

# Processos hidrològics i geomorfològics als rius: context i exemples per a interpretar la seva resposta a episodis d'alta magnitud com el Glòria<sup>1</sup>

**Ramon J. Batalla**

*Grup de recerca de dinàmica fluvial (RIUS), Universitat de Lleida  
Institut Català de Recerca de l'Aigua (ICRA)  
ramon.batalla@udl.cat*

**Damià Vericat**

*Grup de recerca de dinàmica fluvial (RIUS), Universitat de Lleida  
Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya (CTFC)*

**Joaquim Farguell**

**Xavier Úbeda**

*Grup de Recerca Ambiental Mediterrània (GRAM)  
Departament de Geografia, Universitat de Barcelona*

**Celso Garcia**

*Grup de recerca en Recursos hídrics i canvi global (GLOWATER)  
Departament de Geografia, Universitat de les Illes Balears*

## Resum

El temporal Glòria va suposar per a molts rius a Catalunya una reestructuració completa de la seva morfologia fluvial. Els cabals van assolir magnituds molt importants, que van provocar canvis profunds en la forma de la llera, van produir incisió i eixamplament generalitzades, van inundar planes d'inundació, i van reconnectar braços abandonats. L'episodi va contribuir a reactivar profundament els sistemes fluvials, i els rius van experimentar un grau de metamorfisme com feia dècades que no es veia. L'estudi mostra també el paper de les grans preses en la modificació dels hidrogrames de crescuda. El Glòria va trobar uns rius confinats per l'activitat antròpica, amb els balanços de sediments en desequilibri i en clara desconexió hídrica i sedimentària amb la conca. Unes hores

---

1. Aquest treball s'ha realitzat gràcies al suport de la Generalitat de Catalunya a través dels Grups de Recerca Consolidats RIUS SGR2017-0459 i GRAM SGR2017-1344, i del Programa CERCA. Damià Vericat gaudeix d'un contracte de Professor Agregat Serra Hünter de la Generalitat de Catalunya. Els resultats obtinguts en diversos projectes de recerca (e.g. Consolider Ingenio 2010 CSD2009-00065, CGL2012-36394, CGL2016-78874) finançats pel Ministerio de Ciencia e Innovación i Fons FEDER, han contribuït a la formulació d'algunes de les idees que s'exposen en aquests treballs. Els autors volem dedicar aquest treball a la Dra. Maria Sala, pel seu mestratge personal i professional, i per l'oportunitat que ens va donar d'endinsar-nos en el fascinant món de la Geomorfologia Fluvial.

de pluja intensa i la subseqüent resposta hidrològica de les conques van aportar l'energia suficient per superar molts dels llindars físics als que estaven sotmesos, i canviar per molt de temps la morfologia de les lleres i valls afectades.

**Paraules clau:** magnitud i freqüència, canvis en la cobertura del sòl, metamorfosi fluvial, hidrogrames de crescuda, ajustos morfosedimentaris.

**Resumen:** *Procesos hidrológicos y geomorfológicos en los ríos: contexto y ejemplos para interpretar su respuesta a episodios de alta magnitud como el Gloria*

El temporal Gloria supuso para muchos ríos en Catalunya una reestructuración completa de su morfología fluvial. Los caudales alcanzaron magnitudes muy importantes, provocando cambios profundos en la forma de los cauces, produciendo incisión y ensanchamiento generalizados, inundando las llanuras aluviales, y reconectando brazos abandonados. El episodio contribuyó a reactivar profundamente los sistemas fluviales, y los ríos experimentaron un grado de metamorfismo como no se había visto en décadas. El estudio muestra también el papel de las grandes presas en la modificación de los hidrogrames de crecida. El Gloria encontró ríos constreñidos por la actividad antrópica, con los balances de sedimento en desequilibrio y en clara desconexión hídrica y sedimentaria con la cuenca. Unas horas de lluvia intensa y la subsiguiente respuesta hidrológica de las cuencas aportaron la energía suficiente para superar muchos de los límites físicos a los que estaban sometidos, y cambiar por mucho tiempo la morfología de los cauces y valles afectados.

**Palabras clave:** magnitud y frecuencia, cambios en la cubierta del suelo, metamorfosis fluvial, hidrogrames de crecida, ajustes morfo-sedimentarios.

**Abstract:** *Hydrological and geomorphological processes in rivers: context and examples to interpret their response to episodes of high magnitude such as the Gloria storm*

Many rivers in Catalonia undertook a complete restructuring of its fluvial morphology under the effects of the storm Gloria. High magnitude flows caused profound changes in channel morphology, producing widespread incision and widening, flooding floodplains, and reconnecting abandoned channels. The episode contributed to a profound reactivation of river systems, and channels experienced a degree of metamorphism that had not been seen for decades. The study also shows the role of large dams in modifying flood hydrographs. The Gloria found rivers constrained by long-lasting human activity, with sediment balances in complete disequilibrium, and in clear water and sedimentary disconnection with the upstream river basin. Few hours of heavy rain and the subsequent hydrological response of the basins provided enough energy to exceed many of the physical thresholds to which they were subjected, and change the morphology of the affected river channels and valleys for a long time.

**Keywords:** magnitude and frequency, changes in soil cover, fluvial metamorphosis, flood hydrographs, morfo-sedimentary adjustments.

## 1. Marc conceptual: resposta i evolució dels corredors fluvials

### 1.1. Magnitud/freqüència de la resposta dels rius a episodis extrems

En un article ja clàssic en Geomorfologia, Wolman i Miller (1960) es van centrar en el paper de la 'força efectiva' en el desenvolupament d'un paisatge, i van defensar que la quantitat de treball fet durant diferents episodis no és necessàriament sinònim de la importància relativa d'aquests episodis a l'hora de conformar un relleu o alguna forma terrestre en particular. El seu article es va concentrar en la transcendència de la freqüència dels esdeveniments, així com en la magnitud pel que fa al 'treball fet'. Aquest nou concepte va ser important no només perquè va introduir el 'treball' i la noció de 'magnitud i freqüència', sinó també perquè emfatitzava la base teòrica de la mecànica i els processos en Geomorfologia. El concepte va ser utilitzat i desenvolupat per Leopold *et al.* (1964) en relació al transport de sediment en els rius. Aquests treballs pioners van provocar un canvi en la direcció del pensament geomorfològic cap a conceptes de magnitud-freqüència, i cap a una pregunta clau: com funcionen els processos significatius i amb quina freqüència ho fan? És a dir, posaven sobre la taula el concepte d'eficàcia geomorfològica: com de significatives són la magnitud d'un episodi i els efectes geomòrfics resultants.

Les grans crescudes acostumen a generar importants ajustos geomorfològics, però es tracta d'esdeveniments excepcionals, amb una baixa freqüència. Contràriament, les crescudes amb cabals més freqüents, amb el pas del temps, tendeixen a reestablir l'equilibri dinàmic entre les dimensions dels llits fluvials, el pendent i el cabal líquid i sòlid. No obstant això, a mesura que avançaven els estudis es van anar reconeixent les limitacions i complexitats inherents al concepte de magnitud i freqüència, molt útil per altra banda per entendre les formes fluvials i els processos de formació de la plana al·luvial, al constatar la *incomparabilitat* dins i entre estudis, ja que la magnitud de l'episodi i els seus efectes geomorfològics no sempre es poden quantificar a escales semblants (Lisenby *et al.* 2016). Per exemple, si bé les anàlisis de magnitud-freqüència quantifiquen i comparen les relacions geomorfològiques no lineals (el transport de sediments versus cabal i magnitud de la crescuda versus freqüència de la crescuda), la metodologia assumeix que un sistema geomorfològic respondrà de la mateixa manera a les successives crescudes de la mateixa magnitud i que la resposta sempre és directament proporcional a la magnitud de l'episodi (Nash, 1994). Aquest supòsit és intrínsecament lineal i sovint poc realista (Schumm, 1983), ja que les relacions entre les causes de l'episodi i les respostes o efectes geomòrfics són força més complexes i sovint no lineals (Lisenby *et al.* 2016). La variabilitat en la resposta geomorfològica es deu, en gran mesura, a la complexitat introduïda per altres factors geomorfològics que influeixen en el sistema en diferents escales espaciotemporals i que poden modular les respostes geomorfològiques en el temps (Phillips i Van Dyke, 2016); mentre que

l'enfocament de magnitud-freqüència es va dissenyar per a avaluar processos individuals en ambients geomorfològics particulars, com el transport de sediment (Richards, 1999), el concepte d'eficàcia geomorfològica pot ser aplicat de manera més àmplia per avaluar els processos de modificació i evolució de les formes terrestres (Wolman i Gerson, 1978).

El concepte d'eficàcia geomorfològica aborda si un episodi és efectiu, mentre que conceptes com la propagació dels ajustaments geomorfològics (i. e. sensibilitat, Thompson i Croke, 2013), el llindar (Schumm, 1979) i l'eficiència de la transferència de sediments dins i entre ambients geomorfològics (i. e. connectivitat, Thompson *et al.*, 2016) determinen el perquè o el perquè no és efectiu (Lisenby *et al.* 2016). El concepte d'eficàcia geomorfològica compara causa i efecte per a un sol episodi, i conceptes com sensibilitat, connectivitat, recuperació, i llindars geomorfològics poden explicar la variabilitat de l'eficàcia geomorfològica a través de múltiples episodis. La sensibilitat o resistència d'un sistema geomorfològic també influirà en com es recupera després d'un episodi de pertorbació (Fryirs, 2016). Els ajustos dels llindars intrínsecs amb els successius episodis determinaran si s'ha reinicialitzat el sistema i si les respostes geomorfològiques persistiran o es relaxaran de nou cap a les condicions prèvies a la pertorbació (p. e. Costa, 1974; Wolman i Gerson, 1978; Phillips i Van Dyke, 2016).

Per aquestes raons, les comparacions de l'eficàcia de diversos processos geomorfològics es basen cada vegada més, no en la magnitud i la freqüència, sinó en mesures més uniformes d'erosió com la massa de sediment mogut o la quantitat de treball geomorfològic fet. És evident que en la recerca geomorfològica l'objectiu es trobar una mesura (mètric) per a les causes i per als efectes produïts per un episodi. Si aquestes mesures, diferenciant causes d'efectes, són flexibles i comparables permetran maximitzar la utilitat del concepte d'eficàcia geomorfològica (Lisenby *et al.* 2016). Per quantificar la magnitud (causa) d'un episodi els mètrics com l'energia total (en *Joules*) o la potència (en  $\text{W}/\text{m}^2$ , *stream power*) poden ser utilitzats a diferents escales espacials (tram o conca) i temporals (episodi o anys), i en diferents ambients geomorfològics per quantificar les magnituds dels episodis que generen crescudes (p. e. Kale 2008). Per quantificar els efectes d'un episodi, mètrics com l'erosió, la sedimentació o el balanç net de canvis al llarg d'escales rellevants (flux, transferència i emmagatzematge de sediment) són de gran interès. Els acurats i accessibles Models Digitals del Terreny (MDT) permeten una estimació molt precisa del flux de sediment (volumètric) a través de la comparació seqüencial entre models (p. e. Wheaton *et al.*, 2010, James *et al.*, 2012, Vericat *et al.*, 2017).

Són els episodis extrems els que transporten i sedimenten les partícules més grans en els llits i estableixen la carcassa (l'esquelet) de les mesoformes (i. e. unitats morfosedimentàries) en la llera del riu (p. e. barres, ràpids). Són episodis extremadament importants que realitzen un treball geomorfològic i tenen una eficàcia geomorfològica amb diferències en la resposta del riu o els seus trams

si aquest es troba confinat o no en la seva vall fluvial. Per exemple, Thompson i Croke (2013) mostraren diferències considerables durant un episodi extrem segons la configuració de la vall: els trams fluvials confinats experimenten processos erosius que propicien una reorganització de la morfologia del llit (exporten sediment aigües avall) mentre que en els trams no confinats predomina la sedimentació (eixamplament del llit: agradació) i la creació de noves formes.

Els episodis d'alta magnitud poden erosionar, transportar i sedimentar grans volums de sediment, potencialment redimensionant el sistema fluvial, amb impactes sobre la capacitat del canal (secció transversal de la llera) i, per tant, la transmissió de cabals (Staines i Carrivick, 2015). D'altra banda, també s'ha demostrat que l'augment de les inundacions ha estat provocat per canvis geomorfològics en curs (agradació) que redueixen progressivament la capacitat de la llera (Stover i Montgomery 2001; Syvitski i Brakenridge, 2013). Aquests canvis geomorfològics en la capacitat del canal són clarament un factor crític a l'hora d'alterar el risc d'inundacions (i els impactes socials de les inundacions) i en realitat poden ser més grans que els del canvi climàtic directe sobre la magnitud i la freqüència dels cabals (Lane *et al.*, 2007).

La morfodinàmica fluvial, impulsada en part per episodis de crescudes extremes, modula i afegeix complexitat a la relació entre el canvi climàtic i el risc d'inundacions. Per exemple, els rius no són simples 'canals' estàtics per donar cabuda i transmetre l'escolament generat pels canvis en les precipitacions, sinó que són ells els que s'ajusten dinàmicament a règims d'escolament alterats, que provoquen que els episodis extrems, a vegades, alteren les capacitats de la llera i la geometria de la plana al·luvial, modificant el risc de futures inundacions. Aquesta forma de *feedback* significa que, a l'induir la resposta geomorfològica, els episodis extrems poden induir un llegat d'alteració en el risc d'inundacions a episodis extrems similars que es produeixen en el futur (Naylor *et al.*, 2016).

