31.9
600	10			14.2	17.4	22.8	27.1	31.6	37.6	42.3
1200	20			21.9	27.6	36.3	44.0	52.0	62.9	71.4
3600	60	1		33.0	42.0	57.0	70.3	84.3	103.8	119.2
7200	120	2		38.9	49.5	66.7	82.1	98.3	120.9	138.7
	300	5		47.3	60.5	79.1	96.6	115.2	141.0	161.3
	720	12		56.3	70.5	93.8	116.7	141.8	177.2	205.5
	1440	24	1	63.8	81.6	116.5	151.2	190.5	248.6	296.4
	2880	48	2	72.7	91.8	123.7	155.8	190.7	240.3	280.1
		120	5	90.6	110.2	139.8	163.3	186.9	218.3	242.0
		240	10	109.3	127.4	155.9	181.1	205.6	237.3	261.0

Taula 1-17 Valors de les precipitacions, en mm, obtingudes a la xarxa urbana de Barcelona amb les que hem construït les corbes IDF de màxims (Figura 1-15)

2. Organització espacial de la pluja a la zona urbana de Barcelona

Organització [<https://www.encyclopedia.cat/>]: Acció d'organitzar

Organitzar: Donar (a una cosa) una estructura orgànica, fer-la apta per a funcionar. Arranjar, disposar convenientment.

Espacial [<https://www.encyclopedia.cat/>] Relatiu o pertanyent a l'espai.

Espai: del llatí. *spatium* (camp per a córrer) Medi que hom es representa en principi com a il·limitat, continu i tridimensional i com a continent de tots els objectes sensibles, dins el qual aquests poden canviar de posició. En termes de geometria, medi de referència indefinit de tres dimensions, l'estudi del qual és objecte de la geometria clàssica.

2.1. Introducció

L'estructura espacial (i temporal) de les pluges és molt variable, sobre tot en episodis de gran intensitat. Tenir coneixement d'aquestes distribucions espacials té gran importància per comprendre fenòmens climàtics teòrics (Niemczynowicz & Bengtsson, 1996) (Mikkelsen, et al., 2005) i, actuant en conseqüència, prendre decisions en aspectes quotidians del dia a dia de la població, com pot ser el dimensionat del clavegueram de la ciutat (Shah, et al., 1996) Aquests aspectes també han estat mencionats al capítol 1.

Poder disposar de les dades de la xarxa pluviomètrica densa ($\approx 0.2^{pluv}/km^2$) ens permetrà obtenir resultats, referents a l'estructura de les pluges, de bona qualitat científica, ja que disposem de dades des de 1994 fins el 2019 i de gran excepcionalitat ja que no existeixen gaires xarxes pluviomètriques comparables (elevat cost dels aparells i gran cost de manteniment) La longitud de les sèries de dades, 26 anys, comença a ser significativa en estudis climàtics. Haurem de determinar com d'independents i significatives són les informacions proporcionades per la xarxa per no sobrevalorar algunes d'aquestes informacions. Aquests estudis ens portaran a determinar el nombre d'estacions independents equivalent a la xarxa, estudi que farem utilitzant el mètode de components principals (NRC, 1988)

Un altre aspecte que hem de tenir present en els estudis d'estructura de les pluges és el factor de reducció areal (ARF; *areal reduction factor*) Aquest és un factor que ens permet estendre la precipitació recollida en un punt a tota una zona (Svensson & Jones, 2010) Hem utilitzat el mètode de "pluja centrada" (Omolayo, 1993) per estimar empíricament els ARF de l'àrea metropolitana de Barcelona i hem fet els càlculs per una xarxa regular, de pas 300 m, que es superposa suficientment a la regió urbana de Barcelona. Estudiarem diferents duracions de les pluges, des de 5 minuts fins a 10 dies, en intervals logarítmics pels increments temporals.

2.2. Estudi de la correlació espacial entre els pluviòmetres de la xarxa i el nombre equivalent d'estacions independents

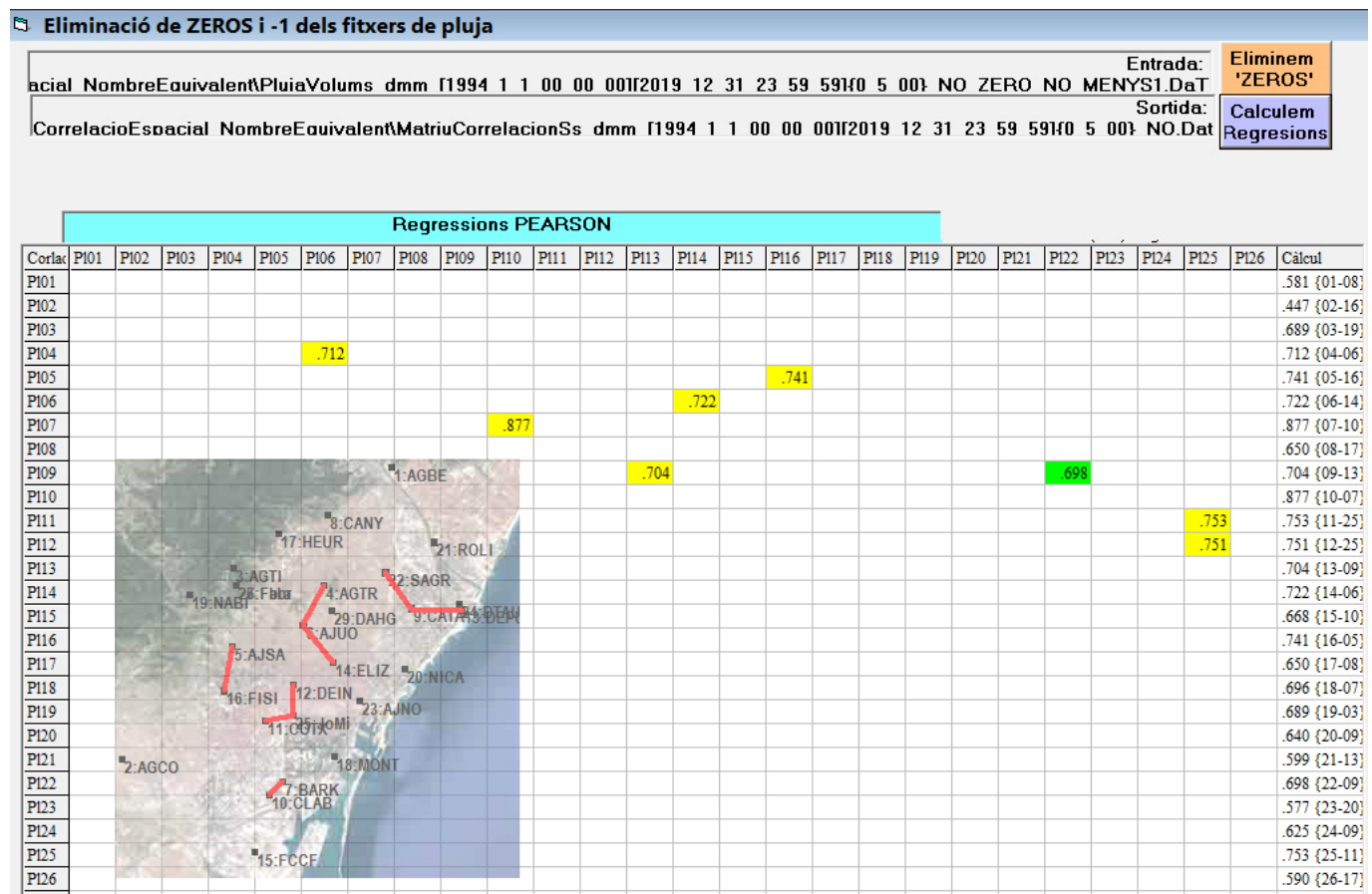
En utilitzar les dades dels pluviòmetres de la xarxa per fer les anàlisis corresponents i en particular en estudis espacials, ens surgeix una pregunta, a la qual intentarem donar resposta: són independents les dades proporcionades per tots els pluviòmetres i per tant totes aquestes dades proporcionen informacions rellevants? La idoneïtat de la pregunta queda de manifest per exemple si consideréssim dos pluviòmetres que estiguin un a costat de l'altre (o idèntics) Sembla evident que tindriem les mateixes dades a les dues estacions i aquestes estarien correlacionades (mesurant aquesta correlació amb el coeficient de correlació de Pearson) de manera que només es podria prendre una de les dues sèries com a portadora d'informació rellevant no redundant. Seguint aquest raonament entendrem que si tenim dos estacions molt allunyades tindrem dues sèries de dades totalment no correlacionades a priori (i per tant independents) i totes dues sèries de dades aportaran informacions rellevants sobre la pluja, clar està si realment fan referència a la mateixa pluja. Després d'aquest raonament, tornen a sorgir com a mínim dues preguntes més: a partir de quina distància entre pluviòmetres es pot considerar que les seves dades són independents; fins i tot aquesta dependència o independència estarà relacionada amb la distància entre estacions? I per quin valor de la correlació podem dir que les dades dels pluviòmetres ens aporten informacions rellevants; i, podrem modular aquesta rellevància segons el valor de les pròpies correlacions?

Per donar resposta a aquestes qüestions i estudiar la rellevància i significació de les dades experimentals, utilitzarem el mètode estadístic d'Anàlisi de Components Principals (PCA) utilitzat abastament als estudis atmosfèrics (Lorenz, 1956) que inicialment es va anomenar com la tècnica de Funcions Ortogonals Empíriques (EOF). Aquestes tècniques que s'engloben dins del marc de l'anàlisi multivariant també són utilitzades en camps de diferents disciplines tant científiques com socials, com ara la docència (Lopez & Gutierrez, 2019) o la sociologia (Riba & Satorra, 2000)

Per estudiar la correlació entre les dades d'intensitat (o del volum recollit pels pluviòmetres) de les precipitacions registrades per la xarxa urbana, (Rodríguez, et al., 2013) aplicarem primerament, tal com hem comentat, un PCA prenent com a variables a analitzar les quantitats de precipitació registrades per les estacions durant els 26 anys (1994-2019) dels que tenim informacions. L'objectiu de les tècniques PCA és reduir el nombre de variables (els pluviòmetres en el nostre cas) de forma que mantinguem una bona significació dels resultats, prenent combinacions lineals de variables tan independents com sigui possible. La clau per fer aquests ajustos són les matrius de correlacions entre les dades de les diferents estacions pluviomètriques de la xarxa.

2.2.1. Anàlisi prèvia de les dades i dels primers resultats de correlacions

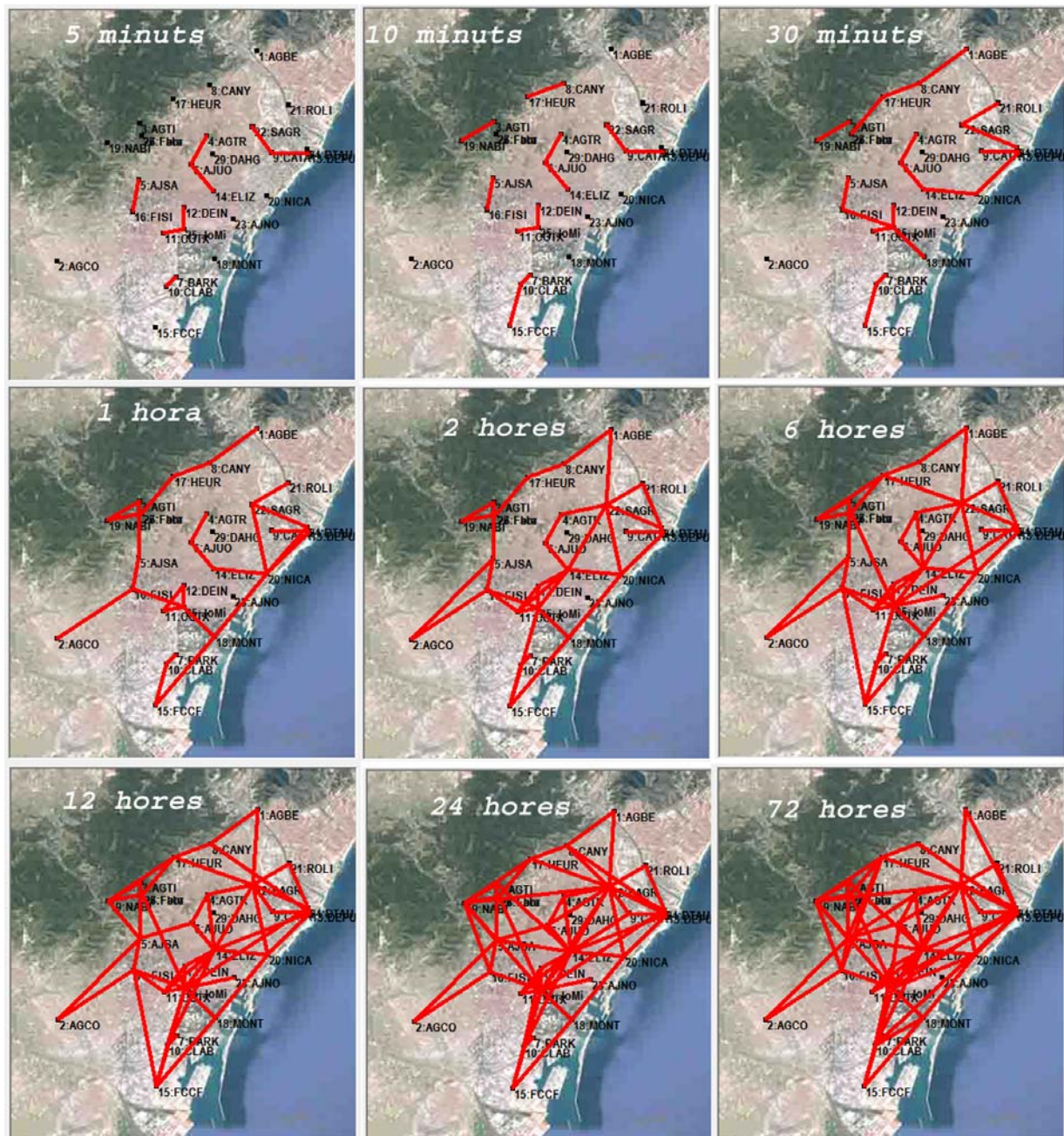
Ja que l'estudi de components principals està basat en les correlacions de Pearson de les dades entre pluviòmetres, hem fet una primera representació gràfica de com les correlacions poden establir relacions d'unió entre les estacions. A la Imatge 2-1 es mostra una sortida gràfica del programari utilitzat per fer l'estudi de les correlacions. A la graella de sortida es mostren únicament els valors de les correlacions màximes que superen un determinat valor límit prefixat, 0.7 a la Imatge 2-1, i els destaquem amb color groc. També suposem que dos estacions estan lligades si superen una correlació que estigui per sobre del 95% d'aquest valor màxim i la destaquem de color verd. Per exemple, si ens fixem en la fila associada al pluviòmetre 9 (PL09) tenim que la correlació màxima es dona per la parella d'estacions 9/13 amb un valor de la mateixa de 0.704 (>0.7) i també supera el 97% d'aquest valor (0.6688) la parella 9/22. A la resta de parelles d'estacions no es supera el límit mínim (0.7) fet que es pot apreciar a la columna "Càlcul" on mostrem el valor màxim de les correlacions de l'estació i amb la resta de pluviòmetres.



Imatge 2-1 Programari utilitzat per estudiar les correlacions de Pearson entre les dades dels pluviòmetres. Donem com pluviòmetres "units" aquells que superin un límit prefixat en el valor de la correlació, així com aquells valors que estiguin per sobre del 97% del valor de la correlació màxima.

Tenim representacions des de durades de la pluja de 5 minuts fins a 72 hores. A la Imatge 2-2 es mostren aquestes unions, representades per línies vermelles entre els pluviòmetres, per algunes

durades de la precipitació. Per valors petits de la duració de la pluja, 5 i 10 minuts, tenim que les unions entre estacions només es donen per localitzacions properes i com a màxim en conjunts de tres pluviòmetres, el què posa de manifest la irregularitat (i independència) de la pluja fins i tot en àrees petites. Dels 30 minuts fins les dues hores, veiem que apareix un estructura d'unions pràcticament paral·leles a la costa, una situada a la pròpia costa i l'altre a la part de muntanya. Com era d'esperar, així que el temps de les pluges augmenta, 6, 12, 24 i 72 hores, els pluviòmetres estan relacionats tots amb tots, indicant que en realitat les dades agrupades temporalment tendeixen a ser un únic conjunt de dades independents.



Imatge 2-2 Unions primàries entre pluviòmetres segons els valors de les correlacions entre ells. Les línies vermelles entre dos pluviòmetres indiquen que la correlació entre les dades supera un valor Límit preestablert. El valor límit d'aquesta figura és de 0.7

El nombre de dades de precipitació analitzades varia des de les 2758 per la durada de 5 minuts fins les 77 per a la durada de 10 dies, Figura 2-1. Es pot apreciar un decaïment constant a partir de mitja hora, el què podem interpretar com que realment no hi ha gaires pluges amb estructura espacial diferent, per duracions superiors a algunes hores.

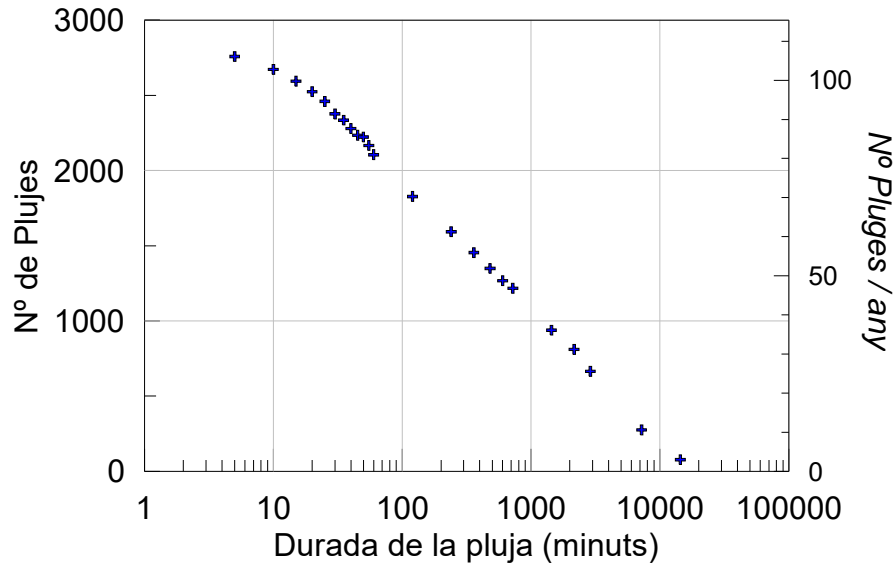


Figura 2-1 Número de pluges per les diferents duracions estudiades per fer les anàlisis PCA.

Les dades van ser seleccionades per tal d'obtenir mostres independents. Per exemple, les dades corresponents a M minuts que es van seleccionar estaven separades entre elles per intervals sense precipitació d'almenys M minuts. La Figura 2-2 mostra el coeficient mitjà de correlació entre pluviòmetres $\langle \text{correlacions} \rangle_{ij}$ calculat per a durades des de 5 minuts fins a 15 dies per diferents Límits (0; 0.7; 0.9 i 1) pel propi coeficient, des del límit 0, on es consideraran totes les correlacions fins el límit 1, on només considerarem els valor màxims de les correlacions. Aquests valors resultant ser tots superiors a 0.7 per a durades de més de 2 hores.

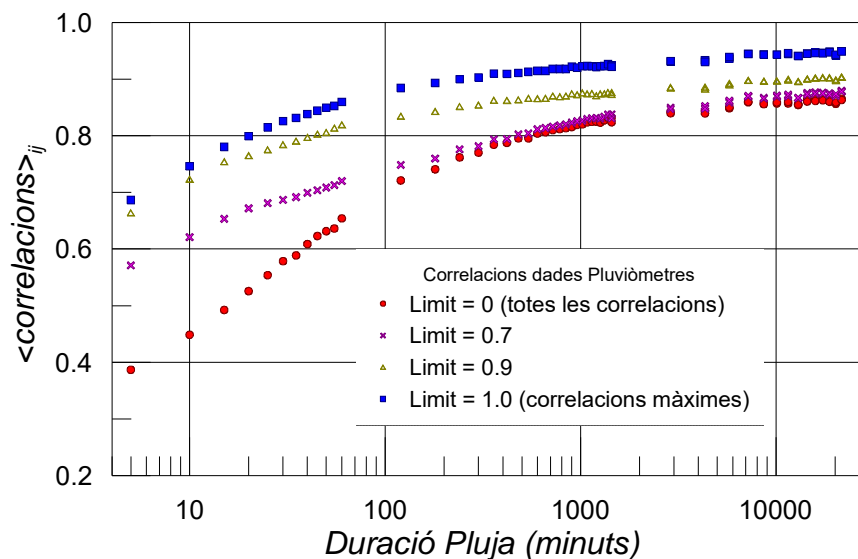


Figura 2-2 Coeficient de correlació entre les dades dels pluviòmetres i i j , per cada durada

2.2.2. Anàlisi factorial de components principals (PCA)

Fonamentalment un PCA redueix les dades d'un gran nombre de variables a un nou conjunt de dades que conté menys variables. Aquest conjunt de noves variables són una combinació lineal de les variables originals i aquesta combinació es tria per tal de representar, tan com sigui possible, la màxima variabilitat i independència de les variables originals. En el nostre cas tindrem un vector K -dimensional de dades (camp vectorial)

$$\vec{x}(t_i) = (x_1(t_i), x_2(t_i), \dots, x_K(t_i)) \quad (2.1)$$

on $x_k(t_i)$ representa el volum de la precipitació recollida pel pluviòmetre k a l'instant t_i . Amb la PCA construïm un nou vector M -dimensional

$$\vec{u}(t_i) = (u_1(t_i), u_2(t_i), \dots, u_M(t_i)) \quad (2.2)$$

amb

$$u_m(t_i) = \sum_{k=1}^K e_{km} x_k(t_i) \quad (2.3)$$

on e_{km} són les components dels diferents vectors propis \vec{e}_k de la matriu de correlacions $[C]$ entre les diferents dades dels pluviòmetres. Ja que l'obtenció de vectors propis d'una matriu no fixa el mòdul dels vectors, nosaltres els triem de manera que siguin unitaris. Associats a aquests vectors propis, tenim els corresponents valors propis λ_k , que ordenarem de forma decreixent $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_K$. El primer vector propi \vec{e}_1 , associat al valor propi més gran de tots (λ_1), apunta en la direcció, de l'espai K -dimensional de les dades, en què aquestes presenten la màxima variabilitat. El segon vector propi \vec{e}_2 a part de ser ortogonal a la resta de vectors propis i associat al segon valor propi (λ_2), apunta en la següent direcció on la variació de les dades és més forta. I així successivament amb la resta de vectors propis. En aquests context cada component principal (valor propi) representa una quota de la variació total, que anomenarem significació (S_j) de les dades originals

$$S_j = \frac{\lambda_j}{\sum_{m=1}^M \lambda_m} \times 100 \quad (2.4)$$

Si l'equació (2.3) representa "l'anàlisi" de les dades, la següent (2.5) representaria "la síntesi" de les mateixes

$$x_k(t_i) = \sum_{m=1}^M e_{mk} u_m(t_i) \quad (2.5)$$

En el cas que agafem $M = K$ aquesta síntesi ens porta a la reconstrucció total de les dades originals, però per tal de reduir el volum de dades que hem de tractar podem agafar $M < K$ limitant el valor de M amb la condició que la significació de les dades sigui superior a un valor prefixat. Tal com

ens diu la literatura (Hosking & Wallis, 1997) (Jolliffe, 2002) amb significacions entre el 70% i el 90% podem afirmar, raonablement, que la descripció dels fenòmens estudiats és suficient. Nosaltres hem fixat el límit per fer la síntesi en el valor mig d'aquests dos límits proposats, el 80%. A la Figura 2-3 es representen la significació S_i dels valors propis associats a les matrius de correlacions per valors de la duració de la pluja des de 5 minuts fins 120 hores.

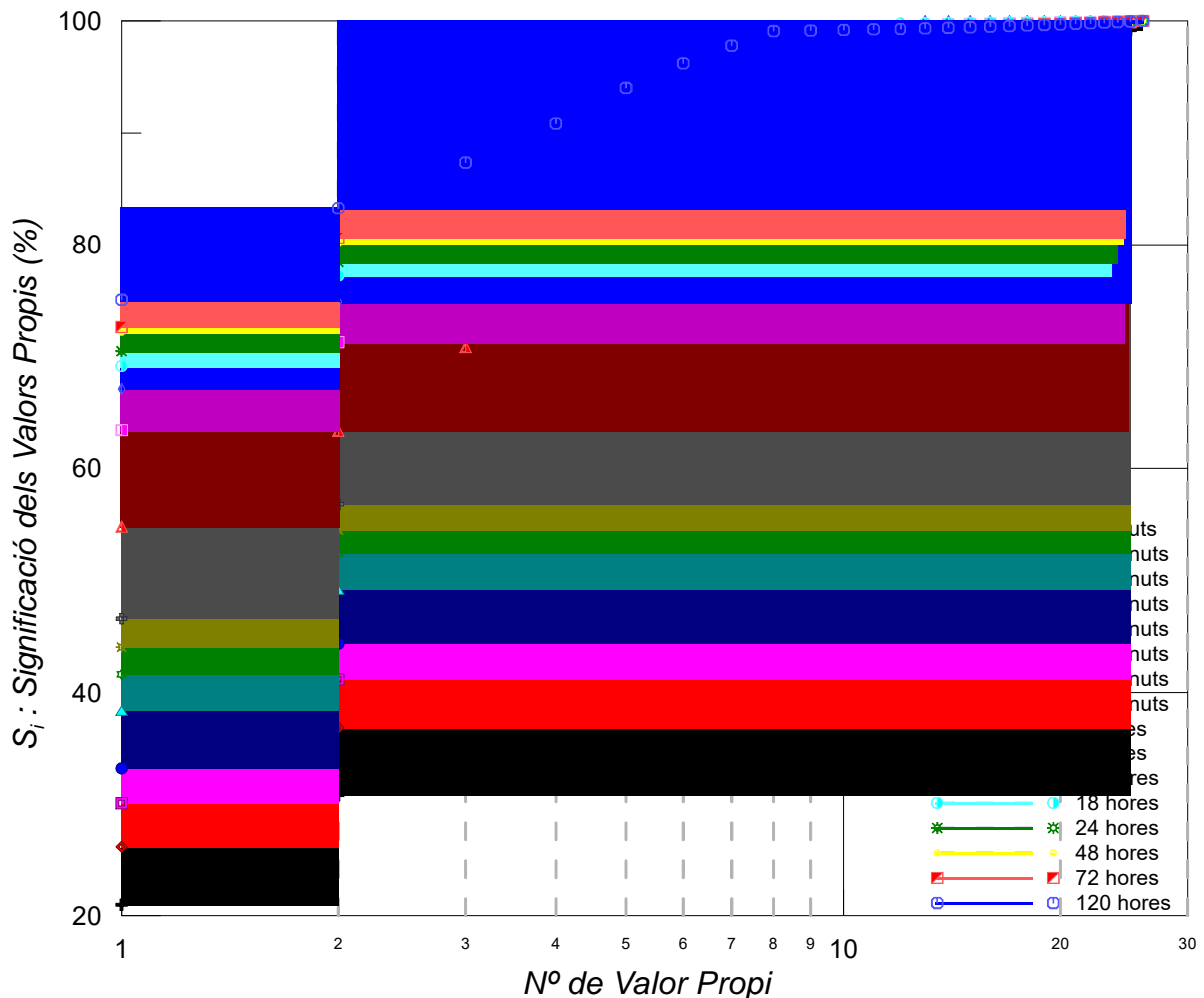


Figura 2-3 Significacions dels valors propis de la matriu de correlacions per diferents temps de duracions de les pluges

Per la més petita de les durades de pluja, 5 minuts, per superar el 80% de significació hem d'agafar 15 termes dels 26 possibles. Interpretem que podem formar fins a 15 sèries de dades independents, que no hem de confondre amb que tenim 15 pluviòmetres que proporcionen informacions independents. A la pluja de 60 minuts, per exemple, superem el límit del 80% amb 7 termes. Aquest comportament, respecte de les pluges de curta durada (*més durada* → *menys termes*) era l'esperat, ja que quan estudiem pluges més llargues les dades han de ser més i més homogènies entre elles. Per pluges més llargues, a partir de 2 hores, es supera el límit amb cinc o menys termes. També es pot veure que per l'estudi de les pluges molt llargues, 48 i 72 hores, no es veu cap

diferència entre les significacions. Aquest comportament també és esperable, ja que en realitat no tenim una diferenciació clara entre pluges d'aquestes durades i l'esperable seria obtenir dades molt semblants entre elles. Podem completar aquesta anàlisi amb la definició del nº de components que calen per superar per primera vegada un determinat percentatge P acumulat de significació: N_P . Representem els valors N_{70} , N_{80} i N_{90} per les diferents durades de les pluges a la Figura 2-4

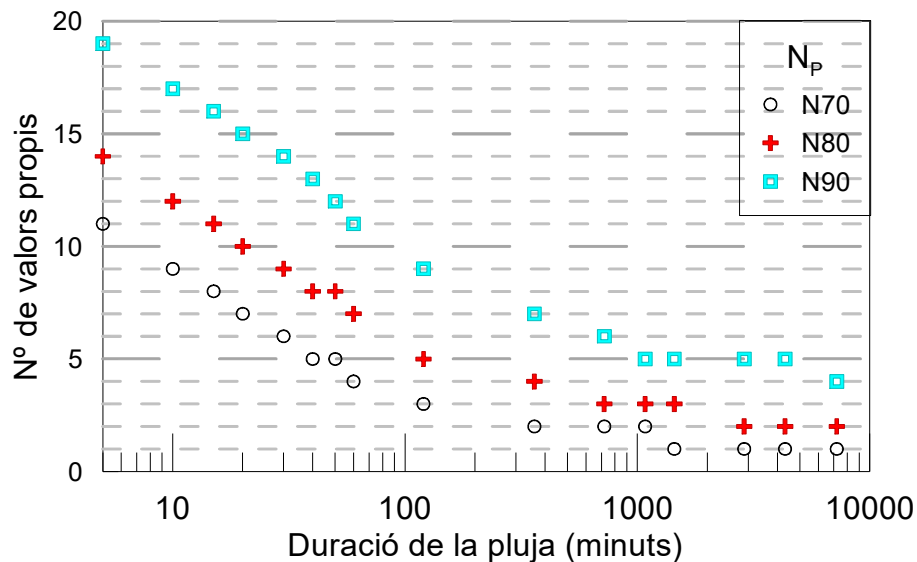


Figura 2-4 Representació del nombre de termes mínim per superar un límit de significació prefixat: N_P

Ja que cada una de les components dels vectors propis està associada a cada una de les estacions meteorològiques, podem associar a la localització de les mateixes els valors de les components dels vectors propis i ja que cada vector està associat al seu valor propi i per tant a una determinada significació de les dades, podem representar en el mapa dels pluviòmetres les components dels vectors per una determinada significació o per la seva acumulació fins el límit prefixat (N_{80} : 80%) d'on obtindrem un mapa de similituds entre estacions pluviomètriques per cada duració de les pluges. Per obtenir el vector acumulat fins el límit N_{80} , primerament sumarem els vectors propis amb els pesos de les seves significacions (2.6) i després el normalitzarem a la unitat (2.7)

$$\vec{v}_{N80} = S_1 \vec{v}_1 + S_2 \vec{v}_2 + \dots + S_{N80} \vec{v}_{N80} \quad (2.6)$$

$$1 = \sqrt{\sum_{i=1}^K v_{N80,i}^2} \quad (2.7)$$

A la Imatge 2-3 representem els sis primers vectors propis associats als pluviòmetres, per pluges de 15 minuts de duració. Aquests sis termes sumats, representen el 65% de la informació de les pluges. La suma ponderada fins al N_{80} i re-normalitzada, la representem a la Imatge 2-4 c.

A la primera component principal (Imatge 2-3 a) on representem el 30% de significació, podem veure que els pluviòmetres estan agrupats en “zones el·líptiques i concèntriques” que acaben ocupant tot el mapa. Si analitzéssim únicament aquesta component, aquestes corones servirien per poder establir similituds entre estacions i poder-les agrupar. Segons això podem dir que tenim una zona central amb valors elevats de les components del primer vector propi (superior a 0.25) situada a la zona central de l'eixample de Barcelona, on tenim dos pluviòmetres, 6: AJUO i 14: ELIZ. La segona zona, una corona al voltant d'aquest nucli central (amb valors d'entre 0.2 i 0.25) engloba pràcticament tota la resta de l'eixample amb 11 pluviòmetres al seu interior 4: AGTR, 5: AJSA, 7: BARK, 8: MONT, 9: CATA, 11: COTX, 12: DEIN, 16: FISI, 20: NICA, 22: SAGR i 25: JoMi. A la tercera corona (amb valors d'entre 0.15 i 0.20) la zona Nord, amb la serra de Collserola, la zona del Bessos, la part central del port amb Montjuic i bona part dels barris de Sans i Les Corts, on tanquem la corona. A aquesta zona en trobem 6 estacions, 3: AGTI, 10: CLAB, 13: DEPU, 17: HEUR, 19: NABI i 26: Fabr. A la més exterior de les zones (amb valors de les components del vector inferiors a 0.15) tenim els pluviòmetres perifèrics de la xarxa, 1: AGBE, 2: AGCO, 15: FCCF, 21: ROLI i 24: DTAU.

Per la segona de les components (Imatge 2-3 b) representant un 11% de la informació, observem una figura amb una tipologia que ens pot fer recordar a una “cònica paraboloides” amb uns hipotètics focus, un a Montjuic, amb valors positius, i l'altre per Nou Barris i Sant Andreu, amb valors negatius. A la imatge es poden apreciar unes zones amb valors negatius a la part superior de la mateixa que podríem catalogar com franges Mar-Muntanya. A la part inferior de la imatge les franges anirien de Mar cap a la conca del Llobregat.

A la tercera component (Imatge 2-3 c) amb un 9% de significació, tenim una mena de rotació recta de l'anterior figura. Tenim franges entre verticals i paral·leles a la costa, on el gradient de valors va de Mar (-0.2) a Muntanya (+0.3)

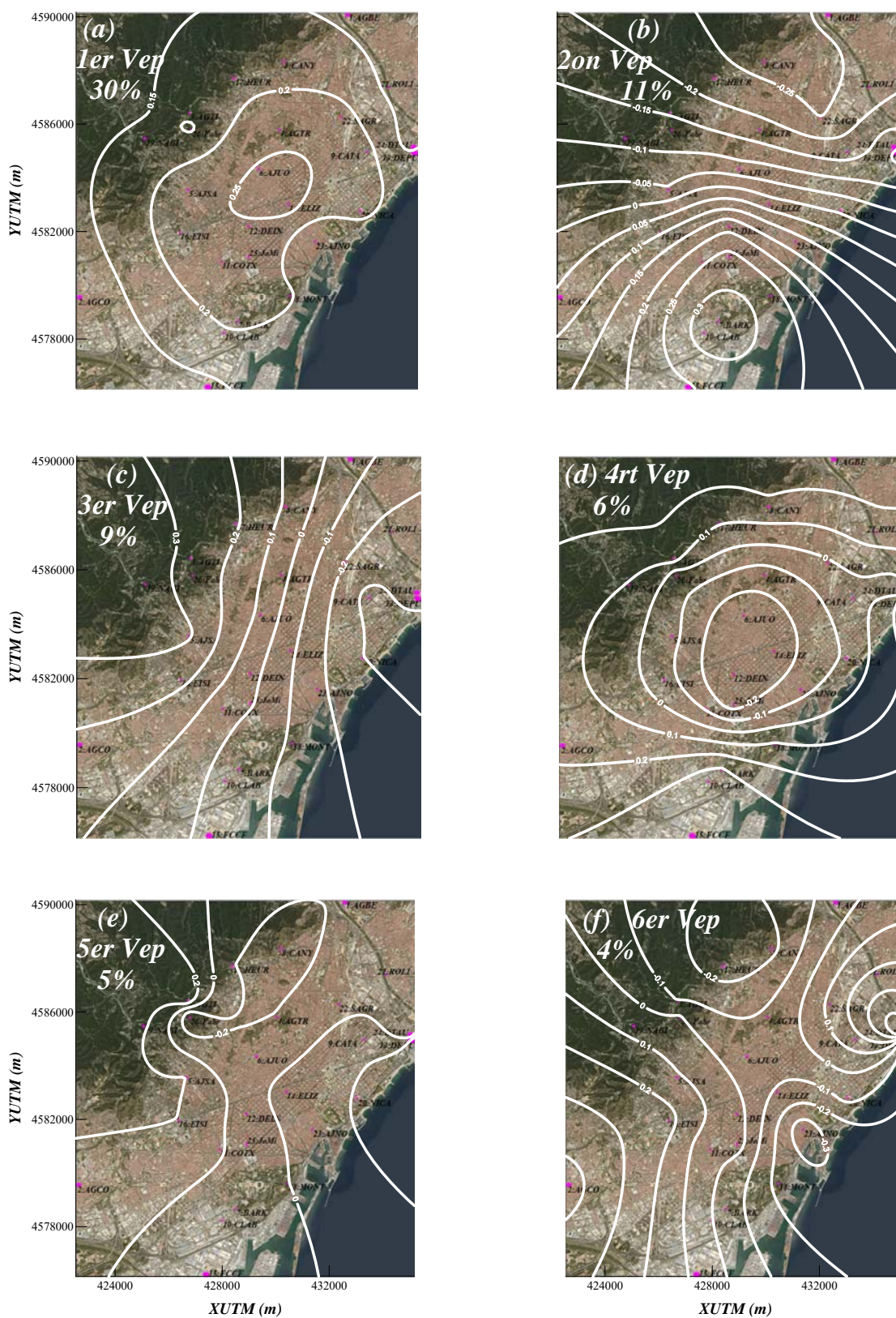
La quarta component (Imatge 2-3 d) representa un 6% d'informació, i torna a mostrar un comportament concèntric, com a la primera component, però ara lleugerament més circular i amb valors negatius al centre i positius cap a l'exterior.

Amb la cinquena component (Imatge 2-3 e) representem el 5% de la significació, i veiem l'aparició d'una estructura tancada cap a zona Nord del mapa i la resta de franges es podrien catalogar, amb una certa bona voluntat, com a paral·leles a la costa.

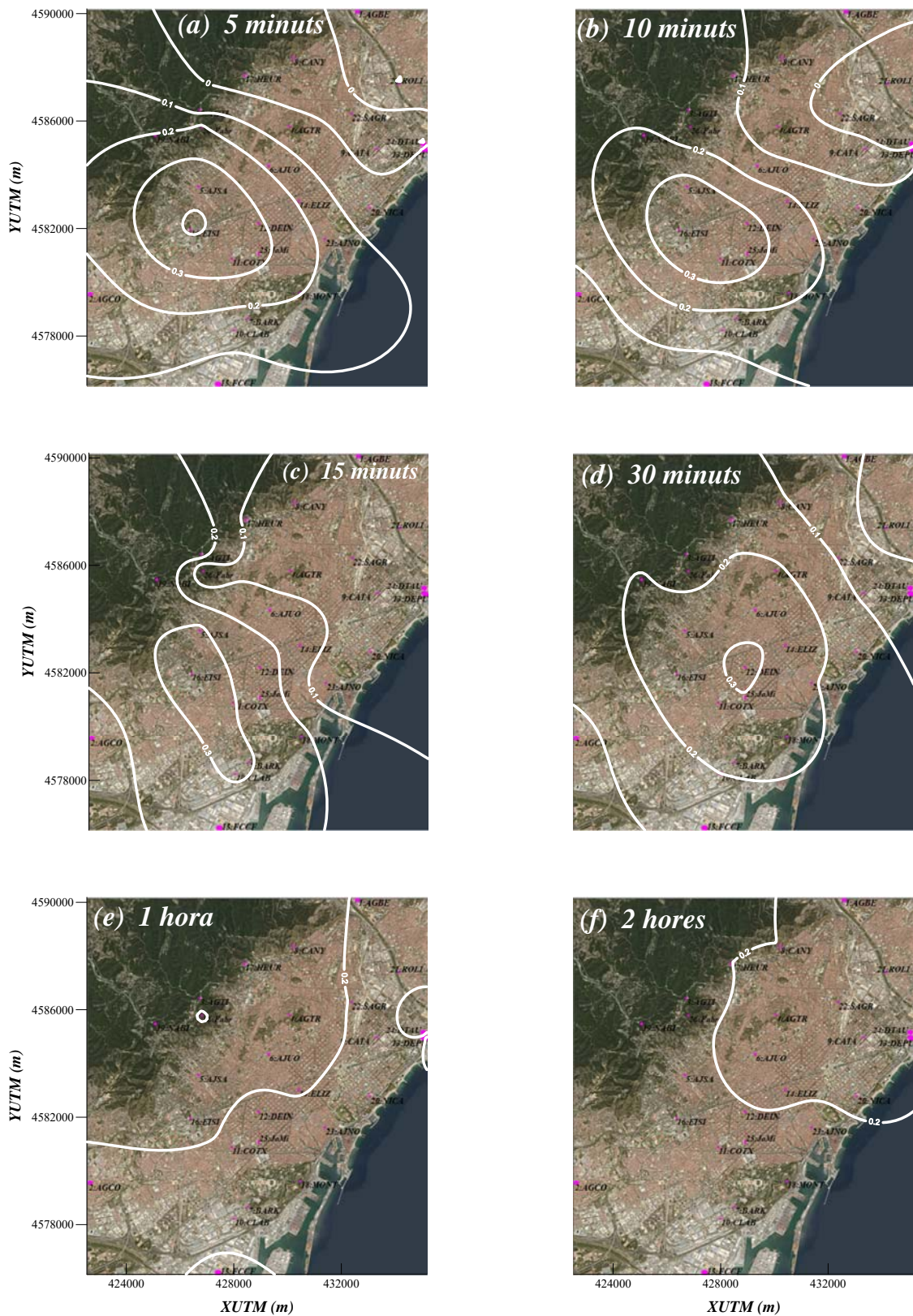
La sisena component (Imatge 2-3 f) representa el 4% de la significació, veiem clarament l'aparició de tres estructures tancades a la perifèria del mapa. Una al Nord (Horta-Guinardó / Nou Barris) un altre cap al Nord_Est (Sant Martí) i la tercera a l'Est (Ciutat Vella) També s'intueix una quarta

estructura, al Sud-Oest, que es tancaria fora dels límits del mapa (possiblement al Prat de Llobregat) Entre aquestes quatre zones es poden veure com unes branques “còniques” amb un centre cap al centre de la imatge (Gràcia / Sagrada Família)

A la Imatge 2-4 mostrem els resultats dels vectors propis ponderats per 5, 10, 15, 30 minuts i 1 i 2 hores. A les durades de fins a 30 minuts (Imatge 2-4 a, b, c i d) podem veure zones tancades aproximadament al centre del mapa, envoltades per zones amb la geometria Mar-Muntanya. Per una i dues hores ja no tenim zones tancades i podem apreciar l'aparició de dos grans zones. Per una hora (Imatge 2-4 e) hi ha una distribució al voltant de la Diagonal barcelonina, fent una divisió Nord-Oest vs Sud-Oest. (mar vs muntanya) Per dues hores (Imatge 2-4 f) la frontera de les zones es situa, aproximadament al Passeig de Gràcia trencant al Nord cap el Nord, de forma que tenim dues zones Nord-Est vs Sud-Oest (amb la serra de Collserola)



Imatge 2-3 Representació de les sis primeres components principals per les pluges de 15 minuts de duració.



Imatge 2-4 Representació de les components principals ponderades fins al 80% i normalitzades per les pluges de curta i mitja durada.

A la Imatge 2-5 mostrem les dades per les durades llargues de les pluges. Una bona ajuda per la explicació d'aquests resultats ens la proporciona la Taula 2-1, on podem veure que per llargues durades les components del vector ponderat fins al N_{80} redueixen la seva desviació estàndard respecte de les pluges de més curta durada i la mitjana s'acosta a la component mitjana que tindria un hipotètic vector unitari de 26 components iguals

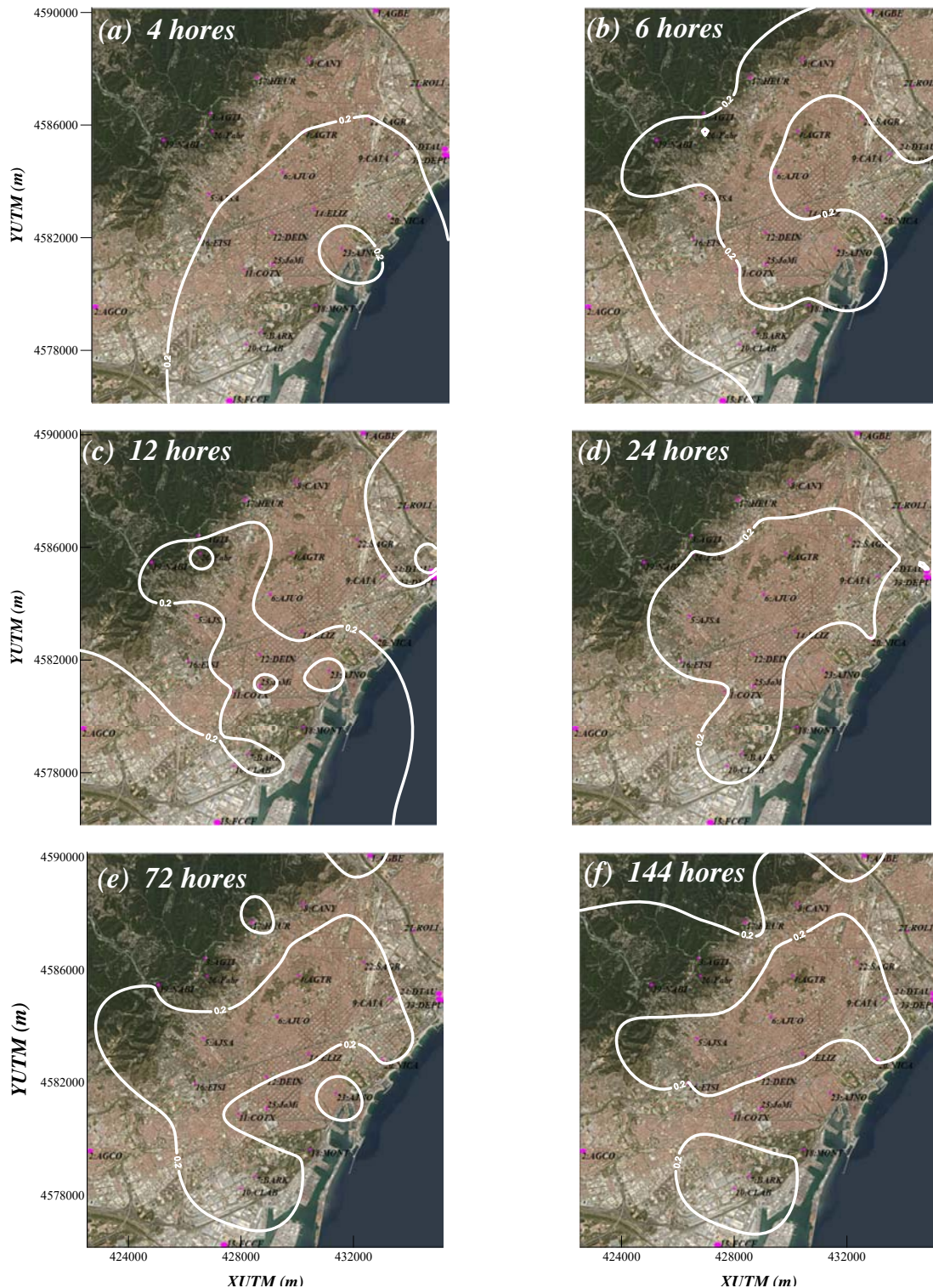
$$\left(1 = \sqrt{\sum_{i=1}^{26} v_i^2} = v_i \sqrt{26} \Rightarrow v_i = 0.196 \right)$$

Aquesta homogeneïtzació de resultats fa que petites variacions de les dades donin lloc a zones aleatòries.

Duració Pluja	$\langle v_{N80,i} \rangle$	$\sigma_{v_{N80i}}$
5 minuts	0.14	0.14
30 minuts	0.17	0.10
1 hora	0.18	0.07
4 hores	0.19	0.04
6 hores	0.19	0.04
12 hores	0.19	0.03
24 hores	0.19	0.03
72 hores	0.19	0.02
144 hores	0.19	0.02

Taula 2-1 Mitjana i desviació estàndard de les components del vector ponderat fins la significació N_{80} dels vectors propis.

Per quatre hores retrobem la distribució Nord-Oest vs Sud-Est amb una subestructura tancada a la zona nord del port de la ciutat. Per 6 i 12 hores queda de manifest la estructura caòtica de les zones i per les durades més llargues si que podem veure com la zona tancada central s'expandeix de forma que vulgui englobar a tants pluviòmetres com sigui possible, només deixant fora de la mateixa zona les estacions de la perifèria de la xarxa.



Imatge 2-5 Representació de les components principals ponderades fins al 80% i normalitzades per les pluges de llarga durada

El següent pas en l'anàlisi de la correlació espacial entre les estacions de la xarxa és la determinació del nombre mínim de pluviòmetres necessaris per caracteritzar correctament el règim d'intensitats de pluja sobre l'àrea urbana de Barcelona. El mètode de *l'any-estació* per anàlisi regional assumeix

l'equivalència entre els registres a partir d' n pluviòmetres situats en una regió climatològicament homogènia durant d anys i aquells enregistrats per un sol pluviòmetre en el mateix lloc formant una sèrie de longitud $n \times d$ (NRC, 1988) Aquesta tècnica és útil per obtenir una distribució de freqüències per tal d'estimar correctament la probabilitat futura de que tingui lloc una pluja intensa en la zona on es troben les estacions. Aquesta anàlisi regional assumeix que les dades de diferents estacions són estadísticament independents. No obstant això, el més habitual és tenir registres a les diferents estacions d'una precipitació causada pel mateix fenomen meteorològic, i per tant les observacions en diferents estacions no són totalment independents, tal com hem vist, i s'hauria de tenir present les diferents correlacions en funció de la proximitat entre les estacions. Si no es considera aquesta correlació, el fet d'afegir registres provinents de diferents pluviòmetres com si fossin un registre més llarg provinent d'un de sol podria resultar en una sobreestimació dels períodes de retorn dels episodis de pluja, encara que la inclusió eventual de més valors extrems podria compensar en part aquest efecte. Per tenir en compte l'efecte de la dependència espacial entre estacions, es pot calcular el nombre equivalent d'estacions independents n_{eq} en funció de la correlació entre estacions (Nandakumar, et al., 2000) i així el nombre efectiu d'anys-estació $n \times d$ pot ser reduït a un nombre menor $n_{eq} \times d$. El nombre efectiu d'estacions independents n_{eq} equivalent a la xarxa urbana es calcula utilitzant l'expressió (2.8), derivada d'un mètode desenvolupat per estimar graus de llibertat espacials dels fluxos atmosfèrics (Fraedrich, et al., 1995) (Bretherton, et al., 1999) Aquest mètode estadístic compara la variància de la distribució chi-quadrada estandarditzada teòrica amb la suma dels quadrats dels valors propis d'una matriu de correlació espacial i es dedueix

$$n_{eq} = \frac{n^2}{\sum_{i,j=1}^n \rho_{ij}^2} \quad (2.8)$$

A l'equació (2.8) n és el nombre de pluviòmetres i ρ_{ij} és el coeficient de correlació de Pearson entre les estacions i i j . Es pot veure que si totes les estacions estiguessin no correlacionades $\rho_{ij} = 0$ per $i \neq j$ i evidentment $\rho_{kk} = 1$ tindriem $n_{eq} = \frac{n^2}{n} = n$ i si les estacions estiguessin totes totalment correlacionades $\rho_{ij} = 1$ tindriem $n_{eq} = \frac{n^2}{n^2} = 1$

Aquest estimador es va formular per sèries de dades amb distribució normal, independents, i constituint una mostra gran. El conjunt de dades de la xarxa es pot considerar com una gran mostra d'observacions independents, però no està distribuït normalment com en moltes aplicacions geofísiques. Tot i això, (Bretherton, et al., 1999) van trobar que l'estimador (2.8) és un bon indicador del nombre de modes dominants en el sistema per observacions no distribuïdes normalment. Quan el nombre d'observacions d'un camp no és prou gran, la substitució de la

mitjana poblacional per la mitjana aritmètica de la mostra finita d'observacions pot donar lloc a errors en el càlcul dels valors propis. Usant la regla general de (North, et al., 1982) per a calcular l'error típic dels valors propis d'una matriu de correlació determinada a partir d'un conjunt limitat d'observacions, (Wang & Shen, 1999) van derivar una fórmula (2.9) per a la pertorbació dels graus de llibertat útil per estimar l'error de n_{eq} :

$$\Delta n_{eq} = 2 n_{eq} \sqrt{\frac{2}{M}} \quad (2.9)$$

on M és el nombre d'esdeveniments independents de pluja. El valor mitjà del coeficient de correlació de Pearson entre els registres dels 25 pluviòmetres de la xarxa urbana de Barcelona en el període 1994-2019 va resultar superior a 0.7 per a durades de més de 6 hores. La Figura 2-5 mostra els valors d' n_{eq} obtinguts utilitzant (2.8) per a cadascuna de les durades considerades, juntament amb els seus límits inferior i superior estimats amb (2.9) D'acord amb aquests valors, la xarxa urbana constituïda per 25 pluviòmetres correlacionats va resultar equivalent a un nombre de entre 5 i 3 pluviòmetres independents per a durades entre 10 i 30 minuts, i a menys de 2 pluviòmetres per a les durades més llargues de dues hores.

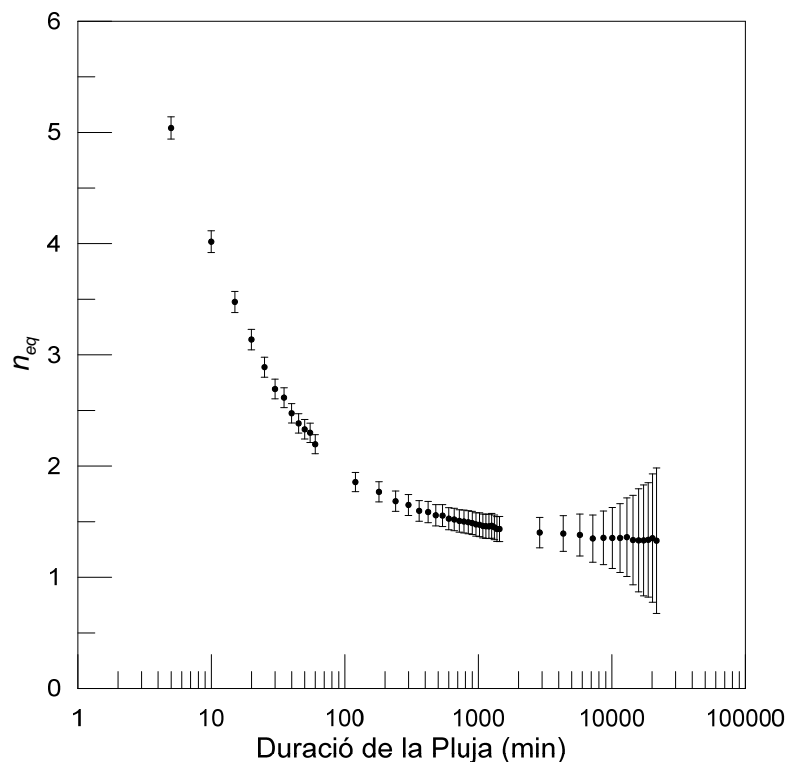


Figura 2-5 Nombre efectiu de pluviòmetres n_{eq} equivalent a la xarxa

Aquests resultats són consistents amb l'anàlisi de components principals realitzada. A la Figura 2-6 presentem la relació entre el nombre equivalent d'estacions independents de la xarxa i el

nombre de components principals que calen per superar una determinada significació de les dades. A aquestes relacions hem ajustat unes equacions quadràtiques $n_{eq} = A \cdot N_p^2 + B \cdot N_p + C$ i els valors dels coeficients dels ajustos (A , B i C) es mostren a la Taula 2-2 on es pot veure que els coeficients de correlació són prou bons per poder fer l'afirmació anterior de consistència de resultats.

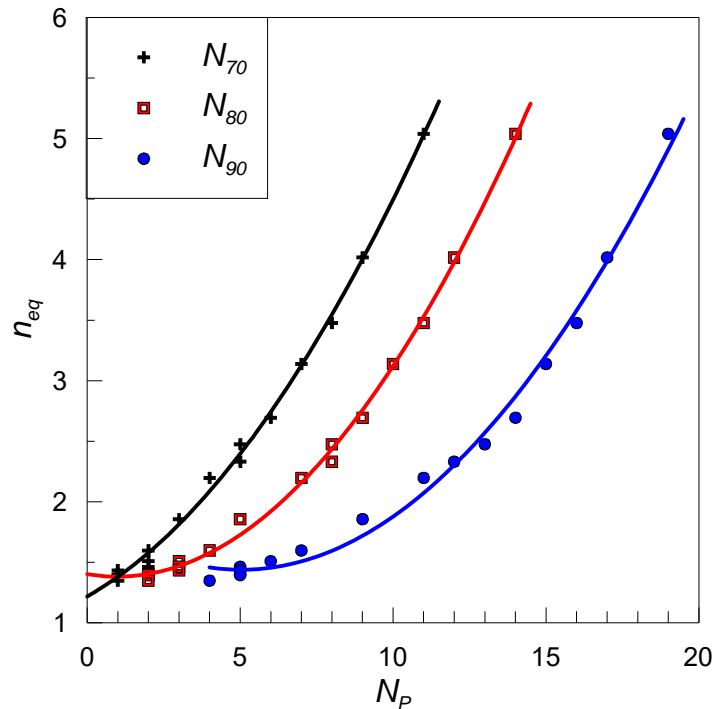


Figura 2-6 Relació entre el n_{eq} i el nombre de components principals que calen per superar el 70%, 80% i 90% de significació (N_{70} , N_{80} i N_{90}) de les dades dels pluviòmetres

N_p	A	B	C	Cof. Corr.
N_{70}	0.019 ± 0.08	0.14 ± 0.09	1.2 ± 0.1	0.997
N_{80}	0.021 ± 0.03	-0.04 ± 0.05	1.4 ± 0.2	0.997
N_{90}	0.018 ± 0.03	-0.18 ± 0.08	2 ± 1	0.993

Taula 2-2 Coeficients de l'ajust quadràtic de les dades representades a la Figura 2-6

2.3. Anàlisi espacial de la pluja a Barcelona

Per al càlcul de les quantitats de pluja areal a partir de les dades de precipitació registrades per la xarxa urbana, es va realitzar una anàlisi espacial objectiva. Utilitzant un mètode d'interpolació, es van generar camps de precipitació en una malla regular sobre l'àrea urbana de Barcelona amb una resolució espacial de 300×300 m. La interpolació (Barnes, 1994) es va fer per a tots els episodis de pluja enregistrats almenys per 8 dels pluviòmetres de la xarxa en el període des de 1994 fins al 2019, per durades entre 10 minuts i 10 dies. El mètode d'interpolació consisteix en l'aplicació recurrent de l'equació (2.10) en la qual $x^{a(k+1)}$ és el valor de precipitació resultat de l'anàlisi en els punts de la malla escollida en el pas d'iteració $k + 1$, $x^{a(k)}$ és el calculat en el pas k anterior i w_j són els pesos utilitzats per a ponderar les diferències entre els valors analitzats $x_j^{a(k)}$ en els punts on es troben les estacions pluviomètriques, i les dades observades en elles x_j^0 . Així, el valor de la precipitació en cada punt de la malla es va modificant a cada pas basant-se en les observacions registrades pels n pluviòmetres, tenint en consideració les diferències entre les dades de precipitació registrades pel pluviòmetre j i el valor analitzat obtingut en el punt de la malla particular on es troba aquest pluviòmetre j .

$$x^{a(k+1)} = x^{a(k)} + \sum_{j=1}^n w_j (x_j^0 - x_j^{a(k)}) \quad (2.10)$$

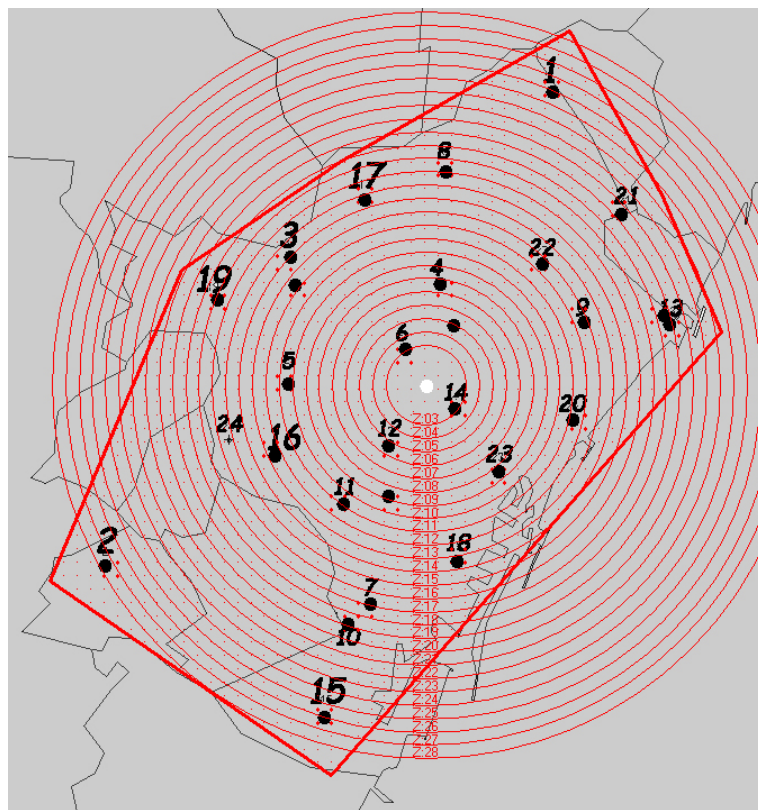
El mètode d'interpolació de Barnes (Barnes, 1994) (Koch, et al., 1983), àmpliament utilitzat per anàlisi meteorològica, fa servir una funció de ponderació w_j definida per l'expressió gaussiana (2.11) en la qual d_j és la distància entre el pluviòmetre j i el punt de malla, i L és un paràmetre de forma que determina la influència de cada pluviòmetre, depenent de la distància al punt de malla. Aquest paràmetre s'ha de seleccionar en funció de les característiques de la xarxa i pot variar a cada pas de la iteració.

$$w_j = \exp\left(-\frac{d_j^2}{2L^2}\right) \quad (2.11)$$

L'anàlisi corresponent al primer pas del procés iteratiu, $x^{a(0)}$, es pot establir de diverses maneres. En el cas que ens ocupa es va calcular per a cada punt de malla un valor mitjà ponderat de les dades registrades per cada pluviòmetre, fent servir l'equació (2.12) Per tal de tenir en consideració la major part de la xarxa en aquest primer pas d'iteració, es va prendre un valor d' $L = 10$ km a la funció de ponderació definida per (2.11)

$$x^{a(0)} = \frac{\sum_{j=1}^n w_j x_j^0}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (2.12)$$

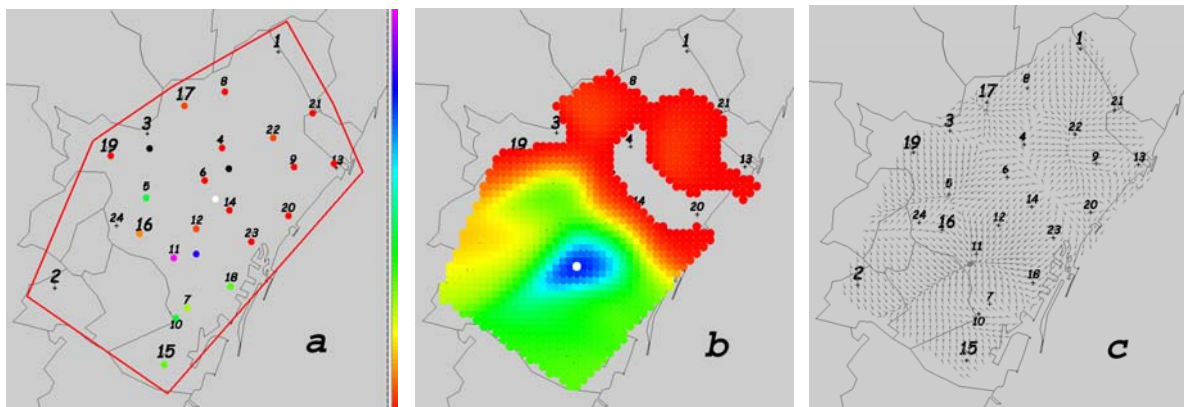
El paràmetre de forma L es va reduint gradualment a cada pas d'iteració fins a arribar a la distància mitjana entre pluviòmetres veïns, que és d'1,8 km per la xarxa urbana de Barcelona. Aquesta distància determina el màxim detall que es pot aconseguir analitzant objectivament la xarxa. Per l'espaiat de la malla, (Barnes, 1973) va proposar fer servir un valor d' $1/3$ d'aquesta distància mitjana, valor que en aquest cas seria d'aproximadament 600 m. Després de provar diferents valors de l'espaiat, es va escollir una resolució màxima de 300 m ja que amb aquest detall les estructures detectades resultaven compatibles amb les dades d'intensitat proporcionades per la xarxa. Amb aquest espaiat i triant una zona d'estudi com la mostrada a la Imatge 2-6 entre les línies rectes gruixudes, la xarxa està composta d'un total de 1503 punts, que fan assumibles els diferents càlculs amb els medis informàtics disponibles.



Imatge 2-6 Zona d'estudi per fer les diferents interpolacions i estudis espacials.

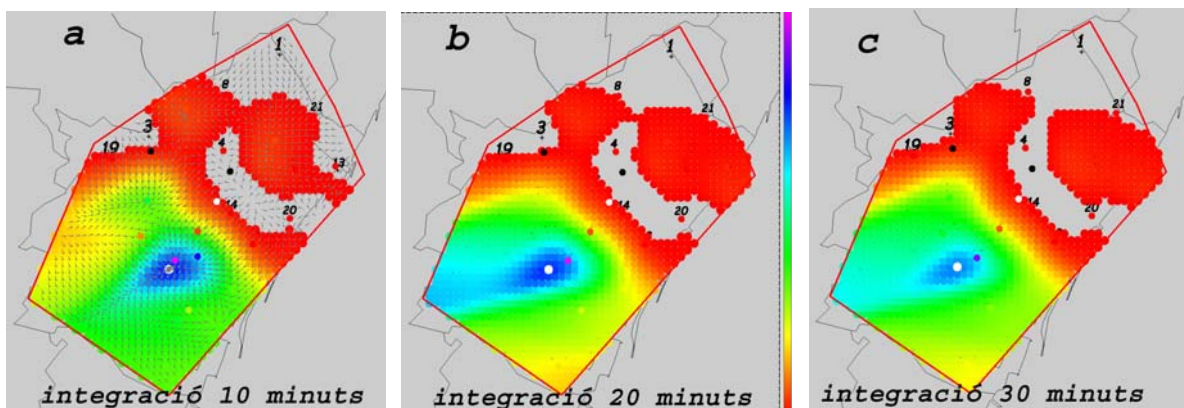
Per aplicar aquests procediments hem desenvolupat un software (programari Reixes.vbp) on podem *visualitzar* diferents propietats físiques dels diferents episodis de pluja que vulguem prendre en consideració. A la Imatge 2-7 mostrem les sortides visuals més significatives que ens dona el programa en analitzar la pluja del 1/10/2017, que s'inicia a les 7:00 i finalitza a les 11:05, per l'instant de les 10:00; A la imatge (a) representem el volum recollit pels pluviòmetres, on cada color fa referència a un valor determinat; a la imatge (b) mostrem el camp de pluges calculat pel mètode d'interpolació a la regió d'estudi; les direccions del gradient d'aquest camp es mostren a la imatge (c) Amb el coneixement d'aquestes direccions del gradient som capaços de localitzar els

punts on tenim els valors màxims del camp, tan relatius com absoluts i si aquests cauen a la perifèria o a l'interior de la zona d'estudi. Aquestes visualitzacions es poden simultaniejar tal i com es presenta a la Imatge 2-8 a.



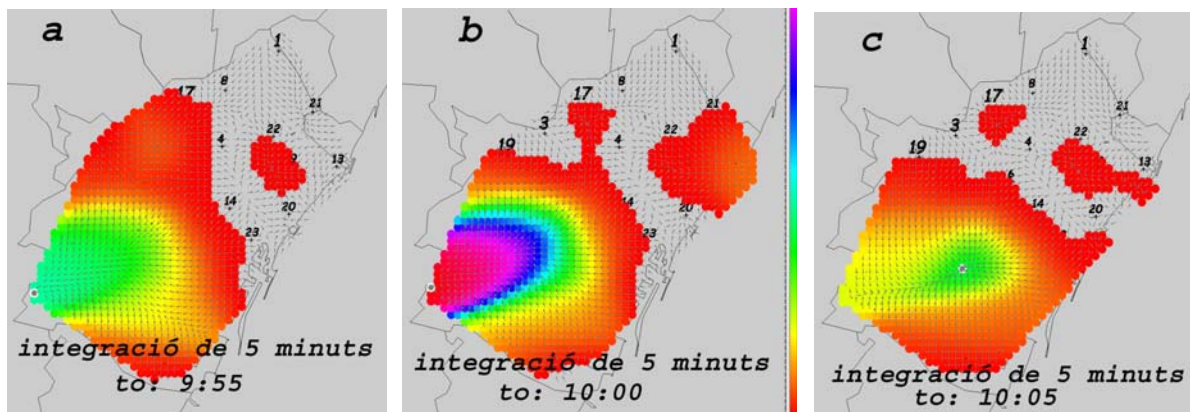
Imatge 2-7 Les tres visualitzacions principals proporcionades pel programa Reixes.vbp. a) Valors dels volums recollits pels diferents pluviòmetres actius durant l'episodi de pluja estudiat. b) Valors del camp de pluges calculat amb el mètode d'interpolació de Barnes. c) Gradients del camp de pluges calculat.

A la Imatge 2-8 es poden veure els camps de pluja per la pluja, esmentada abans, per períodes d'estudi (integració) de 10, 20 i 30 minuts. Es pot veure com la figura es va difuminant, i per tant homogeneïtzant, així que augmenta el temps d'integració.



Imatge 2-8 Tres visualitzacions de la pluja ocorreguda el 1/10/2017 a les 10:00 per anàlisi de duració de les pluges (integració) de 10 minuts (a) 20 minuts (b) i 30 minuts (c)

Amb aquesta utilitat podem construir una “pel·lícula” de la pluja en visualitzar episodis de pluja per temps consecutius i amb un mateix període d'integració. A la Imatge 2-9, per un període d'integració de 5 minuts, mostrem tres instants de temps d'aquesta pluja. A la figura b mostrem l'episodi on tenim el màxim d'intensitat i al apartats a i c l'anterior i el posterior respectivament. Podem veure com es desplaça el màxim del camp d'interpolacions resseguint (aproximadament) el tram superior de la Diagonal de Barcelona i tal com hem comentat anteriorment, com la màxima intensitat la tenim per la imatge b.



Imatge 2-9 Tres visualitzacions per temps consecutius de la pluja ocorreguda el 1/10/2017 per un temps d'integració de 5 minuts. Es pot observar l'evolució temporal (pel·lícula) de la pluja.

Per tal de comprovar la bondat del mètode d'interpolació es va fer servir una tècnica de validació creuada que proporciona un valor de l'error associat a la desviació entre els valors calculats mitjançant l'anàlisi i els reals observats en les estacions pluviomètriques, segons l'equació (2.13)

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j^0 - x_j^{a(k)})^2} \quad (2.13)$$

$x_j^{a(k)}$ és la precipitació estimada per interpolació en el punt de malla on el pluviòmetre j està ubicat, fent servir $n - 1$ valors en excloure el j . El coeficient de variació CV definit per (2.14) és útil per comparar els errors entre les diferents interpolacions:

$$CV = \frac{\sigma}{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j^0} \quad (2.14)$$

Aquesta tècnica d'avaluació es va aplicar als episodis d'interpolació que es mostren a la Figura 2-7 dins el període 1994-2019. Les durades estudiades són les següents: 5, 10 i 20 minuts, 1, 2, 6, 12 i 24 hores.

