

Cartografia de la inundabilitat local al delta del Llobregat durant el temporal Gloria*

Anna Marín Puig
Miquel Sainz de la Maza

Universitat Autònoma de Barcelona. Departament de Geografia
anna.marin@uab.cat
miquel.sainz@uab.cat



Rebut: juny de 2022
Acceptat: febrer de 2023
Publicat: maig de 2023

Resum

Les dificultats de drenatge a l'hemidelta sud del Llobregat s'agreugen durant els temporals marítics per la sobrelevació del nivell del mar i el taponament de les desembocadures. L'objectiu d'aquest estudi és identificar les àrees del marge dret del riu Llobregat més exposades a la inundació. Mitjançant metodologies de teledetecció, es discriminen les àrees de les zones agrícoles i humides inundades durant el temporal Gloria (gener del 2020). Els resultats evidencien una inundabilitat local sense necessitat de riuada que compromet la viabilitat econòmica i les funcions ecològiques de les últimes àrees sense urbanitzar d'aquest delta metropolitana. Aquesta situació s'intensifica per un increment en la freqüència dels temporals i la pujada relativa del nivell mitjà del mar induïda per l'escalfament global.

Paraules clau: inundació local costanera; exposició; Sentinel-1; nivells màxims temporal marítim; canvi climàtic

* Un agraïment especial a l'Antònia Casellas i a l'Eduard Ariza pel seu suport i per les correccions a versions anteriors del manuscrit. També als companys/es de la Taula del Llobregat i a tots els participants de l'estudi. Recerca finançada en el marc del projecte ECOLEARN (PID2019-106438RB-100) I+D 2019 Retos de Investigación del Ministerio de Ciencia, Investigación y Universidades. L'autora principal ha estat finançada amb una subvenció FPI (FPI BES-2017-080771).

Resumen. *Cartografía de la inundabilidad local en el delta del Llobregat durante el temporal Gloria*

Las dificultades de drenaje en el hemidelta sud del Llobregat se agravan durante los temporales marítimos debido a la sobre elevación del nivel del mar y la obstrucción de las desembocaduras. El objetivo de este artículo es identificar las áreas del margen derecho del río Llobregat con una mayor exposición a la inundación. Mediante metodologías de teledetección, se discriminan las zonas agrícolas y humedales inundados durante el temporal Gloria (enero de 2020). Los resultados revelan una situación de inundación sin desbordamiento fluvial comprometiendo la viabilidad económica y las funciones ecológicas de las últimas zonas no urbanizadas de este delta metropolitano. Esta situación se intensifica por un incremento en la frecuencia de los temporales marinos y la subida relativa del nivel de la mar inducida por el calentamiento global.

Palabras clave: inundación local costera; exposición; Sentinel-1; niveles máximos temporal marino; cambio climático

Résumé. *Cartographie de l'inondabilité locale dans le delta du Llobregat lors de la tempête Gloria*

Les difficultés de drainage de l'hémidelta sud du Llobregat s'aggravent pendant les tempêtes maritimes à cause de la surélévation du niveau de la mer et de l'obstruction des embouchures. L'objectif de cette étude est d'identifier les zones de la marge fluviale droite du Llobregat les plus exposées à l'inondation. Grâce à des méthodologies de télédétection, nous avons distingué les zones d'espaces agricoles et humides inondées pendant la tempête Gloria (janvier 2020). Les résultats mettent en évidence une inondabilité locale sans que se produise de crue menaçant la viabilité économique et les fonctions écologiques des dernières zones non urbanisées de ce delta métropolitain. La situation est aggravée par une augmentation de la fréquence des tempêtes et la hausse relative du niveau de la mer produite par le réchauffement global.

Mots-clés: inondation locale côtière; exposition; Sentinel-1; niveaux extrêmes de tempête; changement climatique

Abstract. *Local flood cartography of the Llobregat Delta following Storm Gloria*

Drainage constraints in the southern lobe of the Llobregat Delta are aggravated during coastal storms due to higher marine water levels and river-mouth blockage. The aim of this article is to identify the areas on the right bank of the River Llobregat that are most exposed to flooding. Remote sensing methods are used to discriminate agricultural and wetland areas flooded during Storm Gloria (January 2020). The results reveal flooding without river overflow, compromising the economic viability and ecological functions of the remaining undeveloped areas of this metropolitan delta. This situation is exacerbated by an increase in the frequency of sea storms and the relative rise in sea-level induced by global warming.

Keywords: local coastal flooding; exposure; Sentinel-1; extreme sea-storm levels; climate change

Sumari

- | | |
|------------------------|-----------------------------|
| 1. Introducció | 5. Discussió |
| 2. Estat de la qüestió | 6. Conclusions |
| 3. Mètodes i dades | Referències bibliogràfiques |
| 4. Resultats | |

1. Introducció

Els deltes són per definició zones inundables. L'estabilitat sedimentària dels deltes depèn en gran mesura d'episodis climàtics extrems (riuades i temporals marítics), moment en el qual hi ha més capacitat de mobilització de sediments (Day et al., 1995). L'ocupació humana en zones inundables, com passa al delta del Llobregat, comporta inevitablement una exposició més gran a la inundació (Barriendos et al., 2019; Breton i Sauri-Pujol, 1997). Alhora, la pressió antròpica, com ara la impermeabilització del sòl o la rigidització de la costa, entorpeix la dinàmica ecosistèmica del litoral i, consegüentment, redueix la resiliència d'aquests sistemes costaners als fenòmens climàtics extrems (CADS, 2021).

Els temporals marítics són una de les principals amenaces climàtiques a les àrees litorals de Catalunya (Sánchez-Arcilla et al., 2016). Els principals riscos associats als temporals són l'erosió i la inundació, dos efectes que estan interrelacionats, ja que s'intensifiquen l'un a l'altre (Guillén, 2008). Segons els registres existents en les darreres dues dècades, a la costa catalana hi ha hagut temporals marins de magnitud superior (Palacios, 2019; Pintó et al., 2020). Aquesta situació es veurà agreujada per l'efecte de l'augment relatiu del nivell mitjà del mar (MedECC, 2020). Les prediccions de canvi climàtic indiquen un augment de la freqüència d'aiguats extrems, amb afectacions destacades en zones inundables, especialment a les planes litorals (Generalitat de Catalunya, 2017). En aquest sentit, les polítiques de mitigació dels gasos d'efecte hivernacle ja no són suficients, i les estratègies d'adaptació al canvi climàtic s'han incorporat a les agendes de les administracions públiques locals, regionals i estatals. El rol dels ajuntaments per al compliment dels objectius climàtics s'ha reforçat encara més des de l'Acord de París (UNFCCC, 2015).

Els municipis litorals de l'hemidelta sud del Llobregat —el Prat de Llobregat, Viladecans, Gavà i Castelldefels— han aprovat els respectius plans locals d'adaptació al canvi climàtic (PLACCs) (AMB, 2015a, 2015b, 2018; Lavola, 2014). L'anàlisi del risc d'inundació dels PLACCs integra inundacions de tipologies variades (fluvials, pluvials i costaneres), però no considera la simultaneïtat entre els perills climàtics que poden ser especialment rellevants en zones deltaïques (MedECC, 2020). Pel que fa a la inundació marina, els PLACCs es basen només en la cota d'inundació permanent (projeccions IPCC), però en menys mesura en la inundació potencial d'esdeveniments extrems. Finalment, els PLACCs dediquen una feble consideració de les particularitats i els

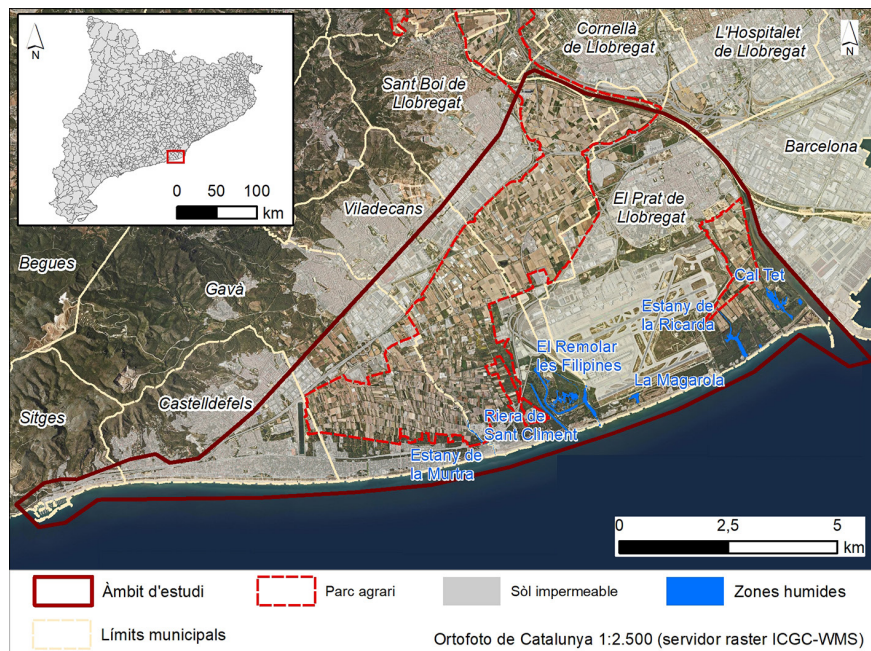
factors locals que determinen la redistribució i la intensitat de l'exposició i la vulnerabilitat a la inundació (Marín-Puig et al., 2022).

