



## MODELITZACIÓ GEOESTADÍSTICA DEL BALANÇ HÍDRIC A CATALUNYA

**Luís Outeiro<sup>1</sup>, Biel Barbe<sup>2</sup>, Francesc Asperó<sup>1</sup>, Xavier Úbeda<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>GRAM (Grup de Recerca Ambiental Mediterrània). Departament de Geografia Física. Universitat de Barcelona. Montalegre, 6, 08001 Barcelona. [louteiro@gmail.com](mailto:louteiro@gmail.com)

<sup>2</sup>Departament de Medi Ambient i Habitatge. Cos d'Agents Rurals. Finca Torreferrussa. Crta. Sabadell a Santa Perpètua de la Mogoda, km. 4.5 (Santa Perpètua de la Mogoda)

L'objectiu d'aquest treball és la generació d'una cartografia temàtica basada en la representació de la variable Balanç hídric, en tant que es tracta d'una variable necessària per a l'elaboració d'estudis hidrològics, però que ha estat poc o gens desenvolupada des de l'àmbit cartogràfic, o des de la pròpia modelització espacial. La xarxa agrometeorològica disposa d'unes 130 estacions meteorològiques amb registres de diferents variables meteorològiques distribuïdes arreu del Principat. Per a cada un dels 130 punts de la xarxa, disposem d'un càlcul del balanç hidrològic que, no obstant això, no és extensiu ni tampoc continu en tot l'espai. Aquest càlcul es basa en la diferència entre la Evapotranspiració-Penman-Monteith (mm) i la precipitació (mm). A nivell metodològic, ens hem fixat en les diferents possibilitats que les eines de modelització geoestadística permeten per produir mapes de balanç hídric amb el màxim grau de precisió, tot emprant variables secundàries que tinguin una correlació significativa amb la variable estudiada. Així hem trobat que l'altitud de les estacions, com a variable secundària, mostra una correlació satisfactòria amb la variable primària balanç hídric, amb un  $R^2$  d'entre 0,3 i 0,5 de la regressió lineal.

Paraules clau: Xarxa agrometeorològica, evapotranspiració, precipitació.

### 1. Introducció

En els últims 30 anys s'han centrat grans esforços en l'estudi de la definició de les variables ambientals i la seva variabilitat a l'àmbit mediterrani (Martín Vide, 1985; Guijarro, 2002; Saladié, 2003). No obstant això, el nostre territori presenta intrínsecament una gran variabilitat, la qual cosa fa difícil i erràtic l'estudi amb mètodes determinístics.

Així mateix, nombrosos treballs s'han adreçat als estudis de representació de variables climàtiques a Catalunya (Pérez, 1981; Sanz, 1982; Gázquez, 1986; ICC, 1996).

Tot i els esforços, les mancances tecnològiques i de mitjans han estat un problema a l'hora d'aconseguir uns resultats òptims i acurats. Això tampoc és un problema exclusiu de l'àmbit territorial català, es tracta d'un problema compartit amb altres territoris de l'àmbit mediterrani (Etchevers et al., 2001; Mölders et al, 2003). De fet, tot just ara els organismes encarregats de crear xarxes de mesura de variables ambientals comencen a implementar xarxes de mostreig i mesura prou denses i precises.

La necessitat d'iniciar aquest procés ve motivat per diverses raons. Des d'un punt de vista geogràfic, es vol fer una quantificació de les variables ambientals i la seva distribució espacial. D'altra banda, es pretenen ampliar les sèries de dades amb l'actual xarxa d'estacions de monitorització a fi d'entendre els processos desencadenants a

causa d'un escalfament global. La sequera omnipresent ens obliga, als geògrafs, a fer servir tot el nostre potencial i coneixement al servei de la comunitat per donar resposta a desequilibris entre territoris a Catalunya. L'aigua, el seu balanç intranual i la seva distribució són àrees que, tot i que s'han començat a estudiar, encara tenen llacunes pel que fa a la seva representació cartogràfica. No es tracta d'un problema que es resolgui fàcilment. La complexitat ambiental és un fenomen general arreu del planeta i a vegades la falta de recursos econòmics i la gran heterogeneïtat topogràfica, microclimàtica i d'usos del sòl són els causants d'aquesta complexitat.