## **1.2. Continents, rius i costes: continuïtat fluvial i balanç sedimentari**

L'escolament hídric erosiona materials meteoritzats de la superfície terrestre, i els rius transporten aquests productes de l'erosió a través de la xarxa de drenatge fins a la sortida de les conques, ja sigui a una altra conca o al mar, completant d'aquesta manera el cicle d'erosió, geogràfic o de denudació continental. Atenent als principals processos sedimentaris, una conca fluvial es pot dividir idealment en tres zones: 1) zona d'erosió o producció de sediments (àrees de capçalera amb forts pendents i altament erosionables), 2) zona de transport (corredors fluvials a través dels quals es mouen els sediments més o menys sense guany o pèrdua neta) i 3) zones de sedimentació (en les que material pot quedar emmagatzemat durant llargs períodes de temps p. e. terrasses fluvials, deltes) (Schumm, 1960). A llarg termini es considera que la producció, transport, transferència i sedimentació es compensen en una conca de drenatge, de manera que el balanç de sediment està en equilibri i e. el sediment no es crea ni es destrueix, només

es mou a través del paisatge (principi de continuïtat sedimentaria), i en relació directa a la magnitud i freqüència dels episodis competents (eficaços) com s'ha descrit a l'apartat anterior.

Un balanç de sediment és una avaluació quantitativa dels processos de generació, emmagatzematge i transport de sediments dins d'una conca de drenatge. Dietrich i Dunne (1978) van ser els primers autors que van definir i aplicar de manera global i sistemàtica el concepte de balanç de sediment en l'estudi integral dels processos geomorfològics en conques de drenatge. El concepte és aplicable de manera general al conjunt de la conca de drenatge però conceptualment es pot aplicar també a cadascun del seus compartiment, per exemple un vessant o un tram de riu concrets. En el cas d'un riu, per exemple, el balanç de sediments es pot construir en termes de transferència de sediments al llarg de la llera, seguint la següent formulació:

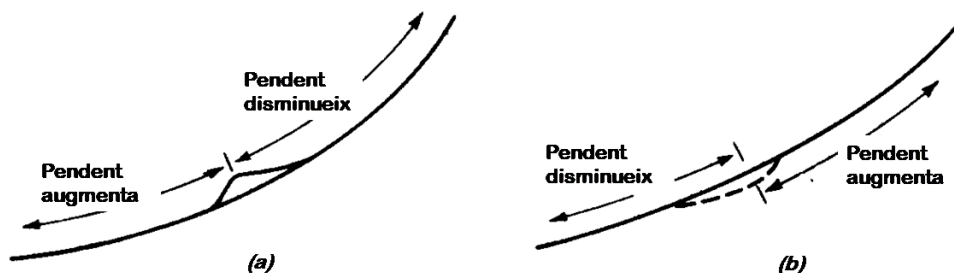
$$I - \Delta S = \Phi$$

on  $I$  és la massa o volum de sediments que entra al sistema fluvial al llarg d'un període de temps concret  $\Delta t$  (i des d'aigües amunt si només es considera un tram de riu determinat i no tota la conca),  $\Delta S$  és el canvi en la massa o volum de sediment emmagatzemat en un tram de riu durant  $\Delta t$  (si incrementa el sediment és positiu) i  $\Phi$  és la massa o volum de sediment que surt del tram fluvial durant  $\Delta t$ . Els balanços de sediment es poden construir sobre diferents escales temporals, i el seu rang pot variar entre una riuada o centenars/milers d'anys. A partir del treball dels dos autos esmentats anteriorment i dels publicats posteriorment per Swanson i Friedriksen (1982) i Dietrich *et al.* (1982), es defineix un balanç de sediment d'una conca de drenatge com la simplificació conceptual de la interacció entre processos geomorfològics que transporten el sediment, a partir de la meteorització de la roca i al llarg del vessants i de la xarxa de drenatge, fora de la conca. Un balanç de sediment implica, doncs, una descripció quantitativa de les taxes de producció, transport i emmagatzematge del sediment en la conca. Cal tenir present, però, que el control dels processos de transferència i transport de totes les partícules en una conca de drenatge és impossible, i el temps de retorn i l'evolució de molts dels processos geomorfològics que hi tenen lloc excedeixen amb escreix la vida dels investigadors.

El transport de sediments a través del sistema fluvial pot ser continu en el temps (p. e. càrrega dissolta) i/o esporàdic (i. e. càrrega sòlida o particulada) El transport ocorre sobretot durant riuades, esdeveniments que superen els llindars d'inici de moviment i. e. els sediments són transportats per cabals competents. L'augment o disminució de l'erosió a les capçaleres de les conques (subministrament de sediments), així com l'augment o reducció de l'escolament, o els canvis en la continuïtat d'aquests dos elements al llarg de la xarxa fluvial, poden suposar canvis importants en el funcionament del sistema fluvial en el seu conjunt. Les càrregues de sediments es propaguen aigües avall a través del riu durant llargs períodes de temps, modificant contínuament els processos

associats, en un estat permanent d'equilibri dinàmic o *quasi*-equilibri en totes les seccions del riu i al llarg del seu perfil longitudinal (fig. 1; el pendent s'ajusta a les entrades d'aigua i sediment; Lane 1953). L'ecosistema fluvial basa el seu funcionament en la freqüència i magnitud de les pertorbacions físiques que més o menys periòdicament experimenta. En aquest sentit però caldria començar utilitzar el concepte d'equilibri dinàmic metastable que indica que el sistema està en un estadi estable o d'equilibri però que contínuament canvia (Bracken i Wainwright, 2006; Phillips, 2014).

**Figura 1.** Com ajusta un riu el pendent ( $s$ ; perfil longitudinal) als canvis en les entrades i sortides de sediments en un tram determinat a partir de  $Q_s @ Q_s D_x$ , on  $Q$  és el cabal d'aigua,  $Q_s$  és la càrrega de sediment (o cabal sòlid) i  $D_x$  és la granulometria del material (i. e. balanç d'aigua, energia i sediments).



Així doncs, una llera fluvial és un sistema dinàmic que constitueix juntament amb la seva plana inundable, un element hidrològic i una unitat geomorfològica caracteritzades per freqüents transferències d'aigua i el sediment entre els elements del riu i aigües avall. No entendre ni apreciar la connexió íntima entre els processos de conca i els processos fluvials (processos continentals i. e. connectivitat fluvial i sedimentària), a través de l'aigua i els sediments que hi circulen des de les capçaleres cap a les zones de deposició, i entre els mateixos continents i oceans, és a la base de molts problemes ambientals en la gestió territorial passada i present de tot el planeta. Les activitats antròpiques sobre els rius estan en gran mesura relacionats amb els patrons d'ús del sòl, els canvis en la coberta vegetal i, en temps més recents, la construcció de preses i les extraccions d'àrids (fig. 2A) i la canalització de molts trams de les lleres dels rius, i tenen efectes importants sobre el balanç de sediments i la morfologia dels rius, i sobre els processos ecològics associats (vegetació de ribera, hàbitat ictícola), així com sobre activitats socioeconòmiques i sobre el risc de persones (estabilitat d'infraestructures, fig. 2B), també en els sistemes associats (estuaris, deltes, platges, línies de costa). Així doncs, el canvi global, entès com un conjunt de canvis que impacten el sistemes naturals, genera un seguit d'efectes sobre el funcionaments d'aquests sistemes. En el cas dels sistemes fluvials, no és el canvi climàtic, és el desequilibri permanent entre els balanços de massa dels continents i els oceans.

**Figura 2.** Esquerra: extracció d'àrids al riu Siurana aigües amunt de la confluència amb l'Ebre (Garcia); dreta: pont descalçat al tram baix del riu Segre (Aitona)



Fotos: R. J. Batalla, hivern de 2004 i desembre de 2006, respectivament.

### 1.3. Canvis històrics en la relació conca-riu

Definides com a sistemes de procés-resposta (Chorley i Kennedy, 1971), les conques presenten tres característiques fonamentals: a) la seva operativitat està controlada per la magnitud i la freqüència de les entrades, b) els canvis en la morfologia i funcionalitat del sistema poden succeir si les entrades canvien o si hi ha una degradació interna del sistema i, c) hi ha una autoregulació per a crear un estat d'equilibri entre formes i processos. La conca és, doncs, un sistema fràgil, essent-ne el subsistema fluvial una part particularment sensible. Una gestió acurada de les seves formes i del seu balanç sedimentari (recursos) pot assegurar-ne un funcionament profitós i equilibrat.

Segons Fisher *et al.* (1998) els canvis de la coberta del sòl estan directament relacionats amb les alteracions en el funcionament de la Terra. Tenen implicacions molt importants per a l'equilibri de la radiació global i els fluxos d'energia; contribueixen als canvis dels cicles biogeoquímics; modifiquen els cicles hidrològics i influeixen en la complexitat ecològica. Hi ha molts estudis a Catalunya, que es mencionen més endavant en aquest treball, que demostren quantitativament que al llarg del segle xx, i fins i tot en els 20 anys de l'actual segle, hi hagut molts canvis d'usos del sòl al territori. A finals del segle xx ja es va aportar molta informació sobre aquest fet, però ha estat amb el desenvolupament de noves tecnologies cartogràfiques digitals a principis de segle xx, que han permès tractar imatges aèries històriques, sobretot dels anys 1940 i 1950, amb imatges de finals del segle xx i actuals (fotografia aèria però també imatges de satèl·lit), i poder fer comparacions i controlar els canvis al territori (Ruíz, 2008). Aquest fet es va exposar clarament al congrés organitzat per la Societat Catalana de Geografia l'any 2008 "Segon Congrés Català de Geografia" on moltes de les aportacions demostraven els canvis d'usos amb dades quantitatives a Catalunya. Aquestes aportacions després van ser publicades al número especial de la revista Treballs de la Societat Catalana de Geografia (núm.



65) dedicat a aquest congrés el mateix any 2008. L'objecte d'estudi d'aquests treballs i altres posteriors estan orientats a relacionar els canvis d'usos del sòl al llarg dels anys amb, per exemple: les dinàmiques socials (Estany *et al.*, 2008); dinàmiques econòmiques (Sancho, 2008); els canvis d'usos del sòl i el canvi global (Gómez *et al.*, 2008; Badia *et al.*, 2008); amb l'increment de grans incendis forestals (Badia *et al.*, 2019); la urbanització (Panareda, 2020) i també articles més metodològics de com s'han de fer les anàlisis espacials (Serra *et al.*, 2008; Planas, 2008). Hi ha autors que centren els estudis en constatar com els canvis d'usos, sobre la pèrdua d'espais més naturals com boscos o conreus cap a situacions més urbanitzades, suposen una pèrdua de biodiversitat, de serveis ecosistèmics i d'altres valors difícilment quantificables (Nelson *et al.*, 2009). S'ha d'esmentar que realitzant aquesta recerca bibliogràfica també s'han trobat un gran nombre de Treballs fi de Grau i Treballs fi de Màster, efecte lògic de la generalització de la utilització dels Sistemes d'Informació Geogràfica al llarg dels últims anys. En el context del tema que ens ocupa en aquest article hi ha molts d'ells dedicats a la relació dels canvis d'usos del sòl amb la hidrologia a nivell de conca hidrogràfica, tan a nivell superficial (Lana-Renault *et al.*, 2011), a nivell subsuperficial (Ezequiel *et al.*, 2018) com a nivell d'aqüífer (Hough, 1984). Se n'exposen a continuació alguns exemples.

Hi ha estudis que determinen un canvi molt important en la hidrologia superficial degut a la impermeabilització com a conseqüència de la urbanització dels vessants de les conques. Aquest fet d'urbanització és força recurrent a tot el món, aquí a casa nostra segons el CREAM (Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals) en els darrers 50 anys la superfície urbanitzada ha augmentat un 330%. Això pot portar a un conseqüent augment de les avingudes al reduir-se la capacitat d'infiltració i a l'augment de l'escolament superficial (Sala, 2003). Contràriament, Hough (1984) va determinar que si es redueix la cobertura d'arbres i vegetació, l'evapotranspiració pot disminuir fins a un 15%; pot augmentar un 20% el coeficient d'escolament, i també i molt important, disminueix el temps de retard entre la iniciació de precipitacions i les crescudes. Romero i Vásquez (2005) mencionaven la importància de conèixer els canvis en el temps en la resposta hidrològica de les conques i de les eines necessàries per al seu estudi com els models hidrològics, eines molt utilitzades per altres investigadors (Bledson i Watson, 2001; Gao *et al.*, 2020) després de comprovar un augment dels coeficients d'escolament en una conca cada cop més urbanitzada a Santiago de Xile. Són molts els estudis que relacionen l'augment de la urbanització de les conques amb augment de pics de crescudes i també inundacions (Henríquez i Azócar, 2006; Gao *et al.*, 2020; Han *et al.*, 2020).

No només el canvi d'ús cap a un model més urbà pot causar més generació d'escolament, poden ser altres canvis d'ús del sòl i també la combinació de diferents variables. Una d'aquestes variables són els nivells freàtics, la seva localització en el terreny i la seva dinàmica. Per exemple, en un estudi a la Pampa Argentina es va quantificar un augment progressiu de terrenys agrícoles vers

zones de pastures durant 50 anys i com va incrementar el nombre d'inundacions a les parts baixes de la conca, ja que aquest canvi va augmentar la recàrrega d'aqüífers amb un increment del 30% (García *et al.*, 2018). Hi ha un estudi fet a la conca del Mar Menor a Múrcia, on també relacionen els canvis d'usos del sòl amb els canvis a les masses d'aigua subterrània i la generació de més inundacions. Arran de la posada en marxa el 1979 del transvasament Tajo-Segura s'han augmentat els regadius herbacis, tant a l'aire lliure com en hivernacles (de Aranzábal *et al.*, 2008). El consegüent augment dels fluxos hídrics s'ha vist confirmat per l'ascens dels nivells piezomètrics (Rodríguez Estrella, 2009) així com per l'increment dels períodes d'inundació (Álvarez-Rogel *et al.*, 2007). A més, aquests fluxos més freqüents van carregats d'elements en concentracions massa elevades, com nitrogen i fòsfor (Martínez-Fernández *et al.*, 2013).