L'objectiu de l'article és contribuir a una millor caracterització de la dimensió espacial del risc local d'inundació a les àrees no urbanitzades del marge dret del riu Llobregat. A partir d'imatges d'observació de la Terra SAR (radar d'obertura sintètica) captades durant el temporal Gloria, que va tenir lloc el 19-23 de gener de 2020 (López-Bustins i Martín-Vide, 2020), s'elabora la cartografia de la inundabilitat local detectada durant aquest esdeveniment climàtic extrem. Per tal d'avaluar el component marí de la inundació, mitjançant dades oceanogràfiques i càlculs paramètrics, s'estima la cota d'inundació marina assolida durant el temporal. Prenent com a referència una llevantada, l'article il·lustra la necessitat de no ignorar la simultaneïtat de riscos associats a esdeveniments compostos en un context de canvi climàtic (Vitousek et al., 2017; Wahl et al., 2015), ni tampoc les variables territorials locals que configuren l'exposició.

2. Estat de la qüestió

L'avaluació i la gestió del risc d'inundació a Catalunya estan regulades per la directiva europea d'inundacions, 2007/60/CE (EC, 2007), i la seva transposició a la normativa estatal espanyola (Reial Decret 903/2010). Per a les

Figura 1. Àrea d'estudi



Font: elaboració pròpia.

inundacions fluvials i pluvials, l'Agència Catalana de l'Aigua (ACA) i Protecció Civil s'encarreguen d'elaborar l'avaluació de la gestió del risc. Per a la tipologia d'inundació costanera, l'avaluació del risc és competència de la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y el Mar.

La implantació de la directiva es realitza a través de cicles de planificació constituïts per tres fases. La primera és l'avaluació preliminar del risc d'inundació, amb la identificació de les àrees amb un risc potencial significatiu d'inundació (ARPSI) i trams amb risc d'inundació (TRI). La segona fase és l'elaboració dels mapes de perillositat (delimitació gràfica de les zones inundables) i risc (danys potencials que poden causar les inundacions). Finalment, la tercera fase és pròpiament la creació del Pla de Gestió del Risc d'Inundacions (PGRI), que s'elabora i aprova per a cada demarcació hidrogràfica.

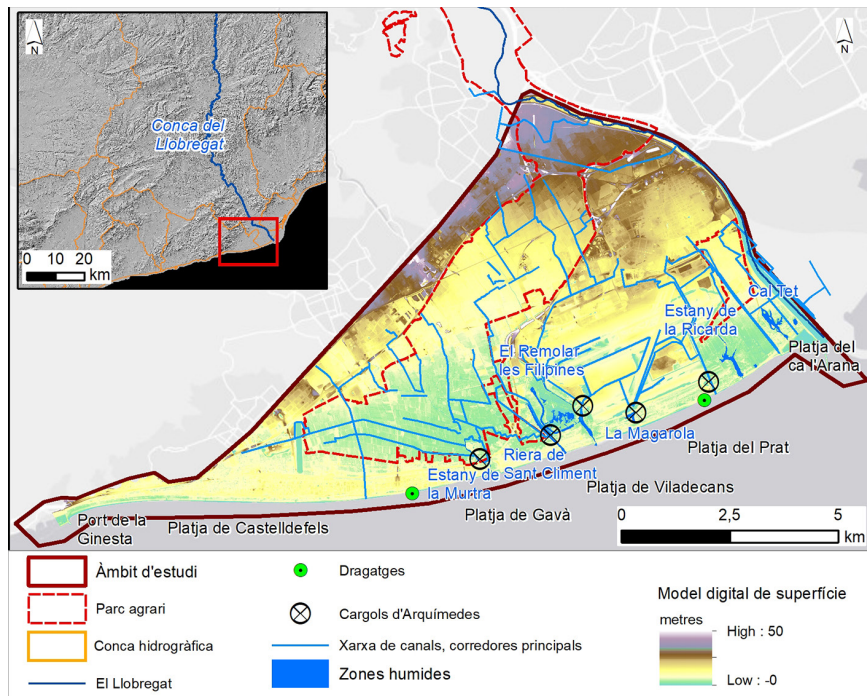
En definitiva, la cartografia del risc d'inundació disponible a l'àrea d'estudi no contempla la simultaneïtat entre fonts d'inundació (terrestres i marines) de manera integrada, ni tampoc ofereix resolucions espacials rellevants des de la perspectiva de la comunitat local. Finalment, els efectes del canvi climàtic en l'elaboració del segon Pla de Gestió de Risc d'Inundació (per al període 2022-2027) s'han considerat només de manera qualitativa, per exemple, identificant àmbits prioritaris d'actuació (ACA, 2019). Pel que fa a l'avaluació de la inundació costanera, s'han integrat diferents escenaris de pujada del nivell del mar (IHCantabria, 2020).

2.1. Àrea d'estudi

L'àrea d'estudi d'aquesta recerca són les zones no urbanitzades de l'hemidelta sud del Llobregat, és a dir, el tram que s'estén des de la nova desembocadura del riu Llobregat fins al port de la Ginesta (figura 2), coincidint amb el tram litoral definit per la cel·la litoral 8 (ICC, 2010). Comprèn els quatre municipis costaners del Baix Llobregat (el Prat de Llobregat, Viladecans, Gavà i Castelldefels) i un petit tram de Sitges.

La plana deltaica del Llobregat ocupa una àrea de 95,5 km² i una línia de costa de 23 km (15 km a l'hemidelta sud i 8 km al nord). És el segon delta en extensió i la tercera àrea humida del litoral català. No obstant això, les àrees naturals humides representen menys del 5% de la seva superfície original (Marcé et al., 2012). La proximitat a la ciutat de Barcelona ha motivat la transformació de «territori hostil i despoblat a nus de comunicacions metropolitana» (Esteban et al., 2018: 28). L'expansió del sòl impermeable ocupa pràcticament el 60% de la plana deltaica, dinàmica que ha modificat intensament l'estructura i les propietats funcionals del paisatge (Pino i Isern, 2018). Actualment, la major part del territori no urbanitzat el conformen les parcel·les del Parc Agrari del Baix Llobregat i les àrees del Consorci pels Espais Naturals del Delta del Llobregat. És a dir, es tracta d'espais definits mitjançant les seves respectives figures de protecció (Germain, 2018; Albaladejo, 2015; Roda, 2015; Montasell i Dorda, 2006). No obstant això, la pressió urbanística i dels grans operadors continua sent font de reiterats conflictes territorials.

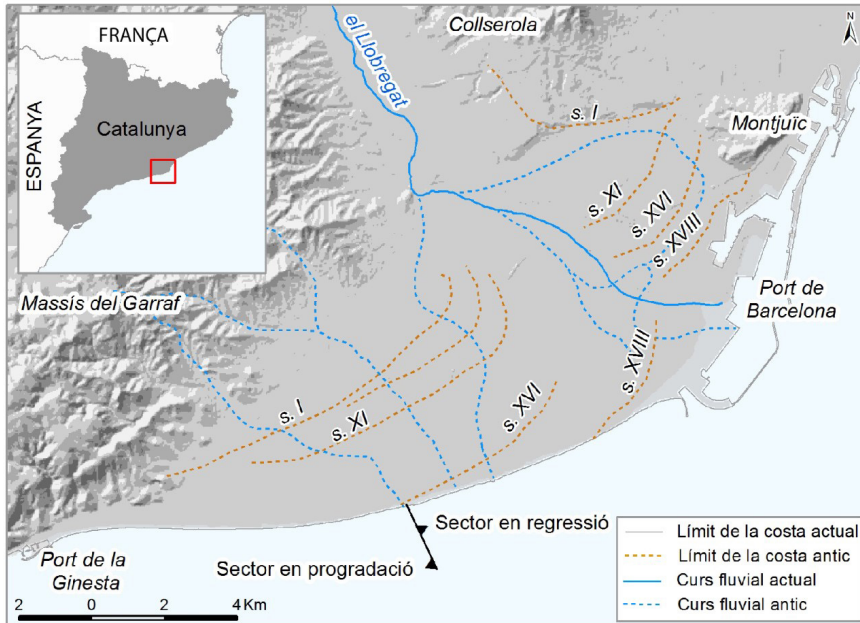
Figura 2. Hemidelta sud del Llobregat, amb alguns elements de la xarxa de drenatge



Font: elaboració pròpia.