Malgrat aquestes afirmacions, vivim un moment de gran explosió de les metodologies en la modelització cartogràfica per tal de resoldre o minimitzar aquestes limitacions amb noves tècniques. Les metodologies geoestadístiques i les diferents branques de la simulació estocàstica obren noves portes a la representació cartogràfica de variables ambientals.

Fent un repàs dels treballs de representacions cartogràfiques a Catalunya, ens adonem de la manca d'estudis sobre balanç hídric. El balanç hídric és important ja que conjuga en un sol valor diferents tipus de variables ambientals (veure metodologia). A més a més, ens satisfà la necessitat de veure representat en una sola imatge allò que a priori hauríem de veure en quatre o cinc mapes de diferents variables; per tant, ens proveeix una imatge clarificadora dels dèficits i superàvits hídrics del territori.

El nostres objectius es resumeixen en: 1) estudi de sèries completes de dades sobre balanç hidrològic, 2) la modelització de la variable amb mètodes deterministes, concretament amb semivariograma, 3) la producció cartogràfica d'aquesta variable amb una interpolació de tipus kriging i amb simulació estocàstica.

Una de les hipòtesis que volem llançar és la utilització satisfactòria o no satisfactòria de variables auxiliars / secundàries per a la millora de la precisió en la representació del balanç hídric. En aquest estudi utilitzarem l'altitud sobre el nivell del mar de les estacions de la xarxa com a possible variable secundària, pel fet que el càlcul de l'evapotranspiració emprat per calcular el balanç hídric utilitza l'altitud com a variable de l'algoritme.

## 2. Metodologia

Les dades que hem utilitzat per aquest estudi provenen de la Xarxa Agrometeorològica de Catalunya. Aquesta xarxa disposa de dades al territori català des de 1989. Malgrat tenir una llarga sèrie d'anys no totes les estacions presents avui al territori disposen de mesures per a tots els anys, de manera que vàrem haver d'escollir els anys hidrològics en funció de la major disponibilitat possible.

El càlcul del balanç hídric emprat per part de la Xarxa Agrometeorològica és el següent:

$$B_h = Eto(mm) - precipitació(mm)$$

Essent *Eto* l'evapotranspiració neta calculada pel mètode Penman-Monteith segons la FAO.

$$ETo(mm) = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{37}{Ta} dh\_VV_2 dif\_pv}{\Delta + \gamma(1 + 0.34dh\_VV_2)}$$

On  $Ta = dh\_temp + 273$ ,

$dh\_temp$  és la temperatura horària, en °C

$dh\_VV_2$ , velocitat del vent horària a 2 metres d'alçada, en m/s.

$\Delta$  és la variació de pressió de vapor saturant

$Rn$  és la radiació neta

$G$  és la transmissió de calor al terra

$\gamma$  és la constant psicromètrica (aquesta és funció de l'altitud en metres)

$dif\_pv = P\_vapor\_sat - P\_vapor$

## 2.0 Modelització geostatística

En el procés previ tant d'interpolació amb kriging ordinari com de simulació estocàstica, és necessari la modelització amb semivariograma mitjançant el següent algoritme:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum [(z_i) - (z_i + h)]^2$$

on  $h$  és l'interval de distàncies entre parells de punts,  $z_i$  és el valor mesurat de la mostra al punt  $i$ ;  $z_i+h$  és el valor del punt mesurat distanciat del seu veí més pròxim per la distància  $i+h$ ; i  $N(h)$  és el nombre total de parelles de punts en un interval de distància  $h$ . De tots els model disponibles, el gaussià ens ha donat un resultat òptim a l'hora de modelitzar tant els semivariogrames com els semivariogrames creuats de balanç hídric i altitud. El model gaussià s'expressa mitjançant aquesta equació:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{h^2}{a^2}\right) \right]$$

On  $C_0$  és la variància de l'efecte palleta (nugget variance),  $C_1$  és l'abast,  $a$  és el llindar i  $h$  és la distància mínima entre dos parelles de punts.