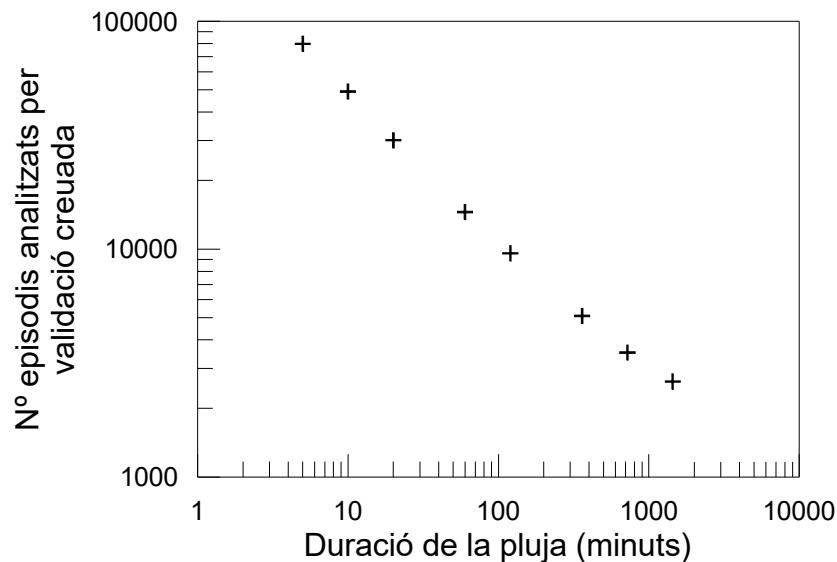


Figura 2-7 Nombre d'episodis individuals de pluja analitzats per validació creuada en funció de la durada de la pluja triada

El valor mitjà del *CV* per aquestes durades es mostra a la Taula 2-3 on podem veure que els valors són tan propers que hem optat per fer la representació gràfica de les mitjanes dels mateixos a la Figura 2-8.

<i>N</i> °PL	5min	10 min	20min	1 hora	2hores	6 hores	12 hores	24 hores
9	1.433	1.421	1.427	1.491	1.505	1.503	1.494	1.617
10	1.315	1.291	1.325	1.313	1.346	1.375	1.424	1.515
11	1.214	1.194	1.159	1.196	1.221	1.200	1.215	1.165
12	1.118	1.102	1.112	1.132	1.143	1.208	1.256	1.204
13	1.041	1.027	1.012	1.014	0.990	0.940	0.944	0.919
14	0.997	0.983	0.974	0.998	1.040	1.007	1.013	1.019
15	0.913	0.895	0.863	0.911	0.933	0.890	0.866	0.828
16	0.853	0.821	0.814	0.833	0.833	0.804	0.742	0.851
17	0.796	0.779	0.763	0.745	0.742	0.709	0.708	0.678
18	0.720	0.679	0.659	0.662	0.667	0.655	0.681	0.614
19	0.661	0.627	0.600	0.590	0.601	0.588	0.578	0.576
20	0.630	0.598	0.571	0.543	0.545	0.540	0.520	0.520
21	0.575	0.541	0.510	0.499	0.489	0.479	0.460	0.464
22	0.543	0.516	0.496	0.460	0.457	0.454	0.436	0.435
23	0.489	0.452	0.430	0.409	0.407	0.408	0.402	0.388
24	0.400	0.360	0.344	0.328	0.324	0.327	0.314	0.318

Taula 2-3 Mitjana dels coeficients de variació (*CV*) respecte del nombre de pluviòmetres actius per les diferents duracions de la pluja.

En particular per a episodis amb un període de retorn superior a 5 anys, el valor mitjà de *CV* varia entre 0,7 i 2 per a una durada de 10 minuts, i entre 0,2 i 0,9 per 24 hores. (Dirks, et al., 1998) van trobar valors similars per durades més llargues utilitzant mètodes d'interpolació tradicionals com el *kriging*, Thiessen o la distància inversa, mentre que (Enjamio, et al., 2005) van trobar valors entre 0,4 i 0,7 en analitzar quatre episodis de pluja utilitzant un algorisme d'interpolació bi-harmònic basat en *splines*. Es pot concloure que el mètode d'interpolació de Barnes ha resultat útil

per reproduir correctament les variacions espacials de la pluja real registrada per la xarxa, donant millors resultats com més extensa és la pluja i major durada es pren en consideració.

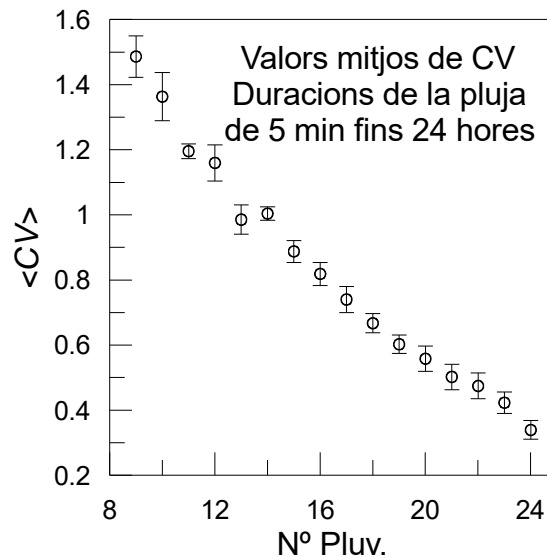


Figura 2-8 Mitjanes de les diferents duracions de les mitjanes dels coeficients CV

2.3.1. Factors de reducció areal (ARF) de l'àrea metropolitana de Barcelona

El factor de reducció areal es defineix com aquell factor que aplicat a una precipitació puntual per un període de retorn i duració, ens proporciona el valor de la precipitació d'una determinada zona. Els factors de reducció areal (ARF) característics de l'àrea metropolitana de Barcelona es van estimar mitjançant una tècnica derivada del mètode TP-29 (U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE; WEATHER BUREAU, 1957)

En primer lloc calculem el centre geogràfic dels pluviòmetres de la zona metropolitana de Barcelona, de la manera habitual, si tenim un total de K estacions, situades segons la Taula 1.1, tindrem

$$\vec{R}_{CG} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \vec{R}_k \quad (2.15)$$

En funció de la distància entre la estació i el centre geogràfic ($|\vec{R}_{CG} - \vec{R}_k|$) se li assigna a una determinada zona tal i com es mostra a la Imatge 2-6, on entenem que cada zona és un cercle amb centre al centre geogràfic i té un radi múltiple de 300 m. El mètode s'aplica a totes les duracions de la pluja (d) i essencialment és el quocient entre la màxima suma de precipitació recollida pels pluviòmetres d'una zona i la suma dels màxims volums recollits pels pluviòmetres de la zona determinada. Aquests paràmetres no tenen perquè coincidir en el temps.

$$\left(\frac{\text{Màxim de la suma}}{\text{Suma dels Màxims}} \right)$$

A la nostra zona el centre geogràfic està localitzat a la posició (UTM) (429617, 4583033) m i abarquem tots els pluviòmetres amb 28 zones fent cercles de 300 en 300 metres. A les tres primeres zones ($R < 900m$) no hi ha cap estació i la resta es distribueixen en la forma mostrada a la Taula 2-4. Hi ha absències de zones ja que en aquestes no tenim cap pluviòmetre que no estigui a la zona de radi inferior, i ha de quedar clar que a cada zona tenim els pluviòmetres que apareixen directament associats a la zona com els de les zones anteriors.

Zona N°	Radi (km)	Índex dels pluviòmetres a cada zona
3	0.9	14
4	1.2	6
6	1.8	12
8	2.4	4
9	2.7	23 i 25
11	3.3	5 i 11
12	3.6	20
13	3.9	9, 16, 22 i 26
14	4.2	3 i 18
15	4.5	17
17	5.1	7, 8 i 19
19	5.7	10, 13 i 24
20	6.0	21
24	7.2	1
26	7.8	15
28	8.4	2

Taula 2-4 Distribució dels pluviòmetres a les diferents zones per fer els càlculs de les ARF. Mostrem els radis de cada una de les zones. Les zones que no apareixen a la taula és que no tenen cap estació que estigui a les zones anteriors.

Un cop caracteritzades les diferents zones de treball, primerament considerarem les precipitacions (volums en *dmm* recollits per les estacions) en períodes anuals (n) i per les diferents duracions de les pluges (d). Per cada duració (d) any (n) i zona (A) amb $k(A)$ pluviòmetres a la zona determinarem el volum recollit a la zona, simultàniament, per tots els pluviòmetres actius a la mateixa. Denominem per $\hat{V}_j(d, A)$ el volum màxim recollit simultàniament pels pluviòmetres de la zona A l'any j en estudiar les pluges de duració d . Aquest volum serà recollit durant un interval determinat de l'any en qüestió. Si $v_{ij}(d, A)$ és el volum recollit pel pluviòmetre i en aquest instant, tindrem que $\hat{V}_j(d, A) = \sum_{vi \in \text{Zona } A} v_{ij}(d, A)$. Ja que ens interessarà fer comparatives entre diferents zones és imprescindible normalitzar aquest volum per unitat de pluviòmetres considerats

$$\hat{v}_j(d, A) = \frac{1}{k(A)} \hat{V}_j(d, A) = \frac{1}{k(A)} \sum_{vi \in \text{Zona } A} v_{ij}(d, A) \quad (2.16)$$

En segon lloc, designem per $V_{ij}(d, A)$ el valor màxim de $v_{ij}(d, A)$ (per cada pluviòmetre i aquest màxim es donarà per un instant diferent) i sumem tots els valors màxims i ho normalitzem per unitat de pluviòmetre

$$\frac{1}{k(A)} \sum_{\forall i \in \text{Zona } A} V_{ij}(d, A) \quad (2.17)$$

Les ARF les obtenim fent les mitjanes anuals de les expressions (2.16) i (2.17) i el seu quocient

$$ARF(d, A) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \hat{v}_j(d, A)}{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{k(A)} \sum_{\forall i \in \text{Zona } A} V_{ij}(d, A) \right)} = \frac{\sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{k(A)} \sum_{\forall i \in \text{Zona } A} v_{ij}(d, A) \right)}{\sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{k(A)} \sum_{\forall i \in \text{Zona } A} V_{ij}(d, A) \right)} \quad (2.18)$$

Un cop calculats tots els ARF experimentals (podem veure aquests valors experimentals per 10 i 55 minuts a la Figura 2-11 i per 4 hores i 5 dies a la Figura 2-12) hem fet uns ajustos potencials a aquests valors, en la forma

$$ARF(d, A) = A_d r^{b_d} \quad (2.19)$$

on A_d representarà l'amplitud de l'ajust i b_d l'exponent, per una r , en km , que representa la distància entre el punt analitzat i el centre geogràfic dels pluviòmetres. A la Taula 2-5 mostrem els valors presentats anteriorment i fem una comparativa amb els obtinguts amb les dades fins el 2009 (Rodríguez, et al., 2013) Podem fer una primera comparativa d'aquests resultats comparant els coeficients de regressió (Figura 2-9) on podem veure que amb les dades fins el 2019 tenim tots els R^2 més propers a 1

Podem veure que per valors de duració de pluja iguals o inferiors a 720 minuts (12 hores) els coeficients de regressió són superiors a 0.7 el què garanteix un molt bon ajust amb les dades experimentals. També hem de destacar que amb les dades actuals el R^2 més baix és de 0.55, que tot i que no ens dona una gran garantia d'ajust, no és menyspreable. De l'anàlisi de les amplituds veiem que totes tenen una tendència a valdre 1, d'altre banda és el valor esperat a priori. A la Taula 2-5 mostrem els valors mitjos de les amplituds per les dues sèries de dades, que són totalment consistents entre ells: $A_d^{2019} = (1.02 \pm 0.01)$ $A_d^{2009} = (1.03 \pm 0.01)$. Els exponents b_d els representem a la Figura 2-10 i podem veure que són molt semblants per els dos conjunts de dades analitzats. Es pot apreciar una tendència asimptòtica cap al $-1/2$ per valors grans de la duració de les pluges. Aquest comportament torna a ser raonable ja que per valors grans de la duració de les pluges els valors màxims de les diferents zones i les sumes dels valors màxims de les estacions haurien de ser els mateixos i per tant les ARF's haurien de tendir a 1

$d(\text{minuts})$	1994 fins 2019			1994 fins 2009		
	A_d	b_d	R^2	A_d	b_d	R^2
5	1.0165	-0.355	0.94	1.0284	-0.364	0.92
10	1.0193	-0.294	0.94	1.0289	-0.300	0.90
15	1.0184	-0.254	0.94	1.0313	-0.264	0.88
20	1.0147	-0.225	0.93	1.0283	-0.236	0.86
25	1.0178	-0.203	0.92	1.0326	-0.214	0.84
30	1.0253	-0.183	0.91	1.0350	-0.192	0.83
35	1.0244	-0.167	0.89	1.0328	-0.173	0.80
40	1.0243	-0.157	0.88	1.0324	-0.160	0.78
45	1.0300	-0.155	0.87	1.0412	-0.155	0.78
50	1.0328	-0.151	0.87	1.0457	-0.149	0.78
55	1.0327	-0.145	0.86	1.0458	-0.141	0.77
60	1.0345	-0.141	0.86	1.0479	-0.135	0.75
120	1.0271	-0.097	0.80	1.0342	-0.084	0.57
240	1.0142	-0.081	0.77	1.0184	-0.069	0.48
360	1.0145	-0.074	0.80	1.0200	-0.064	0.55
480	1.0104	-0.066	0.77	1.0142	-0.054	0.49
600	1.0128	-0.060	0.71	1.0190	-0.049	0.44
720	1.0135	-0.058	0.70	1.0223	-0.048	0.43
1440	1.0144	-0.044	0.56	1.0241	-0.045	0.38
2160	1.0082	-0.037	0.52	1.0152	-0.040	0.32
2880	1.0095	-0.042	0.56	1.0163	-0.043	0.34
7200	1.0051	-0.041	0.52	1.0074	-0.043	0.32
14400	0.9989	-0.042	0.55	0.9923	-0.041	0.29
$\langle A_d \rangle =$	1.02 ± 0.01			1.03 ± 0.01		

Taula 2-5 Amplituds (A_d) exponents (b_d) i coeficients de correlació (R^2) de les funcions potencials ajustades als punts experimentals de les ARF calculades. Mostrem la comparativa entre els valors obtinguts fins el 2009 i els actuals, amb dades fins el 2019

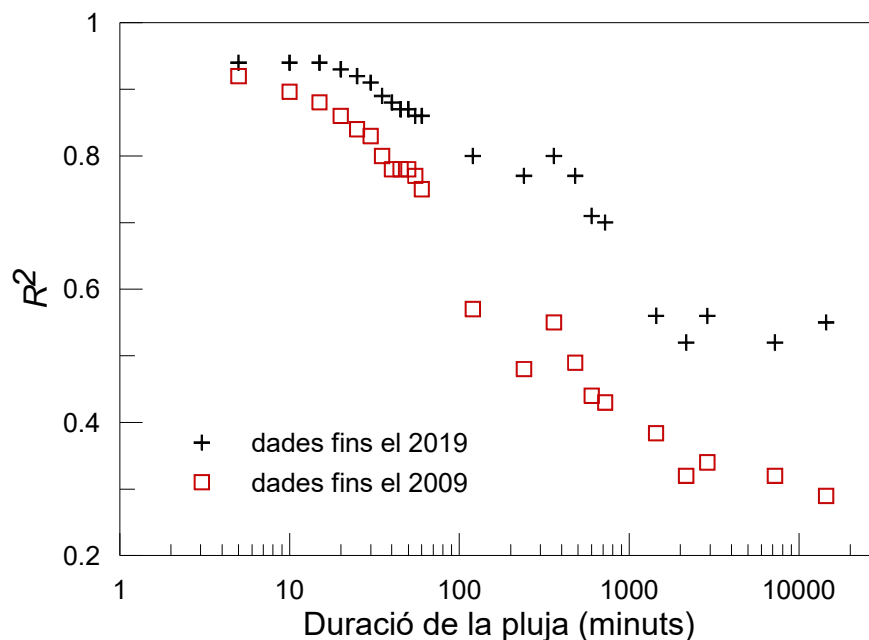


Figura 2-9 Comparativa dels coeficients de regressió (R^2) dels ajustos potencials a les dades de les ARF's experimentals

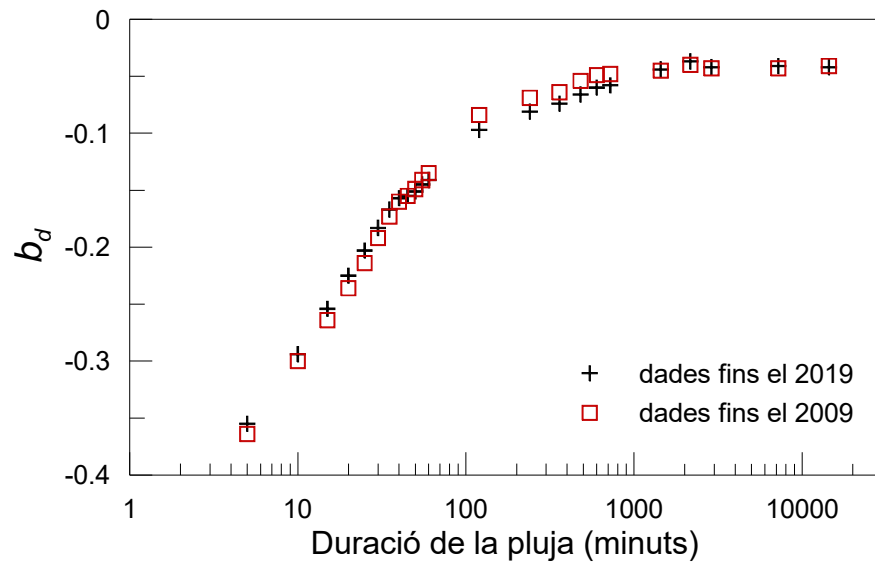


Figura 2-10 Comparativa dels exponents (b_d) dels ajustos potencials a les dades de les ARF's experimentals

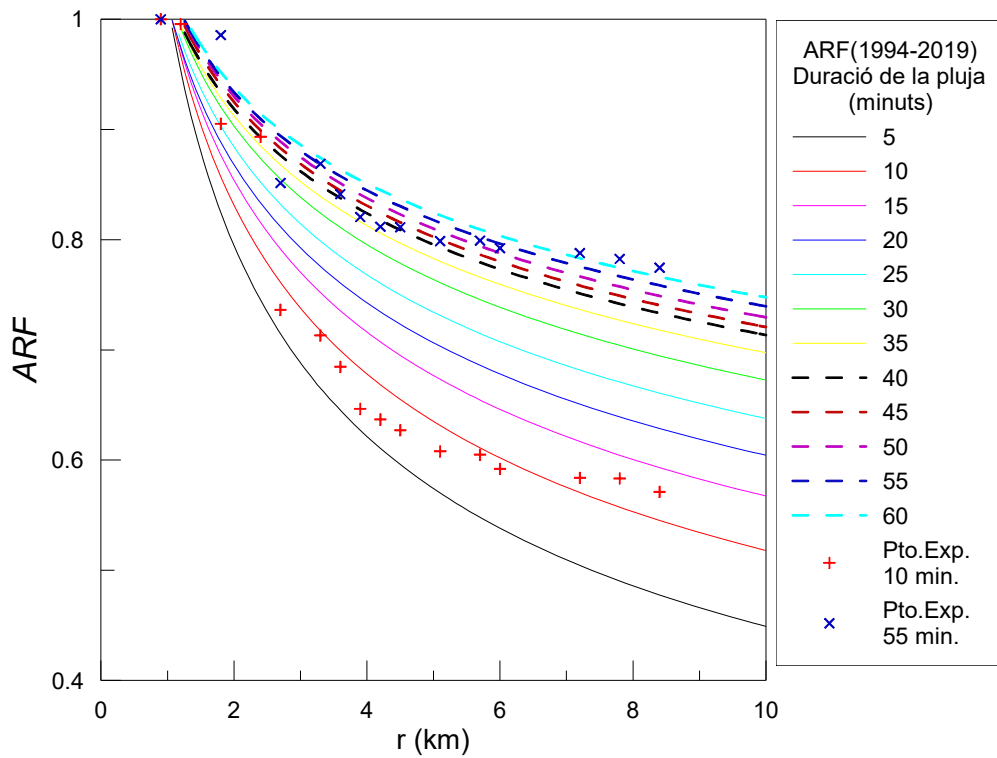


Figura 2-11 Valors de les ARF de la regió metropolitana de Barcelona amb dades des de 1994 fins 2019 per durades de les pluges des de 5 fins 60 minuts. Presentem les dades discretes calculades per 10 i 55 minuts.

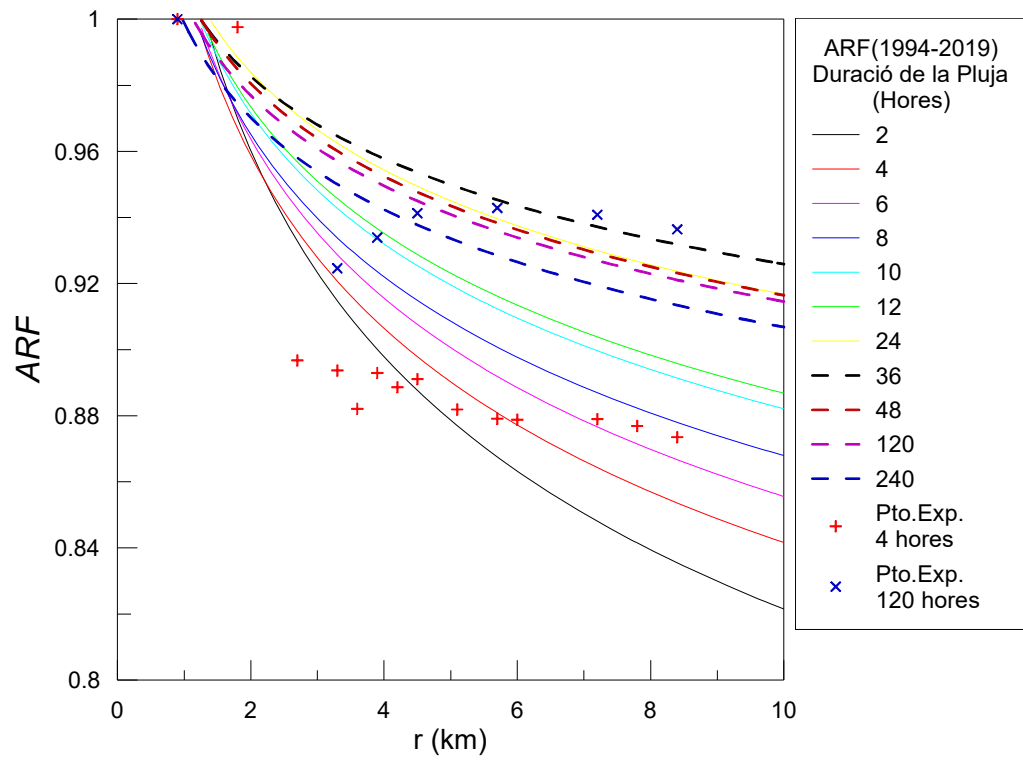


Figura 2-12 Valors de les ARF de la regió metropolitana de Barcelona amb dades des de 1994 fins 2019 per durades de les pluges des de 2 fins 240 hores. Presentem les dades discretes calculades per 4 i 120 hores.

3. Seguiment cinemàtic de tempestes a Barcelona

Cinemàtica (del grec *kínema*, «moviment») és la branca de la física que estudia el moviment dels cossos sense tenir en compte les causes que el produeixen. El vocable *cinemàtica* és creat per Ampère (1775-1836) i és ell qui delimita el que ha d'estudiar aquesta branca de la ciència. Es té constància d'estudis cinemàtics des de el segle XIV, realitzats per científics com William Heytesbury i Richard Swineshead, a Anglaterra, i com Nicolau Oresme, de l'escola francesa, reconegut economista, matemàtic, físic, astrònom, filòsof, psicòleg i musicòleg. Galileo Galilei, cap al 1604 fa estudis cinemàtics de caiguda lliure i moviment d'esferes en plans inclinats per entendre el moviment de planetes i tal com ens diuen, per entendre els moviments de les bales de canó. Científics de la talla de Varignon, d'Alambert, Euler, Bernouilli o Einstein han fet aportacions importantíssimes en el camp de la cinemàtica, tals com el càlcul diferencial i la relativitat espai-temps.

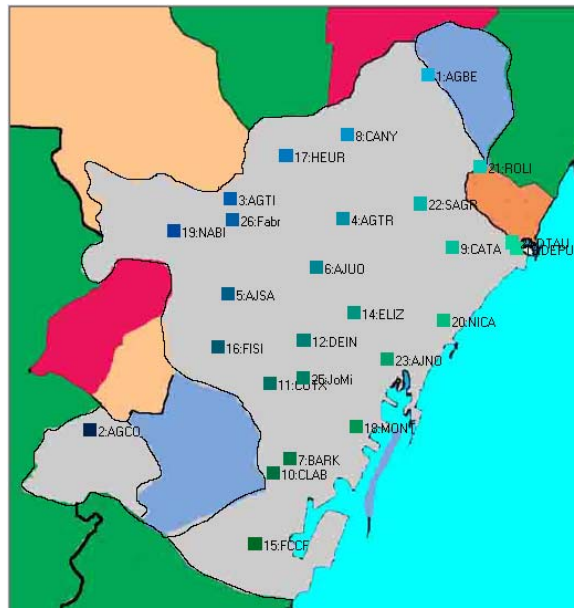
3.1. Introducció

Per fer estudis cinemàtics es poden utilitzar mètodes basats en informacions dels radars meteorològics i fins i tot, tal com hem comentat anteriorment, els valors de les precipitacions extrapolats a la xarxa matemàtica regular que hem estudiat en el capítol anterior. Els mètodes que desenvoluparem estan basats únicament en les informacions que ens proporcionen les estacions meteorològiques de la xarxa. Ens interessarà establir relacions entre velocitats (mòdul, direcció i sentit) i determinades propietats de les pluges. No incloure informacions sobre la velocitat de les pluges (Niemczynowicz, 1987) (Lo Conti, et al., 2009) implicaria cometre errors, per exemple, en les simulacions de cabals d'escorrentia.

Per calibrar el nostre sistema hem aplicat els mètodes i models matemàtics del càlcul de velocitats a unes pluges creades, amb direccions, velocitats de propagació i mides ben definides (pluges de disseny o pluges test) i analitzarem les diferències entre els valors programats, de velocitat (mòdul) i direcció i els resultats dels càlculs. Un cop “calibrat” el nostre sistema de càlcul ho aplicarem a les dades reals d'episodis de pluja seleccionats entre el 1994 i el 2019.

3.2. La zona de càlcul

Hem de ser conscients que efectuar càlculs de magnituds físiques en regions acotades i finites pot aportar errors de frontera (Guàrdia, et al., 1999) Per intentar esmenar aquest efecte els nostres càlculs els farem a la zona mostrada a la Imatge 3-1 que inclou “suficientment” a tots els pluviòmetres de la nostra xarxa. Hem utilitzat una zona rectangular que inclou a tots els pluviòmetres i que els pluviòmetres que estan mes propers al perímetre del rectangle estan a una distància d'aquest perímetre més gran que la distància mitja entre pluviòmetres.



Imatge 3-1 Zona de càlcul de les velocitats on veurem els efectes de la frontera als càlculs.

3.3. Test dels mètodes de càlcul

Abans d'aplicar els diferents mètodes de càlcul de velocitats a les pluges reals (amb les dades proporcionades pels pluviòmetres) els aplicarem a una sèrie de pluges dissenyades per nosaltres de les quals coneixem tots els paràmetres que les defineixen. D'aquesta forma podrem calibrar els resultats proporcionats pels diferents mètodes de càlcul.

Hem construït unes pluges en forma de conus recte d'alçada h (dmm) com a quantitat màxima de la pluja, i un diàmetre a la base D_i ; que serà una variable i que estarà parametritzada en funció de la diagonal de la regió estudiada.

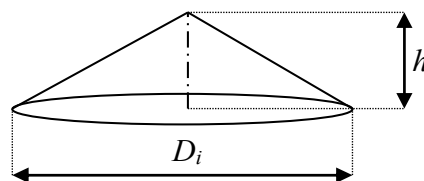


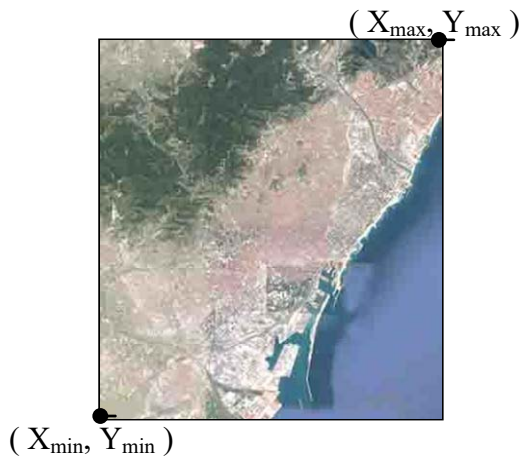
Figura 3-1 Representació de la forma de la pluja de disseny

Les coordenades per definir aquesta diagonal són les coordenades UTM dels punts extrems del mapa presentat a la Imatge 3-2, que en el nostre cas tenen els valors següents

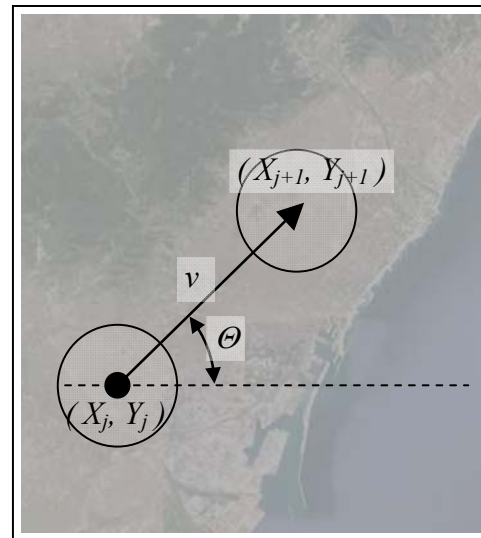
$$X_{min} = 420200 \text{ m}; Y_{min} = 4573500 \text{ m}; X_{max} = 437500 \text{ m} \text{ i } Y_{max} = 4592200 \text{ m} \text{ per tant}$$

$$\text{Diagonal del Mapa} = 25475.09 \text{ m} \quad (3.1)$$

Per calcular la grandària de les pluges, representada per la variable D_i , hem utilitzat la següent expressió: $D_i = 2(\text{Diagonal del Mapa} / f_D)$ amb $f_D = \{1, 2, 5\}$. A la variable f_D l'anomenem *fracció de la diagonal*.



Imatge 3-2 Coordenades per definir la diagonal de la pluja de disseny



Imatge 3-3 Definició dels paràmetres que defineixen el moviment de les pluges (coordenades polars)

Farem que aquestes pluges es desplacin per la regió d'estudi amb una velocitat v formant un angle θ amb l'eix horitzontal X (Imatge 3-3) i que la seva trajectòria passi pel punt mig del mapa (aquest punt és pràcticament el centre geogràfic dels pluviòmetres)

$$\left(X_{mig} = \frac{X_{max} + X_{min}}{2}, Y_{mig} = \frac{Y_{max} + Y_{min}}{2} \right) \quad (3.2)$$

El vèrtex del conus (Figura 3-1) de coordenades (X_j, Y_j) es mou segons el següent algoritme

$$\begin{aligned} X_{j+1} &= X_j + \Delta t(v \cos \theta) \\ Y_{j+1} &= Y_j + \Delta t(v \sin \theta) \end{aligned} \quad (3.3)$$

on Δt representarà el pas de temps del moviment, que serà un paràmetre programable del programari. La primera posició de la nostra pluja (X_0, Y_0) la prenem fora del mapa, de tal manera que pel primer moviment de la mateixa (X_1, Y_1) ja tinguem punts del conus de pluja dintre del mapa; encara que amb tota seguretat encara no assoliran cap pluviòmetre. Tots aquests instants del temps on les dades de la pluja de tots els pluviòmetres és zero no formaran part de la informació de la pluja per fer els estudis corresponents.

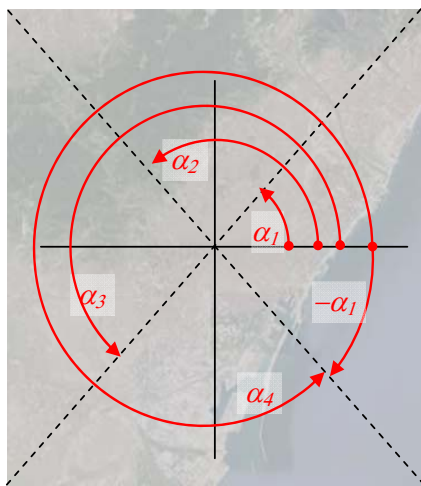
Es poden donar situacions diferents (Imatge 3-5) que marquen un tipus diferent de càlcul de la posició del centre de la pluja, en funció que la recta que marca la direcció de la pluja tingui una determinada inclinació.

Les diagonals de la nostra zona d'estudi defineixen quatre angles:

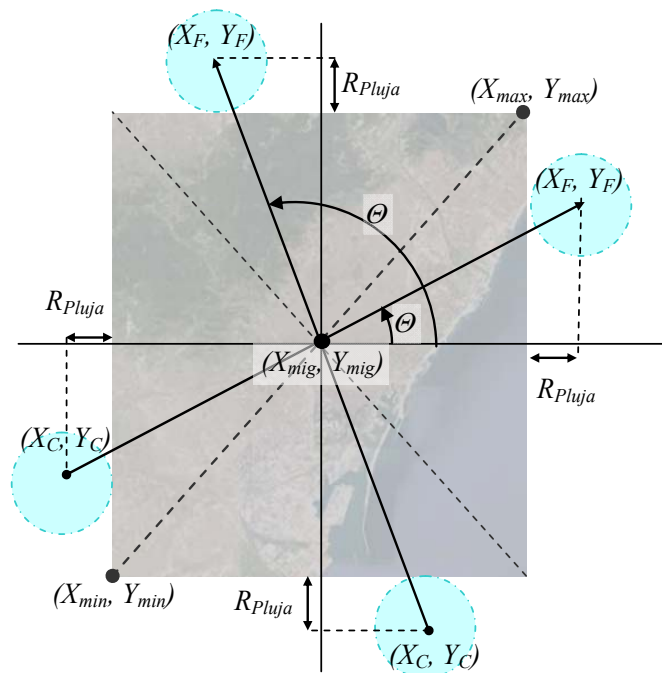
$$\alpha_1 = \arctg\left(\frac{Y_{max} - Y_{min}}{X_{max} - X_{min}}\right); \alpha_2 = \pi - \alpha_1; \alpha_3 = \pi + \alpha_1 \text{ i } \alpha_4 = \pi + \alpha_2 \quad (3.4)$$

A la Imatge 3-4 tenim una representació d'aquests angles, que prenen els valors:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 0.824267 \text{ rad} = 47.227047^\circ & \alpha_2 &= 2.317325 \text{ rad} = 132.772953^\circ \\ \alpha_3 &= 3.965860 \text{ rad} = 227.227047^\circ & \alpha_4 &= 5.458918 \text{ rad} = 312.772953^\circ \end{aligned} \quad (3.5)$$



Imatge 3-4 Angles de treball definits per la zona de treball



Imatge 3-5 Les quatre situacions diferents per calcular el primer centre de la pluja

Si l'angle director de la pluja θ està entre $-\alpha_1$ i α_1 ($\theta < \alpha_1$ o $\theta > \alpha_4$):

$$\begin{aligned} X_C &= X_{min} - R_{Pluja} \\ Y_C &= (X_C - X_{mig}) \cdot \tan \theta + Y_{mig} \\ X_F &= X_{max} + R_{Pluja} \\ Y_F &= (X_F - X_{mig}) \cdot \tan \theta + Y_{mig} \end{aligned} \quad (3.6)$$

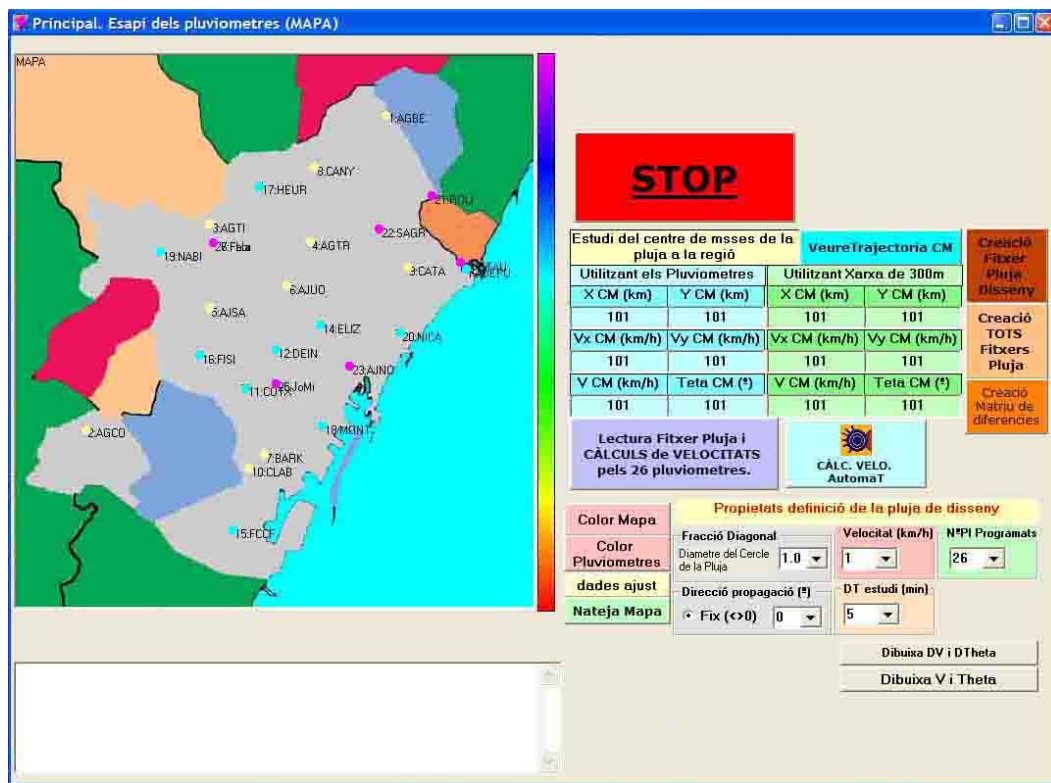
En cas que l'angle director θ estès entre α_2 i α_3 ($\alpha_2 < \theta < \alpha_3$) intercanviarem els punts inicial i finals de la pluja de les anteriors equacions

Si l'angle director de la pluja θ està entre α_1 i α_2 :

$$\begin{aligned} Y_C &= Y_{min} - R_{Pluja} \\ X_C &= X_{mig} + (Y_C - Y_{mig}) / \tan \theta \\ Y_F &= Y_{max} + R_{Pluja} \\ X_F &= X_{mig} + (Y_F - Y_{mig}) / \tan \theta \end{aligned} \quad (3.7)$$

En cas que l'angle director θ estès entre α_3 i α_4 intercanviarem els punts inicial i finals de la pluja de les anteriors equacions.

Assignarem a les pluges una velocitat constant i uns paràmetres que els podem anar modificant per fer els estudis posteriors. Aquests paràmetres es poden observar a la Imatge 3-6 on mostrem la pantalla principal del programari que hem desenvolupat per fer el tractament de les velocitats (*AjustAunPla.vbp*) i del què farem una breu descripció.



Imatge 3-6 Finestra principal del programa *AjustAunPla.vbp* que ens permet generar fitxers de pluges de disseny i calcular les velocitats en general dels diferents tipus de pluja, tan reals com dissenyats.

Sota l'epígraf "Propietats definició de la pluja de disseny" (Imatge 3-6) podem veure els paràmetres adaptables de les pluges que podem construir. A priori pensem que amb aquests valors pels paràmetres posarem el sistema de càlcul en situacions similars a las què ens podem trobar en la realitat. Els valors pre-definits i seleccionables dels paràmetres són els següents:

- Fracció Diagonal {1, 2, 5}

fa referència a la variable D_i explicada anteriorment.

- Velocitat (km/h) {5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60 i 70}

és la velocitat v a la que desplaçarem la nostra pluja.

- N°PI Programats {10, 15, 20, 26}

és el número de pluviòmetres als què assignarem pluja per fer els estudis. Aquest és un paràmetre fonamental de la xarxa i creiem que és mereixedor d'estudi, ja que no sempre es tenen tots els pluviòmetres actius. Hem adoptat de forma arbitrària que un valor inferior a 10 pluviòmetres en funcionament simultani no és digne de ser considerat una xarxa pluviomètrica; per tant el valor mínim de pluviòmetres que estudiarem és de 10. El nombre màxim de pluviòmetres dels nostres estudis és el màxim nombre de pluviòmetres disponibles, 26; i el valor mig, que hauria de ser 18, l'hem simulat amb dos valors 15 i 20. Ja siguin 10, 15 o 20 el nombre de pluviòmetres que estudiem, els hem agafat de forma aleatòria en funció de l'ordre alfabètic de la primera llista de pluviòmetres (Taula 1.1).

- Direcció propagació (°) {0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300 i 330}

és l'angle entre els vector velocitat i l'eix horitzontal. En el nostre cas hem adoptat uns valors múltiples de 30° . Per justificar aquesta tria hem ajustat una recta de regressió a tot el conjunt de pluviòmetres, prenent per x i per y els valors de les posicions (UTM) dels pluviòmetres i obtenim la equació $y = 0.4107x + 4 \cdot 10^6$. La recta ajustada forma un angle de $\arctan(0.4107) = 22.33^\circ$ i hem agafat un valor semblant a aquest que ens permet explorar totes les direccions de forma àgil i homogènia sense coincidir exactament amb l'orientació de les estacions. La correlació de l'anterior recta val 0.1407 que és un bon valor per poder garantir que els nostres pluviòmetres no estan alineats (correlacionats)

- DT estudi (min) {5, 10 i 15}

és l'increment de temps entre dos posicions consecutives de la pluja que estem programant.

Un cop triem els paràmetres que identifiquen i caracteritzen la pluja, crearem el fitxer amb les dades de la mateixa. En aquest fitxer hi seran les dades de les quantitat de pluja per cada pluviòmetre i per tota la duració de la pluja tal i com si fossin les dades d'una pluja real. El primer que fem és assignar un nom pel fitxer de pluja, que ens permeti diferenciar-ho de la resta de fitxers de pluja. És un nom importat pels nostres interessos, ja que al final estarem treballant amb milers de fitxers [$3 \times 9 \times 4 \times 12 \times 3 = 3888$] i amb aquest nom podem identificar amb relativa facilitat els continguts dels mateixos. Mirem el nom d'un fitxer i mostrem la informació que ens proporciona:

PIGDisSdmm_5_0_330°_002km_h_26Pl{000600s}{2018_05_24_13_26}.DAT

<i>PIGDisSdmm</i>	5	0	330°	002km h	26Pl	000600s	2018 05 24 13 26
Nom genèric dels fitxers	Fracció de la diagonal	Sense us	Direcció de propagació de la pluja	Velocitat de propagació de la pluja	Nº de pluviòmetres actius	Pas de temps dels càlculs	Data genèrica de la pluja

Cal destacar que algunes d'aquestes pluges de disseny tindran continguts repetits, per tant no caldrà confeccionar de nou els seus continguts. Aquest fet es dona quan per alguns dels paràmetres triats les posicions temporals del centre de la pluja són els mateixos. Si $\Delta e = v_i \cdot t_j = v_m \cdot t_n$ on v representa la "Velocitat" i t representa el "DT estudi" els fitxer de pluja que fa referència a v_i i t_j és idèntic al fitxer que fa referència a v_m i t_n . A la Taula 3-1 destaquem aquestes redundàncies amb les caselles ombrejades

<i>e</i> (min km / h)	<i>DT estudi</i> (min)		
	1	5	10
5	5	25	50 (*)
10	10	50 (*)	100
15	15	75	150
20	20	100	200
<i>V</i> (km/h)	30	30	150
	40	40	200
	50	50 (*)	250
	60	60	300
	70	70	350

Taula 3-1 Espais, en min km /h, que es calcularan en les pluges de disseny. Els valors ombrejats estan repetits.

Podem veure a l'annex E les sis primeres línies dels fitxers que marquen un espai de 50 min km / h assenyalades amb (*) a la Taula 3-1:

3.4. Els diferents mètodes de càlcul

Els diferents mètodes de càlcul que hem utilitzat per determinar la velocitat de les pluges estan resumits a la Taula 3-2. En cada un d'aquest mètodes estudiem la velocitat de propagació a partir de diferents propietats físiques de les pluges (Carbone, et al., 2014) (Lo Conti, et al., 2009). Algunes d'aquestes propietats són, per exemple, l'instant de començament de la pluja o el de màxima precipitació. En la descripció detallada de cada mètode explicarem concretament la propietat estudiada.

Mètode	Mètode de Càlcul
Directe	CENTROIDE de la pluja Primer MÀXIM de la pluja Començament de la pluja
De correlació	Correlacions entre pluviòmetres Obliguem al (0;0;0) amb restricció Correlacions entre pluviòmetres NO (0;0;0) sense cap restricció
De centre de masses	C.D.M, als pluviòmetres C.D.M, a la xarxa

Taula 3-2 Noms assignats als diferents mètode de càlcul de les velocitats de les pluges

En tots els mètodes obtenim un vector velocitat de dos dimensions que l'expressem com el seu mòdul v i la seva direcció o l'angle amb la horitzontal Θ (Imatge 3-3)

3.4.1. Els mètodes del centre de masses

Aquests mètodes ens proporcionen una visió de la pluja molt semblant a una “pel·lícula” (evolució temporal) de la mateixa. Hem de dir que són mètodes molt sensibles als valors inicials i finals de la pluja i sens dubte és un dels seus punts febles. En intentar explicar els primers instants de la pluja, per exemple, quan aquesta arriba al primer pluviòmetre, tindrem que el centre de masses està a la posició d'aquesta estació i no tindrem cap mobilitat del mateix, fins que la pluja no arribi a més pluviòmetres. En aquests primers instants tindrem un centre de masses amb salts temporals que sens dubte faran modificar l'expressió de la velocitat.

Centre de masses dels pluviòmetres

El primer model de càlcul de velocitats per les pluges de disseny serà similar al càlcul de la velocitat del centre de masses d'un sistema de partícules puntuals, on la posició de les partícules serà la dels pluviòmetres de la nostra xarxa $\vec{r}_k = (X_{UTM}(k), Y_{UTM}(k))$ i la “massa de les partícules” el volum de pluja recollit per cada pluviòmetre k a l'instant t_i : $V(k, i)$; La posició del centre de masses de la pluja a l'instant t_i l'estimarem segons la relació:

$$\vec{r}_{Pluja}(t_i) = \frac{\sum_{k=1}^K V(k, i) \cdot \vec{r}_k}{\sum_{k=1}^K V(k, i)} \quad (3.8)$$

on K representa el nombre màxim de pluviòmetres actius a la nostra pluja. Aquest sistema és del tot especial, ja que les partícules (els pluviòmetres) estan quietes i el que ens varia amb el temps és el volum de pluja recollida. Estaríem parlant d'un sistema de partícules amb massa variable.

La velocitat del centre de masses l'avaluarem, òbviament, com una velocitat mitjana

$$\vec{v}_{Pluja}(t_i) = \frac{\vec{r}_{Pluja}(t_i) - \vec{r}_{Pluja}(t_{i-1})}{(t_i - t_{i-1})} \quad (3.9)$$

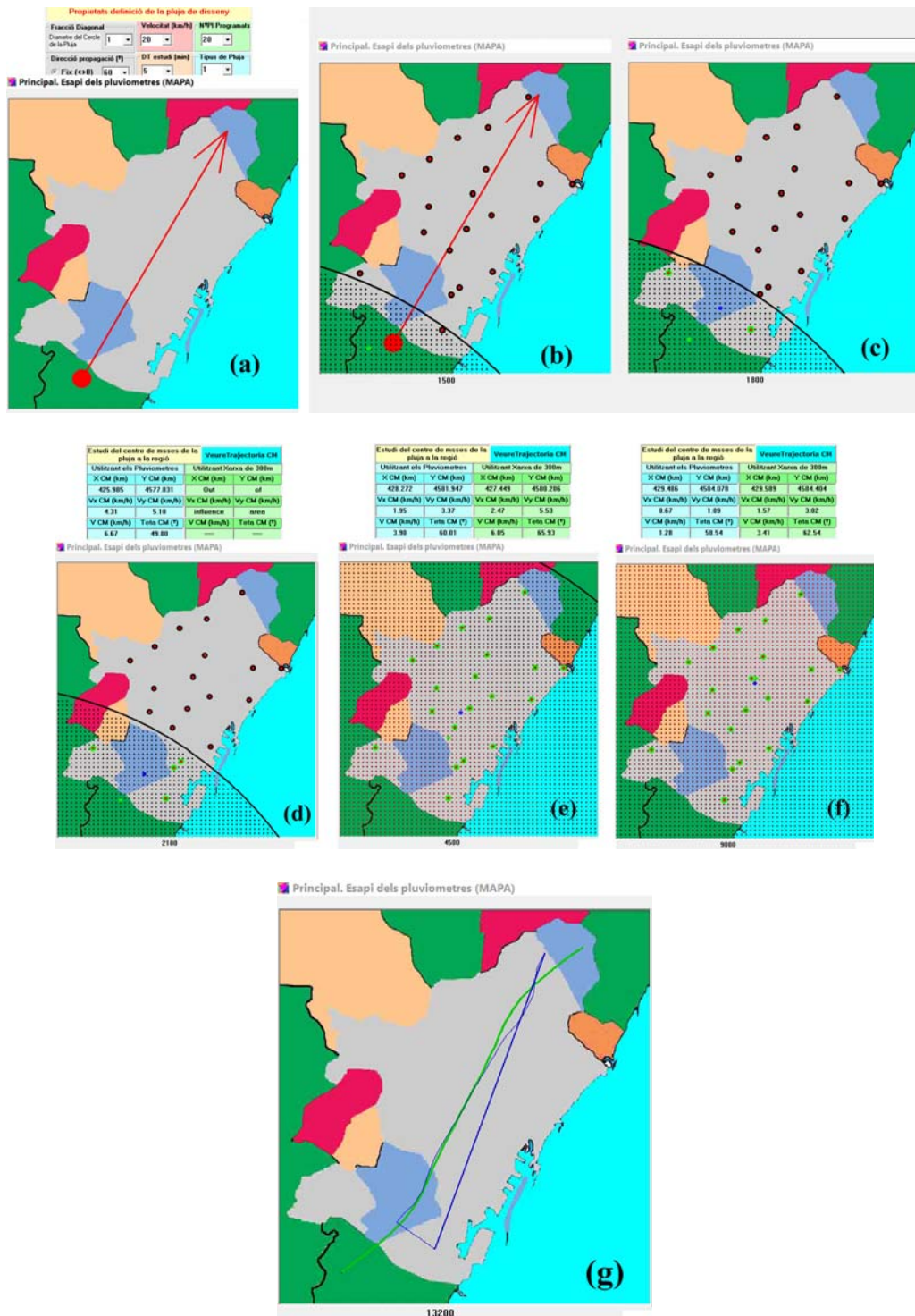
Aquest mètode de càlcul, tal com hem explicat, proporciona resultats discutibles fins que la tempesta no afecta a molts pluviòmetres, però per confeccionar les pluges amb què posarem a

proba els diferents mètodes de càlcul és còmode i sobre tot molt visual; el que ens permetrà confirmar que els càlculs sobre aquestes pluges “dissenyades” són acceptables. És interessant mencionar que aquest mètode permet el càlcul “d’una velocitat” amb el coneixement només de dos valors de l’estat de la pluja a la nostra xarxa $\vec{r}_{Pluja}(t_{i-1})$ i $\vec{r}_{Pluja}(t_i)$ i per tant sembla que permetria fer estudis de la variabilitat temporal de la “velocitat”.

Centre de masses de la xarxa

Per corregir els punts febles del mètode anterior, primerament es podria aplicar el mètode d’interpolació explicat en el capítol anterior (apartat 2.3.) per cada pluja, aconseguint d’aquesta forma un camp de pluges de 1503 punts. I seguidament es podria calcular la velocitat segons el mètode del centre de masses tractant els valors de la quantitat de precipitació en aquests punts com registres de pluviòmetres.

A la Imatge 3-7 mostrem el procés de càlcul del mètode de centre de masses. A Imatge 3-7 (a) selecció dels paràmetres que definiran la cinemàtica de la pluja; Imatge 3-7 (b) la pluja assoleix el primer pluviòmetre. Es pot veure un punt verd a la part inferior esquerra que representa la posició del centre de masses de la xarxa de punts de càlcul. El número a la part inferior de la figura (1500) fa referència al tems de càlcul d’aquest estat de la pluja; Imatge 3-7 (c) la pluja assoleix dos pluviòmetres. El centre de masses calculat pels punts de la xarxa, punt verd, s’ha desplaçat respecte de la Imatge 3-7 (b) fent un salt brusc. Es pot veure un punt blau, entre els dos pluviòmetres, que representa el centre de masses de la pluja calculat en funció de les profunditats de pluja enregistrades. Aquests centres de massa, al principi de la pluja són no coincidents; Imatge 3-7 (d) la pluja a arribat fina a quatre pluviòmetres. El programa ens mostra els valors de la posició i la velocitat dels centres de massa calculats pels nostres dos mètodes. hi ha uns límits per donar per bo el valor del centre de masses i si no es dona per bo el programa respon amb un “Out of influence area” Imatge 3-7 (e) la pluja ja ha arribat a tots els pluviòmetres i els centres de massa són més pròxims. No passa el mateix per les velocitats; Imatge 3-7 (f) si deixem passar més temps es veu com els CM són pràcticament coincidents encara que no és així amb les velocitats; Imatge 3-7 (g) trajectòries dels CM dels dos mètodes. De color verd la calculada segons els punts de la xarxa numèrica de 300 per 300 metres. Es pot apreciar al principi i al final de la trajectòria una desviació de la línia programada. En blau i de gruix fi la trajectòria de CM calculat segons els valor de pluja assolits als pluviòmetres. En blau i de traç gruixut la línia entre la primera i la última posició del CM calculat segons els valor de pluja assolits als pluviòmetres.



Imatge 3-7 Càlcul de la velocitat utilitzant el mètode del centre de masses.

3.5. Descripció del mètode de càlcul de la velocitat

Els mètodes directes i de correlació tenen en comú el mètode de càlcul de la velocitat de la pluja. Inicialment fem el seguiment d'alguna característica temporal del patró de la precipitació. L'instant de temps (t) en què es dona la característica estudiada és assignat a unes coordenades espacials bidimensionals (\vec{r}), la posició de cada pluviòmetre o la distància entre pluviòmetres, de forma que construïm un vector tridimensional (\vec{r}, t) que es podrà pensar com un punt d'un espai

tridimensional on les seves components representen magnituds diferents. Obtindrem diferents d'aquests punts als què ajustarem un pla de la forma

$$t = ax + by + c \quad t = f(x, y) \quad (3.10)$$

d'on obtindrem la velocitat de la pluja tal com explicarem més endavant.

3.5.1. Mètodes directes: obtenció dels instants t_k

Per cada pluja del pluviòmetre k , se li assigna un valor del temps t_k en què es dona la característica estudiada.

CENTROIDE de la pluja

Calculem el temps t_k pel pluviòmetre k com la mitjana de tots els temps de la pluja d'aquest pluviòmetre amb els pesos proporcionats pels volums de la precipitació de la pròpia pluja (Figura 3-2)

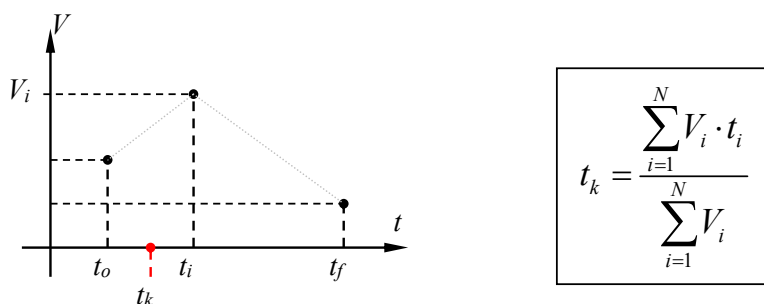


Figura 3-2 Mètode per calcular el centroide temporal del pluviòmetre k

El valor de temps assignat al pluviòmetre k no té perquè coincidir amb cap dels valors originals de la pluja i cal destacar que és un paràmetre només calculable quan tinguem tots els valors de la pluja, el què sens dubte li dona un caràcter estadísticament robust.

Primer màxim de la pluja

Continuem pensant en la representació gràfica dels volums d'una pluja captats pel pluviòmetre k (Figura 3-3). Diem que és el mètode del "primer" màxim ja que si es presenten dos o més màxims absoluts, triarem el primer d'ells. La definició de com fem la tria és la següent, triem aquell valor del temps, t_k , tal que el volum de pluja recollit V_k en aquest interval de temps és el més gran de tots els recollits, $t_k/V_k \geq V_i \quad \forall i$. Si hi ha més d'un valor de màxim ($t_{k1}; t_{k2}; \dots t_{kJ}$ amb $t_{k1} < t_{k2} < \dots < t_{kJ}$) agafem el primer ($t_k = t_{k1}$)

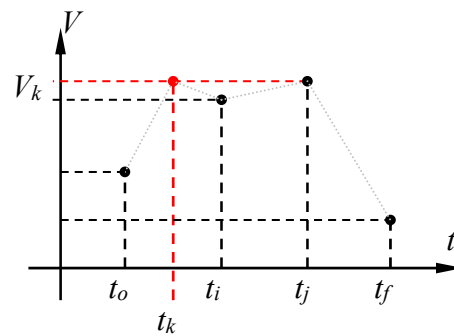


Figura 3-3 Mètode per calcular el primer màxim temporal del pluviòmetre k

Començament de la pluja

Triem per t_k pel pluviòmetre k , el primer instant on el volum d'aigua recollit pel pluviòmetre és diferent de zero $t_k/V_k > 0$. Aquesta propietat física sembla a totes llums molt feble en el seu concepte; es podria fer un altre definició demanant, per exemple, que durant un període de temps “curt” tinguéssim pluja continuadament. En mètodes posteriors, amb els filtres temporal, enfortirem aquesta definició. Aquest valor temporal no coincidirà, en general, amb el temps de començament de la pluja, t_0 ja que aquest té un altre definició en relació a la pluja de tot el conjunt de pluviòmetres.

3.5.2. Obtenció dels instants t_k amb els mètodes de correlacions

Aquests mètodes estan basats en l'estudi de la *correlació de Pearson* (que anomenarem simplement com correlació a partir d'aquest moment) entre els valors de les precipitacions entre dos pluviòmetres. Ja que en aquests mètodes estudiarem una propietat que depèn de dos pluviòmetres simultàniament, hem d'abandonar l'espai físic real de la situació dels pluviòmetres [les coordenades (x_k, y_k)] i hem d'utilitzar l'espai de les “*distàncies entre pluviòmetres*”. Construïm els vectors distància entre els pluviòmetres k i j en la forma habitual $\vec{d}_{jk} = \vec{r}_k - \vec{r}_j$ és evident que $\vec{d}_{kj} = -\vec{d}_{jk}$ on $d_{kj} (= d_{jk})$ representarà la distància entre els pluviòmetres j i k . Si N és el nombre d'estacions de les quals disposem informació, passem de tenir un màxim de N punts per la construcció del pla de regressió a tenir-ne N^2 . A cada un d'aquests vectors \vec{d}_{jk} l'associem un temps t_{jk} que és el desfasament temporal entre les dades pluviomètriques dels dos pluviòmetres en estudi que proporciona el valor de la correlació més alt entre aquestes dades (Upton, 2002) (Lo Conti, et al., 2009)

En primer lloc assignem a la variable aleatòria independent X els valors de la precipitació del pluviòmetre j per totes les dades disponibles de la pluja en estudi; si disposem de f dades

$$X(i) = V(i,j) \quad i = 1, \dots, f \quad (3.11)$$

A continuació assignem a la variable aleatòria dependent Y els valors de la precipitació del pluviòmetre k per totes les dades disponibles de la pluja en estudi; que són les mateixes f d'abans

$$Y(i) = V(i, k) \quad i = 1, \dots, f \quad (3.12)$$

Recordem que els diferents valors de i representen els diferents valors del temps en què tenim la informació de la precipitació. Si diem que el primer valor de precipitació el tenim per $t = t_0$ i que estem estudiant pluges amb un pas de temps Dt , l'índex $i = 1$ farà referència al temps t_0 ; l'índex $i = 2$ farà referència al temps $t_0 + Dt$; $i = 3$ farà referència al temps $t_0 + 2 \cdot Dt$; queda clar que, en general, l'índex i fa referència al temps $t_0 + (i - 1) Dt$.

En aquest punt calculem la correlació $r(j, k, 0)$ entre les variables aleatòries X i Y per les f parelles de punts

$$(X(i), Y(i)) \quad i = 1, \dots, f \quad (3.13)$$

Definint i anomenant

$$\begin{aligned} SX &= \sum_{i=1}^f X(i); & SY &= \sum_{i=1}^f Y(i); & SXY &= \sum_{i=1}^f X(i)Y(i); & SX^2 &= \sum_{i=1}^f X(i)^2; \\ & & SY^2 &= \sum_{i=1}^f Y(i)^2 \end{aligned} \quad (3.14)$$

el coeficient de correlació el calculem com

$$r(j, k, 0) = \frac{f SXY - SX SY}{\sqrt{(f SX^2 - SX^2)(f SY^2 - SY^2)}} \quad (3.15)$$

En aquest primer càlcul les variables X i Y estan aparellades pel mateix instant d'índex i de la pluja.

Al següent pas canviem l'assignació de valors de la variable Y (mantenim l'assignació de la variable X) i la desfases en un pas de temps d'estudi, per tant perdem una parella de dades.

$$Y(i) = V(i+1, k) \quad i = 1, \dots, f-1 \quad (3.16)$$

Tornem a calcular la correlació $r(j, k, 1)$ entre les variables aleatòries X i Y però ara pels $f-1$ punts.

Iterem aquest procés d'assignació de valors desfasats a la variable Y i càlcul de la correlació entre les variables aleatòries X i Y . Les iteracions les aturem quan tinguem menys de 10 parelles de punts, estrictament serien necessaris només 3 punts per poder calcular una correlació però hem cregut que els resultats seran estadísticament més robustos si no fem correlacions amb menys de

10 punts. No hem fet cap estudi per ratificar la validesa d'aquesta afirmació, a part del que ens indica el sentit comú.

La iteració de pas l es pot caracteritzar de la forma següent

$$\left. \begin{array}{l} X(i) = V(i, j); \quad i = 1, \dots, f \\ Y(i) = V(i + l, k); \quad i = 1, \dots, f - l \end{array} \right\} \Rightarrow r(j, k, l) \quad (3.17)$$

Calculats tots els possibles coeficients de correlació $r(j, k, l)$, ens fixem en el màxim, que es produirà per un determinat desfasament temporal a l'assignació de la variable Y i per tant per un determinat valor de l . Si aquest màxim de correlació és superior a un determinat límit, de moment establert de forma arbitrària per cada conjunt de pluges (0.9 per les pluges de disseny i 0.7 per les reals) assignem al vector distància entre els pluviòmetres \vec{d}_{jk} el temps de desfasament $l \cdot Dt$ per crear el núvol tridimensional de punts

$$(\vec{d}_{jk}, l \cdot Dt) = (d_{jk;X}, d_{jk;Y}, l \cdot Dt) \quad (3.18)$$

A priori aquests punt no tenen que presentar cap mena de simetria respecte de les distàncies

$$(\vec{d}_{jk}, l \cdot Dt) \neq (\vec{d}_{kj}, l \cdot Dt) \quad (3.19)$$

fins i tot pot existir un i no l'altre.

Tanmateix podem afirmar que les dades d'un pluviòmetre estaran correlacionades de forma màxima amb les d'ell mateix per l'instant $t = 0s$ amb coeficient de correlació igual a 1; per tant un punt experimental, garantit per tots els pluviòmetres, serà el $(\vec{d}_{jj}, 0s) = (0m, 0m, 0s)$

Aquest motiu fa que, a la pràctica, les correlacions les comencem a calcular per $t = l \cdot Dt$.

Per visualitzar numèricament les diferents maneres d'assignar els temps a cada pluviòmetre i per cada mètode, a l'annex F presentem un exemple numèric d'assignació dels diferents temps pels diferents mètodes de càlcul.

3.6. El càlcul de les velocitats

Un cop coneixem els instants del temps d'interès per cada pluviòmetre, k , o parella, jk , i hem construït el conjunt de vectors tridimensionals (\vec{r}_k, t_k) i/o (\vec{d}_{jk}, t_{jk}) ajustarem a tots ells un pla, de la forma (3.10)

$$t = ax + by + c \quad t = f(x, y) \quad (3.20)$$

d'on podrem obtenir la velocitat bidimensional de la pluja.

3.6.1. Càlcul dels paràmetres a , b i c

Mètode sense restriccions

En quatre dels cinc mètodes que utilitzem, els directes i el de correlació sense obligar a passar per l'origen, utilitzem el mètode d'ajust per mínims quadrat, que garanteix que la suma dels quadrats de les distàncies entre pla i punts (S) sigui mínima. Aquesta condició ens permetrà l'obtenció dels paràmetres a , b i c . Els càlculs següents els farem pensant que el vector posició del pluviòmetre és $\vec{r}_k = (x_k, y_k)$; $k = 1, \dots, K$ i encara que el vector de distàncies \vec{d}_{jk} té dos subíndex $k = 1, \dots, K$ i $j = 1, \dots, K$ podrem adaptar de forma natural les equacions obtingudes.

Sigui

$$S = \sum_{k=1}^K (t(x_k, y_k) - t_k)^2 \quad (3.21)$$

la suma dels quadrats de les distàncies entre pla i punts, on t_k és la part temporal del vector i $t(x_k, y_k) = a \cdot x_k + b \cdot y_k + c$ el valor temporal proporcionat pel pla a la posició del pluviòmetre k . Minimitzem S com a funció dels valors a , b i c :

$$S = \sum_{k=1}^K (t(x_k, y_k) - t_k)^2 = \sum_{k=1}^K (a \cdot x_k + b \cdot y_k + c - t_k)^2; 0 = \frac{\partial S}{\partial a}; 0 = \frac{\partial S}{\partial b}; 0 = \frac{\partial S}{\partial c} \quad (3.22)$$

si definim els sumatoris de forma compacta

$$\begin{aligned}
 S_x &= \sum_{k=1}^K x_k; & S_y &= \sum_{k=1}^K y_k; & S_t &= \sum_{k=1}^K t_k; & S_{xx} &\equiv \sum_{k=1}^K x_k^2; & S_{yy} &\equiv \sum_{k=1}^K y_k^2 \\
 S_{xy} &= S_{yx} \equiv \sum_{k=1}^K y_k x_k; & S_{tx} &\equiv \sum_{k=1}^K t_k x_k; & S_{ty} &\equiv \sum_{k=1}^K t_k y_k
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

i

$$DEM \equiv \det \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_x \\ S_{xy} & S_{yy} & S_y \\ S_x & S_y & K \end{bmatrix} \tag{3.24}$$

tenim pels paràmetres que defineixen el pla

$$a = \frac{\det \begin{bmatrix} S_{tx} & S_{xy} & S_x \\ S_{ty} & S_{yy} & S_y \\ S_t & S_y & K \end{bmatrix}}{DEM}; \quad b = \frac{\det \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{tx} & S_x \\ S_{xy} & S_{ty} & S_y \\ S_x & S_t & K \end{bmatrix}}{DEM}; \quad c = \frac{\det \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{tx} \\ S_{xy} & S_{yy} & S_{ty} \\ S_x & S_y & S_t \end{bmatrix}}{DEM} \tag{3.25}$$

Mètode amb la restricció (0 m, 0 m, 0 s)

Pel mètode de correlacions, una correlació certa i màxima, és la que tindran les dades d'un pluviòmetre amb elles mateixes, això ens garanteix que per tots els $\vec{d}_{kk} = (0, 0)m$ tindrem un desfament temporal nul $t_{kk} = 0s$ el què indica que el pla no tindrà terme independent o el què és el mateix $c = 0$ i $t = ax + by$; $t = t(x, y)$

Podem adaptar les nostres equacions anteriors per aquest cas

$$S = \sum_{k=1}^K (t(x_k, y_k) - t_k)^2 = \sum_{k=1}^K (a \cdot x_k + b \cdot y_k - t_k)^2; \quad 0 = \frac{\partial S}{\partial a}; \quad 0 = \frac{\partial S}{\partial b} \tag{3.26}$$

d'on ara obtenim un sistema de dos equacions amb dues incògnites, a partir del qual determinem els paràmetres a i b

$$a = \frac{\det \begin{bmatrix} S_{tx} & S_{xy} \\ S_{ty} & S_{yy} \end{bmatrix}}{\det \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{xy} & S_{yy} \end{bmatrix}}; \quad b = \frac{\det \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{tx} \\ S_{xy} & S_{ty} \end{bmatrix}}{\det \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{xy} & S_{yy} \end{bmatrix}} \tag{3.27}$$

Rebuig de dades poc significatives o dubtoses

Treballar amb les dades directes obtingudes dels pluviòmetres pot proporcionar una sèrie de correlacions entre les dades que siguin poc significatives, amb coeficients de correlació petits.

Inicialment utilitzarem el mètode de “correlació creuada” per poder identificar dades poc significatives.

Un cop calculades totes les correlacions entre tots els pluviòmetres (k_i, k_j) i per tots els gaps temporals $(RetarD)$, els guardem a la variable $CorrelaCio(k_i, k_j, RetarD)$. Assignem a cada pluviòmetre (k_i) la mitjana de les correlacions de la resta de pluviòmetres, que denotem per $CorrelaCioMIG(k_i, RetarD)$,

$$CorrelaCioMIG(k_i, RetarD) = \frac{1}{K-1} \sum_{\forall j \neq i} CorrelaCio(k_i, k_j, RetarD) \quad (3.28)$$

A una pluja força uniforme, aquestes mitjanes haurien de ser semblants, per tant si obtenim alguns valors molt diferents ens pot fer sospitar que estem tractant amb valors de baix valor estadístic i que seria millor obviar-los.

Definim com $CorrelaCioMIG(-k_i, RetarD)$ a la mitjana de les correlacions mitjanes de tots els pluviòmetres (k_i) menys el propi k_i

$$CorrelaCioMIG(-k_i, RetarD) = \frac{1}{K-1} \sum_{\forall j \neq i} CorrelaCioMIG(k_j, RetarD) \quad (3.29)$$

Calculem la corresponent variància, que anomenem $S2CoR(-k_i, RetarD)$

$$S2CoR(-k_i, RetarD) = \frac{\sum_{\forall j \neq i} (CorrelaCio(k_i, k_j, RetarD))^2 - (K-1) \cdot CorrelaCioMIG(-k_i, RetarD)^2}{K-1} \quad (3.30)$$

Poca cosa podem dir de la distribució estadística de la variable $CorrelaCioMIG(k_i, RetarD)$ però podem construir una variable $Zc(k_i, RetarD)$ normalitzada, de la forma

$$Zc(k_i, RetarD) = \frac{CorrelaCioMIG(k_i, RetarD) - CorrelaCioMIG(-k_i, RetarD)}{\sqrt{S2CoR(-k_i, RetarD)}} \quad (3.31)$$

que per una pluja homogènia podem estar raonablement segurs que serà simètrica, de mitjana nul·la i de variància 1. Rebutjarem qualsevol informació de l'estació k_i pel retard temporal $RetarD$ si l'estadístic $Zc(k_i, RetarD)$ és menor que -3 . Aquest límit és estrictament arbitrari, però esta basat en què estem treballant amb una distribució que se sembla molt a una *distribució t*. Per aquest retard temporal tornarem a refer tots els càlculs però per una estació menys: $(K) \rightarrow (K-1)$

Un cop tots els punts han passat l'anterior filtre i ja tenim el núvol de punts (\vec{d}_{jk}, t_{jk}) apliquem els mètodes sense restriccions o amb restriccions descrits anteriorment,

$$t(x_k, y_k) = a \cdot x_k + b \cdot y_k + c$$

on tindrem els valors de a , b i c : (3.25) o (3.27) i podem representar el pla d'ajust (Figura 3-4)

Aquest pas està pensat per poder eliminar informació dels pluviòmetres que encara que sigui acceptable des del punt de vista de les correlacions no tingui sentit físic. Imaginem que tenim una tempesta amb dos pics de pluja i que un pic passa per sobre del pluviòmetre k_i sense passar després pel pluviòmetre k_j i al cap d'un temps el segon pic de pluja passa pel pluviòmetre k_j sense passar pel k_i . Aquestes dues informacions de la pluja estaran molt correlacionades però no seran correctes per determinar la velocitat de la pluja.