El desviament del riu Llobregat l'any 2004 per l'ampliació del port de Barcelona ha intensificat i cronificat un problema històric de dèficit sedimentari (Martín-Vide et al., 2020). El dic de canalització de la nova desembocadura de vuit metres de profunditat concebut per evitar la inundació de l'aeroport en cas de gran avinguda suposa la pèrdua de sediments fluvials mar endins i obstaculitza el transport longitudinal de sediments (Gracia i Calafat, 2019). El procés de regressió litoral afecta directament les platges a sotacorrent del port de Barcelona per l'obstrucció del transport sedimentari pel corrent de deriva i per la refracció de les onades (Garcia-Lozano, 2019). A més, les aportacions fluvials ja estan reduïdes per tres embassaments, rescloses, estrenyiment i endegaments de la llera, i ocupació de la plana d'inundació pel creixement urbà i d'infraestructures (Prats-Puntí et al., 2021; Sánchez-Juny i Dolz Ripollés, 2004). El riu Llobregat, transformat en un estuari canalitzat, ha quedat desconnectat del seu delta (Gracia i Calafat, 2019). Malgrat els dragatges de 100.000 m³ de sorra anuals (figura 2) com a mesura compensatòria aprovada per la Declaració d'Impacte Ambiental de l'Ampliació del Port de Barcelona (BOE, 2005), el procés de regressió i pèrdua de volum de platja no s'ha aconseguit revertir (Perelló et al., 2019). En canvi, la façana litoral de Castelldefels

Figura 3. Evolució de la línia de costa del delta del Llobregat



Font: Garcia-Lozano (2019).

és el tram de platja urbana en progració (figura 3). La construcció del port de la Ginesta el 1986 actua com a barrera del transport longitudinal i acumula el sediment transportat pel corrent de deriva (Banchini et al., 2009).

Garantir el drenatge a la plana deltaica és una de les preocupacions històriques de la població del delta (Codina, 1966, 1971). A la figura 2, s'observa el suau pendent interromput només per les dunes costaneres i les zones més deprimides de la Murtra i de la riera de Sant Climent. Aquests desnivells atorguen al delta un aspecte de banyera que s'explica pel procés de progració de la plana deltaica.

L'avanç del delta mar endins queda determinat per les variacions del riu i per la formació de barreres litorals. Tal com expliquen Esteban et al. (2018) i Garcia-Lozano (2019), basant-se en Marqués (1984), la formació de barres sorrenques litorals paral·leles a la costa (alimentades pel corrent marí dominant de NE-SW), en emergir, van confinar llacunes litorals poc profundes que s'anirien reblint amb subministraments al·luvials del riu i també de les rieres laterals. La Murtra és un estany relict d'una antiga badia que va passar a albufera i es va anar reomplint (Queralt i Isla, 2018). Aquests espais, juntament amb els antics braços i lleres del riu abandonats quan el pendent no era favorable (figura 3), presenten una topografia deprimida respecte a la resta i actuen com a receptors de l'escolament que es produeix aigües amunt (figura 2). A tall d'exemple, tenim la Ricarda i el Remolar, que podrien ser antigues desembocadures del riu (Sans i Panareda, 2016).

L'expansió de l'agricultura, juntament amb la necessitat d'eradicar el paludisme, va fomentar la dessecació progressiva del delta, procés que va culminar amb la construcció de la xarxa de corredores (segle XVIII-XIX) al delta occidental (Capmany, 2004). En aquest sector, trobem la principal concentració de dunes i de sòl sorrenc del delta. Una de les particularitats d'aquest sòl agrícola és un pendent pràcticament nul (figura 2), i un reg per capil·laritat pel nivell freàtic, que és força alt en aquesta zona. Les corredores, alimentades pel nivell freàtic i per les aportacions dels bombaments efectuats per l'EDAR de Gavà-Viladecans (depuració biològica), s'utilitzen per a la irrigació dels camps. En cas de pluja, les corredores funcionen com a eixos de desguàs de pluvials drenant cap a la llacuna de la Murtra i el Remolar. La gestió dels nivells de les corredores es fa mitjançant dos cargols d'Arquímedes ubicats a cada costat de la riera de Sant Climent, i un tercer a la Murtra amb capacitat de bombament d' $1,5\text{m}^3/\text{s}$ gestionat pels mateixos agricultors (figura 2).

La capacitat de desguàs és desigual entre els diferents sectors del litoral deltaic, i no és suficient per evitar les inundacions recurrents dels camps agrícoles. L'aeroport de Barcelona té el seu propi sistema de drenatge per assegurar la protecció de les instal·lacions, el qual preveu tant el desguàs de les aigües pluvials com el control del nivell freàtic. Disposa de 15 cargols d'Arquímedes que buiden per l'oest a l'estany del Remolar a través del canal de Bogues; per l'est a l'estany de l'Illa, i per la part central directament a mar (figura 2).

El complex conjunt d'infraestructures històriques associades al drenatge i el reg de la plana (filloles, pluvials, canals, etcètera), dimensionat per una superfície agrària molt superior a la capacitat d'ús actual, ha perdut part de la seva funcionalitat (Queralt i Isla, 2018). Les dificultats de drenatge s'intensifiquen per la progressiva impermeabilització de sòls, la reducció d'infiltració i el consegüent increment de sobreexidors d'escorrentia urbana que van a parar a la xarxa tradicional agrícola de canals i pluvials que en molts casos desemboquen als estanys litorals (Roa i Esteban, 2018; ACA, 2008a i 2008b). Paral·lelament a la progressiva expansió dels usos urbans, industrials i logístics, la xarxa d'infraestructures viàries i ferroviàries que talla perpendicularment la direcció principal de la xarxa hidrogràfica constitueix un obstacle afegit que en períodes d'aiguats actua com a dic de retenció d'aigua (Solé-Perich, 2005).

3. Mètodes i dades

El present estudi consta de dos blocs metodològics diferenciats:

1. La delimitació espacial de la inundació deltaica durant el temporal Gloria mitjançant metodologies de teledetecció basades en imatges SAR obtingudes per la missió espacial d'observació de la Terra Sentinel-1.
2. L'estimació de la sobreelevació del nivell del mar durant els dies del temporal.

3.1. Tractament d'imatges de radar d'obertura sintètica (SAR)

El sensor SAR de Sentinel-1 forma part d'una constel·lació de satèl·lits de l'Agència Espacial Europea (ESA) sota el programa Copernicus. La tecnologia SAR opera a la franja de l'espectre de les microones, és a dir, les longituds d'ona més llargues utilitzades en teledetecció, fet que permet observar àrees cobertes per nuvolositat (longitud d'ona superior a la mida d'una gota d'aigua). Aquesta característica les converteix en una font de dades molt útil per a anàlisis espacials en situacions atmosfèriques adverses. Les imatges SAR de Sentinel-1 operen a la banda C (freqüència central de 5.405 GHz) i ofereixen doble polarització (VH/VV) (ESA, 2022).

Cada píxel d'una imatge radar representa el coeficient de retrodispersió del senyal emès pel sensor a la superfície terrestre (Chuvienco, 2010). Aquest coeficient de retrodispersió (o intensitat del senyal de retorn) dependrà en gran mesura de la rugositat del terreny. Les làmines d'aigua actuen com una superfície especular, reflectint el senyal de retorn del radar en una direcció oposada a la posició del sensor, i per tant presenten un valor de retrodispersió molt baix en comparació amb altres cobertes terrestres. Aquest contrast permet la discriminació d'àrees cobertes per aigua.

3.1.1. Dades

Les imatges SAR de Sentinel-1 s'han descarregat gratuïtament a partir de la plataforma Copernicus Open Access Hub (<<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>>). Per a l'anàlisi temporal, utilitzem dues imatges (taula 1). La imatge captada abans del temporal la utilitzem de referència de les masses d'aigua permanent. La imatge posterior al temporal permet establir les diferències amb la imatge de referència i identificar les masses d'aigua temporals (zones inundades).

Les dues imatges seleccionades són consecutives en el temps (període orbital de 12 dies). Ambdues imatges tenen una adquisició IW, passada ascendent i són productes Level-1 Ground Range Detected (GRD) (ESA, 2022). La mida del píxel és de 10 m en geometria del sòl (100 m²).