## 2.1 Interpolació amb kriging ordinari (KO)

El KO és amb diferència el tipus de mètode interpolatiu més comú i assumeix (1) que la mitjana és constant i desconeguda (Webster i Oliver, 2001), (2) el semivariogram teòric és conegut, i (3) la suma dels pesos,  $\lambda_i$ , està limitada per un valor igual a 1. Els pesos òptims,  $\lambda_i$ , són funció de l'estructura de correlació espacial (Burrough i McDonnell, 1998). Així, per a un espai dividit en  $n$  blocs ( $B$ ), l'estimació de  $Z$  per al bloc  $B_j$  ve donada per:

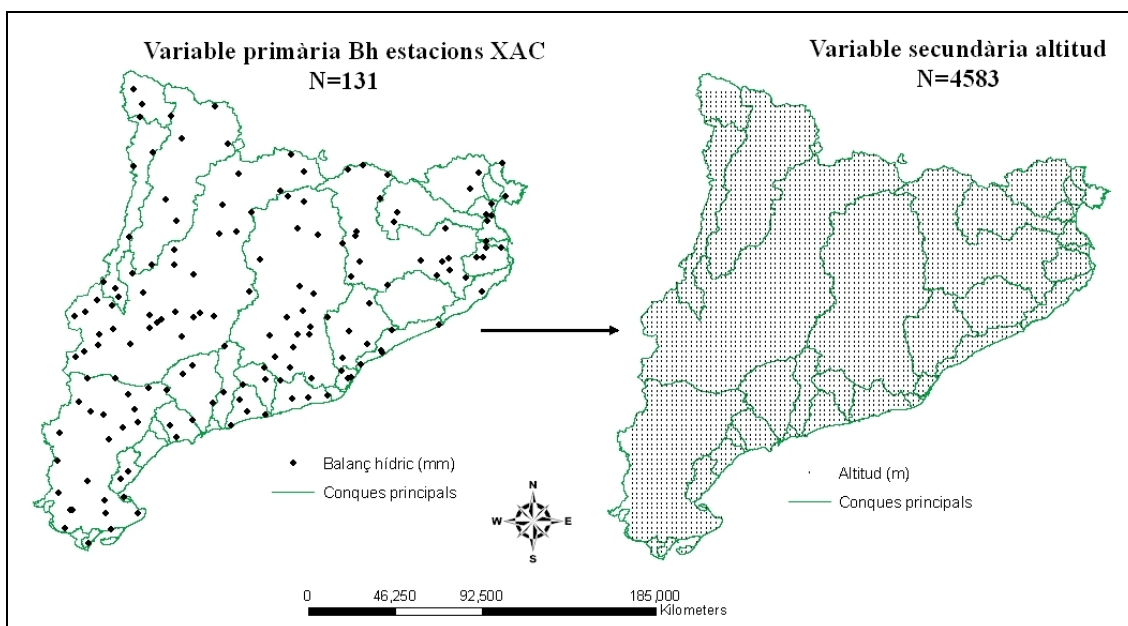
$$Z(B_j) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$

On  $Z(x_i)$  són els valors mesurats allà on tenim les estacions de la XAC i  $Z(B_1)$  és l'òptim i l'estimació no esbiaixada del balanç hídric dins d'un bloc determinat. KO també prova diferents combinacions per radi de cerca ( $x$  m) i la designació del veí més proper per produir la interpolació òptima.

## 2.2 Cokriging

El mètode interpolatiu per cokriging ens capacita l'interpolació dels valors de balanç hídric a partir d'una segona variable més densament mostrejada, l'altitud (Veure mapa 1). Aquesta segona variable, o variable auxiliar, la tenim mostrejada en els punts on tenim valors de balanç hídric com a altres punts que estan entre mig i dels que no tenim valors de balanç hídric. El cokriging utilitza les dades de modelització del semivariograma de la variable primària (Bh), del semivariograma i la covariància de totes dues variables. Això dona més fiabilitat a les prediccions de la variable primària en el cas que totes dues variables covariïn satisfactòriament, és a dir, mostrin una certa relació lineal. Aquest algoritme presenta un gran interès perquè ens permet estimar valors de la variable que a priori té un cost o una dificultat tècnica afegida a partir d'una variable que covaria amb la primera i que no representa tanta dificultat per rebre un mostreig.