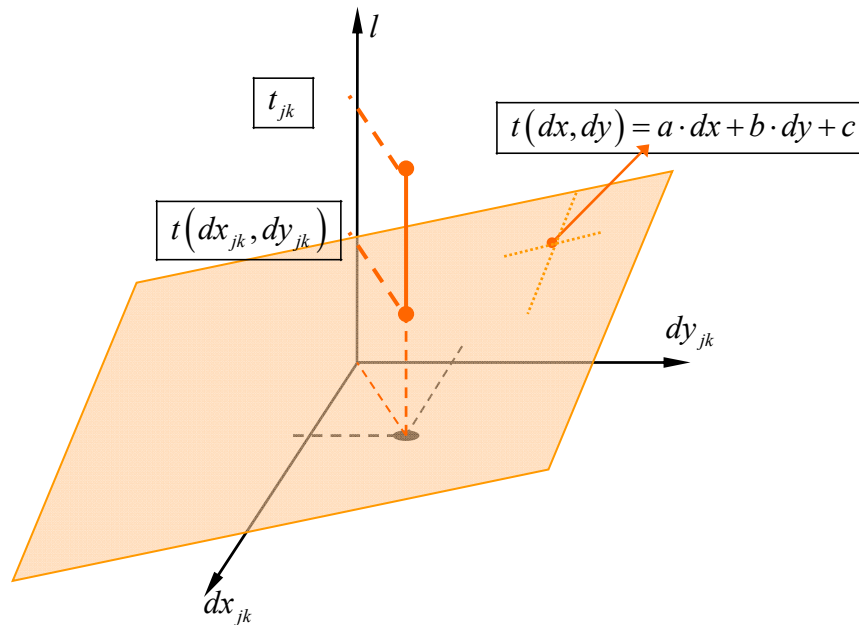


Figura 3-4 Representació esquemàtica dels punts i del seu pla d'ajust

A continuació calculem les diferències (desviacions) entre els valors experimentals t_{jk} i els valors obtinguts per medi de l'equació del pla

$$t(dx_{jk}, dy_{jk}) = a \cdot dx_{jk} + b \cdot dy_{jk} + c \quad (3.32)$$

que designem per ε_{jk}

$$\varepsilon_{jk} \equiv t_{jk} - t(dx_{jk}, dy_{jk}) = t_{jk} - a \cdot dx_{jk} - b \cdot dy_{jk} - c \quad (3.33)$$

assignem a cada un dels pluviòmetres la suma dels quadrats de les desviacions on ell està involucrat i ho designem per L_j

$$L_j = \sum_{k \neq j} \varepsilon_{jk}^2 = \sum_{k \neq j} (t_{jk} - a \cdot dx_{jk} - b \cdot dy_{jk} - c)^2 \quad (3.34)$$

calculem la mitjana \bar{L} i la desviació estàndard S_L del conjunt de punts $\{L_j\}$ i definim l'estadístic z_j com

$$z_j \equiv \frac{L_j - \bar{L}}{S_L} \quad (3.35)$$

Encara que no sapiguem exactament quin tipus estadístic representa concretament z_j podem pensar que pot ser aproximadament normal. Per tant valors extremadament alts per aquest estadístic ens donarien a entendre que les informacions associades al pluviòmetre j no són del tot correctes. La literatura proposa que si $z_j > 3$ no tinguem en consideració la informació d'aquesta estació. Ja que el numerador de z_j tant pot ser positiu com negatiu nosaltres posem el límit en la condició $|z_j| > 3$

Els càlculs per determinar la velocitat de propagació de les pluges (el mòdul, la direcció i el sentit) són qualsevol cosa menys lineals, on potser seria raonable aplicar els mètodes de propagació d'errors per determinar els intervals de confiança pels resultats de les velocitats. Hi ha autors que proposen mètodes per estimar aquests errors; proposem adaptar el mètode de (Upton, 2002) als nostres futurs treballs.

(Upton, 2002) proposa un enginyós mètode experimental per poder estimar aquests errors: suposem que les nostres estacions de recollida d'aigua tinguessin una sensibilitat la meitat de la que tenen (recordem que la sensibilitat dels nostres pluviòmetres és de 1 dmm de precipitació; si reduïm la sensibilitat a la meitat, realitzarien una bolcada cada 2 dmm) els nostres fitxers de pluja quedarien, aproximadament, reduïts a la meitat de valors. Això si, podríem construir el doble de fitxers d'informació. Pensem en la informació que ens proporciona un pluviòmetre tal com la mostrem a la Taula 3-3. són els temps en què s'han produït les bolcades "originals"

Instant de temps en el que es produeix la bolcada		Volum total recollit (dmm)	
t	hh:mm:ss	t(s)	
	0:01:00	60	1
	0:03:00	180	2
	0:04:00	240	3
	0:06:00	360	4
	0:07:00	420	5
	0:08:00	480	6
	0:12:00	720	7
	0:14:00	840	8
	0:19:00	1140	9
	0:20:00	1200	10
	0:21:00	1260	11
	0:22:00	1320	12

Taula 3-3 Exemple de dades originals de bolcades amb sensibilitat original, on una bolcada representa un volum d'1 dmm

En disminuir la sensibilitat de recollida d'aigua podem fabricar dos fitxers d'informació de la pluja, per exemple, el de les bolcades parelles i els de les bolcades senars.

Meitat de sensibilitat; parell = 0				Meitat de sensibilitat; senar = 1			
t	hh:mm:ss	t(s)	Volum total recollit (dmm)	t	hh:mm:ss	t(s)	Volum total recollit (dmm)
	0:03:00	180	2		0:01:00	60	1
	0:06:00	360	4		0:04:00	240	3
	0:08:00	480	6		0:07:00	420	5
	0:14:00	840	8		0:12:00	720	7
	0:20:00	1200	10		0:19:00	1140	9
	0:22:00	1320	12		0:21:00	1260	11

Taula 3-4 Instants de les bolcades parelles i bolcades senars on ara pensem que cada bolcada representen 2 dmm

i amb aquestes noves dades podríem calcular “dos velocitats” una utilitzant les dades parelles i un altre amb les senars Taula 3-4 . Ja que aquesta descomposició es podrà fer per tots els K pluviòmetres podrem combinar les dades dels diferents fitxers de 2^K maneres diferents i calcular unes altres tantes velocitats. Un cop fets tots aquest càlculs podrem fer una estadística amb moltíssimes dades per trobar una velocitat mitja amb una desviació estàndard i pensar que aquesta desviació és la que regirà el nostre càlcul primigeni amb totes les dades. Cal pensar que estem treballant amb uns 20 pluviòmetres per cada pluja, el què ens faria calcular un total de 2^{20} resultats (1048576 resultats) que estarien absolutament fora de l'abast de les nostres eines de càlcul. Altres autors tampoc fan tots els càlculs possibles i ens diuen que realitzen uns 500 càlculs per obtenir cada resultat.

Per un futur proper proposarem el següent mètode de treball: pensem que tenim dades de 20 pluviòmetres ($K = 20$) Fem les descomposicions parell/senar per cada pluviòmetre que les anomenem 0/1. Triarem al atzar un total de, per exemple, $2^4 = 16$ d'aquestes composicions, per exemple $\{00111101010011000110\}$ $\{1010001110011101010\}$ i per cada una d'aquestes configuracions calcularem la velocitat. Fem una estadística $\langle v \rangle$ i σ_v . Continuarem triant configuracions i fent els càlculs fins que per les dos últimes configuracions triades les velocitats calculades v_f estiguin a l'interval $[\langle v \rangle - \sigma_v, \langle v \rangle + \sigma_v]$ Aquest seria l'interval de confiança dels nostres càlculs. Amb tot, aquest procediment podria no tenir final (a part de esgotar totes les possibles configuracions) en aquest cas podríem ser més laxes en la condició per finalitzar la iteració i ampliar el nostre interval de confiança en la forma $[\langle v \rangle - \alpha \sigma_v, \langle v \rangle + \alpha \sigma_v]$ amb $\alpha = 2$ ó 3 .

Nosaltres posarem a prova els nostres mètodes de càlcul amb l'estudi de les pluges de disseny on serem capaços d'obtenir uns bons nivells de confiança pels resultats.

3.6.2. La velocitat, interpretació física dels paràmetres del pla; valors a, b i c

Conegut el pla (3.10) o (3.20)

$$t = ax + by + c \quad \text{o} \quad t = ax + by \quad (3.36)$$

ajustat al núvol de punts

$$(\vec{r}_k, t_k) \quad \text{i/o} \quad (\vec{d}_{jk}, t_{jk}) \quad (3.37)$$

la velocitat associada a la pluja es calcula com (Imatge 3-3)

$$v = \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad \tan \theta = \frac{b}{a} \quad (3.38)$$

Passem a deduir aquestes expressions.

Mètode d'ones planes

Ens basem en el coneixement que tenim sobre propagació d'ones planes bidimensionals. La idea bàsica consisteix en pensar que la pluja es desplaça a velocitat constant

$$\vec{v} = v_x \vec{i} + v_y \vec{j} \quad (3.39)$$

tal com ho faria una *ona plana*, per exemple harmònica. La fase d'aquesta farà el paper del pla d'ajust

$$\varphi = \vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \varphi_0 \Leftrightarrow t = ax + by + c \quad (3.40)$$

Fixem-nos en la part espacial de la fase, on \vec{k} és el vector n° d'ones i \vec{r} el vector posició del punt en estudi

$$\vec{k} \equiv k_x \vec{i} + k_y \vec{j}; \quad \vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j}; \quad \vec{k} \cdot \vec{r} = k_x \cdot x + k_y \cdot y \quad (3.41)$$

i ho comparem amb la part espacial del nostre pla

$$ax + by + c \equiv \vec{k} \cdot \vec{r} + c \quad (3.42)$$

sempre que fem la identificació següent

$$a \equiv k_x; \quad b \equiv k_y \quad (3.43)$$

També hem de veure que identifiquem la “freqüència angular” de la fase de l’ona plana com unitària

$$\omega t = t \Rightarrow \omega = 1 \quad (3.44)$$

i tal com ens diu la teoria de les ones planes, la velocitat de propagació d’una ona d’aquest estil és calculable com

$$v = |\vec{v}| = \frac{\omega}{k} = \frac{\omega}{|\vec{k}|} = \frac{\omega}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}} \Rightarrow v = \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (3.45)$$

la direcció de propagació de la velocitat és la determinada pel vector \vec{k}

$$\vec{k} = (k_x, k_y) \Rightarrow \tan \theta = \frac{k_y}{k_x} \quad (3.46)$$

i com que \vec{k} i \vec{v} són paral·lels

$$\tan \theta = \frac{b}{a} \quad (3.47)$$

Mètode geomètric

Una altre forma d’arribar a aquest resultat, que pot semblar més geomètrica, sense deixar de pensar que en el nostre model de moviment, la pluja es mou com un tot, a velocitat constant \vec{v} . Prenem dos punts, A i B , alineats segons la direcció de propagació de la pluja i separats una distància d (Figura 3-5) Seria raonable pensar que si la pluja triga un temps t en anar del punt A al punt B la velocitat de la mateixa es pugui calcular com d/t .

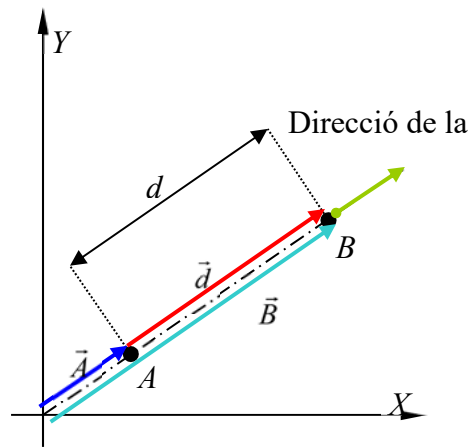


Figura 3-5 Model geomètric per determinar la velocitat

Si coneixem l'equació del pla d'ajust del núvol de punts, podem establir que el temps pel qual la pluja es dona al punt A serà

$$t(A) = ax_A + by_A + c = \vec{k} \cdot \vec{A} + c \text{ on } \vec{k} = (a, b) \text{ i } \vec{A} = (x_A, y_A) \quad (3.48)$$

i el temps en què es donarà al punt B

$$t(B) = ax_B + by_B + c = \vec{k} \cdot \vec{B} + c \text{ on } \vec{B} = (x_B, y_B) \quad (3.49)$$

El temps t per anar del punt A al punt B serà

$$t \equiv t(B) - t(A) = \vec{k} \cdot \vec{B} + c - (\vec{k} \cdot \vec{A} + c) = \vec{k} \cdot (\vec{B} - \vec{A}) = \vec{k} \cdot \vec{d} \quad (3.50)$$

i com que \vec{k} i \vec{d} són paral·lels

$$t = \vec{k} \cdot \vec{d} = k \cdot d \cdot \cos 0^\circ \Rightarrow v = \frac{d}{t} = \frac{1}{k} = \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (3.51)$$

Ara cal veure que segons el model d'ajust d'un pla, tota la pluja es desplaça segons el vector $\vec{k} = (a, b)$. Per demostrar aquest resultat veurem que els punts de l'espai pels quals la pluja es dona al temps t_0 i els punts de l'espai pels quals la pluja es dona al temps t_1 són dues línies paral·leles i perpendiculars al vector \vec{k} (Figura 3-6). Els punts del pla amb un mateix estat de pluja a l'instant t_0 són

$$t_0 = ax + by + c \Rightarrow y = \frac{1}{b}(t_0 - c - ax) = -\frac{a}{b}x + \frac{t_0 - c}{b} \quad (3.52)$$

i a l'instant t_1

$$y = -\frac{a}{b}x + \frac{t_1 - c}{b} \quad (3.53)$$

tenim, doncs, una altre recta amb el mateix pendent (paral·lela) però amb diferent ordenada a l'origen. Per trobar la distància entre aquestes dues rectes caldrà determinar un vector paral·lel a la primera recta, per exemple

$$P_0(t_0):(x_0, y_0) = \left(x_0, -\frac{a}{b}x_0 + \frac{t_0 - c}{b}\right); \quad P_1(t_0):(x_1, y_1) = \left(x_1, -\frac{a}{b}x_1 + \frac{t_0 - c}{b}\right) \quad (3.54)$$

$$\vec{P}(t_0) = "P_1(t_0) - P_0(t_0)" = (x_1 - x_0, y_1 - y_0) = \left(x_1 - x_0, -\frac{a}{b}(x_1 - x_0)\right) = \frac{x_1 - x_0}{b}(b, -a)$$

i ja que estem en dos dimensions, intercanviant components i canviant una de signe tindrem un vector perpendicular

$$\vec{Q}(t_0) = \frac{x_1 - x_0}{b}(a, b) = \alpha(a, b) \quad (3.55)$$

on es veu que aquest vector és paral·lel al “vector n° d'ones” \vec{k} com no podria ser de cap més manera.

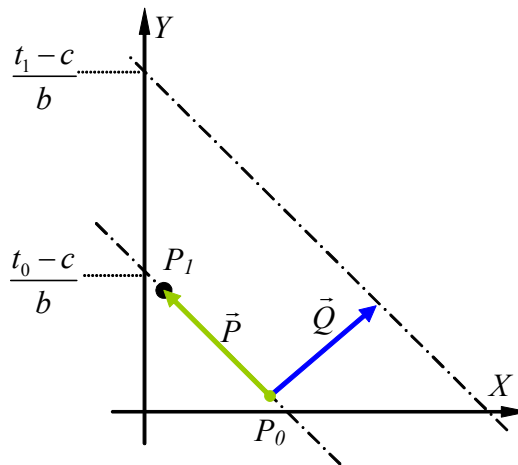


Figura 3-6 Punts de l'espai pels que la pluja es dona per un temps constant (t_0 i t_1)

3.6.3. La bondat de l'ajust

Encara que en la correlació bidimensional planar no tenim un paràmetre com el del coeficient de correlació de Pearson de la correlació lineal, que ens indica de manera absoluta si el lligam entre les variables és bo, hi ha una estimació de l'error que es pot calcular segons la expressió (Viedma, 1972)

$$S_{exy} = \sqrt{\frac{S}{K-3}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K (t(x_k, y_k) - t_k)^2}{K-3}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K (ax_k + by_k + c - t_k)^2}{K-3}} \quad (3.56)$$

Es pot demostrar que S_{exy} és un estimador sense biaix de la desviació típica de la variable $[t/(x,y)]$ que es suposa independent de (x,y)

És evident que si tenim un bon ajust $t(x_k, y_k) \approx t_k$ i S_{exy} tindrà un valor proper a 0. Però per altres valors experimentals podem tenir valors diferents de zero o fins i tot valors “grans” per S_{exy} i no podrem estar segurs de que l’ajust sigui bo o dolent. Tot això es deu a que no hi ha un límit superior per aquest estimador.

(Carbone, et al., 2014) ens proposen un altre mètode per avaluar la bondat de l’ajust; un mètode on el indicador té, en principi, límits superior i inferior. En essència, el mètode considera que els diferents temps que tenim pels diferents pluviòmetre o parelles de pluviòmetres són fluctuacions aleatòries d’un temps únic per tots els pluviòmetres; aquest temps únic serà la mitjana dels temps experimentals.

Per tant si prenem que a tots els pluviòmetres els temps és

$$T_0 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K t_k \quad (3.57)$$

no deixa de ser com si tinguéssim un pla d’ajust horitzontal de temps T_0 al què podem calcular la bondat de l’ajust, com a qualsevol altre pla

$$S_0 = \sum_{k=1}^K (t(x_k, y_k) - T_0)^2; \quad S_{e0} = \sqrt{\frac{S_0}{K-3}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K (t(x_k, y_k) - T_0)^2}{K-3}} \quad (3.58)$$

Podem veure que, a priori, aquest valor de S_0 és el més gran de tots els possibles S_{exy} i ja que tots dos tenen les mateixes unitats, és doncs molt interessant estudiar la relació entre el paràmetre S_{exy} i S_0 que serà un paràmetre adimensional i amb límit superior de 1, segons el nostre raonament. L’anomenarem el *Significance Ratio* (Carbone, et al., 2014)

$$\text{Significance Ratio} \equiv S.R. \equiv \frac{S_{exy}}{S_0} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K (t(x_k, y_k) - t_k)^2}{\sum_{k=1}^K (t(x_k, y_k) - T_0)^2}} \quad (3.59)$$

on és d’esperar que $0 \leq S.R. \leq 1$. Aquesta afirmació pot fer-se més entenedora, si pensem en un pla horitzontal, que tindrà una equació

$$t = ax + by + c = T_0 \quad \forall(x, y) \Rightarrow a = b = 0; \quad c = T_0 \quad (3.60)$$

i la velocitat associada a aquest pla és

$$v = \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2}} = \infty \quad (3.61)$$

Qualsevol altre valor d' a i de b , per tant qualsevol altre pla, ens proporcionarà una velocitat, òbviament menor. Això ens indica que qualsevol ajust amb $a \neq 0$ i/o $b \neq 0$ serà millor que per valors nuls, per tant $S_{exy} < S_0$.

La literatura proposa acceptar els valor per les velocitats calculats amb aquests mètodes sempre que obtinguem un valor del S.R. inferior a 0.85 (Carbone, et al., 2014)

3.7. Resultats

3.7.1. Les pluges de disseny o de test

A totes les pluges creades, segons els diferents valors dels paràmetres que les defineixen, les hem sotmès als diferents mètodes de càlcul per que ens proporcionin els vectors velocitat associats a les mateixes. El temps que triga els nostre sistema de càlcul (típicament treballem amb un P.C. portàtil HP Compaq 6910p amb sistema operatiu Windows XP SP3, fent córrer un programa de VB6 dins de l'entorn de programació) per fer aquests càlculs és de l'ordre d'una desena d'hores (Figura 3-7)

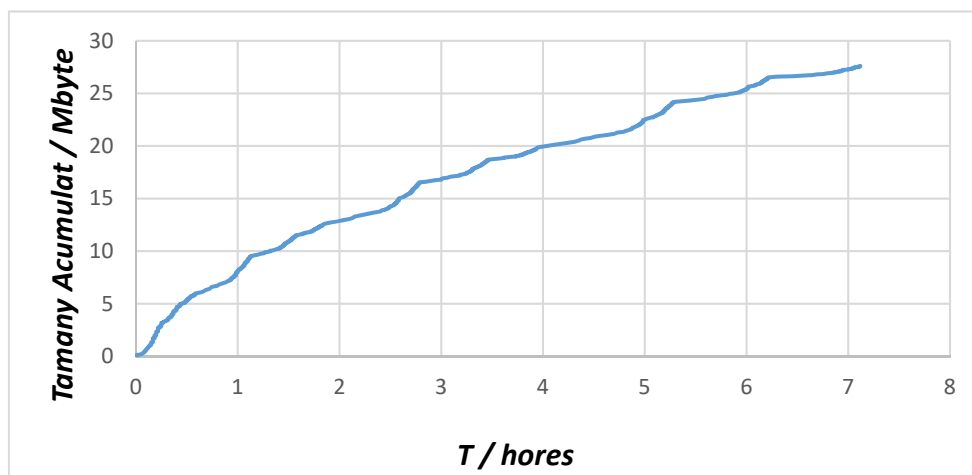
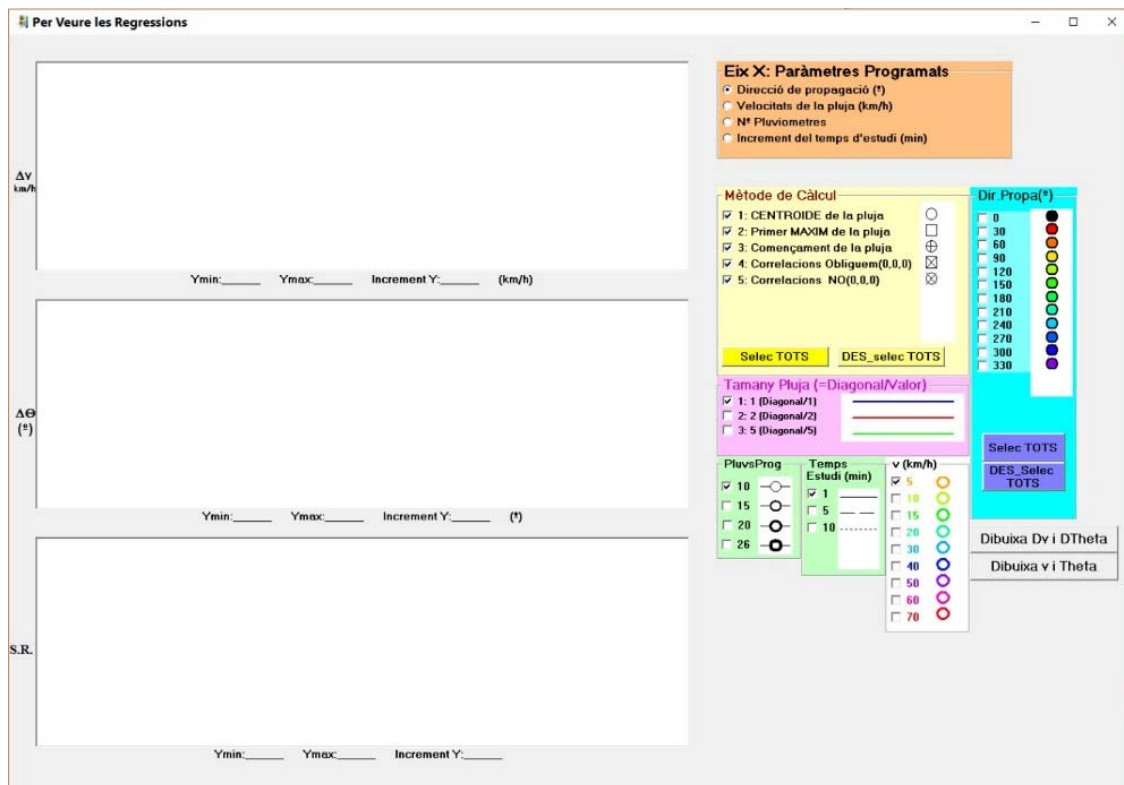


Figura 3-7 Temps de treball del sistema informàtic per generar tots els fitxers de les pluges de disseny i calcular les diferents velocitats. 2354 arxius 27614092 bytes

Esperem que el temps que trigarem en analitzar totes les pluges reals de les que disposem informacions serà del mateix ordre.

En el mateix software de càlcul de velocitat hem desenvolupat un petit entorn gràfic per poder visualitzar els resultats obtinguts per aquestes pluges de disseny (Imatge 3-8)



Imatge 3-8 Entorn gràfic per visualitzar els resultats obtinguts per les pluges de disseny

Podem representar els resultats de cinc paràmetres calculats de les pluges

- el mòdul de la velocitat
- l'angle de la velocitat amb l'eix X
- el S.R. (3.59)
- la diferència entre els valors del mòdul de la velocitat programat i calculat
- la diferència entre les valors dels angles de la velocitat amb l'eix X programats i calculats.

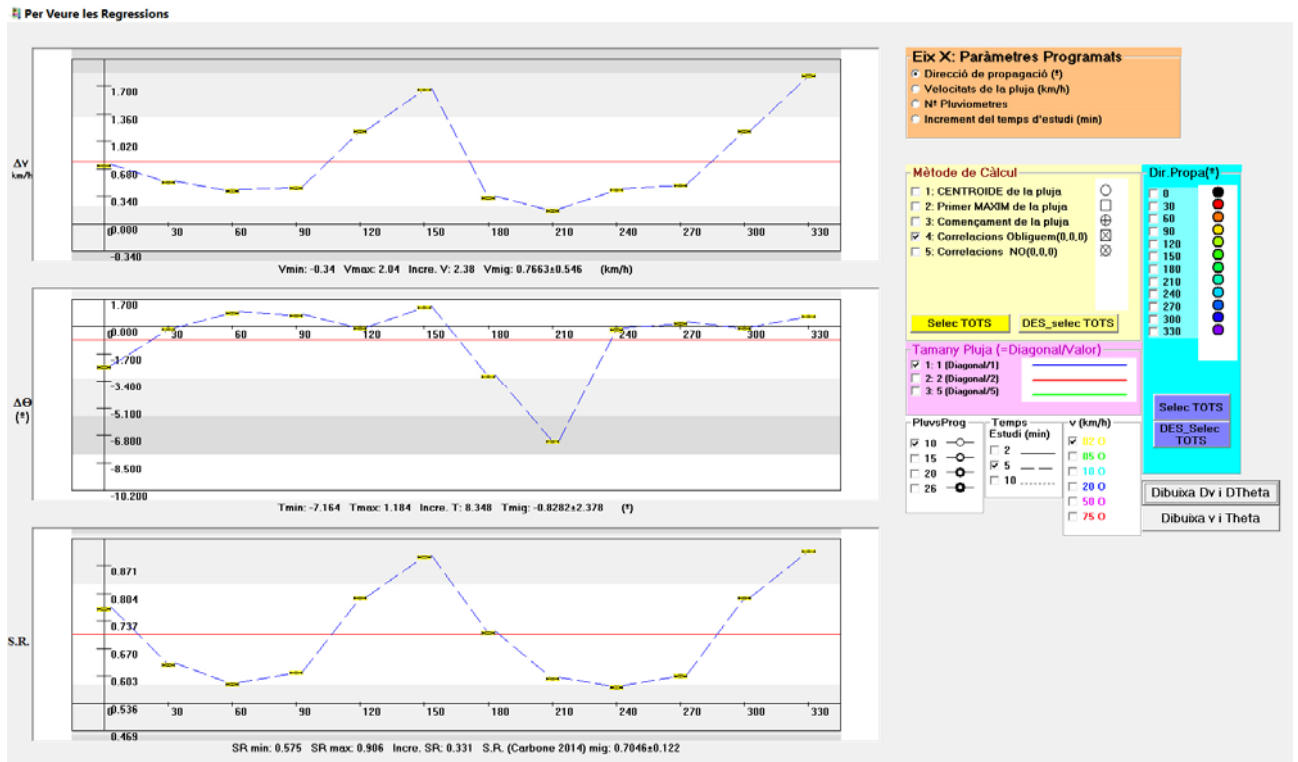
Aquest cinc resultats els podem presentar en funció de quatre variables independents programades

- la direcció de propagació
- el mòdul de la velocitat de propagació
- el nombre de pluviòmetres actius durant la pluja
- l'increment del temps d'estudi de la propagació de la pluja.

La resta de paràmetres que defineixen la pluja són elegibles de forma múltiple amb la resta d'opcions del software.

A la Imatge 3-9 mostrem els resultats del S.R., la diferència entre el mòdul de la velocitat programat i calculat i la diferència entre els angles programats i calculats en funció de la direcció de propagació pel mètode de correlacions obligant al pas pel punt $(0,0,0)$ amb una mida de la pluja

de $f_d=1$ per 10 pluviòmetres actius i per un temps d'estudi dels desplaçaments de la pluja de 5 minuts i amb una velocitat programada de la pluja de 2 km/h



Imatge 3-9 Resultats del S.R., la diferència entre el mòdul de la velocitat i l'angle programats i calculats

Sempre que fem les representacions fem un petit estudi estadístic de les dades representades i calculem per cada gràfica els valors màxim, mínim i mig; aquest últim representat amb una línia vermella i la desviació estàndard de les dades. A les gràfiques (Imatge 3-9) diferenciem tres zones amb diferents colors de fons, blanc, gris clar i gris fosc que representen els intervals

$\bar{Y} \pm \sigma_Y$; $\bar{Y} \pm 2\sigma_Y$ i $\bar{Y} \pm 3\sigma_Y$ respectivament.

Als resultats anteriors i per la gràfica de diferència de velocitat, tenim un valor mig, per aquesta diferència de (0.8 ± 0.5) km/h [entem que seria desitjable $(0 \pm x)$ km/h] i que per 150° i 330° de direcció de propagació es donen les diferències més grans, encara que dins de l'interval de 2σ . A la gràfica de S.R. la interpretació ha de ser forçosament diferent, el valor mig el tenim per (0.7 ± 0.1) . Aquí els valors per sota d'aquesta mitja seran valors acceptables per la velocitat però els valors superiors, estiguin a l'interval que estiguin, no ho seran. En particular els valor per les direccions de propagació de 120° , 150° , 300° i 330° tenen una acceptació dubtosa.

A l'annex G presentem un resum de resultats de les desviacions i del S.R. mitjanats per les diferents direccions de propagació i per un temps d'estudi de les pluges de 5 minuts.

A la Taula 3-5 mostrem el valor mig $\langle S.R. \rangle$, el màxim $S.R_{m\grave{a}x}$ i el número N de punts utilitzat per calcular aquest màxim, pels diferents mètodes de càlcul i encara que a l'Annex G: Resum de resultats de les desviacions i del S.R. mitjanats per les diferents direccions de propagació i per un temps d'estudi de les pluges de 5 minuts. no mostrem els resultats per un temps d'anàlisi de les pluges (DT) de 2 i 10 minuts, si que mostrem aquestes mitjanes

Significance Ratio: S.R.	DT / minuts								
	2			5			10		
	$\langle S.R. \rangle$	$S.R_{m\grave{a}x}$	N	$\langle S.R. \rangle$	$S.R_{m\grave{a}x}$	N	$\langle S.R. \rangle$	$S.R_{m\grave{a}x}$	N
CENTROIDE de la pluja	0.004	0.04	72	0.01	0.10	68	0.01	0.10	60
Primer MAXIM de la pluja	0.07	0.21	72	0.15	0.50	68	0.19	0.75	60
Començament de la pluja	0.19	0.31	72	0.24	0.49	68	0.26	0.67	60
Correlacions entre pluviòmetres	0.43	0.83	64	0.47	0.94	51	0.48	0.89	40
Obliquem a (0,0,0)									
NO obliquem a (0,0,0)	0.30	0.56	72	0.38	0.80	68	0.35	0.79	50

Taula 3-5 Resum de resultats pel S.R. a les pluges de disseny. Es pot observar una gran fiabilitat dels tres primers mètodes de càlcul

Podem veure que els tres primers mètodes són molt fiables, especialment el mètode del *Centroide*. Gairebé totes les dades de $S.R_{m\grave{a}x}$ serien acceptades segons el criteri del 0.85.

Fem un estudi semblant per les diferències de les velocitats (Δv) (Taula 3-6) i per les diferències de les direccions de propagació (Taula 3-7). Presentem els valor mitjos de les magnituds i les seves desviacions. El nombre de punts utilitzat per fer cada càlcul és el mateix que el mostrat anteriorment. Recordem que els valors ideals per la diferència en la velocitat i en la direcció de propagació haurien de ser zero ($\Delta v_{ideal} = 0$; $\Delta \theta_{ideal} = 0$).

Diferència de Velocitat: Δv (km/h)	DT / minuts					
	2		5		10	
	$\langle \Delta v \rangle$	$\sigma_{\Delta v}$	$\langle \Delta v \rangle$	$\sigma_{\Delta v}$	$\langle \Delta v \rangle$	$\sigma_{\Delta v}$
CENTROIDE de la pluja	0.03	0.10	0.02	0.12	-0.03	0.11
Primer MAXIM de la pluja	0.2	1.3	0.4	2.1	0.5	3.6
Començament de la pluja	0.0	2.9	-0.2	2.8	-0.9	2.4
Correlacions entre pluviòmetres	0.95	0.76	0.39	0.59	0.22	0.32
Obliquem a (0,0,0)						
NO obliquem a (0,0,0)	11.7	3.3	21.3	7.1	7.0	4.7

Taula 3-6 Resum de resultats per les diferències de les velocitats programades i calculades a les pluges de disseny.

Pels quatre primers mètodes veiem que els Δv són petits i pràcticament compatibles amb zero ja que els valors de Δv i $\sigma_{\Delta v}$ tenen un ordre de magnitud semblant. De nou el mètode de *Correlació*, ara sense obligar a (0,0,0) és el que presenta valors dispersius més grans. De fet els errors relatius entre les velocitats de la pluja i les calculades són fins i tot de l'ordre del 100% de manera que clarament no reproduïen bé aquest tipus de pluges.

Diferència de direccions de propagació: $\Delta\Theta$ (°)	DT / minuts						
	2		5		10		
	$\langle \Delta\Theta \rangle$	$\sigma_{\Delta\Theta}$	$\langle \Delta\Theta \rangle$	$\sigma_{\Delta\Theta}$	$\langle \Delta\Theta \rangle$	$\sigma_{\Delta\Theta}$	
CENTROIDE de la pluja	-0.04	0.17	0.03	0.27	-0.03	0.29	
Primer MAXIM de la pluja	0.1	1.4	0.2	3.0	0.0	4.5	
Començament de la pluja	-0.3	5.3	-0.3	6.0	0.0	7.0	
Correlacions entre pluviòmetres	Obliquem a (0,0,0)	-0.2	1.3	-0.2	1.4	-0.3	1.5
	NO obliquem a (0,0,0)	-0.2	1.3	-0.2	1.7	-0.2	1.7

Taula 3-7 Resum de resultats per les diferències dels angles de propagació programats i calculats a les pluges de disseny.

A les direccions de propagació (Taula 3-7) veiem que per tots els mètodes obtenim valors de $\langle \Delta\Theta \rangle$ petits però les dispersions més grans les tenim ara pel *Començament de la pluja*. Aquest és un resultat no esperat, ja que fins ara sempre eren els valors de *Correlació* els que donaven les desviacions més grans i més dispersives. Aquest mal comportament del mètode de *Començament de la pluja* ens pot fer replantejar la definició del propi mètode d'elecció del temps (recordem: triem per t_k pel pluviòmetre k, el primer instant on el volum d'aigua recollit pel pluviòmetre és diferent de zero $t_k / V_k > 0$). Encara que no ho hem fet al present treball, podríem imposar una condició més restrictiva sobre el volum d'aigua recollit pel pluviòmetre, en la forma: triem per t_k pel pluviòmetre k, el primer instant on el volum d'aigua recollit pel pluviòmetre en intervals de temps consecutius superi una quantitat límit $t_k / V_k + V_{k+1} + \dots + V_{k+n} > V_{min}$ per un n a determinar.

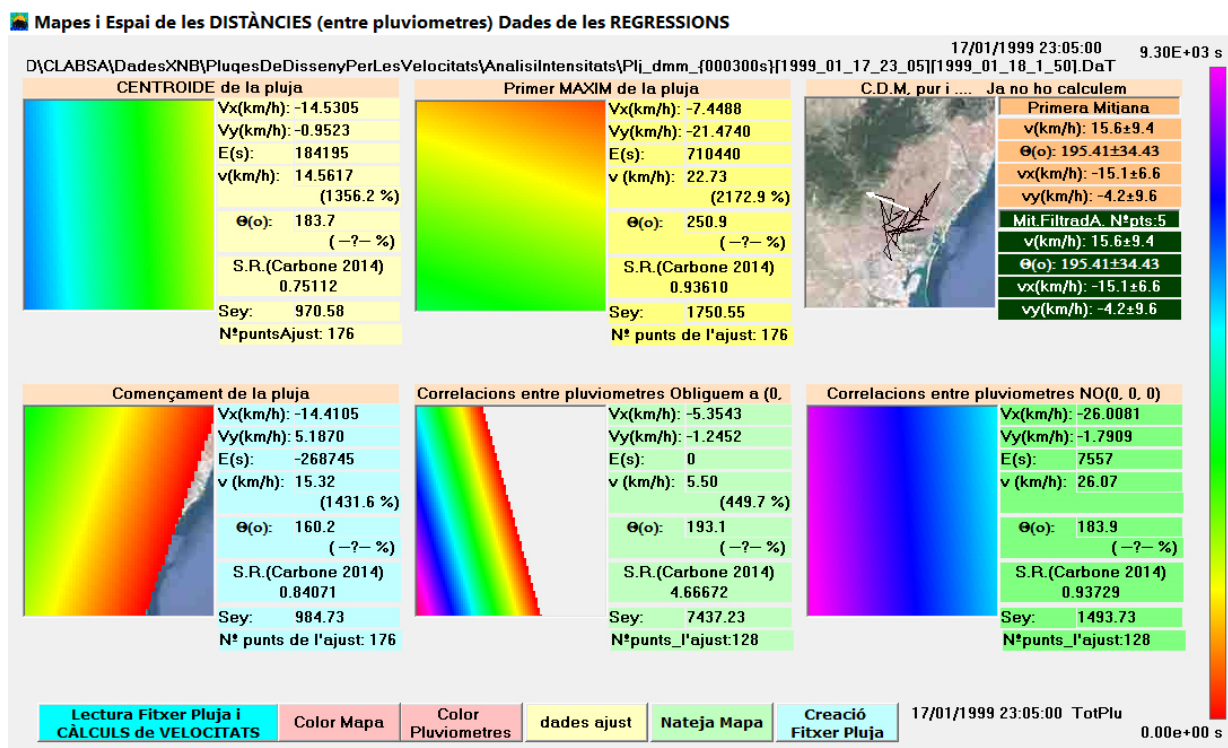
Resumint els resultats obtinguts per totes les pluges de disseny (*Annex G: Resum de resultats de les desviacions i del S.R. mitjanats per les diferents direccions de propagació i per un temps d'estudi de les pluges de 5 minuts.*) podem concloure que els dos mètodes de càlcul de les velocitats basats en les correlacions de les quantitats de pluja entre pluviòmetres són els que donen pitjors resultats. En primer lloc s'observa que els mètodes de correlació aplicats a les pluges de disseny no són gaire fiables ja que el valor de SR és proper o a vegades sobrepassa el límit $SR > 0.85$. En segon lloc s'obtenen errors entre les velocitats de la pluja i les calculades que poden arribar a ser tant grans que clarament podem concloure que no reproduïxen bé aquest tipus de pluges, i per tant les velocitats calculades no es poden considerar correctes.

Dels altres tres mètodes de càlcul, el del centroide és el que dona millors resultats, ja que és el que dona menor error quan l'apliquem a les pluges de disseny (*Annex G: Resum de resultats de les desviacions i del S.R. mitjanats per les diferents direccions de propagació i per un temps d'estudi de les pluges de 5 minuts.*).

3.7.2. Les pluges reals

Una vegada calibrats i testejats, amb les pluges de disseny, els mètodes de càlcul, els aplicarem a les dades de les pluges reals. A l'Annex H: Exemple d'aplicació dels mètodes de càlcul de les velocitats a una pluja real. presentem l'aplicació detallada dels diferents mètodes de càlcul per una pluja concreta; la què es va produir el 17 de gener de 1999 a les 23:05.

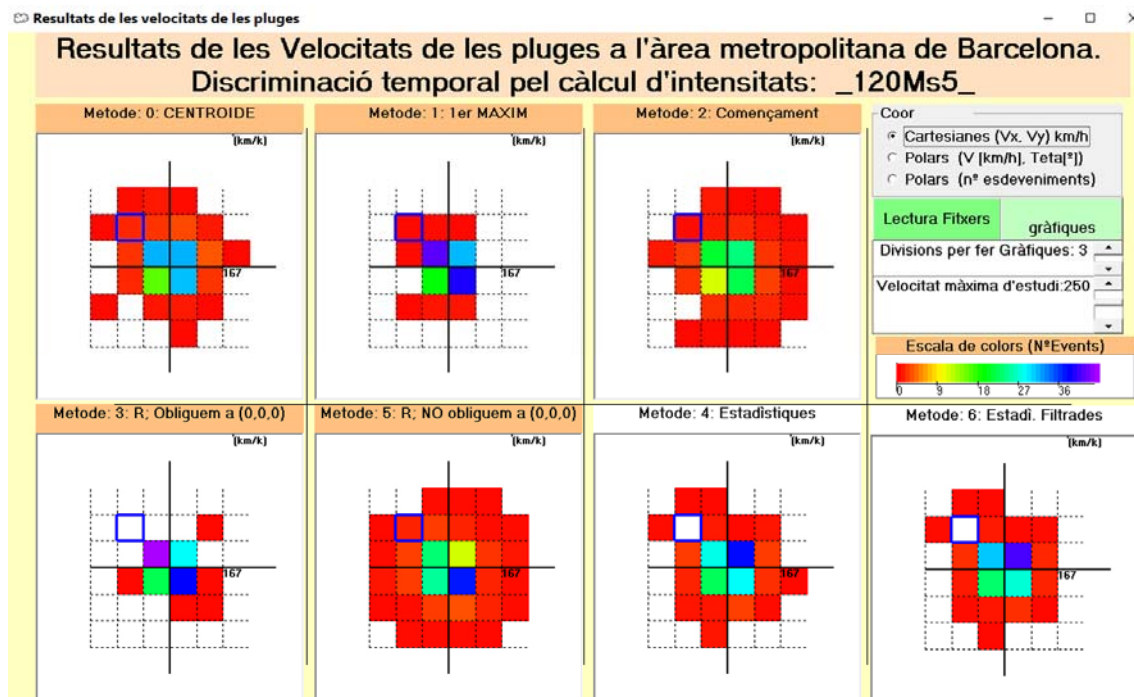
A la Imatge 3-10 presentem la pantalla de resultats que genera el programa, per poder fer un seguiment particular d'una pluja particular en concret o bé per fer el càlcul de tot un conjunt de pluges. Per cada un dels mètodes presentem els resultats numèrics dels plans ajustats als punts de precipitació, així com la seva representació gràfica (tridimensionalitat segons els diferents colors) i el càlcul del Significant Ratio (S.R). També fem una mitjana estadística dels valors proporcionats pels diferents mètodes. Aquesta mitjana no respon a un únic concepte físic; seria normal que la velocitat associada al començament de la pluja i al mètode del centroide, per exemple, ens donin resultats diferents ja que responen a conceptes físics relativament diferents; amb tot si ens féssim o ens fessin la pregunta “Quina és la velocitat d'aquesta pluja” creiem que una bona resposta, a priori, podria ser la mitjana dels valors obtinguts pels diferents mètodes.



Imatge 3-10 Pantalla de resultats de velocitats per la pluja del 17/1/1999 a les 23:05

El temps de càlcul d'aquestes velocitats per les pluges, des de 1994 fins el 2019, és de l'ordre d'uns 300 minuts, per tant relativament breu, el què ens facilitarà el poder iniciar diferents estudis, associats a aquestes dades, per diferents filtres segons la duració, la intensitat i agrupacions temporals d'intensitats. En primer lloc presentem els resultats obtinguts per totes les pluges,

considerant tota la durada de la mateixa (Navarro, et al., 2019). Més endavant filtrarem temporalment aquestes dades per donar resultats de velocitat més acurats i més fidels als conceptes estudiats. Finalment farem un seguiment en detall dels xàfecs extrems de període de retorn 1 any que s'han produït a la ciutat de Barcelona entre 1994 i 2019. Per tal de veure tots aquests resultats hem construït un petit programa que genera uns histogrames amb les dades que li proporcionem (*ProjectResusPluges.vbp*). Presentem els resultats de tots els estudis en forma d'aquests histogrames, amb tres configuracions diferents. Al primer dels histogrames presentats (Imatge 3-12) mostrem els resultats de les velocitats en coordenades cartesianes $\vec{v} = v_x\vec{i} + v_y\vec{j}$ on òbviament v_x es representa a l'eix horitzontal i v_y es representa al vertical. Les magnituds es donen en *km/h* i són modificables per software. Els diferents colors de les gràfiques representen el número d'esdeveniments ocorreguts per cada grup de velocitats. Al segon tipus d'histograma (Imatge 3-13) fem una representació de velocitats en forma polar $\vec{v} = (v, \theta)$ de la forma habitual, v representa el mòdul de la velocitat en *km/h* i θ representa l'angle del vector amb l'eix de les X . El mòdul de la velocitat és modificable per software i els angles els treballem en increments de 15° . Abans d'explicar el tercer tipus de gràfics, fer dos comentaris sobre la representació dels resultats en l'histograma cartesià en relació a l'histograma en polars. A l'histograma cartesià és convenient seleccionar una sensibilitat més gran que en el de polars; si no és fa així els resultats queden massa pixelats tal com podem veure a la Imatge 3-11.

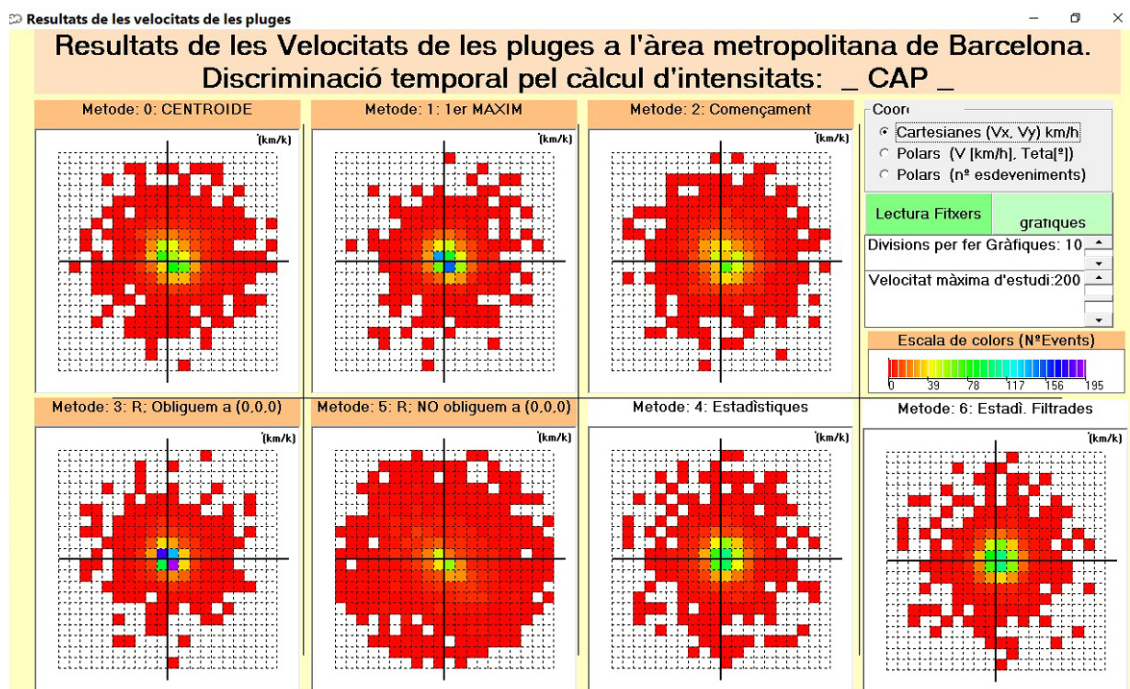


Imatge 3-11 Explicació gràfica de resultats a la pantalla de l'histograma cartesià. Hem pixelat els resultats amb una escala molt poc sensible per poder apreciar l'efecte que volem destacar.

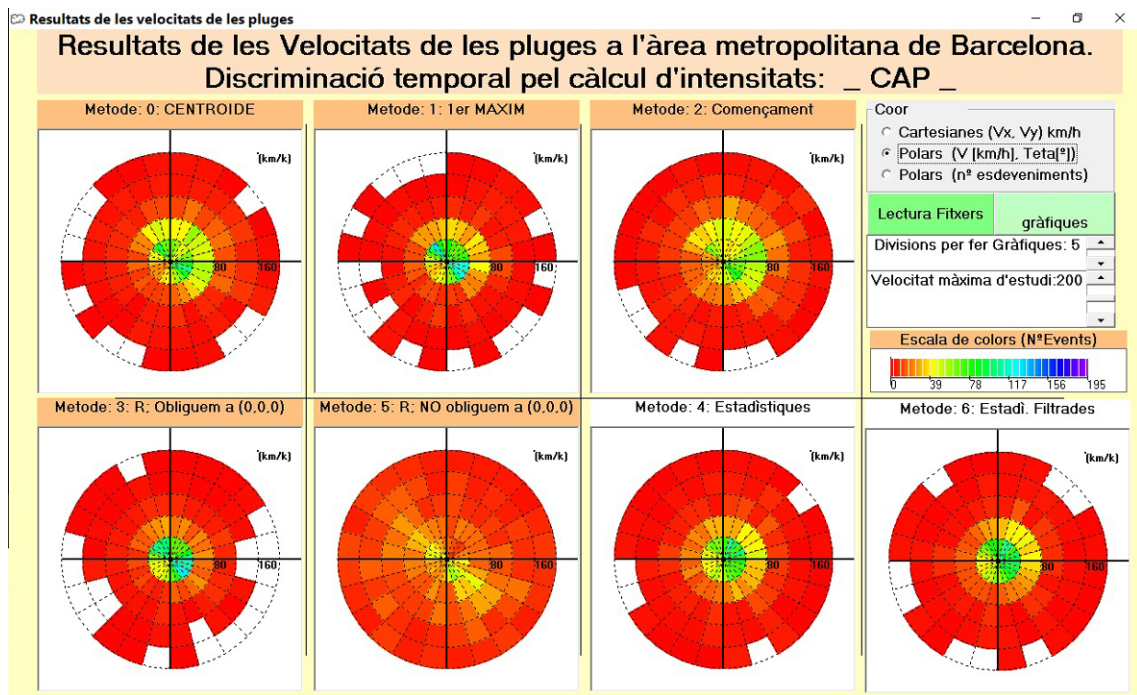
I també fent referència a aquesta Imatge 3-11 no caure en la trampa numèrica, als gràfics del mètodes 4 i 6 que són les mitjanes estadístiques dels altres mètodes. Fixem-nos en el quadre remarcat en blau $(-2v_x, -2v_y)$ que a les estadístiques figura sense cap valor i als càlculs real si que hi han dades. Recordem que les mitjanes es fan sobre els resultats de cada pluja en particular i per tant les mitjanes no tenen per que coincidir amb cap dels valors reals.

L'últim dels histogrames utilitzats (Imatge 3-14) és del tipus rosa dels vents (wind chart) on utilitzem la distància a l'origen com a informació sobre el número d'esdeveniments ocorreguts i de forma additiva i l'angle de la representació és l'associat a l'angle de la velocitat de les coordenades polars; amb increments de 15° .

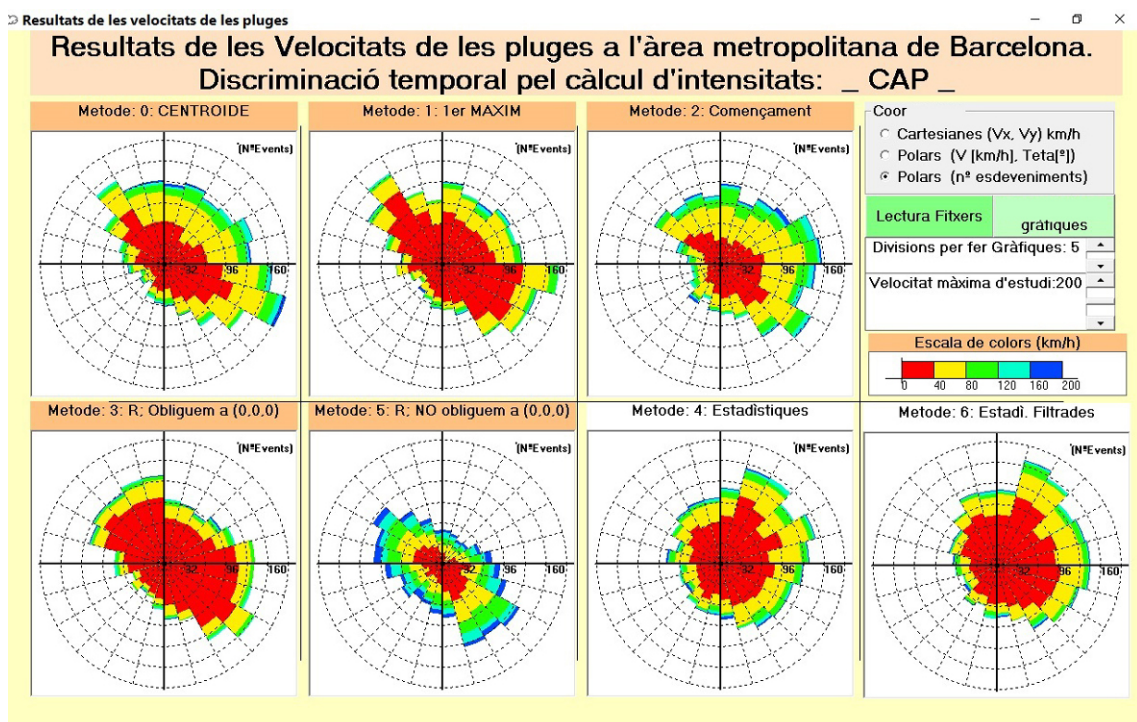
Els tres mètodes són complementaris però creiem que sens dubte és aquest últim (Imatge 3-14) d'on es poden treure més conclusions sobre les propietats físiques de les pluges.



Imatge 3-12 Histograma de resultats de les velocitats obtingudes utilitzant coordenades cartesianes. Presentem les mitjanes estadístiques als dos requadres inferiors de la dreta.



Imatge 3-13 Histograma de resultats de les velocitats obtingudes. Utilitzem coordenades polars.



Imatge 3-14 Histograma de resultats de les velocitats obtingudes. Utilitzem una representació mixta, on la distància a l'origen representa la informació sobre el nombre d'esdeveniments ocorreguts (i de forma additiva) i l'angle de la representació és l'associat a l'angle de la velocitat de les coordenades polars; amb increments de 15°

Veiem a la gràfica (Imatge 3.14), els resultats obtinguts per la totalitat d'episodis i per la totalitat dels mètodes. S'observa que la majoria de les pluges, un 70%, evolucionen o es mouen en el ventall de direccions (135° , 315°) [NO, SE] i molt poques en la direcció de 225° [SO]. Als diagrames

d'estadístiques es pot observar un pic a les direccions d'entre 60° i 75° , mentre que a la resta de direccions es veu un comportament molt homogeni.

Els que anomenem a la gràfica mètodes estadístics (mètodes 4 i 6) es calculen fent la mitjana de les velocitats trobades per tots els mètodes.

3.7.3. Filtres temporals

Les tempestes individuals, és a dir, constituïdes per cèl·lules convectives simples, solen tenir un temps de vida entre 10 i 60 minuts, es mouen segons el vent mitjà i poden unir-se entre si per formar grups de tempestes amb un temps de vida molt més gran i un moviment diferent al de les cèl·lules simples, així com també subdividir-se posteriorment (Wilson, et al., 1998)

En aquests casos estudiar tota la informació de la pluja sense cap filtre ens pot portar a assignar uns valors de velocitat de la pluja que poden ser artificiosos. Per les pluges llargues limitar la informació de la pluja ens pot acostar a valors més realistes de les velocitats calculades. Per tal de poder limitar l'interval de temps en què s'estudien les pluges hem incorporat en el nostre programari el paràmetre *DePlj: Duració efectiva de la pluja (minuts)*, que no és més que la diferència entre el temps més gran i el temps més petit que utilitzem per determinar el pla temporal d'on obtenim les velocitats per tots els mètodes de càlcul.

Som conscients que limitar l'interval de temps en l'estudi de velocitats pot produir valors més grans per les velocitats; només cal pensar en la definició de velocitat, però creiem que amb aquests filtres estudiarem de forma més acurada el fenomen del moviment de la pluja.

Filtres temporals globals

El primer intent per acotar temporalment l'estudi de les pluges llargues respon a la idea d'estudiar l'interval de temps on la pluja és més intensa de manera global, per tots els pluviòmetres actius durant la pluja.

Proposem analitzar només els 125 minuts ($60 + 5 + 60$; aquest valor volem que en un primer estudi sigui molt poc restrictiu, és per això que estudiem un període més gran que 60 minuts) de pluja que tinguin el volum total d'aigua recollida més gran. No cal dir que aquest mètode l'aplicarem a aquelles pluges que tinguin una duració de més de 125 minuts.

El mètode matemàtic que utilitzem es pot resumir de la següent forma:

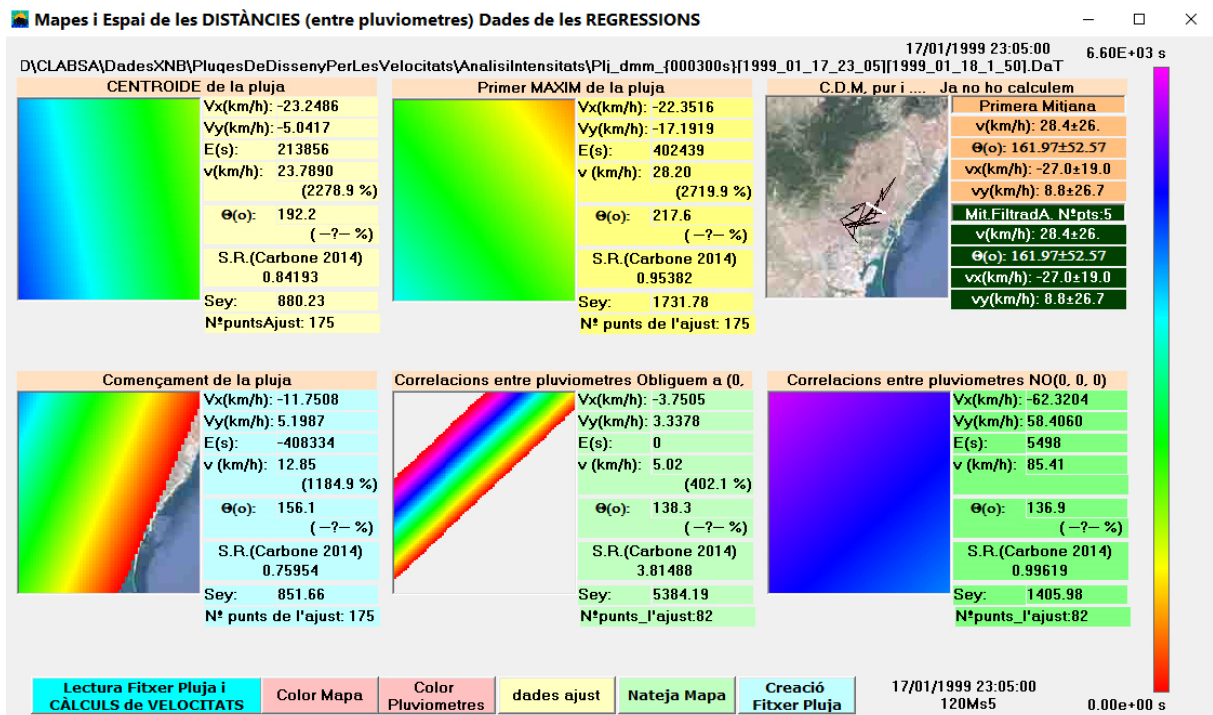
- Sigui δt el temps de l'interval temporal que volem estudiar. En el nostre cas $\delta t = 125$ minuts.
- Sigui *SumaDeVolums(j)* la suma dels volums d'aigua recollides per tots els pluviòmetres des de l'interval t_j fins l'instant $t_j + \delta t$:

$$SumaDeVolums(j) = \sum_{\forall \text{ pluv. } t_i=t_j}^{t_j+\delta t} \text{Volum}(\text{pluv}, t_i) \quad (3.62)$$

- Estudiarem la informació proporcionada per la pluja a partir de l'interval $t_{j\text{MAX}}$ fins $t_{j\text{MAX}} + \delta t$ on $t_{j\text{MAX}}$ queda determinat per la condició

$$SumaDeVolums(j\text{MAX}) > SumaDeVolums(i) \quad \forall i \quad (3.63)$$

Els resultats obtinguts per les velocitats, un cop aplicat aquest filtre, per la pluja del 17/01/1999 els mostrem en la pròpia pantalla del nostre programari (Imatge 3-15)



Imatge 3-15 Pantalla de resultats de la pluja del 17/1/1999 a les 23:05 un cop aplicat el filtre temporal global de 125 minuts d'intensitat màxima

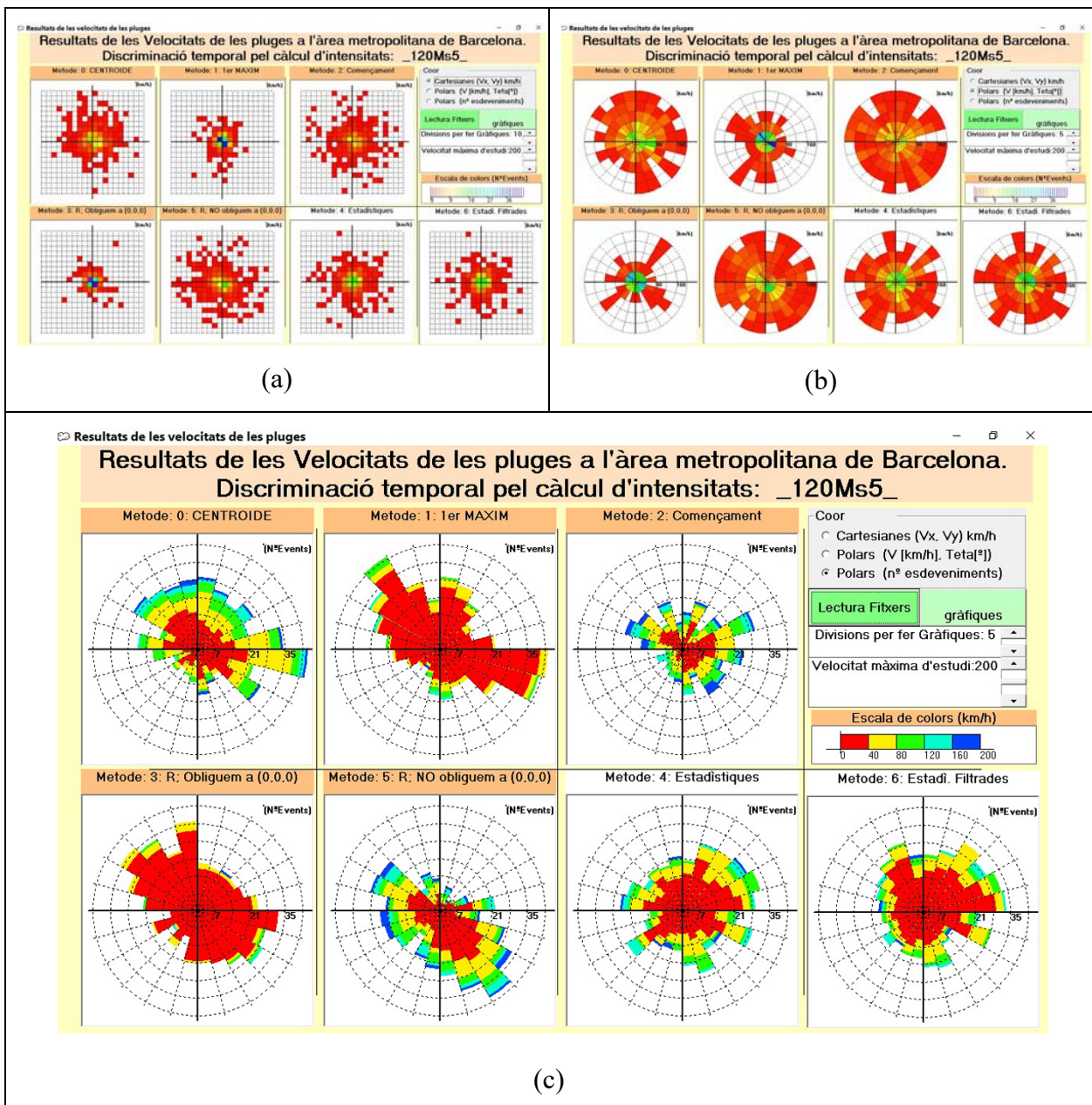
Per veure les diferències entre els resultats sense filtre i amb aquest filtre, els presentem agrupats a la Taula 3-8

	Centroide		Primer Màxim		Començament		Correlacions (0,0,0)		Correlacions No (0,0,0)	
	v (km/h)	Θ°	v (km/h)	Θ°	v (km/h)	Θ°	v (km/h)	Θ°	v (km/h)	Θ°
Tota la pluja	15	184	23	251	15	160	6	193	26	184
125Ms5	24	192	28	218	13	156	5	138	85	137

Taula 3-8 Comparativa dels resultats de les velocitats assignades a la pluja del 17/1/1999 a les 23:05 aplicant el filtre temporal d'intensitat i utilitzant totes les dades proporcionades pels pluviòmetres.

Podem apreciar que els mòduls de les velocitats són del mateix ordre pels mètodes del Primer Màxim, Començament i Correlacions (0,0,0) i pel altres dos la velocitat és considerablement més gran a l'anàlisi de 125 minuts, tal com havíem previst en introduir el filtre.

A continuació presentem els resultats de totes les pluges aplicant el filtre de 125 minuts (Imatge 3-16). Destaquem més clarament aquests resultats en l'últim dels gràfics (Imatge 3-16 c)



Imatge 3-16 Pantalles amb els histogrames de velocitats, per totes les pluges, aplicant el filtre de 125 minuts d'interval global. (a) Histograma cartesià (b) Histograma en coordenades polars (c) Histograma mixt.

Filtres temporals particulars per cada pluviòmetre

Seguint amb el concepte de l'apartat anterior, proposem ara un nou filtre per analitzar pluges llargues filtre que tracti cada pluviòmetre de forma individual. No proposem cap revolució, si més no el què volem fer és aplicar el mateix que abans fèiem a tota la pluja en global però ara pluviòmetre per pluviòmetre. Continuarem estudiant un determinat interval temporal δt per tots i cada un dels pluviòmetres amb la condició que el volum recollit pel mateix sigui màxim. Si volem

podem fer una definició a la inversa, no utilitzarem la informació de pluja recollida per les estacions meteorològiques que sigui poc rellevant.

Matemàticament es tracta d'un mètode semblant al de l'apartat anterior:

- Sigui δt el temps de l'interval temporal que volem estudiar. En el nostre cas farem quatre estudis de temps, per 45 minuts, 60 minuts, 90 minuts i 125 minuts.
- Sigui $SumaDeVolums(k, j)$ la suma dels volums d'aigua recollida pel pluviòmetre k des de l'interval t_j fins l'instant $t_j + \delta t$:

$$SumaDeVolums(k, j) = \sum_{t_i=t_j}^{t_j+\delta t} Volum(k, t_i) \quad (3.64)$$

- Estudiarem la informació del pluviòmetre k proporcionada per la pluja a partir de l'interval t_{jMAX} fins $t_{jMAX} + \delta t$ on t_{jMAX} queda determinat per la condició

$$SumaDeVolums(k, jMAX) > SumaDeVolums(k, i) \quad \forall i \quad (3.65)$$

Sembla natural que aquesta selecció de valors tingui efectes en el càlcul de les velocitats de les pluges en tots els mètodes utilitzats. Per destacar algun, ens podem fixar que en el mètode de començament de la pluja (pluja del 17/1/1999; Imatge 3-15) només 13 de les estacions són coincidents els temps per fer el càlcul del pla temporal. Tampoc no calen gaires càbales per intuir que aquests valors del temps també seran diferents en els altres mètodes de càlcul.

Mostrem (Taula 3-9) la comparativa dels valor de les velocitats pel diferents mètodes de càlcul i pel diferents límits temporals estudiats en la nostra pluja. També mostrem els resultats de l'apartat anterior (125Ms5).

	Centroide		Primer Màxim		Començament		Correlacions (0,0,0)		Correlacions No (0,0,0)	
	v (km/h)	Θ°	v (km/h)	Θ°	v (km/h)	Θ°	v (km/h)	Θ°	v (km/h)	Θ°
Tota la pluja	15	184	23	251	15	160	6	193	26	184
125Ms5	24	192	28	218	13	156	5	138	85	137
125 minuts	15	193	23	249	16	163	4	162	25	159
90 minuts	14	174	23	195	10	152	4	132	10	104
60 minuts	17	201	22	191	14	173	7	135	7	138
45 minuts	18	187	21	197	15	168	8	133	7	134

Taula 3-9 Comparativa dels valor de les velocitats pel diferents mètodes de càlcul i pel diferents límits temporals estudiats en la pluja del 17 de gener de 1999 a les 23:05

En aquesta pluja en particular es pot veure una “gran” concordança entre els valors de les velocitats, independentment de l'interval estudiat. Els resultats del mètode de l'apartat anterior també estan raonablement en bona concordança.

Presentem a continuació els resultats obtinguts en aplicar els models de càlcul de velocitat a totes les pluges que compleixin $SR > 0.85$ i per tots quatre filtres temporals. Seguidament centrarem

l'estudi en les velocitats de les pluges obtingudes mitjançant el mètode 0 (Centroide) per als 60 minuts més intensos. Finalment com aplicació d'aquest estudi cinemàtic de les tempestes a l'àrea metropolitana de Barcelona analitzarem les trajectòries seguides i la velocitat de moviment dels xàfec més extrems que s'han produït a Barcelona entre 1994 i 2019.

	<i>S.R. < 0.85</i>					
	<i>Nº total</i>	<i>Mètode 0: Centroide</i>	<i>Mètode 1: Prim. Màx.</i>	<i>Mètode 2: Començament</i>	<i>Mètode 3: Corr. (0,0,0)</i>	<i>Mètode 5: Corr.no (0,0,0)</i>
Tota la durada	2534	2057	1531	1717	24	236
< 45 min	1857	1423	1215	1339	243	668
< 60 min	1400	1116	895	1051	189	490
< 90 min	862	682	513	652	129	330
< 125 min	575	444	329	490	82	210

Taula 3-10 Nombre de pluges disponibles entre 1994 i 2019 i nombre de pluges amb S.R. < 0.85 obtingudes mitjançant tots els mètodes de càlcul de velocitats, suposant tota la durada de la pluja i 4 filtres de durada (45min, 60min, 90min, 125min)

A la Taula 3-10 es mostra el nombre de pluges analitzades i a la Figura 3-8 la distribució de les pluges segons el mes de l'any. Els dos mètodes de càlcul de les velocitats basats en les correlacions de les quantitats de pluja entre pluviòmetres són els que donen pitjors resultats. Amb el mètode 5 només el 36% de les pluges donen valors de $SR < 0.85$ i pel mètode 3 només el 13%, és a dir, per la majoria de pluges estudiades surt $SR > 0.85$.