S'ha reduït l'extensió de les imatges per ajustar-les a l'àmbit d'estudi. Per tal de no excloure les cobertes de platja, s'ha ampliat el polígon uns metres mar endins. Finalment, s'han eliminat les superfícies urbanes de l'àmbit d'estudi. La màscara de sòl impermeable s'ha elaborat a partir d'una reclassificació del Mapa d'Usos i Cobertes del Sòl de Catalunya, MUCSC 2017, disponible a (<<http://www.creaf.uab.es/mcsc/>>). L'exclusió d'aquestes àrees és deguda a la

Taula 1. Imatges utilitzades Sentinel-1B

Imatge	Satèl·lit	Data captura	Hora captura	Angle incidència
A (pretemporal)	Sentinel-1B	10 de gener de 2020	20:25	30.54-46.25
B (posttemporal)	Sentinel-1B	22 de gener de 2020	21:31	30.54-46.25

Font: elaboració pròpia.

dificultat tècnica de detectar inundacions en zones urbanes utilitzant dades SAR, atesa l'alta intensitat de retorn d'aquestes superfícies (Tavus et al., 2018).

El processament i l'anàlisi de dades Sentinel-1 s'han efectuat íntegrament a través del software gratuït SNAP (Sentinel Application Platform, Toolbox Sentinel-1, versió 8.0.4, disponible a <<http://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-1-toolbox/s1tbx-features/>>). Hem sotmès les dues imatges Sentinel-1 GRD a un procediment estàndard de preprocessat per tal de reduir-ne l'extensió i aplicar les correccions geomètriques i radiomètriques pertinents (Filipponi, 2019). En aquest estudi no s'han aplicat filtres per esmoreir l'efecte salpebrat o soroll granular (speckle noise) característic de les imatges SAR. Els filtres ofereixen una millora visual de les imatges, però impliquen una reducció de la resolució espacial (Tarazona et al., 2021) i, per tant, es desaconsellen per a la identificació d'elements de petites dimensions (Filipponi, 2019).

3.1.2. Classificació d'imatges

Per a la identificació de les masses d'aigua temporals, s'ha utilitzat un mètode de classificació supervisada a partir de la interpretació visual d'una composició RGB multitemporal. És un mètode basat en les diferències entre les intensitats del senyal a les imatges pre- i posttemporal tot establint una combinació de bandes RGB pensada per realçar canvis temporals causats per la presència d'aigua (Conde i Mata Muñoz, 2019). La combinació de bandes utilitzada és la següent: la imatge pretemporal en polarització VH per la banda R (vermell), i la imatge posttemporal (també en polarització creuada VH) per la banda G (verd) i la banda B (blau). Aquesta combinació permet visualitzar en vermell aquells píxels amb valors d'intensitat de retorn elevats per a la imatge pretemporal però que presenten una disminució important d'intensitat (per sota els -21dB) en la imatge posttemporal.

La composició RGB multitemporal resultant identifica aquelles superfícies amb un comportament de reflexió especular només en la imatge posttemporal. Basant-nos en aquestes diferències de tonalitats, hem creat tres tipologies d'àrees d'entrenament corresponents a les classes següents: (A) masses d'aigua permanents, (B) masses d'aigua temporals, (C) sòl no cobert per aigua. No hem utilitzat punts de veritat-terreny per a la classificació de les imatges, de manera que han quedat tots reservats per a la validació dels resultats. L'algorisme de classificació utilitzat és el *random forest* integrat en el programari SNAP (Breiman, 2001).

3.1.3. Validació

S'han recollit 24 punts de veritat-terreny obtinguts a partir de treball de camp (amb un GPS) realitzat entre el setembre del 2021 i el maig del 2022 (figura 5). El conjunt de punts cobreix parcel·les agràries, zones de platja, zones dels espais naturals i zones limítrofes amb zones urbanes excloses de l'estudi. Del total de punts, 18 són identificats com a inundats el dia 22 de gener de 2022 i 6 com a no inundats. D'alguns dels punts identificats com a inundats, la persona informant ens ha facilitat també suport fotogràfic de la inundació. Es

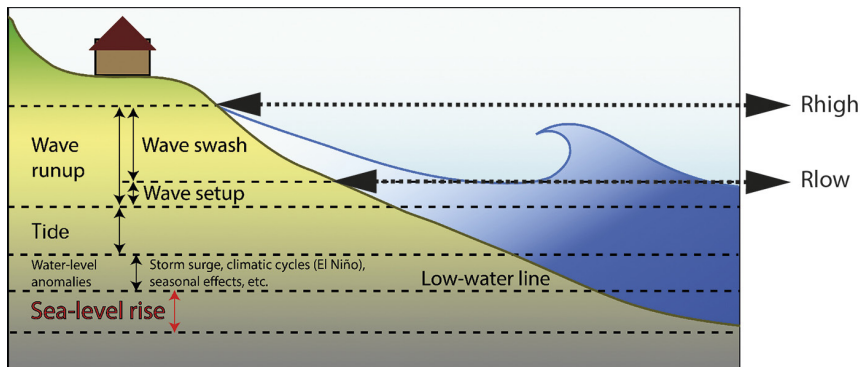
tracta d'una mostra reduïda per l'extensió de l'envolupant de l'àrea d'estudi i, per tant, acceptem un interval de confiança superior a l'habitual.

3.2. Estimació de la sobrelevació temporal del nivell del mar

A les zones deltaïques, hi conflueixen inundacions fluvials, pluvials i costaneres, i hi poden concórrer totes tres alhora (Ballesteros et al., 2018). Pel que fa al component d'origen marí, distingim entre la inundació permanent per la pujada del nivell del mar associada al canvi climàtic (Nicholls et al., 1999), i la inundació esporàdica associada als temporals marítims (Stockdon et al., 2007). Durant un temporal marítim, l'efecte combinat de la marea astronòmica, la marea meteorològica (*storm surge*) i la remuntada de l'onatge (*wave runup*) contribueixen a elevar el nivell del mar (Stockdon et al., 2007). La marea meteorològica es produeix per l'efecte combinat de la baixa pressió atmosfèrica i l'efecte del vent a la costa (Anselme et al., 2011). Mentre que les oscil·lacions de les mareas queden registrades pels mareògrafs, la remuntada de l'onatge sovint s'estima a partir de càlculs paramètrics integrant dades oceanogràfiques (altura d'ona significant i període de pic de l'onatge) amb dades geogràfiques de pendent de platja (Stockdon et al., 2006). La magnitud de la remuntada (*wave runup*), tal com es mostra a la figura 4, està formada per dos components: el *wave setup* (la sobrelevació del nivell del mar per la ruptura de l'onatge) i el *wave wash* (la làmina o flux d'aigua que arriba a la costa un cop trencada l'onada).

En l'àmbit de l'enginyeria costanera, sovint s'utilitza el càlcul de la cota a partir del qual es troben el 2% dels valors màxims de *wave runup* enregistrats (Stockdon et al., 2006), que correspon a la R_{high} . El calat d'inundació de component marí en aquest article s'estima a partir de la R_{low} definida com la suma de les mareas astronòmica i meteorològica (registre mareògrafs) i el càlcul del

Figura 4. Els components que integren el nivell del mar i poden contribuir a la inundació costanera



Font: adaptat de Vitousek et al. (2017).

wave setup (Sallenger, 2000). Per al càlcul del *wave setup* (η), ens basem en la formulació paramètrica proposada per Stockdon et al. (2006), on es combina el pendent de la platja (β), l'altura d'ona significant H_s (alçada mitjana de les ones més altes durant un període d'uns 30 minuts), la longitud d'ona de l'onatge (L) i el període de pic T_p (temps entre cada cresta d'ona). Els passos seguits per al càlcul de la R_{high} són els mateixos que els descrits per a la R_{low} , amb la diferència que en comptes de calcular el *wave setup* s'ha calculat el màxim *wave runup*, també basant-nos en la referència de Stockdon et al. (2006), per posteriorment sumar-li l'efecte de les mareas.

Assumim un pendent de platja constant de 3° , valor congruent amb estudis recents sobre l'evolució de la morfologia del tram de platja analitzat (Perelló et al., 2019), i per tant acceptem un únic valor de la R_{low} representatiu de tot el tram litoral, en comptes d'una anàlisi específica en funció dels diferents perfils de platja.

3.2.1. Dades oceanogràfiques

Les dades del nivell del mar s'han obtingut del mareògraf de Barcelona II de l'estació Redmar de Puertos del Estado. Per equiparar el sistema de referència vertical de les dades oceanogràfiques (0 Redmar) amb la base cartogràfica del model digital d'elevacions del terreny, s'han convertit les dades de marea astronòmica i marea meteorològica referides amb 0 Redmar al nivell mitjà del mar a Alacant.