De les conclusions més mencionades, i que ja fa anys s'ha comprovat, hi ha l'afirmació que donat l'increment de superfície forestal hi ha un augment de la intercepció per part de la vegetació, més evapotranspiració i menys aigua en els cursos d'aquestes conques fluvials més aforestades (Blay, 1997). Això mateix es va constatar en un estudi a la riera de Llémena analitzant dades de tot el segle xx (Batalla *et al.*, 1992). En un estudi als Pirineus, Lana-Renault *et al.* (2011) van comprovar com a les àrees més boscoses la generació d'escolament va ser menor. Hi ha en alguns casos, però, que els canvis d'usos del sòl va en detriment del bosc vers àrees de matolls, com el cas d'un estudi a una conca de les rambles valencianes (Camarasa *et al.*, 2018), en el qual l'evolució entre 1956 i 2011, mostra un augment de l'escolament superficial produït a les capçaleres, com a conseqüència de la reculada de bosc, i per l'increment de paviment artificial a les zones mitja i baixa de la conca.

Morán *et al.* (2008) en estudis sobre la quantitat d'aigua retinguda en boscos del Sistema Central, assenyalen que una gran quantitat de bosc fa que la quantitat d'aigua que arriba al sòl i fins i tot als rius pot arribar a ser un problema de dèficit hidrològic. Davant d'aquest fenomen es pot obrir un debat de quina densitat arbòria ha de ser la sostenible, per evitar: processos de degradació com l'erosió del sòl; la quantitat d'aigua necessària perquè no hagi estres hídric als arbres; i afavorir que no hi hagi crescudes i inundacions a la part baixa de les conques. Aquí hi ha estudis que parlen de la necessitat de realitzar gestió forestal, per poder abastir de més aigua al sistema, evitar grans incendis forestals i també afavorir a l'economia local (Úbeda *et al.*, 2020). Un incendi forestal suposa un canvi dràstic de la dinàmica hidrològica sobre tot en els primers moments, hi ha menys o nul·la intercepció, menys capacitat d'infiltració, i més generació d'escolament a nivell de vessant i a nivell de conca (Velasco i Úbeda, 2015). Aquest fet ha estat reportat com un dels més importants en l'increment de transport de cendres i sediments en l'aigua d'escolament i que ha arribat a aterrar embassaments (Bladon *et al.*, 2014; Teclé i Neary, 2015). Wagener *et al.* (2010) proclamaven, ja fa 10 anys, que l'enfocament i la incidència cultural de la ciència de la hidrologia i amb ella disciplines associades com la geomorfologia

i l'ecologia (ciències fluvials, *river sciences*) han de canviar significativament per a què puguem predir i desenvolupar estratègies de gestió sostenible dels recursos hídrics, dels ecosistemes associats i per la seguretat de les persones i el medi ambient.

#### **1.4. Metamorfosi fluvial: Canvis multiescalars i multitemporals en la morfologia dels rius**

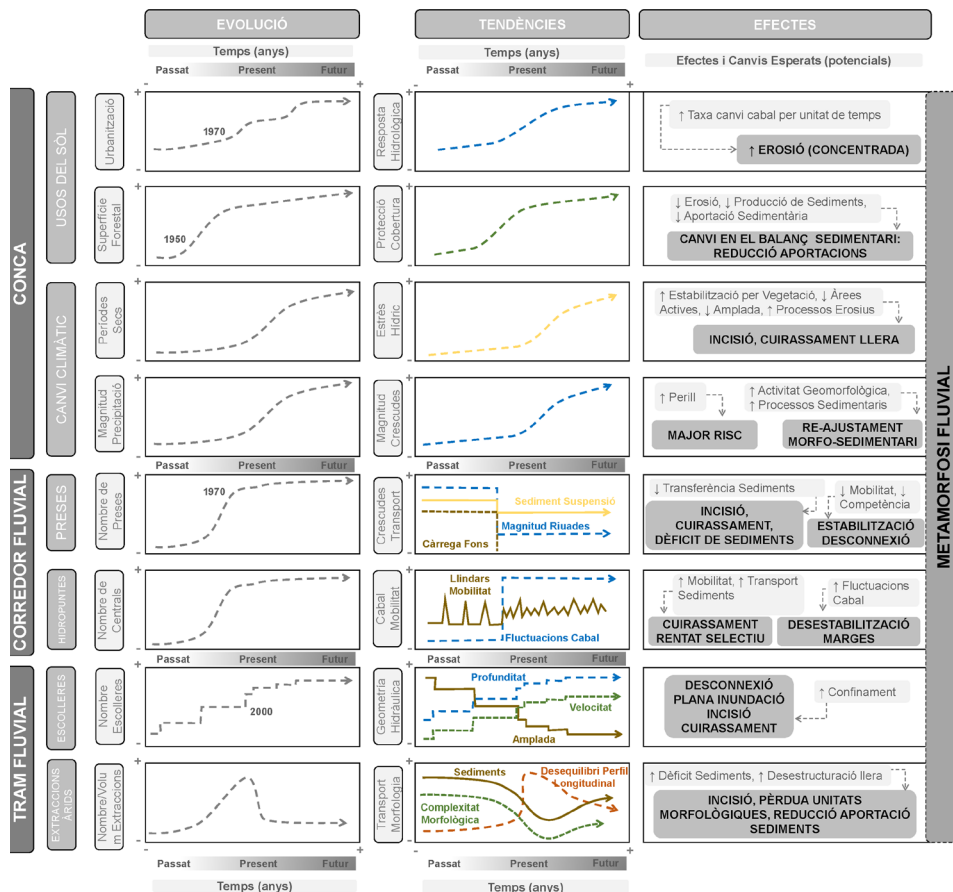
Tal i com hem explicat, de manera general, el canvi global té un paper clau sobre la dinàmica hidrosedimentària dels rius, en particular en àrees mediterrànies. El canvi global genera impactes hidrosedimentaris que es tradueixen en canvis en la transferència d'aigua i sediments al llarg de les conques fluvials, transferència que determina la forma de les lleres (traçat, morfologia, geometria). L'escala temporal i espacial en la que el canvi global afecta la dinàmica fluvial és variable (p. e. Downs *et al.*, 2013; Llana *et al.*, 2020). Per exemple, els efectes de les extraccions d'àrids a les lleres generen un canvi ràpid i localitzat en les característiques morfosedimentàries d'un tram fluvial, mentre que els efectes dels canvis dels usos del sòl poden ser considerats més lents tot i que afecten grans extensions. Per tal d'entendre la resposta hidrosedimentària de les conques és necessari considerar l'evolució i l'escala d'afectació dels diferents impactes, les tendències que aquests ocasionen sobre variables clau en els processos físics, i, per últim, els efectes i canvis esperats degut a aquestes (fig. 3). Així doncs, les característiques morfosedimentàries en un punt concret d'una conca responen als fluxos d'aigua i sediments, i, a la vegada, aquests estan condicionats per un seguit d'impactes que actuen a múltiples escales espacials i temporals i que propicien diferents efectes sobre la pròpia morfologia fluvial. La figura 3 mostra un diagrama conceptual d'aquestes interaccions que es tradueixen en una *metamorfosi fluvial* (p. e. Petts i Gurnell, 2005). Aquests terme indica que les característiques morfosedimentàries dels rius han canviat condicionades per les alteracions en els fluxos d'aigua i sediments al llarg de les conques, canvis que es veuen accentuats per impactes localitzats en les lleres que a la vegada condicionen la disponibilitat de sediments i la capacitat i competència fluvial. El grau de metamorfisme vindrà determinat per la magnitud i freqüència dels impactes (i. e. eficàcia del procés) i la pròpia sensibilitat del sistema (i. e. característiques morfosedimentàries de partida). Aquest *metamorfisme* fa que sigui necessari la percepció de les conques com són ara però dinàmiques, i que qualsevol estratègia de gestió fluvial es basi amb objectius específics però sense voluntat de reproduir les imatges històriques donat a que, entre d'altres condicionants, els fluxos d'aigua i sediments han sofert una canvi que en molts dels casos és irreversible.

De manera general, els impactes es poden fragmentar en tres escales espacials: conca, corredor fluvial i tram fluvial (fig. 3). La conca és la unitat principal, on els impactes s'acumulen amb el temps, cosa que condiciona una resposta

relativament lenta, processos de baixa magnitud però d'elevada freqüència (més constants en el temps). Les tendències en les variables clau ocasionades per aquests impactes determinaran uns efectes i canvis que requeriran de temps per tal de poder ser observats. Petts i Gurnell (2005) anomenaven aquest període com la *fase de reacció* del sistema. La durada d'aquesta fase estarà determinada, entre d'altres, per la magnitud de l'impacte, la grandària de la conca i el lloc on s'estudia el canvi. Un cop superada aquesta fase, les característiques morfo-sedimentàries d'un riu s'ajustaran al nou règim d'aigua i sediments imposat per les tendències en les variables clau degut als impactes (resposta). Aquest període correspon a la *fase d'ajust*. Els impactes a escala de conca es tradueixen en afectacions al llarg d'extensions grans (p. e. increment superfície forestal, canvis en la magnitud i freqüència de les precipitacions degut al canvi climàtic) i incideixen en nombrosos processos que condicionen la transferència d'aigua i sediments (fig. 3). Així doncs, la resposta hidrosedimentària de les conques està condicionada a múltiples estímuls (Downs *et al.*, 2013). Per exemple, una de les principals característiques de les zones de muntanya, àrees on es produeix la majoria de l'escolament, és el procés de reforestació (natural i induïda) que s'ha produït des dels anys 60 del segle xx, i que s'ha revisat de manera específica a l'apartat 1.3. Aquest procés ha generat uns impactes hidrosedimentaris que es tradueixen en canvis en la transferència d'aigua i sediments al llarg de les conques fluvials. Buendia *et al.* (2016), per exemple, analitzen l'impacte de la reforestació sobre la resposta de la conca de la Ribera Salada (Conca del Segre, Pirineu Català). Mitjançant la modelització hidrològica a escala de conca en base a la combinació de diferents escenaris d'usos de sòl i climàtics conclouen que l'augment de la cobertura forestal és el principal factor que controla la reducció (20%) del cabal durant el període 1971-2014. De la mateixa manera, l'elevada erosivitat dels episodis torrencials que es registren actualment associats als efectes del canvi climàtic és hipotèticament menor per l'efecte de protecció de la cobertura forestal. Aquest efecte de protecció del sòl, a la vegada que redueix el cabal circulant (n'augmenta la retenció), redueix, tot i que de manera marginal, la càrrega sedimentària que es transportava a mitjans del segle xx, fet que indica la baixa activitat geomorfològica de la conca. A més, la combinació de diferents escenaris ha permès estudiar quina seria la resposta sedimentària de la conca si la reforestació no hagués succeït. En aquest cas, els resultats indiquen que la càrrega sedimentària augmentaria mentre que els cabals es mantindrien, fet que reforça el paper de la coberta forestal sobre la reducció de la generació d'escolament, i sobre la protecció dels sòls, reduint l'erosió i producció de sediments durant els episodis més torrencials.

La resposta hidrosedimentària de les conques també genera una resposta a escala de corredor fluvial (fig. 3). Es tracta d'una escala més gran (extensió) que la de tram fluvial, inclou les àrees contigües a la llera que han estat o són necessàries per garantir la transferència d'aigua i sediments (plana d'inundació),

**Figura 3.** Metamorfosi fluvial: diagrama conceptual de la resposta hidrosedimentària de les conques en relació a l'evolució i l'escala d'afectació dels diferents impactes, les tendències que aquests ocasionen sobre variables clau en els processos físics i els efectes i canvis esperats degut a aquestes.



i garanteixen la connectivitat lateral, que a la vegada és determinant per als ecosistemes associats (p. e. vegetació de ribera). Les lleres són les responsables de transferir l'aigua i els sediments que es generen aigües avall. Durant les riades es succeeixen un seguit d'episodis d'erosió i sedimentació que actuen a múltiples escales temporals i que al final controlen la forma i el dinamisme de les lleres, incloent l'extensió i topografia de les planes d'inundació i la vegetació de ribera. En aquest cas, les preses (incloent les centrals hidroelèctriques) són un clar exemple d'infraestructures que condicionen la transferència d'aigua i sediments, tant en quan a la magnitud com en la freqüència d'aquesta, el que determinarà canvis en la mobilitat dels sediments grossers que conformen les lleres i en els processos associats (en el cas d'alguns exemples a Catalunya veure p. e. Batalla *et al.*, 2004; Vericat i Batalla, 2006; Vericat *et al.*, 2006; Batalla i Vericat, 2011; Vericat *et al.*, 2020). Aquestes infraestructures trenquen

la connectivitat longitudinal i transversal dels rius, i canvien els períodes en els quals el riu assoleix cabals suficients per transportar sediments (episodis competents), a la vegada que, de manera general, redueixen la transferència de sediments des d'aigües amunt. Aquestes tendències es tradueixen en un seguit d'efectes que comporten la incisió de les lleres amb una possible desconexió de les planes d'inundació, el rentat selectiu de partícules i augment de la mida dels sediments superficials de les lleres (i. e. cuirassament), l'estabilització dels marges mitjançant la intrusió de la vegetació de ribera ocupant àrees de la plana d'inundació que anteriorment eren inundades amb més freqüència però que ara no ho són degut a la reducció, i un dèficit de sediment aigües avall degut a la desconexió longitudinal del sistema que es tradueix en una estabilització de les lleres i una menor aportació de sediments a les zones deltaïques i les costes, entre d'altres (fig. 3).

Finalment, a escala de tram fluvial, es donen impactes molt acotats en el temps, ràpids, i que generen una resposta en els condicionants dels processos fluvials molt variable. La construcció d'esculleres o la canalització dels trams fluvials, conjuntament amb les extraccions d'àrids de les lleres són clar exemples (p. e. Batalla, 2003; Batalla *et al.*, 2007). Aquests impactes generen un seguit de canvis que es tradueixen en la degradació de les lleres mitjançant la desconexió lateral, la incisió i el cuirassament, l'estabilitat del traçat de les lleres i la reducció de l'aportació de sediments aigües avall (fig. 3).