**Figura 1. Localització dels punts de les estacions XAC i malla de punts utilitzada com a variable secundària.**



## 2.3 Simulació estocàstica

L'algoritme de simulació emprat és el de la simulació seqüencial condicionada del GSlib (Deutsch i Journel, 1998). Aquest tipus de simulació té la capacitat de tenir en compte variables secundàries-auxiliars, que poden tenir algun tipus de relació amb la variable principal que volem representar cartogràficament (balanç hídric). Mitjançant la modelització i l'ajust del semivariograma empíric al teòric i de la modelització de la funció de distribució condicional acumulativa, fent servir també el comportament que

aquesta variable té en la seva autocorrelació espacial. El fet interessant d'aquest algoritme rau en què aquesta segona variable està més densament mesurada, de manera que farem servir aquesta informació per simular el balanç hídric a aquells punts on no disposem d'estacions de la XAC.

El software utilitzat per a la modelització espacial ha estat el GS+ v7.0 (Gamma software Inc).

### 3. Resultats i discussió

A priori podríem pensar que el balanç hídric pot tenir una certa continuïtat espacial només trencada per factors físics o topogràfics. Això es podria analitzar en funció dels resultats observats en les regressions lineals i també amb el tipus i forma del semivariograma teòric ajustat. Els resultats de les regressions són moderament òptims pels nostres objectius i també de cara a acomplir la hipòtesi plantejada. Així trobem a l'any hidrològic 2005-06 un  $R^2 = 0.3$  i a l'any hidrològic 2006-07 un  $R^2 = 0.55$ .

La dificultat de la modelització espacial radica primer en la baixa densitat d'estacions que siguin òptimes per a la seva modelització, de manera que tenim grans buits espacials entre estacions a l'hora de generar un mapa de la variable en continu. En segon lloc, existeix la dificultat de trobar-nos en un territori amb una gran variabilitat ambiental i de contrastos. Aquest fenomen determina que fan que les dades experimentals presentin errors, especialment si ens referim al anys hidrològics estudiats, 2005-06 i 2006-2007.

La resolució espacial obtinguda és de 2,6 km<sup>2</sup>, amb una generació de tots 3 models al voltant dels 4583 píxels arreu el territori. Val a dir que amb aquestes premisses, la modelització esdevé una tasca difícil en tenir molt poques estacions espaiades amb aquesta mínima distància de píxel i en tenir alhora un total de 134 (2005-06) i 131 (2006-07) píxels reals, que representen les mesures preses a les estacions de la XAC. Tot i així, pensem que podem ser optimistes ja que els resultats assolits donen signes força precisos en tots els models emprats tant a nivell interpolatiu com a nivell de simulació estocàstica.

#### 3.1 Balanç hidrològic 2005-2006

El model gaussià ha estat el més eficient en el procés de modelització dels valors empírics als teòrics de les variables balanç hídric i altitud i s'ha obtingut un  $R^2$  en la validació creuada de 0.42.

Pel que fa als resultats obtinguts als tres models utilitzats podríem dir que els més satisfactoris han estat els models de simulació seqüencial condicional i el cokriging. Tots dos mostren uns valors d'incertesa (SDm) generada pel model que no arriba l'1 (Taula 1). La raó per la qual els models assoleixen un grau d'incertesa més baix és la utilització de la variable auxiliar altitud a 4583 punts, que fan incrementar la densitat del mostreig. El resultat generat pel kriging ordinari mostra valors d'incertesa força elevats pel fet que no utilitza per a la interpolació cap valor secundari tal com fan els altres dos models. Als mapes dels tres models també podem observar com el KO tendeix a suavitzar la variabilitat, mentre que els altres tendeixen a marcar la variabilitat que representa la rugositat real del terreny. Amb una ullada ràpida al mapa del balanç hídric,

podríem observar com tots tres models mostren els valors màxims (200-300mm) a les capçaleres de les conques de la Noguera Pallaresa i Ribagorçana, Besós i Fluvià, i de manera més general a les del Segre, Ter i Llobregat. Pel que fa als dèficits en el balanç hídric, la major part se situen a la conca del Segre, la part catalana de l'Ebre i el tram central del Llobregat.

