

Caracterització dels recursos hídrics mitjançant eines de modelització: impactes del canvi climàtic i d'altres processos antròpics.

Pere Quintana Seguí i Anais Barella Ortiz

Observatori de l'Ebre (URL – CSIC), Horta Alta 38, Roquetes (Baix Ebre).

pquintana@obsebre.es, 977 500 511

L'aigua és un recurs necessari per viure, produir el nostre aliment i fer funcionar la nostra economia, però també és un risc important (sequeres, inundacions). Degut a les característiques del cicle de l'aigua Mediterrani i a les necessitats de la nostra societat, la gestió de l'aigua al nostre territori és complexa i requereix d'informació adequada per monitoritzar els hidrosistemes i per planificar el futur, en un context de canvi climàtic. Afortunadament disposem d'eines adequades per abordar aquestes necessitats, des d'una extensa xarxa d'observació, fins a models, passant per la teledetecció espacial. Actualment, estem progressant molt ràpidament en la combinació de models i dades remotes per a una millor descripció i comprensió del cicle de l'aigua continental, tenint en compte les activitats humanes, com ara la irrigació. L'Observatori de l'Ebre (URL – CSIC) participa en aquest esforç desenvolupant un model hidrològic físic i distribuït per a Ibèria, SASER, i aplicant-lo a l'estudi de la sequera (projecte HUMID) i a l'estudi dels recursos hídrics del Pirineu, tant en el passat, com en el futur (projecte PIRAGUA).

El cicle de l'aigua continental a la Mediterrània

Els humans tenim una relació doble amb l'aigua. Per un cantó, l'aigua és un recurs necessari per viure: la bevem, la utilitzem en l'agricultura per produir el nostre aliment i, finalment, és necessària per a un gran nombre de processos industrials. Sense aigua, res no seria possible. Al mateix temps, però, l'aigua és un important risc: les precipitacions intenses i les inundacions, que poden ser sobtades i molt destructives, fan malbé els nostres camps i inunden ciutats i zones industrials, provocant grans danys econòmics. És per aquesta raó que la gestió de l'aigua com a recurs i la gestió dels riscos hidrològics han estat sempre prioritaris per a la societat, des de l'antiguitat, fins ara.

A la Mediterrània, la gestió de l'aigua es fa difícil degut a la gran variabilitat del cicle hidrològic continental. Aquest és variable tant en l'espai com en el temps. Aquesta variabilitat es mostra al llarg de l'any, ja que tenim un règim amb dos pics de precipitació, un a la primavera i un altre a la tardor, i un llarg període força sec, l'estiu. També hi ha una gran variabilitat interanual, que implica que alguns anys poden ser molt secs i d'altres anys molt humits. A nivell espacial la distribució de la precipitació també és molt variable, al nostre territori hi trobem zones amb grans cúmuls de precipitació anual,

com per exemple els més 2000 mm anuals que podem registrar algunes zones del Pirineu, fins als 200 mm anuals que s'enregistren a les zones més àrides de la conca de l'Ebre. A tot això, hi hem de sumar el gran nombre de sistemes precipitants de meso-escala, difícils de preveure i que poden causar precipitacions molt intenses i molt localitzades, causants d'inundacions ràpides a barrancs i conques petites.

Aquesta gran variabilitat temporal i espacial de la precipitació és la causa de l'extensiva infraestructura hidràulica que s'utilitza per transportar aigua de les zones on es genera més escorrentia (les àrees de més relleu), cap a les zones on l'aigua es consumeix (les planes agrícoles i les ciutats). També es fa servir per a emmagatzemar aigua, durant la tardor i l'hivern, i ser consumida quan la necessita l'agricultura, a la primavera i l'estiu. La nostra xarxa d'embassaments i canals és extensa i complexa i requereix un alt nivell de tecnificació per a la seva bona gestió.

Canvi climàtic i d'altres impactes antròpics en el cicle de l'aigua

Degut a les emissions de gasos d'efecte hivernacle, el nostre clima està canviant. Tal com mostra el 3r Informe del Canvi Climàtic a Catalunya (Martín-Vide et al., 2016), el nostre clima s'està fent més càlid, els estius s'estan fent més llargs i secs i, tot i que encara no hem enregistrat disminucions significatives de la precipitació anual, esperem que, al llarg de les properes dècades, el nostre clima es vagi fent més sec. Les nostres conques són molt dependents de la neu, un autèntic magatzem natural d'aigua, que podem aprofitar durant la primavera, quan aquesta es fon. En el clima futur, esperem que el desglaç sigui més d'hora i que el volum d'aigua emmagatzemada en forma de neu sigui menor. A la primavera i l'estiu, és quan esperem un augment més important de les temperatures, quelcom que ja està succeint, causant un augment de l'evapotranspiració potencial i, per tant, un major consum d'aigua de la vegetació. Així doncs, tindrem menys aigua disponible, en necessitarem més, i la tindrem més mal repartida, fet que causarà dificultats.