## **2. La hidrologia del Glòria: precipitació-escolament**

L'episodi anomenat Glòria constitueix un bon exemple de la dinàmica hidrosedimentària i de les conseqüències en les conques fluvials que s'han exposat als apartats anteriors, ja que és un d'aquests grans episodis de baixa freqüència però d'elevada magnitud que altera de forma considerable els sistemes fluvials. L'episodi, però, s'inicia amb l'entrada d'aigua a les conques fluvials, procedent de la pluja, i que és la responsable de desencadenar tots els processos hidrogeomorfològics posteriors.

### **2.1. Les precipitacions**

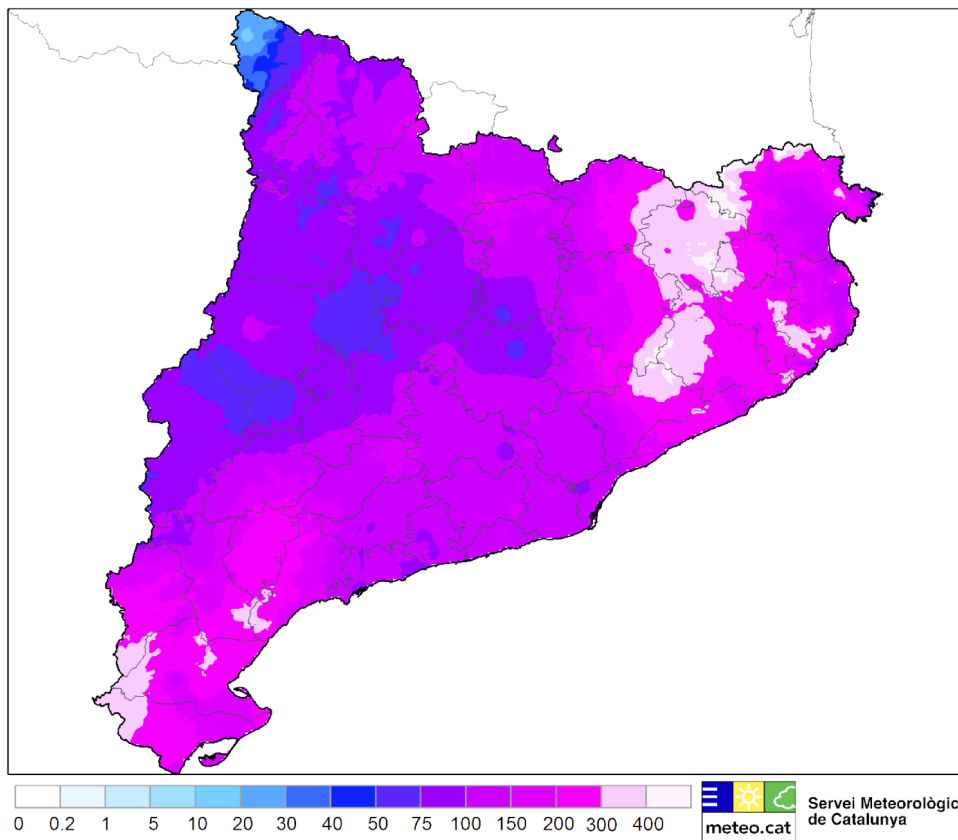
La característica principal de les pluges registrades durant l'episodi Glòria va ser la persistència. Les pluges es van produir durant quatre dies consecutius, i les magnituds de les precipitacions han estat territorialment desiguals. La figura 4 mostra la distribució territorial de les pluges a Catalunya (Servei Meteorològic de Catalunya, 2020) durant l'episodi. A les Terres de l'Ebre es van assolir els 200 mm, igual que a les comarques gironines. A més, es van produir registres superiors als 300 mm i puntualment es van assolir els 400 mm de pluja acumulada en zones localitzades del Montseny, la Garrotxa i

Ripollès. La zona central de Catalunya i les comarques de Lleida van registrar acumulacions inferiors als 100 mm.

### Figura 4

#### Precipitació acumulada (mm) Del 19 al 23 de gener de 2020

S'ha obtingut a partir de 293 pluviòmetres de la XEMA i de la XOM



Font: Servei Meteorològic de Catalunya

La taula 1 mostra les precipitacions diàries registrades en diferents estacions d'aforament que també disposen de pluviòmetre. La conca de la Tordera a Sant Celoni va acumular pràcticament 400 mm de precipitació. Les conques del Fluvià i del Ter a Esponellà, Sant Joan de les Abadesses i Girona respectivament, van registrar acumulacions compreses entre els 230 i 270 mm. Les conques de la Muga, Besòs i Llobregat van registrar valors entre 100 i 160 mm i finalment, les conques del sud (Foix, Gaià i Francolí) les pluges acumulades van ser entre els 70 i 90 mm.

**Taula 1.** Dades pluviomètriques registrades a diferents punts de la xarxa de control fluvial de l'Agència Catalana de l'Aigua

PLUVIÒMETRE	CONCA	Precipitació diària durant l'episodi (mm)				TOTAL
		20/01/2020	21/01/2020	22/01/2020	23/01/2020	
EA088 Perlada	MUGA	38,4	28,8	28,1	16,2	111,5
EA016 Esponella	FLUVIÀ	39,3	63,5	97,6	29,8	230,2
EA072 St. Joan de les Abadesses	TER	0,0	109,4	121,8	36,3	267,5
EA020 Girona-Onyar	TER	77,1	106,1	42,0	19,8	245,0
EA015 Sant Celoni	TORDERA	16,4	263,5	96,2	20,5	396,6
EA089 Fogars de la Selva	TORDERA	35,6	62,2	34,6	11,1	143,5
EA037 La Garriga*	BESÒS	11,1	105,1	60,8	43,4	220,4
EA047 Sta. Coloma de Gramenet	BESÒS	6,8	64,6	12,2	15,8	99,4
EA078 Guardiola de Berguedà	LLOBREGAT	0,0	31,5	88,7	44,7	164,9
EA049 Sant Joan Despi	LLOBREGAT	6,4	85,2	2,0	6,8	100,4
EA008 Castellet i la Gornal	FOIX	0,4	59,1	2,9	16	78,4
EA007 Vilabella de Gaià	GAIÀ	0,2	70,6	2,2	0,0	73,0
EA079 Tarragona**	FRANCOLÍ	0,8	60,1	14,6	16,6	92,1
EA041 Sitruana	SITRANA	3,8	69,5	57,2	46,2	176,7

\* Les dades corresponen al pluviòmetre de Tagamanent (Font: Servei Meteorològic de Catalunya)

\*\* Les dades corresponen al pluviòmetre de Constanç (Font: Servei Meteorològic de Catalunya).

Aquestes dues estacions no disposen de pluviòmetre.



La taula 1 també mostra les acumulacions en 24 hores dels pluviòmetres triats. A excepció del pluviòmetre de Sant Celoni, que va registrar un màxim de 260 mm acumulats en 24 hores, les acumulacions diàries de la resta de pluviòmetres no indiquen registres excepcionals. De fet, cal tenir en compte que l'episodi de pluges registrat el 4 i 5 de desembre de 2019, també va assolir precipitacions acumulades de 100 mm a les conques de la Tordera, Ter i Fluvià, de manera que el sòl es trobava amb una condició d'humitat antecedent alta.

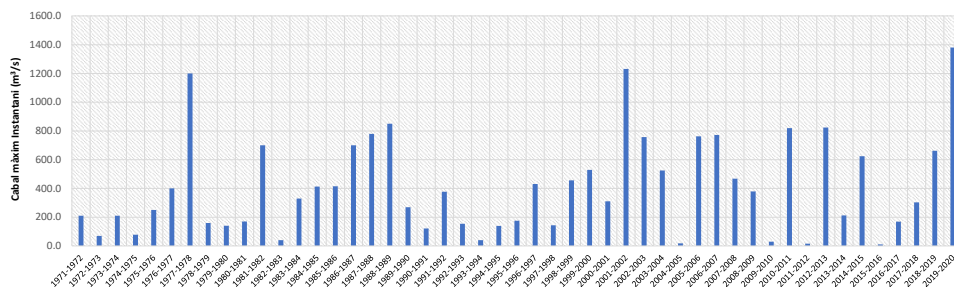
## 2.2. Les crescudes

La persistència de les pluges i les quantitats acumulades que en van resultar van provocar crescudes que a les conques del Fluvià, Ter i Llobregat van superar, i de llarg, el llindar dels 1000 m<sup>3</sup>/s com a cabal màxim instantani ( $Q_{ci}$ ) (taula 2). Tot i això, cal distingir les crescudes que s'han produït a les conques que no tenen embassament, és a dir, les conques no regulades, de les crescudes a les conques regulades, ja que tant a la conca del Ter com a la del Llobregat, aquest pic ha estat produït per l'alliberament de cabal procedent de la regulació dels embassaments.

### Crescudes a conques no regulades

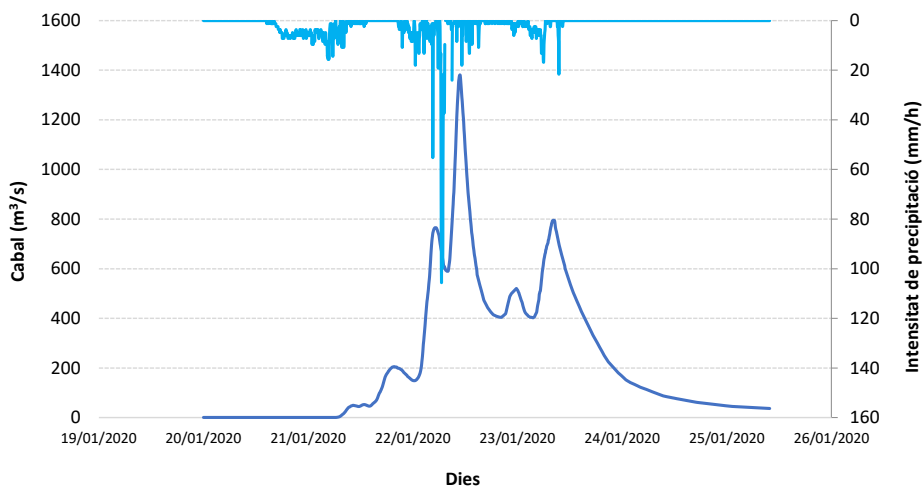
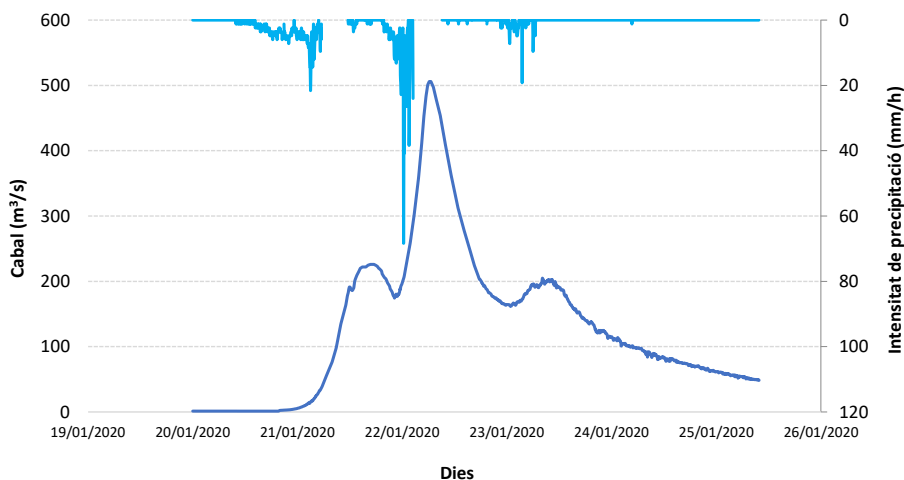
La crescuda de major magnitud durant l'episodi es va produir al riu Fluvià, amb un cabal màxim de 1380 m<sup>3</sup>/s a l'estació d'aforament d'Esponellà (taula 2). Aquest és el valor més elevat que s'ha registrat en aquesta estació en el període 1971-2020. Només en altres dues ocasions s'havien superat els 1000 m<sup>3</sup>/s: *i*) l'any 1977-78 es van registrar 1200 m<sup>3</sup>/s i *ii*) l'any 2001-02 es van assolir 1231 m<sup>3</sup>/s (fig. 5). La figura 6 mostra l'hidrograma de la crescuda i el hietograma associat. La crescuda del riu està íntegrament relacionada amb l'escolament produït per les precipitacions i l'arribada dels diferents afluents del riu. A part de la conca del Fluvià, hi ha hidrogrames de formes semblants en aquelles conques no regulades i els diferents pics de crescuda estan associats als ritmes de la precipitació. Les conques de la Tordera i el Besòs van registrar cabals màxims de poc més de 500 m<sup>3</sup>/s (fig. 7 i 8).