**Taula 1. Paràmetres estadístics dels resultats obtinguts en la modelització del balanç hídric (mm)**

	Any hidrològic	N	Mitjana	SD	Min	Max	CV	SDm
Mesurats	2005-06	131	-188.1	326.4	-737.6	1105.7	-1.7	
Kriging ordinari	2005-06	8836	-95.8	185.6	-719.7	978.1	-1.9	77.8
Cokriging	2005-06	8836	-85.5	228.4	-730.8	1047.5	-2.7	0.8
Simulació	2005-06	8836	-86.8	250.2	-1038.0	1105.7	-2.9	0.0
Mesurats	2006-07	131	-370.9	264.4	-769.8	694.8	-0.7	
Kriging ordinari	2006-07	8836	-176.7	229.8	-671.9	505.2	-1.3	29.7
Cokriging	2006-07	8836	-177.7	246.6	-764.7	625.3	-1.4	29.0
Simulació	2006-07	8836	-175.5	270.5	-1106.3	819.9	-1.5	0.0

La desviació estàndard (SD) dels models per a l'any hidrològic 2005-06 és més baixa que la mesurada. Com a contrapunt tenim un coeficient de variació (CV) més elevat als models que a les mesurades, fent referència a la més alta variabilitat també observada als mapes (Figura 2 i 3). La simulació presenta els valors de dispersió i de variabilitat més alts pels tres models.

### 3.2 Balanç hídric 2006-07

S'observen diferències significatives entre la mitjana dels valors mesurats i la mitjana dels models. Aquest fet es deu a la inèrcia arrossegada de l'any anterior en termes de valors de balanç hídric negatiu que fan caure encara més els valors observats a les estacions. Les mitjanes dels models són més moderades a causa que el nombre de punts és més alt i també per tenir en compte els paràmetres de variació espacial modelats amb el semivariograma. Aquest fet també dóna coeficients de variació més elevats. Pel que fa a la incertesa generada pel model (SDm) tenim valors moderadament baixos als models de kriging ordinari i cokriging, i inexistents al model de simulació. Aquest fet es produeix perquè el model de simulació és molt més fidel a la variabilitat de la variable secundària, i el kriging primari i cokring tenen més en compte la variabilitat conjunta del balanç hídric i de l'altitud.

Els valors negatius ocupen les  $\frac{3}{4}$  parts del territori, on gairebé el 100% de les conques de l'Ebre, Segre, Llobregat, rieres de Tarragona i Barcelona, Gaià, Foix i Francolí presenten valors per sota dels -100mm. Els trams baixos de les Nogueres, tram central del Ter, Tordera i Muga presenten valors per sota dels -300mm. En aquest any hidrològic el balanç hídric positiu es redueix a les capçaleres de les Nogueres, Garona, Segre i de manera menys extensa a les capçaleres del Llobregat, Ter i Fluvià.

Es fa necessària una comparació entre els dos anys hidrològics a nivell de les dades espacials generades, ja que s'observa una progressiva entrada dels valors negatius per sobre dels -200 cap el terç nord-est del país, de manera més acusada als trams mitjns i baixos de les capçaleres i de les rieres litorals.

Malgrat que el nivell de correlació entre altitud i balanç hídric no ha estat tan satisfactori com havíem esperat, la hipòtesi que plantejàvem al principi del treball ha



estat resolta satisfactòriament. Això és així a causa que la resolució dels mapes del balanç hídric amb mètodes d'estimació i simulació utilitza com a variable secundària l'altitud, minimitzant la incertesa.