Les dades d'onatge s'han descarregat del Punt Simar 2109135 ($2,08^\circ$ E; $41,25^\circ$ N). La base de dades Simar (simulació marítima), operada per Puertos del Estado, ofereix sèries temporals de paràmetres d'onatge mitjançant un model numèric (Ratsimandresy et al., 2008). Aquestes dades simulades són de gran utilitat per a l'anàlisi de tendències temporals llargues, ja que s'estenen des del 1958 fins ara i s'actualitzen periòdicament. En canvi, per a l'anàlisi específica de condicions d'onatge d'un temporal concret, poden presentar certes anomalies respecte a les dades reals (Mendoza et al., 2011). Per al càlcul de la R_{low} i la R_{high} , hem hagut d'acceptar aquesta limitació perquè la boia de Barcelona, a causa del fort onatge durant el temporal, va deixar de registrar dades a partir del dia 20 de gener.

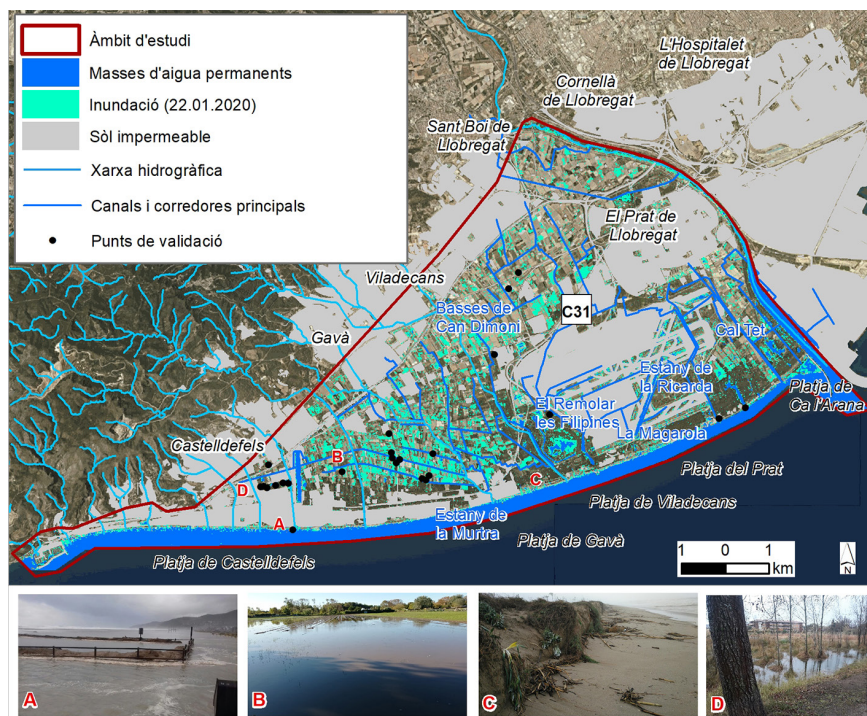
4. Resultats

4.1. Masses d'aigua temporals durant el temporal Gloria (22 de gener de 2020)

El resultat de la classificació supervisada de les imatges SAR obtingudes pel satèl·lit Sentinel-1B es mostra a la figura 5. Les àrees dibuixades en blau marí corresponen a les masses d'aigua permanents. Les àrees representades en blau turquesa fan referència a les masses d'aigua temporals detectades el dia 22 de gener de 2020. Les àrees ombrejades en gris corresponen a superfícies urbanes asfaltades i s'han exclòs de l'anàlisi espacial.

El mapa obtingut mostra una inundació força generalitzada a tota l'àrea estudiada, amb un total de 725 ha de masses d'aigua temporals. La zona que

Figura 5. Delimitació de àrees inundades el dia 22 de gener de 2020, a partir d'una reclasificació d'imatges SAR



A) Platja de Castelldefels inundada, desembocadura obstruïda; B) Parcel·la agrícola (Gavà) inundada (cedida per Miquel José); C) Destrucció de dunes a la platja (cedida pel Consorci dels Espais Naturals); D) Exemple de TFFV (temporal flooded vegetation), zona Olla del Rei, Castelldefels (cedida per la Plataforma Salvem l'Olla del Rei)

Font: elaboració pròpia.

presenta una taca més contínua i extensa d'inundació és l'àrea de les corredores del parc agrari, especialment les parcel·les més deprimides que formen part de la conca de drenatge de la Murtra (figura 5-B). La llacuna va assolir un nivell màxim d'1,35 m s. n. m. el 22 de gener a la matinada (el valor mitjà anual és de 0,72 m s. n. m.) (Cuadll, 2020) i, per tant, els alts nivells de la llacuna van dificultar el drenatge de les corredores.

Moltes de les parcel·les de la conca de drenatge del Remolar-Filipines es detecten com a inundades, especialment del camí Ral fins a mar. No obstant això, àrees més allunyades dels estanyes litorals, com ara l'espai comprès entre les basses de Can Dimoni i la C-31, també presenten inundació. La llacuna del Remolar, a banda de ser receptora d'aigües agrícoles, es troba compromesa per un excés d'aigües de desguàs dels municipis de Sant Boi de Llobregat, Viladecans i el Prat de Llobregat a través de la riera Roja, el canal de la Vidaleta i la

reguera de les Bogues, i també de les aigües de l'aeroport. Conseqüentment, a les àrees dels espais naturals observem un eixamplament dels principals estanys litorals, on visualment el més rellevant és el Remolar-Filipines.

La platja de ca l'Arana (creada després del desviament del riu, tancada a l'ús públic i integrada dins dels espais naturals del Consorci per a la Protecció i la Gestió dels Espais Naturals del Delta del Llobregat) queda totalment inundada. La figura 5-C il·lustra els impactes en el sistema de dunes litorals de la platja del Remolar, a Viladecans. De fet, s'identifica inundació a totes les platges, que és més visible a les platges de més amplada, especialment a Castelldefels (figura 5-A). A Gavà Mar es va produir ultrapassament del vorell costaner, cosa que va afectar la trama urbana, tot i que no s'aprecia en el mapa en tota la seva magnitud per la màscara urbana aplicada i la poca amplada de la platja seca d'aquest tram (rere platja urbanitzat).

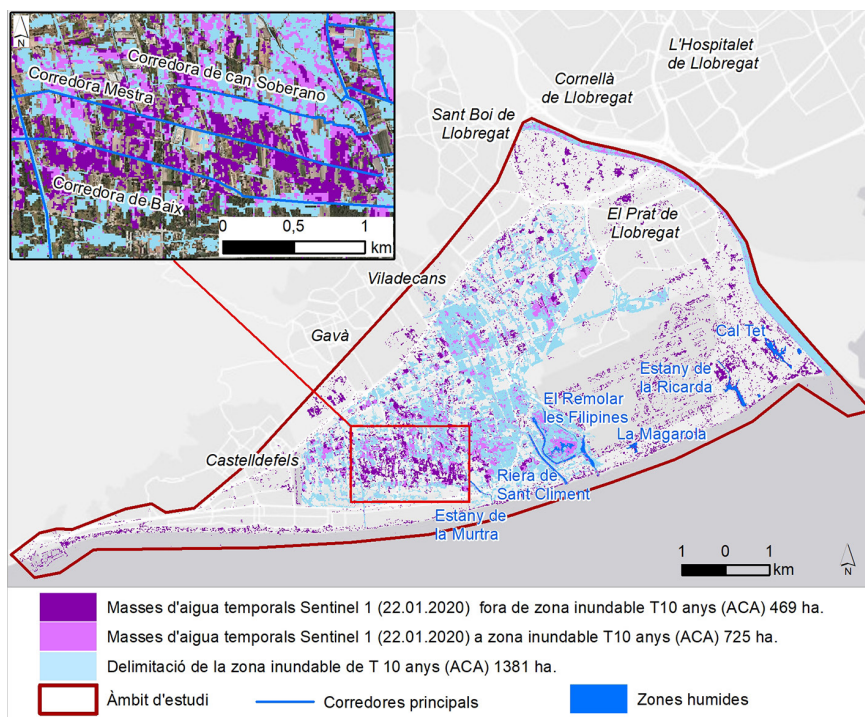
El registre de precipitació acumulada entre els dies 20-23 de gener a l'estació automàtica de Viladecans del Servei Meteorològic de Catalunya va ser de 123,4 mm d'aigua (dels quals 100,6 mm corresponen a la precipitació acumulada del dia 21 de gener). Aquest valor s'aproxima a una pluja de disseny de període de retorn de 10 anys ($T_{10} = 126,9$ mm) utilitzat pel model hidràulic bidimensional de l'estudi de l'impacte acumulat de la xarxa de drenatge del delta del Llobregat (ACA, 2008: 85)¹.

La figura 6 mostra una comparativa entre la delimitació de la zona potencialment inundable per al període de retorn de 10 anys extreta del visor de l'ACA² (<https://sig.gencat.cat/visors/VISOR_ACA.html>) i la inundació observada amb teledetecció el dia 22 de gener. En blau, es mostra la superfície simulada com a inundada però que no es va inundar durant el Gloria; en lila clar, aquelles zones on hi ha correspondència entre ambdues fonts, i finalment, en una tonalitat més fosca, aquelles àrees no detectades pel model hidràulic però detectades inundades durant el temporal Gloria. Del total d'hectàrees inundades segons Sentinel-1, el 65% (469 ha) no correspon a la delimitació de zona inundable modelitzada per al període de retorn de 10 anys.