Dels altres tres mètodes de càlcul, el del centroide és el que dona millors resultats, ja que el 80% de les pluges estudiades donen valors $SR > 0.85$ i també és el que dona menor error quan l'apliquem a les pluges de disseny (veure *Annex G: Resum de resultats de les desviacions i del S.R. mitjanats per les diferents direccions de propagació i per un temps d'estudi de les pluges de 5 minuts.*).

A la Figura 3-8 es mostra el nombre de pluges analitzades en funció del mes de l'any pel mètode del centroide i pels 60 minuts més intensos.

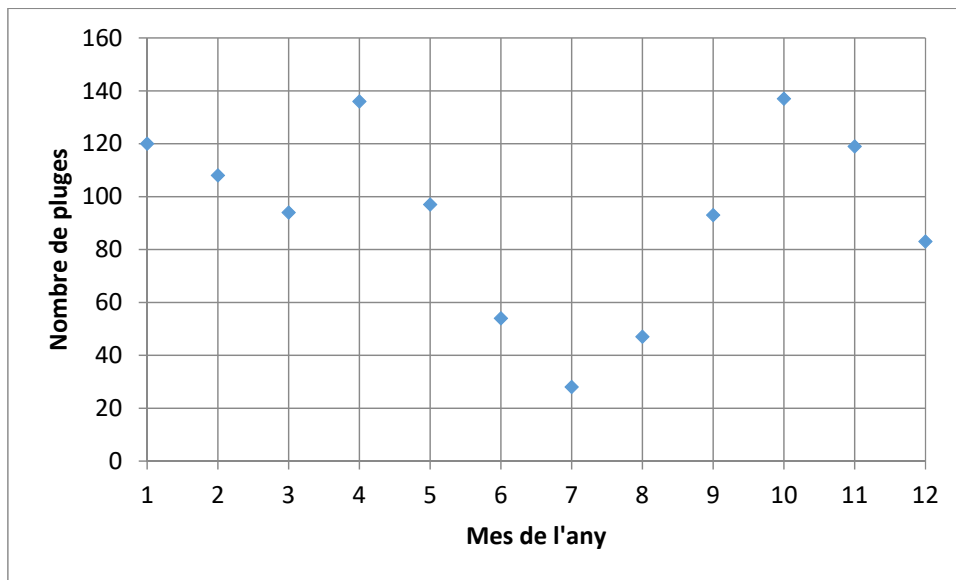
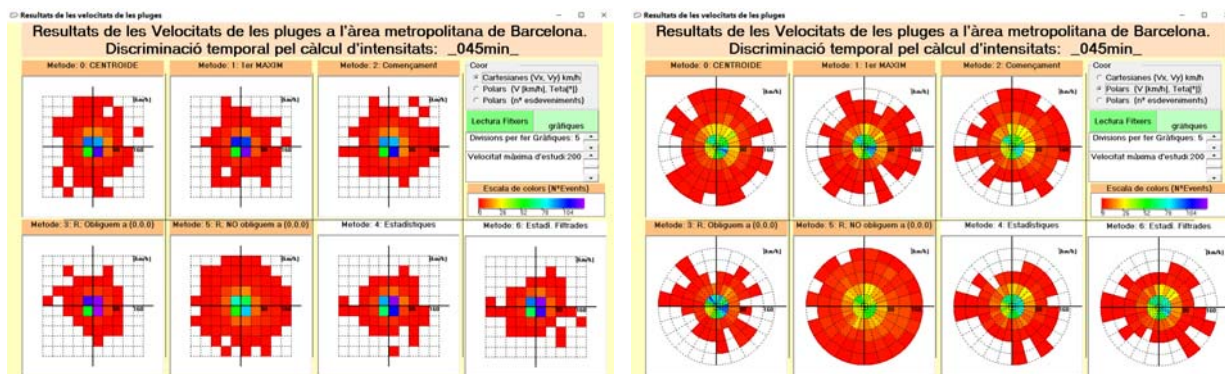


Figura 3-8 Nombre de pluges per mes. Mètode del centroide i 60 minuts més intensos.

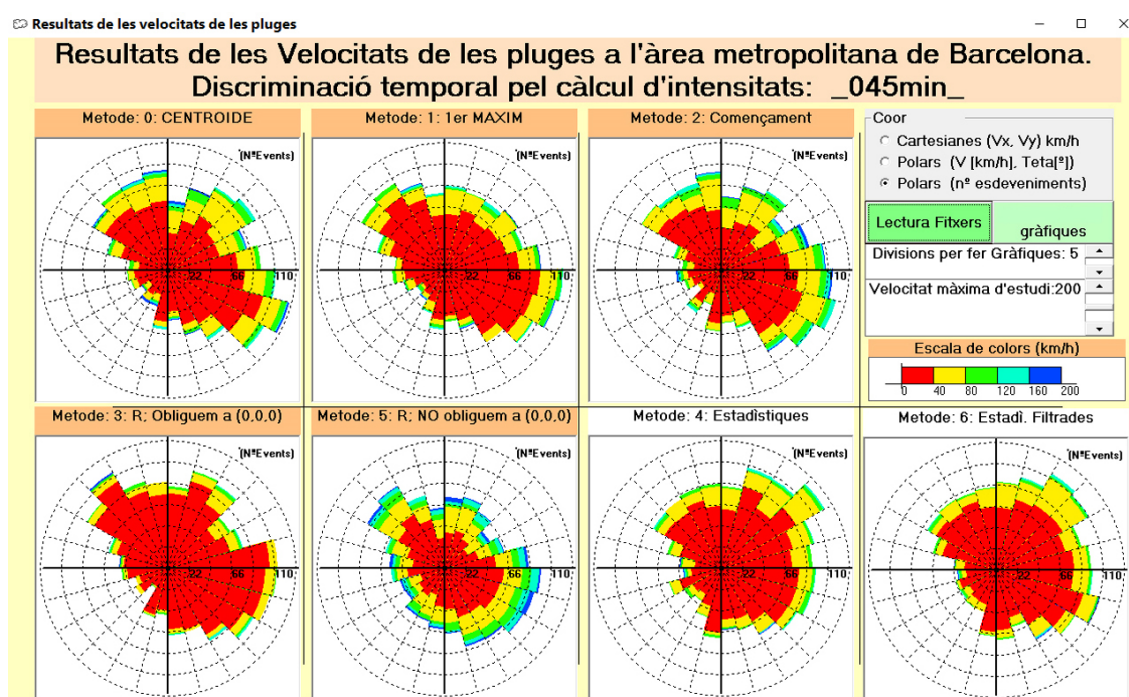
A continuació presentem els resultats dels estudis amb filtres temporals en forma d'histogrames. En els histogrames corresponents als filtres de 45 i 60 minuts (Imatge 3-17, Imatge 3-18), estudiem la part més intensa de la pluja registrada per cada un dels pluviòmetres. La durada del cicle de vida de les tempestes pot ser típicament de 10 a 60 minuts si són cèl·lules individuals o pot durar varies hores si estan formades per agrupacions de cèl·lules amb diferent grau de desenvolupament (multi cèl·lules). Quant més durada tingui la pluja estudiada, més possibilitat hi ha que capturem fragments de la vida de diferents cèl·lules amb velocitats i direccions diferents. En limitar l'anàlisi de les pluges als intervals més intensos de duració 45 i 60 minuts tractem de capturar el moviment de les cèl·lules individuals.

Filtre de 45 minuts



(a)

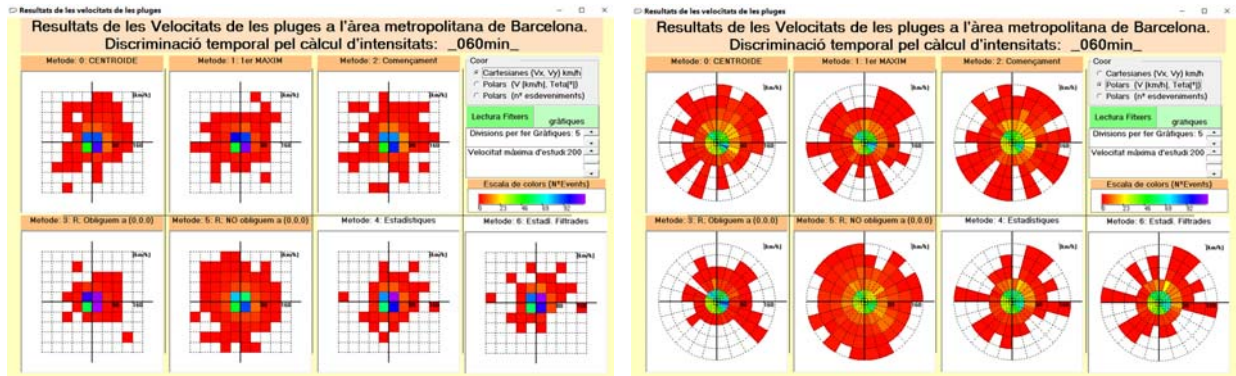
(b)



(c)

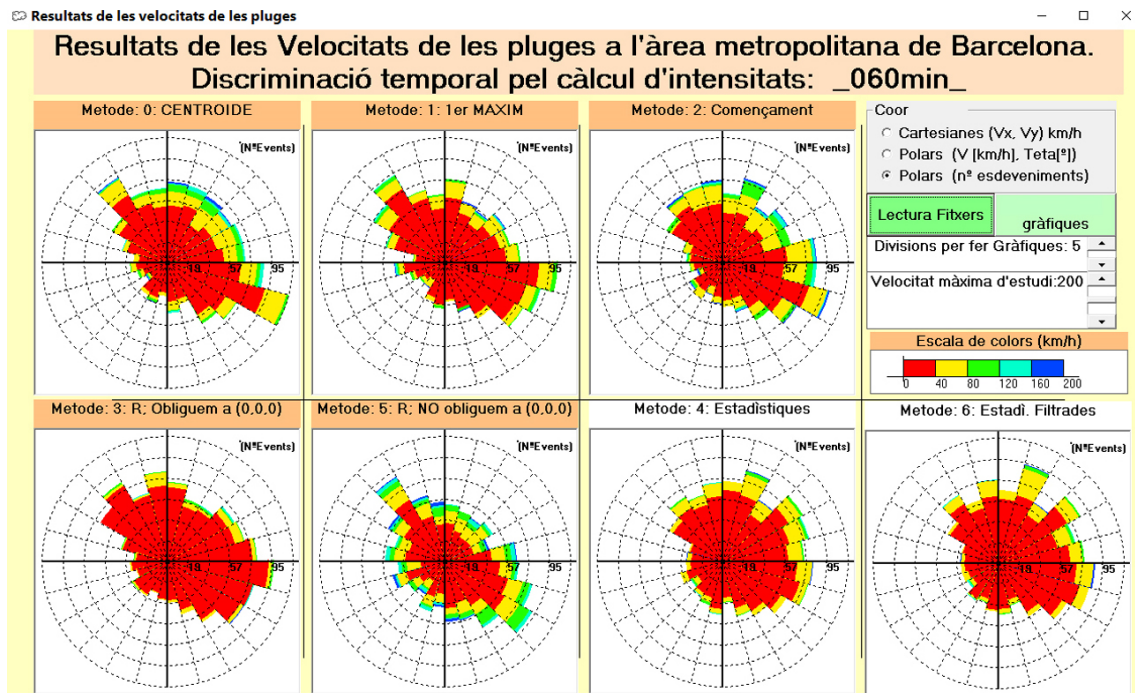
Imatge 3-17 Histogrames de velocitats per totes les pluges i per tots els mètodes de càlcul aplicant el filtre de discriminació temporal d'intensitat individual a cada pluviòmetre de 45 minuts. (a) Histograma cartesià (b) Histograma en coordenades polars (c) Histograma mixt.

Filtre de 60 minuts



(a)

(b)

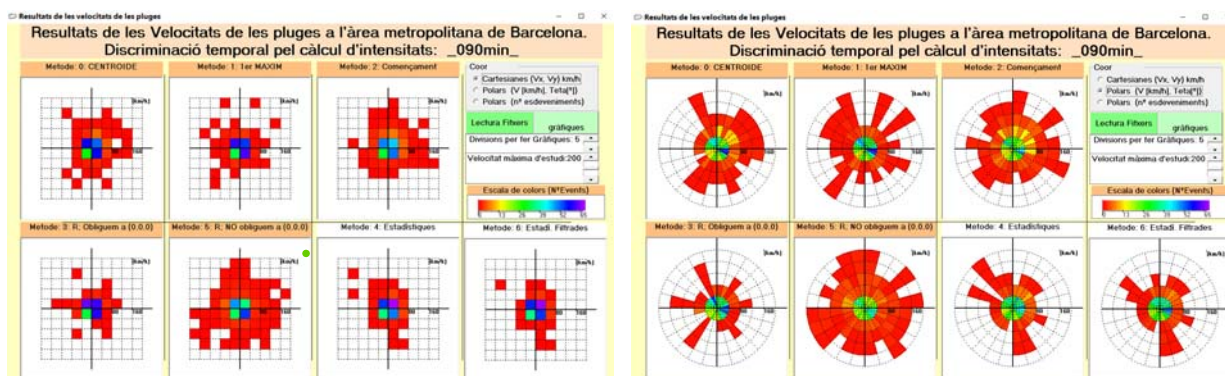


(c)

Imatge 3-18 Histogrames de velocitats per totes les pluges i per tots els mètodes de càlcul aplicant el filtre de discriminació temporal d'intensitat individual a cada pluviòmetre de 60 minuts. (a) Histograma cartesià (b) Histograma en coordenades polars (c) Histograma mixt.

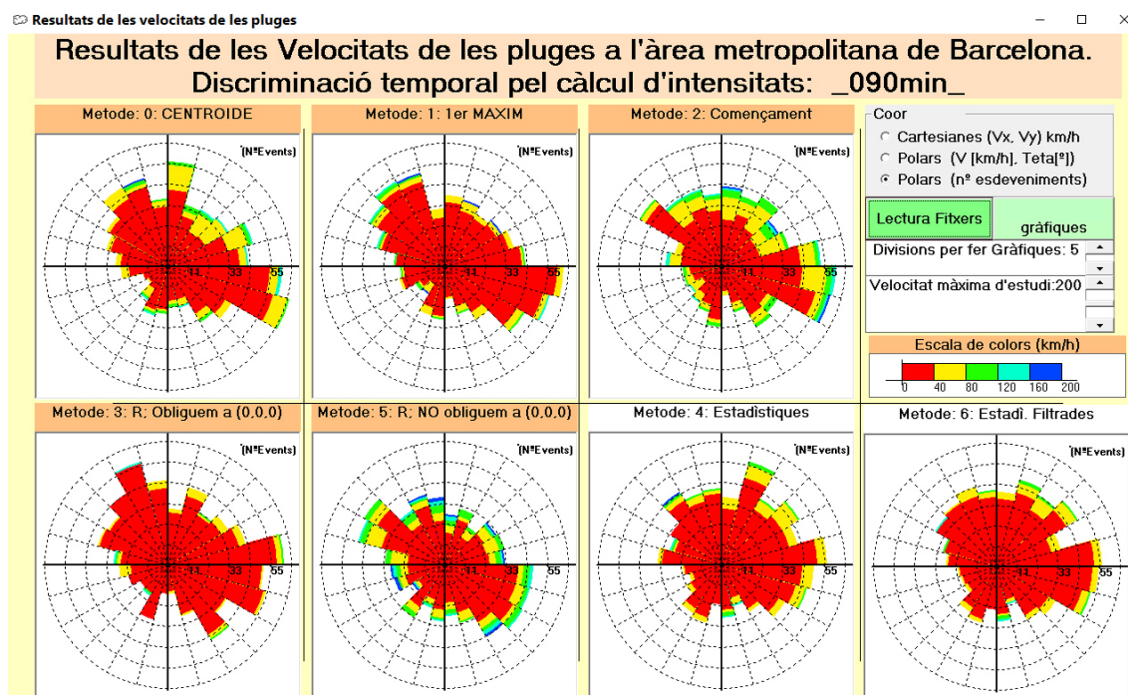
En allargar l'interval temporal d'estudi a 90 minuts (Imatge 3-19) cal destacar que en tots els mètodes les velocitats obtingudes són sensiblement més baixes (més predominança del color vermell).

Filtre de 90 minuts



(a)

(b)

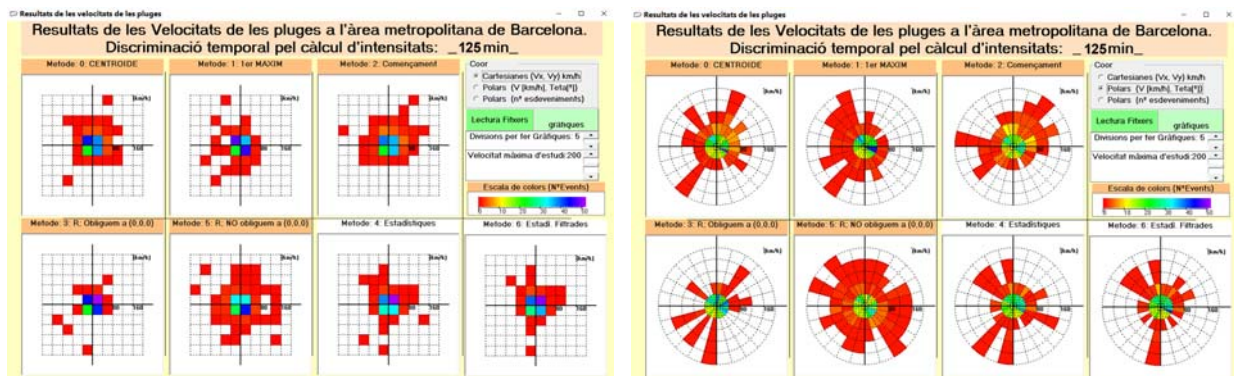


(c)

Imatge 3-19 Histogrames de velocitats per totes les pluges i per tots els mètodes de càlcul aplicant el filtre de discriminació temporal d'intensitat individual a cada pluviòmetre de 90 minuts. (a) Histograma cartesià (b) Histograma en coordenades polars (c) Histograma mixt.

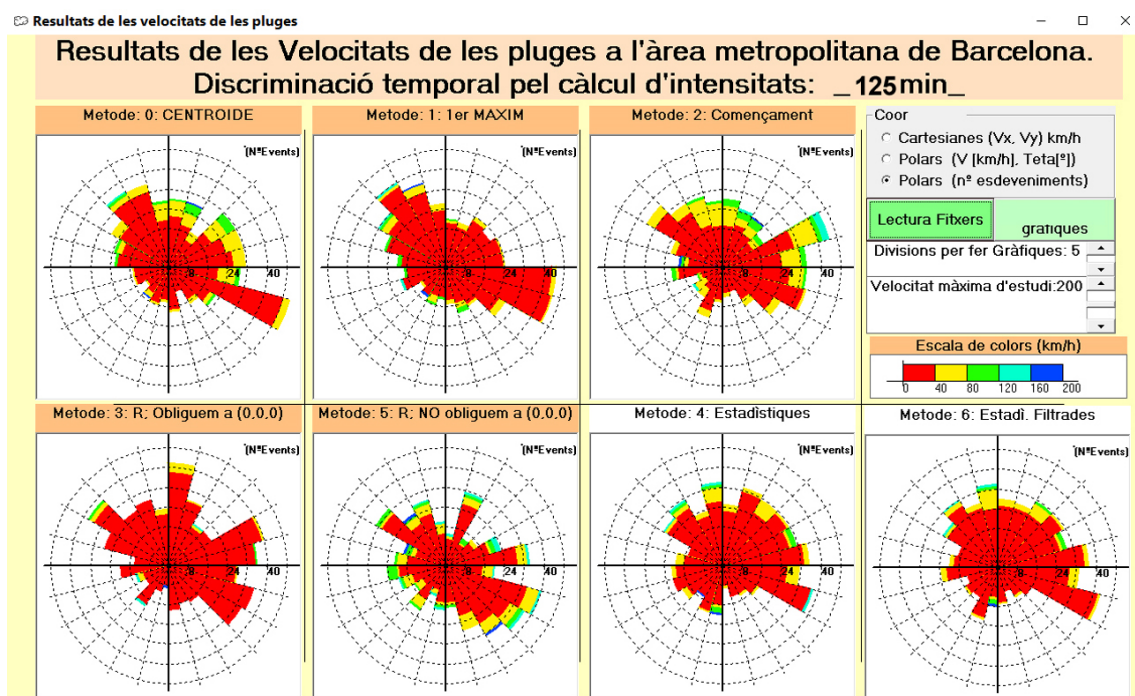
Pel filtre de 125 minuts (Imatge 3-20) encara que poguéssim pensar que seran resultats més semblants als obtinguts sense filtre, hi tenim moltes menys pluges (l'escala que tenim a l'eix d'esdeveniments ens mostra el màxim a 40, mentre que en el global de totes les pluges és de 160) el què fa que observem resultats lleugerament diferents al resultats sense filtre.

Filtre de 125 minuts



(a)

(b)



(c)

Imatge 3-20 Histogrames de velocitats per totes les pluges i per tots els mètodes de càlcul aplicant el filtre de discriminació temporal d'intensitat individual a cada pluviòmetre de 125 minuts. (a) Histograma cartesià (b) Histograma en coordenades polars (c) Histograma mixt.

A primer cop d'ull, la predominança del vermell, ens indica un rang de velocitats més baixes. Els mètodes del Centroide i del Primer Màxim donen uns pics d'esdeveniment cap als 130° i cap als 330° . El primer pic queda confirmat, més o menys, pels altres mètodes. En canvi el segon no queda

confirmat per cap més mètode. També es pot veure un pic d'esdeveniments al mètode de Començament de la pluja cap els 30°.

A primera vista, si comparem gràficament els resultats obtinguts aplicant filtres temporals amb els resultats sense cap filtre es pot observar que tenen certa similitud. Amb tots els mètodes podem apreciar que els resultats formen una mena d'el·lipse amb el seu eix major orientat de nord-oest fins sud-est. Els resultats "estadístics" (mitjana de tots els mètodes) queden més apilats en el primer quadrant, deixant el tercer quadrant més buit.

A la Taula 3-11 es mostren la velocitat mitjana (\bar{v}) i el rang de velocitats entre el percentil 5% i el 95% (v_{95} ; v_{5}) obtinguts mitjançant tots els mètodes de càlcul de velocitats, suposant tota la durada de la pluja i els 4 filtres de durada (45min, 60min, 90min, 125min) . A la Figura 3-9 es presenta un diagrama de caixes amb les velocitats de les pluges obtingudes per tots els mètodes per als 60 minuts més intensos.

	<i>Mètode 0:</i>		<i>Mètode 1:</i>		<i>Mètode 2:</i>		<i>Mètode 3:</i>		<i>Mètode 5:</i>	
	<i>Centroide</i>		<i>Primer Màxim</i>		<i>Començament</i>		<i>Corr. (0,0,0)</i>		<i>Corr. no (0,0,0)</i>	
	\bar{v}	v_{95}, v_5	\bar{v}	v_{95}, v_5	\bar{v}	v_{95}, v_5	\bar{v}	v_{95}, v_5	\bar{v}	v_{95}, v_5
Tota la durada	31.4	79.9, 10.8	21.8	54.6, 6.1	37.1	82.6, 10.6	18.2	37.6, 4.9	35.8	94.5, 5
<45 min	22.9	64.9, 5.7	17.2	46.1, 5.2	26.6	62.8, 5.5	14.5	35.1, 5.2	23.7	59.3, 6.4
<60 min	21	56.2, 5.0	14.7	43.4, 4.3	25.1	61.8, 5.1	12	28.2, 4.6	19.3	49, 5.4
<90 min	16.7	52.0, 4.5	11	35, 3.5	22.7	61.8, 4.5	8.34	18.1, 2.8	16.6	49.6, 3.6
<125 min	16.1	49.8, 3.9	9.2	33, 3.1	18.5	46.8, 3.3	7.88	27.7, 1.9	15	54.3, 2.8

totes les dades en m/s

Taula 3-11 Velocitat mitjana de pluges seleccionades amb $SR < 0.85$ i rang de velocitats entre els percentils 5 i 95.

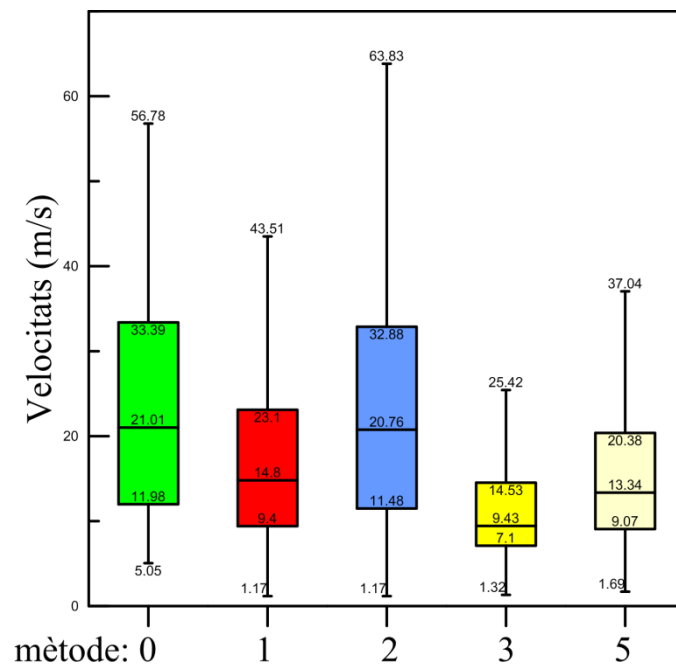


Figura 3-9 Velocitats de les pluges obtingudes per tots els mètodes per als 60 minuts més intensos.

A la Taula 3-12 presentem el nombre de pluges segons la direcció obtinguda pels mètodes del Centroide i del Primer màxim (0 i 1 respectivament), classificades per quadrants i per a tots els filtres temporals. Al diagrama de caixes de la Figura 3-10 es presenten les velocitats de les pluges obtingudes mitjançant el mètode 0 (Centroide) per als 60 minuts més intensos i classificades per quadrants. I a la Figura 3-11 s'afegeix la informació del mes de l'any en què han succeït.

<i>Quadrant (°)</i>	<i>Mètode 0: Centroide</i>					<i>Mètode 1: Primer Màxim</i>				
	<i>Tota</i>	<i>125</i>	<i>90</i>	<i>60</i>	<i>45</i>	<i>Tota</i>	<i>125</i>	<i>90</i>	<i>60</i>	<i>45</i>
<i>0-90</i>	684	146	212	361	452	470	92	151	267	380
<i>90-180</i>	527	126	180	278	361	386	92	138	229	305
<i>180-270</i>	241	68	102	158	191	198	55	82	141	175
<i>270-360</i>	605	104	188	319	419	477	90	142	258	355

Taula 3-12 Nombre de pluges segons la direcció obtinguda pels mètodes 0 i 1.

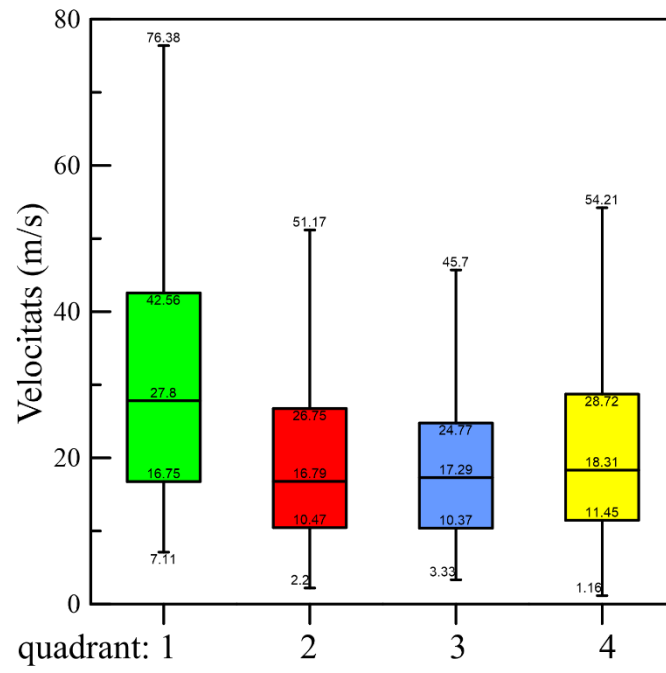


Figura 3-10 Velocitats de les pluges obtingudes mitjançant el mètode 0 per als 60 minuts més intensos.

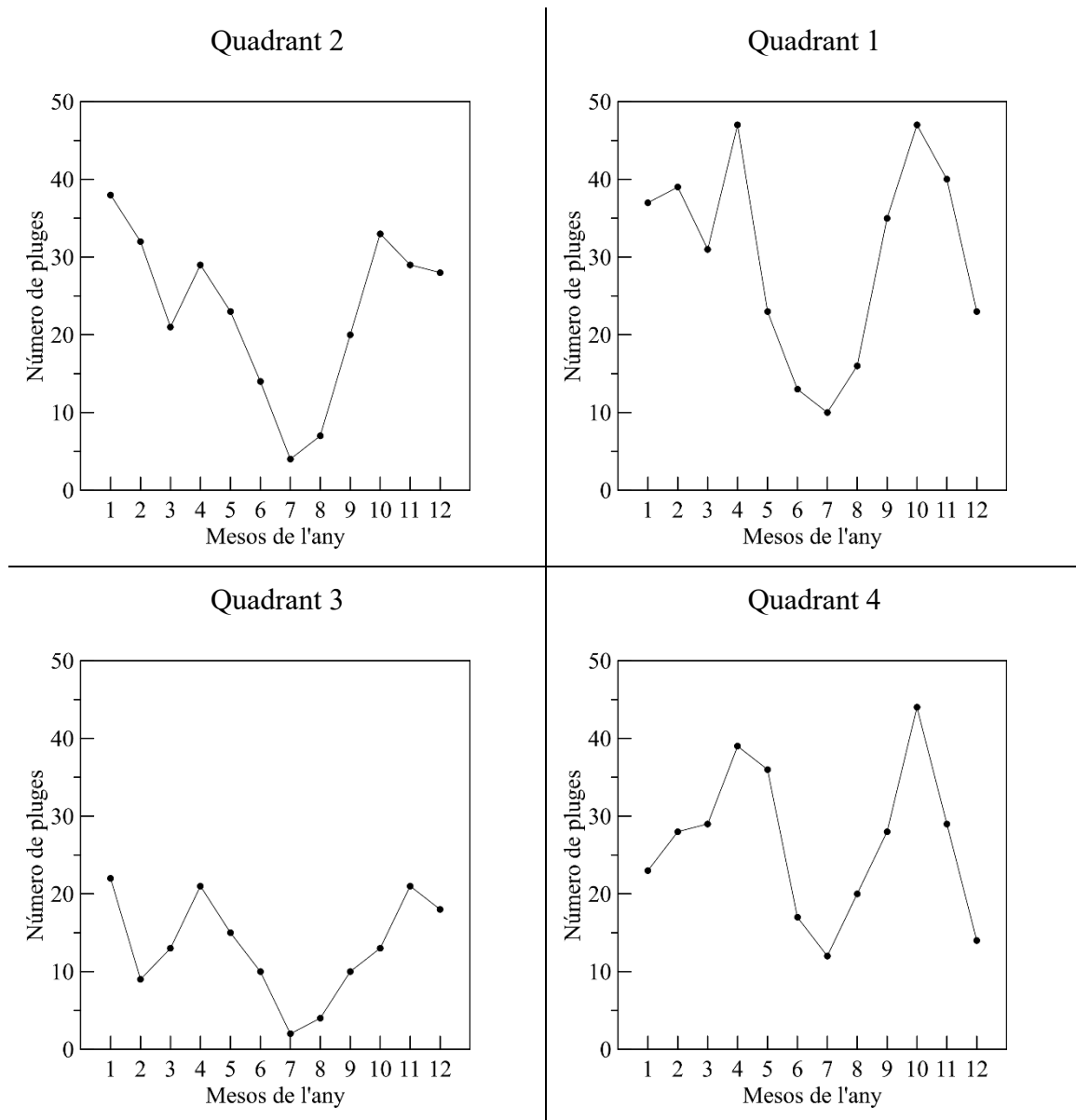


Figura 3-11 Nombre de pluges obtingudes mitjançant el mètode 0 (Centroide) per als 60 minuts més intensos classificades per quadrants i mesos.

3.7.4. Plugues extremes

S'han analitzat també les velocitats i direccions corresponents als xàfecs extrems registrats per la xarxa urbana. Aquest estudi de les plugues extremes s'ha realitzat aplicant el mètode del Centroide als 60 minuts més intensos de dites plugues. Només s'han considerat les plugues extremes si el càlcul de la velocitat ha donat un valor de $SR < 0.85$.

S'han trobat 75 plugues que presenten intensitats amb període de retorn igual o més gran que 1 any, per a alguna durada entre 5 min i 24 hores i per algun pluviòmetre de la xarxa. En les Figura 3-12, Figura 3-13, Figura 3-14 i Figura 3-15 es representen les velocitats i direccions obtingudes classificades per mesos de l'any, estacions i quadrants

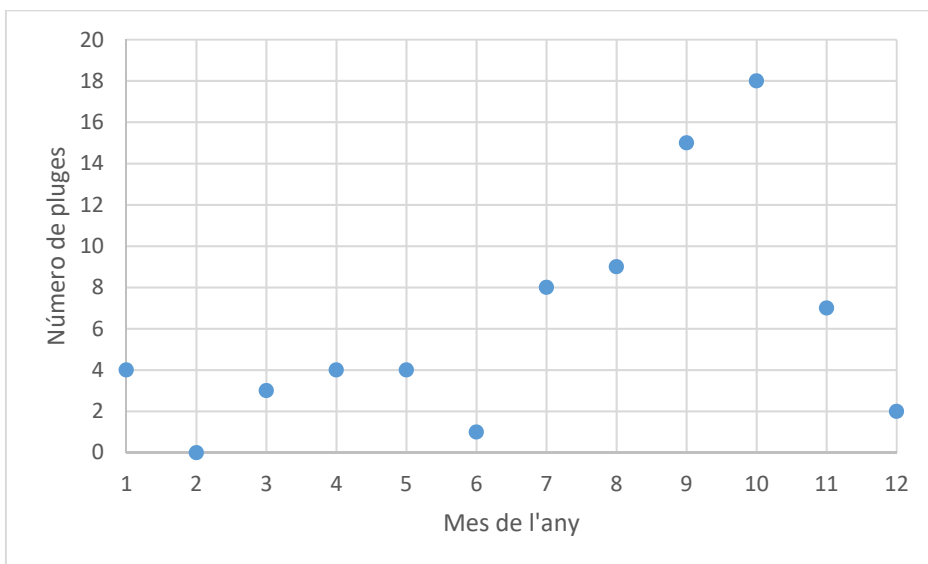


Figura 3-12 Nombre de pluges extremes de període de retorn igual o més gran que 1 any trobades per a cada mes de l'any.

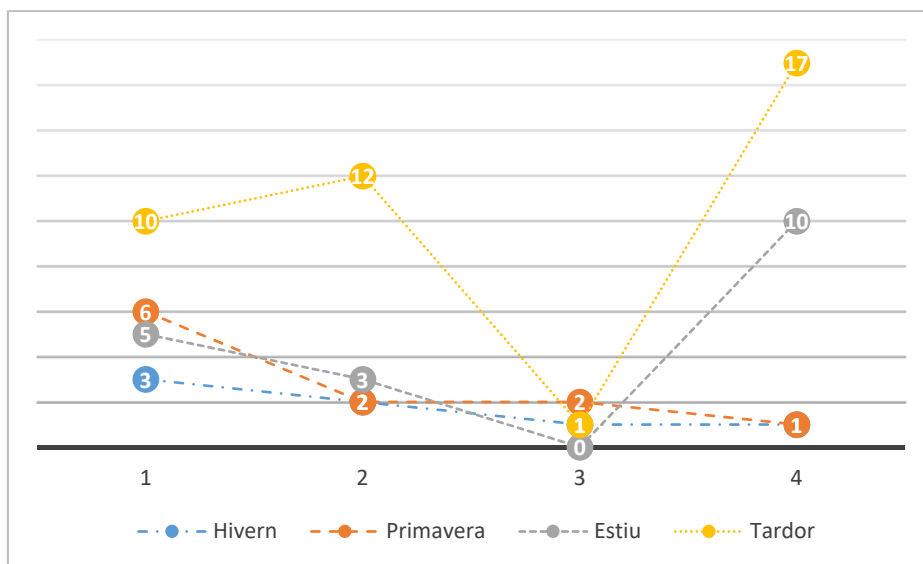


Figura 3-13 Nombre de pluges extremes de període de retorn igual o més gran que 1 any per a cada quadrant i segons l'estació de l'any. La numeració de l'eix horitzontal es refereix als

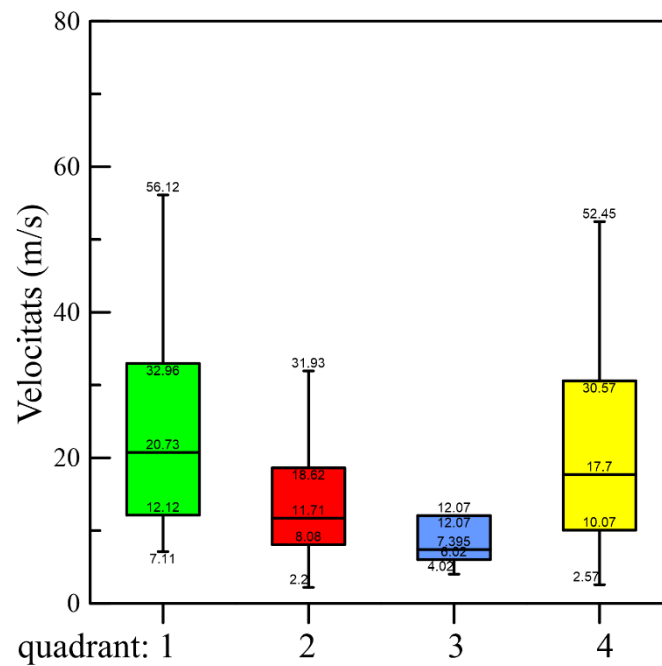


Figura 3-14 Velocitats de les pluges extremes de període de retorn igual o més gran que 1 any classificades per quadrants.

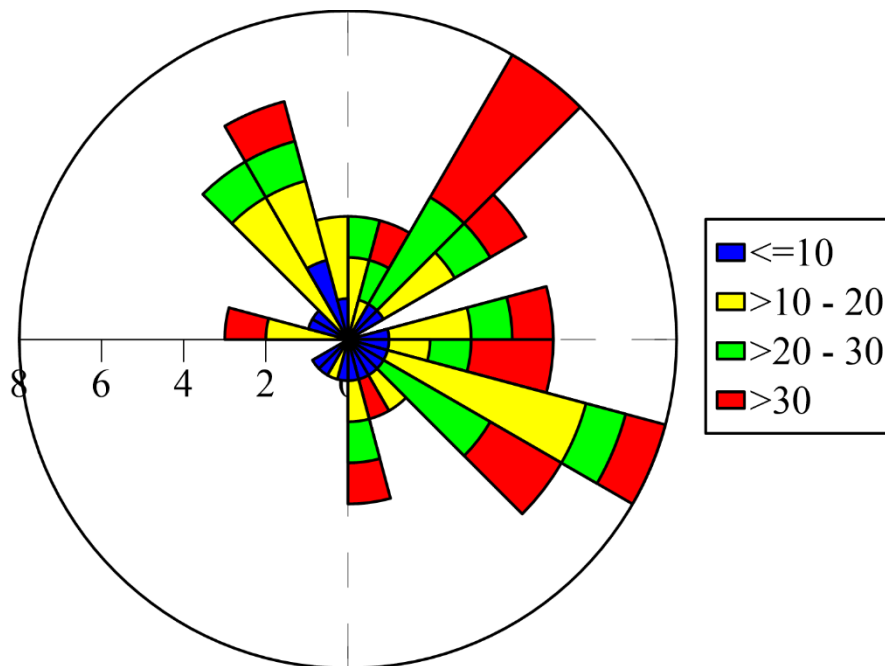


Figura 3-15 Diagrama de vent corresponent a las pluges extremes de període de retorn igual o major que 1 any. Les velocitats estan calculades en km/h

3.7.5. Discussió de resultats

La dispersió trobada per a la velocitat i la direcció de moviment estimades pels quatre mètodes de seguiment és un resultat esperat, ja que no totes les propietats característiques de les pluges que fan de punts de referència presenten el mateix comportament durant el cicle de vida de l'esdeveniment de pluges, tot i que és evident la connexió entre elles. Entre els mètodes directes, observem que el que utilitza el centre de tempesta com a referència necessita la informació de tot

el hietograma per al seu càlcul, i no només un punt únic com en el cas, per exemple, de l'hora d'inici. En aquest sentit, sembla raonable pensar que el mètode del centroide proporciona estimacions més robustes que els altres dos. De fet, (May & Julien, 1998) van informar de resultats més fiables utilitzant el centroide que l'hora inicial. Els dos mètodes de càlcul de les velocitats basats en les correlacions de les quantitats de pluja entre pluviòmetres són els que donen pitjors resultats. Amb el mètode 5 només el 36% de les pluges donen valors de $SR < 0.85$ i pel mètode 3 només el 13%, és a dir, per la majoria de pluges estudiades surt $SR > 0.85$. (Niemczynowicz, 1987) troba també que l'ús dels mètodes de la correlació entre els registres dels pluviòmetres no sol funcionar bé si hi ha més d'una cèl·lula de pluja.

Els rangs de velocitats obtinguts per tots els mètodes i filtres temporals són compatibles amb els resultats obtinguts per altres autors tant a Catalunya com en altres regions. En particular pel mètode del Centroide i considerant els 60 minuts més intensos de les pluges, hem obtingut una velocitat mitjana de 21 km/h i el 90% de les pluges amb velocitats entre 56.2 km/h i 5 km/h.

A tall de comparació, la velocitat mitjana estimada per a 400 tempestes a Lund (Suècia) va ser de 37 km/h (Niemczynowicz, 1987). (Marshall, 1980) va informar de velocitats mitjanes estimades de 41 km/h per 110 tempestes a Cardington i 42 km/h per 133 tempestes a Winchcombe (dues ubicacions angleses). (Upton, 2002), amb dades de 107 tempestes procedents d'una xarxa de 20 pluviòmetres situats en una regió de 600 km² a prop de Bolton, al nord-oest d'Anglaterra, va obtenir una velocitat mitjana de 34,5 km/h. (Lo Conti, et al., 2009), recollint dades d'una xarxa consistent en 10 pluviòmetres situats a Palerm (Itàlia) va obtenir que el 60% de les tempestes monitoritzades tenien una velocitat inferior a 30 km/h i al voltant del 30% dels esdeveniments tenien velocitats que oscil·laven entre els 20 km/h i 30 km/h.

Particularitzant a estudis realitzats a Catalunya, (del Moral, et al., 2020) mitjançant mesures de radar així com registres de precipitació horària i diària troba un rang de velocitats entre 9 i 61 km/h en estudiar les pluges de caràcter convectiu a Salou entre 2014 i 2018. (Rigo, et al., 2019) van documentar amb observacions de radar, que durant la tardor alguns sistemes meso-escalars amb cèl·lules convectives poden travessar tot el litoral català en menys de 3h. En altres casos els sistemes meso-escalars resten quasi estacionaris en determinades àrees, presentant velocitats reduïdes (< 8.6 km/h) (Rigo & Llasat, 2005).

Els resultats de velocitat calculada per les 75 pluges extremes de període de retorn major que 1 any pel mètode del centroide i estudiant els 60 minuts més intensos, són lleugerament inferiors: una velocitat mitjana de 19.6 km/h amb el 90% de les pluges entre 42.8 km/h i 4.5 km/h.

A la tardor es produeix el major nombre de pluges analitzades, el 31%. Aquest percentatge augmenta fins al 53% de les pluges de període de retorn superior a 1 any. A l'estiu es produeix el menor nombre de les pluges analitzades, el 11%, augmentant fins al 24% de les pluges de període de retorn superior a 1 any. Per tant, obtenim que a la tardor i estiu es produeixen al voltant del 77% de les pluges extremes. Aquest resultat coincideix amb l'obtingut per (Rigo & Llasat, 2007) en el seu estudi dels sistemes convectius a Catalunya utilitzant mesures de radar pel període 1996–2000.

A la Figura 3-16 presentem el percentatge de pluges que porten una direcció continguda al 4rt quadrant (de S a E) és del 29% i augmenta fins al 38% per pluges extremes. Ens els quadrants 1r (de E a N) i 2on (de N a O) els percentatges són 32% i 25% respectivament i no varien quan seleccionem pluges extremes. Al 3r quadrant hi ha només el 14% de les pluges i el percentatge disminueix fins a un 5% per pluges extremes.

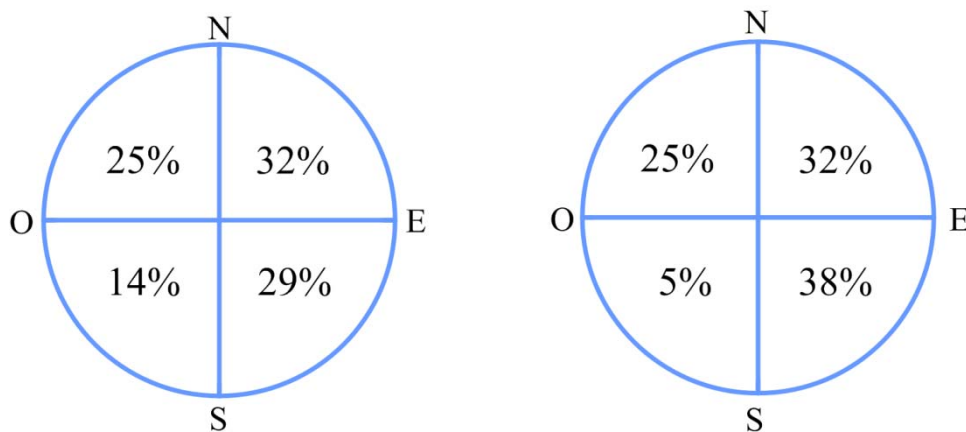


Figura 3-16 Percentatges de pluges per quadrant. Considerant totes les pluges (esquerra), o bé només les plugues extremes de període de retorn 1 any o més (dreta)

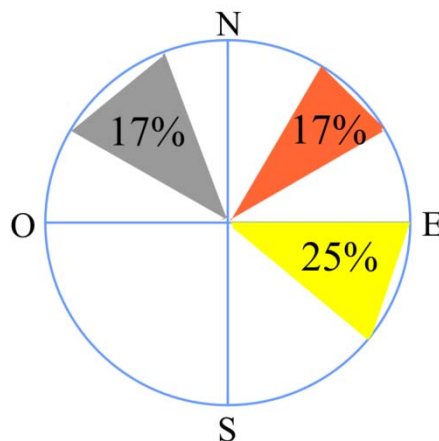


Figura 3-17 Direccions més freqüents de les plugues extremes de període de retorn 1 any o més

En el cas de la selecció de 75 esdeveniments de pluja extrema de període de retorn major o igual a 1 any, la major part d'ells van evolucionar o es van desplaçar cap a E-SE, i. e., cap a la costa (Figura 3-17) (un 25% entre 320° i 360°), corroborant els resultats obtinguts per (Lorente & Redaño, 1990) en un estudi similar. Aquest resultat és compatible amb la direcció dels vents dominants de l'oest registrats en altura a la zona. Un segon grup d'episodis es desplacen paral·lelament a la costa de sud a nord (SO-NE) (un 17% entre 30° i 60°) i corresponen en general a situacions amb vents d'alçada S i SO, amb un fort cisallament vertical i vents forts i moderats de llevant a la superfície. Aquestes situacions solen produir precipitacions torrencials a la zona costanera (Lorente & Redaño, 1990) i, a Barcelona, el seu moviment també està influït per l'efecte de canalització produït per la serra de Collserola (512 m d'altitud) gairebé paral·lela a la línia de costa. Finalment un tercer grup d'episodis es mouen cap al N-NO, perpendicularment a la costa, de mar cap a terra, (un 17% entre 105° i 130°). (del Moral, et al., 2020) també troba en el seu estudi que la majoria de cèl·lules convectives viatgen del mar cap a terra (aproximadament de SE a NO) i més de un 10% es mouen paral·leles a la costa de sud a nord (SO-NE) .

El 30% de les pluges que es mouen perpendicularment a la costa en els dos sentits, es produeixen a la tardor, el percentatge augmenta fins al 60% de les pluges extremes de període de retorn superior a 1 any. És destacable també que el 15% de les pluges que es mouen de terra a mar són a l'estiu i el percentatge augmenta fins al 34% si seleccionem les extremes. En el sentit de mar a terra el 35% de les pluges es donen a hivern, per pluges extremes el percentatge de pluges hivernals disminueix dràsticament fins a un 10%.

Més del 70% de les pluges, també de les extremes, que es mouen paral·leles a la costa, van de SO a NE, els majors percentatges es donen a la tardor, un 34% si considerem totes les pluges i un 42% si només tenim en compte les extremes.

Analitzant les estacions de l'any, el 38% (55% de les extremes) de les pluges d'estiu es produeixen al 4rt quadrant (terra-mar), el 34% de les pluges de tardor es produeixen al 1r quadrant (paral·leles a la costa de SO a NE) i el 31% de les pluges d'hivern es produeixen en el 2n quadrant (mar-terra)

A la Figura 3-18 mostrem la velocitat mitjana de les pluges per quadrant. La mitjana de la velocitat de les pluges en el 1r quadrant (SO-NE) és la més gran 33.3 km/h i també ho és per les pluges extremes 24.7 km/h.

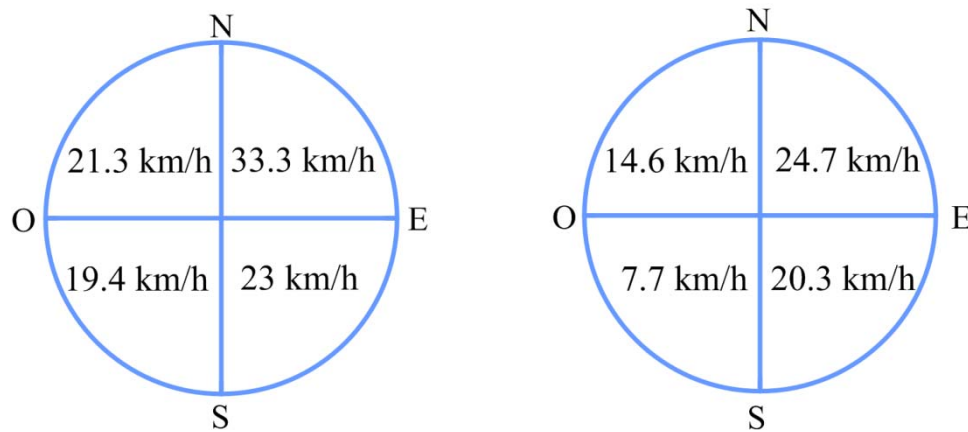


Figura 3-18 Velocitat mitjana de les pluges per quadrant. Considerant totes les pluges (esquerra), o bé només les pluges extremes de període de retorn 1 any o més (dreta)

3.7.6. Conclusions

Mitjançant les dades de la xarxa urbana de pluviòmetres de Barcelona, s'ha estimat satisfactòriament la velocitat i direcció de moviment sobre la ciutat dels esdeveniments de pluja succeïts entre 1994 i 2019.

Entre les quatre característiques de pluja que s'utilitzen com a punts de referència per al seguiment de les tempestes analitzades, sembla raonable preferir l'ús del Centroide ja que en el seu càlcul es té en compte tota la informació del hietograma i no només un punt únic, com per exemple, l'hora d'inici o del primer màxim. A més, el mètode Centroide sembla que no està tan condicionat com els mètodes de correlació amb la presència de més d'una cèl·lula de pluja o d'un episodi de pics múltiples, situacions en què aquests darrers mètodes no solen funcionar bé.

Pel fet que la durada del cicle de vida de les tempestes pot ser típicament de 10 a 60 minuts si són cèl·lules individuals, hem analitzat en detall les pluges a l'interval més intens de duració 60 minuts, d'aquesta forma hem tractat de capturar el moviment de les cèl·lules individuals.

La xarxa urbana és capaç de detectar altes intensitats en punts específics de la zona urbana que cobreix amb una resolució que les imatges de radar no poden proporcionar. Amb les dades de precipitació dels pluviòmetres s'ha pogut analitzar el desplaçament de les pluges extremes de període de retorn major o igual a 1 any registrades per la xarxa de pluviòmetres entre 1994 i 2019. Aquest estudi demostra la importància de disposar de les dades d'una xarxa densa d'indicadors d'intensitat en una ciutat densament poblada com Barcelona, equipada amb un complex sistema de clavegueram.

Els resultats més importants relatius a la selecció de 75 esdeveniments de pluja extrema de període de retorn major o igual a 1 any són els següents: els percentatges més elevats de pluges corresponen

aproximadament a les direccions paral·lela (SO-NE) i perpendicular a la costa (SE-NO). A la tardor es produeixen més del 60% de les pluges extremes perpendiculars a la costa i un 42% de les que es mouen paral·lelament a la costa de SO a NE. Les pluges extremes que es mouen paral·leles a la costa de SO a NE corresponen en general a situacions amb vents d'alçada S i SO, amb un fort cisallament vertical i vents forts i moderats de llevant a la superfície. Aquestes situacions solen produir precipitacions torrencials a la zona costanera. S'ha trobat també que aquestes darreres són les pluges que tenen una velocitat mitjana més gran.

4. Els efectes del canvi climàtic en les intensitats extremes de pluja a l'àrea metropolitana de Barcelona

Canvi climàtic [<https://www.encyclopedia.cat>] Nom donat al procés de transformació del clima per efecte de les activitats humanes.

4.1. Introducció

Els efectes del canvi climàtic en la hidrologia degut a una possible futura intensificació del cicle hidrològic han de ser considerats per tal de prevenir problemes futurs en els sistemes de drenatge urbà. Les corbes IDF podrien ser alterades a causa d'un presumpte augment de les pluges intenses causat pel canvi climàtic. Una visió global d'aquesta situació va ser presentada per (Willems, et al., 2011)

Contràriament al que passa a les regions de latitud alta o mitjana del món, en les quals s'ha reportat un increment en la precipitació total, diversos estudis mostren una tendència decreixent dominant durant les últimes dècades en l'àrea mediterrània (IPCC, 2007) L'informe d'avaluació regional de canvi climàtic elaborat per investigadors de la xarxa CLIVAR-Espanya (Pérez & Boscolo, 2010) arriba a la conclusió que la precipitació anual a la Península Ibèrica en les últimes tres dècades ha disminuït significativament en comparació amb els anys 1960 i 1970, essent al final de l'hivern la disminució més important observada. Malgrat aquesta disminució en la precipitació total, en canvi, s'ha observat un augment de les precipitacions extremes. Les simulacions per al segle XXI que utilitzen models climàtics pronostiquen també descensos importants en la precipitació total en l'àrea mediterrània, mentre que algunes projeccions dels models regionals mostren un possible augment de les pluges torrencials (Christensen & Christensen, 2003) amb episodis de precipitació més curts i més intenses. Per a la regió de la Mediterrània nord-occidental (Hertig & Jacobeit, 2008) van trobar un augment de la precipitació a l'hivern per al període 2071-2100, sota l'escenari B2 (un dels escenaris d'emissions de gasos d'efecte hivernacle del SRES, *Special Report on Emission Scenarios*, publicat pel IPCC <http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/>, que modelitzen les emissions futures en base a diferents patrons de desenvolupament social, econòmic, polític i tecnològic), mentre que a la tardor i la primavera van trobar una disminució. El possible augment en les condicions anticiclòniques a les estacions de transició (tardor i primavera) a la regió de la Mediterrània podria ser la causa d'aquesta reducció en la precipitació. L'augment de la precipitació a l'hivern podria estar causat per un augment en les condicions ciclòniques, en particular al desembre i gener.

(Buonomo, et al., 2007) van trobar que els canvis en els valors extrems de precipitació augmenten tant en augmentar el període de retorn de la precipitació com en disminuir la durada considerada: per a la regió d'Europa en mitjana, la pluja diària amb un període de retorn de 20 anys

s'incrementarà en un 18% a finals del segle XXI, mentre que per a un període de retorn de 2 anys l'increment mitjà serà només del 13%. I aquests augments són inferiors quan es consideren durades de més de 24 hores. En general, el que s'observa és un augment de les precipitacions extremes en oposició a una reducció en la precipitació mitjana anual. Això està indicant un canvi en el clima futur, amb una reducció substancial dels episodis de precipitació lleugera o moderada i, en canvi, un augment dels episodis de pluja intensa. En termes del factor de canvi climàtic, (Larsen, et al., 2009) van trobar valors generalment per sobre d'1 per a les precipitacions horàries a Europa per al període 2071-2100 sota l'escenari de canvi climàtic A2. Per a la nostra zona, el factor de canvi climàtic calculat va resultar proper a 1,2 per a períodes de retorn entre 5 i 100 anys.

L'avaluació de la possible influència del canvi climàtic en la intensitat de les pluges extremes és molt interessant a l'àrea mediterrània, especialment en zones urbanes densament poblades amb complexos sistemes de clavegueram, generalment vulnerables a les pluges torrencials. Hem obtingut i analitzat sèries futures de precipitació diària per al període 2000-2099, per a sis estacions pluviomètriques situades a l'àrea metropolitana de Barcelona, sota quatre escenaris de canvi climàtic: A1B, A2, B1 i B2 (Taula 4-1)

Nom del model (CGM)		Resolució espacial	Calendari dies/any	Escenaris disponibles
CGCM2	Canadian Center for Climate Modelling and Analysis, Canadà	3.7° x 3.7°	365	A2, B2
BCM2	Bjerknes Center for Climate Research, Noruega	2.8° x 2.8°	365/366	A2, B1, A1B
CNCM3	Centre National de Recherches Météorologiques, França	2.8° x 2.8°	365/366	A2, B1, A1B
ECHAM5	Max Plank Institute for Meteorology, Alemanya	1.8° x 1.8°	365/366	A2, B1, A1B
EGMAM	Universitat Lliure de Berlín	3.7° x 3.7°	360	A2, B1, A1B

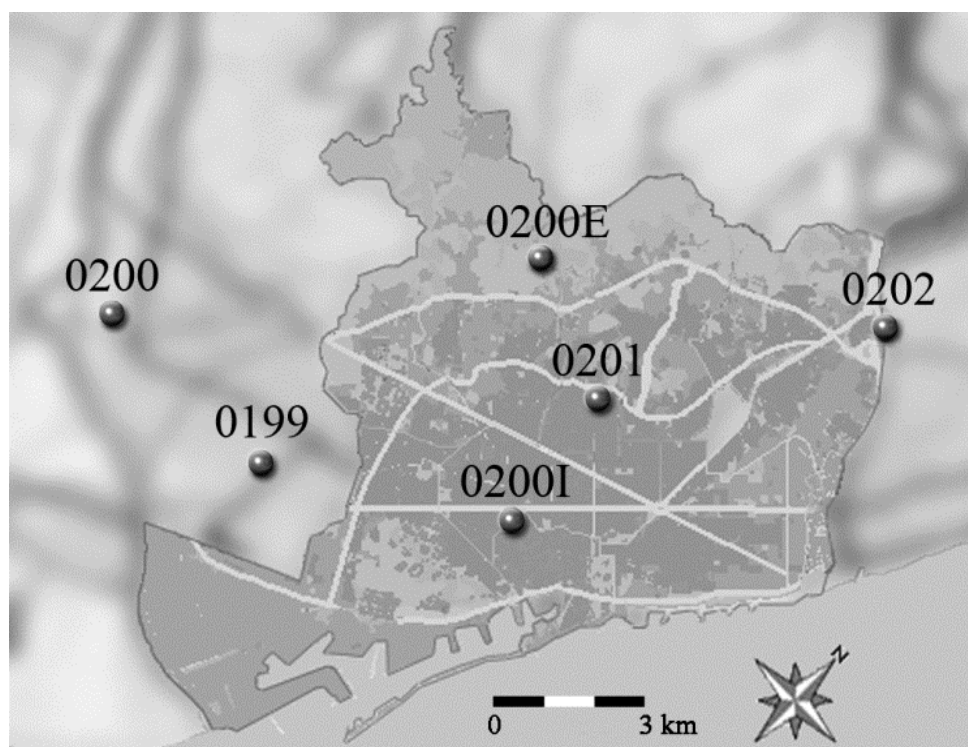
Taula 4-1 Models climàtics utilitzats. Es caracteritzen per tenir diferents resolucions espacials, des de 1.8° fins 3.7. Els diferents models utilitzen diferents calendaris anuals i també diferents escenaris d'actuació

A partir d'aquestes sèries es van calcular els canvis futurs a esperar en les actuals corbes IDF de Barcelona, per a cada escenari climàtic considerat. Per obtenir-ho hem utilitzat un mètode de reducció d'escala (o *downscaling*) temporal que es basa en les propietats d'escala de la precipitació.

4.2. Obtenció de sèries futures pel segle XXI de precipitació a Barcelona: *downscaling* espacial

Els models de circulació general (CGMs) proporcionen projeccions climàtiques futures a gran escala. Per inferir informació a escala regional a partir d'aquestes projeccions se solen utilitzar diferents tècniques de *downscaling* espacial, entre elles les que fan servir un enfoc estadístic (Wilby, et al., 2004) (Imbert & Benestad, 2005) per les quals els *predictandos* d'alta resolució, com ara la pluja, s'obtenen aplicant relacions climàtiques prèviament identificades entre els *predictors* a gran escala, com per exemple els fluxos geostrofics atmosfèrics, i aquests *predictandos*.

Les sèries de precipitació diària futura analitzades, van ser simulades per la *Fundación para la investigación del Clima* (FIC), fent ús d'una tècnica de reducció d'escala estadística basada en el marc conceptual presentat per (Ribalaygua, et al., 2013)



Imatge 4-1 Estacions d'AEMET a Barcelona. 0200E correspon a l'Observatori Fabra

La informació a gran escala utilitzada va ser proporcionada per cinc models de circulació general: quatre provinents del *Fourth Assessment Report AR4* (EGMAM, CNCM3, ECHAM5 i BCM2) de l'IPCC (2007) i un cinquè provinent del *Third Assessment Report AR3* (CGCM2). Aquesta informació climàtica va ser reduïda espacialment d'escala per generar les sèries simulades corresponents a sis estacions pluviomètriques de l'Agència Estatal de Meteorologia (AEMET) instal·lades a l'àrea metropolitana de Barcelona (codis 0199, 0200, 0201, 0202, 0200E i 0200I a la

Imatge 4-1 i Taula 4-2), de les quals es disposa, a més, de més de 20 anys de dades diàries de precipitació observada.

Estació	Nom de l'estació	Altura (m)	X _{UTM} (m)	Y _{UTM} (m)	Prop de
Cornellà del Llobregat	0200	13	421622	4578701	AGCO
Servei Meteorològic	0201	94	429459	4584505	AJUO
Besos	0202	24	432350	4589807	AGBE
Observatori Fabra	0200E	420	436794	4585459	AGTI
Valldoncella	0200I	19	430099	4581612	ELIZ
L'Hospitalet	0199	8	425807	4578879	CLAB

Taula 4-2 Estacions pluviomètriques de l'Agència Estatal de Meteorologia (AEMET) instal·lades a l'àrea metropolitana de Barcelona. Mostrem l'estació de la xarxa BCASA que tenen més a prop.

Per a la verificació de la metodologia es van considerar les dades de la re-anàlisi ERA-40. El conjunt de dades ERA-40 cobreix el període des de l'1 de setembre de 1957 fins el 31 d'agost de 2002, amb una resolució de 1.125° per 1.125° per a tota la superfície de la Terra, quatre vegades al dia (cada sis hores). Aquesta alta resolució espacial i temporal va ser relaxada a la resolució GCM (de 2° a 3° , i generalment dades diàries). Els límits geogràfics de la finestra atmosfèrica utilitzada van ser entre 30° N i 55° N de latitud, i entre 27.5° O i 15° E de longitud; una finestra que cobreix l'àrea geogràfica en estudi i les àrees circumdants, que tenen certa influència meteorològica. Es van assignar diferents pesos als punts de la graella considerada en funció de la seva influència en l'àrea d'estudi (Ribalaygua, et al., 2013) Es van considerar tres escenaris d'emissions de gasos d'efecte hivernacle, l'A1B, l'A2 i el B1, i el període de control 1951-1999, per als models EGMAM, CNCM3, ECHAM5 i BCM2, i dos escenaris, l'A2 i el B2, i el període de control 1961-1999, per al model CGCM2 (IPCC, 2000) El mètode de reducció d'escala utilitzada estima els camps meteorològiques d'alta resolució en superfície per un cert dia x en dos passos: el primer pas és una tècnica d'anàlegs (Zorita & von Storch, 1999), i en la segona etapa la informació d'alta resolució en superfície (per exemple, la precipitació) s'estima mitjançant un enfoc probabilístic. Aquest procediment suposa que les relacions entre els *predictors* (variables atmosfèriques a gran escala) i els *predictandos* (variables de superfície de petita escala) no variaran en el futur sota condicions de canvi climàtic. En el primer pas, igual que en altres mètodes de reducció d'escala per anàlegs, per a cada dia de sortida dels models climàtics es cerquen les situacions meteorològiques més similars observades en les sèries històriques passades, utilitzant els fluxos geostrofics atmosfèrics com la dada rellevant com a criteri de similitud. Aquests fluxos determinen el forçament sinòptic que fa que l'aire ascendeixi o descendeixi, donant lloc a la formació de núvols i la precipitació. A més, el flux a 1000 hPa proporciona informació sobre la direcció del vent de la superfície, dada molt útil per estudiar l'efecte de la topografia en la nuvolositat i la distribució espacial de precipitació. Entre els diferents algorismes que

tradicionalment s'han utilitzat per avaluar la similitud entre els camps, el mètode de les distàncies pseudo-euclidianes (Martin, et al., 1997) (Kruizinga & Murphy, 1983) és el que va donar millors resultats. La similitud entre dos dies es calcula determinant (i estandarditzant), de forma independent, la seva semblança amb respecte a cada un dels quatre camps de predicció finals: la velocitat i la direcció del vent geostrofic a 1000 hPa i a 500 hPa. La dissemblança entre dos dies x_i i x_j , per a cada camp *predictor* P , es calcula com una distància pseudo-euclidiana segons l'equació (4.1)

$$D_p(x_i, x_j) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (P_{ik} - P_{jk})^2 \cdot W_k}{\sum_{k=1}^N W_k}} \quad (4.1)$$

en la qual P_{ik} és el valor del *predictor* P del dia x_i en el punt de la graella k ; W_k és el coeficient de ponderació corresponent al punt k , i N és el nombre de punts de la finestra atmosfèrica (55° N - 30° N; 27,5° O - 15° E), amb una resolució de 2.5° de latitud per 2.5° de longitud. Les pseudo-distàncies calculades per a cada *predictor* s'han d'estandarditzar abans de combinar-se per obtenir una mesura final de similitud. L'estandardització es fa substituint $D_p(x_i, x_j)$ per la magnitud adimensional $cent_p$, la qual és el centil de la mostra de referència de distàncies euclidianes entre els camps *predictor* P que resulta més proper al valor $D_p(x_i, x_j)$. Els valors dels centils es determinen prèviament, independentment per a cada P , per a una mostra de referència de més de 10^6 valors de D_p . Aquesta mostra de referència es calcula aplicant l'equació (4.1) amb els mateixos valors de W_k , per a parelles de dies seleccionades a l'atzar. La mesura de similitud final entre els dies x_i i x_j , $sim(x_i, x_j)$, ve donada per la inversa de la mitjana ponderada dels $cent_p(x_i, x_j)$ per als quatre *predictor* P , segons l'equació (4.2)

$$sim(x_i, x_j) = \frac{1}{\sum_{P=1}^4 (w_P \cdot cent_p(x_i, x_j))} \quad (4.2)$$

on w_P és el coeficient de ponderació del camp *predictor* P . Finalment, els quatre predictors van ser considerats d'igual importància per la diagnosi de la precipitació, i per tant es va assignar a tots quatre un valor de w_P de 0.25.

El segon pas en el procediment de (Ribalaygua, et al., 2013) és la determinació de la relació entre les variables atmosfèriques a gran escala i les variables de superfície de menor escala, i la seva validació amb les observacions. La precipitació futura s'estima com la precipitació mitjana observada per als dies que han resultat més similars al dia concret que es vol simular. Des del conjunt de dies anàlegs a un cert dia x_i trobats a la primera etapa, es selecciona un subconjunt del

K més similars. La similitud en aquest segon pas es determina considerant predictors relacionats amb la precipitació, com ara la humitat, la convergència de flux, l'advecció tèrmica o d'humitat i l'estabilitat. Cada dia x_i tindrà un nombre K d'anàlegs a_j , cadascun amb una certa similitud $sim(x_i, a_j)$, i una precipitació observada p_j . Llavors, la precipitació p_i per a cada dia x_i s'estimarà segons l'equació (4.3)

$$p_i = \frac{\sum_{j=1}^K \rho_j sim(x_i, a_j)}{\sum_{j=1}^K sim(x_i, a_j)} \quad (4.3)$$

La verificació dels resultats obtinguts per *downscaling* del model climàtic es va fer mitjançant el càlcul de dos errors: d'una banda, els valors de la precipitació diària obtinguts per *downscaling* a partir de les dades de la re-anàlisi ERA-40 es comparen amb les dades observades, i d'altra banda, les dades ERA-40 es comparen amb les dades simulades obtingudes per la regionalització del període de control del GCM. El primer error s'ha calculat per corregir els biaixos introduïts pel mètode de *downscaling*, mentre que el segon corregeix els resultats dels models. Tots dos errors s'han calculat com la raó entre els dos valors que es comparen per a cada dia de l'any i cada estació, i per vint quantils d'intensitat, essent el quantil superior el que representa la precipitació més intensa. Multiplicant ambdós errors, el biaix de la sèrie de precipitació diària simulada es va corregir per al període de control (1951-1999). Per al període de simulació climàtic (2000-2099) es va considerar la mateixa correcció de biaix, i cada dia futur es va corregir utilitzant el factor calculat per al quantil d'intensitat i dia de l'any corresponents. En comparació amb les observacions, les sèries simulades obtingudes després d'aquest procés de verificació subestimen en general la quantitat de pluja esperada per a totes les estacions excepte a l'estiu, on tendeix a sobreestimar-la. Les majors diferències s'observen a la tardor. Com és sabut, per la seva resolució espacial i temporal els models de circulació general no resolen estructures atmosfèriques molt curtes i petites i, per tant, no simulen adequadament alguns fenòmens atmosfèrics com els mecanismes convectius. En conseqüència, els resultats són clarament pitjors pels mesos de tardor, amb una fracció significativa de la precipitació de tipus convectiu.

4.3. Anàlisi de les sèries de precipitació diàries simulades a Barcelona pel segle XXI

Seguint la metodologia abans descrita, s'han trobat un total de 114 sèries simulades de precipitació diària, corregides i verificades, per a les sis estacions considerades: 84 d'elles corresponents als quatre escenaris climàtics futurs considerats en l'estudi (24 sèries pel A1B I el B1, 30 per l'A2 i 6 pel B2), mentre que les 30 restants corresponen als períodes de control per als cinc models de circulació general. La Figura 4-1 mostra l'evolució de la precipitació anual a Barcelona per a cada

escenari climàtic com la mediana de tots els resultats obtinguts per a cada model climàtic i per a cada observatori. Cada valor concret s'ha calculat fent la mitjana en una finestra mòbil de 30 anys: el valor associat a l'any 2050, per exemple, es correspon amb la mitjana mòbil del període 2020–2050, és a dir, dels 30 anys anteriors a l'any de referència. Els resultats es mostren com la variació relativa de la precipitació mediana obtinguda respecte de la corresponent al període de referència 1971–2000. Es pot observar com pel darrer terç del segle XXI es preveu una disminució de la precipitació anual d'aproximadament un 5% pels tres escenaris climàtics amb més casos (A1B, A2 i B1). Aquest resultat és comparable amb els obtinguts per (Sillmann, et al., 2013) pel Sud d'Europa, utilitzant els escenaris RCP associats al cinquè informe IPCC.