Figura 2. Mapes del balanç hídric a les conques de Catalunya per l'any hidrològic 2005-06

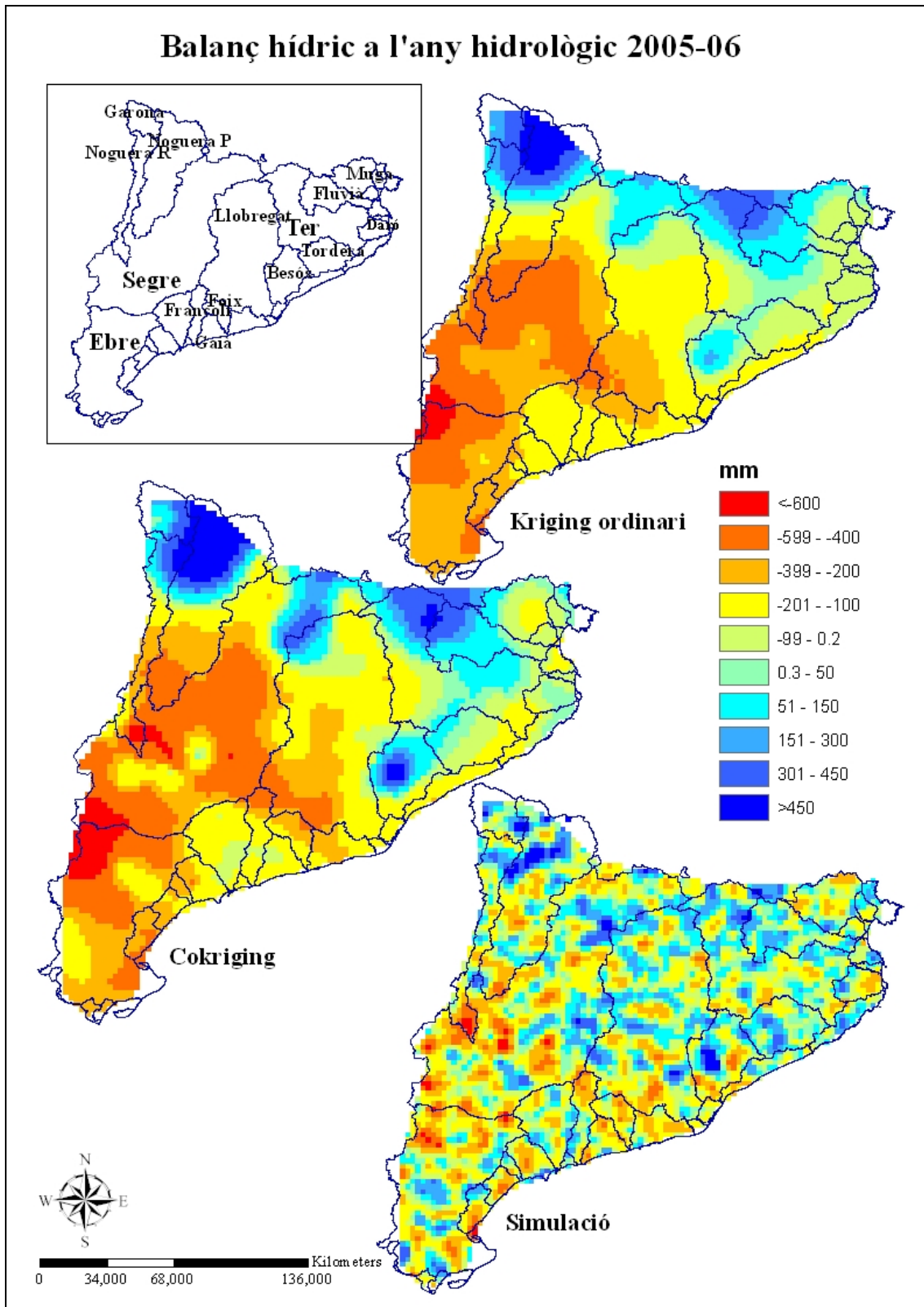
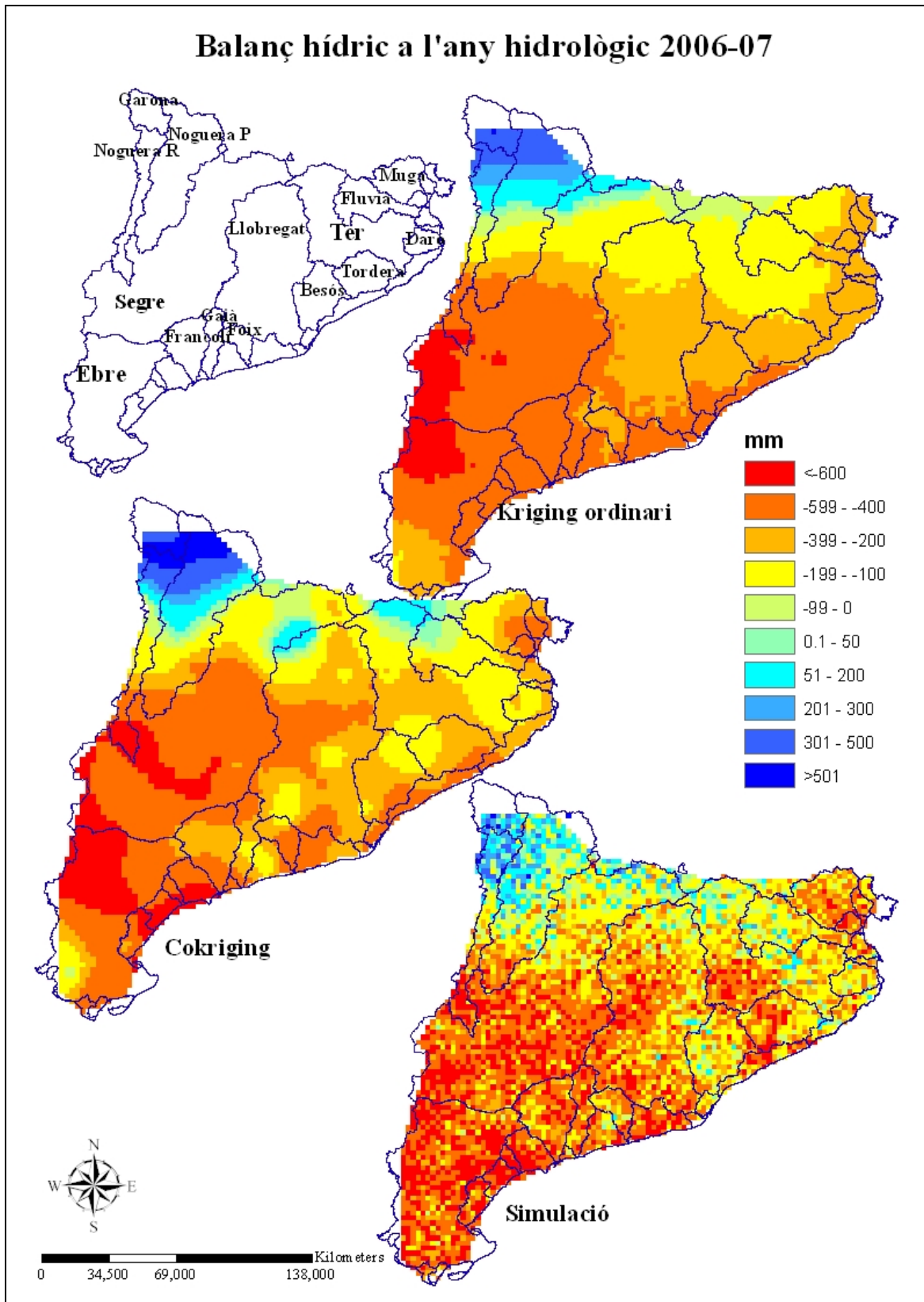