**Figura 5.** Registre de cabals màxims instantanis a l'estació d'aforament d'Esponellà (1971-2020)



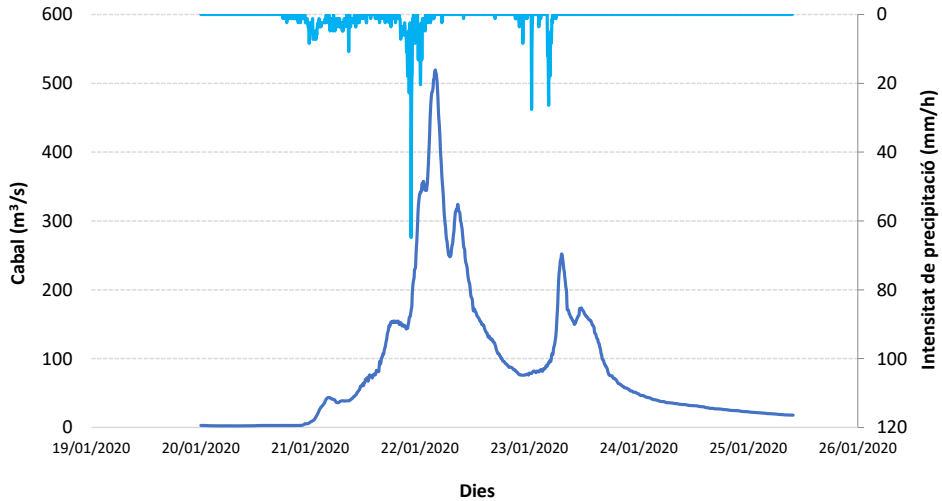
**Taula 2.** Cabals màxims instantanis ( $Q_d$ ) durant els dies de l'episodi Glòria a diverses estacions d'aforament. En negreta els registres que han superat els 1000 m<sup>3</sup>/s

ESTACIONS D'AFORAMENT	CONCA	20/1/2020	21/1/2020	22/1/2020	23/1/2020	24/1/2020
		$Q_d$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_d$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_d$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_d$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_d$ (m <sup>3</sup> /s)
EA052 Castelló d'Empúries	MUGA	4,3	177,9	390,3	240,1	120,3
EA016 Esponellà	FLUVIÀ	0,4	204,9	<b>1381,0</b>	795,1	163,2
EA072 St. Joan de les Abadesses	TER	3,5	67,8	160,2	169,8	53,6
EA010 Girona	TER	17,2	283,4	696,4	<b>1070,0</b>	626,0
EA015 Sant Celoni	TORDERA	1,7	182,3	269,6	90,3	26,5
EA089 Fogars de la Selva	TORDERA	5,4	226,0	505,8	204,9	114,6
EA047 Sta. Coloma de Gramenet	BESÒS	7,9	338,7	519,4	252,0	48,1
EA078 Guardiola de Berguedà	LLOBREGAT	0,4	1,6	96,4	214,1	68,0
EA049 Sant Joan Despí	LLOBREGAT	7,2	188,4	513,6	<b>1330,0</b>	<b>1314,1</b>
EA008 Castellet i la Gornal	FOIX	0,2	31,1	36,0	16,1	1,5
EA007 Vilabella de Gaià	GAIÀ	0,2	11,5	32,2	22,8	7,0
EA079 Tarragona	FRANCOLÍ	1,7	14,4	14,4	116,5	18,9
EA041 Siturana	SIURANA	0,1	15,2	37,0	93,0	14,7

**Figura 6.** Hidrograma i hietograma de crescuda del riu Fluvià a Esponellà**Figura 7.** Hidrograma de crescuda i hietograma del riu Tordera a Fogars de la Selva (Can Simó)

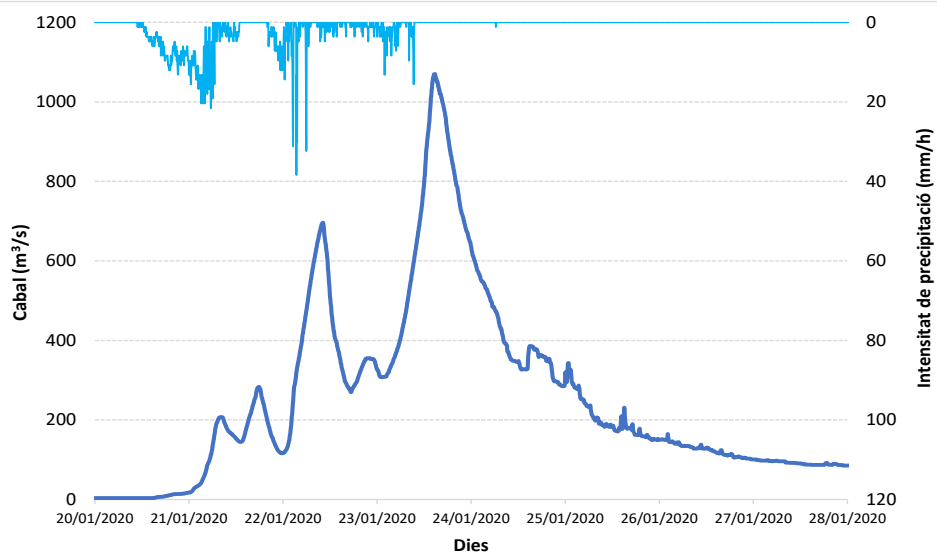
### Crescudes a conques regulades

A diferència dels hidrogrames de les conques no regulades, els de les conques regulades presenten diferències en la forma de l'episodi de crescuda. Han perdut la relació temporal entre la pluja i el registre respon a la gestió duta a terme als embassaments. La tendència general és l'endarreriment del pic de la crescuda, així com la reducció de tres a un sol pic. En el cas de l'hidrograma de crescuda del Ter a Girona, la crescuda mostra un únic pic que va superar els 1000 m<sup>3</sup>/s però que no respon al patró de pluja (fig. 9) i que es deu a la gestió que es va dur a terme als embassaments de Sau i Susqueda.

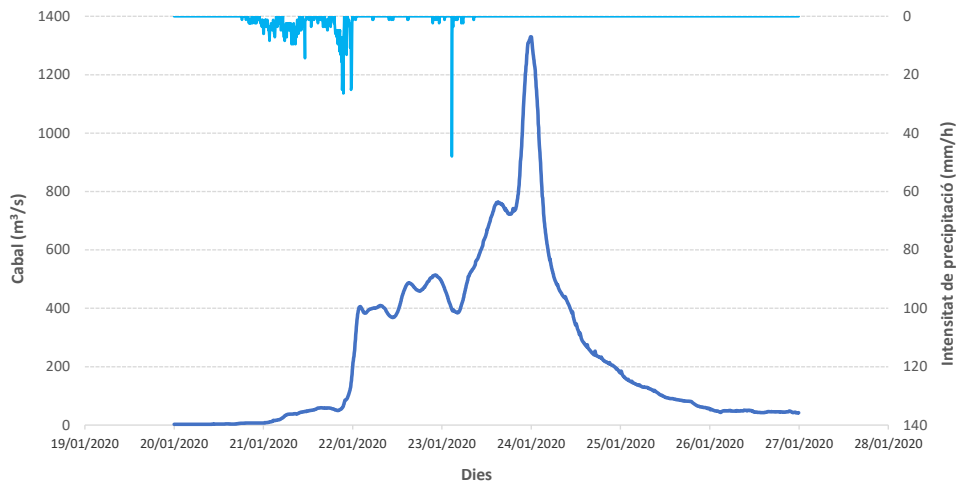
**Fig. 8.** Hidrograma de crecuda i hietograma del riu Besòs a Santa Coloma de Gramenet

Les pluges recollides al riu Llobregat i la forma de l'hidrograma de l'estació de Sant Joan Despí (fig. 10) mostren que el riu respon al ritme de pluges, amb un cabal al voltant dels 500 m<sup>3</sup>/s durant el pic de l'episodi. En canvi, el pic de l'hidrograma es va disparar durant el tercer i quart dia d'episodi i respon a la gestió dels embassaments de la conca. El pic de cabal màxim és asincrònic respecte les pluges i indica l'arribada de l'onada posteriorment i afegida al cabal que ja hi circulava (fig. 10).

Un fet semblant va passar a la conca del riu Siurana on es va registrar un cabal pic de fins a 90 m<sup>3</sup>/s, el tercer dia de l'episodi, que respon a les maniobres

**Fig. 9.** Hidrograma de crecuda i hietograma del riu Ter a Girona

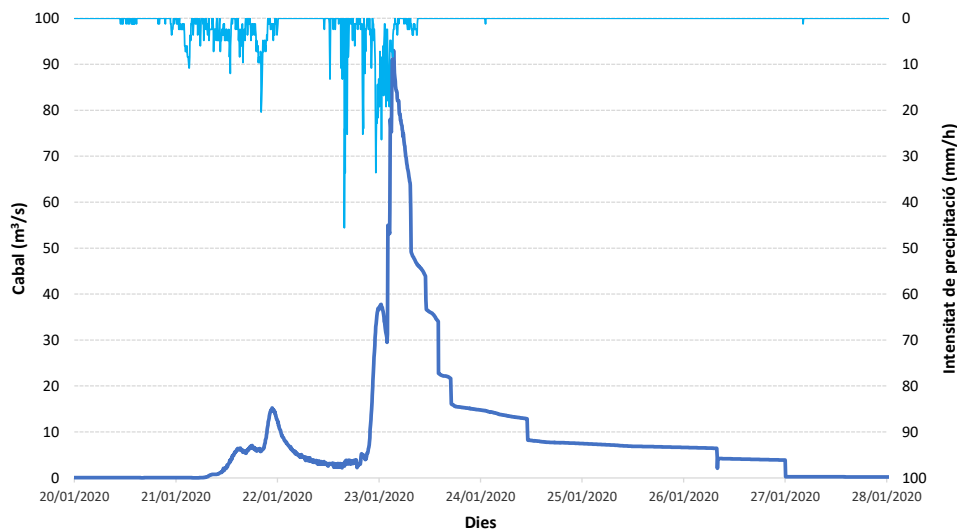
**Fig. 10.** Hidrograma de crecuda i hietograma del riu Llobregat a Sant Joan Despí

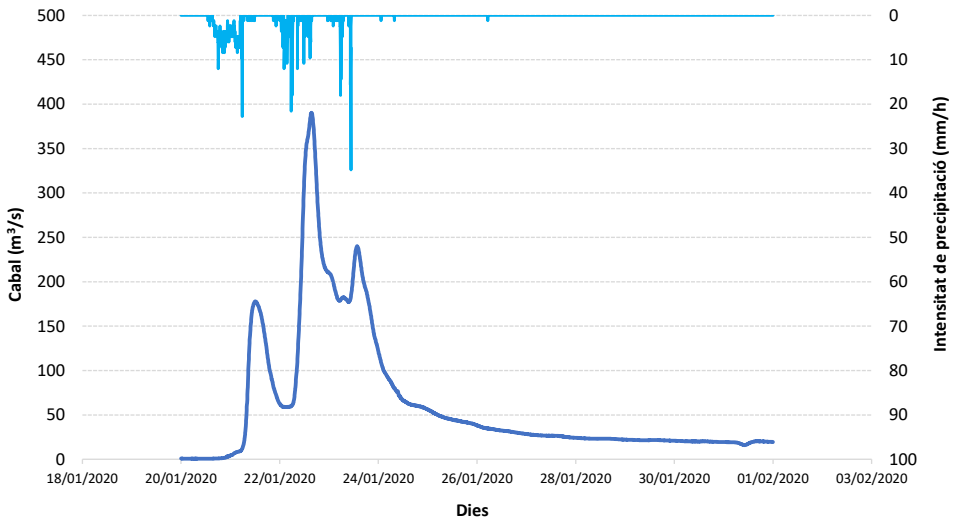


de gestió de l'embassament de Siurana i que van disparar el cabal en aquesta conca (fig. 11). L'esglaonament que s'observa durant la recessió de la crecuda indica de nou les maniobres de tancament de les comportes de l'embassament.

Finalment, a la conca de la Muga el comportament va ser al contrari: la gestió de l'embassament va esmorteir la magnitud de la crecuda ja que va retenir el cabal de la capçalera del riu i la crecuda a la desembocadura va ser de 400 m<sup>3</sup>/s (fig. 12).

**Fig. 11.** Hidrograma i hietograma de crecuda del riu Siurana a Cornudella de Montsant



**Fig. 12.** Hidrograma i hietograma de crescuda de la Muga a Castelló d'Empúries

## 2.2. El context hidrològic de l'episodi Glòria

Per il·lustrar de forma breu el concepte de magnitud i freqüència descrits en apartats anteriors, la informació que es mostra a la taula 3 mostra la freqüència d'ocurrència dels cabals màxims instantanis, és a dir, el cabal més alt de cada any, a les estacions d'aforament seleccionades. La durada de les sèries és diferent en cada cas, però representen anys consecutius.

**Taula 3.** Freqüència d'ocurrència de cabals màxims instantanis a les diferents estacions d'aforament

	EA010 Girona	EA049 Sant Joan Despí	EA016 Espanellà	EA089 Fogars de la Selva	EA047 Santa Coloma de Gramenet	EA052 Castelló d'Empúries
Percentil 25	50,3	194,2	153,9	30,3	79,8	83,2
Percentil 50	138,8	450,7	330,0	141,1	117,5	287,9
Percentil 75	324,8	660,2	662,8	190,7	187,4	612,7
Percentil 95	997,5	1036,9	1060,0	280,0	525,7	797,8
Percentil 98	1041,0	1262,0	1237,0	424,0	540,7	868,3
Nombre anys	18	15	49	21	17	24

Les dades de la taula 3 mostren que com més alt sigui el percentil més baixa és la freqüència d'ocurrència del cabal indicat. Els cabals màxims registrats durant l'episodi Glòria tenen una baixa freqüència de produir-se a la majoria de les estacions d'aforament. Als rius Ter, Llobregat, Fluvià i Tordera, els pics

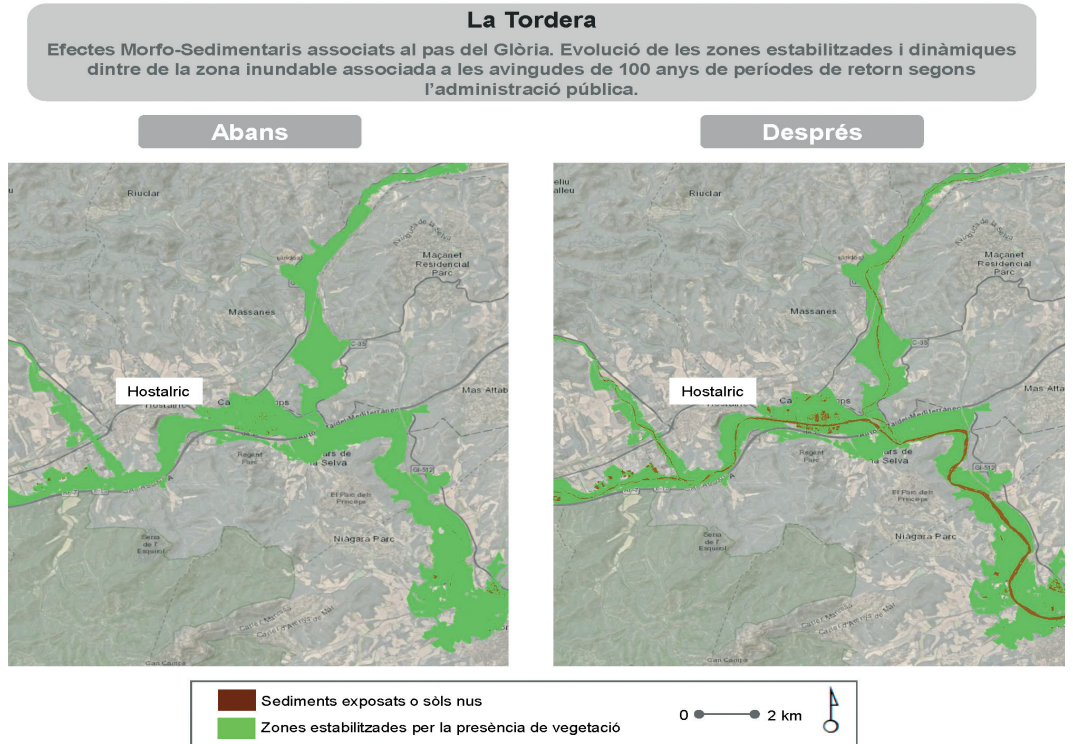
registrats tenen una freqüència d'ocurrència inferior al 2% del període considerat. A la conca del Besòs (Santa Coloma), la freqüència augmenta fins a un 5%, però en canvi a la Muga la freqüència és superior al 25% (i. e. veure pics de cabal a la taula 2). Cal tenir en compte que a les conques regulades els cabals han estat modificats per l'acció dels embassaments, augmentant-ne la magnitud del pic de la riuada en els casos del Ter i el Llobregat o esmorteint-ne el pic en el cas de la Muga.