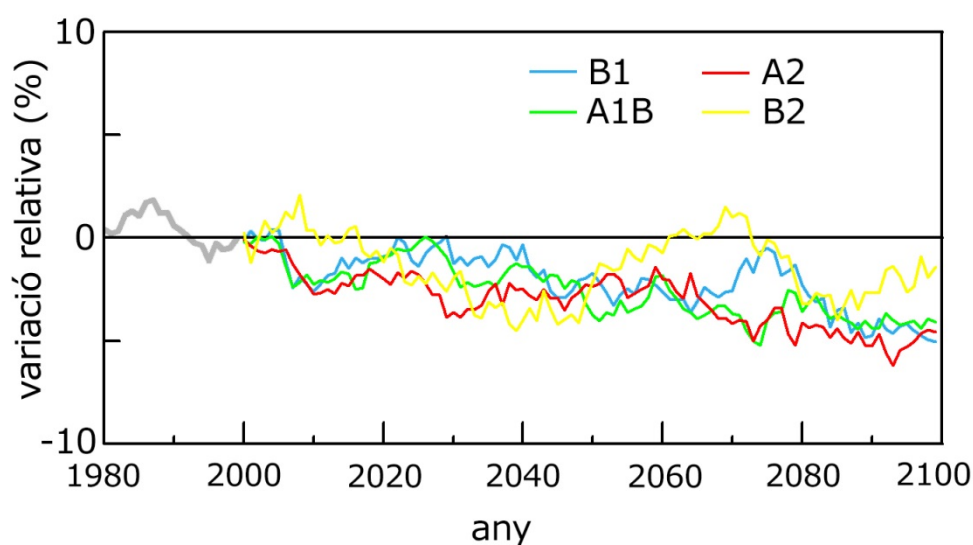


Figura 4-1 Variació relativa de la precipitació anual esperada a Barcelona al s. XXI comparada amb la del període 1971-2000. En gris, el resultat obtingut pel fragment 1980-2000 del període de control

S'ha dut a terme l'anàlisi de freqüència de les sèries futures de precipitació per calcular la precipitació diària amb períodes de retorn de 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 i 500 anys, distingint entre terços de segle (2000–2032, 2033–2065 i 2066–2099). Per comprovar els resultats obtinguts, les corbes IDF calculades pel període de control es poden comparar amb les calculades a partir de les observacions històriques reals (Willems & Vrac, 2011)

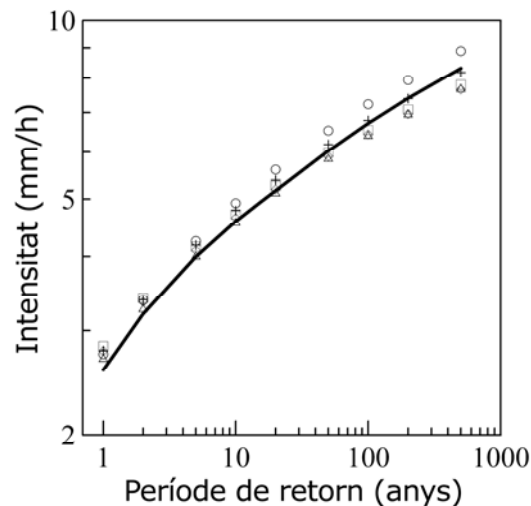


Figura 4-2 Corba IF d'intensitat-freqüència per a 24 h de Barcelona (línia) i punts IF trobats pels períodes de control dels models climàtics considerats

Per exemple, la Figura 4-2 compara la corba històrica real observada d'intensitat-freqüència per a 24 hores obtinguda a partir de les dades del pluviògraf Jardí (1927–1991) situat a l'Observatori Fabra de Barcelona (0200E a la Imatge 4-1) amb els punts d'intensitat-freqüència obtinguts a partir dels models climàtics pel període de control, de mitjana per a les sis estacions, per a períodes de retorn entre 1 i 500 anys. Les diferències són inferiors al 10%.

La precipitació diària esperada per als períodes de retorn de 0.2 anys fins 500 anys calculada per a les 84 sèries corresponents a les sis estacions i els quatre escenaris climàtics futurs considerats ha resultat molt variable depenent del model de circulació general que s'utilitza, com altres autors ja havien referit anteriorment (Ntegeka & Willems, 2008) Els resultats per a les sis estacions mostren certa dispersió també, malgrat la seva proximitat en comparació amb la resolució models climàtics, el que indica una forta dependència del mètode de *downscaling* amb les condicions inicials. Com a exemple, si considerem la diferència relativa entre la precipitació diària esperada per al període de 2066–2099 i el període de control calculat per a les 24 sèries corresponents a l'escenari A1B, s'observen variacions des d'un 6% de disminució fins un 20% d'augment en les intensitats diàries amb període de retorn d'1 any, mentre que per a un període de retorn de 10 anys les variacions estan entre un 17% de disminució i un augment del 31%. Tot i aquesta dispersió, és possible extreure alguna primera conclusió: és notable que en la majoria dels casos les variacions relatives entre el futur i el corresponent precipitació diària període de control són negatius per al període de retorn inferior a 1 any. Aquest resultat està d'acord amb estudis d'obtenció de freqüències inferiors pels valors futurs d'intensitat de pluja baixa i moderada que els registrats en les últimes dècades (Olsson, et al., 2009). D'altra banda, una clara tendència ha estat trobat cap a l'augment de la precipitació diària extrema. Així, per al segon i l'últim terç del segle XXI i períodes

de retorn superiors a 50 anys, la precipitació diària augmenta per més del 60% dels casos: per a l'últim terç, l'augment és superior al 10% en més del 40% dels casos sota els escenaris A1B i A2, mentre que per al segon terç l'increment és superior al 10% en el 50% dels casos per a l'escenari A1B.

El factor de canvi climàtic c_f (Arnbjerg-Nielsen, 2012) es defineix com (4.4) la raó entre la intensitat de la pluja amb un període de retorn T i una durada t per a un escenari climàtic futur, $I(t, T)_{futur}$, i la corresponent intensitat pel clima actual, $I(t, T)_{present}$.

$$c_f = \frac{I(t, T)_{futur}}{I(t, T)_{present}} \quad (4.4)$$

S'han calculat valors d'aquests factors de canvi climàtic prenent les sèries simulades de precipitació diària com a clima futur i les corresponents al període de control com a clima present. La Taula 4-3 mostra aquests factors pels quatre escenaris de canvi climàtic utilitzats, per als períodes 2000–2032, 2033–2065 i 2066–2099, i diferents períodes de retorn. Els factors del canvi climàtic consignats en aquesta taula són els valors mitjans obtinguts per als diferents CGM i les 6 estacions considerades.

2000-2032		Període de retorn T (anys)					
Escenari	1	5	10	20	50	100	500
A1B	1.02	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
A2	1.00	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97
B1	1.04	1.03	1.03	1.03	1.02	1.02	1.02
B2	0.99	1.02	1.02	1.03	1.04	1.04	1.05
2033-2065		Període de retorn T (anys)					
Escenari	1	5	10	20	50	100	500
A1B	1.00	1.03	1.04	1.05	1.06	1.06	1.08
A2	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01	1.01	1.02
B1	1.01	1.02	1.02	1.03	1.03	1.04	1.05
B2	1.00	1.01	1.01	1.01	1.02	1.02	1.03
2066-2099		Període de retorn T (anys)					
Escenari	1	5	10	20	50	100	500
A1B	1.04	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.06
A2	1.00	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	1.07
B1	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01
B2	1.00	1.05	1.07	1.08	1.10	1.11	1.14

Taula 4-3 Factors de canvi climàtic c_f per a la pluja diària esperada pel s. XXI amb període de retorn entre 1 i 500 anys, sota quatre escenaris climàtics

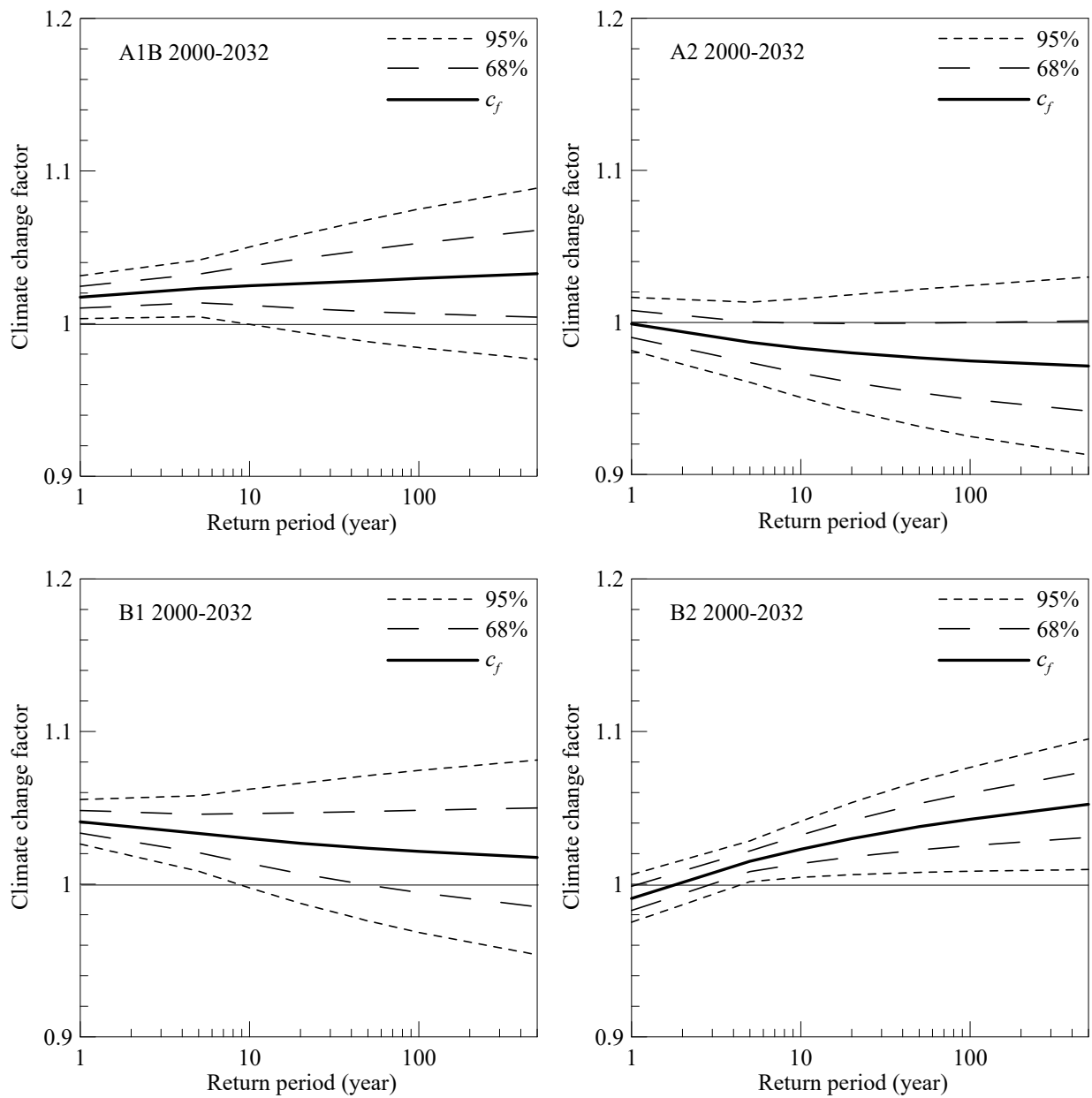


Figura 4-3 Factor climàtic mitjà (línia contínua) per a la precipitació diària, pel període 2000–2032 i escenaris A1B, A2, B1 i B2. La incertesa estadística causada per la variabilitat de la mostra es representa amb línies discontinües (68% i 95%)

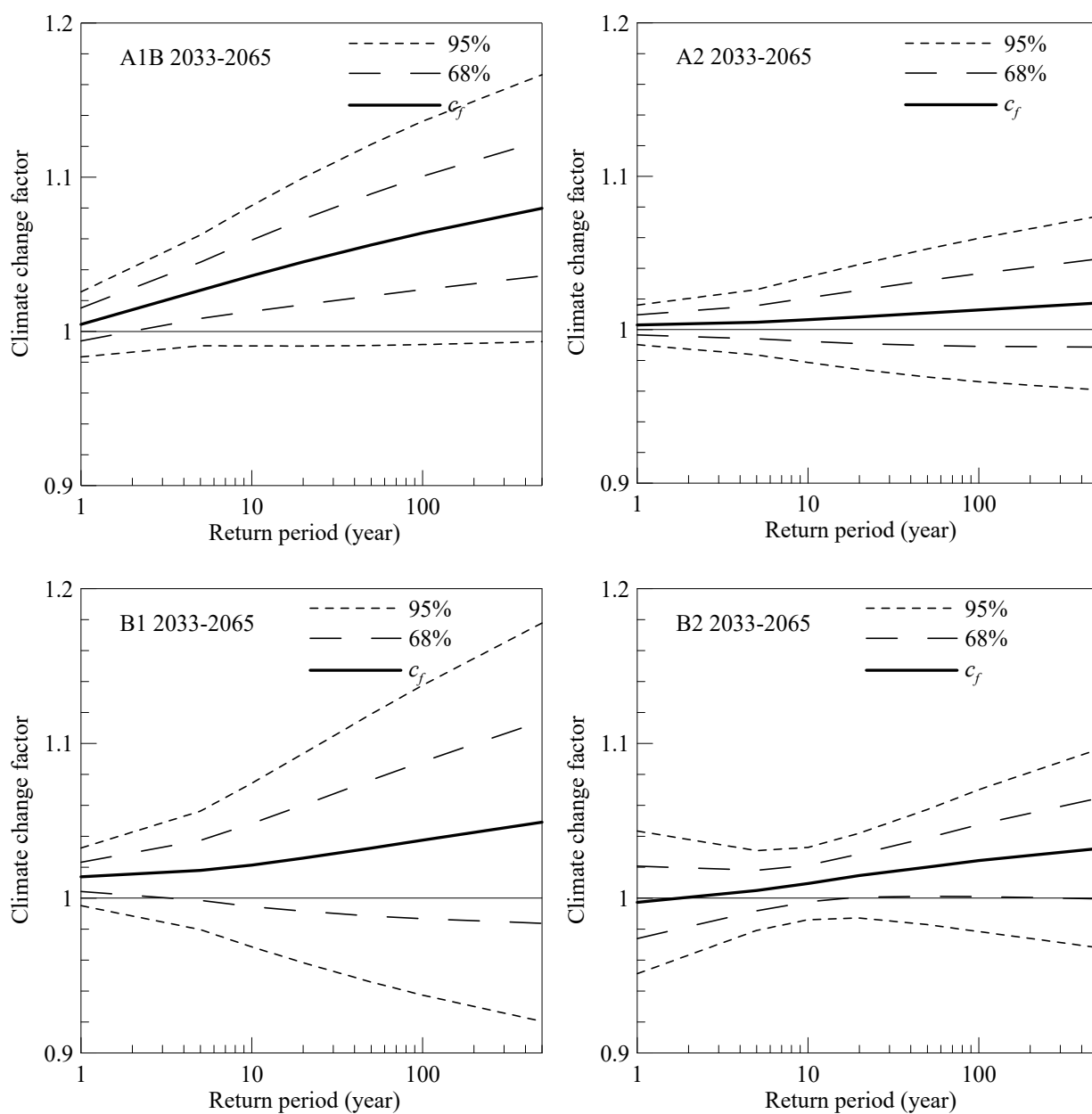


Figura 4-4 Factor climàtic mitjà (línia contínua) per a la precipitació diària, pel període 2033–2065 i escenaris A1B, A2, B1 i B2. La incertesa estadística causada per la variabilitat de la mostra es representa amb línies discontinües (68% i 95%)

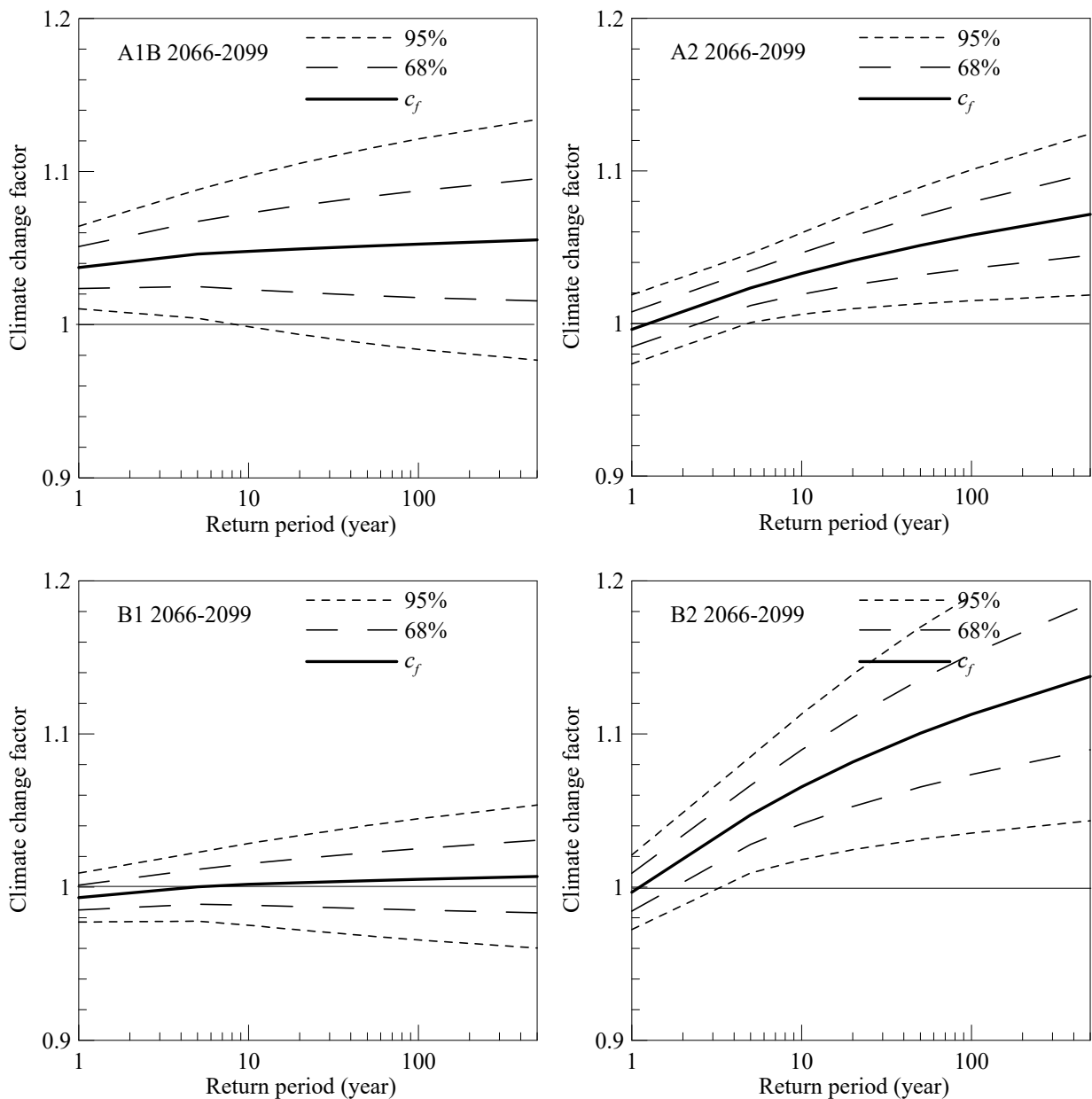


Figura 4-5 Factor climàtic mitjà (línia contínua) per a la precipitació diària, pel període 2066-2099 i escenaris A1B, A2, B1 i B2. La incertesa estadística causada per la variabilitat de la mostra es representa amb línies discontinües (68% i 95%)

Les Figura 4-3, Figura 4-4 i Figura 4-5 mostren els factors corresponents al primer, segon i tercer terç del segle XXI, juntament amb els seus intervals de confiança del 68% i del 95%. Segons els resultats obtinguts, les precipitacions diàries extremes augmentaran amb una probabilitat del 95% sota els escenaris A2 i B2 durant el període de 2066–2099. Per gairebé tots els escenaris i períodes, el factor climàtic mitjà ha resultat més alt com més llarg és el període de retorn. Els valors més alts (més de 1.1 per períodes de retorn de més de 50 anys) han estat obtinguts sota l'escenari B2 en l'últim terç del segle. No obstant això, els resultats per a l'escenari B2 podrien no ser tan significatius com els obtinguts per a la resta ja que per aquest escenari només un model climàtic contribueix, a diferència dels altres escenaris per els quals es van considerar quatre o cinc

models. L'últim terç és també el període en qual els increments han resultat més grans sota l'escenari A2, amb valors lleugerament inferiors (d'1.05 a 1.07 per als períodes de retorn d'entre 50 i 500 anys). Els valors més alts obtinguts sota els escenaris A1B i B1 s'han obtingut en el segon terç del segle, amb factors climàtics mitjans entre 1.03 i 1.08 per als mateixos períodes de retorn. Només durant el període 2000–2032 el factor climàtic mitjà disminueix lleugerament amb l'augment del període de retorn: d'1.04 a 1.02 sota l'escenari B1, i d'1 a 0,97 sota l'escenari A2.

Per resumir, malgrat les previsions d'una davallada futura en les precipitacions anuals a Barcelona (Figura 4-1), els valors de la precipitació diària extrema, amb períodes de retorn entre 10 i 500 anys, previstos durant el darrer terç del s. XXI sota els escenaris climàtics A1B, A2 i B2 superaran (amb una probabilitat del 95%) els valors actuals de la corba IF per a 24 hores de Barcelona, en percentatges que oscil·len entre el 3% i el 14%, el major sempre sota l'escenari B2.

4.4. Generació de les corbes IDF de Barcelona sota els diferents escenaris climàtics futurs

El mètode aplicat per trobar les corbes IDF de Barcelona a partir dels valors de la pluja diària per diferents períodes de retorn estimada sota les condicions dels diferents escenaris climàtics considerats (punts IF), és una tècnica de *downscaling* temporal que estima intensitats de precipitació sots-diàries tenint en consideració les propietats fractals de la precipitació, en concret, la seva invariància d'escala.

Els conceptes d'escala simple i múltiple per tal de caracteritzar l'estructura probabilística del procés de precipitació van ser introduïts per (Gupta & Waymire, 1990), mentre que (Burlando & Rosso, 1996) van ser els pioners en aplicar relacions d'escala als moments estadístics de les sèries de màxims anuals de pluja. Altres autors (Benjoudi, et al., 1997) (Menabde, et al., 1999) (Nguyen, et al., 2002) (Nhat, et al., 2007) (Desramaut, 2008) (Bara, et al., 2010) (Pérez, et al., 2015) (Rodríguez, et al., 2017) van obtenir corbes IDF de diferents localitats a partir de dades diàries, basant-se en la propietat d'invariància d'escala de la pluja. La relació d'escala entre el moment estadístic d'ordre q de la intensitat diària màxima anual, I_{24}^q , i el corresponent a una altra duració t , I_t^q , es pot expressar segons (4.5)

$$I_t^q = \lambda^{K(q)} I_{24}^q \quad (4.5)$$

essent λ la raó d'escala entre diferents durades i $K(q)$ una funció d'escala. En la hipòtesi mono-fractal o d'escala simple, la funció d'escala és lineal: $K(q) = \beta q$. L'equació (4.5) escrita en termes d'intensitat-duració-freqüència ($q = 1$) i suposant la hipòtesi mono-fractal, queda com la (4.6),

$$I(t, T) = \left(\frac{t}{24}\right)^\beta I(24, T) \quad (4.6)$$

on t és la duració en hores (i per tant $t/24$ la raó d'escala λ), T el període de retorn, i β un exponent d'escala que s'ha de determinar. L'equació (4.6) permet la determinació d'intensitats sots-diàries a partir de les diàries (*downscaling* temporal) una vegada conegut el règim d'escala corresponent. (Rodríguez, et al., 2017) van determinar els valors de l'exponent d'escala per Barcelona ($\beta = -0.78$) i l'Observatori de l'Ebre ($\beta = -0.79$), alhora que per un centenar d'estacions pluviomètriques cobrint bona part de la Península Ibèrica i les Illes Balears, un 8% d'elles en territori català.

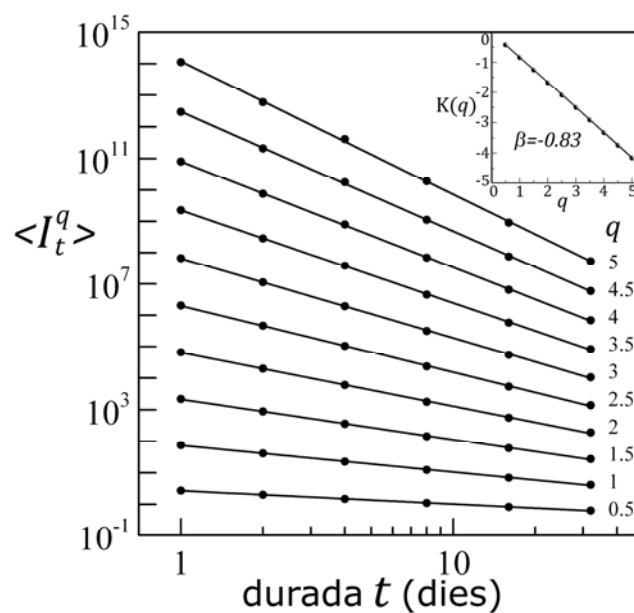


Figura 4-6 Moments estadístics obtinguts per les sèries futures simulades pel model BCN2 sota l'escenari A1B a Barcelona (2066-2099). La figura inserida mostra la funció d'escala lineal $K(q)$

De l'anàlisi de propietats d'escala de la sèrie futura de precipitació diària màxima anual simulada per al període 2000-2099, es van calcular les intensitats màximes de precipitació per a les durades sots-diàries superiors a 1 hora. Amb aquesta finalitat, es van generar, per agregació de la sèrie futura diària, sèries de precipitació amb durades des de 2 fins a 32 dies. En aquest cas, els moments d'ordre q per a cada durada t , $\langle I_t^q \rangle$, es van calcular com el valor mitjà per les sis estacions pluviomètriques de Barcelona considerades. Per a tots els models de circulació i escenaris utilitzats en la simulació, els resultats van mostrar l'existència d'un règim únic d'escala al llarg de tot el rang de durades estudiades (d'1 a 32 dies). Com a exemple, la Figura 4-6 mostra els resultats obtinguts pel model BCM2 sota l'escenari A1B durant l'últim terç del segle XXI. L'exponent d'escala mitjà per les sèries de control va resultar de $\beta = -0.83$, mentre que per les sèries futures simulades sota

els escenaris climàtics considerats, A1B, A2, B1 i B2, els exponents van resultar lleugerament inferior.

2033-2065	BCM2	CNCM3	ECHAM5	EGMAM	CGCM2	Mitjana
CONTROL	-0.821	-0.841	-0.838	-0.829	-0.841	-0.834
A1B	-0.863	-0.846	-0.878	-0.829		-0.854
A2	-0.863	-0.870	-0.863	-0.870	-0.847	-0.862
B1	-0.820	-0.861	-0.842	-0.827		-0.838
B2					-0.825	-0.825

2066-2099	BCM2	CNCM3	ECHAM5	EGMAM	CGCM2	Mitjana
CONTROL	-0.821	-0.841	-0.838	-0.829	-0.841	-0.834
A1B	-0.830	-0.849	-0.804	-0.827		-0.828
A2	-0.835	-0.873	-0.852	-0.827	-0.880	-0.853
B1	-0.875	-0.849	-0.848	-0.819		-0.848
B2					-0.858	-0.858

Taula 4-4 Exponents d'escala trobats per a cada model i escenari climàtic considerats, pels dos darrers terços del s. XXI

La Taula 4-4 mostra els exponents obtinguts pels diferents models i escenaris, pel segon i darrer terç del s. XXI, els valors dels quals són molt similars als calculats per altres autors, com ara (Bara, et al., 2010) per Eslovàquia. Aquests exponents es van fer servir, aplicant l'equació (4.6), per trobar les intensitats de pluja futura per a durades entre 1 i 24 hores per a diversos períodes de retorn, és a dir, punts IDF futurs calculats considerant la invariància d'escala de la pluja. La Figura 4-7 mostra les corbes IDF generades pels escenaris climàtics A2 i B2, comparades amb les corbes actuals de Barcelona (Casas, et al., 2004)

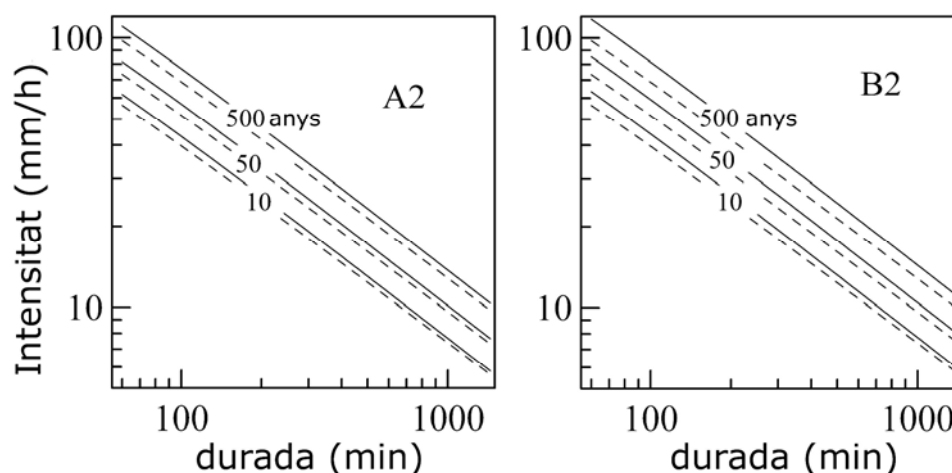


Figura 4-7 Corbes IDF futures de Barcelona estimades durant el període 2066-2099, sota els escenaris A2 i B2 (línies contínues), comparades amb les IDF actuals (a traços)

2033-2065		Període de retorn (anys)					
Escenari	1	5	10	20	50	100	500
A1B	1.08	1.11	1.12	1.13	1.14	1.15	1.17
A2	1.09	1.09	1.10	1.10	1.10	1.10	1.11
B1	1.03	1.03	1.04	1.04	1.05	1.06	1.07
B2	0.95	0.96	0.96	0.97	0.97	0.98	0.98
2066-2099		Període de retorn (anys)					
Escenari	1	5	10	20	50	100	500
A1B	1.02	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05
A2	1.06	1.09	1.10	1.10	1.11	1.12	1.13
B1	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.06
B2	1.05	1.11	1.12	1.14	1.16	1.17	1.20

Taula 4-5 Factors de canvi climàtic per les precipitacions horàries estimades amb períodes de retorn entre 1 i 500 anys, pels dos darrers terços del s. XXI sota els quatre escenaris climàtics considerats.

Els factors de canvi climàtic corresponents a les precipitacions horàries estimades es van determinar aplicant l'equació (4.4) i es mostren a la Taula 4-5 i a les Figura 4-9 i Figura 4-10, per a tots els escenaris climàtics durant els dos darrers terços del segle XXI, juntament amb els seus intervals de confiança del 68% i 95%. A la Figura 4-8 es presenten els resultats pel primer terç del segle XXI.

S'ha trobat una clara tendència durant el s. XXI cap a l'augment de les precipitacions horàries extremes, sota tots els escenaris climàtics considerats. Per al primer terç del segle, per exemple, van estimar que les precipitacions horàries augmentaran amb una probabilitat del 95% sota l'escenari B2, mentre que pel segon terç augmentaran sota els escenaris A1B i A2. Pel darrer terç del segle van estimar augments sota tres dels escenaris: A2, B1 i B2. El major valor del factor de canvi climàtic, més de 1.12 per períodes de retorn de més de 10 anys, es va obtenir sota l'escenari B2 en aquest darrer terç (2066–2099), encara que els resultats per a l'escenari B2 es van estimar com a menys significatius que la resta degut a la contribució d'un únic model climàtic per a l'anàlisi. Sota l'escenari A2 i també per períodes de retorn superiors a 10 anys, es van estimar factors de canvi climàtic variant entre 1.10 i 1.13 pel darrer terç del segle, mentre que (Larsen, et al., 2009) van trobar un valor de 1.2 per períodes de retorn de més de 20 anys. De fet, van arribar a la conclusió que un esdeveniment de precipitació d'una hora de duració amb un període de retorn de 20 anys estimat en l'actualitat a Espanya es convertirà en un esdeveniment de 10 anys de període de retorn a la fi del s. XXI. D'acord amb els resultats obtinguts sota l'escenari A2, en l'últim terç del segle se li assignarà un període de retorn d'11 anys a la quantitat de precipitació horària a la qual se li estimen 20 anys de període de retorn en el present. Sota l'escenari A1B, els valors més alts s'assoleixen en el segon terç del segle, variant des d'1.12 fins a 1.17 per a períodes de retorn de entre 10 i 500 anys. És remarcable que aquests factors climàtics sota l'escenari A1B resultin més grans pel segon terç del segle que pel darrer, tal com van trobar també (Gregersen, et al.,

2011) Aquest resultat pot estar relacionat amb la disminució de les emissions de gasos d'efecte hivernacle previstes sota l'escenari A1B pel final de segle (IPCC, 2012). Sota l'escenari B1, els valors més alts són similars en el segon i últim terç, entre 1.04 i 1.07 per als períodes de retorn entre 10 i 500 anys.

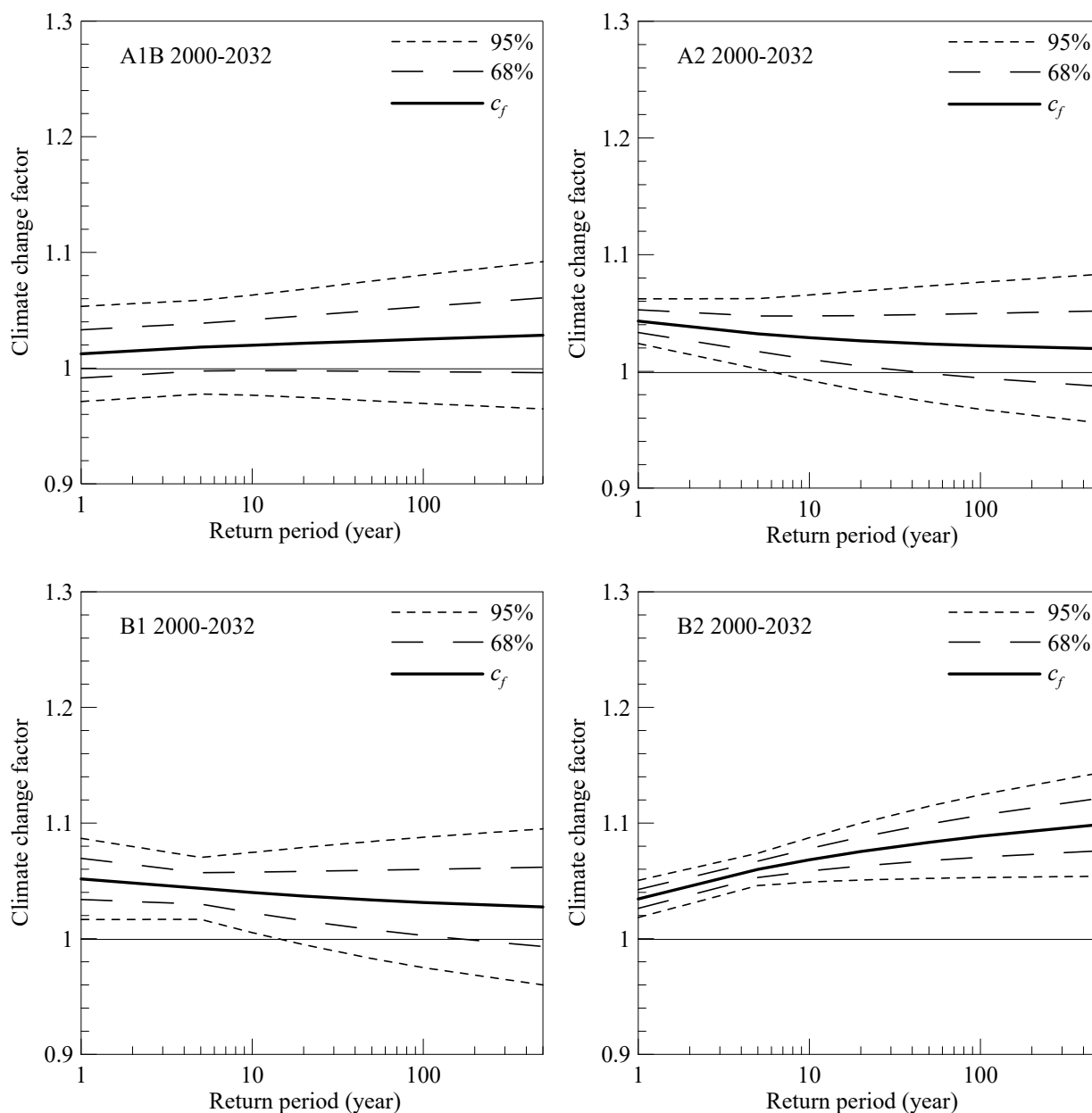


Figura 4-8 Factor climàtic mitjà (continuo) per a la precipitació horària, pel període 2000-2032 i escenaris A1B, A2, B1 i B2. La incertesa estadística causada per la variabilitat de la mostra es representa amb línies discontinües (68% i 95%)

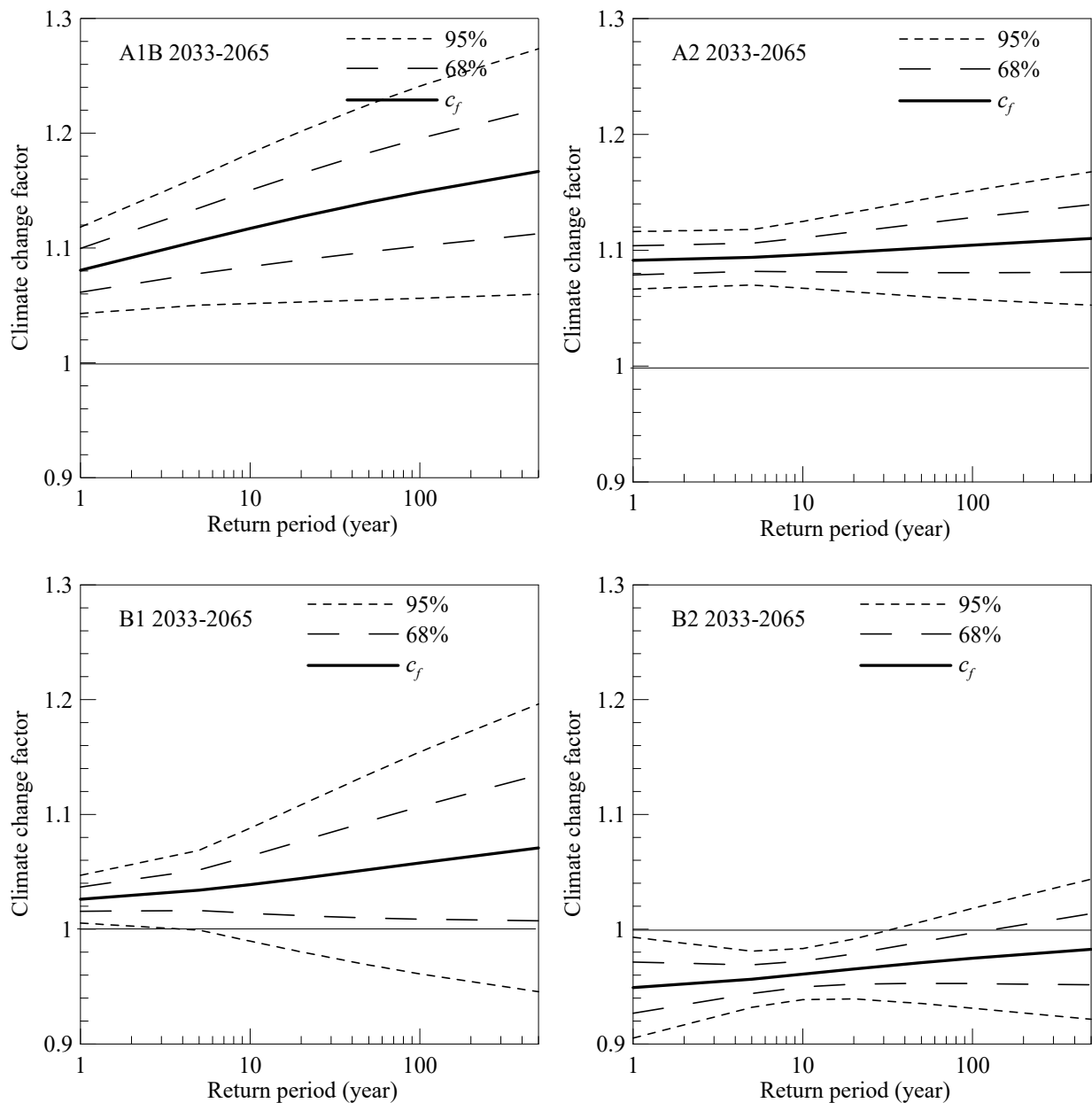


Figura 4-9 Factor climàtic mitjà (continuo) per a la precipitació horària, pel període 2033-2065 i escenaris A1B, A2, B1 i B2. La incertesa estadística causada per la variabilitat de la mostra es representa amb línies discontinües (68% i 95%)

Els factors del canvi climàtic per la precipitació horària són en la majoria dels casos lleugerament més alts que els calculats per a la precipitació diària. Les majors diferències entre ambdós casos s'han trobat durant el segon terç del s. XXI sota els escenaris A1B (8%) i A2 (9%). És a dir, els resultats trobats no només estimen una variació diferent per la pluja futura en funció de la seva freqüència, amb lleugera disminució pels totals anuals envers discrets augments pels episodis extrems, sinó que per aquests darrers també indiquen una certa diferència segons la durada, esperant-se un major augment per les durades curtes (1 hora) que per les diàries.

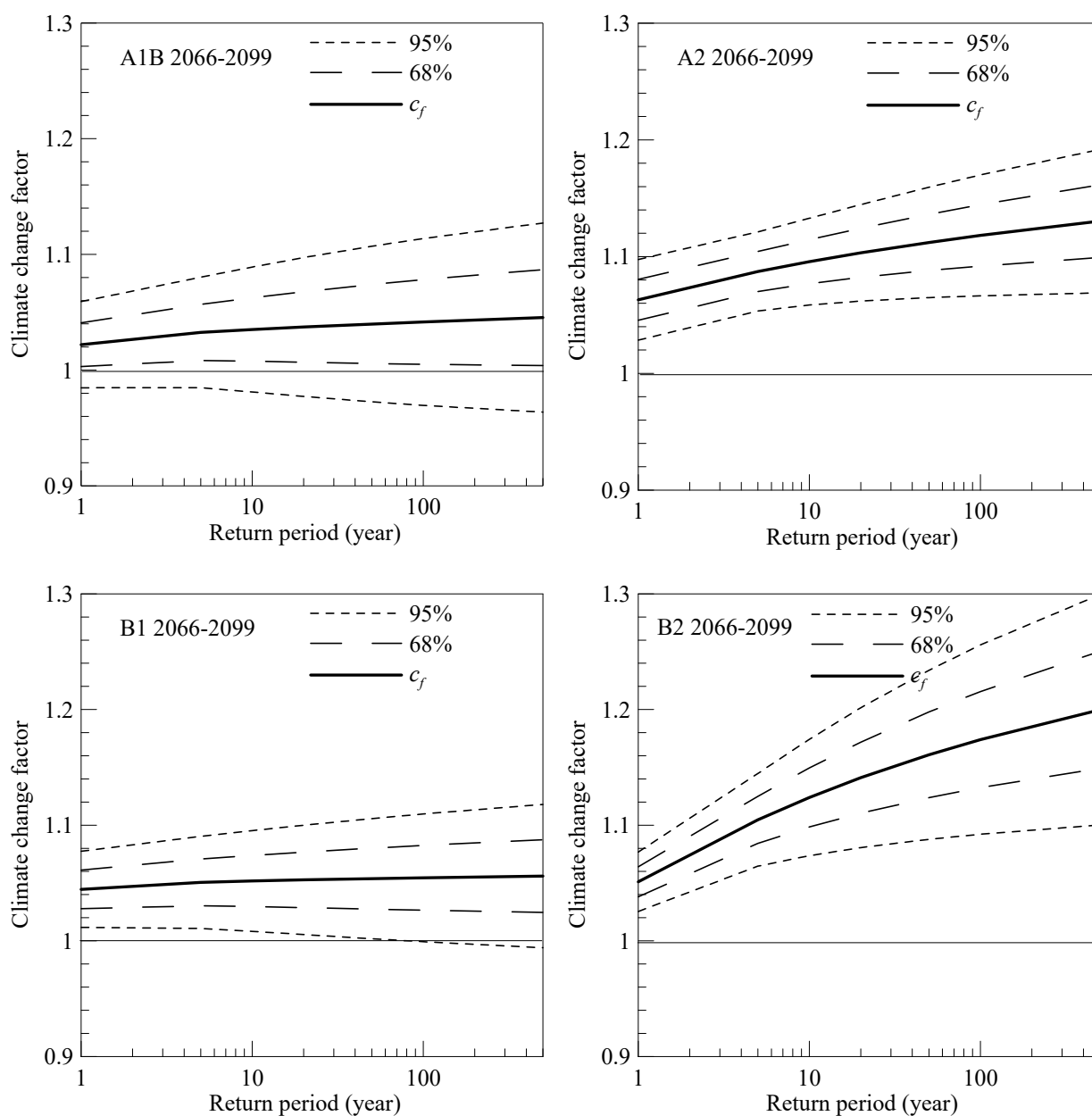


Figura 4-10 Factor climàtic mitjà (continuo) per a la precipitació horària, pel període 2066-2099 i escenaris A1B, A2, B1 i B2. La incertesa estadística causada per la variabilitat de la mostra es representa amb línies discontinües (68% i 95%)

Aquesta conclusió és compatible amb els resultats obtinguts en altres estudis, com ara els de (Christensen & Christensen, 2003), que preveuen, malgrat una possible reducció de la precipitació mitjana a l'estiu sobre una part substancial d'Europa, un augment en la quantitat de precipitació que supera el percentil 95 en moltes zones del continent, la qual cosa indica un possible augment en la freqüència dels episodis d'inundacions severes o torrencials. O d'una manera més global, el que l' (IPCC, 2012) reporta envers les pluges extremes, indicant que és probable que la freqüència de la precipitació de caràcter intens, o bé la proporció de les pluges intenses en el total de la precipitació, augmentin durant el s. XXI sobre moltes àrees del planeta, i que aquesta precipitació intensa augmenti en algunes zones on, en canvi, es preveu un descens del total de la precipitació.

5. Conclusions

S'ha estudiat l'organització espacial i temporal de la pluja a l'àrea metropolitana de Barcelona mitjançant els registres de la xarxa de pluviòmetres que l'empresa BCASA gestiona i manté a la ciutat de Barcelona. S'ha treballat amb dades des del 1994 fins el 2019. S'ha disposat, doncs, de sèries de dades amb una llargada màxima de 26 anys, que ja proporcionen una certa significació climàtica.

Inicialment s'ha estudiat el comportament temporal de les pluges calculant les corbes d'intensitat-duració-freqüència (IDF). Seguidament s'ha analitzat l'estructura espacial de les pluges determinant els factors de reducció areal (ARF) i també, dins d'aquest estudi espacial, s'ha calculat un nombre efectiu d'estacions independents equivalent a la xarxa (n_{eq}) per cada durada. A continuació s'ha realitzat un estudi cinemàtic de les precipitacions, calculant propietats de temps, d'espai i de velocitat per totes les pluges registrades per la xarxa i també per una selecció formada per les pluges extremes de període de retorn major que 1 any. Finalment, utilitzant sèries de pluja diària simulades per diferents models i escenaris climàtics pel segle XXI, s'ha estimat quins seran els canvis que es poden produir en les corbes IDF en el futur.

S'ha confeccionat un programari específic per aquests propòsits, dissenyat de manera que sigui fàcilment adaptable a la realització de futurs càlculs amb les dades actualitzades o amb les dades d'altres xarxes.

Pel que fa referència a la determinació de les relacions IDF, en primer lloc s'han trobat les corbes IDF per a cada pluviòmetre i seguidament s'ha escollit la màxima intensitat de tota la xarxa corresponent a cada durada i freqüència per trobar les corbes IDF globals de la xarxa. S'ha constatat que els valors de les intensitats són significativament diferents segons el mètode utilitzat pel seu càlcul: funcions empíriques de tres paràmetres *mnp*, o funcions de distribució d'extremes de tipus GEV. Les corbes IDF obtingudes a partir de l'ajust de les dades a la funció empírica de tipus potencial-exponencial de tres paràmetres (funcions *mnp*) són les que presenten els valors més elevats de les intensitats. Aquestes intensitats són més altes que les proposades per Casas (2005) per tots els períodes de retorn i durades superiors a 1 hora. Per períodes de retorn de 2 i 5 anys i durades inferiors a 1 hora estan per sota de les trobades per Casas (2005). Quan per l'ajust es fa ús d'una distribució de valors extrem de tipus Gumbel a la sèrie de màxims anuals, s'obtenen unes corbes IDF de menor intensitat per totes les durades i períodes de retorn. Ajustant a una distribució de valors extrem de tipus GEV s'obtenen unes corbes IDF similars a les obtingudes ajustant Gumbel per períodes de retorn fins a 10 anys i de major intensitat per períodes de retorn més llargs.

Tenint present que les corbes IDF s'utilitzen principalment com una eina de prevenció de riscos deguts a xàfecs extrems, amb el criteri de màxim valor de la intensitat de la xarxa, les obtingudes fent ús de l'ajust amb la funció empírica de tres paràmetres *mnp* es proposen com a actualització de les corbes IDF de la zona metropolitana de Barcelona.

En relació a l'estudi de la organització espacial de la pluja, mitjançant tècniques d'anàlisi objectiva (mètode d'interpolació de Barnes), s'han generat camps continus de precipitació en una quadrícula regular amb una resolució espacial de 300 m × 300 m per a les tempestes registrades pels pluviòmetres del 1994 al 2019, amb una durada des de 10 min fins a 24 h. Els camps de precipitació obtinguts han estat utilitzats per estimar els factors de reducció d'àrea (ARF) característics de l'àrea metropolitana of Barcelona. Els factors ARF són útils per estimar la probabilitat de què una tempesta tingui lloc en una zona determinada. Així, el període de retorn d'un esdeveniment de pluja obtingut mitjançant un punt de les corbes IDF construïdes a partir de registres dels pluviòmetre, es pot re-calcular utilitzant els valors ARF per estimar la recurrència d'aquest esdeveniment a l'àrea d'estudi.

Considerant la correlació existent entre els valors de precipitació registrats pels diferents pluviòmetres s'ha fet una estimació del nombre d'estacions independents que és equivalent a la xarxa (n_{eq}). Ha resultat que la xarxa equival a un nombre entre 3 i 5 pluviòmetres independents per precipitacions de durades entre 10 i 30 minuts, i a menys de 2 pluviòmetres independents per a les durades més llargues de dues hores.

S'ha estimat satisfactòriament la velocitat i direcció de moviment sobre la ciutat dels esdeveniments de pluja succeïts entre 1994 i 2019. Entre les quatre característiques de pluja que s'han utilitzat com a punts de referència per al seguiment de les tempestes analitzades, es conclou que la més apropiada és la de la determinació del centroid del hietograma, ja que en el seu càlcul es té en compte tota la informació del hietograma i no només un punt únic, com per exemple, l'hora d'inici o del primer màxim. És de destacar que s'han analitzat en detall les pluges a l'interval de 60 minuts més intens, per tal d'aconseguir d'aquesta forma capturar el moviment de les cèl·lules individuals.

La xarxa urbana és capaç de detectar altes intensitats en punts específics de la zona urbana que cobreix amb una resolució que les imatges de radar no poden proporcionar. En aquest sentit, amb les dades de precipitació dels pluviòmetres s'ha pogut analitzar el desplaçament de les pluges extremes de període de retorn major o igual a 1 any registrades per la xarxa de pluviòmetres entre 1994 i 2019. Aquest estudi mostra la importància de disposar de les dades d'una densa xarxa

d'indicadors d'intensitat en una gran ciutat densament poblada com Barcelona, equipada amb un complex sistema de clavegueram.

És molt interessant l'avaluació de la possible influència del canvi climàtic en les precipitacions extremes en la zona mediterrània a causa de les habituals i característiques altes intensitats del seu patró pluviomètric. Aquesta anàlisi també és molt important a les zones urbanes, especialment aquelles densament poblades amb sistemes de clavegueram complexos, generalment vulnerables a les pluges torrencials. En aquest treball, s'ha analitzat un total de 114 sèries simulades de pluges diàries, 84 per al període 2000–2099 i 30 per a la període de control 1951-1999. Aquestes sèries es van obtenir per a sis estacions termo-pluviomètriques localitzades a l'àrea metropolitana de Barcelona utilitzant la informació proporcionada per cinc models de circulació general sota quatre futurs escenaris climàtics d'emissions de gasos d'efecte hivernacle i l'aplicació de mètodes estadístics de reducció d'escala espacial. S'han investigat els canvis potencials en les relacions IDF a causa del canvi climàtic. Per a l'últim terç del segle XXI, sota els escenaris climàtics A1B, A2 i B2, s'ha trobat un augment d'almenys un 4% sobre les precipitacions diàries previstes amb un període de retorn superior a 20 anys. Utilitzant una reducció d'escala temporal basada en les propietats d'escala de la pluja, s'han estimat també les pluges horàries extremes futures. Per a gairebé tots els escenaris i períodes considerats, l'augment de les precipitacions horàries ha resultat lleugerament superiors al de les corresponents precipitacions diàries. Les majors diferències entre les futures precipitacions horàries i diàries s'han trobat en el segon terç

6. Annexos

6.1. Annex A: Valors dels paràmetres m , n i p , pels diferents pluviòmetres i duracions. També mostrem el número de punts utilitzats per fer els ajustos i l'estadístic χ^2

Valors dels paràmetres m , n i p , pels diferents Pluv's i duracions						
NºPluv	Duració(s)	NºPts	m	n	p	χ^2
1	300	78	1.814E-01	-3.86E-01	4.75E-02	4.95301
1	600	111	3.903E-01	-5.01E-01	2.44E-02	3.31731
1	1200	140	7.388E-01	-5.48E-01	1.52E-02	2.11975
1	3600	170	1.871E+00	-6.01E-01	9.43E-03	1.08746
1	7200	187	1.781E+00	-4.60E-01	9.16E-03	1.11853
1	18000	194	9.933E+00	-7.57E-01	5.85E-03	1.19439
1	43200	190	3.977E+01	-9.91E-01	3.77E-03	1.88754
1	86400	162	6.519E+01	-1.04E+00	2.91E-03	1.05332
1	172800	153	7.475E+00	-5.56E-01	3.46E-03	1.12003
1	432000	110	1.537E-02	7.25E-01	5.08E-03	0.83475
1	864000	58	3.211E-02	6.59E-01	4.18E-03	1.14153
2	300	76	2.163E-01	-4.85E-01	4.14E-02	0.72509
2	600	110	4.838E-01	-5.81E-01	2.20E-02	0.45893
2	1200	135	1.183E+00	-7.05E-01	1.28E-02	0.61167
2	3600	163	4.395E+00	-8.35E-01	7.94E-03	1.37594
2	7200	173	5.836E+00	-7.67E-01	7.05E-03	2.23076
2	18000	184	4.517E+00	-5.60E-01	6.75E-03	0.80544
2	43200	172	2.615E+01	-8.97E-01	4.00E-03	1.23578
2	86400	168	9.842E+01	-1.11E+00	2.90E-03	1.33058
2	172800	146	1.358E+01	-6.64E-01	3.46E-03	0.84199
2	432000	104	5.169E-02	5.00E-01	4.80E-03	1.10578
2	864000	57	1.272E-04	1.61E+00	5.13E-03	0.47325
3	300	55	2.775E-01	-6.61E-01	3.93E-02	0.98367
3	600	74	6.427E-01	-7.58E-01	2.03E-02	1.73122
3	1200	84	1.513E+00	-8.57E-01	1.11E-02	1.91909
3	3600	104	6.263E+00	-1.01E+00	5.73E-03	2.36976
3	7200	116	7.111E+00	-9.14E-01	5.20E-03	3.13172
3	18000	113	5.046E+00	-6.84E-01	5.39E-03	0.78837
3	43200	97	1.700E+01	-8.97E-01	3.07E-03	0.83797
3	86400	88	4.921E+01	-1.06E+00	2.06E-03	0.96172
3	172800	71	2.175E+01	-8.21E-01	2.36E-03	0.60704
3	432000	41	1.611E-02	7.19E-01	5.04E-03	0.23491
3	864000	18	7.052E-09	3.43E+00	7.81E-03	0.48037
4	300	81	2.141E-01	-4.20E-01	4.38E-02	0.73523
4	600	112	3.752E-01	-4.23E-01	2.66E-02	1.12124
4	1200	133	8.223E-01	-5.45E-01	1.61E-02	1.71555
4	3600	157	3.270E+00	-7.54E-01	8.52E-03	1.99351
4	7200	171	9.342E+00	-9.32E-01	5.35E-03	0.40925
4	18000	183	3.036E+01	-1.08E+00	3.62E-03	1.42129
4	43200	191	4.855E+01	-1.09E+00	2.88E-03	1.19669
4	86400	163	5.433E+01	-1.05E+00	2.60E-03	0.9717
4	172800	158	1.295E+01	-7.02E-01	2.94E-03	0.8945
4	432000	107	2.785E-01	1.33E-01	3.69E-03	0.59599

Valors dels paràmetres m , n i p , pels diferents Pluv's i duracions						
NºPluv	Duració(s)	NºPts	m	n	p	χ^2
4	864000	48	3.568E-05	1.85E+00	5.34E-03	0.13329
5	300	79	4.445E-01	-8.03E-01	3.08E-02	2.25393
5	600	118	9.567E-01	-8.18E-01	1.63E-02	1.48223
5	1200	140	2.586E+00	-9.39E-01	8.77E-03	1.62781
5	3600	185	1.569E+01	-1.19E+00	3.94E-03	2.32756
5	7200	198	2.515E+01	-1.18E+00	3.20E-03	2.96699
5	18000	212	2.062E+01	-9.86E-01	3.55E-03	1.39907
5	43200	209	2.384E+01	-9.27E-01	2.91E-03	0.90691
5	86400	202	1.827E+01	-8.05E-01	2.76E-03	0.59584
5	172800	175	3.988E+00	-4.48E-01	3.10E-03	0.60896
5	432000	117	1.437E-02	7.11E-01	4.36E-03	1.8031
5	864000	56	4.609E-06	2.20E+00	5.40E-03	0.36535
6	300	79	4.737E-01	-8.51E-01	2.83E-02	3.98945
6	600	112	1.031E+00	-8.38E-01	1.70E-02	4.50918
6	1200	140	2.879E+00	-9.60E-01	9.57E-03	4.2522
6	3600	180	1.073E+01	-1.07E+00	5.85E-03	3.65663
6	7200	187	1.951E+01	-1.09E+00	4.65E-03	1.88766
6	18000	192	1.946E+01	-9.32E-01	4.72E-03	1.35086
6	43200	188	1.081E+01	-7.14E-01	4.59E-03	1.99558
6	86400	180	6.428E+00	-5.51E-01	4.40E-03	2.46944
6	172800	170	1.117E+00	-1.69E-01	4.47E-03	3.78756
6	432000	119	1.727E-04	1.59E+00	6.80E-03	3.07989
6	864000	66	1.696E-06	2.46E+00	6.75E-03	1.94319
7	300	90	3.429E-01	-7.03E-01	2.78E-02	0.97712
7	600	121	8.650E-01	-8.00E-01	1.41E-02	1.54759
7	1200	151	2.276E+00	-9.13E-01	7.53E-03	2.19055
7	3600	187	5.971E+00	-9.18E-01	5.46E-03	1.3897
7	7200	194	7.222E+00	-8.33E-01	5.70E-03	1.25891
7	18000	203	7.456E+00	-7.10E-01	5.23E-03	2.17964
7	43200	206	6.075E+00	-5.87E-01	4.72E-03	1.24282
7	86400	196	9.143E+00	-6.28E-01	3.91E-03	1.07326
7	172800	167	3.973E+00	-4.35E-01	3.55E-03	0.85158
7	432000	114	1.350E-01	3.11E-01	4.25E-03	0.41285
7	864000	63	1.783E-02	7.49E-01	4.09E-03	0.72089
8	300	78	2.223E-01	-4.06E-01	5.10E-02	1.68861
8	600	113	4.030E-01	-4.33E-01	2.90E-02	1.80152
8	1200	137	8.865E-01	-5.57E-01	1.65E-02	1.2
8	3600	168	1.756E+00	-5.31E-01	1.16E-02	2.57523
8	7200	180	1.382E+00	-3.49E-01	1.14E-02	1.56293
8	18000	192	2.141E+00	-3.57E-01	9.04E-03	1.05998
8	43200	197	1.660E+01	-7.72E-01	5.35E-03	2.23176
8	86400	190	2.321E+01	-7.97E-01	4.33E-03	1.07107
8	172800	165	1.322E+00	-1.61E-01	5.24E-03	0.72985
8	432000	119	5.587E-05	1.87E+00	8.13E-03	1.88138
8	864000	67	1.055E+00	1.18E-01	4.30E-03	1.35421
9	300	79	2.722E-01	-6.04E-01	3.74E-02	1.35569
9	600	115	7.461E-01	-7.66E-01	1.73E-02	1.55096
9	1200	139	1.955E+00	-8.78E-01	9.95E-03	0.63805
9	3600	176	5.512E+00	-9.11E-01	6.48E-03	0.83134

Valors dels paràmetres m , n i p , pels diferents Pluv's i duracions						
NºPluv	Duració(s)	NºPts	m	n	p	χ^2
9	7200	196	1.475E+01	-1.04E+00	4.61E-03	1.51434
9	18000	202	3.453E+01	-1.09E+00	3.63E-03	1.51765
9	43200	195	4.568E+01	-1.05E+00	3.12E-03	1.94827
9	86400	186	5.338E+01	-1.03E+00	2.58E-03	1.69175
9	172800	173	1.335E+01	-6.95E-01	2.93E-03	1.76872
9	432000	120	4.437E-02	4.98E-01	4.43E-03	0.62669
9	864000	62	1.451E-06	2.40E+00	6.01E-03	0.62832
10	300	87	5.204E-01	-8.94E-01	2.13E-02	2.53821
10	600	119	9.017E-01	-7.92E-01	1.43E-02	2.14657
10	1200	151	1.967E+00	-8.43E-01	8.74E-03	1.86431
10	3600	183	4.811E+00	-8.56E-01	6.08E-03	0.66173
10	7200	196	8.816E+00	-8.94E-01	5.29E-03	1.08324
10	18000	204	1.931E+01	-9.57E-01	3.95E-03	1.0673
10	43200	209	3.450E+01	-1.00E+00	3.08E-03	2.00828
10	86400	194	3.778E+01	-9.58E-01	2.79E-03	0.62089
10	172800	172	3.051E+01	-8.71E-01	2.45E-03	1.09591
10	432000	116	4.555E-01	5.08E-02	3.52E-03	0.67813
10	864000	61	8.069E-03	9.03E-01	4.30E-03	0.17737
11	300	87	2.909E-01	-5.94E-01	3.23E-02	0.58596
11	600	129	5.559E-01	-6.16E-01	1.72E-02	1.85644
11	1200	156	1.321E+00	-7.42E-01	8.79E-03	1.4011
11	3600	186	5.953E+00	-9.56E-01	4.19E-03	1.21168
11	7200	199	6.792E+00	-8.75E-01	3.98E-03	1.5121
11	18000	210	6.662E+00	-7.41E-01	4.01E-03	1.06165
11	43200	208	5.000E+00	-6.03E-01	3.79E-03	0.74699
11	86400	203	5.405E+00	-5.65E-01	3.43E-03	0.88688
11	172800	181	5.561E+00	-5.31E-01	2.94E-03	1.44179
11	432000	122	6.539E-03	8.48E-01	4.70E-03	1.76241
11	864000	58	3.426E-09	3.47E+00	7.03E-03	0.33801
12	300	78	2.196E-01	-4.22E-01	4.28E-02	1.1533
12	600	113	4.792E-01	-5.38E-01	2.16E-02	1.6176
12	1200	141	1.037E+00	-6.46E-01	1.15E-02	1.08922
12	3600	175	2.831E+00	-7.31E-01	6.63E-03	1.21396
12	7200	185	3.969E+00	-7.10E-01	5.71E-03	0.76003
12	18000	186	8.196E+00	-7.64E-01	4.51E-03	0.85542
12	43200	187	1.669E+01	-8.36E-01	3.53E-03	1.29015
12	86400	175	4.759E+01	-9.91E-01	2.66E-03	1.4851
12	172800	149	1.136E+02	-1.12E+00	1.95E-03	0.93268
12	432000	95	6.449E+00	-4.35E-01	2.70E-03	2.14894
12	864000	44	1.036E+02	-6.87E-01	2.68E-03	0.76062
13	300	56	3.208E-01	-5.70E-01	3.85E-02	0.41827
13	600	71	8.032E-01	-7.07E-01	1.85E-02	0.96458
13	1200	86	1.785E+00	-7.85E-01	1.20E-02	1.88383
13	3600	103	2.721E+00	-6.69E-01	9.53E-03	0.572
13	7200	101	4.403E+00	-7.24E-01	6.82E-03	0.79002
13	18000	86	3.770E+01	-1.15E+00	2.87E-03	0.34361
13	43200	76	7.596E+01	-1.24E+00	1.81E-03	0.6672
13	86400	75	2.598E+02	-1.43E+00	9.23E-04	1.35139
13	172800	56	1.636E+02	-1.24E+00	1.27E-03	0.57869

Valors dels paràmetres m , n i p , pels diferents Pluv's i duracions						
NºPluv	Duració(s)	NºPts	m	n	p	χ^2
13	432000	31	7.449E-01	-7.06E-02	3.27E-03	0.3388
14	300	86	2.353E-01	-4.20E-01	4.23E-02	1.47057
14	600	122	5.518E-01	-5.62E-01	2.10E-02	1.03045
14	1200	154	1.466E+00	-7.34E-01	1.06E-02	0.79168
14	3600	187	4.707E+00	-8.59E-01	5.80E-03	0.47446
14	7200	204	1.093E+01	-9.69E-01	3.97E-03	1.39325
14	18000	214	2.330E+01	-1.01E+00	3.15E-03	2.00768
14	43200	219	2.398E+01	-9.27E-01	2.80E-03	1.19922
14	86400	210	3.248E+01	-9.24E-01	2.43E-03	1.9784
14	172800	181	1.849E+01	-7.56E-01	2.40E-03	0.34715
14	432000	121	7.195E-02	3.97E-01	3.72E-03	0.22648
14	864000	55	9.523E-06	2.07E+00	5.16E-03	0.24718
15	300	88	2.079E-01	-3.48E-01	4.38E-02	0.74035
15	600	122	4.720E-01	-4.75E-01	2.26E-02	1.32739
15	1200	155	1.310E+00	-6.67E-01	1.17E-02	2.20473
15	3600	188	2.698E+00	-6.53E-01	8.08E-03	1.27102
15	7200	207	2.864E+00	-5.58E-01	7.74E-03	0.39424
15	18000	202	6.706E+00	-6.61E-01	5.71E-03	1.06289
15	43200	206	5.270E+00	-5.42E-01	4.98E-03	0.92678
15	86400	198	5.742E+00	-5.19E-01	4.22E-03	1.68325
15	172800	169	1.917E+00	-2.58E-01	4.23E-03	1.03433
15	432000	118	2.555E-02	6.54E-01	4.99E-03	0.76304
15	864000	66	2.643E-09	3.57E+00	7.85E-03	0.34932
16	300	80	2.411E-01	-4.37E-01	4.27E-02	1.2136
16	600	119	5.467E-01	-5.62E-01	2.11E-02	0.7508
16	1200	146	9.137E-01	-5.69E-01	1.35E-02	1.28507
16	3600	181	5.177E+00	-8.59E-01	6.57E-03	0.99567
16	7200	188	9.258E+00	-8.83E-01	5.50E-03	0.94735
16	18000	199	1.205E+01	-8.09E-01	5.06E-03	1.57185
16	43200	194	2.163E+01	-8.73E-01	3.79E-03	1.31162
16	86400	174	2.232E+01	-8.24E-01	3.42E-03	1.33266
16	172800	157	6.584E+00	-5.40E-01	3.43E-03	0.53991
16	432000	115	1.067E-02	7.78E-01	5.02E-03	1.16357
16	864000	63	3.190E-04	1.45E+00	4.97E-03	0.59539
17	300	80	2.625E-01	-5.39E-01	4.26E-02	0.90621
17	600	113	5.553E-01	-6.00E-01	2.37E-02	0.85607
17	1200	144	1.219E+00	-6.94E-01	1.33E-02	0.73057
17	3600	179	4.078E+00	-8.30E-01	6.84E-03	1.92082
17	7200	201	6.112E+00	-8.22E-01	5.44E-03	2.08963
17	18000	219	7.108E+00	-7.31E-01	4.56E-03	1.09232
17	43200	225	7.934E+00	-6.80E-01	3.60E-03	1.24569
17	86400	206	9.487E+00	-6.65E-01	2.99E-03	1.02354
17	172800	181	1.648E+00	-2.70E-01	3.30E-03	2.15623
17	432000	120	9.878E-04	1.19E+00	4.73E-03	2.11451
17	864000	57	6.490E-18	6.83E+00	9.62E-03	1.26108
18	300	93	3.172E-01	-7.09E-01	2.63E-02	0.37308
18	600	126	7.891E-01	-7.98E-01	1.28E-02	1.11954
18	1200	159	1.895E+00	-8.89E-01	6.84E-03	1.15973
18	3600	184	7.044E+00	-1.02E+00	3.61E-03	1.18747

Valors dels paràmetres m , n i p , pels diferents Pluv's i duracions						
NºPluv	Duració(s)	NºPts	m	n	p	χ^2
18	7200	201	1.242E+01	-1.04E+00	3.10E-03	2.3256
18	18000	218	2.350E+01	-1.05E+00	2.72E-03	1.13996
18	43200	216	2.216E+01	-9.46E-01	2.74E-03	1.18452
18	86400	207	3.577E+01	-9.80E-01	2.38E-03	0.75097
18	172800	174	2.528E+01	-8.49E-01	2.31E-03	0.59914
18	432000	121	7.157E-01	-5.13E-02	3.23E-03	1.10894
18	864000	58	3.322E-03	1.03E+00	4.14E-03	0.88013
19	300	81	3.312E-01	-6.98E-01	3.41E-02	0.95324
19	600	114	8.418E-01	-8.07E-01	1.71E-02	2.58914
19	1200	149	2.349E+00	-9.41E-01	8.91E-03	2.47421
19	3600	186	7.166E+00	-1.02E+00	4.76E-03	1.84805
19	7200	199	1.243E+01	-1.03E+00	3.85E-03	1.61751
19	18000	209	1.316E+01	-8.97E-01	3.87E-03	1.81809
19	43200	212	1.028E+01	-7.51E-01	3.40E-03	1.54172
19	86400	207	1.496E+01	-7.67E-01	2.80E-03	0.88524
19	172800	189	9.815E+00	-6.26E-01	2.71E-03	0.27319
19	432000	118	5.927E-02	4.44E-01	3.94E-03	0.52483
19	864000	59	3.276E-06	2.26E+00	5.50E-03	0.36118
20	300	95	2.056E-01	-4.23E-01	3.69E-02	1.36162
20	600	129	4.896E-01	-5.52E-01	1.88E-02	1.01085
20	1200	163	1.211E+00	-6.92E-01	1.03E-02	2.45893
20	3600	196	4.606E+00	-8.71E-01	5.26E-03	2.1979
20	7200	204	9.061E+00	-9.33E-01	3.99E-03	0.94634
20	18000	220	1.876E+01	-9.88E-01	3.07E-03	0.89351
20	43200	211	2.041E+01	-9.07E-01	2.87E-03	0.444
20	86400	207	2.181E+01	-8.57E-01	2.63E-03	1.3131
20	172800	185	1.247E+01	-6.86E-01	2.69E-03	1.03892
20	432000	123	2.436E-01	1.69E-01	3.64E-03	0.63462
20	864000	60	1.296E-02	8.06E-01	3.97E-03	0.51508
21	300	82	8.312E-01	-1.17E+00	1.20E-02	
21	600	115	7.307E-01	-7.34E-01	1.51E-02	2.164
21	1200	147	9.232E-01	-6.10E-01	1.19E-02	1.37259
21	3600	167	2.595E+00	-6.99E-01	7.70E-03	0.80427
21	7200	184	4.860E+00	-7.47E-01	6.53E-03	1.30341
21	18000	182	2.282E+01	-1.01E+00	4.13E-03	2.49523
21	43200	190	1.730E+01	-8.57E-01	3.89E-03	1.56874
21	86400	174	2.635E+01	-9.02E-01	2.95E-03	0.9919
21	172800	154	2.151E+01	-8.14E-01	2.64E-03	1.17012
21	432000	108	6.788E+00	-4.67E-01	2.79E-03	0.87264
21	864000	54	3.581E+02	-1.02E+00	1.96E-03	0.41746
22	300	87	1.931E-01	-3.19E-01	4.72E-02	2.34132
22	600	120	3.994E-01	-4.30E-01	2.50E-02	1.46796
22	1200	149	9.187E-01	-5.62E-01	1.43E-02	0.85184
22	3600	186	8.693E+00	-1.02E+00	5.26E-03	1.65783
22	7200	194	2.523E+01	-1.17E+00	3.66E-03	2.46386
22	18000	205	7.087E+01	-1.26E+00	2.84E-03	2.42725
22	43200	214	8.951E+01	-1.21E+00	2.35E-03	1.66722
22	86400	196	6.553E+01	-1.07E+00	2.31E-03	1.07348
22	172800	179	1.501E+01	-7.14E-01	2.75E-03	0.52474