Destaca la zona de les corredores de Gavà-Viladecans, on moltes parcel·les agràries detectades inundades en el mapa de Sentinel-1 queden omeses a la delimitació de zona inundable. A l'ampliació de la imatge (figura 6), s'observa com la majoria de les parcel·les afectades per aquesta omisió en el model hidràulic es troben entre la corredora de Can Soberano i la corredora del Baix. Altres zones agrícoles inundades durant el temporal Gloria i omeses al model es troben a la part septentrional del mapa i pertanyen al terme municipal de Sant Boi de Llobregat. També s'hi inclou la zona agrícola del canal de la Bunyola/Llacuna de la Ricarda, que, no obstant això, sí que es

1. Utilitzen els valors de pluja màxims diaris proposats al Pla Director d'Aigües Pluvials en l'àmbit de l'Entitat Metropolitana i Serveis Hidràulics i Tractament de Residus (PDAP) pel tipus de pluja A corresponent a una llista de municipis del Baix Llobregat, entre els quals hi ha Gavà, Viladecans i el Prat de Llobregat.
2. Data d'obtenció del mapa: febrer de 2023.

Figura 6. Comparació entre el model d'inundació per a T10 (ACA) i les zones inundades pel temporal Gloria (Sentinel-1)



Font: elaboració pròpia.

delimita com a potencialment inundable a l'estudi de l'ACA (2008) per al mateix període de retorn. Finalment, la darrera gran diferència la trobem a la façana litoral, ja que la modelització hidràulica no contempla la inundació marina (vegeu 4.2).

La validació dels resultats és feble a causa d'un volum reduït de punts de referència. La significació d'aquesta classificació és del 66,6%, i la majoria dels errors detectats són per omisió (taula 2). És a dir, els errors observats corresponen a punts GPS de coordenades inundades que apareixen com a no inundades en el mapa. Per tant, indiquen una aparent infravaloració en la discriminació de superfície inundada. No obstant això, més punts de veritat-terreny probablement també haurien detectat errors de comissió per l'efecte salpebrat o *speckle noise* de les imatges SAR.

Molt probablement aquests errors d'omissió de masses d'aigua poden ser deguts a la vegetació inundada temporalment (Tsyganskaya et al., 2018) o TFV (la sigla en anglès anglès de *temporal flooded vegetation*), que justament comporta una subestimació de la inundació per a aquelles cobertes més denses

Taula 2. Matriu de confusió

		Punts GPS		
		Inundat	No inundat	Total
Mapa	Inundat	11	1	12
	No inundat	7	5	12
	Total	18	6	24
	Exactitud			66,6%

Font: elaboració pròpia.

de vegetació. Si la làmina d'aigua es troba coberta per vegetació, la detecció d'inundació amb imatges SAR es veu compromesa pel canvi de comportament de retrodispersió que rep el sensor. La figura 5-D (un dels punts veritat-terreny utilitzats a la validació) il·lustra un exemple de TFV no detectat inundat a la imatge de Sentinel-1.

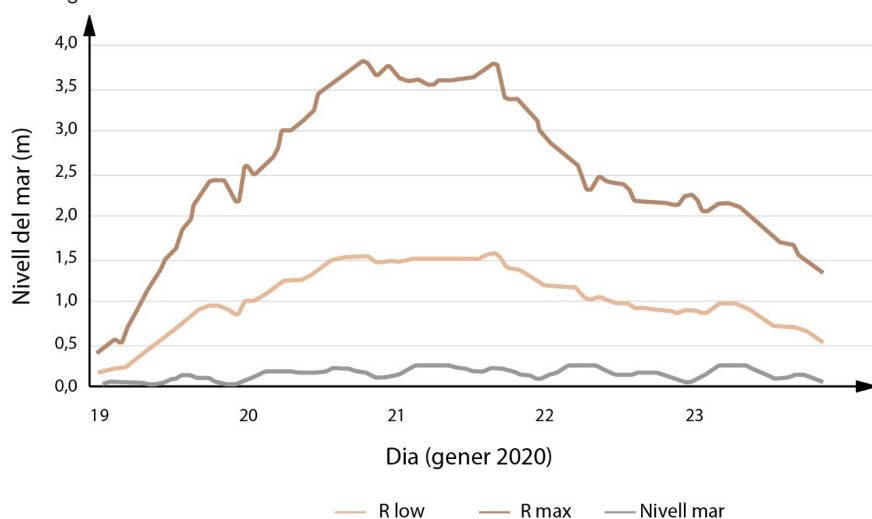
Per tal d'estimar l'impacte de la TFV en el mapa obtingut amb Sentinel-1, hem procedit a un càlcul d'estadístics zonals, distingint entre aquelles parcel·les de la base cartogràfica del SIGPAC del Baix Llobregat amb els codis *campes improductius*, *fruiters* i *forestals* (assumint que la parcel·la improductiva o abandonada, en no estar llaurada, es troba coberta per vegetació més densa). Del total de masses d'aigua temporals detectades dins dels usos agraris del SIGPAC, només el 5% es troba en parcel·les potencialment cobertes de vegetació. Per tant, el mapa podria estar mostrant una delimitació molt conservadora de la inundació, detectant aquelles parcel·les literalment submergides per una làmina d'aigua com es mostra a la figura 5-B. L'efecte de la TFV probablement afecta igualment les zones baixes dels espais naturals amb cobertores per canyissars o altra vegetació lacustre densa.

4.2. El component marí de la inundació

La figura 7 mostra una estimació de l'evolució de la sobrelevació temporal del nivell del mar durant el temporal Gloria. La suma dels càlculs paramètrics de *wave setup* més els valors registrats de *storm surge* i marea indiquen que el nivell mitjà del mar induït pel temporal marítim (R_{low}) va arribar a 1,7 metres. Si hi afegim l'efecte del *wave wash*, el nivell màxim d'aigua assolit pel trencament de les grans onades generades prop de la costa durant el temporal (R_{high}) va arribar a 3,9 metres. Aquests nivells es van mantenir pràcticament constants durant dos dies. És a dir, amb una cota d'inundació marina d'1,7 metres, el sistema de plagues va quedar submergit.

El gràfic també assenyalava que el principal component de l'increment del mar a la zona costanera va ser degut a la remuntada de l'onatge i un *storm surge* induït fonamentalment pels vents i el mateix efecte de l'onatge, i en aquest cas poca aportació de marea meteorològica per baixes pressions que va oscil·lar entre els 20 i 30 cm (dades registrades pel mareògraf del port de Barcelona).

Figura 7. Estimació de l'evolució de la R_{low} i la R_{high} durant el temporal Gloria al delta del Llobregat



Font: elaboració pròpia.

La inundació en el sistema de platges de la figura 5 apareix representada amb un acusat salpebrat i, tot i quedar submergida, no és captada pel sensor com una superfície llisa a causa del fort onatge. Els pluvials i desguassos a mar van quedar obstruïts (figura 5-A), cosa que va dificultar el drenatge de tot el sistema deltaic (Palau Robert, 2021). El desguàs de la llacuna de la Murtra no es va fer efectiu fins al dia 23 de gener, ja que el temporal marítim no va permetre que el cargol d'Arquímedes operés amb normalitat (Cuadll, 2020).

5. Discussió

La planificació territorial té un rol crític en l'anticipació i la promoció d'una adaptació robusta al canvi climàtic (Cardona et al., 2012; Wilson, 2007), però per fer-ho possible cal disposar de cartografia del risc a escala local. El present estudi parteix de l'argument que els mapes de zones inundables disponibles per a l'àrea d'estudi no integren la simultaneïtat entre fonts d'inundació terrestre i marines, ni tampoc incorporen les projeccions de canvi climàtic. Utilitzant una situació atmosfèrica de llevantada, el cas d'estudi il·lustra una situació present d'exposició a la inundació.

El temporal Gloria va tenir afectacions a tota la costa catalana (Guillén, 2020; Pelegrí et al., 2020; Pintó et al., 2020). Les inundacions deltaïques ocorregudes durant el temporal han estat cartografiades al delta de l'Ebre (Amores et al., 2020; ICGC, 2020), en canvi, del delta del Llobregat, a excepció de

l'estudi SGM (2021), que cobreix l'àmbit agrícola de Viladecans, no tenim constància que s'hagi publicat cap suport cartogràfic quantificant l'abast de la inundació. L'article contribueix a omplir aquest buit i donar visibilitat a una situació recurrent d'entollament de la zona agrícola.