Però l'home no només modifica el cicle de l'aigua a través del canvi climàtic. Altres processos antròpics tenen un impacte rellevant en el cicle de l'aigua continental. L'agricultura irrigada, que és beneficiosa en molts aspectes, també té un impacte negatiu, disminuint els cabals i canviant els règims fluvials riu avall, entre d'altres impactes. És més, l'abandonament dels cultius en zones de muntanya, que són difícilment mecanitzables, està causant un augment de la massa forestal a les capçaleres dels rius (on es genera la major part de l'escorrentia), fet que causa un augment de l'evapotranspiració i, per tant, una disminució del cabal dels rius i del recurs disponible per l'agricultura (Gallart et al., 2011; López Moreno et al., 2011).

Caracterització del cicle de l'aigua mitjançant observacions *in-situ* i remotes, i models

Així doncs, els canvis tecnològics, econòmics i socials, tant globals (canvi climàtic) com locals, estan tenint un impacte important en el cicle de l'aigua continental, en els recursos hídrics i en els extrems.

Al mateix temps, la demanda en aigua va en augment degut a l'increment de la pressió humana (urbanització, indústria, expansió dels regadius, etc.), de manera que hi ha una forta demanda d'un millor coneixement sobre el cicle hidrològic continental, d'una millora en les eines de monitorització i d'un millor coneixement sobre els canvis esperats al llarg de les properes dècades.

La millor manera de comprendre un sistema natural és observant-lo directament, sempre que sigui possible. Afortunadament, al nostre territori disposem d'extenses xarxes d'observació meteorològica i hidrològica, amb dos serveis meteorològics (Agència Estatal de Meteorologia i Servei Meteorològic de Catalunya), que mantenen xarxes d'estacions meteorològiques, i dos organismes de conca (Agència Catalana de l'Aigua i Confederació Hidrogràfica de l'Ebre) que mantenen xarxes d'observació hidrològica (estacions meteorològiques, punts de mesura del cabal, nivells piezomètrics, etc.). Així doncs, disposem d'una rica base de dades per descriure i estudiar el cicle de l'aigua i el seu canvi.

No obstant, l'observació directa té diverses limitacions importants. La primera és que hi ha parts del sistema que no s'observen, com ara la humitat del sòl. També, ens és molt difícil fer experiments amb el sistema, fet que ens limita a només poder observar allò que ocorre naturalment. Afortunadament, la tècnica de la modelització ens permet superar, parcialment, aquesta limitació. Els models meteorològics i hidrològics ens permeten simular el cicle de l'aigua continental, tot permetent-nos experimentar amb una natura virtual, i recollir informació sobre parts del sistema que no són observables. Ara bé, els models són per la seva natura limitats, ja que només contenen allò que coneixem del sistema i, per tant, estan subjectes a dues fonts d'incertesa. Una relacionada en la impossibilitat de mesurar totes les propietats del sistema i l'altra deguda al desconeixement de tots els processos rellevants. No obstant això, els models han permès un gran progrés en la nostra capacitat de monitoritzar i preveure el cicle de l'aigua continental.

Hi ha diferents tipus de model hidrològic, però aquí ens centrarem en els anomenats models de la superfície continental (LSM, *land-surface model* en anglès). Van ser desenvolupats inicialment per la comunitat meteorològica per descriure els intercanvis d'energia, aigua i moment entre el sòl, la vegetació i l'atmosfera, tant dins dels models meteorològics com del clima. ISBA (Noilhan i Mahfouf, 1996), ara integrat dins SURFEX (Masson et al., 2013), seria un bon exemple d'aquesta mena de model. Així doncs, tot model climàtic o meteorològic integra un LSM que descriu els processos a la superfície continental. És més, aquests models es poden utilitzar també de manera independent, alimentant-los (forçant-los seria la paraula més tècnica) amb observacions meteorològiques interpolades en una malla. Fet que els converteix en autèntics models hidrològics físics i distribuïts (per exemple, Habets et al., 2018), que ens permeten accedir a variables poc observades (com la humitat del sòl; Quintana-Seguí et al, 2018), experimentar amb el sistema (per exemple, modificant

les cobertures vegetals i analitzant l'impacte dels canvis), o fer prediccions, tant a escala diària, estacional (avui en dia encara de manera força experimental) o climàtica.