### **3. La memòria dels rius: ajusts morfosedimentaris a episodis com el Glòria**

Tal i com s'ha explicat anteriorment, la majoria de les conques han sofert una *metamorfosi fluvial* conduïda pel canvi global, donant resposta a múltiples estímuls que actuen a múltiples escales temporals i espacials (fig. 3). Les lleres tenen tendència a l'estabilització i a la constricció degut a un menor dinamisme com a resultat dels processos descrits, incloent les actuacions sobre el riu (canalització, esculleres), amb efectes sobre la magnitud de les inundacions, i el funcionament de l'ecosistema fluvial (p. e. desconnectivitat). A més, l'increment de la pressió sobre el territori, que condiciona alguns dels impactes descrits (p. e. urbanització, esculleres) també condiciona l'exposició i vulnerabilitat, canviant el risc potencial al llarg dels corredors fluvials. Tot i això, tal i com descriu Hinderer *et al.* (2013) en el cas de les conques de muntanya, episodis extrems podem propiciar un efecte de *memòria* a partir de l'augment del subministrament i disponibilitat de sediments, i l'amplificació de la carga sedimentària a posteriori (p. e. Rickenmann *et al.*, 1998). L'augment de la disponibilitat de sediments es pot donar tant pels processos erosius en zones de capçalera (p. e. esllavissades) com pels que tenen lloc a les parts baixes de les conques, a partir de la recuperació de part del corredor fluvial actualment desconnectat, mitjançant, per exemple, la recuperació de canals secundaris i l'erosió de marges i la conseqüent eliminació de la vegetació de ribera. Aquests processos permeten reconnectar la llera amb la plana d'inundació. Així doncs, tot i aquesta situació d'estabilitat en la qual es troben molts dels rius, no s'ha d'oblidar la seva *memòria* i la capacitat que tenen per 'recuperar' part del seus espais quan les condicions de transferència d'aigua i sediments assoleix els llindars necessaris. La magnitud dels canvis morfosedimentaris ocasionats per aquests tipus d'episodis no estarà tan sols condicionada per la pròpia magnitud de l'esdeveniment, les condicions anteriors a aquest, així com el grau de reactivació sedimentària de la conca, seran factors que poden condicionar la magnitud dels ajustos. Conseqüentment, respostes hidrosedimentàries extremes poden o no ser la resposta a episodis extrems. El cas del Glòria és un clar exemple. Les figures 13, 14 i 15 mostren el canvi en la superfície de sediments exposats o sòls nus després d'aquest episodi.

Es tracta d'una anàlisi molt simple a partir de tècniques de teledetecció però que permet constatar aquesta idea de la *memòria dels rius*. S'han obtingut dues imatges de satèl·lit Sentinel-2 de 10 metres de resolució espacial (Agència Espacial Europea), una d'abans del Glòria i una altra obtinguda després. A partir d'aquestes imatges s'ha calculat l'índex de vegetació o també conegut com NDVI (de l'anglès *Normalized Difference Vegetation Index*). Per tal de focalitzar l'anàlisi a l'amplada del corredor fluvial, l'extensió de la cartografia s'ha delimitat en funció de la cartografia de la zona inundable associada a un període de 100 anys de període de retorn segons l'administració pública (Agència Catalana de l'Aigua i Confederació Hidrogràfica de l'Ebre).

**Figura 13.** Efectes morfosedimentaris del Glòria a la Tordera: processos erosius i de sedimentació que afavoreixen l'aparició d'unitat morfològiques i la reconexió transversal de les lleres



Dates; (i) abans: 13-01-2020; (ii) després: 02-02-2020

Els valors de NDVI s'han reclassificat en dues classes majoritàries, indicant estabilitat (zones estabilitzades per la presència de vegetació en major o menor densitat, color verd) i inestabilitat o zones actives (àrees sense vegetació, amb sediments, o sòls nus, color marró). En tots tres rius s'observen els mateixos canvis, tot i que l'escala de visualització dels resultats és diferent. En el cas de la Tordera (fig. 13), hi ha un increment d'àrees inestables i actives seguint la

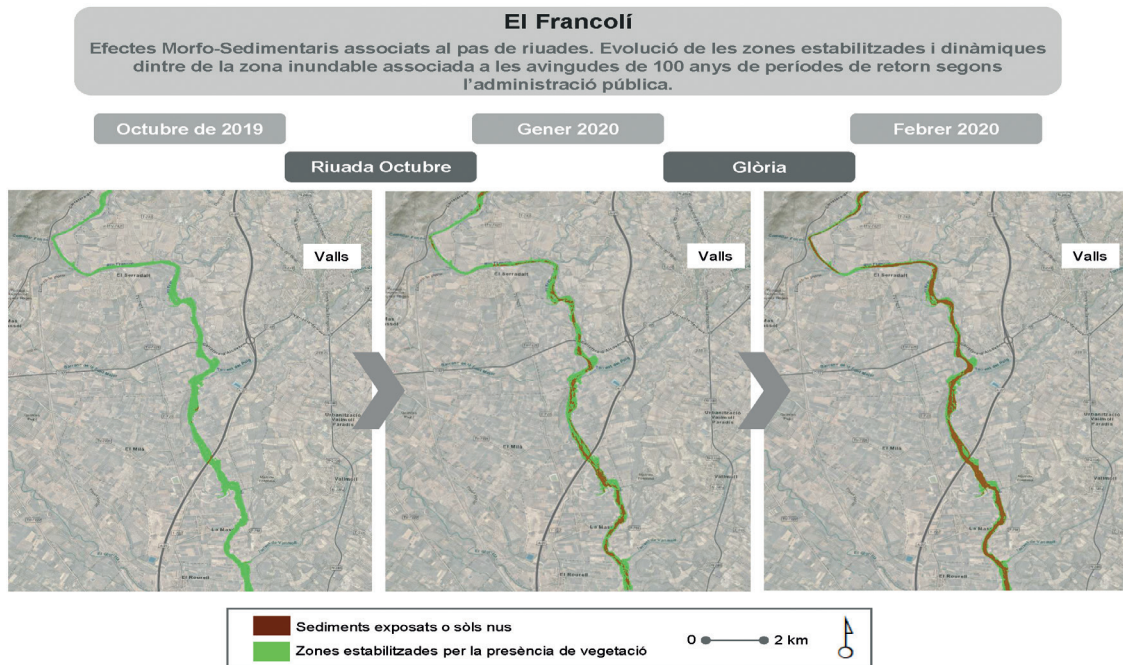


totalitat del corredors fluvial al llarg de la conca. Abans del pas del Glòria, el riu mostrava una elevada estabilitat, la presència d'àrees exposades era mínim (tenint en compte la resolució de les imatges), mentre que després del pas del Glòria s'observen noves àrees actives a la llera. Tal i com mostra la figura 13 en el cas de la Riera de Santa Coloma i de la pròpia Tordera, apareixen noves unitat morfosedimentàries (barres fluvials), s'observen processos d'erosió lateral i es redueix considerablement la quantitat de vegetació de ribera.

En el cas del Francolí (fig. 14), l'escala d'anàlisi és més detallada i es pot observar com l'extensió de les zones estables respectes les actives s'inverteix després del Glòria. Observacions més detallades, mostren com processos similars als descrits anteriorment han estat els responsables de la significant reducció de la vegetació de ribera, la connexió de les lleres amb les planes d'inundació i en l'establiment de noves unitats morfosedimentàries a la llera. De manera general, l'amplada activa de la llera ha augmentat al mateix temps que aquesta ha guanyat connectivitat, tal i com clarament es mostra en el cas del Siurana (fig. 15). Aquests processos descrits en el cas de la Tordera també s'observen en altres rieres com el cas de la d'Osor i de la de Llémna, totes dos a la conca del Ter (fig. 16), i al propi Ter o al Llobregat (fig. 17).

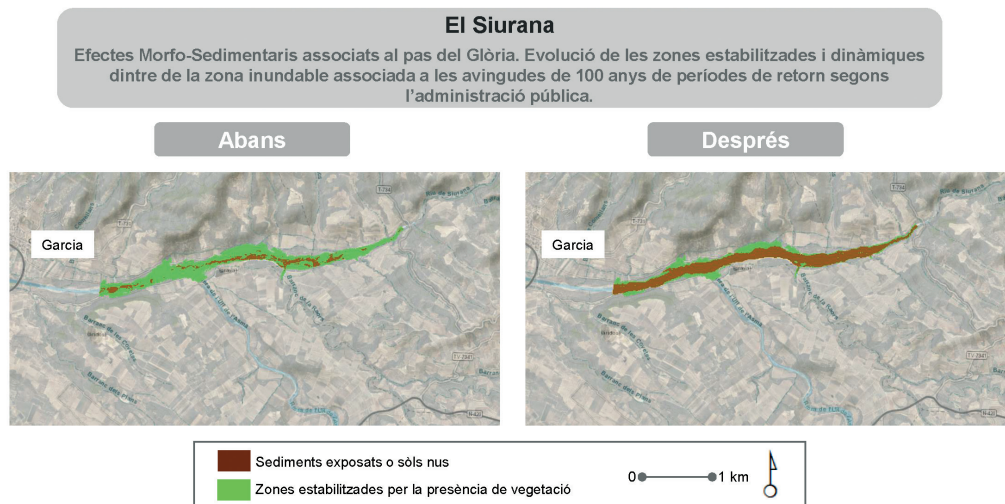
Al Francolí (fig. 14) també s'ha realitzat la mateixa anàlisi per a la riuada d'octubre de 2019. En aquest cas, es poden veure tres imatges d'un corredor fluvial d'uns 12 km de longitud que ha estat subjectes a dos esdeveniments d'elevada magnitud en tres mesos. Tal i com s'observa a la figura 14, la riuada d'octubre genera una activació morfosedimentària del sistema, que es tradueix en l'aparició d'àrees actives al llarg del corredor fluvial. Aquestes àrees estan condicionades per processos erosius (p. e. erosió lateral, incisió) i per processos de sedimentació (p. e. creació de noves barres fluvials, sedimentació de fins a sobre de les planes d'inundació). La riuada d'octubre va ocasionar grans desperfectes associats a habitatges i infraestructures properes a la llera entre d'altres. Així doncs, el Glòria, es troba amb un sistema desestabilitzat amb major connectivitat lateral i, tot i que a nivell hidrològic la riuada associada al Glòria al Francolí va ser de menor magnitud que a les conques del nord de Catalunya, la resposta morfosedimentària del sistema és similar a l'observada en aquests. Així doncs, tal i com s'ha apuntat anteriorment, la dualitat freqüència i magnitud són dos aspectes claus a considerar, tenint en compte la situació antecedent del sistema i les pròpies característiques d'aquest que condicionaran els llindars a partir dels quals succeeixen els canvis. Observacions més detallades sobre la situació post-Glòria (fig. 17) mostren com processos similars als descrits anteriorment han estat els responsables de la significant reducció de la vegetació de ribera, la connexió de les lleres amb les planes d'inundació i en l'establiment de noves unitats morfosedimentàries a la llera. De manera general, l'amplada activa de la llera ha augmentat al mateix temps que aquesta ha guanyat connectivitat, tal i com clarament s'ha mostrat en el cas del Siurana (fig. 15).

**Figura 14.** Efectes morfosedimentaris del Glòria al riu Francolí: processos erosius i de sedimentació que afavoreixen l'aparició d'unitat morfològiques i la reconexió transversal de les lleres.