La validació dels resultats de la classificació de les masses d'aigua temporals és poc robusta a causa d'un nombre incipient de punts veritat-terreny en proporció a l'àrea d'estudi. Fem notar que no s'utilitzen els resultats de l'estudi SGM (2021) com a font secundària per ampliar els punts de validació perquè els resultats de la classificació de sòl inundat i sòl saturat tampoc estan validats. Futures millores de la figura 5 haurien d'incloure una recopilació més massiva de punts de validació, especialment per millorar els problemes detectats en les zones inundades cobertes de vegetació densa. La correlació observada entre parcel·les detectades no inundades (amb les imatges Sentinel-1) i les parcel·les forestals o abandonades és significativa. Aquesta observació podria indicar que efectivament la inundació detectada correspon a terrenys totalment coberts per una làmina d'aigua i sense coberta vegetal. Els errors d'omissió de la TFV (específic de zones inundades cobertes per vegetació) també podrien haver subestimat la inundació dels espais naturals.

L'exclusió de les àrees urbanes d'aquest estudi representa una certa limitació dels resultats obtinguts en no cobrir l'abast de tota la inundació deltaica, que va ser significativa en zones urbanes com ara Castelldefels (Palau Robert, 2021). No obstant això, l'èmfasi en els espais «lliures» d'asfalt pot ajudar a una millor comprensió de la situació de vulnerabilitat d'àrees i sectors sovint oblidats en l'anàlisi de risc. Per al cas dels espais naturals, els problemes associats a la inundació no són tant per la quantitat d'aigua, ja que es tracta d'espais inundables, sinó per la qualitat d'aquesta en arribar als aiguamolls protegits i la pèrdua d'hàbitats litorals accelerada per la regressió dels sistemes platja-duna (Roa i Esteban, 2018; Palau Robert, 2021). Els espais naturals del delta del Llobregat, altament valorats tant per la població local com per la visitant (Meo et al., 2021), tenen un paper clau per enfortir i protegir l'interior del delta d'extrems climàtics presents i futurs (CADS, 2021; Broekman et al., 2020; Ibañez i Prat, 2020).

A la zona agrària, s'identifica una inundació generalitzada, especialment intensa a les parcel·les del tram de les corredores de Gavà-Viladecans, on es va perdre el 80% de la collita (*La Premsa del Baix*, 2020). Aquesta situació no és puntual (Catà, 2020) i compromet la viabilitat econòmica d'un sector primari en declivi (Fernández, 2019; Sempere, 2004). La situació recurrent d'inundació d'aquestes àrees és coneguda. Concretament, l'ACA va realitzar un estudi de diagnosi de l'impacte hidrològic, hidràulic i ambiental acumulat a les zones agrícoles i humides del marge dret del riu Llobregat generat per les noves infraestructures (ACA, 2008a). L'avaluació dels impactes sobre la inundabilitat incorpora una delimitació de les zones potencialment inundables associades a les avingudes de $T = 0,1, 1, 10, 25$ i 50 anys de període de retorn. El segon volum de l'esmentat informe (ACA, 2008b) incorpora mesures correctores i

compensatòries per redreçar els impactes detectats, que a data d'avui no s'han implementat (Palau Robert, 2021)³.

La comparativa de les masses d'aigua temporals (Sentinel-1), amb la delimitació de la zona inundable per al període de retorn de 10 anys (visor ACA), mostra discrepàncies zonals. El desacord entre la inundació de les parcel·les agràries a través de la modelització hidràulica i la inundació detectada durant el temporal Gloria ja ha estat notificat amb anterioritat per l'estudi d'entollaments a la zona agrària de Viladecans (SGM, 2021). Segons l'esmentat treball, alguns dels factors condicionants de la inundació en aquestes àrees agrícoles no detectades pel model de l'ACA són: el pendent, l'alçada relativa respecte al nivell freàtic, la granulometria (aportacions de llims i argiles), la distància en els canals, l'estat funcional de la xarxa de canals, entre d'altres (SGM, 2021).

Aquest article proposa incorporar un altre factor condicionant per a l'anàlisi de la inundabilitat local al delta del Llobregat: les oscil·lacions temporals del nivell del mar. Aquesta consideració és especialment pertinent en les planes deltaïques per l'efecte banyera (taponament desembocadures), sobretot a les costes baixes mediterrànies menys avesades a grans oscil·lacions diàries del nivell del mar (Day et al., 1995) i en platges dissipatives on el component de l'*storm surge* és significativament superior (Mendoza i Jiménez, 2005). La cota d'inundació marina estimada a partir de la R_{low} durant el temporal Gloria va ser d'1,7 metres. Aquest valor podria haver superat de llarg els dos metres si hagués coincidit amb una situació sinòptica de baixes pressions. El mapa elaborat en aquest estudi recolza treballs previs que alerten d'una subestimació de l'impacte potencial de la inundació marina pel fet de considerar únicament la pujada permanent del nivell mitjà del mar (Barnard et al., 2019; Vitousek et al., 2017; Wahl et al., 2015) i ignorar les interaccions entre riscos (Simpson et al., 2021).

Sabem que pobles i ciutats costaners s'han de preparar per fer front a episodis extrems cada vegada més intensos i freqüents, i després recuperar-se dels seus estralls (CADS, 2021; MedECC, 2020). La hidrologia del delta es caracteritza pel poc pendent, per nivells freàtics alts i per un sistema de drenatge complex i controvertit (Queralt i Isla, 2018; Sans i Panareda, 2012). Conèixer i considerar aquestes vulnerabilitats i particularitats actuals és clau per a una adaptació robusta al canvi climàtic (Wilby i Dessai, 2010) i representa un guany en capacitats locals (Marín-Puig et al., 2022). El mapa elaborat mitjançant metodologies de teledetecció contribueix a fer visible i ampliar la base de coneixement relacionada amb les inundacions a escala local i augmentar el potencial de gestió d'àrees exposades per problemes locals de drenatge i escolaments. Per fer-ho possible, cal involucrar les persones afectades i coneixedores del territori, per tal d'explorar col·lectivament les dinàmiques i

3. En el període 2022-2027, es preveu una inversió en aquest sentit de 8 M€: 7 M€ destinats a les actuacions derivades dels treballs efectuats en el marc de la Comissió Tècnica del Delta del Llobregat i 1 M€ articulat en forma de línies de subvenció en règim de cofinançament, adreçades a les comunitats de regants per a la millora dels sistemes de drenatge agrícola.

les interdependències socioecològiques (Mathevet i Bousquet, 2014; White et al., 2010), i així poder transitar cap a nous paradigmes que enriqueixin les capacitats de resposta des de la perspectiva de la comunitat local, per exemple, en la gestió de les aigües pluvials (Nóblega-Carriquiry, 2022) o en el rol, la gestió i el manteniment de la xarxa de reg i drenatge agrícola.

6. Conclusions

A través del cas d'estudi del temporal Gloria al delta del Llobregat, l'article aborda l'exposició a la inundabilitat local al marge dret del riu Llobregat. El treball apunta a la necessitat de no menystenir les oscil·lacions temporals del nivell del mar, especialment rellevants en plans d'inundació urbanitzades amb dificultats de drenatge durant episodis d'aiguats.

El mapa obtingut amb imatges SAR permet la discriminació de les àrees dels espais agraris i naturals del marge dret del riu Llobregat més exposats a la inundació temporal. Aquests resultats permeten disposar d'informació útil a l'hora d'avaluar vulnerabilitats i riscos associats als darrers espais lliures del delta. Aquestes vulnerabilitats actuals s'han de conèixer i atendre com a pas previ per fer front a la intensificació i l'acceleració d'extrems climàtics previstos.