L'Observatori de l'Ebre ha desenvolupat un model hidrològic distribuït, anomenat SASER (SAFRAN-SURFEX-Eaudyssée-RAPID), basat en el LSM SURFEX, que simula el cicle de l'aigua continental de la Península Ibèrica a una resolució espacial de 5 km i una resolució temporal d'1 dia (Quintana-Seguí et al., 2017). Actualment s'està utilitzant per a progressar en la comprensió teòrica, en la millora de la monitorització de la sequera (projecte HUMID¹) i en els estudis d'impacte del canvi CLIMATIC (projecte PIRAGUA²).

El progrés tecnològic, però, ens ha aportat una nova manera d'observar el cicle de l'aigua, aquest cop des de l'espai. La teledetecció espacial ens permet observar la Terra amb una bona repetibilitat temporal i una bona cobertura espacial. Així, gràcies a missions com SMOS (Kerr, 2012) o SMAP (Entekhabi et al, 2010) podem observar la humitat del sòl superficial a baixa resolució (30-50 km). Afortunadament, combinant aquestes dades amb, per exemple, dades de temperatura superficial del sòl i d'índexs de vegetació (LST i NDVI de MODIS), es poden convertir en dades d'humitat d'alta resolució utilitzant algorismes com ara DISPATCH (Merlin et al, 2013). Aquestes dades són de gran valor perquè permeten fer el seguiment de la humitat del sòl per, per exemple, estudiar la sequera, com estem fent en el projecte HUMID, contrastar models (Escorihuela i Quintana-Seguí 2016), o, fins i tot, estimar la irrigació (Brocca et al, 2018). D'altres quantitats geofísiques són també accessibles mitjançant els satèl·lits, fet que ens permet deduir les cobertures vegetals, l'evolució de l'índex foliar, o bé els nivells dels embassaments. Actualment, estem vivint un creixement exponencial de la nostra capacitat d'observar la Terra des de l'espai gràcies, per exemple, a programes com Sentinel³, de l'Agència Espacial Europea, que està llançant un gran nombre de noves missions d'observació de la Terra.

En un entorn com la Mediterrània, la principal limitació dels models hidrològics és la gran dificultat d'incloure-hi els processos antròpics, ja sigui la irrigació, els embassaments, els canals o els canvis en els usos dels sòls. És per aquesta raó que la combinació de models i satèl·lits és tan interessant. Els satèl·lits no poden observar el sistema complet (per exemple, només poden accedir a la humitat del sòl superficial, els primers 5 cm del sòl), però veuen el sistema tal com és, amb tots els impactes humans. Així doncs, emprant diferents tècniques, com ara l'assimilació de dades (Rodell et al. 2004; Parrens et al, 2014), podem apropar les simulacions hidrològiques a la realitat, passant de simular un sistema natural idealitzat, a simular un sistema molt més proper a la realitat.

Estudi dels impactes del canvi climàtic

1 Hydrological Understanding and Modeling of Iberian Drought (HUMID), CGL2017-85687-R.

2 INTERREG V-A España-Francia-Andorra POCTEFA2014-2020. EFA210/16-PIRAGUA.

3 <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home>

No obstant, el que no podem observar és el futur, i el futur ens preocupa cada cop més, tant a escales curtes (gelarà demà?) com a escales llargues (tindrem prou aigua en el futur per mantenir els cultius actuals, siguin de regadiu o de secà?). Per respondre aquestes preguntes hem de fer gran confiança als models, i a la nostra capacitat d'introduir-hi tots els processos físics rellevants de manera acurada.

Però, com podem saber com seran les precipitacions o els cabals d'aquí 50 anys?

Per respondre aquesta pregunta utilitzem, en primer lloc, els models climàtics globals. Aquests models simulen el sistema climàtic en el seu conjunt (atmosfera, oceans i superfícies continentals a l'escala global). Aquests simulen els principals processos físics que regulen el clima de la Terra. No obstant, degut als grans requeriments de càlcul necessaris per a simular el sistema climàtic en el seu conjunt, la seva resolució (el detall amb el què descriuen l'espai) és molt limitada, essent de l'ordre dels 100 km.