Valors dels paràmetres m , n i p , pels diferents Pluv's i duracions						
NºPluv	Duració(s)	NºPts	m	n	p	χ^2
22	432000	122	9.413E-02	3.62E-01	4.03E-03	0.617
22	864000	61	2.116E-02	8.01E-01	4.39E-03	1.16779
23	300	82	2.987E-01	-5.45E-01	3.27E-02	1.41382
23	600	107	6.552E-01	-6.37E-01	1.61E-02	1.07918
23	1200	132	1.821E+00	-8.08E-01	7.78E-03	1.04497
23	3600	154	7.558E+00	-9.95E-01	3.49E-03	0.76
23	7200	162	1.144E+01	-9.81E-01	3.10E-03	0.48963
23	18000	166	1.430E+01	-9.07E-01	3.07E-03	0.61929
23	43200	156	1.551E+01	-8.38E-01	2.84E-03	0.63838
23	86400	142	1.043E+01	-7.07E-01	2.78E-03	0.85436
23	172800	125	3.562E+00	-4.38E-01	3.08E-03	0.75874
23	432000	78	8.463E-03	8.07E-01	4.70E-03	0.42878
23	864000	37	4.484E-07	2.57E+00	5.68E-03	1.24642
24	300	70	2.776E-01	-5.87E-01	3.68E-02	0.62223
24	600	98	5.522E-01	-6.16E-01	2.10E-02	1.59971
24	1200	122	1.245E+00	-7.17E-01	1.22E-02	3.52639
24	3600	144	2.401E+00	-6.90E-01	8.83E-03	2.60833
24	7200	162	1.520E+00	-4.44E-01	9.79E-03	1.42842
24	18000	160	3.144E+00	-5.52E-01	6.60E-03	1.56345
24	43200	156	3.052E+00	-4.68E-01	5.70E-03	1.2978
24	86400	128	1.674E+00	-2.92E-01	5.28E-03	0.69559
24	172800	111	3.549E+00	-4.51E-01	3.55E-03	0.60342
24	432000	79	5.974E-02	4.17E-01	4.29E-03	1.43787
24	864000	40	2.545E-06	2.31E+00	6.13E-03	0.47863
25	300	80	2.569E-01	-4.82E-01	3.31E-02	0.4699
25	600	116	4.496E-01	-4.88E-01	1.80E-02	1.37252
25	1200	139	9.440E-01	-5.89E-01	9.75E-03	0.65132
25	3600	165	2.200E+00	-6.46E-01	5.92E-03	0.53071
25	7200	172	3.141E+00	-6.41E-01	5.08E-03	1.33328
25	18000	163	8.047E+00	-7.51E-01	3.84E-03	0.9917
25	43200	167	3.389E+00	-4.68E-01	4.18E-03	1.09689
25	86400	138	1.675E+01	-7.55E-01	2.85E-03	0.90626
25	172800	121	1.419E+01	-6.84E-01	2.57E-03	0.60283
25	432000	70	1.168E+00	-1.10E-01	2.87E-03	0.64138
25	864000	37	6.654E-03	8.88E-01	3.55E-03	0.33164
26	300	63	3.126E-01	-6.89E-01	3.62E-02	0.45998
26	600	86	8.325E-01	-8.34E-01	1.63E-02	0.80791
26	1200	108	2.256E+00	-9.65E-01	8.00E-03	0.90207
26	3600	128	6.987E+00	-1.04E+00	3.87E-03	1.22282
26	7200	140	1.435E+01	-1.09E+00	3.00E-03	1.04037
26	18000	135	1.526E+01	-9.62E-01	2.97E-03	1.02523
26	43200	131	1.093E+01	-7.81E-01	2.99E-03	0.64012
26	86400	114	7.938E+00	-6.51E-01	2.86E-03	0.8761
26	172800	100	5.909E+00	-5.49E-01	2.80E-03	0.24051
26	432000	56	1.465E-01	2.36E-01	3.22E-03	0.49776
26	864000	29	3.935E-03	9.20E-01	3.30E-03	0.24932
28	300	23	2.117E-01	-4.93E-02	7.56E-02	1.32364
28	600	28	2.443E-01	9.26E-03	4.46E-02	1.09758
28	1200	26	1.831E-01	2.11E-01	3.41E-02	1.01663

Valors dels paràmetres m , n i p , pels diferents Pluv's i duracions

NºPluv	Duració(s)	NºPts	m	n	p	χ^2
28	3600	19	1.585E-01	2.46E-01	2.05E-02	0.32763
28	7200	17	1.546E-01	2.69E-01	1.67E-02	0.14222
28	18000	15	3.831E-01	1.58E-02	1.05E-02	0.17354
29	300	44	3.477E-01	-4.13E-01	2.57E-02	0.39749
29	600	57	4.206E-01	-2.57E-01	1.92E-02	0.40695
29	1200	59	9.954E-01	-4.13E-01	1.08E-02	0.67383
29	3600	43	9.215E-01	-2.73E-01	7.39E-03	0.714
29	7200	34	4.488E-01	-5.59E-02	6.88E-03	1.06447
29	18000	29	1.560E+01	-8.00E-01	3.15E-03	0.36728
29	43200	20	2.187E+03	-1.72E+00	3.69E-04	0.17333
29	86400	17	1.909E+03	-1.64E+00	-1.81E-05	0.24844

6.2. Annex B: Corbes IDF calculades amb la funció de probabilitat mnp de la regió metropolitana de Barcelona

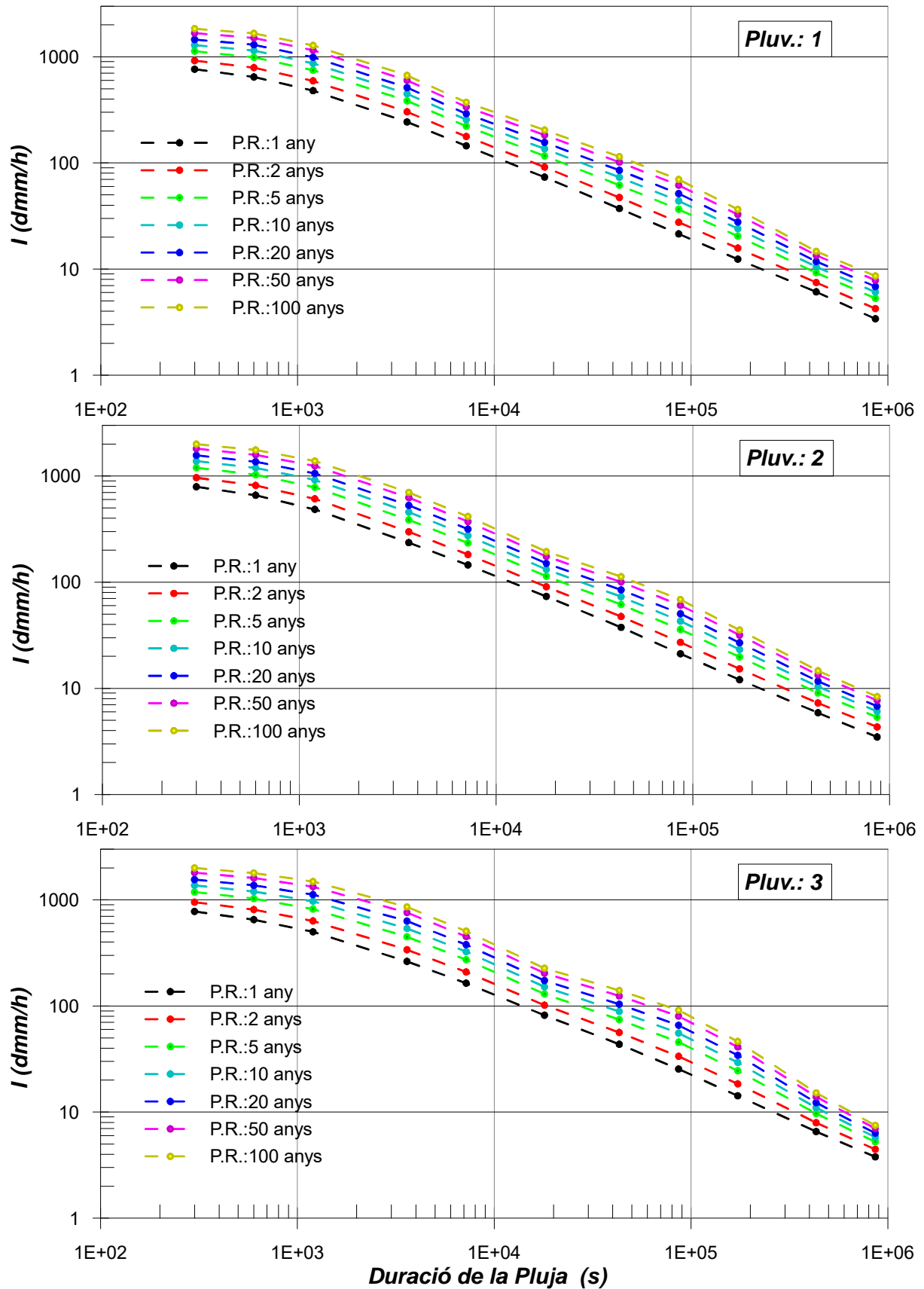


Figura B-1 Corbes IDF (mètode mnp) de la regió metropolitana de Barcelona. Pluv's 1, 2 i 3

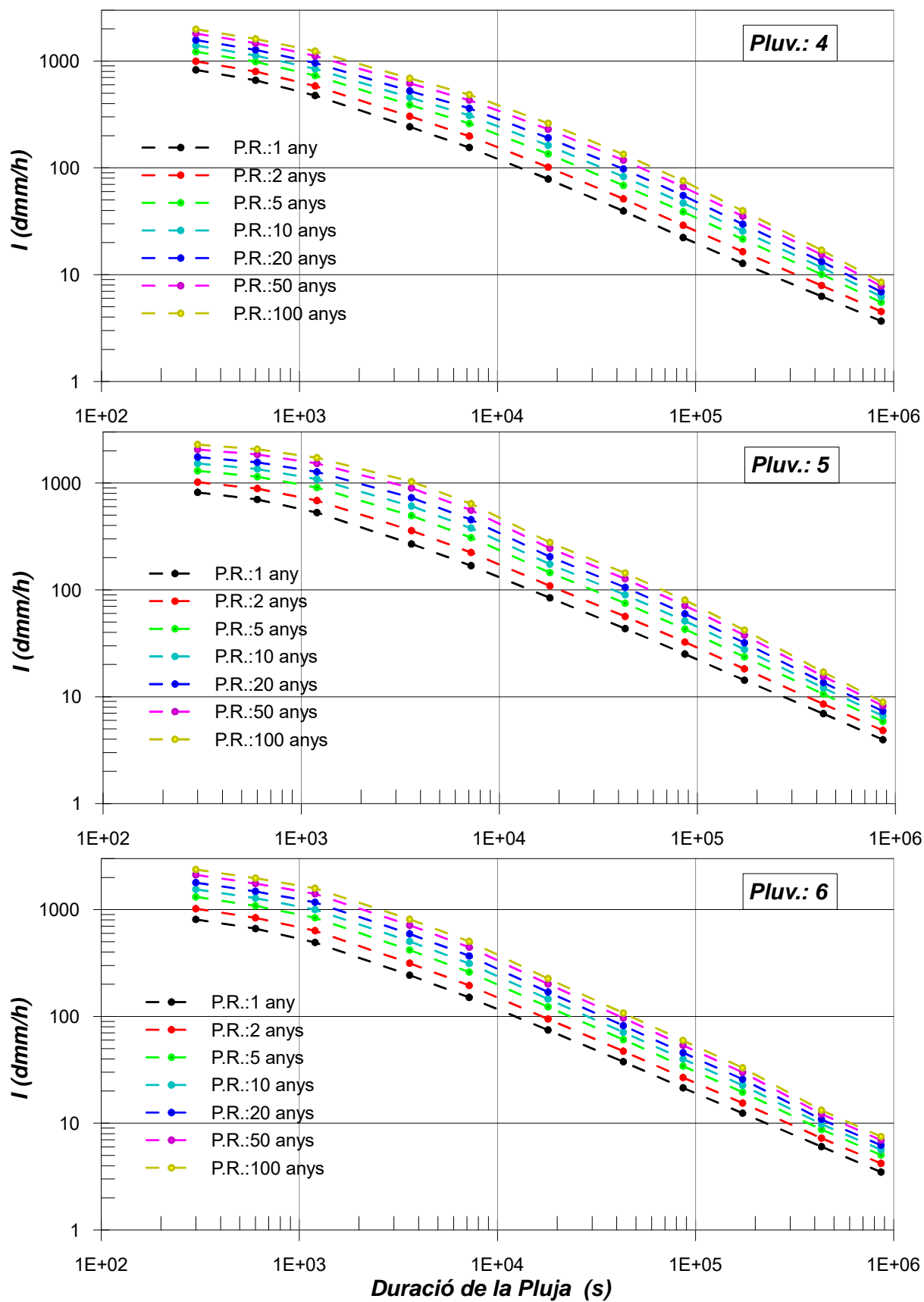


Figura B-2 Corbes IDF (mètode mnp) de la regió metropolitana de Barcelona. Pluv's 4, 5 i 6

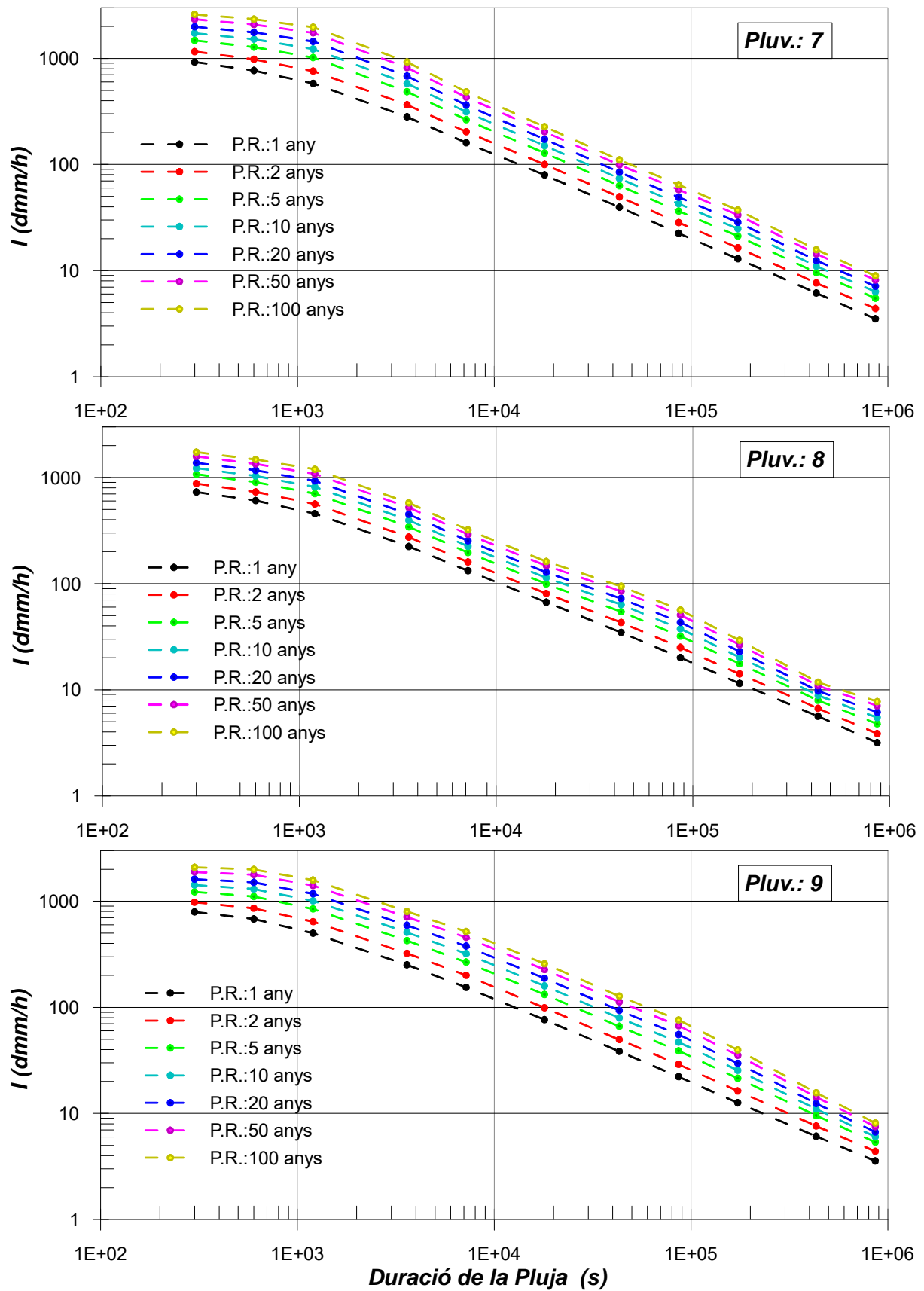


Figura B-3 Corbes IDF (mètode mnp) de la regió metropolitana de Barcelona. Pluv's 7, 8 i 9

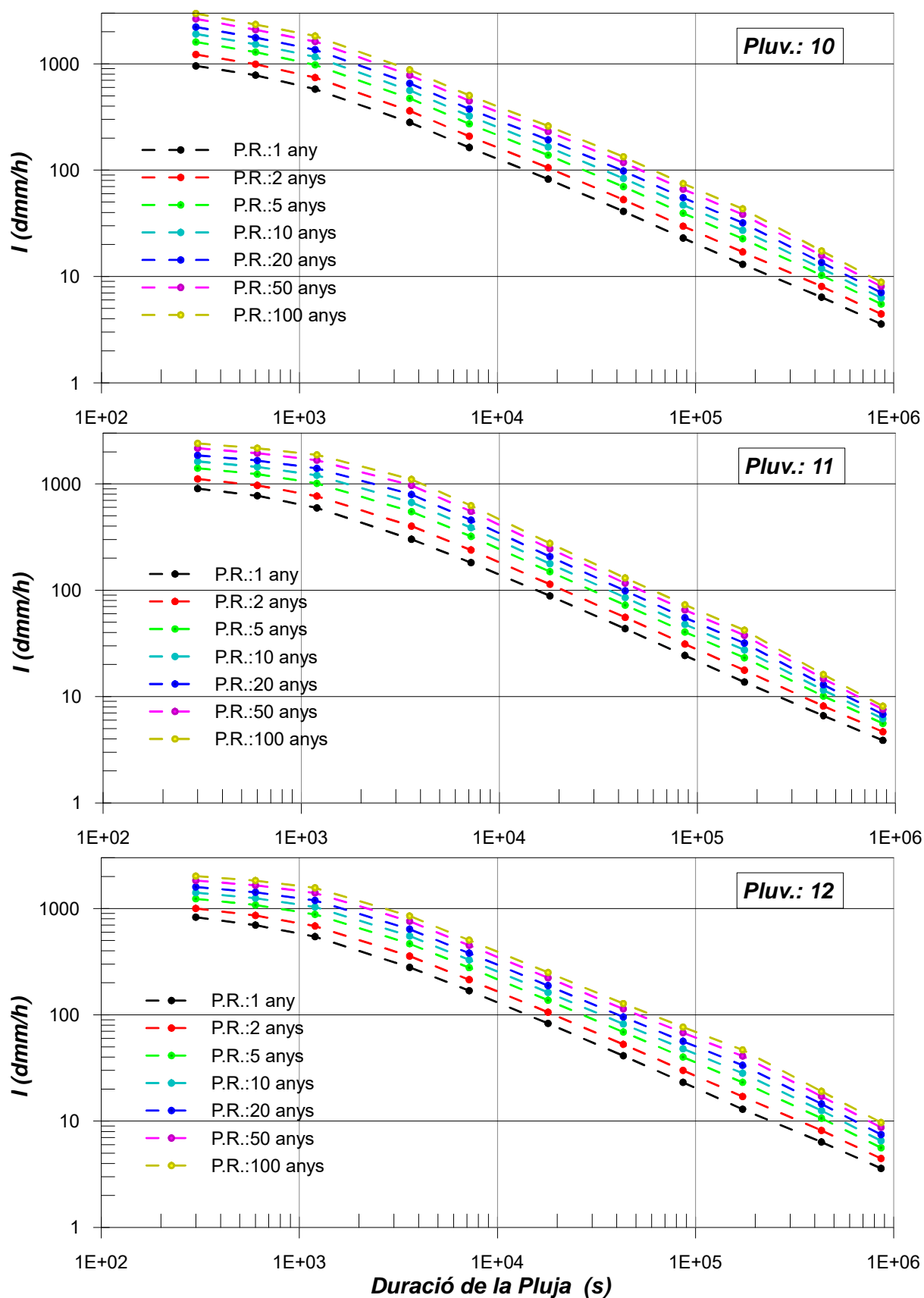


Figura B-4 Corbes IDF (mètode mnp) de la regió metropolitana de Barcelona. Pluv's 10, 11 i 12

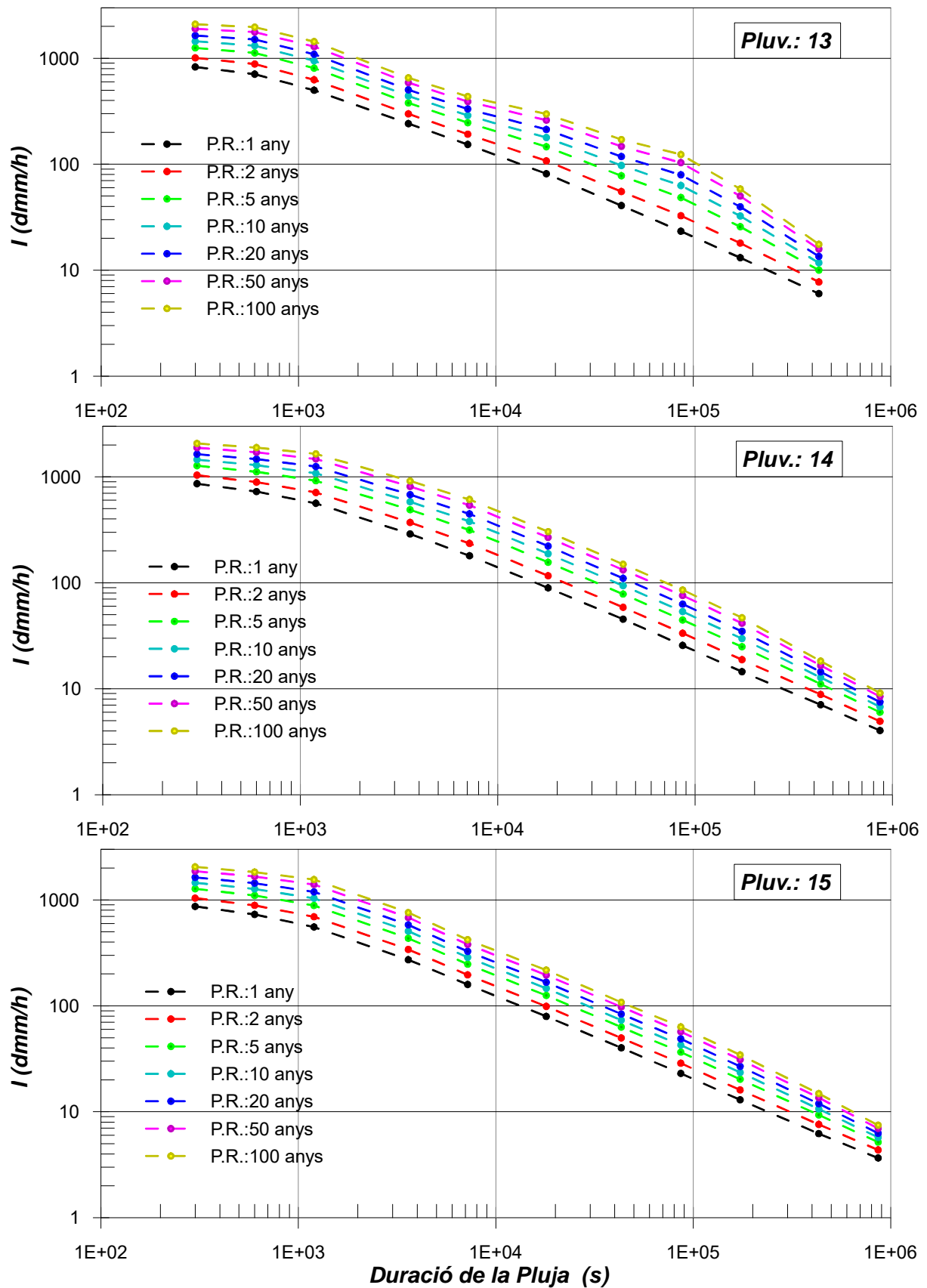


Figura B-5 Corbes IDF (mètode mnp) de la regió metropolitana de Barcelona. Pluv's 13, 14 i 15

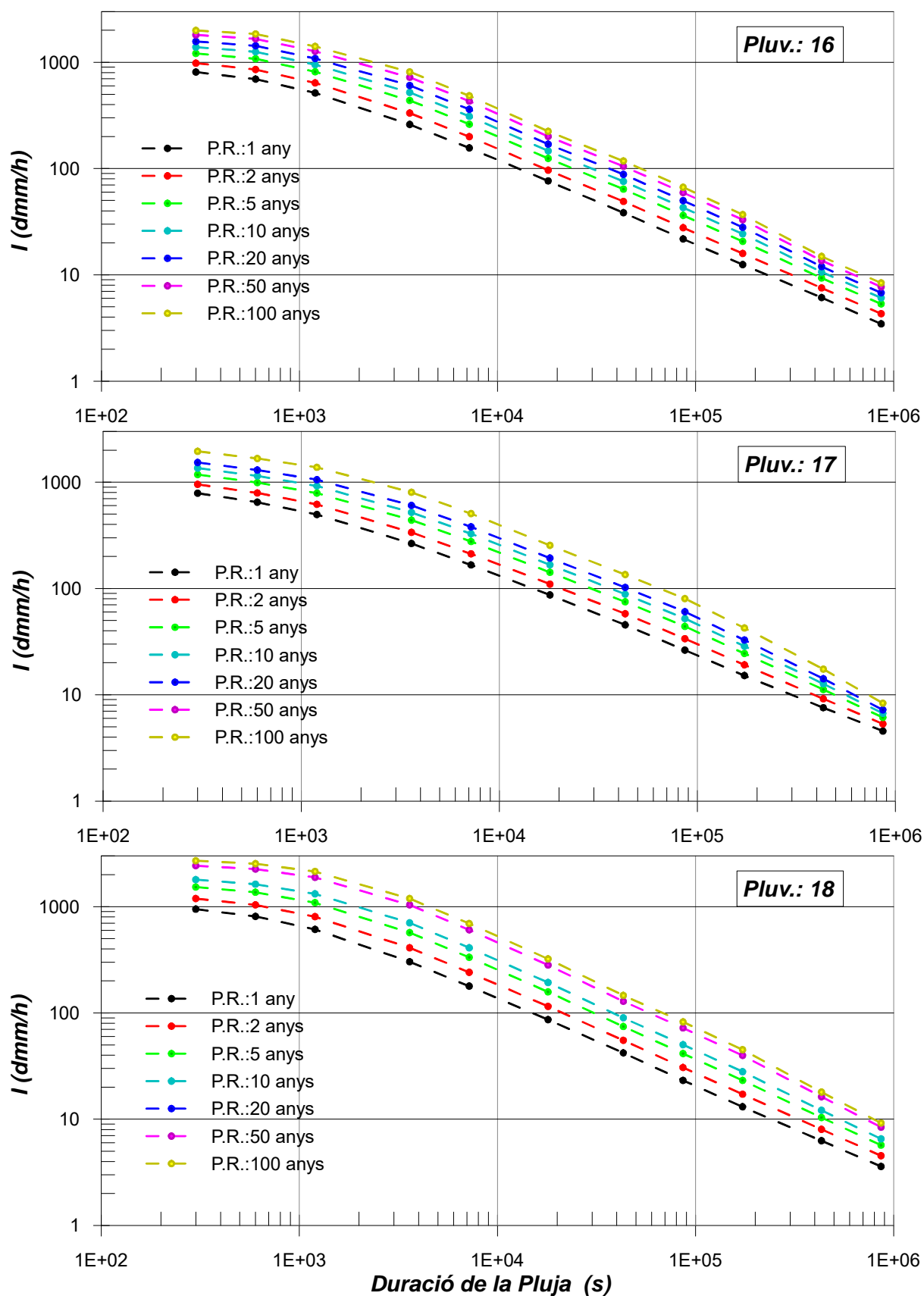


Figura B-6 Corbes IDF (mètode mnp) de la regió metropolitana de Barcelona. Pluv's 16, 17 i 18

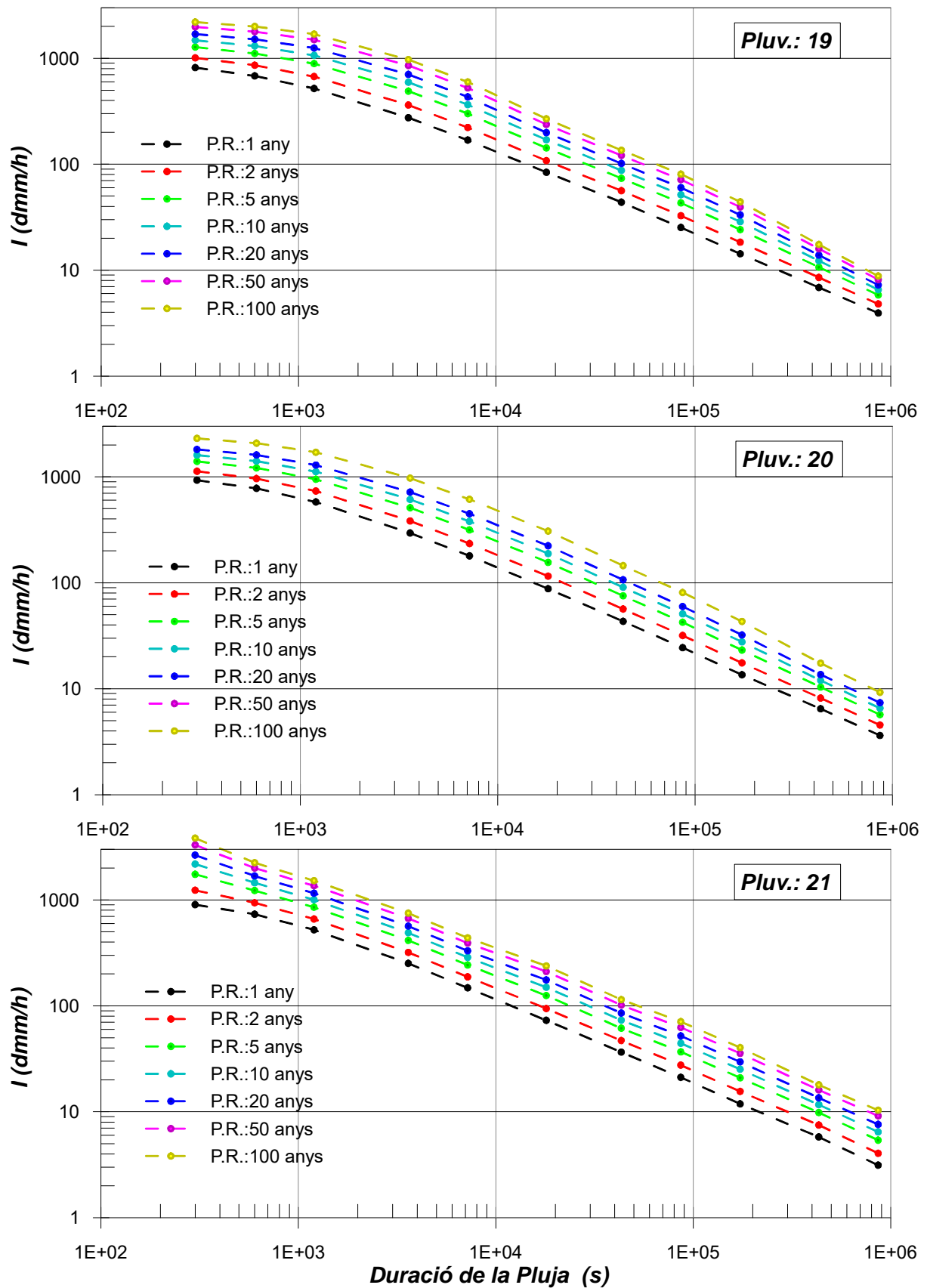


Figura B-7 Corbes IDF (mètode mnp) de la regió metropolitana de Barcelona. Pluv's 19, 20 i 21

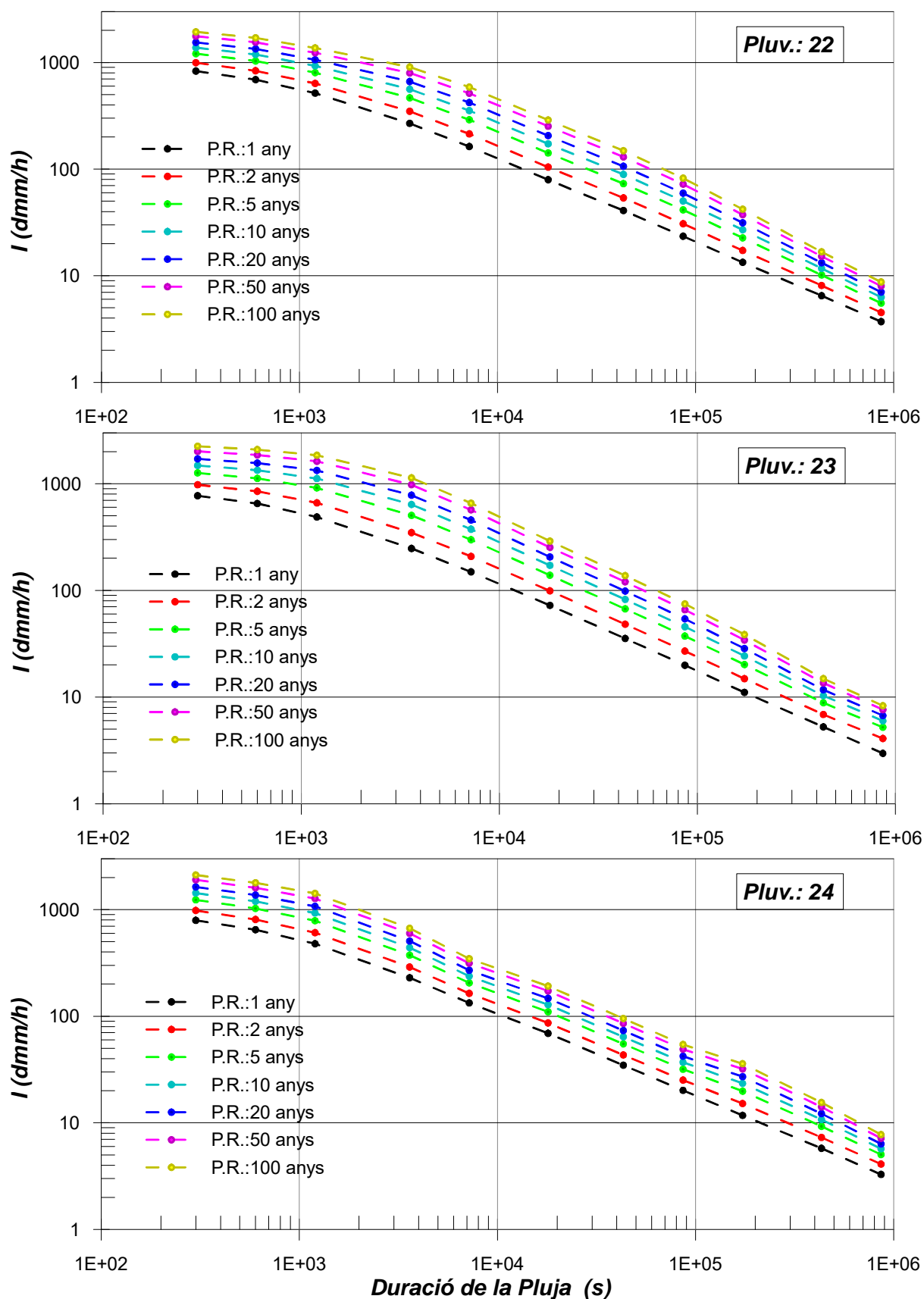


Figura B-8 Corbes IDF (mètode mnp) de la regió metropolitana de Barcelona. Pluv's 22, 23 i 24

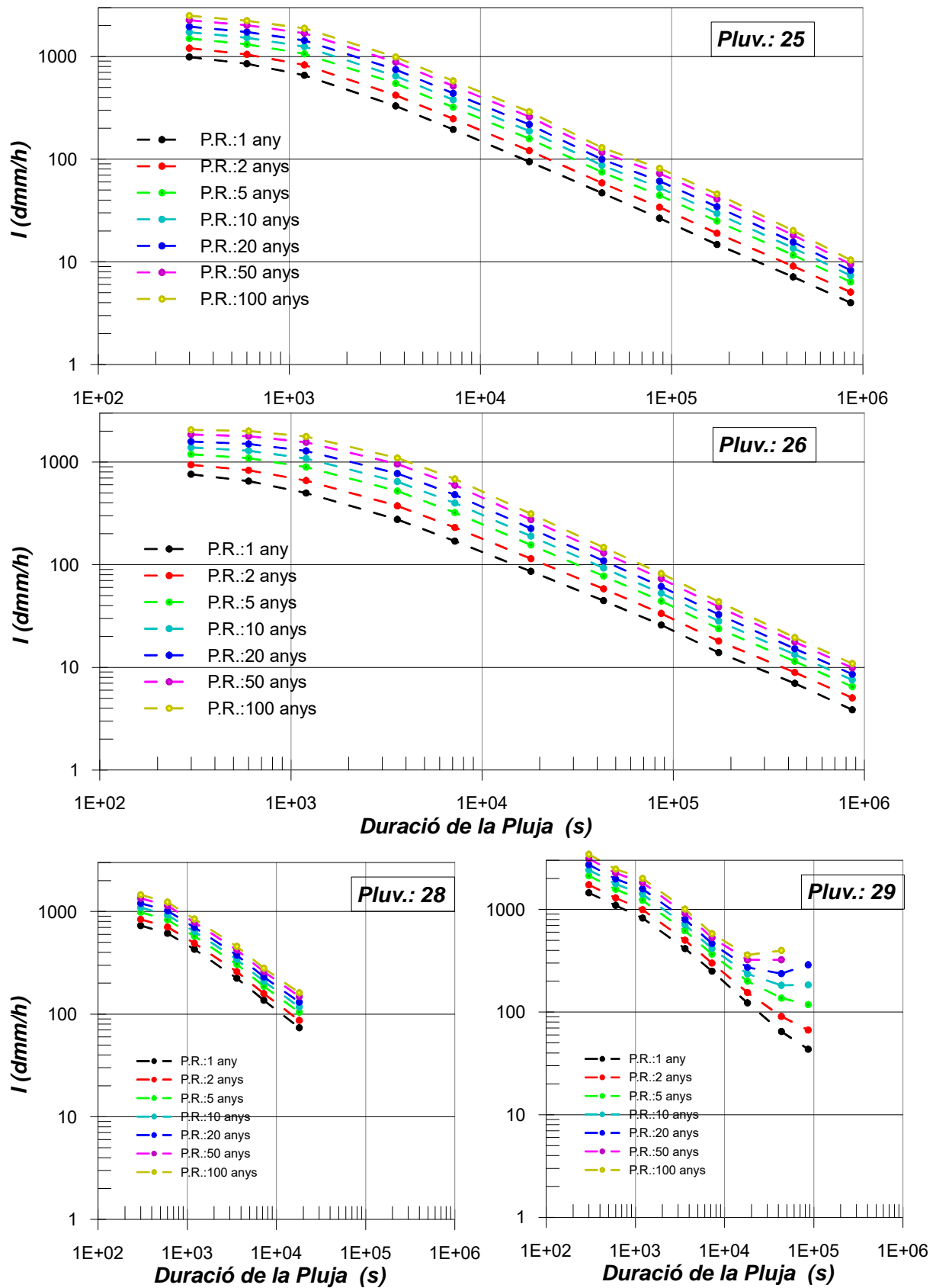


Figura B-9 Corbes IDF (mètode mnp) de la regió metropolitana de Barcelona. Pluv's 25, 26, 28 i 29

6.3. Annex C: Corbes IDF calculades amb la funció de Gumbel de la regió metropolitana de Barcelona

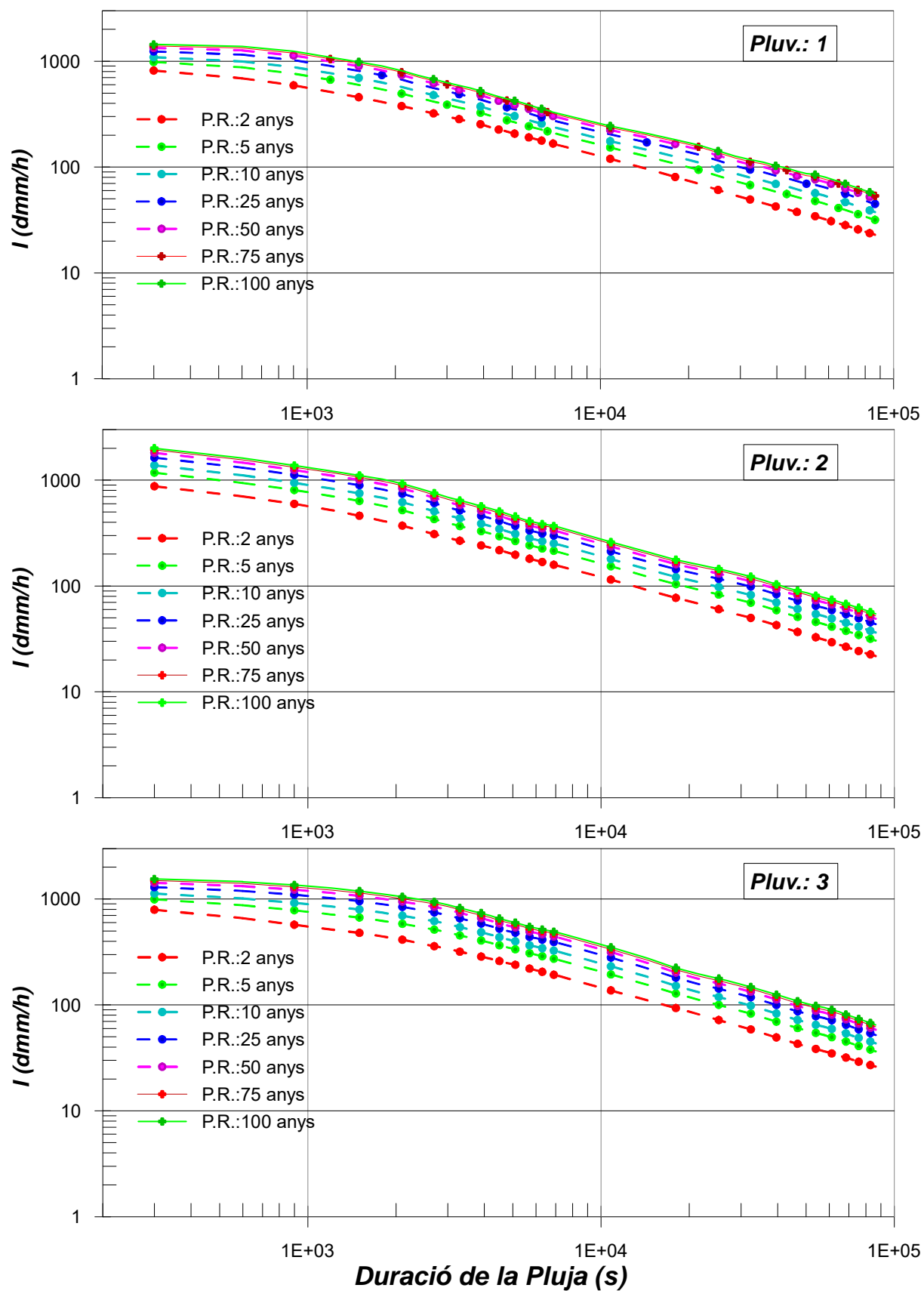


Figura C-1 Corbes IDF (mètode Gumbel) de la regió metropolitana de Barcelona. Pluv's 1, 2 i 3

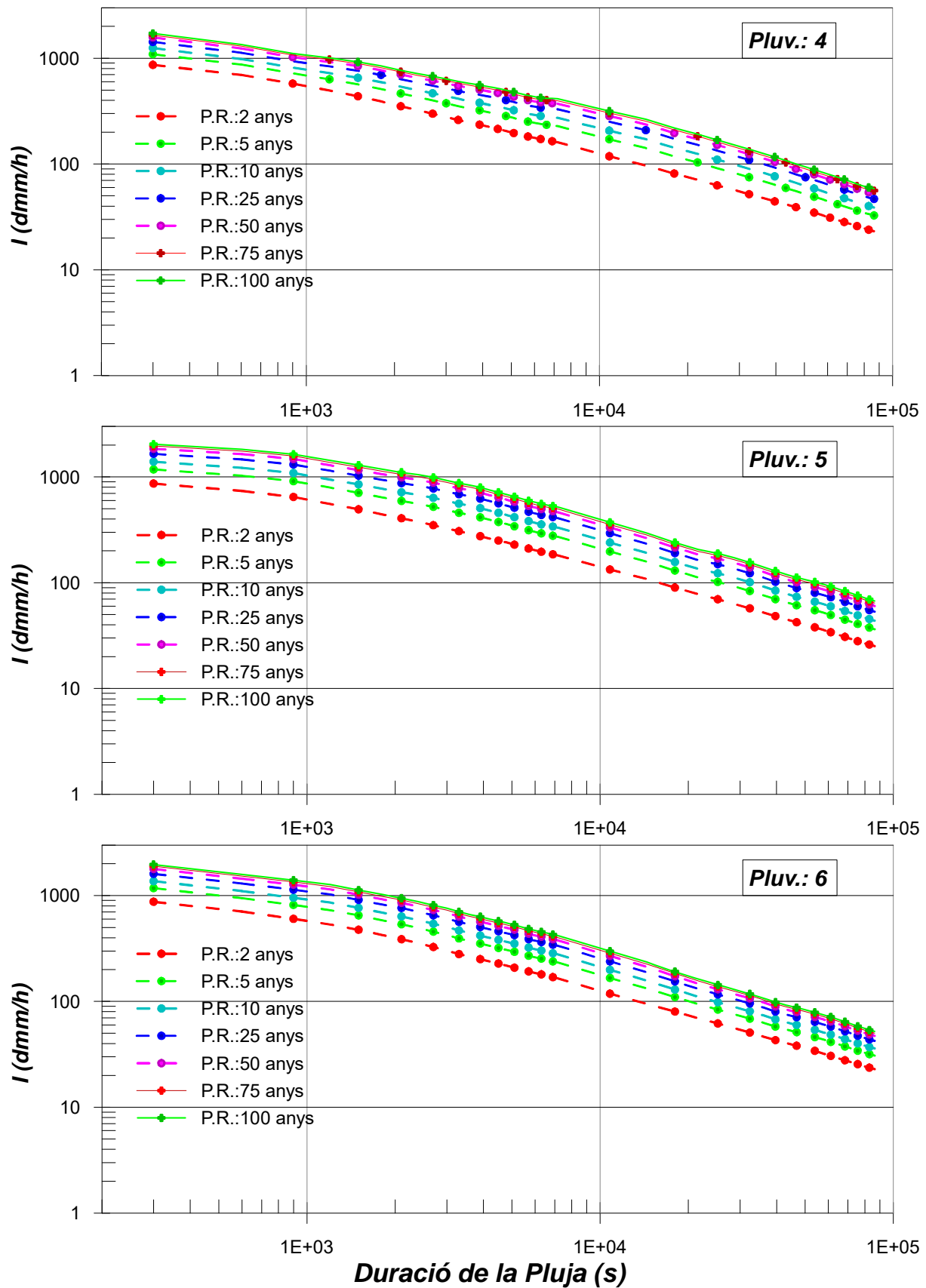


Figura C-2 Corbes IDF (mètode Gumbel) de la regió metropolitana de Barcelona. Pluv's 4, 5 i 6

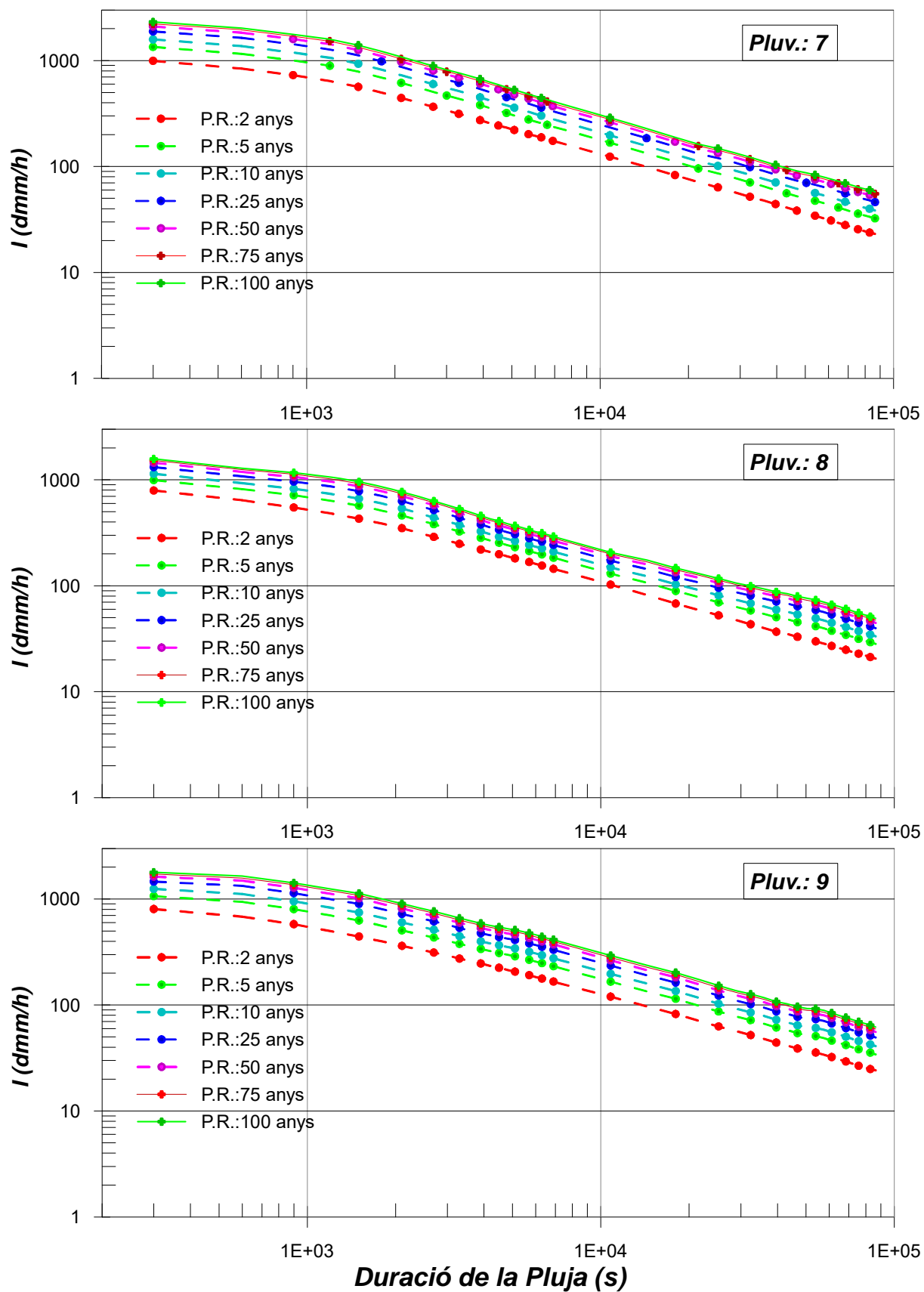


Figura C-3 Corbes IDF (mètode Gumbel) de la regió metropolitana de Barcelona. Pluv's 7, 8 i 9

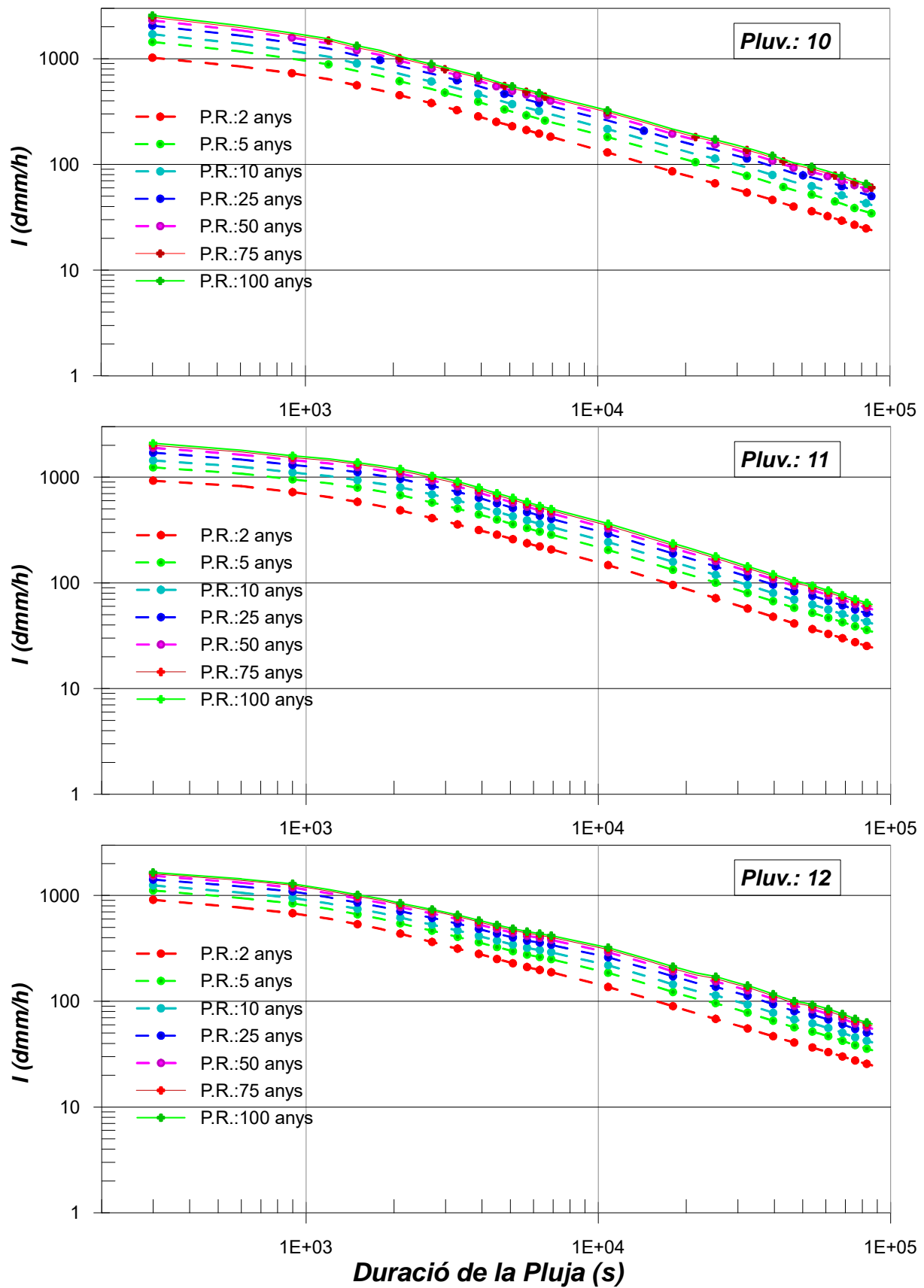


Figura C-4 Corbes IDF (mètode Gumbel) de la regió metropolitana de Barcelona. Pluv's 10, 11 i 12

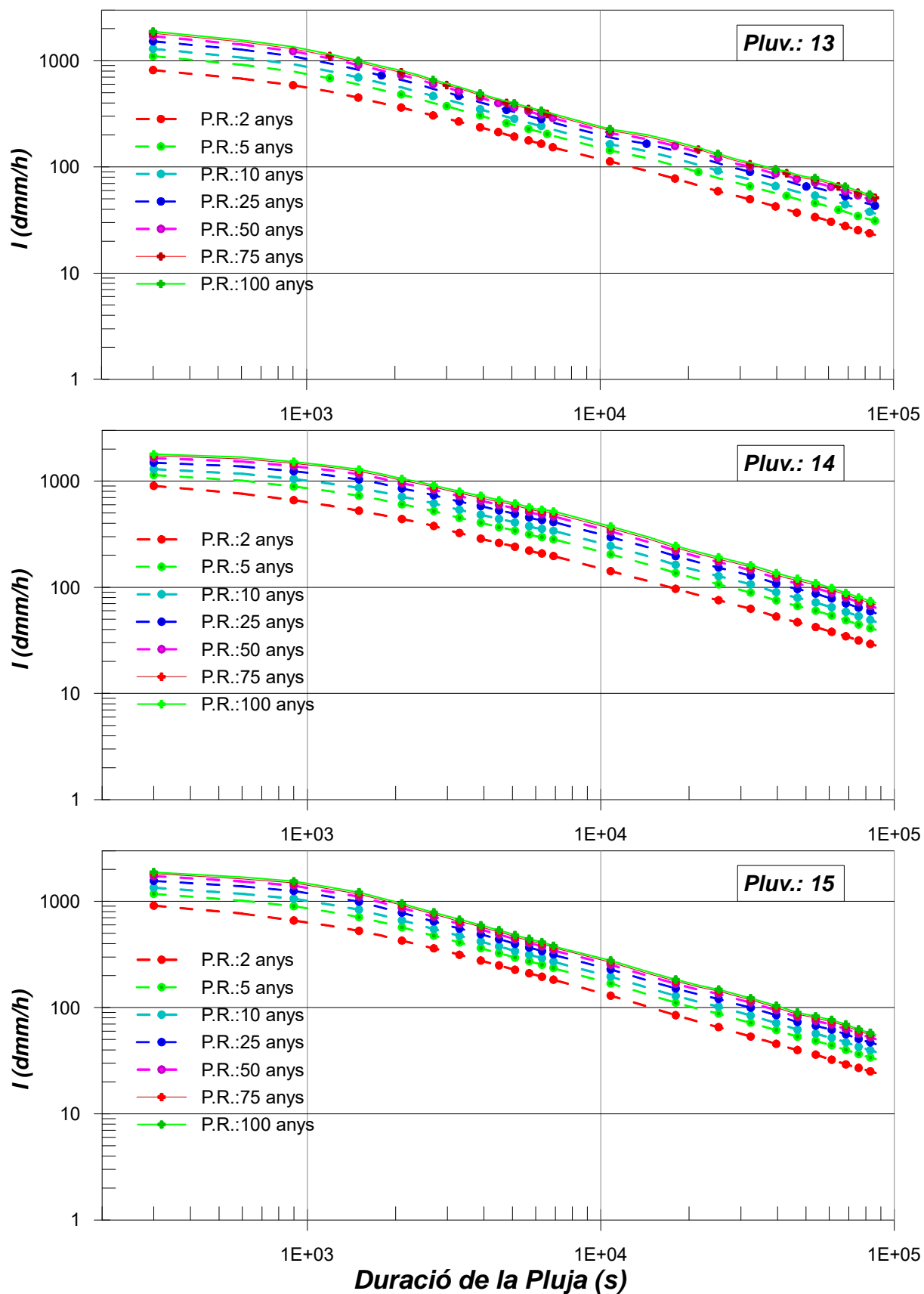


Figura C-5 Corbes IDF (mètode Gumbel) de la regió metropolitana de Barcelona. Pluv's 13, 14 i 15

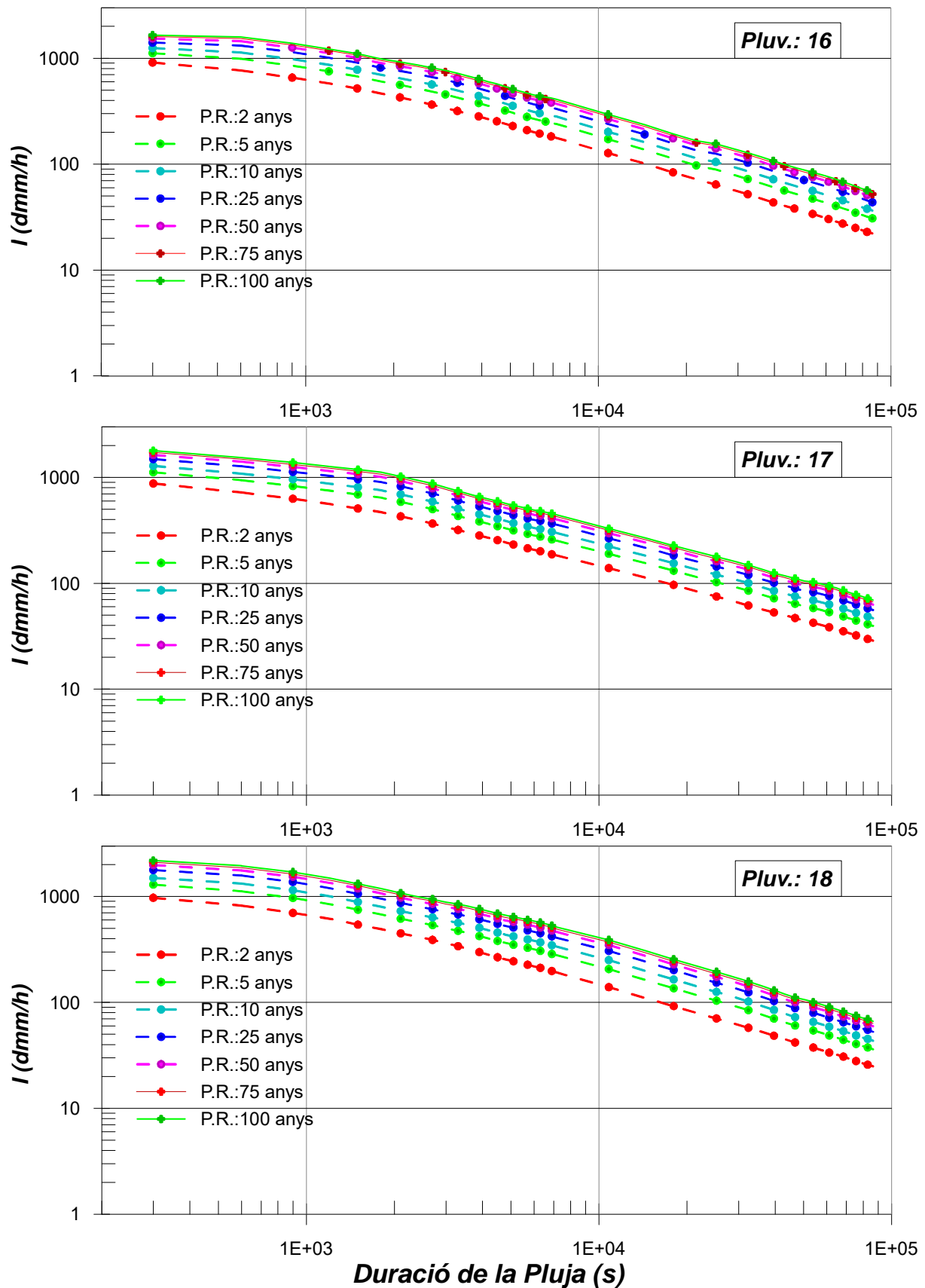


Figura C-6 Corbes IDF (mètode Gumbel) de la regió metropolitana de Barcelona. Pluv's 16, 17 i 18

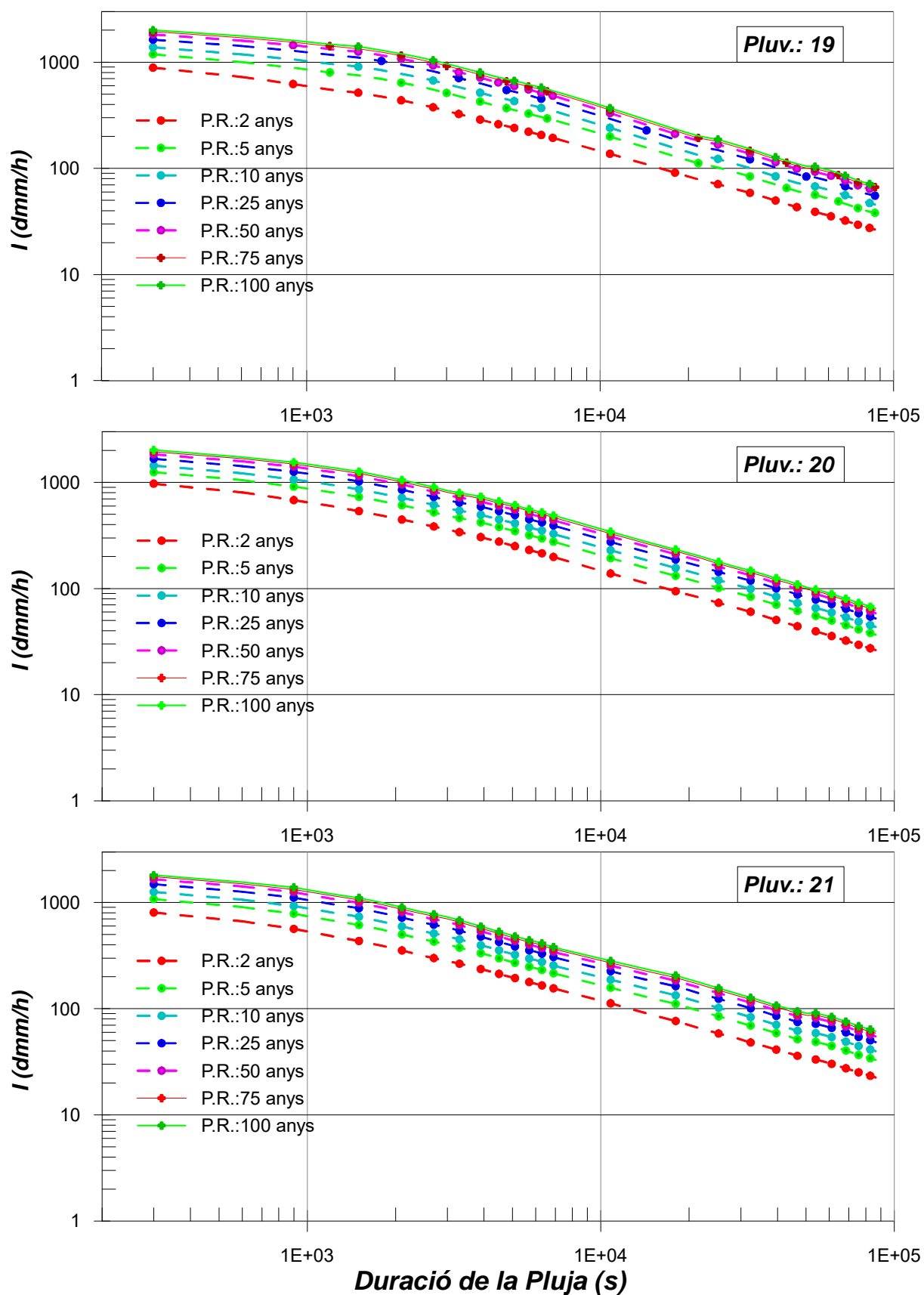


Figura C-7 Corbes IDF (mètode Gumbel) de la regió metropolitana de Barcelona. Pluv's 19, 20 i 21

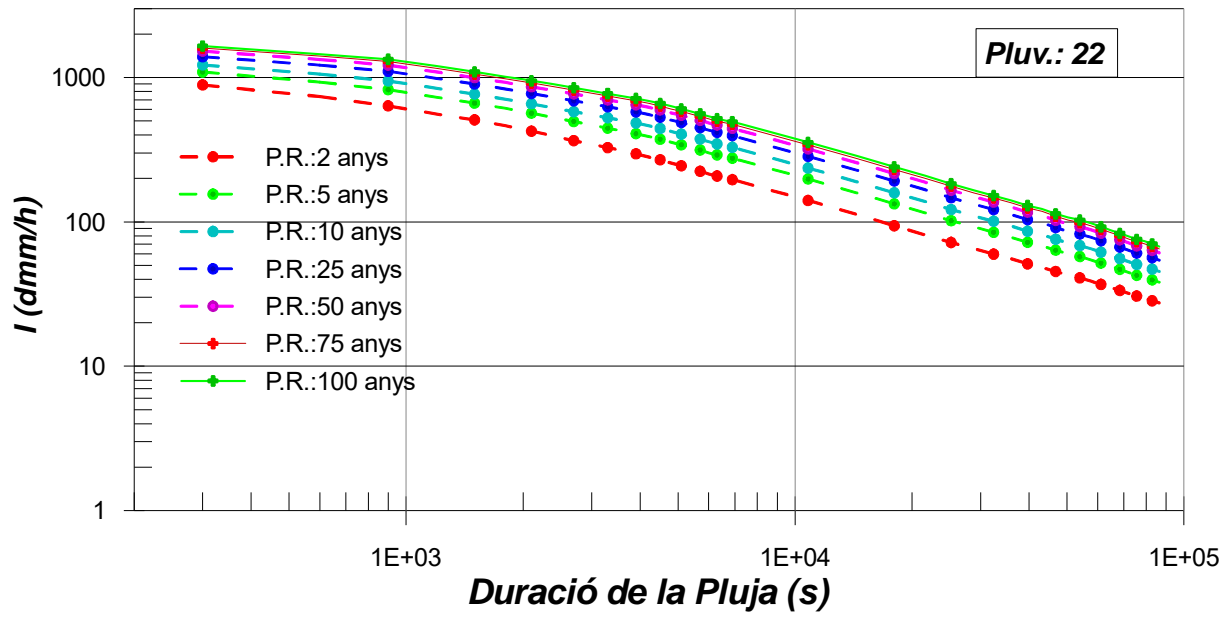


Figura C-8 Corbes IDF (mètode Gumbel) de la regió metropolitana de Barcelona. Pluviòmetre 22