Dates; (i) Octubre 2020: 03-10-2020; (ii) Gener 2020: 11-01-2020; (iii) Febrer 2020: 10-02-2020

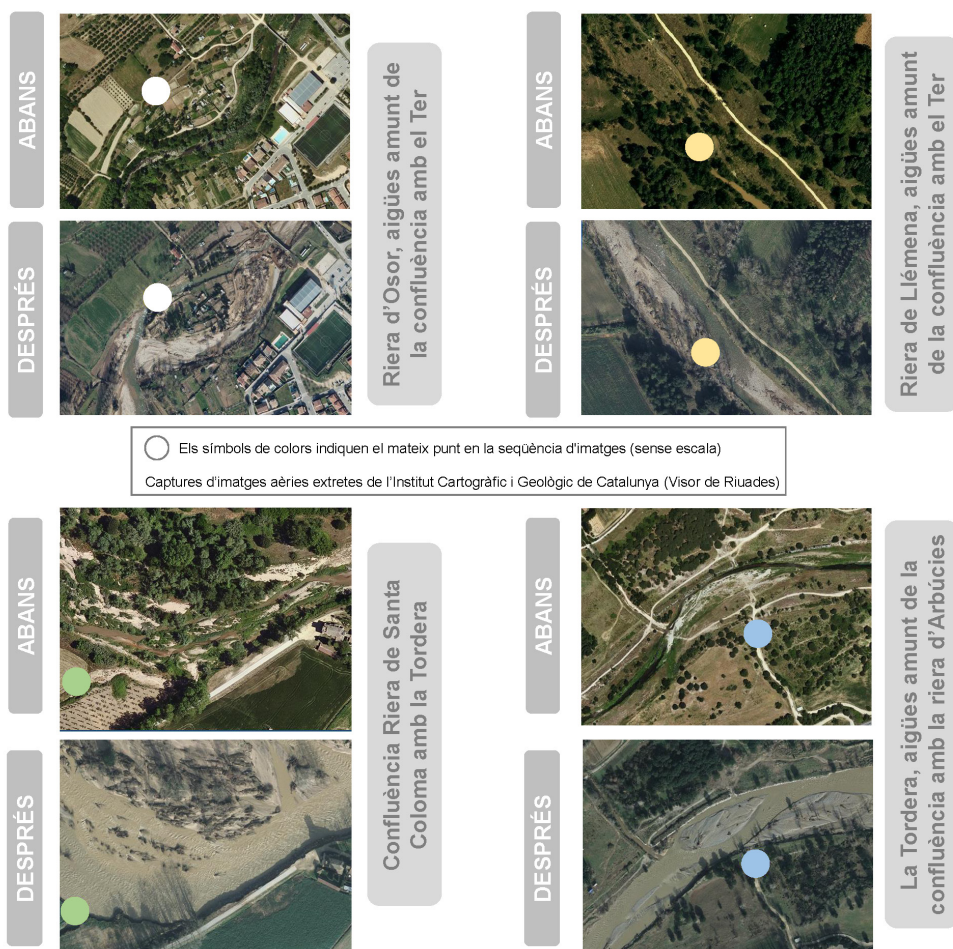
**Figura 15.** Efectes morfosedimentaris del Glòria al riu Siurana: processos erosius i de sedimentació que afavoreixen l'aparició d'unitat morfològiques actives i la reconexió transversal de les lleres.



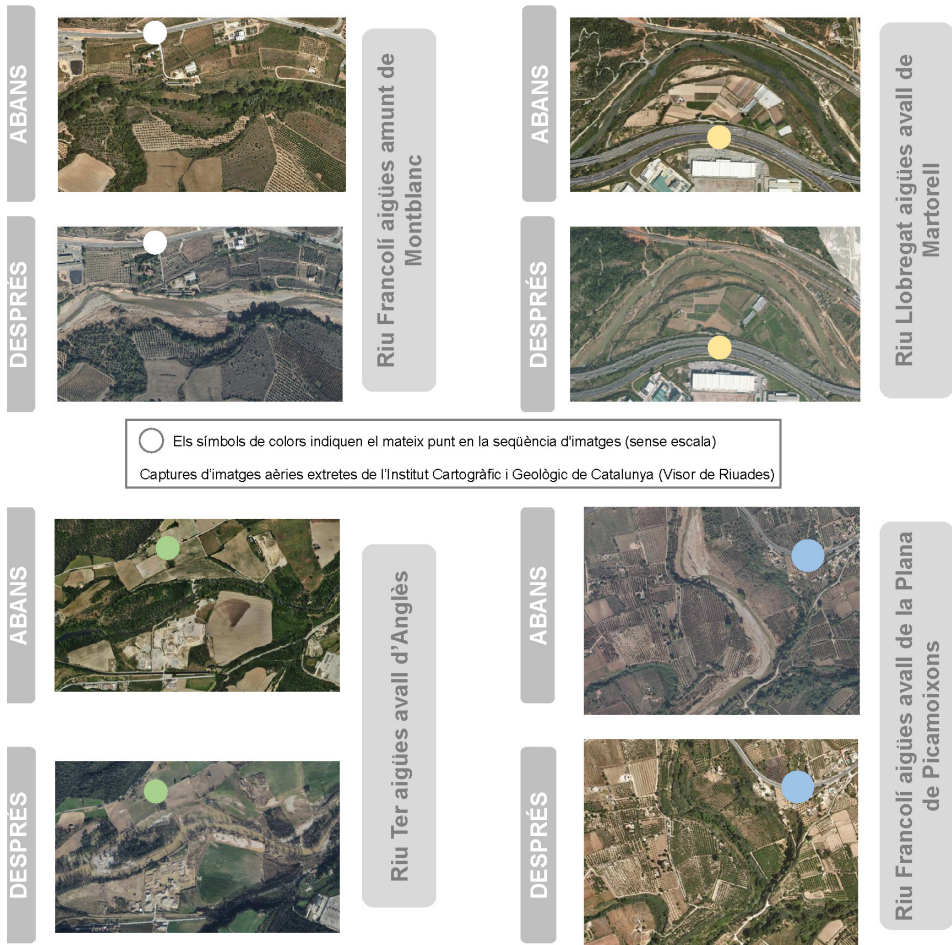
Dates; (i) abans: 11-01-2020; (ii) després: 10-02-2020

De manera general, la cartografia que es mostra en aquestes figures (fig. 13, 14, i 15) i les fotografies aèries abans i després del Glòria (fig. 16 i 17) indiquen un augment de les zones actives després d'aquest episodi. Aquest increment significa un augment dels processos erosius, la desaparició d'àrees estables (i. e. color verd a les figures 13, 14 i 15), la recuperació de zones del corredor fluvial que el riu històricament havia utilitzat per optimitzar la transferència d'aigua i sediments aigües avall i que actualment, degut a la *metamorfosi fluvial* descrita (fig. 3), es consideraven desconnectades (i en moltes ocasions definitivament 'colonitzades' per l'home), i l'aparició de noves unitats morfosedimentàries (fig. 16 i 17). Específicament, l'anàlisi detallada d'aquesta informació ens mostra: *i)* Canvis en el traçat de les lleres; *ii)* Processos d'erosió lateral; *iii)* Reconnexió del riu amb les planes d'inundació; *iv)* Recuperació de canals secundaris abandonats; i *v)* Mobilització d'unitats morfològiques estabilitzades per la vegetació de ribera i creació de noves unitats.

**Figura 16.** Processos erosius i sedimentaris associats al pas del Glòria en diferents trams fluvials (exemples de les conques de la Tordera i el Ter)



**Figura 17.** Processos erosius i sedimentaris associats al pas del Glòria en diferents trams fluvials (exemples de les conques del Ter, el Francolí i el Llobregat)



#### 4. Consideracions finals

Marc Aureli (s. II, Roma, 121-Vindonona, 180 dC) va deixar escrit que “el temps és una mena de riu de coses que passen, i el més fort és el seu corrent; tan aviat una cosa ens es mostrada com és escombrada, i una altra hi pren el lloc, fins que també sigui arrasada”.

El Glòria va ser un episodi hidroclimàtic de molt alta magnitud que per a molts rius a Catalunya va suposar un reforma completa de l'estructura física (morfologia) i un reinici del seu funcionament com a ecosistema. Les dades aportades i les anàlisis aquí realitzades assenyalen que en els rius estudiats (una bona mostra de nord a sud del país) els cabals associats al temporal van assolir magnituds molt importants, que provocaren canvis profunds en la morfologia

de les lleres, van inundar planes d'inundació, van reconnectar braços abandonats, van provocar fenòmens d'incisió generalitzats, i van eixamplar el canal de manera molt important. Tot plegat, va contribuir a reactivar els sistemes fluvials, i a afegir un estadi més en el procés de continu metamorfisme que aquests dinàmics sistemes experimenten. Malgrat la severitat del Glòria, l'estudi ha permès constatar també el paper de les infraestructures hidràuliques en la modificació dels hidrogrames de crescuda en aquells rius que estan regulats per grans preses.

Com s'ha explicat en el treball, el Glòria va trobar rius confinats per l'activitat antròpica continuada durant dècades, amb els balanços de sediments *esgotats* i en una situació de forta desconexió hídrica i sedimentària amb la conca (canvis usos del sòl i profundes alteracions de la xarxa de drenatge). Tot i així van ser suficients només unes hores de pluja intensa (d'intensitat molt important però no extrema) i la corresponent resposta hidrològica de les conques en forma de cabals d'alta magnitud, aportant energia suficient transformada en treball efectiu, per superar molts dels llindars físics que se'ls havia anat imposant i canviar completament la morfologia de les lleres i valls afectades. La reacció dels sistemes fluvials és ja coneguda i ha quedat fefaentment il·lustrada en aquest treball.

M. Gordon Wolman i John P. Miller animaven als lectors del seu treball publicat fa ara 60 anys a continuar observant i analitzant *episodis formadors* per calibrar-ne la seva importància relativa dins del cicle geogràfic, fent avançar d'aquesta manera el coneixement sobre els rius i les conques i, alhora, apuntalant el cos teòric de la geomorfologia com a ciència de la terra i d'aplicació a la gestió dels corredors fluvials. Fenòmens hidroclimàtics com l'analitzat ens obren els ulls de tant en tant sobre l'estat i el funcionament dels nostres sistemes fluvials, i en palesen la seva reacció. En aquest context, episodis com el Glòria ofereixen renovades oportunitats per millorar la gestió d'uns dels sistemes naturals més complexos, els rius, que caldria aprofitar.

## Bibliografia

- ALVAREZ-ROGEL, J.; F. J. JIMENEZ-CARCELES; M. J. ROCA; R. ORTIZ (2007). "Changes in soils and vegetation in a Mediterranean coastal salt marsh impacted by human activities". *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, núm. 75, p. 10-526.
- ARANZABAL, I. DE; M. F. SCHMITZ; P. A. AGUILERA; F. D. PINEDA (2008). "Modelling of landscape changes derived from the dynamics of socio-ecological systems: A case of study in a semiarid Mediterranean landscape". *Ecological Indicators*, núm. 8(5), p. 672-685.
- BADIA, A.; A. PALLARES-BARBERA; N. VALLDEPERAS; M. GISBERT (2019). "Wildfires in the wildland-urban interface in Catalonia: Vulnerability analysis based on land use and land cover change". *Science of the Total Environment*, núm. 673, p. 184-196.
- BADIA, A.; I. OTERO; R. MANEJA; G. ESTANY; M. BOADA (2008). "Canvi global i paisatge a la Costa del Têt-Mont-rodó (Matadepera, Vallès Occidental). Analitzar el passat per planificar el futur (1956-2006)". *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, núm. 52, p. 31-48.

- BATALLA, Ramon J. (2003). "Sediment deficit in rivers caused by dams and instream gravel mining: a review with examples from NE Spain". *Cuaternario y Geomorfol. Rev. la Soc. Española Geomorfol. y Asoc. Española para el Estudio del Cuaternario*, núm. 17, p. 79-91.
- BATALLA, R. J.; C. FERRER; J. P. MARTÍN-VIDE; A. ROVIRA (2007). "Directrius de gestió del sediment fluvial". Barcelona: Agència Catalana de l'Aigua (inèdit).
- BATALLA, R. J.; C. M. GÓMEZ; G. M. KONDOLF (2004). "Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain)". *Journal of Hydrology*, núm. 290, p. 117-136.
- BATALLA, Ramon J.; DAMIÀ VERICAT (2011). "An appraisal of the contemporary sediment yield in the Ebro Basin". *Journal of Soils and Sediments*, núm. 11, p. 1070-1081.
- BATALLA, R. J.; C. GARCÍA; M. SALA (1992). "Disminución de la escorrentía superficial a causa de cambios en los usos del suelo: el caso de la riera de Llémena durante el siglo XX", dins: F. López Bermúdez; C. CONESA; M. A. ROMERO [ed.]. *Estudios de Geomorfología en España*, vol. 11, p. 203-209.
- BLADON, K. D.; M. B. EMELKO; U. SILINS; M. STONE (2014). "Wildfire and the Future of Water Supply. Environmental". *Science and Technology*, núm. 48, p. 8936-8943.
- BLAY, Jordi (1997). "El canvi d'usos del sol com a factor de canvi hidrològic, La Conca de Barberà 1956-1983". *Treballs de la Societat Catalana de Geografia*, núm. 44, p. 177-197.
- BLEDSE, B. P.; C. C. WATSON (2001). "Effects of urbanization on channel instability". *JAWRA*, núm. 37(2), p. 255-270.
- BRACKEN, L. J.; J. WAINWRIGHT (2006). "Geomorphological equilibrium: myth and metaphor?". *Transactions of the Institute of British Geographers*, núm. 31, p. 267-178.
- BUENDIA, C.; G. BUSSI; J. TUSET; D. VERICAT; S. SABATER; A. PALAU; R. J. BATALLA (2016). "Effects of afforestation on runoff and sediment load in an upland Mediterranean catchment". *Science of the Total Environment*, núm. 540, p. 144-157.
- CAMARASA-BELMONTE, A. M., MARIA P. CABALLERO LÓPEZ; E. IRANZO GARCÍA (2018). "Cambios de uso del suelo, producción de escorrentía y pérdida de suelo. Sinergias y compensaciones en una rambla mediterránea (Barranc del Carraixet, 1956-2011)". *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, núm. 78, p. 127-153.
- CHORLEY, R. J.; B. A. KENNEDY (1971). "Physical geography: A systems approach". Londres: Prentice-Hall.
- COSTA, J. E. (1974). "Response and recovery of a piedmont watershed from Tropical Storm Agnes, June 1972". *Water Resources Research*, núm. 10, p. 106-112.
- DIETRICH, W.; T. DUNNE (1978). "Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain". *Z. Geomorph. N.F. Suppl. Bd. 29* [Berlin], p. 191-206.
- DOWNS, P. W.; S. R. DUSTERHOFF; W. A. SEARS (2013). "Reach-scale channel sensitivity to multiple human activities and natural events: Lower Santa Clara River, California, USA". *Geomorphology*, núm. 189, p. 121-134.
- ESTANY, G.; A. BADIA; M. BOADA; I. OTERO (2008). "Integració de fonts d'informació per l'anàlisi socioecològica dels canvis en el paisatge a Matadepera (Vallès Occidental) entre 1931 i 2007". *Treballs de la Societat Catalana de Geografia*, núm. 65, p. 44-54.
- FISHER, A.; S. LOUAHALA; P. MAISONGRANDE; L. KERGOAT; G. DEDIEU (1998). "Satellite data for monitoring, understanding and modelling of ecosystem functioning", dins B. WALKER; W. STEFFEN [ed.]. *Global Change and Terrestrial Ecosystems*. Cambridge University Press, vol. 2, p. 566-591.
- FRYIRS, K. (2016). "River sensitivity: A lost foundation concept in fluvial geomorphology". *Earth Surface Processes and Landforms*, núm. 42, p. 55-70.
- GAO, Y.; J. CHEN; H. LUO; H. WANG (2020). "Prediction of hydrological responses to land use change". *Science of the Total Environment*, núm. 708, p. 134988.
- GARCÍA, P. E.; N. D. BADANO; A. N. MENÉNDEZ; F. BERT; G. GARCÍA; G. PODESTÁ; S. ROVERE; A. VERDÍN; B. RAJAGOLAPAN; P. ARORA (2018). "Influencia de los cambios en el uso del suelo y la precipitación sobre la dinámica hídrica de una cuenca de llanura extensa. Caso