A part de les incerteses inherents als models (resolució i processos físics descrits), la principal font d'incertesa dels models climàtics és quin serà el nivell de CO₂ a l'atmosfera en el futur, quelcom que depèn de l'evolució socioeconòmica i tecnològica de la societat. És per aquesta raó, que es realitzen escenaris futurs amb diferents nivells de CO₂ a l'atmosfera, ja que no podem preveure com serà l'economia i la tecnologia del futur.

Tornant al problema de la resolució. El fet que els models globals tinguin una resolució limitada és molt problemàtic, perquè no poden simular processos físics d'escala més fina, que són tan importants a la Mediterrània, com ara els sistemes precipitants de mesoescala, la influència de l'orografia en la precipitació o el vent, etc. És per aquesta raó que recorrem a la regionalització, sigui dinàmica o estadística (Teutschbein and Seibert, 2010; Vaithinada Ayar et al., 2016). En el primer cas el que fem és realitzar noves simulacions sobre un domini limitat (per exemple, Europa) a molt més alta resolució, incorporant als límits del domini informació provinent d'una simulació global. A la pràctica això ve a ser com fer un "zoom" en una àrea concreta. Alternativament, podem utilitzar tècniques de regionalització estadística, que utilitzen models estadístics, més o menys simples, per relacionar variables d'escala sinòptica (com ara els camps de pressió), que a priori són ben simulades pels models del clima, i variables d'escala fina (com ara la precipitació o el vent). Per exemple, quan un centre de baixes pressions se situa al Golf de Gènova, sabem que hi haurà vent fort de Tramuntana a Menorca i l'Empordà, i vent fort de Mestral a les Terres de l'Ebre. Podem aprofitar aquestes regularitats per deduir quin temps tindrem a escala fina, quan es donen situacions sinòptiques determinades.

Aquests mètodes no són lliures de problemes, però són la sola manera que tenim per transformar la informació provinent dels models globals del clima, en informació utilitzable a una escala rellevant per, per exemple, prendre decisions a l'escala agrícola. Així doncs, és important que la comunitat climatològica comuniqui molt bé a la comunitat d'impactes i als usuaris finals quines són les incerteses que hi ha en joc. Una previsió climàtica sense barres d'error no és acceptable.

Un cop hem regionalitzat els escenaris futurs del clima global, per obtenir escenaris regionals a alta resolució (de l'ordre d'1 km) podem utilitzar aquesta informació per realitzar simulacions hidrològiques que descriguin el comportament de les nostres conques en un clima futur (Quintana-Seguí et al, 2010). Aquesta és una activitat que l'Observatori de l'Ebre està realitzant actualment en el si del projecte PIRAGUA, que estudia el cicle de l'aigua del Pirineu (ambdós vessants) en el passat i en el futur.

Com hem dit abans, cal tenir molt present diversos factors que fan que aquestes simulacions siguin incertes. Són hereves de la incertesa en les emissions futures de gasos d'efecte hivernacle, de la incertesa dels models de clima global, dels errors introduïts per la regionalització estadística i, finalment, hi sumen la incertesa pròpia de la simulació hidrològica. A més, aquest és un exercici idealitzat, que no contempla els canvis en els usos dels sòl (canvis en pràctiques agrícoles, aforestació o desforestació, urbanització), ni canvis en la gestió dels recursos hídrics. No obstant, malgrat tot, si es fan bé, aquests estudis serveixen per fitar el rang de futurs possibles, una informació que és útil a l'hora de fer planificació a llarg termini, com ara, a l'hora de planificar infraestructures hidràuliques que duraran dècades.

Conclusions

Degut a les característiques del cicle de l'aigua Mediterrani i a les necessitats de la nostra societat, la gestió de l'aigua al nostre territori és complexa i requereix d'informació adequada per monitoritzar els hidrosistemes i per planificar el futur, en un context de canvi climàtic. Afortunadament disposem d'eines adequades per abordar aquestes necessitats, des d'una extensa xarxa d'observació, fins a models, passant per la teledetecció espacial. La meteorologia, la climatologia i la hidrologia estan evolucionant molt ràpidament a mesura que augmenta la nostra capacitat de càlcul i el nombre de missions d'observació de la Terra des de l'espai. Actualment, estem progressant molt ràpidament en la combinació de models i dades remotes per a una millor descripció i comprensió del cicle de l'aigua continental, tenint en compte les activitats humanes, com ara la irrigació. L'Observatori de l'Ebre (URL – CSIC) participa en aquest esforç desenvolupant un model hidrològic físic i distribuït per a Ibèria, SASER, i aplicant-lo a l'estudi de la sequera (projecte HUMID) i a l'estudi dels recursos hídrics del Pirineu, tant en el passat, com en el futur (projecte PIRAGUA).