Figura 3. Mapes del balanç hídric a les conques de Catalunya per l'any hidrològic 2006-07







#### 4. Conclusions

Hem modelat i representat satisfactòriament la variable balanç hídric, i hem obtingut una cartografia amb una resolució espacial molt elevada com no s'havia aconseguit abans.

La cartografia del balanç hídric en temps real i amb les excepcionalitats climàtiques que s'aproximen, esdevenen bàsiques a l'hora de prendre decisions sobre la planificació i gestió de les conques hidrogràfiques.

El mètode de representació amb simulació seqüencial condicional tenir en compte la rugositat del terreny com a variable secundària, evita el procés de suavització espacial i marca més les àrees amb probabilitats de patir valors extrems. Aquest ha estat el model més fidel a la realitat dels tres generats, tant pel que fa a la incertesa del propi model com dels paràmetres estadístics estudiats.

Tot i que aquesta primera experimentació amb la modelització del balanç hídric i amb la variable secundària altitud ha estat satisfactòria, no ens podem oblidar de la necessitat d'incloure en futures investigacions altres tipus de variables ambientals (usos del sòl) que estiguin relacionades amb el balanç hídric per tal de millora la precisió en els models d'estimació i simulació espacial.

#### 5. Agraïments

Agraïm especialment a la Xarxa Agrometeorològica de Catalunya per disponibilitzar les dades de Balanç hídric, i també al programa de Formació del Professorat Universitari del Ministeri d'Educació i Ciència per la beca que el primer autor ha disposat durant la realització d'aquest treball.

#### 6. Referències

- BURROUGH, P.A i MCDONNELL, R.A. 1998. *Principals of Geographical Information Systems*. Oxford University Press. Nova York.
- DEUTSCH, C.V. i JOURNAL A.G. GSLIB. 1998. *Geostatistical Software Library and User's Guide*. Oxford University Press. Nova York, NY 369pp.
- ETCHEVERS, P.; GOLAZ, G. ; HABETS, F. 2001. "Simulation of the water budget and the river flows of the Rhone basin from 1981 to 1994". *Journal of Hydrology*. Volum: 244 Número 1-2: 60-85.'
- GUIJARRO, J.A. 2002. *Tendencias de la precipitación en el litoral mediterráneo español*. III Congreso de la Asociación Española de Climatología 3: 237 – 246. Palma de Mallorca.
- GÁZQUEZ, A. 1986. *Estudio termopluviométrico y balance hídrico de la zona Besós-Tordera*. Tesi de llicenciatura. Director: Pedro L. Clavero Paricio. Universitat de Barcelona.
- INSTITUT CARTOGRÀFIC DE CATALUNYA. 1996. *Atles climàtic de Catalunya*. Departament de Política Territorial i Obres Públiques. Departament de Medi Ambient. Generalitat de Catalunya. Barcelona.
- MARTÍN VIDE, J. 1985. *Plugues i inundacions a la Mediterrània*. Ed. Ketres. Barcelona



- PÉREZ, M. 1981. *Estudio termopluiométrico y balance hídrico de las cuencas de los ríos Fluvià y Muga*. Tesi de Llicenciatura. Universitat de Barcelona.
- MÖLDERS, N.; HAFERKORN, U.; DÖRING, J.; KRAMM, G. 2003. “Long-term investigations on the water budget quantities predicted by the hydro-thermodynamic soil vegetation scheme (HTSVS). Part II: Evaluation, sensitivity, and uncertainty”. *Meteorology and atmospheric physics*. Volum: 84 Número 1-2: 137-156.
- OLCINA, J. 2001. “Causas de las sequías en España. Aspectos climáticos y geográficos de un fenomen natural.” A: GIL, A.; MORALES, A. *Causas y consecuencias de las sequías en España*, 49-110.
- SALADIÉ, O. 2003. *Variaciones y tendencia secular de la precipitación en el sector nororiental de la Península Ibérica (1985-2000)*. Tesi doctoral: Diego López Bonillo (URV). Tutora: Montserrat Jardí Porqueras. Departament de Geografia Física i Anàlisi Geogràfica Regional de la Universitat de Barcelona.
- SANZ, C. 1982. *Estudio termopluiométrico y balance hídrico de la cuenca del río Segre*. Tesi de Llicenciatura. Director: Pedro L. Clavero Paricio. Universitat de Barcelona.
- WEBSTER, R. i OLIVER, M.A. 2001. *Geostatistics for Environmental Scientists*. John Wiley & Sons. Chichester.

<<http://xarxes.meteocat.com>> Xarxa Agrometeorològica de Catalunya  
Darrera visita 30/04/2008