6.4. Annex D: Corbes IDF calculades amb la funció GEV de la regió metropolitana de Barcelona

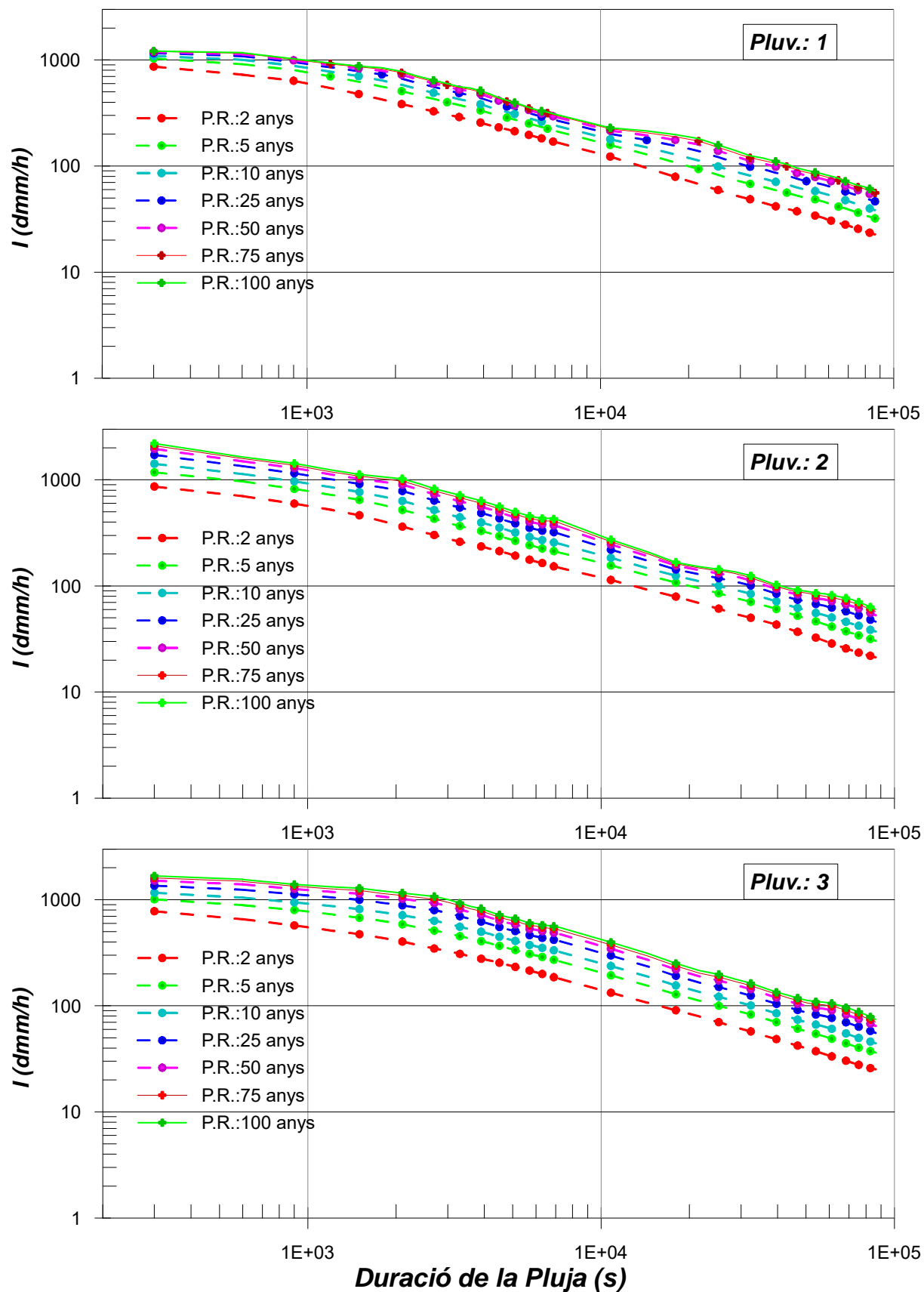


Figura D-1 Corbes IDF (mètode GEV) de la regió metropolitana de Barcelona. Pluv's 1, 2 i 3

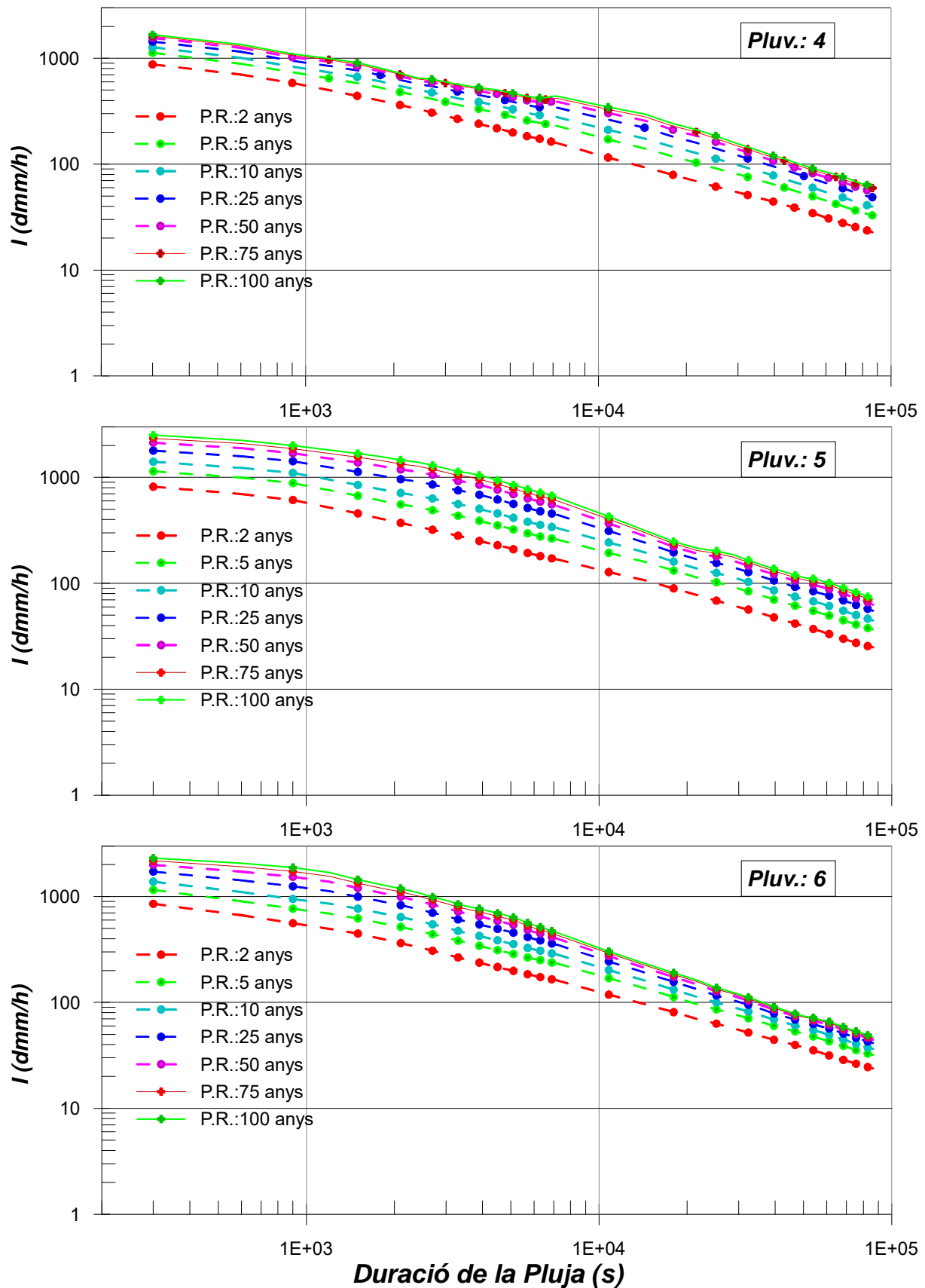


Figura D-2 Corbes IDF (mètode GEV) de la regió metropolitana de Barcelona. Pluv's 4, 5 i 6

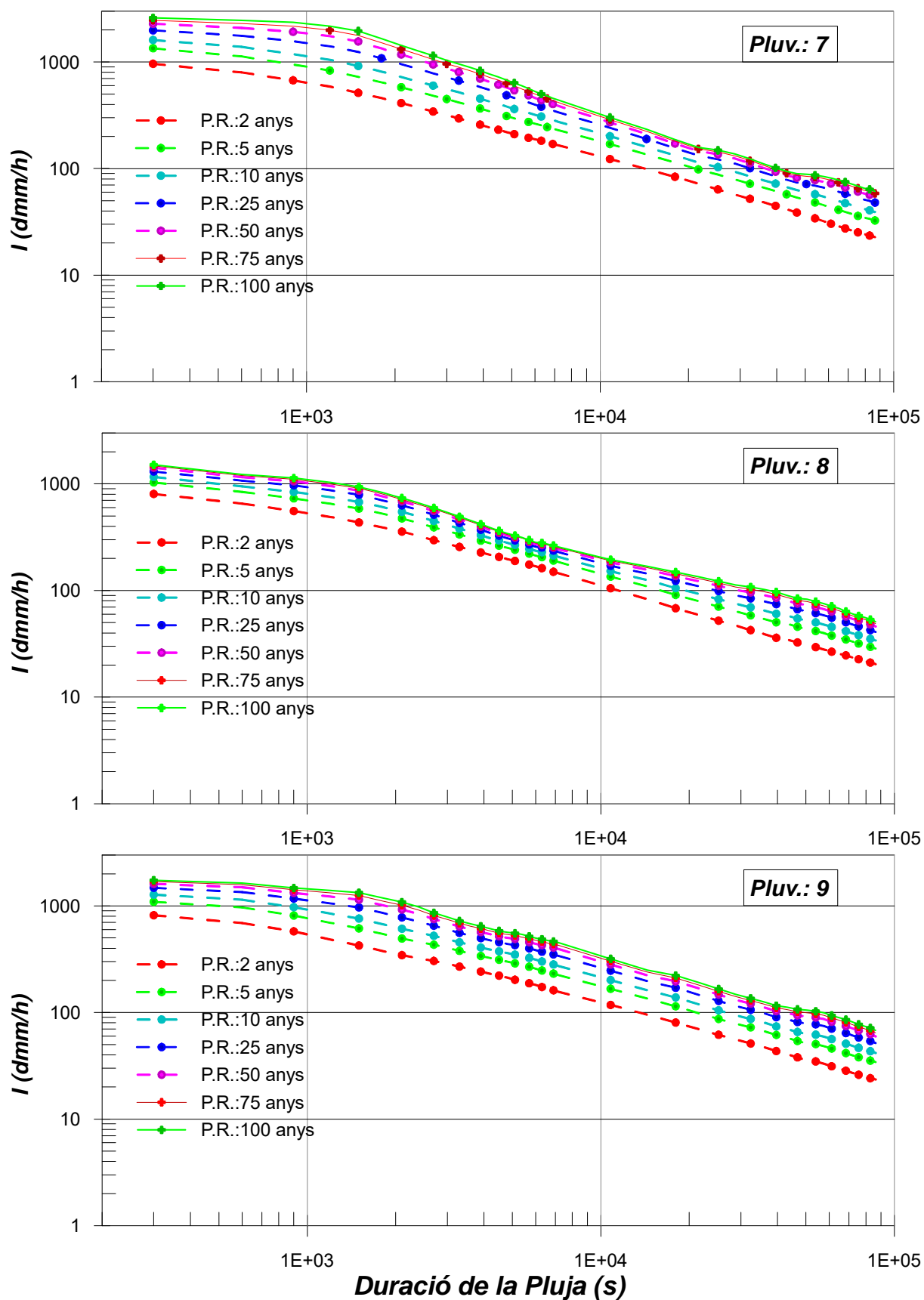


Figura D-3 Corbes IDF (mètode GEV) de la regió metropolitana de Barcelona. Pluv's 7, 8 i 9

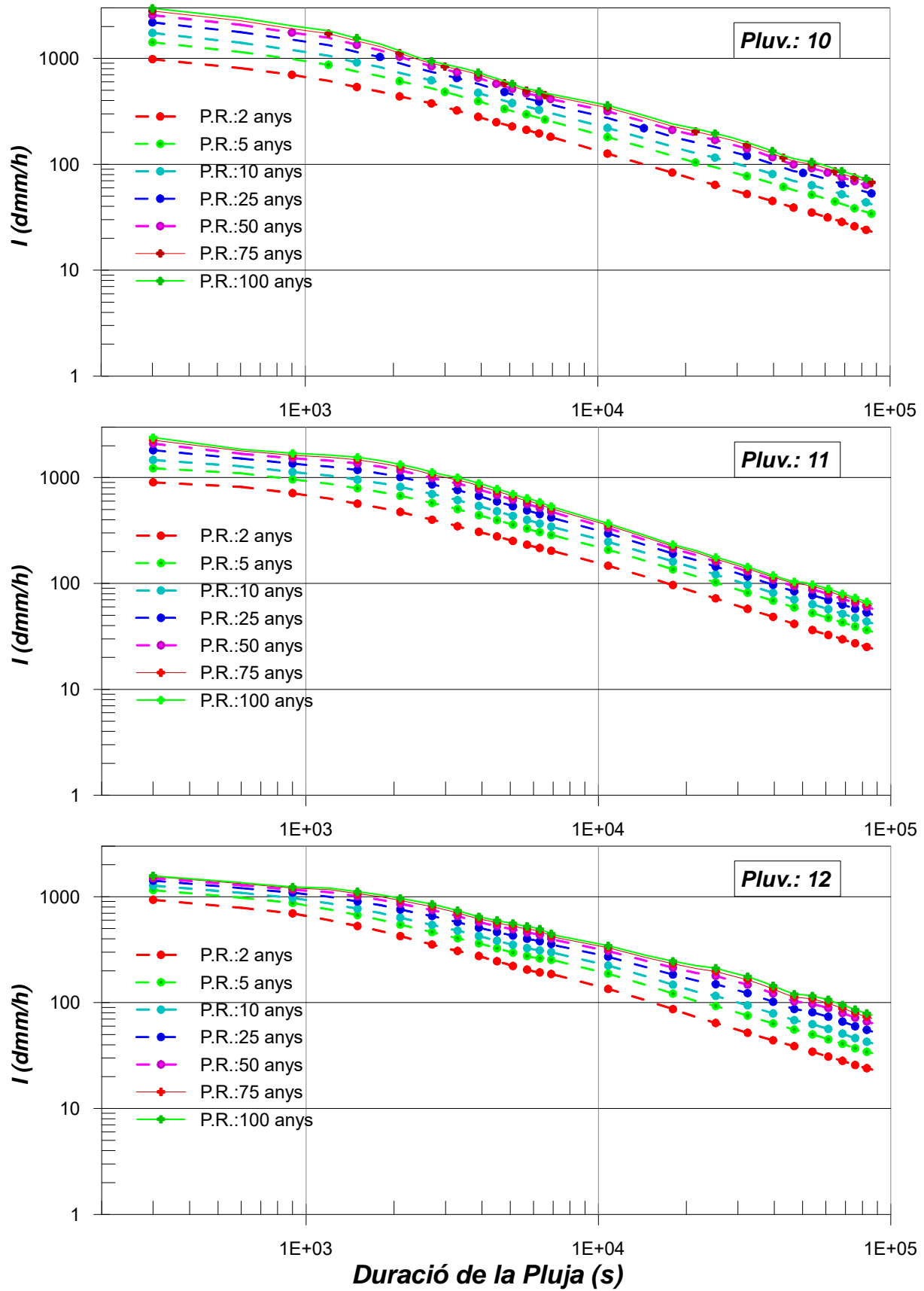


Figura D-4 Corbes IDF (mètode GEV) de la regió metropolitana de Barcelona. Pluv's 10, 11 i 12

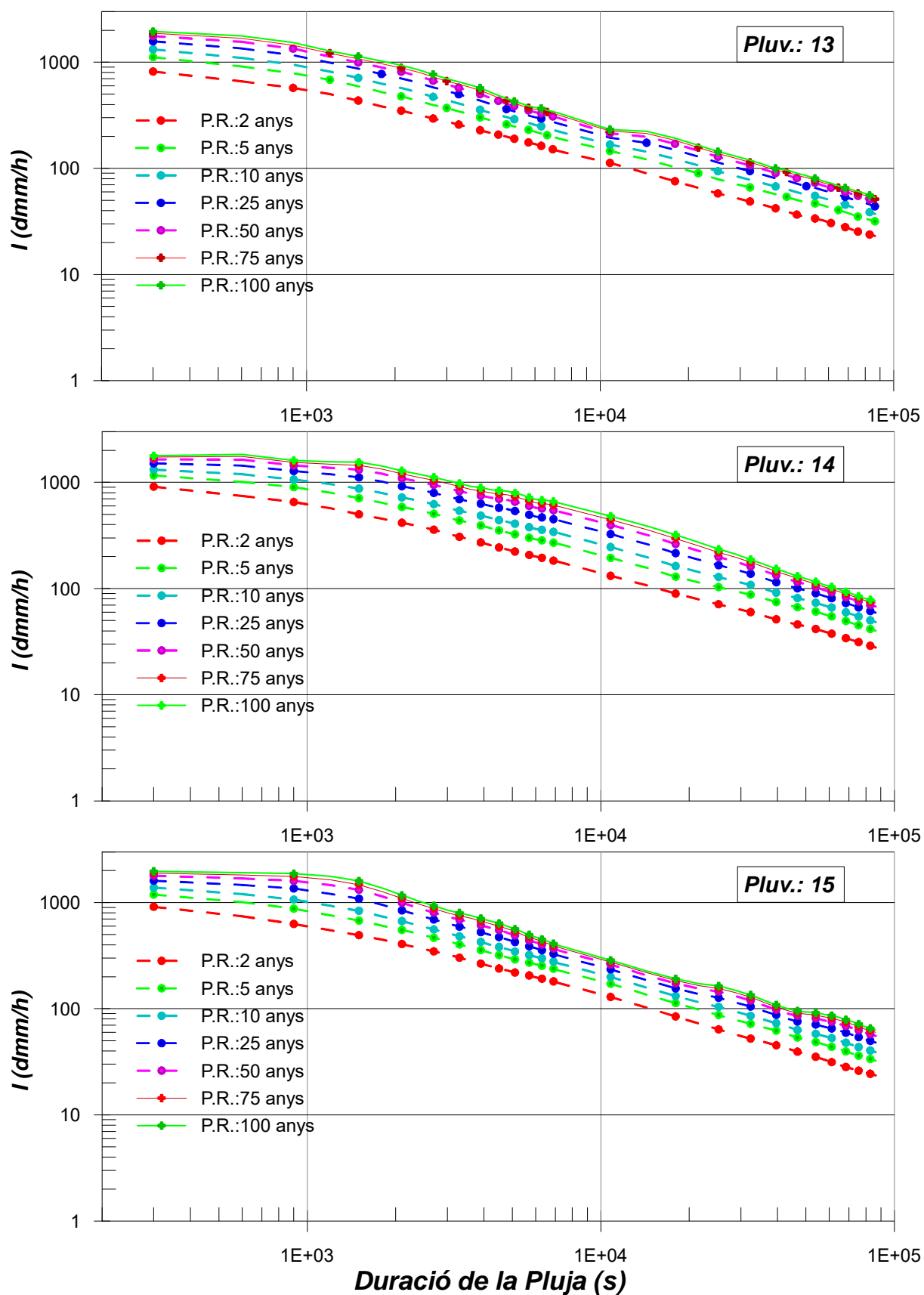


Figura D-5 Corbes IDF (mètode GEV) de la regió metropolitana de Barcelona. Pluv's 13, 14 i 15

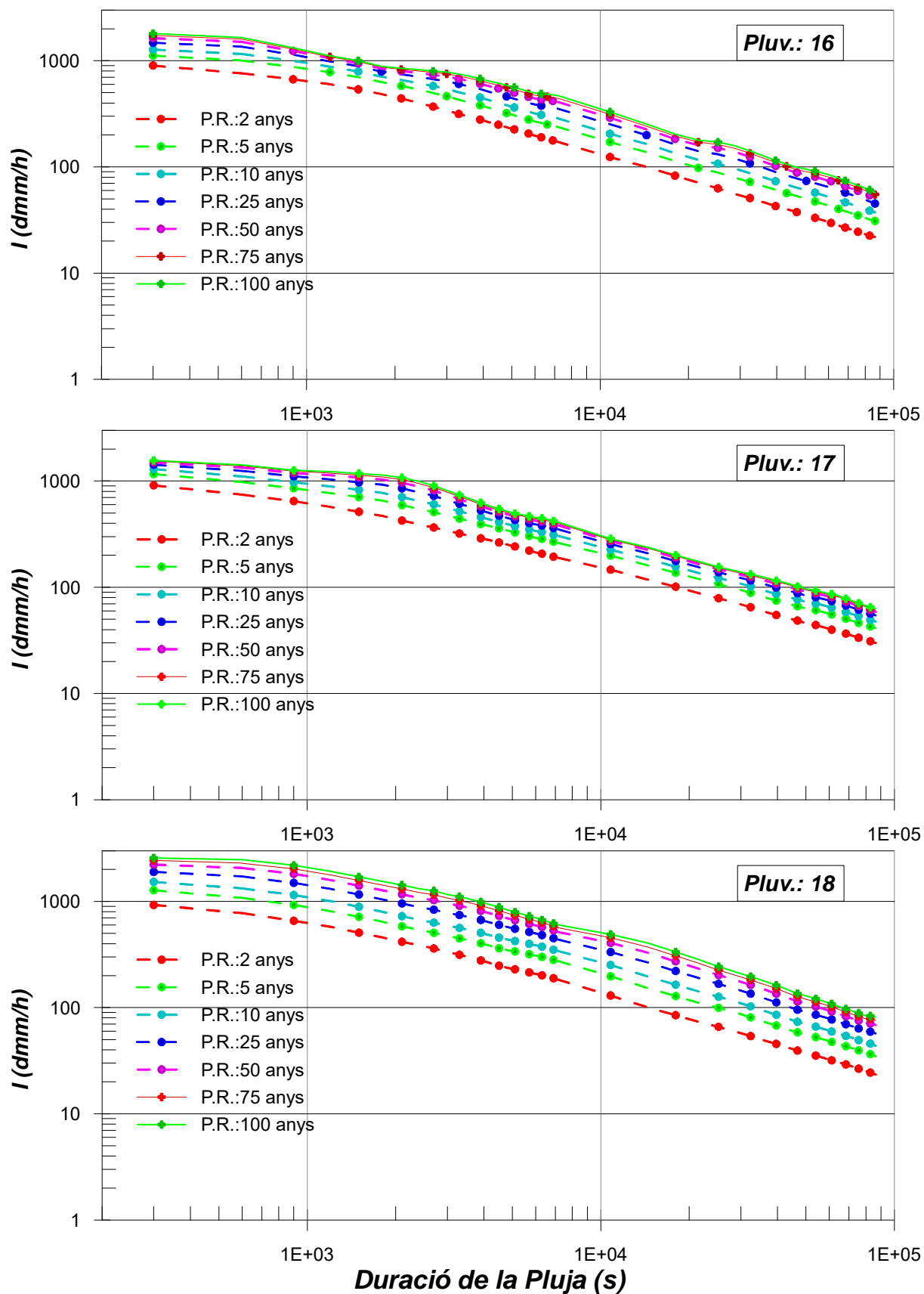


Figura D-6 Corbes IDF (mètode GEV) de la regió metropolitana de Barcelona. Pluv's 16, 17 i 18

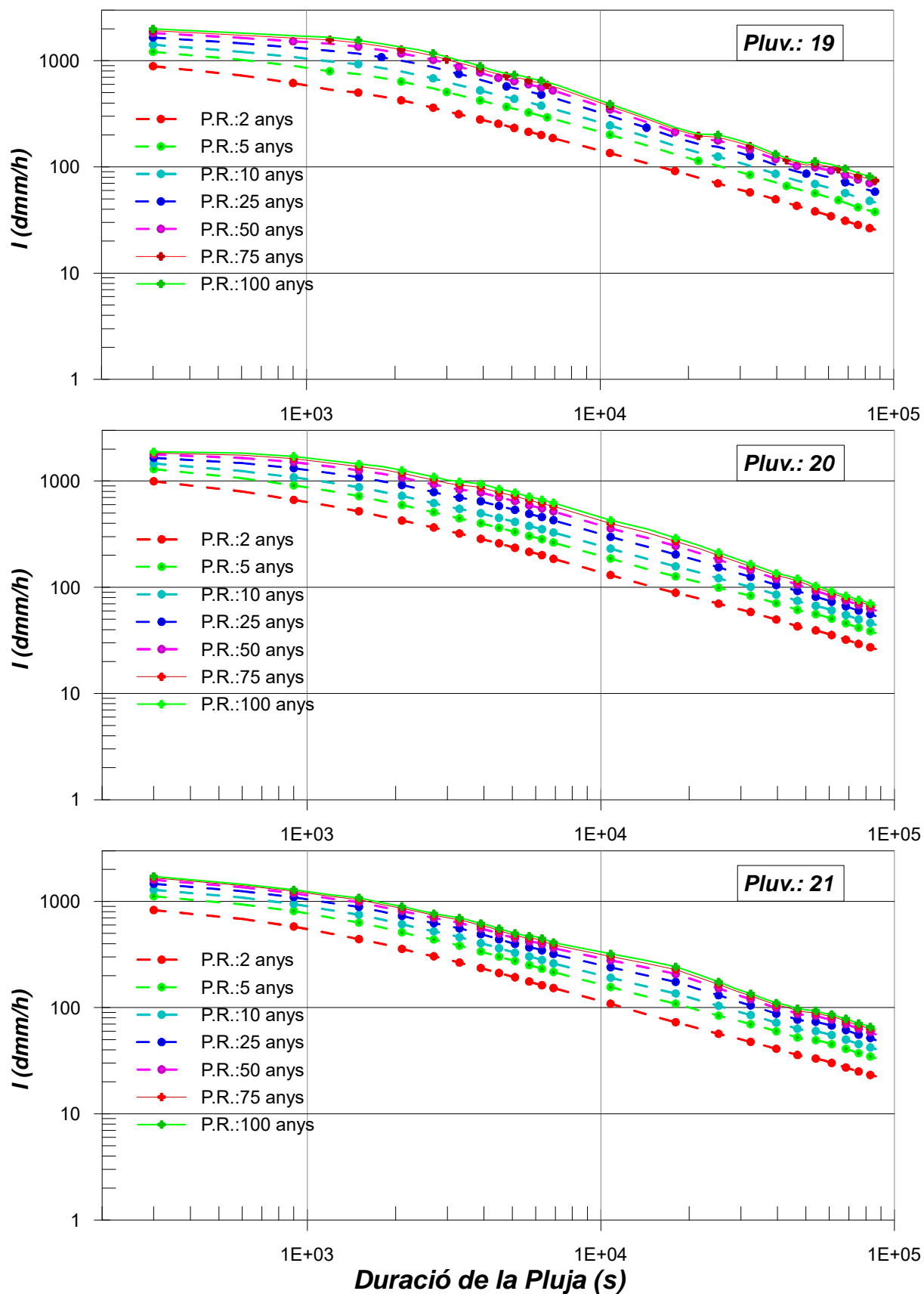


Figura D-7 Corbes IDF (mètode GEV) de la regió metropolitana de Barcelona. Pluv's 19, 20 i 21

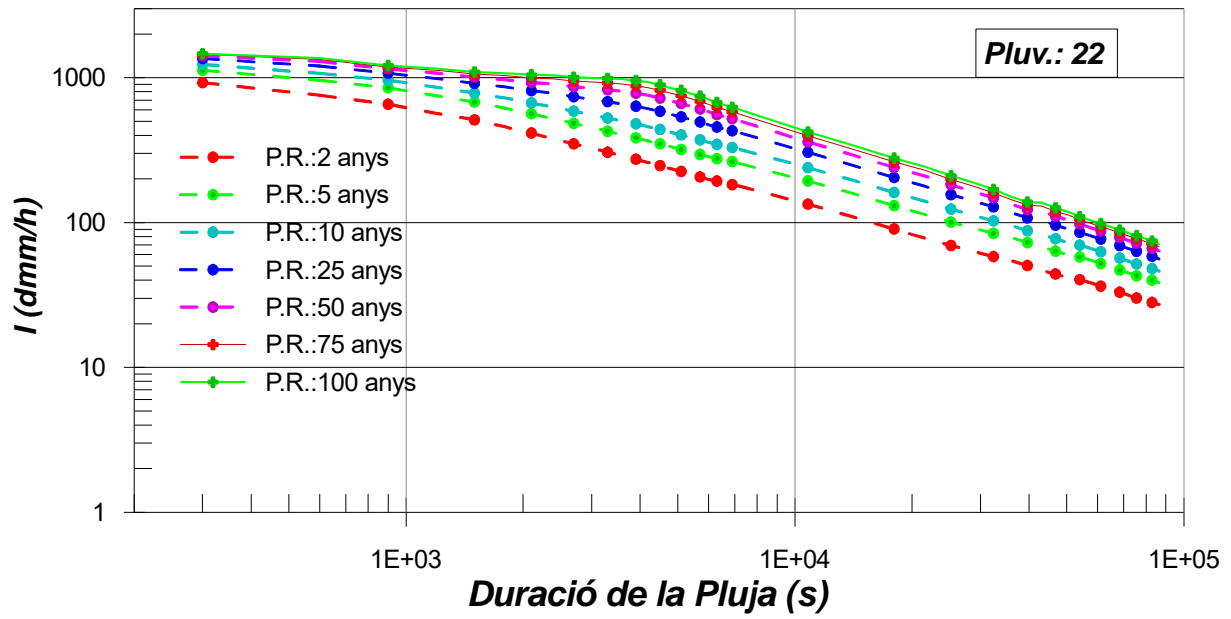


Figura D-8 Corbes IDF (mètode GEV) de la regió metropolitana de Barcelona. Pluviòmetre 22

6.6. Annex F: Assignació del temps pels diferents mètodes de càlcul de les velocitats

Mostrem un exemple numèric simplificat, amb només 19 punts de pluja i esperem que faci entenedor el mètode per assignar els instants d'ocurrència al vector d'espai/distància. Ens fixarem en els pluviòmetres 6 i 8 i en els conjunts de distàncies associats $\{6, 8\}$ i $\{8, 6\}$ (Figura F-1)

$$\begin{aligned}\vec{r}_6 &= (429269.86, 4584410.49) \text{ m} & \vec{r}_8 &= (430181.35, 4588414.30) \text{ m} \\ \vec{d}_{68} &= \vec{r}_8 - \vec{r}_6 = (430181.35, 4588414.30) - (429269.86, 4584410.49) = (911.46, 4003.81) \text{ m} \\ d_{68} &= 4106.25 \text{ m}\end{aligned}$$

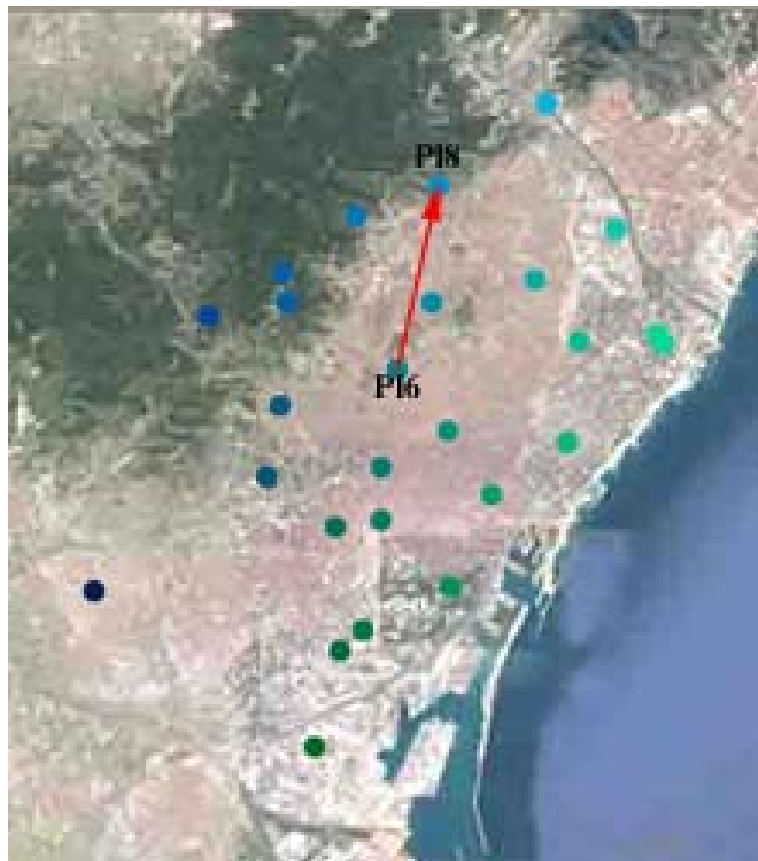


Figura F-1 Representació gràfica del vector \vec{d}_{68}

Siguin els valors de la precipitació d'aquesta pluja els presentats a la Taula F-1; on ens fixem, per suposat, en el valor de la pluja dels pluviòmetres 6 i 8 que en aquest cas és el volum de precipitació, en *dmm*, recollit per cada pluviòmetre.

Pluja de disseny. Valors programats(dmm):
Velocitat = 20 km/h; direcció de propagació = 300°; Pas de temps d'estudi = 300 s = 5 min.

<i>i</i>	<i>t/s</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	
1	"19/07/2019 13:05:00"	806159100	0	0	115	0	0	0	0	56	0	0
2	"19/07/2019 13:10:00"	806159400	88	0	246	51	45	0	0	179	0	0
3	"19/07/2019 13:15:00"	806159700	190	0	376	179	175	129	0	298	0	0
4	"19/07/2019 13:20:00"	806160000	282	23	507	305	304	259	0	413	65	0
5	"19/07/2019 13:25:00"	806160300	360	127	638	429	432	389	20	519	182	0
6	"19/07/2019 13:30:00"	806160600	419	223	769	549	559	518	148	610	295	124
7	"19/07/2019 13:35:00"	806160900	453	307	900	662	683	645	275	673	400	249
8	"19/07/2019 13:40:00"	806161200	456	375	968	755	798	770	400	690	493	372
9	"19/07/2019 13:45:00"	806161500	428	421	837	800	876	879	523	654	566	490
10	"19/07/2019 13:50:00"	806161800	374	440	707	767	844	897	639	578	608	601
11	"19/07/2019 13:55:00"	806162100	299	429	576	679	740	798	742	480	608	695
12	"19/07/2019 14:00:00"	806162400	210	389	445	569	619	675	806	370	566	753
13	"19/07/2019 14:05:00"	806162700	110	325	314	450	493	548	793	254	493	749
14	"19/07/2019 14:10:00"	806163000	3	244	183	326	365	419	713	133	401	685
15	"19/07/2019 14:15:00"	806163300	0	151	52	200	236	290	605	9	295	587
16	"19/07/2019 14:20:00"	806163600	0	49	0	73	107	160	486	0	183	475
17	"19/07/2019 14:25:00"	806163900	0	0	0	0	0	29	363	0	66	356
18	"19/07/2019 14:30:00"	806164200	0	0	0	0	0	0	237	0	0	233
19	"19/07/2019 14:35:00"	806164500	0	0	0	0	0	0	109	0	0	108

Taula F-1 Dades de precipitació d'una pluja de disseny. Ens fixarem en les dades dels pluv's 6 i 8

CENTROIDE de la pluja pels P16 i P18

$$t_6 = \frac{\sum_{i=1}^{19} V_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^{19} V_i}$$

$$= \frac{0 \cdot 8061591 + 0 \cdot 8061594 + 129 \cdot 8061597 + \dots + 29 \cdot 8061639 + 0 \cdot 8061642 + 0 \cdot 8061645}{0 + 0 + 129 + \dots + 29 + 0 + 0}$$

$$= \frac{5969627304900}{7405} = 806161688.7 \text{ s} \quad (13:45 < t_6 < 13:50)$$

$$t_8 = \frac{\sum_{i=1}^{19} V_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^{19} V_i}$$

$$= \frac{56 \cdot 806159100 + 179 \cdot 806159400 + 298 \cdot 806159700 + \dots + 0 \cdot 806164200 + 0 \cdot 806164500}{56 + 179 + 298 + \dots + 0 + 0}$$

$$= \frac{4769249300100}{5916} = 806161139.3 \text{ s} \quad (13:35 < t_8 < 13:40)$$

Els nostres vectors tridimensional seran

$$P16: (\vec{r}_6, t_6) = (429269.86 \text{ m}, 4584410.49 \text{ m}, 806161688.7 \text{ s})$$

$$P18: (\vec{r}_8, t_8) = (430181.35 \text{ m}, 4588414.30 \text{ m}, 806161139.3 \text{ s})$$

Primer MÀXIM de la pluja pels PL6 i PL8

Pel pluviòmetre 6 tenim que el volum màxim és el de 897 dmm (Taula F-1) que es produeix a l'instant 806161800 ("19/07/2019 13:50:00") per tant $t_6 = 806161800$ s. Pel pluviòmetre 8 el volum màxim és de 690 dmm (Taula F-1) a l'instant 806161200 ("19/07/2019 13:40:00") per tant $t_8 = 806161200$ s i els vectors tridimensionals

$$PL6: (\vec{r}_6, t_6) = (429269.86 \text{ m}, 4584410.49 \text{ m}, 806161800 \text{ s})$$

$$PL8: (\vec{r}_8, t_8) = (430181.35 \text{ m}, 4588414.30 \text{ m}, 806161200 \text{ s})$$

Començament de la pluja pels PL6 i PL8

Pel pluviòmetre 6 la pluja comença a l'instant 806159700 ("19/07/2019 13:15:00") i assignem $t_6 = 806159700$ s. Pel pluviòmetre 8; 806159100 ("19/07/2019 13:05:00") per tant $t_8 = 806159100$ s. Els vectors tridimensionals

$$PL6: (\vec{r}_6, t_6) = (429269.86 \text{ m}, 4584410.49 \text{ m}, 806159700 \text{ s})$$

$$PL8: (\vec{r}_8, t_8) = (430181.35 \text{ m}, 4588414.30 \text{ m}, 806159100 \text{ s})$$

Mètodes de correlacions

En primer lloc analitzarem la correlació entre el pluviòmetre 6 i el pluviòmetre 8 {6, 8}. Assignem a la variable X els valor associats al pluviòmetre 6 i en primer lloc a la variable Y els valor associats al pluviòmetre 8 (Taula F-2) A aquesta assignació inicial a la variable Y la denotem per $Y(0)$

Pluv. 6		Pluviòmetre 8: variables Y								
Var. X	Y(0)	Y(1)	Y(2)	Y(3)	Y(4)	Y(5)	Y(6)	Y(7)	Y(8)	Y(9)
0	56	179	298	413	519	610	673	690	654	578
0	179	298	413	519	610	673	690	654	578	480
129	298	413	519	610	673	690	654	578	480	370
259	413	519	610	673	690	654	578	480	370	254
389	519	610	673	690	654	578	480	370	254	133
518	610	673	690	654	578	480	370	254	133	9
645	673	690	654	578	480	370	254	133	9	0
770	690	654	578	480	370	254	133	9	0	0
879	654	578	480	370	254	133	9	0	0	0
897	578	480	370	254	133	9	0	0	0	0
798	480	370	254	133	9	0	0	0	0	0
675	370	254	133	9	0	0	0	0	0	0
548	254	133	9	0	0	0	0	0	0	0
419	133	9	0	0	0	0	0	0	0	0
290	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R	0.8178	0.5601	0.2166	-0.1712	-0.5224	-0.7836	-0.9333	-0.9862	-0.9752	-0.9302

Taula F-2 Valors de les variables X i Y per fer les correlacions entre els pluviòmetres 6 i 8

Ara decalem una posició amunt els valor de la variable Y i construïm la variable $Y(1)$ [Taula F-2]. Decalem una posició amunt els valor de la variable $Y(1)$ i construïm la variable $Y(2)$. Iterem

aquest procés fins que tinguem un mínim de 10 parelles de valors. En aquest cas en concret podem arribar fins la variable $Y(9)$. Fem una representació gràfica d'aquestes variables i mostrem els valors de les correlacions amb la variable X ; Figura F-2 i Figura F-3

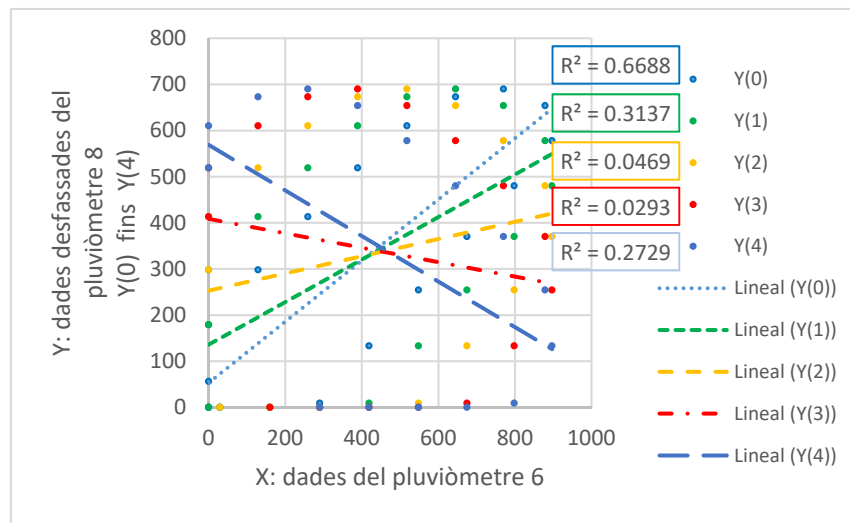


Figura F-2 Representació de les cinc primeres variables [$Y(0)$; $Y(1)$; $Y(2)$; $Y(3)$ i $Y(4)$] i dels seus coeficients de correlació R^2 (correlacions entre els pluviòmetres 6 i 8)

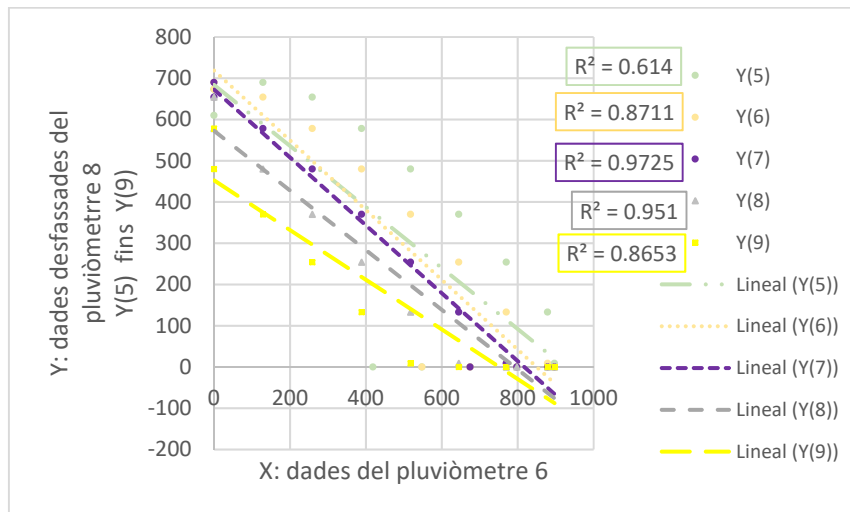


Figura F-3 Representació de les cinc últimes variables [$Y(5)$; $Y(6)$; $Y(7)$; $Y(8)$ i $Y(9)$] i dels seus coeficients de correlació R^2 (correlacions entre els pluviòmetres 6 i 8)

Podem veure que en aquest exemple hi han força correlacions negatives. Es podria interpretar com que el que està passant al pluviòmetre 6 també li passa al 8 però en direcció temporal inversa. Pels nostres interessos no té cap mena de significació les correlacions negatives i no les tindrem presents; en tot cas esperarem que l'intercanvi de variables X per Y proporcioni correlacions positives.

En el cas que mostrem veiem que la correlació màxima es dona pel desfasament 0. Encara que el valor de la correlació sigui proper a 1 no podem acceptar aquest desfasament temporal nul, ja que aquest està restringit a la correlació entre un pluviòmetre i ell mateix.

A continuació analitzem la correlació entre el pluviòmetre 8 i el pluviòmetre 6 {8, 6} (intercanvi de variables respecte de l'exemple anterior) Mostrem a la Taula F-2 les correlacions entre les dades del pluviòmetre 8 i el 6

$$\vec{d}_{86} = -\vec{d}_{68} = -(911.46, 4003.81) m; \quad d_{86} = d_{68} = 4106.25 m$$

Pluv. 8	Pluviòmetre 6: variables Y									
Var. X	Y(0)	Y(1)	Y(2)	Y(3)	Y(4)	Y(5)	Y(6)	Y(7)	Y(8)	Y(9)
56	0	0	129	259	389	518	645	770	879	897
179	0	129	259	389	518	645	770	879	897	798
298	129	259	389	518	645	770	879	897	798	675
413	259	389	518	645	770	879	897	798	675	548
519	389	518	645	770	879	897	798	675	548	419
610	518	645	770	879	897	798	675	548	419	290
673	645	770	879	897	798	675	548	419	290	160
690	770	879	897	798	675	548	419	290	160	29
654	879	897	798	675	548	419	290	160	29	0
578	897	798	675	548	419	290	160	29	0	0
480	798	675	548	419	290	160	29	0	0	
370	675	548	419	290	160	29	0	0		
254	548	419	290	160	29	0	0			
133	419	290	160	29	0	0				
9	290	160	29	0	0					
0	160	29	0	0						
0	29	0	0							
0	0	0								
0	0									
R ²	0.6688	0.9146	0.9900	0.8044	0.4305	0.0794	0.0236	0.2967	0.6601	0.8926
R	0.8178	0.9563	0.9950	0.8969	0.6561	0.2817	-0.1537	-0.5447	-0.8124	-0.9448

Taula F-3 Valors de les variables X i Y per fer les correlacions entre els pluviòmetres 8 i 6

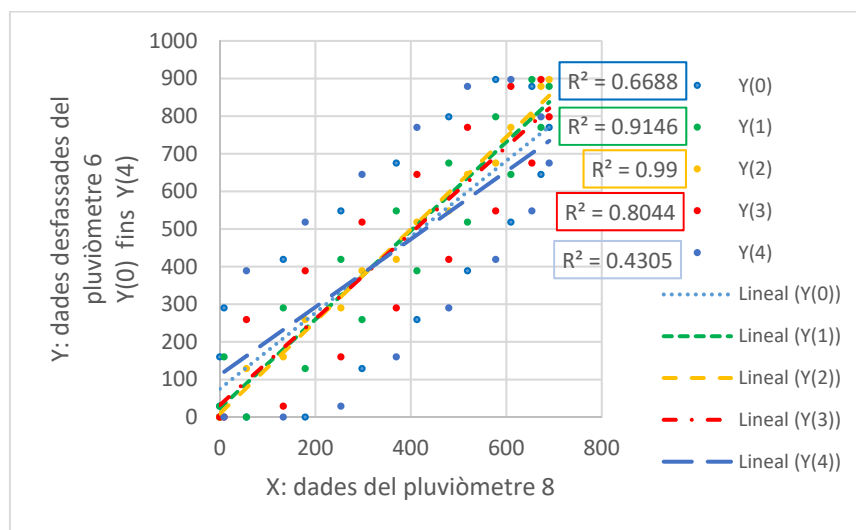


Figura F-4 Representació de les cinc primeres variables [Y(0); Y(1); Y(2); Y(3) i Y(4)] i dels seus coeficients de correlació R² (correlacions entre els pluviòmetres 8 i 6)

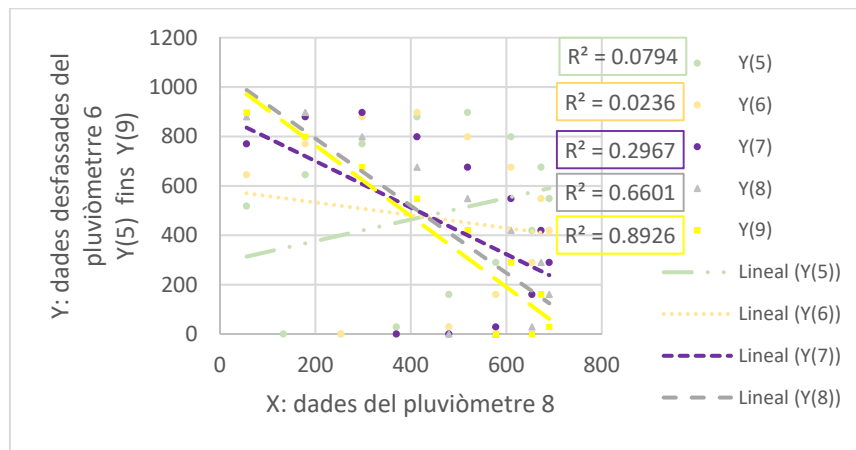


Figura F-5 Representació de les cinc últimes variables [Y(5); Y(6); Y(7); Y(8) i Y(9)] i dels seus coeficients de correlació R^2 (correlacions entre els pluviòmetres 8 i 6)

En aquest cas tenim correlacions positives fins la variable $Y(6)$ (Figura F-4 i Figura F-5) i la màxima de les correlacions per la $Y(2)$. En aquest cas assignem el valor $2 \cdot Dt = 2 \cdot 300 = 600 \text{ s} = 10 \text{ min}$ a la part temporal del punt del núvol de punts per fer la regressió planar; $(\vec{d}_{86}, 2Dt) = (-911.46 \text{ m}, -4003.81 \text{ m}, 600 \text{ s})$

En un anàlisi rudimentari podríem pensar que la nostra pluja a trigat uns deu minuts en recorre un distància d'uns quatre quilòmetres, el que ens proporcionaria un càlcul apriorístic per la velocitat de $v \cong \frac{4 \text{ km}}{10 \text{ min}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = 24 \text{ km/h}$ Recordem que els càlculs d'aquest exemple estan agafats d'una pluja programada a un velocitat de 20 km/h per tant el resultat anterior esta en bon acord amb el valor programat. En aquest cas ens hem aproximat tant en el valor del mòdul de la velocitat com en la direcció i el sentit.

6.7. Annex G: Resum de resultats de les desviacions i del S.R. mitjanats per les diferents direccions de propagació i per un temps d'estudi de les pluges de 5 minuts.

Presentem un resum de resultats (Taula G-2 fins Taula G-6) de les desviacions i del S.R. mitjanats per les diferents direccions de propagació i per un temps d'estudi de les pluges de 5 minuts.

En primer lloc destacar que hi han algunes pluges a las que no hem pogut associar una velocitat, són pluges petites i ràpides, $R = diagonal/5$ i $v_p = 75 \text{ km/h}$. En aquestes condicions els pocs punts associats a la pluja fan que el càlcul de la velocitat sigui inviable.

<i>Temps d'estudi de les Plugues:</i>	$[Dt] = \text{minut}$
<i>Velocitat programada:</i>	$[Vp] = \text{km/h}$
<i>Diferència entre la velocitat de la pluja i la programada i el seu error:</i>	$[Dvm] = [SDvm] = \text{km/h}$
<i>Diferència entre la direcció de propagació de la pluja i la programada i el seu error:</i>	$[DTm] = [SDTm] = ^\circ (\text{graus})$
<i>Mitjana del Factor de Reducció Superficial:</i>	$SRm [\text{Carbone}]$

Taula G-1 Acrònims utilitzats a les taules de resultats següents.

CENTROIDE de la pluja																
		Tamany de la pluja: R														
Dt: 5 min		Diagonal / 1					Diagonal / 2					Diagonal / 5				
NºP	Vp	Dvm	SDvm	DTm	SDTm	SRm	Dvm	SDvm	DTm	SDTm	SRm	Dvm	SDvm	DTm	SDTm	SRm
10	2	0.000006	0.000015	-0.00013	0.00025	0.000019	-0.000013	0.00003	-0.0001	0.0008	0.000037	-0.00001	0.00017	0	0.006	0.00012
	5	0.00004	0.00015	-0.0003	0.002	0.00009	0	0.0005	-0.0009	0.0031	0.00021	0.002	0.004	-0.01	0.06	0.0009
	10	0.0006	0.0012	0.002	0.012	0.00033	-0.001	0.004	-0.013	0.019	0.001	0.016	0.023	-0.1	0.17	0.003
	20	-0.003	0.014	0.007	0.03	0.0018	0.006	0.023	-0.02	0.09	0.0035	0.13	0.21	-0.3	1	0.015
	50	-0.04	0.16	0.06	0.22	0.0074	0	0.28	0	0.5	0.014	0.3	1.2	0.8	2.7	0.04
75	-0.2	0.4	0.11	0.31	0.014	0.1	0.4	-0.1	0.9	0.027	---	---	---	---	---	
15	2	0.000005	0.000015	0	0.0003	0.000021	-0.00001	0.00003	-0.0002	0.001	0.000036	-0.00002	0.00021	-0.001	0.006	0.00017
	5	0.00013	0.00016	0	0.0017	0.000093	0.00004	0.0003	-0.001	0.004	0.00021	0.002	0.005	-0.02	0.06	0.001
	10	0.0007	0.0011	0.002	0.012	0.0003	-0.001	0.003	-0.006	0.02	0.00108	0.002	0.028	-0.05	0.15	0.004
	20	-0.006	0.012	0.006	0.028	0.0019	0.005	0.021	-0.01	0.09	0.0034	0.15	0.23	-0.3	0.9	0.014
	50	-0.03	0.11	0.03	0.13	0.0083	0.08	0.25	0	0.4	0.015	0.3	1	1.2	2.2	0.05
75	0.01	0.29	0.04	0.2	0.0139	0.1	0.3	-0.2	1.3	0.03	---	---	---	---	---	
20	2	0.000003	0.000011	-0.00003	0.00022	0.000022	-0.000003	0.000026	-0.0003	0.0005	0.000037	-0.00003	0.0001	0	0.004	0.00016
	5	0.00008	0.00009	-0.0002	0.0012	0.000102	0.00006	0.00023	-0.0002	0.0027	0.00021	0.0003	0.0026	-0.02	0.03	0.0011
	10	0.0005	0.0007	0.001	0.007	0.00034	0	0.0023	-0.002	0.014	0.00106	0.002	0.014	-0.02	0.11	0.0038
	20	-0.004	0.01	0.005	0.025	0.002	0.002	0.015	0	0.08	0.0035	0.04	0.11	-0.2	0.5	0.017
	50	-0.04	0.09	0.01	0.08	0.0087	0.07	0.13	-0.03	0.24	0.015	0.3	0.8	0.4	1.4	0.09
75	-0.07	0.22	0.04	0.17	0.0148	-0.06	0.24	-0.1	1	0.028	---	---	---	---	---	
26	2	0.000003	0.000008	-0.00001	0.00021	0.000023	0	0.000023	-0.0002	0.0006	0.000038	-0.00003	0.00009	0	0.003	0.00016
	5	0.00008	0.00009	-0.0003	0.0012	0.000103	0.00004	0.00018	0.0001	0.0017	0.00023	0.0005	0.002	-0.022	0.026	0.0011
	10	0.0003	0.0005	0.001	0.007	0.00034	-0.0002	0.0024	-0.002	0.013	0.0011	0	0.011	-0.02	0.09	0.0038
	20	-0.002	0.01	0.001	0.021	0.0021	-0.001	0.015	-0.01	0.07	0.0036	0.03	0.08	0	0.3	0.019
	50	-0.04	0.08	0.01	0.08	0.0091	0.07	0.12	0	0.15	0.016	0.1	0.8	0.8	1.8	0.1
75	-0.02	0.19	0.03	0.11	0.0156	0.1	0.3	0	0.6	0.035	---	---	---	---	---	

Taula G-2 Comparativa de resultats obtinguts i programats pel mètode del CENTROIDE

Primer MAXIM de la pluja																
Tamanys de la pluja: R																
Dt: 5 min																
NºP	Vp	Diagonal / 1					Diagonal / 2					Diagonal / 5				
		Dvm	SDvm	DTm	SDTm	SRm	Dvm	SDvm	DTm	SDTm	SRm	Dvm	SDvm	DTm	SDTm	SRm
10	2	0.003	0.015	0.17	0.27	0.013	0.002	0.014	-0.07	0.3	0.013	0.003	0.017	0.07	0.31	0.013
	5	0.01	0.06	0.1	0.6	0.035	0.01	0.07	0	0.5	0.031	-0.02	0.07	0	0.8	0.027
	10	-0.12	0.24	-0.1	1.1	0.07	0.06	0.21	0.3	1.2	0.061	0.2	0.3	0.5	2.1	0.059
	20	0.1	1.2	-1	2.2	0.123	0.4	1.2	0.8	3.3	0.13	-0.3	0.5	-0.5	2.4	0.132
	50	3.5	10.8	-2.1	12.5	0.29	0.3	9.2	4.7	9.9	0.27	1.9	6.1	-2.9	5.9	0.16
	75	6.6	15.2	1.5	16.8	0.42	5.3	14.2	-0.5	10	0.44	---	---	---	---	---
15	2	0	0.011	0.11	0.24	0.015	0.001	0.01	-0.04	0.29	0.0139	0	0.013	-0.03	0.29	0.014
	5	0	0.03	-0.3	0.6	0.036	0.01	0.07	0.1	0.4	0.034	-0.01	0.07	0.1	0.9	0.029
	10	-0.12	0.2	0.1	1.2	0.069	0.04	0.17	0.2	1.5	0.065	0.12	0.29	0.6	1.7	0.066
	20	0.1	0.9	-0.9	1.7	0.136	0.4	1	0.7	3.1	0.13	-0.3	0.7	-0.8	3	0.14
	50	-0.2	4.1	-0.7	5.8	0.34	1.8	5.2	2.3	8.1	0.31	0.2	3.4	2.4	6.3	0.19
	75	1.6	6.7	1.5	9.8	0.48	-0.4	6.2	0.6	8.8	0.43	---	---	---	---	---
20	2	0	0.005	0	0.19	0.016	0.001	0.008	-0.01	0.22	0.0146	-0.001	0.009	-0.01	0.29	0.0145
	5	-0.002	0.029	0	0.5	0.035	0.02	0.06	0	0.4	0.034	-0.01	0.05	0	0.6	0.029
	10	-0.12	0.19	-0.1	1.1	0.067	0.04	0.17	0.3	1.3	0.066	0.02	0.16	0.8	1.6	0.072
	20	0.1	0.8	-0.8	2	0.14	0.2	0.8	0.5	2.3	0.134	-0.1	0.6	-0.7	2.4	0.142
	50	0.6	3.9	-0.6	4.2	0.34	1.2	4.4	0.3	4.5	0.33	-0.2	2.5	0.3	7.2	0.29
	75	1.9	5.8	0.8	7.3	0.48	-1.9	7.1	-0.5	6.5	0.45	---	---	---	---	---
26	2	0	0.005	-0.02	0.21	0.016	-0.002	0.007	0.02	0.25	0.0153	-0.002	0.008	-0.07	0.24	0.0151
	5	0.002	0.019	-0.1	0.4	0.037	0.01	0.07	0.11	0.26	0.035	-0.01	0.06	-0.1	0.6	0.031
	10	-0.1	0.15	-0.1	1	0.07	0.02	0.16	0	1.3	0.068	0.02	0.18	0.6	1.4	0.074
	20	0	0.8	-0.8	2.2	0.142	0.2	0.8	0.6	2.3	0.141	0.1	0.6	-1	1.9	0.146
	50	0.8	4.3	-0.7	4.1	0.35	1.1	4	0.4	3.8	0.35	-0.6	2.6	0.7	5.9	0.3
	75	1.5	4.3	0.8	5.2	0.49	-0.4	6.4	0.3	4.7	0.47	---	---	---	---	---

Taula G-3 Comparativa de resultats obtinguts i programats pel mètode del PRIMER MÀXIM

Començament de la pluja																
Tamanys de la pluja: R																
Dt: 5 min																
NºP	Vp	Diagonal / 1					Diagonal / 2					Diagonal / 5				
		Dvm	SDvm	DTm	SDTm	SRm	Dvm	SDvm	DTm	SDTm	SRm	Dvm	SDvm	DTm	SDTm	SRm
10	2	0	0.03	0.1	1.5	0.08	0	0.06	0.2	3.4	0.17	0	0.4	-0.9	14.5	0.19
	5	-0.01	0.1	-0.2	1.7	0.09	-0.01	0.19	-0.2	3	0.18	0.1	1	-1.1	15.1	0.19
	10	-0.2	0.4	-0.2	2.1	0.1	0	0.4	-0.7	3.8	0.18	0.2	2.4	-0.9	15.6	0.19
	20	-0.3	1	-0.1	3	0.16	-0.3	0.9	-0.6	3.3	0.22	1.5	8.2	0.2	15.8	0.23
	50	-1	6.9	-1.9	9.8	0.27	1.2	8.9	-3.3	9.9	0.33	-2.9	4.3	-2.9	12.4	0.14
	75	-3.3	15.3	0.6	13	0.41	-5.1	12.1	0.8	14	0.41	---	---	---	---	---
15	2	-0.002	0.017	0.1	0.8	0.09	0.001	0.02	0.1	1.5	0.18	0.1	0.6	-1.5	12.2	0.24
	5	-0.01	0.08	-0.1	0.9	0.09	0	0.04	0	1.5	0.19	0.2	1.5	-1.7	12.4	0.25
	10	-0.1	0.23	-0.1	1.3	0.11	-0.03	0.18	-0.4	1.6	0.2	0.5	3.2	-1.4	12.8	0.25
	20	-0.2	0.6	0.2	2.4	0.16	-0.3	0.5	-0.3	3.3	0.22	2	9.8	-0.4	12.4	0.28
	50	0.3	4.3	2.6	8.2	0.32	1.1	4	-2.5	6.6	0.38	-0.9	3.1	-2	9	0.21
	75	-0.2	12.6	1.4	10.5	0.42	-0.8	9.5	-0.3	11.2	0.46	---	---	---	---	---
20	2	-0.001	0.016	0.1	0.9	0.08	0.001	0.022	0.1	1.8	0.17	0.01	0.24	-0.5	7.8	0.27
	5	-0.02	0.05	-0.1	1	0.09	-0.01	0.04	0	1.7	0.17	0	0.6	-0.9	8	0.27
	10	-0.08	0.17	-0.2	1.1	0.1	0	0.19	-0.1	1.8	0.18	0.1	1.3	-0.5	7.7	0.27
	20	-0.3	0.5	0.2	2.1	0.15	-0.1	0.5	0	2.7	0.21	0.3	2.8	-0.4	7.7	0.3
	50	-0.7	3.4	1.4	4.8	0.32	2.5	5.6	-0.6	2.5	0.38	0.1	5.3	-1.5	7.8	0.34
	75	-1.6	10.7	1.7	7.4	0.45	-2.1	8.6	0.2	9.9	0.46	---	---	---	---	---
26	2	0	0.02	0.1	1.4	0.08	0	0.03	0	2.6	0.16	-0.01	0.21	-0.5	9.3	0.27
	5	-0.01	0.06	-0.1	1.3	0.09	-0.01	0.07	0.1	2.6	0.17	0	0.5	-0.8	9.4	0.27
	10	-0.06	0.21	-0.3	1.5	0.11	-0.02	0.21	0	2.6	0.18	0	1.1	-0.6	9.3	0.27
	20	-0.2	0.6	0.3	1.6	0.16	0	0.4	0.3	3.1	0.21	0	2.4	-0.1	9.2	0.3
	50	-0.5	3.6	0.4	4.5	0.34	2.3	5.4	-0.6	2.6	0.39	-0.7	6.4	-1.3	8.5	0.35
	75	1	10.5	-0.5	4.6	0.49	-3.2	6.9	0.1	7.4	0.48	---	---	---	---	---

Taula G-4 Comparativa de resultats obtinguts i programats pel mètode del començament de la pluja

Correlacions entre pluviòmetres Obliguem a (0,0,0)																			
Tamany de la pluja: R																			
Dt: 5 min		Diagonal / 1					Diagonal / 2					Diagonal / 5							
NºP	Vp	Dvm	SDvm	DTm	SDTm	SRm	SSRm	Dvm	SDvm	DTm	SDTm	SRm	SSRm	Dvm	SDvm	DTm	SDTm	SRm	SSRm
10	2	0.8	0.5	-0.8	2.4	0.7	0.12	0.13	0.09	0.1	2.1	0.38	0.09	-0.005	0.011	-0.1	0.3	0.094	0.014
	5	1.7	1.1	-1.2	3	0.74	0.14	0.32	0.24	0.2	2.5	0.41	0.12	0	0.05	-0.1	0.3	0.11	0.03
	10	3	2.3	-0.7	3.1	0.81	0.22	0.6	0.5	0.3	3	0.47	0.15	0.01	0.17	-0.6	1	0.15	0.07
	20	---	---	---	---	---	---	0.2	0.6	-0.4	2.1	0.53	0.17	-0.3	0.4	1.1	1.2	0.2	0.05
	50	---	---	---	---	---	---	-2.5	2.7	-0.3	3	0.9	0.6	0.3	1.5	1.3	1	0.28	0.28
75	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
15	2	0.7	0.4	-1.3	2	0.7	0.1	0.16	0.1	-0.3	1.7	0.41	0.08	0.006	0.01	-0.1	0.6	0.14	0.04
	5	1.7	1	-1.3	2	0.75	0.12	0.36	0.24	-0.2	1.9	0.44	0.1	0.001	0.031	0.1	0.9	0.14	0.07
	10	3	1.9	0.4	3.1	0.84	0.16	0.6	0.3	-0.5	1.4	0.48	0.13	-0.02	0.1	-0.5	0.6	0.16	0.06
	20	---	---	---	---	---	---	0.24	0.24	0	1.4	0.54	0.16	-0.05	0.31	0.2	1.6	0.23	0.1
	50	---	---	---	---	---	---	-1.7	1.6	0.3	1.7	0.9	0.4	-0.6	2.5	1.1	4.6	0.3	0.24
75	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
20	2	0.78	0.25	-0.4	1.2	0.72	0.07	0.18	0.05	-0.3	0.5	0.41	0.05	0.012	0.004	-0.12	0.14	0.13	0.024
	5	1.9	0.6	-0.6	1.5	0.77	0.08	0.41	0.13	-0.2	0.7	0.44	0.06	0.019	0.011	0	0.3	0.13	0.04
	10	3.4	1.2	0.1	3	0.86	0.11	0.63	0.19	-0.4	0.8	0.48	0.08	0.02	0.05	0	0.4	0.16	0.03
	20	---	---	---	---	---	---	0.5	0.3	0	0.7	0.56	0.12	0.07	0.31	-0.1	0.8	0.23	0.05
	50	---	---	---	---	---	---	-2.3	1.8	-0.1	0.9	0.88	0.22	-0.6	2.1	-1.1	1.5	0.47	0.19
75	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
26	2	0.82	0.26	-0.5	1	0.72	0.07	0.19	0.06	-0.2	0.5	0.42	0.05	0.014	0.006	-0.06	0.19	0.14	0.028
	5	2	0.6	-0.6	1.1	0.78	0.08	0.43	0.13	-0.1	0.5	0.45	0.06	0.021	0.011	0.2	0.4	0.14	0.04
	10	3.8	1.3	0.1	0.9	0.88	0.11	0.67	0.21	-0.2	0.3	0.49	0.08	0.02	0.05	-0.1	0.4	0.17	0.028
	20	---	---	---	---	---	---	0.59	0.27	0.3	0.6	0.58	0.11	0.03	0.18	-0.2	1	0.25	0.06
	50	---	---	---	---	---	---	-2.5	1.3	-0.2	0.7	0.94	0.25	---	---	---	---	---	---
75	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	

Taula G-5 Comparativa de resultats obtinguts i programats pel mètode de CORRELACIONS ENTRE PLUVIÒMETRES OBLIGUEM A (0,0,0)

Correlacions entre pluviòmetres NO(0,0,0)																
Tamany de la pluja: R																
Dt: 5 min		Diagonal / 1					Diagonal / 2					Diagonal / 5				
NºP	Vp	Dvm	SDvm	DTm	SDTm	SRm	Dvm	SDvm	DTm	SDTm	SRm	Dvm	SDvm	DTm	SDTm	SRm
10	2	1.2	0.5	-0.8	2	0.39	0.49	0.16	0	1.7	0.23	0.073	0.024	-0.13	0.2	0.079
	5	2.9	1	-0.9	2	0.4	1.3	0.5	0	1.2	0.25	0.22	0.15	0	0.4	0.093
	10	6.3	2.7	-0.9	2.6	0.41	3.1	1.3	-0.3	2.6	0.27	0.6	0.5	-0.6	1	0.12
	20	16.6	10.6	-0.1	2.9	0.48	6.5	3.4	-0.2	2.4	0.34	0.5	0.8	1.1	1.2	0.19
	50	57.9	22	-1.2	2.9	0.64	19.8	4.1	-1	2.8	0.5	4.7	8.3	1.3	4.1	0.26
75	98.1	31.8	-2.7	5.7	0.72	48.5	15.8	-1.9	3.8	0.65	---	---	---	---	---	
15	2	1.1	0.3	-0.8	2.3	0.4	0.52	0.15	-0.3	1.5	0.25	0.13	0.05	-0.2	0.6	0.108
	5	2.9	0.9	-0.8	2.6	0.41	1.4	0.4	-0.2	1.7	0.27	0.3	0.18	0.1	0.9	0.11
	10	6.3	2.2	-0.1	2.6	0.43	3.1	1	-0.5	1.5	0.29	0.6	0.3	-0.6	0.6	0.13
	20	14.5	6.1	-0.1	3.5	0.49	6.6	2.3	0	2.2	0.34	1.4	1.7	0.2	1.6	0.21
	50	65.4	31.5	-0.3	4.3	0.66	41.8	31.6	-0.5	2.4	0.58	5.2	4.6	0.8	5.3	0.27
75	128.1	41	1.2	3.5	0.76	62.1	20.8	0.6	4.9	0.68	---	---	---	---	---	
20	2	1.19	0.22	-0.3	0.9	0.4	0.55	0.09	-0.2	0.5	0.255	0.127	0.029	-0.12	0.21	0.105
	5	3.1	0.6	-0.5	1.1	0.42	1.47	0.26	-0.2	0.7	0.266	0.3	0.1	0	0.3	0.106
	10	6.8	1.4	-0.3	0.9	0.44	3.2	0.6	-0.4	0.8	0.29	0.69	0.27	0	0.3	0.134
	20	16.4	4.7	-0.4	1.4	0.49	7.2	2.1	-0.1	0.9	0.35	1.4	1	0	0.8	0.21
	50	87.4	29.2	-0.1	2.3	0.7	32.7	14.5	-0.2	1.9	0.58	10.1	5	-1.1	1.7	0.42
75	144.9	37.9	0.1	1	0.79	84.4	19	0.4	2.3	0.74	---	---	---	---	---	
26	2	1.22	0.22	-0.3	0.7	0.4	0.57	0.09	-0.2	0.4	0.261	0.14	0.04	-0.06	0.27	0.111
	5	3.2	0.6	-0.4	0.7	0.42	1.5	0.26	-0.1	0.5	0.271	0.34	0.1	0.1	0.4	0.117
	10	7.1	1.5	-0.1	0.6	0.44	3.2	0.6	-0.2	0.4	0.29	0.73	0.21	-0.11	0.26	0.144
	20	17.5	4.3	-0.2	0.8	0.5	7.5	1.9	0.3	0.5	0.35	1.7	1	-0.1	1.1	0.23
	50	84.8	20.5	-0.6	1.2	0.7	36.7	17.7	-0.4	1.7	0.6	10.6	6.2	1.3	3.6	0.44
75	161.5	36.3	0.7	0.9	0.8	99.1	27.7	1.4	2.6	0.76	---	---	---	---	---	

Taula G-6 Comparativa de resultats obtinguts i programats pel mètode de CORRELACIONS ENTRE PLUVIÒMETRES NO (0,0,0)

6.8. Annex H: Exemple d'aplicació dels mètodes de càlcul de les velocitats a una pluja real.

La pluja que estudiarem (Taula H-1) és la que es va produir el 17 de gener de 1999 a les 23:05; el fitxer on tenim les dades és el que porta per nom:

Plj_dmm_{000300s}[1999_01_17_23_05][1999_01_18_1_50].DaT

i el seu contingut és el següent

```

159231900,300,33
"17/01/1999 23:05:00",0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,-99,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"17/01/1999 23:10:00",0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,-99,1,0,0,0,0,5,0,0,0,1,1,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"17/01/1999 23:15:00",0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,-99,0,0,0,0,0,3,1,1,0,0,1,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"17/01/1999 23:20:00",1,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,-99,1,0,0,0,0,2,0,1,1,0,0,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"17/01/1999 23:25:00",0,0,0,0,1,0,1,0,0,0,0,-99,1,1,0,0,0,3,0,1,1,1,0,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"17/01/1999 23:30:00",2,0,0,1,0,0,1,0,1,1,1,-99,1,0,0,0,0,2,0,0,1,0,0,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"17/01/1999 23:35:00",0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,-99,1,0,1,0,0,2,0,0,0,0,2,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"17/01/1999 23:40:00",1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,-99,1,0,1,0,0,1,0,0,1,0,0,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"17/01/1999 23:45:00",0,1,0,0,1,0,1,0,0,0,0,-99,1,0,1,0,0,2,0,1,0,0,0,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"17/01/1999 23:50:00",0,0,0,0,0,0,1,0,1,0,0,-99,1,0,1,1,0,1,0,0,0,1,0,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"17/01/1999 23:55:00",0,1,0,0,0,0,1,0,0,1,1,-99,1,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"18/01/1999",0,0,0,0,0,0,1,0,0,1,0,-99,2,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"18/01/1999 0:05:00",0,2,0,0,0,0,2,0,0,0,0,-99,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"18/01/1999 0:10:00",0,1,0,0,0,0,1,0,0,1,0,-99,2,0,1,0,0,0,0,2,0,0,0,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"18/01/1999 0:15:00",0,2,0,0,0,0,1,0,0,1,0,-99,1,0,1,0,0,0,0,2,0,0,0,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"18/01/1999 0:20:00",0,6,1,0,0,0,0,0,1,1,0,-99,1,0,1,0,0,1,0,2,0,0,1,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"18/01/1999 0:25:00",1,3,0,0,0,0,0,0,0,0,0,-99,1,0,0,0,0,1,0,3,0,0,1,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"18/01/1999 0:30:00",0,2,0,0,0,0,1,0,1,1,0,-99,0,0,2,0,0,1,0,1,0,0,2,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"18/01/1999 0:35:00",0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,-99,0,0,1,0,0,2,1,1,0,0,1,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"18/01/1999 0:40:00",0,1,0,0,0,0,1,0,0,1,0,-99,0,0,1,0,0,2,0,0,0,0,1,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"18/01/1999 0:45:00",0,2,0,0,0,0,1,0,0,1,1,-99,0,1,1,0,0,1,0,1,0,0,0,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"18/01/1999 0:50:00",0,0,0,0,0,0,1,0,0,1,0,-99,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,1,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"18/01/1999 0:55:00",0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,-99,0,0,1,0,1,1,0,0,0,0,0,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"18/01/1999 1:00:00",0,0,0,0,0,0,1,1,0,1,0,-99,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"18/01/1999 1:05:00",0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,-99,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"18/01/1999 1:10:00",1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,-99,0,0,1,0,0,0,0,0,0,1,0,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"18/01/1999 1:15:00",0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,-99,0,0,1,0,0,1,0,0,0,0,0,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"18/01/1999 1:20:00",0,0,0,0,0,0,1,0,0,1,0,-99,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"18/01/1999 1:25:00",0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,-99,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"18/01/1999 1:30:00",0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,1,-99,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"18/01/1999 1:35:00",0,1,0,1,0,0,0,0,0,1,0,-99,0,0,1,0,1,1,0,0,0,0,0,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"18/01/1999 1:40:00",0,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,-99,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL
"18/01/1999 1:45:00",0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,-99,0,0,0,1,0,0,1,0,0,0,0,-99,-99,-99,-99,-99,-99,EOL

```

Taula H-1 Dades informatitzades de la pluja que es va produir el 17 de gener de 1999 a les 23:05

És un fitxer de dades de pluja dels estàndards en el nostre treball i d'una mida moderada on podrem fer tots els càlculs a ma (amb l'ajut d'un full de càlcul) per tal de poder-los comparar amb els informatitzats.