Bibliografia

Brocca, L. et al., 2018. How much water is used for irrigation? A new approach exploiting coarse resolution satellite soil moisture products. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73(August), pp.752–766. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0303243418304793>.

- Entekhabi, D. et al., 2010. The Soil Moisture Active Passive (SMAP) Mission. *Proceedings of the IEEE*, 98(5), pp.704–716. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5460980/> [Accessed November 7, 2017].
- Escorihuela, M.J. & Quintana-Seguí, P., 2016. Comparison of remote sensing and simulated soil moisture datasets in Mediterranean landscapes. *Remote Sensing of Environment*, 180, pp.99–114. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425716300748>.
- Gallart, F. et al., 2011. Analysing the effect of global change on the historical trends of water resources in the headwaters of the Llobregat and Ter river basins (Catalonia, Spain). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 36(13), pp.655–661. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1474706511000647>.
- Habets, F. et al., 2008. The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113, p.D06113. Available at: <http://www.agu.org/pubs/crossref/2008/2007JD008548.shtml> [Accessed September 17, 2010].
- Kerr, Y.H. et al., 2012. The SMOS Soil Moisture Retrieval Algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(5), pp.1384–1403. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6161633/> [Accessed November 7, 2017].
- López-Moreno, J.I. et al., 2011. Impact of climate evolution and land use changes on water yield in the ebro basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(1), pp.311–322. Available at: <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/15/311/2011/> [Accessed October 11, 2011].
- Martin-Vide, J., 2016. *Tercer informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*, Barcelona: Institut d'Estudis Catalans i Generalitat de Catalunya, Departament de la Vicepresidència, Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible de Catalunya. Available at: http://cads.gencat.cat/web/.content/Documents/Publicacions/tercer-informe-sobre-canvi-climatic-catalunya/TERCER_INFORME_CANVI_CLIMATIC_web.pdf.
- Masson, V. et al., 2013. The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes. *Geoscientific Model Development*, 6(4), pp.929–960. Available at: <http://www.geosci-model-dev.net/6/929/2013/> [Accessed March 26, 2014].
- Noilhan, J. & Mahfouf, J.F., 1996. The ISBA land surface parameterisation scheme. *Global and Planetary Change*, 13(1–4), pp.145–159.
- Parrens, M. et al., 2014. Assimilation of surface soil moisture into a multilayer soil model: design and evaluation at local scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(2), pp.673–689. Available at: <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/18/673/2014/> [Accessed June 28, 2017].
- Quintana Seguí, P. et al., 2010. Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins. *Journal of Hydrology*, 383(1–2), pp.111–124. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169409006246> [Accessed March 24, 2014].
- Quintana-Seguí, P. et al., 2017. Validation of a new SAFRAN-based gridded precipitation product for Spain and comparisons to Spain02 and ERA-Interim. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(4), pp.2187–2201. Available at: <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/21/2187/2017/> [Accessed April 21, 2017].

- Quintana-Seguí, P. et al., 2018. The utility of land-surface model simulations to provide drought information in a water management context using global and local forcing datasets. *Water Resources Management*, Accepted.
- Rodell, M. et al., 2004. The Global Land Data Assimilation System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(3), pp.381–394.
- Teutschbein, C. & Seibert, J., 2010. Regional Climate Models for Hydrological Impact Studies at the Catchment Scale: A Review of Recent Modeling Strategies. *Geography Compass*, 4(7), pp.834–860. Available at: <http://blackwell-synergy.com/doi/abs/10.1111/j.1749-8198.2010.00357.x> [Accessed July 13, 2010].
- Vaithinada Ayar, P. et al., 2016. Intercomparison of statistical and dynamical downscaling models under the EURO- and MED-CORDEX initiative framework: present climate evaluations. *Climate Dynamics*, 46(3–4), pp.1301–1329.