- de estudio: Cuenca del Río Salado, Buenos Aires, Argentina”. *RIBAGUA*, núm. 5 (2), p. 92-106.
- GÓMEZ F. J.; M. MARTÍ BOADA; S. SÀNCHEZ (2008). “Análisis de los procesos de cambio global: el caso del robleal de Ridaura (Parque Natural del Montseny. Barcelona)”. *Boletín de la AGE*, núm. 47, p. 125-141.
- HAN, Y.; Q. HUANG; C. HE; Y. FANG; J. WEN; J. GAO; S. DU (2020). “The growth mode of built-up land in floodplains and its impacts on flood vulnerability”. *Science of the Total Environment*, núm. 700, p. 134462.
- HENRÍQUEZ, C.; G. AZÓCAR (2006). “Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile”. *Revista de Geografía Norte Grande*, núm. 36, p. 61-74.
- HINDERER, M.; M. KASTOWSKI; A. KAMELGER; C. BARTOLINI; F. SCHLUNEGGER (2013). “River loads and modern denudation of the Alps – A review”. *Earth-Science Reviews*, núm. 118, p. 11-44.
- HOUGH, M. (1984). “City Form and Natural Processes”. Londres: Croom Helm Publishers.
- JAMES, L. A.; M. E. HODGSON; S. GHOSHAL; M. M. LATIOLAIS (2012). “Geomorphic change detection using historic maps and DEM differencing: The temporal dimension of geospatial analysis”. *Geomorphology*, núm. 137, p. 181-198.
- KALE, V. S. (2007). “Geomorphic effectiveness of extraordinary floods on three large rivers of the Indian Peninsula”. *Geomorphology*, núm. 85, p. 306-316.
- LANA-RENAULT, N.; J. LATRON; D. KARSENBERG; P. SERRANO-MUELA; D. REGÜÉS; M. F. P. BIERKENS (2011). “Differences in stream flow in relation to changes in land cover: A comparative study in two sub-Mediterranean mountain catchments”. *Journal of Hydrology*, núm. 411, p. 366-378.
- LANE, E. W. (1955). “The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering”. *Am. Soc. Civ. Eng., Proc.*, núm. 81, p. 1-17.
- LANE, S. N.; V. TAYEFI; S. C. REID; D. YU; R. J. HARDY (2007). “Interactions between sediment delivery, channel change, climate change and flood risk in a temperate upland environment”. *Earth Surface Processes and Landforms*, núm. 32, p. 429-446.
- LEOPOLD, L. B.; G. WOLMAN; J. P. MILLER (1964). “Fluvial Processes in Geomorphology”. Nova York: Dover Publications.
- LISENBY, P. E.; J. CROKE; K. A. FRYIRS (2018). “Geomorphic effectiveness: a linear concept in a non-linear world”. *Earth Surface Processes and Landforms*, núm. 43, p. 4-20.
- LLENA, M.; D. VERICAT; J. A. MARTÍNEZ-CASASNOVAS; M. SMITH (2020). “Geomorphic adjustments to multi-scale disturbances in a mountain river: A century of observations”. *Catena*, núm. 192, p. 1-19.
- MARTÍNEZ FERNÁNDEZ, J.; C. FITZ; M. A. ESTEVE SELMA; N. GUAITA; J. MARTÍNEZ-LÓPEZ (2013). “Modelización del efecto de los cambios de uso del suelo sobre los flujos de nutrientes en cuencas agrícolas costeras: el caso del Mar Menor (Sudeste de España)”. *Ecosistemas*, núm. 22(3), p. 84-94.
- MORÁN, C.; J. MARTÍNEZ; V. HERNÁNDEZ; A. CANO (2008). “Traslación y pérdidas por interceptación en un bosque de roble melojo del Sistema Central”. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, núm. 34, p. 7-22.
- NASH, D. B. (1994). “Effective sediment-transporting discharge from magnitude-frequency analysis”. *The Journal of Geology*, núm. 102, p. 79-95.
- NAYLOR, L. A.; T. SPENCER; S. N. LANE; S. E. DARBY; F. J. MAGILLIGAN; M. G. MACKLIN; I. MÖLLER (2017). “Stormy geomorphology: geomorphic contributions in an age of climate extremes”. *Earth Surface Processes and Landforms*, núm. 42, p. 166-190.
- NELSON, K. C.; M. A. PALMER; J. E. PIZZUTO; G. E. MOGLEN; P. L. ANGERMEIER; R. H. HILDERBRAND; M. DETTINGER; K. HAYHOE (2009). “Forecasting the combined effects of urbanization and climate change on stream ecosystems: from impacts to management options”. *J Appl Ecol.*, núm. 46 (1), p 154-163.

- PACHECO, E.; J. FARGUELL; X. ÚBEDA; L. OUTEIRO; A. MIGUEL (2011). "Runoff and sediment production in a Mediterranean basin under two different land uses". *Cuaternario y Geomorfología*, núm. 25(3-4), p. 103-114.
- PANAREDA, Josep M. (2020). "El delta de la Tordera: tensions, reptes i expectatives d'un paisatge rural complex a la perifèria metropolitana de Barcelona". *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, en premsa (1-22).
- PETTS, G. E.; A. M. GURNELL (2005). "Dams and geomorphology: Research progress and future directions". *Geomorphology*, núm. 71(1-2), p. 27-47.
- PHILLIPS, J. D.; C. VAN DYKE (2016). "Principles of geomorphic disturbance and recovery in response to storms". *Earth Surface Processes and Landforms*, núm. 41, p. 971-979.
- PHILLIPS, J. D. (2014). "Thresholds, mode-switching and emergent equilibrium in geomorphic systems". *Earth Surface Processes and Landforms*, núm. 39, p. 71-79.
- PLANAS, M. (2008). "Cartografia i desenvolupament rural. Els mapes com a mitjà per a l'anàlisi de les àrees rurals". *Treballs de la Societat Catalana de Geografia*, núm. 65, p. 300-311.
- RICHARDS, K. (1999). "The magnitude-frequency concept in fluvial geomorphology: a component of a degenerating research programme?" *Zeitschrift für Geomorphologie Supplement*, núm. 115, p. 1-18.
- RICKENMANN, D.; V. D'AGOSTINO; G. D. FONTANA; M. LENZI; L. MARCHI (1998). "New results from sediment transport measurements in two Alpine torrents". *Hydrology, Water Resources and Ecology in Headwaters*, núm. 248, p. 283-289.
- RODRÍGUEZ-ESTRELLA, T. (2009). "El Mar Menor: Geología y sus relaciones con las aguas subterráneas del continente", dins: F. CABEZAS; M. SENENT [ed.]. *El Mar Menor. Estado actual del conocimiento científico*. Instituto Mediterráneo del Agua, p. 47-84.
- ROMERO, H.; A. VÁSQUEZ (2005). "Evaluación ambiental del proceso de urbanización de las cuencas del piedemonte andino de Santiago de Chile". *EURE*, núm. 94, vol. 31, p. 97-117.
- RUÍZ, E. (2008). "L'impacte de les tecnologies de la informació geogràfica en la cartografia i la geografia: reflexions sobre 20 anys de SIG". *Treballs de la Societat Catalana de Geografia*, núm. 65, p. 672-679.
- SALA, Maria (2003). "Floods Triggered by Natural Conditions and by Human Activities in a Mediterranean Coastal Environment". *Geografiska Annaler*, núm. 85 (3-4), p. 301-312.
- SANCHO, Alexis (2008). "L'anàlisi dels canvis recents en el paisatge a través de la cartografia: l'exemple de la Terreta (Ribagorça)". *Treballs de la Societat Catalana de Geografia*, núm. 65, p. 143-154.
- SCHUMM, S. A. (1960). "The shape of the alluvial channels in relation to sediment type." *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, núm. 352-B. <https://pubs.usgs.gov/pp/0352b/report.pdf>
- (1979). "Geomorphic thresholds: The concept and its applications". *Transactions of the Institute of British Geographers*, núm. 4, p. 485-515.
- (1983). "River morphology and Behavior: problems of extrapolation", dins: C. M. ELLIOTT [ed.]. *River Meandering, Proceedings of the Conference Rivers '83*. Nova York: American Society of Civil Engineers, p. 16-29.
- SERRA, J. M.; A. PÈLACHS; M. NINYEROLA; J. LLORENS; J. CRISTÒBAL; A. VERA (2008). "El GTP com a mètode per al disseny d'unitats de paisatge". *Treballs de la Societat Catalana de Geografia*, núm. 65, p. 155-167.
- SERVEI METEOROLÒGIC DE CATALUNYA (2020). *Mapa Gener 19-23*. Nota de Premsa. Departament de Territori i Sostenibilitat.
- STAINES, K. E. H.; J. L. CARRIVICK (2015). "Geomorphological impact and morphodynamic effects on flow conveyance of the 1999 jökulhlaup at sólheimajökull, Iceland". *Earth Surface Processes and Landforms*, núm. 40, p. 1401-1416.
- STOVER, S. C.; D. R. MONTGOMERY (2001). "Channel change and flooding, Skokomish River, Washington". *Journal of Hydrology*, núm. 243, p. 272-286.



- SWANSON, F. J.; R. L. FREDRIKSEN (1982). "Sediment routing and budgets: implications for judging impacts on forestry practices", dins: F. J. SWANSON; R. J. JANDA; T. DUNNE; D. N. SWANSON [ed.]. *Sediment budgets and routing in forested drainage basins*, p. 129-137.
- SYVITSKI, J. P. M.; G. R. BRAKENRIDGE (2013). "Causation and avoidance of catastrophic flooding on the Indus River, Pakistan". *GSA Today*, núm. 23, p. 4-10.
- TECLE, A.; D. NEARY (2015). "Water Quality Impacts of Forest Fires". *J Pollut Eff Cont*, núm. 3:2, p. 1000139.
- THOMPSON, C.; J. CROKE (2013). "Geomorphic effects, flood power, and channel competence of a catastrophic flood in confined and unconfined reaches of the upper Lockyer Valley, southeast Queensland, Australia". *Geomorphology*, núm. 197, p. 156-169.
- THOMPSON, C.; K. FRYIRS; J. CROKE (2016). "The disconnected sediment conveyor belt: Patterns of longitudinal and lateral erosion and deposition during a catastrophic flood in the Lockyer Valley, southeast Queensland, Australia". *River Research and Applications*, núm. 32, p. 540-551.
- ÚBEDA, X.; J. FARGUELL; M. FRANCOS; L. OUTEIRO; E. PACHECO (2020). "Runoff and erosion generation by simulated rainfall in a Mediterranean forest with forest management". *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del medio Ambiente*, núm. 26 (1), p. 37-51.
- VELASCO, ANTONIO; XAVIER ÚBEDA (2015). "Runoff generation and soil erosion after forest fires from the slopes to the rivers at a basin scale", dins: *Rivers – Physical, Fluvial and Environmental Processes*. Springer, p. 443-458.
- VERICAT, DAMIÀ; RAMON J. BATALLA (2006). "Sediment transport in a large impounded river, the lower Ebro, NE Iberian Peninsula". *Geomorphology*, núm. 79, p. 72-92.
- VERICAT, D.; R. J. BATALLA; C. GARCIA (2006). "Breakup and reestablishment of the armour layer in a large gravel-bed river below dams: the lower Ebro". *Geomorphology*, núm. 76, p. 122-136.
- VERICAT, D.; J. WHEATON; J. BRASINGTON (2017). "Revisiting the Morphological Approach: Opportunities and Challenges with Repeat High-Resolution Topography", dins: D. TSUTSUMI; J. B. LARONNE [ed.]. *Gravel-Bed Rivers: Processes and Disasters*. Wiley: Publisher, cap. 5, p. 121-158.
- VERICAT, D.; F. VILLE; A. PALAU-IBARS; R. J. BATALLA (2020). "Effects of Hydropeaking on Bed Mobility: Evidence from a Pyrenean River". *Water*, núm. 12, p. 178.
- WAGENER, T.; M. MURUGESU SIVAPALAN; P. A. TROCH; B. L. MCGLYNN; C.J. HARMAN; H. V. GUPTA; P. KUMAR; S. C. RAO; N. B. BASU; J. S. WILSON (2010). "The future of hydrology: An evolving science for a changing world". *Water Resources Research*, vol. 46, W05301.
- WHEATON, J. M.; J. BRASINGTON; S. E. DARBY; D. A. SEAR (2010). "Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets". *Earth Surface Processes and Landforms*, núm. 35, p. 136-156.
- WOLMAN, M. G.; R. GERSON (1978). "Relative scales of time and effectiveness of climate in watershed geomorphology". *Earth Surface Processes*, núm. 3, p. 189-208.
- WOLMAN, M. G.; J. P. MILLER (1960). "Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes". *The Journal of Geology*, núm. 68, p. 54-74.