El corresponent full de càlcul associat al fitxer de dades de pluja anterior i pels pluviòmetres actius serà el que mostrem a la Taula H-2. Hem eliminat els pluviòmetres no actius i hem introduït una nova columna de temps, en segons, associada a la columna de temps de tipus “data de calendari”

i	t (s)	Pluviòmetre n°																						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
1	17-1-99 23:05	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	
2	17-1-99 23:10	300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	5	0	0	0	1	1	
3	17-1-99 23:15	600	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3	1	1	0	0	1	
4	17-1-99 23:20	900	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	2	0	1	1	0	0	
5	17-1-99 23:25	1200	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	3	0	1	1	1	0	
6	17-1-99 23:30	1500	2	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	
7	17-1-99 23:35	1800	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	2	
8	17-1-99 23:40	2100	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	
9	17-1-99 23:45	2400	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	1	0	0	0	
10	17-1-99 23:50	2700	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	
11	17-1-99 23:55	3000	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	
12	18-1-99 0:00	3300	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
13	18-1-99 0:05	3600	0	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
14	18-1-99 0:10	3900	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	2	0	1	0	0	0	0	2	0	0	
15	18-1-99 0:15	4200	0	2	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	2	0	0	
16	18-1-99 0:20	4500	0	6	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	2	0	0	
17	18-1-99 0:25	4800	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	3	0	0	
18	18-1-99 0:30	5100	0	2	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	2	0	0	1	0	1	0	0	
19	18-1-99 0:35	5400	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	1	1	0	0	
20	18-1-99 0:40	5700	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	
21	18-1-99 0:45	6000	0	2	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	
22	18-1-99 0:50	6300	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
23	18-1-99 0:55	6600	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	
24	18-1-99 1:00	6900	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25	18-1-99 1:05	7200	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
26	18-1-99 1:10	7500	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	
27	18-1-99 1:15	7800	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	
28	18-1-99 1:20	8100	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
29	18-1-99 1:25	8400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
30	18-1-99 1:30	8700	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
31	18-1-99 1:35	9000	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	
32	18-1-99 1:40	9300	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
33	18-1-99 1:45	9600	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	

Taula H-2 Full de càlcul associat al fitxer de la pluja del 17 de gener de 1999 a les 23:05 que és l'objecte d'estudi “manual”

Càlculs pel centroide

El primer dels mètodes que utilitzem és del “centroide”, fem el càlcul del temps on estan els centroides dels diferents pluviòmetres (dels dos primers)

$$\text{Pluv N}^\circ 1: Tct(1) = \frac{\sum_{i=1}^{33} t_i \cdot v_{i,1}}{\sum_{i=1}^{33} v_{i,1}} =$$

$$\frac{0 \cdot 0 + 300 \cdot 0 + \dots + 900 \cdot 1 + 1200 \cdot 0 + 1500 \cdot 2 + 1800 \cdot 0 + 2100 \cdot 1 + 4800 \cdot 1 + \dots + 7500 \cdot 1 + \dots + 9600 \cdot 0}{0 + 0 + \dots + 1 + 0 + 2 + 0 + 1 + 1 + \dots + 1 + \dots + 0} = \frac{18300}{6} = 3050 \text{ s}$$

$$\text{Pluv N}^\circ 2: Tct(2) = \frac{\sum_{i=1}^{33} t_i \cdot v_{i,2}}{\sum_{i=1}^{33} v_{i,1}} =$$

$$\frac{2400*1+3000*1+3600*2+3900*1+4200*2+4500*6+4800*3+5100*2+5400*1+5700*1+6000*2+6600*1+7800*1+9000*1}{1+1+2+1+2+6+3+2+1+1+2+1+1+1} =$$

$$\frac{123000}{25} = 4920 \text{ s}$$

repetint aquests càlculs per tots els pluviòmetres obtenim els resultats que mostrem a la Taula H-3.

<i>i</i>	Càlcul "manual"		Càlcul Informatitzat	
	$T_{ct}(i)$ (s)	Nº d'informacions	$T_{ct}(i)$ (s) [TdeMAX(<i>i</i>)]	Nº d'informacions
1	3050.00	5	3050	5
2	4920.00	14	4920	14
3	7425.00	4	7425	4
4	5250.00	2	5250	2
5	1800.00	3	1800	3
6	9300.00	1	9300	1
7	4500.00	19	4500	19
8	3900.00	2	3900	2
9	2940.00	5	2940	5
10	5343.75	16	5343.75	16
11	4725.00	8	4725	8
13	2788.24	15	2788.23529	15
14	3600.00	4	3600	4
15	5277.27	21	5277.272727	21
16	6000.00	4	6000	4
17	5200.00	3	5200	3
18	2754.55	19	2754.545454	19
19	5200.00	3	5200	3
20	3825.00	11	3825	11
21	1425.00	4	1425	4
22	2925.00	4	2925	4
23	3763.64	9	3763.636363	9

Taula H-3 Comparativa de resultats de l'instant de temps associat a cada pluviòmetre pel mètode del centroide calculats manualment i pes nostres programes

També controlem el nº d'informacions que ens proporciona cada un dels pluviòmetres, evidentment les estacions que no tenen cap informació, o bé per què no funcionaven o per què la pluja no els hi ha arribat a produir ni una bolcada ja no hi figuren als càlculs. Extrapolant aquest raonament d'eliminació d'estacions no actives, sembla que seria una "injustícia" estadística donar-li el mateix valor a la informació d'una estació amb "moltes" dades durant la pluja que a un pluviòmetre amb "poques" dades. Als càlculs de les pluges de disseny no hem tingut present aquest fenomen, però per les dades reals proposem (i així ho calculem) que la informació d'una estació amb n informacions tingui un pes n vegades més gran que la d'una estació amb una única informació. Farem i mostrarem els resultats tenint en compte aquest pes i sense tenir-lo. També

presentem la comparativa dels valor obtingut pel programari *AjustaAunPla.vbp* per aquests valors, on es veu que l'acord entre els resultats és l'esperat.

Continuem ajustant un pla als valor obtinguts anteriorment amb el programari SURFER(c), on les variables X i Y seran les posicions dels pluviòmetres i la variable vertical els temps calculats anteriorment (Taula H-4)

i		$X_{UTM}(i)$ (m)	$Y_{UTM}(i)$ (m)	$T_c(i)$ (s)
1	AGBE	432571.50	4590189.02	3050.00
2	AGCO	422530.02	4579548.85	4920.00
3	AGTI	426690.31	4586494.09	7425.00
4	AGTR	430033.71	4585877.61	5250.00
5	AJSA	426648.22	4583627.20	1800.00
6	AJUO	429269.86	4584410.49	9300.00
7	BARK	428484.87	4578697.91	4500.00
8	CANY	430181.35	4588414.30	3900.00
9	CATA	433278.54	4585022.51	2940.00
10	CLAB	427986.67	4578246.70	5343.75
11	COTX	427878.79	4580946.15	4725.00
13	DEPU	435184.29	4584975.35	2788.24
14	ELIZ	430373.13	4583077.04	3600.00
15	FCCF	427443.14	4576149.36	5277.27
16	FISI	426341.33	4582030.28	6000.00
17	HEUR	428356.66	4587775.00	5200.00
18	MONT	430431.21	4579648.86	2754.55
19	NABI	425041.98	4585528.75	5200.00
20	NICA	433034.54	4582822.33	3825.00
21	ROLI	434116.78	4587438.68	1425.00
22	SAGR	432334.28	4586331.75	2925.00
23	AJNO	431350.99	4581678.24	3763.64

Taula H-4 Assignació a cada un dels pluviòmetres actius a la nostra pluja dels valors temporal calculats amb anterioritat

Els resultats pels paràmetres del pla els mostrem a la Taula H-5

SURFER: Planar Regression: $Z = A X + B Y + C$			
Fitted Parameters			
	A (s/m)	B (s/m)	C (s)
Parameter Value:	-0.3075527	0.03296534	-14638.1
Programari: AjustAunPla; Sub CalculS(0) $t = k_x X + k_y Y + E$			
Paràmetres calculats. Sense pes estadístic			
	k_x (s/m)	k_y (s/m)	E (s)
	-0.3075525	0.03296537	-14638.3
Paràmetres calculats. Amb pes estadístic; Sub CalculS(0) $t = k_x X + k_y Y + E$			
	k_x (s/m)	k_y (s/m)	E (s)
	-0.24669503	-0.016167599	184194.5

Taula H-5 Mètode del Centroide. Comparativa de resultats dels paràmetres del pla entre els mètodes informatitzats i els manuals. Per cada mètode hem respectat la nomenclatura original que proporciona el propi mètode; aquesta nomenclatura es pot veure als títols dels càlculs.

Les discrepàncies entre els resultats proporcionats pel SURFER (c) i pel nostre programari es donen a la sisena xifra significativa, el que de nou ens fa pensar que els resultats estan en molt bon acord. Tal com era d'esperar, els resultats quan donem diferents pesos estadístics als punts no tenen res a veure que quan no donem aquest pes. Als càlculs anteriors veiem que el terme independent no només ha canviat de signe si no que a augmentat en un ordre de magnitud, encara que és un valor que no utilitzem per fer els càlculs de la velocitat de la pluja. Ens decantem per aquest últim mètode de càlcul per obtenir les diferents velocitats de les pluges.

Càlculs pel Primer Màxim

En el segon dels mètodes de càlcul que utilitzem hem de veure per quin valor temporal tenim el primer dels màxims d'intensitat de pluja (o de profunditat, ja que utilitzem un interval temporal fix) Aquesta consulta a la Taula H-2 ens donen els següents resultats (Taula H-6)

i		$X_{UTM}(i)$ (m)	$Y_{UTM}(i)$ (m)	Mètode manual		AjustAunPla	
				$T_{\max}(i)$ (s)	$V_{\max}(i)$ (dmm)	TdeMAX(i) (s)	IntensiPluv(i) (dmm)
1	AGBE	432571.50	4590189.02	1500	2	1500	2
2	AGCO	422530.02	4579548.85	4500	6	4500	6
3	AGTI	426690.31	4586494.09	4500	1	4500	1
4	AGTR	430033.71	4585877.61	1500	1	1500	1
5	AJSA	426648.22	4583627.20	1200	1	1200	1
6	AJUO	429269.86	4584410.49	9300	1	9300	1
7	BARK	428484.87	4578697.91	3600	2	3600	2
8	CANY	430181.35	4588414.30	900	1	900	1
9	CATA	433278.54	4585022.51	900	1	900	1
10	CLAB	427986.67	4578246.70	1500	1	1500	1
11	COTX	427878.79	4580946.15	600	1	600	1
13	DEPU	435184.29	4584975.35	3300	2	3300	2
14	ELIZ	430373.13	4583077.04	0	1	0	1
15	FCCF	427443.14	4576149.36	5100	2	5100	2
16	FISI	426341.33	4582030.28	2700	1	2700	1
17	HEUR	428356.66	4587775.00	0	1	0	1
18	MONT	430431.21	4579648.86	300	5	300	5
19	NABI	425041.98	4585528.75	600	1	600	1
20	NICA	433034.54	4582822.33	4800	3	4800	3
21	ROLI	434116.78	4587438.68	900	1	900	1
22	SAGR	432334.28	4586331.75	300	1	300	1
23	AJNO	431350.99	4581678.24	1800	2	1800	2

Taula H-6 Valors dels temps on es donen els valors màxims d'intensitat per tots els pluviòmetres de la nostra puja. Les dades manuals i les informàtiques són idèntiques.

Els resultats són idèntics als proporcionats pel nostre sistema informàtic. Que no hi hagi cap discrepància en aquest resultats es deu a que ara estem treballant amb nombres naturals.

Tornem a ajustar un pla als valor obtinguts anteriorment amb el programari SURFER i comparem els seus resultats amb els nostres (Taula H-7)

SURFER: Planar Regression: $Z = A X + B Y + C$			
Fitted Parameters			
	A (s/m)	B (s/m)	C (s)
Parameter Value:	-0.05585954	-0.14379207	685340.3
Programari: AjustAunPla; Sub CalculS(1) $t = k_x X + k_y Y + E$			
Paràmetres calculats. Sense pes estadístic			
	k_x (s/m)	k_y (s/m)	E (s)
	-0.05585951	-0.14379199	685339.9
Paràmetres calculats. Amb pes estadístic; Sub CalculS(0) $t = k_x X + k_y Y + E$			
	k_x (s/m)	k_y (s/m)	E (s)
	-0.05190622	-0.14963989	710439.98765

Taula H-7 Mètode del Primer Màxim. Comparativa de resultats dels paràmetres del pla entre els mètodes informatitzats i els manuals. Per cada mètode hem respectat la nomenclatura original que proporciona el propi mètode; aquesta nomenclatura es pot veure als títols dels càlculs.

De nou l'acord és formalment total per les regressions sense assignar pes estadístic als punts. Veiem el mateix efecte (valor diferents) que es dona amb el mètode anterior amb les dades obtingudes donant pes estadístic als punts.

Càlculs pel Començament de la pluja

El treball que hem de fer és molt semblant al de l'apartat anterior, hem de consultar a la Taula H-2 per quin temps és dona el primer valor d'intensitat (volum) de pluja diferent de zero. Presentem aquesta consulta i les dades amb les que treballarà el nostre software (Taula H-8)

i	$X_{UTM}(i)$ (m)	$Y_{UTM}(i)$ (m)	Mètode manual		AjustAunPla		
			$T_o(i)$ (s)	$V_o(i)$ (dmm)	$T_{deO}(i)$ (s)	$IntensIPluv(i)$ (dmm)	
1	AGBE	432571.50	4590189.02	900	1	900	1
2	AGCO	422530.02	4579548.85	2400	1	2400	1
3	AGTI	426690.31	4586494.09	4500	1	4500	1
4	AGTR	430033.71	4585877.61	1500	1	1500	1
5	AJSA	426648.22	4583627.20	1200	1	1200	1
6	AJUO	429269.86	4584410.49	9300	1	9300	1
7	BARK	428484.87	4578697.91	0	1	0	1
8	CANY	430181.35	4588414.30	900	1	900	1
9	CATA	433278.54	4585022.51	900	1	900	1
10	CLAB	427986.67	4578246.70	1500	1	1500	1
11	COTX	427878.79	4580946.15	600	1	600	1
13	DEPU	435184.29	4584975.35	300	1	300	1
14	ELIZ	430373.13	4583077.04	0	1	0	1
15	FCCF	427443.14	4576149.36	1800	1	1800	1
16	FISI	426341.33	4582030.28	2700	1	2700	1
17	HEUR	428356.66	4587775.00	0	1	0	1
18	MONT	430431.21	4579648.86	0	1	0	1
19	NABI	425041.98	4585528.75	600	1	600	1
20	NICA	433034.54	4582822.33	600	1	600	1
21	ROLI	434116.78	4587438.68	900	1	900	1
22	SAGR	432334.28	4586331.75	300	1	300	1
23	AJNO	431350.99	4581678.24	300	1	300	1

Taula H-8 Valors dels temps quan comença la pluja per tots els pluviòmetres. Les dades manuals i les informàtiques són les mateixes.

De nou el treballar amb posicions temporals senceres fa que les dades siguin exactament iguals i pels paràmetres del pla tenim (Taula H-9)

SURFER: Planar Regression: $Z = A X + B Y + C$			
Fitted Parameters			
	A (s/m)	B (s/m)	C (s)
Parameter Value:	-0.2167162	0.0877656	-307778.1
Programari: AjustAunPla; Sub CalculS(2) $t = k_x X + k_y Y + E$			
Paràmetres calculats. Sense pes estadístic			
	k_x (s/m)	k_y (s/m)	E (s)
	-0.2167164	0.0877657	-307778.4
Paràmetres calculats. Amb pes estadístic; Sub CalculS(0) $t = k_x X + k_y Y + E$			
	k_x (s/m)	k_y (s/m)	E (s)
	-0.2211637	0.0796074	-268744.7

Taula H-9 Mètode del Començament de la pluja. Comparativa de resultats dels paràmetres del pla entre els mètodes informatitzats i els manuals. Per cada mètode hem respectat la nomenclatura original que proporciona el propi mètode; aquesta nomenclatura es pot veure als títols dels càlculs.

Veiem un comportament similar als dos mètodes anteriors, encara que amb valors dels paràmetres força diferents.

Càlculs pels mètodes de correlació

El nostre software ens proporciona (Taula H-10) els següents valors pels desfasaments temporals (Desf) entre els diferents pluviòmetres (PLM: màster i PIE: esclau) als que els hi corresponen unes distàncies

$$d_{PLM;PIE} = \sqrt{(X_{PLM} - X_{PIE})^2 + (Y_{PLM} - Y_{PIE})^2} \equiv \sqrt{X^2 + Y^2}$$

on hem definit

$$X \equiv X_{PLM} - X_{PIE} \quad i \quad Y \equiv Y_{PLM} - Y_{PIE}$$

Recordem que en aquests mètodes de correlació és a aquestes (X, Y) als que assignem el temps (anomenat Desf) Per aquesta pluja que estem estudiant tenim 128 punts i aquest mètode ja incorpora implícitament el fet que pluviòmetres amb poques dades intervinguin poc o gens en el càlcul del pla temporal pel càlcul de la velocitat. És per això que per aquest mètodes no farem cap repetició de valors. Les dades que utilitzarem les presentem a la següent taula on mostrem qui és el pluviòmetre mestre (PLM) qui l'esclau (PLE) les coordenades (X, Y) associades a la parella en qüestió i el temps per aquestes parelles.

i	PIM	PIE	X(m)	Y(m)	Desf (s)	i	PIM	PIE	X(m)	Y(m)	Desf (s)	i	PIM	PIE	X(m)	Y(m)	Desf (s)
1	1	3	-5881.19	-3694.93	7800	46	10	19	-2944.69	7282.05	8100	91	18	17	-2074.55	8126.14	8700
2	1	4	-2537.79	-4311.41	7500	47	11	2	-5348.77	-1397.3	8400	92	18	22	1903.07	6682.89	7200
3	1	6	-3301.64	-5778.53	8400	48	11	4	2154.92	4931.46	8400	93	19	1	7529.52	4660.27	6900
4	1	7	-4086.63	-11491.11	8400	49	11	6	1391.07	3464.34	8700	94	19	2	-2511.96	-5979.9	8400
5	1	8	-2390.15	-1774.72	5400	50	11	7	606.08	-2248.24	8700	95	19	4	4991.73	348.86	8400
6	1	17	-4214.84	-2414.02	7500	51	11	16	-1537.46	1084.13	8100	96	19	6	4227.88	-1118.26	8700
7	1	19	-7529.52	-4660.27	8700	52	11	17	477.87	6828.85	8400	97	19	7	3442.89	-6830.84	8700
8	1	22	-237.22	-3857.27	6000	53	11	18	2552.42	-1297.29	8400	98	19	8	5139.37	2885.55	6300
9	2	6	6739.84	4861.64	6900	54	11	19	-2836.81	4582.6	9000	99	19	14	5331.15	-2451.71	6600
10	2	19	2511.96	5979.9	7200	55	13	3	-8493.98	1518.74	9000	100	19	16	1299.35	-3498.47	9000
11	3	4	3343.4	-616.48	4500	56	13	6	-5914.43	-564.86	9000	101	19	17	3314.68	2246.25	8400
12	3	6	2579.55	-2083.6	4800	57	13	7	-6699.42	-6277.44	9000	102	19	18	5389.23	-5879.89	8400
13	3	19	-1648.33	-965.34	900	58	14	2	-7843.11	-3528.19	7800	103	19	22	7292.3	803	2100
14	3	22	5643.97	-162.34	3000	59	14	4	-339.42	2800.57	9000	104	20	16	-6693.21	-792.05	9000
15	4	1	2537.79	4311.41	6000	60	14	7	-1888.26	-4379.13	8100	105	20	19	-7992.56	2706.42	9000
16	4	6	-763.85	-1467.12	7800	61	14	10	-2386.46	-4830.34	9000	106	21	5	-7468.56	-3811.48	300
17	4	8	147.64	2536.69	5400	62	14	11	-2494.34	-2130.89	8700	107	21	19	-9074.8	-1909.93	8700
18	4	17	-1677.05	1897.39	7500	63	14	15	-2929.99	-6927.68	9000	108	22	2	-9804.26	-6782.9	8700
19	4	19	-4991.73	-348.86	8100	64	14	17	-2016.47	4697.96	9000	109	22	3	-5643.97	162.34	9000
20	4	22	2300.57	454.14	6000	65	14	18	58.08	-3428.18	7800	110	22	4	-2300.57	-454.14	8700
21	5	3	42.09	2866.89	7500	66	15	19	-2401.16	9379.39	7800	111	22	6	-3064.42	-1921.26	9000
22	5	6	2621.64	783.29	8100	67	16	19	-1299.35	3498.47	6900	112	22	7	-3849.41	-7633.84	9000
23	5	19	-1606.24	1901.55	8400	68	17	1	4214.84	2414.02	7500	113	22	10	-4347.61	-8085.05	8700
24	7	2	-5954.85	850.94	9000	69	17	2	-5826.64	-8226.15	9000	114	22	15	-4891.14	-10182.39	8700
25	7	4	1548.84	7179.7	9000	70	17	4	1677.05	-1897.39	9000	115	22	16	-5992.95	-4301.47	8400
26	7	10	-498.2	-451.21	9000	71	17	8	1824.69	639.3	6900	116	22	17	-3977.62	1443.25	8700
27	7	11	-606.08	2248.24	8700	72	17	9	4921.88	-2752.49	5100	117	22	18	-1903.07	-6682.89	8700
28	7	15	-1041.73	-2548.55	9000	73	17	10	-369.99	-9528.3	9000	118	23	1	1220.51	8510.78	5700
29	7	17	-128.21	9077.09	9000	74	17	11	-477.87	-6828.85	8700	119	23	2	-8820.97	-2129.39	7200
30	7	18	1946.34	950.95	9000	75	17	13	6827.63	-2799.65	4800	120	23	4	-1317.28	4199.37	7200
31	8	1	2390.15	1774.72	6600	76	17	14	2016.47	-4697.96	7200	121	23	6	-2081.13	2732.25	7500
32	8	2	-7651.33	-8865.45	8100	77	17	15	-913.52	-11625.64	9000	122	23	7	-2866.12	-2980.33	7500
33	8	4	-147.64	-2536.69	8100	78	17	18	2074.55	-8126.14	9000	123	23	11	-3472.2	-732.09	8100
34	8	6	-911.49	-4003.81	8400	79	17	20	4677.88	-4952.67	6000	124	23	14	-977.86	1398.8	5400
35	8	7	-1696.48	-9716.39	8400	80	17	22	3977.62	-1443.25	7500	125	23	17	-2994.33	6096.76	7200
36	8	14	191.78	-5337.26	6300	81	17	23	2994.33	-6096.76	6300	126	23	18	-919.78	-2029.38	7200
37	8	17	-1824.69	-639.3	8100	82	18	1	2140.29	10540.16	7200	127	23	19	-6309.01	3850.51	7800
38	8	18	249.86	-8765.44	8100	83	18	2	-7901.19	-100.01	8700	128	23	22	983.29	4653.51	5700
39	8	19	-5139.37	-2885.55	8700	84	18	3	-3740.9	6845.23	9000						
40	8	22	2152.93	-2082.55	6600	85	18	4	-397.5	6228.75	8700						
41	9	3	-6588.23	1471.58	7800	86	18	6	-1161.35	4761.63	9000						
42	9	6	-4008.68	-612.02	8400	87	18	7	-1946.34	-950.95	9000						
43	9	7	-4793.67	-6324.6	8400	88	18	10	-2444.54	-1402.16	8700						
44	9	19	-8236.56	506.24	8700	89	18	14	-58.08	3428.18	6900						
45	10	6	1283.19	6163.79	7800	90	18	15	-2988.07	-3499.5	8700						

Taula H-10 Assignacions del desfasaments temporals per cada parella de pluviòmetres.

EXCEL; Estimacion.Lineal: $Z = A X + B Y + C$			
Fitted Parameters			
	A (s/m)	B (s/m)	C (s)
Parameter Value:	-0.1377651936112	-0.009486569189765	7556.5900371942
Programari: AjustAunPla; Sub CalculS(3) $t = kx X + ky Y + E$			
Paràmetres calculats.			
	kx (s/m)	ky (s/m)	E (s)
	-0.1377651936112	-0.009486569189765	7556.5900371942
Paràmetres calculats. Sub CalculS(5) $t = kx X + ky Y + 0$			
	kx (s/m)	ky (s/m)	E (s)
	-0.637857164816804	-0.148338833395894	0

Taula H-11 Mètodes de Correlacions. Comparativa de resultats dels paràmetres del pla entre els mètodes informatitzats i els manuals.

El càlcul fet a “ma” està realitzat amb el full de càlcul Excel(c) utilitzant la funció *ESTIMACION.LINEAL*(conocido_y, [conocido_x], [constante], [estadística]) L’anàlisi dels resultats calculats manualment i els que ens dona el nostre software (Taula H-11) torna a ser

coincident en el cas del càlcul de tots els paràmetres del pla [CalculS(3)] En obligar a fer passar el pla pel punt (0, 0, 0) [CalculS(5)] els valors ja no tenen res a veure. Aquesta discrepància també és esperada.

6.9. *Annex I*: Data, velocitat i direcció estimades de les pluges extremes registrades a Barcelona entre 1994 i 2019

Les pluges tenen un període de retorn major o igual a 1 any per alguna durada entre 5 minuts i 24 hores i per algun pluviòmetre. S'ha calculat la velocitat amb el mètode del Centroide i s'ha determinat en els 60 minuts més intensos.

Any	Mes	Dia	v (m/s)	direccio (°)
1994	9	29	8.73	331.6
1994	10	19	11.6	133.1
1995	8	7	22.45	329.8
1995	8	24	17	175.5
1995	9	21	8.37	284.7
1996	5	11	11.71	104.8
1996	8	7	56.12	50.5
1996	10	14	5.02	296.2
1997	1	28	6.02	266
1997	12	16	13.69	119.1
1998	9	25	10.57	108.8
1998	12	2	11.89	78.7
1999	9	14	40.27	30.5
1999	9	14	16.18	2.6
1999	9	15	34.88	328.6
1999	10	17	31.93	110.1
2001	1	15	7.32	100.3
2001	7	15	39.95	351.5
2001	8	30	6.24	52.9
2001	10	9	14.4	344.6
2002	7	31	12.76	308.4
2002	8	26	22.76	356.1
2002	10	8	17.09	353.5
2005	8	1	30.57	333.6
2005	9	6	21.78	342.2
2005	10	13	4.7	352.2
2005	10	14	3.62	161.3
2005	11	13	20.41	57.8
2006	1	29	20.89	45.7
2006	8	15	27.96	81.2
2006	9	12	15.24	167.1
2007	4	2	10.95	32.2
2007	10	8	24.41	284.9
2007	10	17	8.08	141.1
2007	10	26	2.57	313.1
2008	7	12	23.26	327.5
2008	10	17	14.01	270.6
2009	9	14	12.07	249.9
2009	10	22	18.31	41.4
2010	9	17	7.18	317.3

Any	Mes	Dia	v (m/s)	direccio (°)
2010	9	17	60.94	2.1
2010	10	10	10.56	134.4
2011	3	15	20.57	62.3
2011	4	28	40.98	271.6
2011	5	3	8.77	234.3
2011	7	14	10.99	134.6
2011	7	30	38.53	286.9
2011	11	2	2.2	110.1
2011	11	13	7.11	36.6
2012	4	4	12.12	4
2012	9	29	18.42	80.9
2013	7	18	27.52	36.3
2013	11	17	34.75	165.4
2014	4	3	11.68	70.7
2014	5	28	30.47	48.2
2014	7	28	42.5	324.7
2014	8	22	14.13	132.8
2014	9	28	8.59	12.7
2014	11	3	18.32	333.1
2014	11	26	12.76	343.4
2015	7	6	10.07	331.5
2015	9	10	18.62	98.4
2015	10	3	27.98	130.8
2015	11	2	29.25	10.7
2016	9	23	4.76	343
2016	10	6	52.45	359.1
2016	10	12	43.51	49.6
2016	10	13	21.8	112.5
2017	3	24	4.02	213.3
2017	8	31	37.07	58.6
2017	10	18	13.98	332.5
2018	1	26	22.56	52.7
2018	3	24	32.96	63.6
2018	5	1	6.15	106.8
2018	6	6	21.03	323.5

7. Bibliografía

- Arnbjerg-Nielsen, K., 2012. Quantification of climate change effects on extreme precipitation used for high resolution hydrologic design. *Urban Water Journal*, 9(2), pp. 57-65.
- Bara, M. et al., 2010. On the use of the simple scaling of heavy rainfall in a regional estimation of IDF curves in Slovakia. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 58(1), p. 49–63.
- Barnes, S. L., 1973. Mesoscale objective map analysis using weighted time-series observations. *NOAA technical memorandum ERL NSSL*, 60.
- Barnes, S. L., 1994. Applications of the Barnes objective analysis scheme. Part I: effects of undersampling, wave position, and station randomness.. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volum 11, pp. 1433-1448.
- Beguéría, S., 2002. *Revisión de métodos paramétricos para la estimación de la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos en Climatología e Hidrología: El uso de series de excedencias y su comparación con las series de máximos anuales*. Zaragoza: s.n.
- Benjoudi, H., Hubert, P., Schertzer, D. & Lovejoy, S., 1997. Multifractal point of view on rainfall intensity-duration-frequency curve. *C. R. Acad. Sci. Paris Earth Planet. Sci.*, Volum 325, pp. 323-326.
- Bretherton, C. et al., 1999. The Effective Number of Spatial Degrees of Freedom of a Time-Varying Field.. *Journal of Climate*, 12, pp. 1990-2009.
- Buonomo, E., Jones, R., Huntingford, C. & Hannaford, J., 2007. On the Robustness of Changes in Extreme Precipitation Over Europe From Two High Resolution Climate Change Simulations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volum 133, pp. 65-81.
- Burlando, P. & Rosso, R., 1996. Scaling and multiscaling models of deph-duration-frequency curves for storm precipitation. *Journal of Hydrology*, Volum 187, pp. 45-64.
- Carbone, M., Garofalo, G., Tomei, G. & Piro, P., 2014. *Storm tracking based on rain gauges for flooding control in urban areas..* s.l., s.n., pp. 256-265.
- Casas, M. C., 2005. Análisis espacial y temporal de las lluvias extremas en Catalunya. Modelización y clasificación objetiva. *CRAI - Publicacions i Edicions, Universitat de Barcelona*.
- Casas, M. C., Codina, B., Redaño, A. & Lorente, J., 2004. A methodology to classify extreme rainfall events in the western Mediterranean area.. *Theoretical and Applied Climatology*, Volum 77, pp. 139-150.
- Casas, M. C., Rodríguez, R. & Redaño, A., 2010. Analysis of extreme rainfall in Barcelona using a microscale rain gauge network. *Meteorological Applications*, Volum 17, p. 117–123.
- Christensen, J. & Christensen, O., 2003. Severe summertime flooding in Europe. *Nature*, 421: 805–806.. *Nature*, Volum 421, p. 805–806.
- Desramaut, N., 2008. *Estimation of intensity Duration Frequency Curves for Current and Future Climates*. Thesis of Master. Departament of Civil Engineering and Applied Mechanics ed. Montreal, Quebec, Canada: McGill University.
- Dirks, K., Stow, C., Hay, J. & Harris, D., 1998. High-resolution studies of rainfall on Norfolk Island: Part II: Interpolation of rainfall data. *Journal of Hydrology*, Volum 208, pp. 187-193.
- Diskin, M. H., 1987. On the determination of the speed of moving rainfall. *Hydrological Sciences Journal*, 32:1, 1-14.
- Eicher, C., 1991. Selection of design storms-time resolution considerations. *Atmospheric Research*, 27, pp. 23-43.

- Enjamio, C. et al., 2005. Experimental analysis of microscale rain cells and their dynamic evolution. *RADIO SCIENCE*, Volum 40.
- Fraedrich, K., Ziehmann, C. & Sielmann, F., 1995. Estimates of spatial degrees of freedom.. *Journal of Climate*, 8, pp. 361-369.
- Gajić-Čapka, M., 1990. Maximum Precipitation for different Short-Term Intervals. *Theoretical and Applied Climatology*, 41, pp. 33-39.
- Gajić-Čapka, M., 1991. Short-term Precipitation Maxima in Different Precipitation Climate Zones of Croatia, Yugoslavia. *International Journal of Climatology*, 11, pp. 677-687.
- Greenwood, J. A., Landwehr, J. M., Matalas, N. C. & Wallis, J. R., 1979. Probability weighted moments: Definition and relation to parameters of several distributions expressible in inverse form. *Water Resources Research*, 15(5), pp. 1049-1054.
- Gregersen, I. B., Madsen, H. & Arnbjerg-Nielsen, K., 2011. *Estimation of climate factors for future extreme rainfall: Comparing observations and RCM simulations*. Porto Alegre, Brazil, s.n.
- Guàrdia, E., Sesé, G., Padró, J. A. & Kalko, S. G., 1999. Molecular Dynamics simulation of Mg²⁺ and Ca²⁺ ions in water. *Journal of Solution Chemistry*, Volum 28, pp. 1113-1126.
- Gupta, V. K. & Waymire, E., 1990. Multiscaling properties of spatial rainfall and river flow distributions. *Journal of Geophysical Research*, 95(D3), pp. 1999-2009.
- Hertig, E. & Jacobeit, J., 2008. Assessments of Mediterranean precipitation changes for the 21st century using statistical downscaling techniques. *International Journal of Climatology*, Volum 8, pp. 1025-1045.
- Hosking, J. R. M., 1990. L-Moments: Analysis and Estimation of Distributions Using Linear Combinations of Order Statistics. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 52(1), pp. 105-124.
- Hosking, J. & Wallis, J., 1997. *Regional Frequency Analysis. An Approach Based on L-Moments*. s.l.:Cambridge University Press.
- Imbert, A. & Benestad, R., 2005. An improvement of analog model strategy for more reliable local climate change scenarios. *Theoretical and Applied Climatology*, Volum 82, pp. 245-255.
- IPCC, 2000. *Special Report Emission Scenarios*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- IPCC, 2007. *Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, University Press.
- IPCC, 2012. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker,. Cambridge, UK I New York, NY, USA, Cambridge University Press.
- Jolliffe, I., 2002. *Principal Component Analysis*, s.l.: Springer.
- Koch, S. E., desJardins, M. & Kocin, P. J., 1983. An Interactive Barnes Objective Map Analysis Scheme for Use with Satellite and Conventional Data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 22(9), pp. 1487-1503.
- Koutsoyiannis, D., Kozonis, D. & Manetas, A., 1998. A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *Journal of Hydrology*, Volum 206, pp. 118-135.
- Kruizinga, S. & Murphy, A., 1983. Use of an analogue procedure to formulate objective probabilistic temperature forecasts in the Netherlands. *Monthly Weather Review*, Volum 111, p. 2245–2254.

- Larsen, A. et al., 2009. Potential future increase in extreme one-hour precipitation events over Europe due to climate change. *Water Science and Technology*, Volum 60, pp. 2205-2216.
- Lo Conti, F., Noto, L. V., Quatrosi, A. & La Loggia, G., 2009. *Using high resolution raingauge data for storm tracking analysis in the urbana rea of Palermo, Italy..* St. Moritz, Suïssa., s.n.
- Lopez, M. & Gutierrez, M. L., 2019. Cómo realizar e interpretar un análisis factorial exploratorio utilizando SPSS. *Revista d'Innovació i Recerca en Educació*, 12(2), pp. 1-14.
- Lorente, J., Redaño, A. & ., 1991. Relation between maximal rainfall rates for different time intervals in the course of a storm. *Atmospheric Research*, Volum 27, pp. 61-66.
- Lorenz, E., 1956. Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction.. *Science Report 1, Statistical Forecasting Project, Department of Meteorology, MIT*, p. 49.
- Martin, E., Timbal, B. & Brun, E., 1997. Downscaling of general circulation model outputs simulation of the snow climatology of the French Alps and sensitivity to climate change. *Climate Dynamics*, Volum 13, pp. 45-56.
- Menabde, M., Seed, A. & Pegram, G., 1999. A simple scaling model for extreme rainfall. *Water Resources Research*, 35(1), pp. 335-339.
- Mikkelsen, P. S., Madsen, H., Arnbjerg-Nielsen, K. & Poul Harremoës, D. R., 2005. Selection of regional historical rainfall time series as input to urban drainage simulations at ungauged locations. *Atmospheric Research*, Volum 77, pp. 4-17.
- Nandakumar, N., Weinmann, P. E., Mein, R. G. & Nath, R., 2000. Estimation of spatial Dependence for the CRCFORGE Method.. *Hydro 2000: Interactive Hydrology; Proceedings. Barton, A.C.T.: Institution of Engineers, Australia*, pp. 553-557.
- Navarro, J. et al., 2019. *Análisis de seguimiento de chubascos en el área urbana de Barcelona utilizando una red pluviométrica de microescala..* Zaragoza, s.n.
- Nguyen, V. T., Nguyen, T. D. & Ashkar, F., 2002. Regional frequency analysis of extreme rainfalls. *Water Science and Technology*, 45(2), pp. 75-81.
- Nhat, L. M., Tachikawa, Y., Sayama, T. & Takaka, K., 2007. A simple scaling characteristic of rainfall in time and space to derive intensity duration frequency relationships. *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, Volum 51, pp. 73-78.
- Niemczynowicz, J., 1987. Storm tracking using rain gauge data. *Journal of Hydrology*, Volum 93, pp. 135-152.
- Niemczynowicz, J. & Bengtsson, L., 1996. What practitioners need from theoreticians?. *Atmospheric Research*, 42(1-4), pp. 5-17.
- North, G., Bell, T., Cahalan, R. & Moeng, F., 1982. Sampling errors in estimation of empirical orthogonal functions. *Monthly Weather Review*, p. 699-706.
- NRC, 1988. Estimating probabilities of extreme floods.. *National Academy Press, Washington, D.C. Methods and recommended research..*
- Ntegeka, V. & Willems, P., 2008. Trends and multidecadal oscillations in rainfall extremes, based on a more than 100 years time series of 10 min rainfall intensities at Uccle, Belgium. *Water Resources Research*, Volum 44, p. W07402.
- Olsson, J., Berggren, K., Olofsson, M. & Olofsson, M., 2009. Applying climate model precipitation scenarios for urban hydrological assessment: A case study in Kalmar City, Sweden. *Atmospheric Research*, Volum 92, pp. 364-375.

- Omolayo, A., 1993. On the transposition of areal reduction factors for rainfall frequency estimation. *Journal of Hydrology*, 145(1-2), pp. 191-205.
- Pérez, F. & Boscolo, R., 2010. *Clima en España: Pasado, presente y futuro. Informe de Evaluación del Cambio climático Regional*. s.l.:Red Temática CLIVAR-España.
- Pérez, N. et al., 2015. Analysis of extreme rainfall in the Ebre Observatory (Spain). *Theoretical and Applied Climatology*, 124(3-4), pp. 935-944.
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. & Flannery, B. P., 1992. *Numerical Recipes in Fortran 77. The Art of Scientific Computing*. s.l.:Cambridge University Press.
- Rakhecha, P. R., Deshpande, N. R. & Soman, M. K., 1992. Probable Maximum Precipitation for a 2-Day Duration over the Indian Peninsula.. *Theoretical and Applied Climatology*, Volum 45, pp. 277-283.
- Riba, C. & Satorra, A., 2000. *Mètodes Estadístics Aplicats a les Ciències Polítiques i de l'Administració. Anàlisi de Components Principals*. s.l., s.n.
- Ribalaygua, J. et al., 2013. Description and validation of a two-step analogue/regression downscaling method. *Theoretical and Applied Climatology*, Volum 114(1), pp. 253-269.
- Rodríguez, R., Casas, M. C., Navarro, X. & Redaño, A., 2017. A study of the scaling properties of rainfall in Spain and its appropriateness to generate intensity-duration-frequency curves from daily records. *International Journal of Climatology*, 37(2), pp. 770-780.
- Rodríguez, R., Navarro, X., Casas, M. C. & Redaño, A., 2013. Rainfall spatial organization and areal reduction factors in the metropolitan area of Barcelona (Spain). *Theoretical and Applied Climatology*, 114 (1-2): 1-8..
- Rodríguez, R. et al., 2014. Influence of climate change on IDF curves for the metropolitan area of Barcelona (Spain). *International Journal of Climatology*, Volum 34, p. 643-654.
- Shah, S., O'Connell, P. & Hosking, J., 1996. Modelling the effects of spatial variability in rainfall on catchment response. 1. Formulation and calibration of a stochastic rainfall field model. *Journal of Hydrology*, 175(1-4), pp. 67-88.
- Sillmann, J. et al., 2013. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections. *Journal of Geophysical Research*, Volum 118, p. 2473-2493.
- Sumner, G. N., 1978. The prediction of short duration storm rainfall intensity maxima. *Journal of Hydrology*, 37, pp. 91-100.
- Svensson, C. & Jones, D., 2010. Review of methods for deriving areal reduction factors. *Journal of Flood Risk Management*, Volum 3, pp. 232-245.
- U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE; WEATHER BUREAU, 1957. Rainfall Intensity - Frequency Regime. *WEATHER BUREAU*, p. TECHNICAL PAPER NO. 29.
- Unkašević, M., 1991. The Extreme Value Distribution of 5-min Rainfall Data at Belgrade.. *Theoretical and Applied Climatology*, 44, pp. 223-228.
- Upton, G., 2002. A correlation-regression method for tracking rainstorms using rain-gauge data.. *Journal of Hydrology*, 261 (1-4), pp. 60-73.
- Urcikán, P., Horváth, J. & ., 1984. Synthetic design storm and its relation to intensity-duration-frequency curves.. *Water Science & Technology*, Volum 16, pp. 69-83.
- Viedma, J., 1972. *Exposición intuitiva y problemas resuleltos de MÉTODOS ESTADÍSTICOS*. Madrid - España: Rdiciones del Castillo.

-
- Wang, X. & Shen, S. S., 1999. Estimation of Spatial Degrees of Freedom of a Climate Field. *Journal of Climate*, 11(5), pp. 1280-1291.
- Wilby, R. et al., 2004. The guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods. *Supporting material of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), pre-pared on behalf of Task Group on Data and Scenario Support for Impacts and Climate Analysis (TGICA)*.
- Willems, P., 2000. Compound intensity/duration/frequency-relationships of extreme precipitation for two seasons ant two storm types. *Journal of Hydrology*, 233, pp. 189-205.
- Willems, P., Arnbjerg-Nielsen, K., Olsson, J. & Nguyen, V., 2011. Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: Methods and shortcomings. *Atmospheric Research*, Volum 103, p. 106–118.
- Willems, P. & Vrac, M., 2011. Statistical precipitation downscaling for small-scale hydrological impact investigations of climate change. *Journal of Hydrology*, Volum 402, pp. 193-205.
- Wilson, J. et al., 1998. Nowcasting thunderstorms: a status report.. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, pp. 2079-2099.
- Zorita, E. & von Storch, H., 1999. The analog method as a simple statistical downscaling technique: comparison with more complicated methods. *Journal of Climate*, Volum 12, pp. 2474-2489.

8. Índex de taules, figures i imatges

8.1. Taules

<i>Taula 1-1 Els pluviòmetres d'intensitat de la xarxa metropolitana. A la columna PL N° indiquem l'índex associat des de l'inici del nostre treball. A la columna on mostrem el nom i la situació mostrem com aquesta nomenclatura numèrica ha canviat (P N°) A les dues últimes columnes indiquem la posició del pluviòmetre en coordenades UTM.</i>	10
<i>Taula 1-2 Mides dels fitxers de dades dels fitxers de bolcades i pels de volums de 5 minuts. La mida dels fitxers de volums de 5 minuts és dos ordres de magnitud més gran que la dels fitxers de bolcades.</i>	14
<i>Taula 1-3 Informacions rebudes per les Societats gestores dels pluviòmetres i els seus formats.</i>	14
<i>Taula 1-4 Tres primeres línies d'un fitxer de dades proporcionat per les societats BCASA i la transformació en dades preparades pels diferents càlculs.</i>	16
<i>Taula 1-5 Eliminació dels zeros de les taules amb les dades de cada 5 minuts originals.</i>	17
<i>Taula 1-6 Part d'un dels fitxers de sortida del programa FiltresPlujes.VBP. En aquests fitxers està compactada la informació del volums (dmm) de pluja recollits per tots i cada un dels pluviòmetres de la xarxa.</i>	22
<i>Taula 1-7 Número d'interval de 5 minuts que estan actius els pluviòmetres, identificats amb PL, pel període d'estudi de 1994 fins 2019.</i>	24
<i>Taula 1-8 Il·lustració del mètode per assignar les pluges per diferents intervals temporals (DT) d'estudi.</i>	28
<i>Taula 1-9 Contingut obtingut dels fitxers de pluja que proporciona el programa DetecioPluja.</i>	30
<i>Taula 1-10 Contingut obtingut dels fitxers d'histogrames que proporciona el programa DetecioPluja.</i>	31
<i>Taula 1-11 Contingut obtingut dels fitxers de probabilitats que proporciona el programa DetecioPluja.</i>	32
<i>Taula 1-12 Sèries de volums màxims anuals per dues estacions i dues durades diferents per cada estació de l'exemple.</i>	50
<i>Taula 1-13 Volums màxims ordenats de menor a major i agrupats segons les seves ocurrencies (H) Càlcul de les probabilitats per cada valor del volum $P[v < V]$.</i>	51
<i>Taula 1-14 Paràmetres estadístics per determinar els moments de probabilitat (b), els l-moments (λ) i els l-moments-ratio (τ) per les quatre estacions/durada de mostra.</i>	52
<i>Taula 1-15 Valor de les funcions de Gumbel i GEV associades a les quatre estacions/durada de la nostra mostra.</i>	52
<i>Taula 1-16 Valors de les precipitacions (mm) obtingudes a l'observatori Fabra amb les que (Casas, 2005) construeix les corbes IDF per la ciutat de Barcelona.</i>	58
<i>Taula 1-17 Valors de les precipitacions, en mm, obtingudes a la xarxa urbana de Barcelona amb les que hem construït les corbes IDF de màxims (Figura 1-15).</i>	65
<i>Taula 2-1 Mitjana i desviació estàndard de les components del vector ponderat fins la significació N_{80} dels vectors propis.</i>	79
<i>Taula 2-2 Coeficients de l'ajust quadràtic de les dades representades a la Figura 2-6.</i>	83
<i>Taula 2-3 Mitjana dels coeficients de variació (CV) respecte del nombre de pluviòmetres actius per les diferents duracions de la pluja.</i>	88
<i>Taula 2-4 Distribució dels pluviòmetres a les diferents zones per fer els càlculs de les ARF. Mostrem els radis de cada una de les zones. Les zones que no apareixen a la taula és que no tenen cap estació que estigui a les zones anteriors.</i>	90
<i>Taula 2-5 Amplituds (A_d) exponents (b_d) i coeficients de correlació (R^2) de les funcions potencials ajustades als punts experimentals de les ARF calculades. Mostrem la comparativa entre els valors obtinguts fins el 2009 i els actuals, amb dades fins el 2019.</i>	92
<i>Taula 3-1 Espais, en min km /h, que es calcularan en les pluges de disseny. Els valors ombrejats estan repetits.</i>	101
<i>Taula 3-2 Noms assignats als diferents mètode de càlcul de les velocitats de les pluges.</i>	102
<i>Taula 3-3 Exemple de dades originals de bolcades amb sensibilitat original, on una bolcada representa un volum d'1 dmm.</i>	114
<i>Taula 3-4 Instants de les bolcades parelles i bolcades senars on ara pensem que cada bolcada representen 2 dmm.</i>	114
<i>Taula 3-5 Resum de resultats pel S.R. a les pluges de disseny. Es pot observar una gran fiabilitat dels tres primers mètodes de càlcul.</i>	123
<i>Taula 3-6 Resum de resultats per les diferències de les velocitats programades i calculades a les pluges de disseny.</i>	123
<i>Taula 3-7 Resum de resultats per les diferències dels angles de propagació programats i calculats a les pluges de disseny.</i>	124
<i>Taula 3-8 Comparativa dels resultats de les velocitats assignades a la pluja del 17/1/1999 a les 23:05 aplicant el filtre temporal d'intensitat i utilitzant totes les dades proporcionades pels pluviòmetres.</i>	130
<i>Taula 3-9 Comparativa dels valor de les velocitats pel diferents mètodes de càlcul i pel diferents límits temporals estudiats en la pluja del 17 de gener de 1999 a les 23:05.</i>	132
<i>Taula 3-10 Nombre de pluges disponibles entre 1994 i 2019 i nombre de pluges amb S.R. < 0.85 obtingudes mitjançant tots els mètodes de càlcul de velocitats, suposant tota la durada de la pluja i 4 filtres de durada (45min, 60min, 90min, 125min).</i>	133

<i>Taula 3-11 Velocitat mitjana de pluges seleccionades amb $SR < 0.85$ i rang de velocitats entre els percentils 5 i 95.</i>	<i>139</i>
<i>Taula 3-12 Nombre de pluges segons la direcció obtinguda pels mètodes 0 i 1.</i>	<i>140</i>
<i>Taula 4-1 Models climàtics utilitzats. Es caracteritzen per tenir diferents resolucions espacials, des de 1.8° fins 3.7. Els diferents models utilitzen diferents calendaris anuals i també diferents escenaris d'actuació.</i>	<i>152</i>
<i>Taula 4-2 Estacions pluviomètriques de l'Agència Estatal de Meteorologia (AEMET) instal·lades a l'àrea metropolitana de Barcelona. Mostrem l'estació de la xarxa BCASA que tenen més a prop.</i>	<i>154</i>
<i>Taula 4-3 Factors de canvi climàtic cf per a la pluja diària esperada pel s. XXI amb període de retorn entre 1 i 500 anys, sota quatre escenaris climàtics.</i>	<i>159</i>
<i>Taula 4-4 Exponents d'escala trobats per a cada model i escenari climàtic considerats, pels dos darrers terços del s. XXI.</i>	<i>165</i>
<i>Taula 4-5 Factors de canvi climàtic per les precipitacions horàries estimades amb períodes de retorn entre 1 i 500 anys, pels dos darrers terços del s. XXI sota els quatre escenaris climàtics considerats.</i>	<i>166</i>

8.2. Figures

Figura 1-1 Representació cronològica de les informacions rebudes per les Societats gestores dels pluviòmetres i els seus formats: Bolcades i 5-minutals.....	15
Figura 1-2 Número d'anys efectius de treball de cada estació.	24
Figura 1-3 Representació dels volums recollits per un hipotètic pluviòmetre durant 200 minuts	25
Figura 1-4 Estudi de pluges per intervals de duració (DT) de les mateixes: de 5 minuts a la part superior en blau i de 10 minuts a la part inferior en vermell.	26
Figura 1-5 Representació de les probabilitats acumulades (FD) experimentals i les seves regressions mnp, pel pluviòmetre PL16 (FISI) i per una durada de les pluges d'una hora. (a) comparativa entre els valors experimentals (les creuetes) i la funció mnp associada (línia vermella continua) amb un càlcul a partir d'un valor de FD de 0.75. (b) en línia discontinua de color blau representem la funció mnp associada als punts experimentals a partir d'un valor de FD de 0.99	34
Figura 1-6 Valors de l'estadístic χ^2 per tots els ajustos fets a les pluges. De color taronja el valor mitja.	35
Figura 1-7 Representació de funcions potencials-exponencials per valors petits de m	36
Figura 1-8 Representació de funcions potencials-exponencials per valors no petits de m	36
Figura 1-9 Representació dels valors de m de les funcions potencial-exponencial mnp	37
Figura 1-10 Representació dels valors de n de les funcions potencial-exponencial mnp	37
Figura 1-11 Representació dels valors de p de les funcions potencial-exponencial mnp	38
Figura 1-12 Relació entre els valors dels paràmetres m i n	38
Figura 1-13 Relació entre els valors dels paràmetres m i p	39
Figura 1-14 Mètode per assignar les intensitats a les probabilitats	40
Figura 1-15 Valors màxims, mínims i mitjos de les IDF calculades amb el mètode de la funció mnp de totes les estacions estudiades.....	41
Figura 1-16 Representació de la probabilitat acumulada de la funció de Gumbel per un valor de origen de 15 i quatre valors de escala (a): 1, 5, 10 i 20.....	44
Figura 1-17 Representació de la probabilitat acumulada de la funció GEV per un valor d'origen de $\beta = 15$ [b a la llegenda] i diferents valors d'escala (α) i forma (κ) [a i k a la llegenda].....	46
Figura 1-18 Gràfica de l-moments. Es mostren tant les distribucions utilitzades pels valors extrems (GEV i Gumbel) com les d'excedents (GP i Exp) i la distribució normal.....	49
Figura 1-19 Representació dels valors de probabilitat acumulada per les quatre estacions/durada de la mostra. Els punts aïllats representen els valors obtinguts directament de les dades experimentals (Taula 1-13: $P[v < V]$) i en continu les respectives funcions de Gumbel i la GEV.....	53
Figura 1-20 Representació dels punts experimentals τ_3, τ_4 per poder fer comparacions amb les corbes teòriques de les funcions de probabilitat.....	54
Figura 1-21 Valors màxims, mínims i mitjos de les IDF calculades amb la distribució de Gumbel de tots els resultats de totes les estacions estudiades.....	55
Figura 1-22 Valors màxims, mínims i mitjos de les IDF calculades amb la distribució GEV de tots els resultats de totes les estacions estudiades.	56
Figura 1-23 Corbes IDF obtingudes per (Casas, 2005) amb les dades del pluviòmetre JARDI de l'observatori Fabra	57
Figura 1-24 Comparativa de resultats de les corbes IDF per l'estació AGTI i pels tres mètodes de càlcul	59
Figura 1-25 Comparativa de resultats de les corbes IDF per tots els pluviòmetres de la xarxa i pels tres mètodes de càlcul.....	60
Figura 1-26 Comparativa de resultats de les corbes IDF de Màxim, de Mitjanes i de Mínims per tots els pluviòmetres de la xarxa i pel mètode de càlcul de la funció mnp	62
Figura 1-27 Comparativa de resultats de les corbes IDF de Màxim, de Mitjanes i de Mínims per tots els pluviòmetres de la xarxa i pel mètode de càlcul de Gumbel	63
Figura 1-28 Comparativa de resultats de les corbes IDF de Màxim, de Mitjanes i de Mínims per tots els pluviòmetres de la xarxa i pel mètode de càlcul de la GEV.....	64
Figura 2-1 Número de pluges per les diferents duracions estudiades per fer les anàlisis PCA.....	71
Figura 2-2 Coeficient de correlació entre les dades dels pluviòmetres i i j , per cada durada.....	71
Figura 2-3 Significacions dels valors propis de la matriu de correlacions per diferents temps de duracions de les pluges.....	73
Figura 2-4 Representació del nombre de termes mínim per superar un límit de significació prefixat: N_p	74
Figura 2-5 Nombre efectiu de pluviòmetres n_{eq} equivalent a la xarxa	82
Figura 2-6 Relació entre el n_{eq} i el nombre de components principals que calen per superar el 70%, 80% i 90% de significació (N_{70} , N_{80} i N_{90}) de les dades dels pluviòmetres	83
Figura 2-7 Nombre d'episodis individuals de pluja analitzats per validació creuada en funció de la durada de la pluja triada.....	88
Figura 2-8 Mitjanes de les diferents duracions de les mitjanes dels coeficients CV.....	89

Figura 2-9 Comparativa dels coeficients de regressió (R^2) dels ajustos potencials a les dades de les ARF's experimentals.....	92
Figura 2-10 Comparativa dels exponents (b_a) dels ajustos potencials a les dades de les ARF's experimentals.....	93
Figura 2-11 Valors de les ARF de la regió metropolitana de Barcelona amb dades des de 1994 fins 2019 per durades de les pluges des de 5 fins 60 minuts. Presentem les dades discretes calculades per 10 i 55 minuts.	93
Figura 2-12 Valors de les ARF de la regió metropolitana de Barcelona amb dades des de 1994 fins 2019 per durades de les pluges des de 2 fins 240 hores. Presentem les dades discretes calculades per 4 i 120 hores.....	94
Figura 3-1 Representació de la forma de la pluja de disseny.....	96
Figura 3-2 Mètode per calcular el centroide temporal del pluviòmetre k	105
Figura 3-3 Mètode per calcular el primer màxim temporal del pluviòmetre k	106
Figura 3-4 Representació esquemàtica dels punts i del seu pla d'ajust.....	112
Figura 3-5 Model geomètric per determinar la velocitat.....	117
Figura 3-6 Punts de l'espai pels que la pluja es dona per un temps constant (t_0 i t_1).....	118
Figura 3-7 Temps de treball del sistema informàtic per generar tots els fitxers de les pluges de disseny i calcular les diferents velocitats. 2354 arxius 27614092 bytes.....	120
Figura 3-8 Nombre de pluges per mes. Mètode del centroide i 60 minuts més intensos.....	134
Figura 3-9 Velocitats de les pluges obtingudes per tots els mètodes per als 60 minuts més intensos.....	140
Figura 3-10 Velocitats de les pluges obtingudes mitjançant el mètode 0 per als 60 minuts més intensos.....	141
Figura 3-11 Nombre de pluges obtingudes mitjançant el mètode 0 (Centroide) per als 60 minuts més intensos classificades per quadrants i mesos.....	142
Figura 3-12 Nombre de pluges extremes de període de retorn igual o més gran que 1 any trobades per a cada mes de l'any.....	143
Figura 3-13 Nombre de pluges extremes de període de retorn igual o més gran que 1 any per a cada quadrant i segons l'estació de l'any. La numeració de l'eix horitzontal es refereix als.....	143
Figura 3-14 Velocitats de les pluges extremes de període de retorn igual o més gran que 1 any classificades per quadrants.....	144
Figura 3-15 Diagrama de vent corresponent a las pluges extremes de període de retorn igual o major que 1 any. Les velocitats estan calculades en km/h.....	144
Figura 3-16 Percentatges de pluges per quadrant. Considerant totes les pluges (esquerra), o bé només les pluges extremes de període de retorn 1 any o més (dreta).....	146
Figura 3-17 Direccions més freqüents de les pluges extremes de període de retorn 1 any o més.....	146
Figura 3-18 Velocitat mitjana de les pluges per quadrant. Considerant totes les pluges (esquerra), o bé només les pluges extremes de període de retorn 1 any o més (dreta).....	148
Figura 4-1 Variació relativa de la precipitació anual esperada a Barcelona al s. XXI comparada amb la del període 1971-2000. En gris, el resultat obtingut pel fragment 1980-2000 del període de control.....	157
Figura 4-2 Corba IF d'intensitat-freqüència per a 24 h de Barcelona (línia) i punts IF trobats pels períodes de control dels models climàtics considerats.....	158
Figura 4-3 Factor climàtic mitjà (línia continua) per a la precipitació diària, pel període 2000–2032 i escenaris A1B, A2, B1 i B2. La incertesa estadística causada per la variabilitat de la mostra es representa amb línies discontinües (68% i 95%).....	160
Figura 4-4 Factor climàtic mitjà (línia continua) per a la precipitació diària, pel període 2033–2065 i escenaris A1B, A2, B1 i B2. La incertesa estadística causada per la variabilitat de la mostra es representa amb línies discontinües (68% i 95%).....	161
Figura 4-5 Factor climàtic mitjà (línia continua) per a la precipitació diària, pel període 2066-2099 i escenaris A1B, A2, B1 i B2. La incertesa estadística causada per la variabilitat de la mostra es representa amb línies discontinües (68% i 95%).....	162
Figura 4-6 Moments estadístics obtinguts per les sèries futures simulades pel model BCN2 sota l'escenari A1B a Barcelona (2066-2099). La figura inserida mostra la funció d'escala lineal $K(q)$	164
Figura 4-7 Corbes IDF futures de Barcelona estimades durant el període 2066-2099, sota els escenaris A2 i B2 (línies contínues), comparades amb les IDF actuals (a traços).....	165
Figura 4-8 Factor climàtic mitjà (continuo) per a la precipitació horària, pel període 2000-2032 i escenaris A1B, A2, B1 i B2. La incertesa estadística causada per la variabilitat de la mostra es representa amb línies discontinües (68% i 95%).....	167
Figura 4-9 Factor climàtic mitjà (continuo) per a la precipitació horària, pel període 2033-2065 i escenaris A1B, A2, B1 i B2. La incertesa estadística causada per la variabilitat de la mostra es representa amb línies discontinües (68% i 95%).....	168
Figura 4-10 Factor climàtic mitjà (continuo) per a la precipitació horària, pel període 2066-2099 i escenaris A1B, A2, B1 i B2. La incertesa estadística causada per la variabilitat de la mostra es representa amb línies discontinües (68% i 95%).....	169

8.3. Imatges

<i>Imatge 1-1 Aspecte d'un dels pluviòmetres LAMBRECHT 15188 utilitzats a la xarxa urbana de Barcelona.....</i>	<i>8</i>
<i>Imatge 1-2 Seu de l'empresa CLABSA (esquerre) Dipòsit per recollir aigües pluvials del clavegueram a la ciutat de Barcelona (dreta).....</i>	<i>9</i>
<i>Imatge 1-3 Mapa de la zona de Barcelona amb la localització dels pluviòmetres subministrat per BCASA el 2008. BCASA ja utilitzava la nomenclatura (Pnn) per identificar-los.....</i>	<i>11</i>
<i>Imatge 1-4 Mapa (obtingut de la Diputació de Barcelona) dels municipis del Barcelonès i del Baix Llobregat. Amb dades pluviomètriques de l'Hospitalet, Esplugues de Llobregat, Sant Just Desvern i de la ciutat de Barcelona, disposariem de les informacions pluviomètriques d'una zona pràcticament rectangular.....</i>	<i>12</i>
<i>Imatge 1-5 Pantalla principal (operativa) per adaptar les dades de cada 5 minuts, proporcionades per les societats propietàries de la xarxa pluviomètrica, de forma que siguin operatives pels nostres estudis.....</i>	<i>17</i>
<i>Imatge 1-6 Pantalla principal (de treball) del programa FiltresPlujes.VBP Es pot seleccionar el període d'estudi de les diferents pluges (a la banda esquerra) i presentem esquemàticament els registres que tenim per un pluviòmetre (a la banda dreta).....</i>	<i>19</i>
<i>Imatge 1-7 Primera pantalla auxiliar del programa FiltresPlujes.VBP. Es mostren les informacions de tots els pluviòmetres de la xarxa.....</i>	<i>20</i>
<i>Imatge 1-8 Segona pantalla auxiliar del programa FiltresPlujes.VBP Els diferents colors associats als diferents pluviòmetres fan referència al volum de pluja recollit pels mateixos durant l'increment de temps que hem seleccionat a la pantalla principal (Imatge 1-6) La gradació de colors de dalt a baix indica el volum captat per cada pluviòmetre de més a menys; és una escala sense unitats i serveix per comparar les diferents dades d'un mateix episodi de pluja. El color blanc indica que no tenim dades d'aquest pluviòmetre.....</i>	<i>21</i>
<i>Imatge 1-9 Pantalla principal del programa DeteccioPluja.VBP. Aquest programa és l'encarregat d'establir quantes pluges hi ha en un període de temps, a partir de les informacions generades pel programa FiltresPlujes.VBP.....</i>	<i>23</i>
<i>Imatge 1-10 Pluviòmetres que han intervingut en la confecció de les corbes de "màxims" i de "mínims" La seva freqüència d'aparició està al costat de cada estació, amb el número que figura després de "Màx" o "mín".....</i>	<i>42</i>
<i>Imatge 1-11 Observatori Fabra. Camí de l'observatori, s/n 08035 Barcelona.....</i>	<i>57</i>
<i>Imatge 2-1 Programari utilitzat per estudiar les correlacions de Pearson entre les dades dels pluviòmetres. Donem com pluviòmetres "units" aquells que superin un límit prefixat en el valor de la correlació, així com aquells valors que estiguin per sobre del 97% del valor de la correlació màxima.....</i>	<i>69</i>
<i>Imatge 2-2 Unions primàries entre pluviòmetres segons els valors de les correlacions entre ells. Les línies vermelles entre dos pluviòmetres indiquen que la correlació entre les dades supera un valor Límit preestablert. El valor límit d'aquesta figura és de 0.7.....</i>	<i>70</i>
<i>Imatge 2-3 Representació de les sis primeres components principals per les pluges de 15 minuts de duració.....</i>	<i>77</i>
<i>Imatge 2-4 Representació de les components principals ponderades fins al 80% i normalitzades per les pluges de curta i mitja durada.....</i>	<i>78</i>
<i>Imatge 2-5 Representació de les components principals ponderades fins al 80% i normalitzades per les pluges de llarga durada.....</i>	<i>80</i>
<i>Imatge 2-6 Zona d'estudi per fer les diferents interpolacions i estudis espacials.....</i>	<i>85</i>
<i>Imatge 2-7 Les tres visualitzacions principals proporcionades pel programa Reixes.vbp. a) Valors dels volums recollits pels diferents pluviòmetres actius durant l'episodi de pluja estudiat. b) Valors del camp de pluges calculat amb el mètode d'interpolació de Barnes. c) Gradients del camp de pluges calculat.....</i>	<i>86</i>
<i>Imatge 2-8 Tres visualitzacions de la pluja ocorreguda el 1/10/2017 a les 10:00 per anàlisi de duració de les pluges (integració) de 10 minuts (a) 20 minuts (b) i 30 minuts (c).....</i>	<i>86</i>
<i>Imatge 2-9 Tres visualitzacions per temps consecutius de la pluja ocorreguda el 1/10/2017 per un temps d'integració de 5 minuts. Es pot observar l'evolució temporal (pel·lícula) de la pluja.....</i>	<i>87</i>
<i>Imatge 3-1 Zona de càlcul de les velocitats on veurem els efectes de la frontera als càlculs.....</i>	<i>96</i>
<i>Imatge 3-2 Coordenades per definir la diagonal de la pluja de disseny.....</i>	<i>97</i>
<i>Imatge 3-3 Definició dels paràmetres que defineixen el moviment de les pluges (coordenades polars).....</i>	<i>97</i>
<i>Imatge 3-4 Angles de treball definits per la zona de treball.....</i>	<i>98</i>
<i>Imatge 3-5 Les quatre situacions diferents per calcular el primer centre de la pluja.....</i>	<i>98</i>
<i>Imatge 3-6 Finestra principal del programa AjustAunPla.vbp que ens permet generar fitxers de pluges de disseny i calcular les velocitats en general dels diferents tipus de pluja, tan reals com dissenyats.....</i>	<i>99</i>
<i>Imatge 3-7 Càlcul de la velocitat utilitzant el mètode del centre de masses.....</i>	<i>104</i>
<i>Imatge 3-8 Entorn gràfic per visualitzar els resultats obtinguts per les pluges de disseny.....</i>	<i>121</i>
<i>Imatge 3-9 Resultats del S.R., la diferència entre el mòdul de la velocitat i l'angle programats i calculats.....</i>	<i>122</i>
<i>Imatge 3-10 Pantalla de resultats de velocitats per la pluja del 17/1/1999 a les 23:05.....</i>	<i>125</i>
<i>Imatge 3-11 Explicació gràfica de resultats a la pantalla de l'histograma cartesià. Hem pixelat els resultats amb una escala molt poc sensible per poder apreciar l'efecte que volem destacar.....</i>	<i>126</i>
<i>Imatge 3-12 Histograma de resultats de les velocitats obtingudes utilitzant coordenades cartesianes. Presentem les mitjanes estadístiques als dos requadres inferiors de la dreta.....</i>	<i>127</i>
<i>Imatge 3-13 Histograma de resultats de les velocitats obtingudes. Utilitzem coordenades polars.....</i>	<i>128</i>

<i>Imatge 3-14</i>	<i>Histograma de resultats de les velocitats obtingudes. Utilitzem una representació mixta, on la distància a l'origen representa la informació sobre el número d'esdeveniments ocorreguts (i de forma additiva) i l'angle de la representació és l'associat a l'angle de la velocitat de les coordenades polars; amb increments de 15°</i>	128
<i>Imatge 3-15</i>	<i>Pantalla de resultats de la pluja del 17/1/1999 a les 23:05 un cop aplicat els filtre temporal global de 125 minuts d'intensitat màxima</i>	130
<i>Imatge 3-16</i>	<i>Pantalles amb els histogrames de velocitats, per totes les pluges, aplicant el filtre de 125 minuts d'interval global. (a) Histograma cartesià (b) Histograma en coordenades polars (c) Histograma mixt.</i>	131
<i>Imatge 3-17</i>	<i>Histogrames de velocitats per totes les pluges i per tots els mètodes de càlcul aplicant el filtre de discriminació temporal d'intensitat individual a cada pluviòmetre de 45 minuts. (a) Histograma cartesià (b) Histograma en coordenades polars (c) Histograma mixt.</i>	135
<i>Imatge 3-18</i>	<i>Histogrames de velocitats per totes les pluges i per tots els mètodes de càlcul aplicant el filtre de discriminació temporal d'intensitat individual a cada pluviòmetre de 60 minuts. (a) Histograma cartesià (b) Histograma en coordenades polars (c) Histograma mixt.</i>	136
<i>Imatge 3-19</i>	<i>Histogrames de velocitats per totes les pluges i per tots els mètodes de càlcul aplicant el filtre de discriminació temporal d'intensitat individual a cada pluviòmetre de 90 minuts. (a) Histograma cartesià (b) Histograma en coordenades polars (c) Histograma mixt.</i>	137
<i>Imatge 3-20</i>	<i>Histogrames de velocitats per totes les pluges i per tots els mètodes de càlcul aplicant el filtre de discriminació temporal d'intensitat individual a cada pluviòmetre de 125 minuts. (a) Histograma cartesià (b) Histograma en coordenades polars (c) Histograma mixt.</i>	138
<i>Imatge 4-1</i>	<i>Estacions d'AEMET a Barcelona. 0200E correspon a l'Observatori Fabra</i>	153