Referències bibliogràfiques

- ACA (2008a). *Estudi d'impacte acumulat i d'avaluació d'alternatives sobre la xarxa de drenatge i les zones humides generats per l'execució de les infraestructures del delta del Llobregat*, 1.
- (2008b). *Estudi d'impacte acumulat i d'avaluació d'alternatives sobre la xarxa de drenatge i les zones humides generats per l'execució de les infraestructures del delta del Llobregat*, 2.
- (2019). «Annex 07. Incidència del canvi climàtic en el risc d'inundació». A: *Revisió i actualització de l'avaluació preliminar del risc d'inundació del districte de conca fluvial de Catalunya (2n cicle)*, 1-52.
- ALBALADEJO, M. J. (2015). «La preservació del medi natural en un context metropolità». *Materials del Baix Llobregat*, 21, 53-57.
- AMB (2015a). *Pla local d'adaptació al canvi climàtic del Prat de Llobregat (PLACC 2016-2020)*. Direcció de Serveis Ambientals de l'AMB. Recuperat de <https://www.elprat.cat/sites/default/files/documentos_descargables/3_4_3_pla_adaptacio_canviclimatic_prat_0.pdf>.
- (2015b). *Pla local d'adaptació al canvi climàtic de Viladecans (PLACC 2016-2020)*. Direcció de Serveis Ambientals de l'AMB. Recuperat de <<https://seuelectronica.viladecans.cat/images/documents/plans/PACCViladecans.pdf>>.
- (2018). *Pla d'adaptació al canvi climàtic de Gavà (2020-2030)*. Recuperat de <<https://www.gavaciutat.cat/documents/20142/0/PLACC+GAVA+2019-30.pdf/617f1856-87b5-e90f-17c8-94a21d20901a>>.
- AMORES, A.; MARCOS, M.; CARRIÓ, D. S. i GÓMEZ-PUJOL, L. (2020). «Coastal impacts of Storm Gloria (January 2020) over the north-western Mediterranean». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20 (7), 1.955-1.968.
<<https://doi.org/10.5194/nhess-20-1955-2020>>

- ANSELME, B.; DURAND, P.; THOMAS, Y. F. i NICOLAE-LERMA, A. (2011). «Storm extreme levels and coastal flood hazards: A parametric approach on the French coast of Languedoc (district of Leucate)». *Comptes Rendus Geoscience*, 343 (10), 677-690. <<https://doi.org/10.1016/J.CRTE.2011.07.006>>
- BALLESTEROS, C.; JIMÉNEZ, J. A. i VIAVATTENE, C. (2018). «A multi-component flood risk assessment in the Maresme coast (NW Mediterranean)». *Natural Hazards*, 90 (1), 265-292. <<https://doi.org/10.1007/s11069-017-3042-9>>
- BANCHINI, S.; CHELLERI, L.; TRUJILLO, A. J. i BRETON, F. (2009). «New Directions in Beach Management in the Barcelona Metropolitan Area Coastal Systems (Catalonia, Spain)». A: WILLIAMS, A. i MICALLEF, A. *Beach management. Principles & practice*. Londres: Earthscan, 349-357.
- BARNARD, P. L.; ERIKSON, L. H.; FOXGROVER, A. C.; HART, J. A. F.; LIMBER, P.; O'NEILL, A. C.; ORMONDT, M. van; VITOUSEK, S.; WOOD, N.; HAYDEN, M. K. i JONES, J. M. (2019). «Dynamic flood modeling essential to assess the coastal impacts of climate change». *Scientific Reports*, 9 (1), 1-13. <<https://doi.org/10.1038/s41598-019-40742-z>>
- BARRIENDOS, M.; GIL-GUIRADO, S.; PINO, D.; TUSET, J.; PÉREZ-MORALES, A.; ALBEROLA, A.; COSTA, J.; BALASCH, J. C.; CASTELLTORT, X.; MAZÓN, J. i RUIZ-BELLET, J. L. (2019). «Climatic and social factors behind the Spanish Mediterranean flood event chronologies from documentary sources (14th-20th centuries)». *Global and Planetary Change*, 182. <<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.102997>>
- BOE (2005). *Resolución de 5 de mayo de 2000, de la Secretaría General de Medio Ambiente, por la que se formula declaración de impacto ambiental sobre el plan director del puerto de Barcelona, de la Autoridad Portuaria de Barcelona (2005)*.
- BREIMAN, L. (2001). «Random Forests». *Machine Learning*, 45, 5-32.
- BRETON, F. i SAURI-PUJOL, D. (1997). «Toward a redefinition of resources and hazards in coastal management: Examples from the lowland coastal areas of Catalonia, Spain». *Coastal Management*, 25 (4), 363-385. <<https://doi.org/10.1080/08920759709362330>>
- BROEKMAN, A.; SÁNCHEZ-PLAZA, A.; GARÓFANO-GÓMEZ, V. i MARTÍNEZ-CAPE, F. (2020). *Estratègia integrada per a la reducció de la vulnerabilitat als impactes del canvi global al Delta i la Baixà Tordera*. Informe tècnic projecte REDAPTA amb el suport de la Fundación Biodiversidad, del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.
- CADS (2021). *Un litoral al límit. Recomanacions per a una gestió integrada de la costa catalana*. Barcelona: Generalitat de Catalunya. Recuperat de <<https://cads.gencat.cat/web/.content/Documents/Informes/2021/informe-Un-Litoral-al-Limit.pdf>>.
- CAPMANY, J. (2004). «La colonització del delta occidental del Llobregat (Gavà i Castelletdefels)». A: PRAT, N. i TELLO, E. (eds.). *El Baix Llobregat, història i actualitat ambiental d'un riu*. Centre d'Estudis Comarcals del Baix Empordà, 160-171.
- CARDONA, O. D.; AALST, M. K. van; BIRKMANN, J.; FORDHAM, M.; MC GREGOR, G.; ROSA, P.; PULWARTY, R. S.; SCHIPPER, E. L. F.; SINH, B. T.; DÉCAMP, H.; KEIM, M.; DAVIS, I.; EBI, K. L.; LAVELL, A.; MECHLER, R.; MURRAY, V.; PELLING, M.; POHL, J.; SMITH, A. O. i THOMALLA, F. (2012). «Determinants of risk: Exposure and vulnerability». A: C. FIELD, V. BARROS, T. STOCKER i Q. DAHE (Eds.). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 65-108. <<https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.005>>

- CATÀ, J. (6/2/2020). «El Gloria aquí pasa un poco cada año. *El País*. Recuperat de <https://elpais.com/ccaa/2020/02/05/catalunya/1580926953_290651.html>.
- CHUVIECO, E. (2010). *Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio* (3a ed.). Barcelona: Ariel Ciències.
- CODINA, J. (1966). *Delta del Llobregat. La gent del fang. El Prat: 1965-1965*. Granollers: Montblanc.
- (1971). *Inundacions al delta del Llobregat (Flooding at the Llobregat Delta)*. R. Dalmau.
- CONDE, F. C. i MATA MUÑOZ, M. de (2019). «Flood monitoring based on the study of Sentinel-1 SAR images: The Ebro river case study». *Water (Switzerland)*, 11 (12). <<https://doi.org/10.3390/w11122454>>
- CUADLL (2020). *Evolució del nivell d'aigua de la Murtra durant el temporal Gloria*, p. 2.
- DAY, J. W.; POST, D.; HENSEL, P. F. i IBÁÑEZ, C. (1995). «Impacts of sea-level rise on Deltas in the Gulf of México and Mediterranean». *Estuaries*, 18 (4), 636-647.
- ESA (2022). *Sentinel-1 SAR User Guide*. Recuperat de <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar>>.
- ESTEBAN, P.; LAREDO, S.; PINO, J. i VALVERDE MARTÍNEZ, A. (2018). «El context deltaic: situació, origen geològic i història del poblament humà». A: GERMAIN I OTZET, J. i PINO I VILALTA, J. (eds.). *Els sistemes naturals del delta del Llobregat*. Barcelona: Institució Catalana d'Història Natural, 27-41.
- FERNÁNDEZ, J. (2019). *Problemáticas, oportunidades y desafíos de la agricultura deltaica periurbana en el contexto del cambio climático*. Bellaterra: UAB.
- FILIPPONI, F. (2019). «Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow». *Proceedings 2019*, 18 (1), 11. <<https://doi.org/10.3390/ECRS-3-06201>>
- GARCIA-LOZANO, C. (2019). *Els sistemes dunars de la costa catalana. Evolució històrica, estat actual i potencial de restauració*. Girona: Universitat de Girona. Recuperat de <<http://hdl.handle.net/10803/668331>>.
- GENERALITAT DE CATALUNYA (2017). *Pla de gestió del districte de conca fluvial de Catalunya i programa de mesures*. Recuperat de <http://aca.gencat.cat/web/.content/30_Plans_i_programes/10_Pla_de_gestio/02-2n-cicle-de-planificacio-2016-2021/destacat/01_Document_sintesi_PdG_2ncicle_ca.pdf>.
- GERMAIN, J. (2018). «Iniciatives de conservació del delta del Llobregat». A: GERMAIN I OTZET, J. i PINO I VILALTA, J. (eds.). *Els sistemes naturals del delta del Llobregat*. Barcelona: Institució Catalana d'Història Natural, 651-677.
- GRACIA, V. i CALAFAT, A. (2019). «El hemidelta sur del Llobregat. Un sistema natural controlado por la acción humana. The southern lobe of the Llobregat delta: A natural system controlled by human activity». *X Jornadas de Geomorfología Litoral: libro de ponencias*, 265-269. <<https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/8956>>
- GUILLÉN, J. (2008). «Els riscos litorals a Catalunya». A: VILAPLANA, J. M. (ed.). *Informe RISKAT. Els riscos naturals a Catalunya*. Barcelona: Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible. Generalitat de Catalunya, 1-26. Recuperat de <https://cads.gencat.cat/web/.content/Documents/Publicacions/els_riscos_naturals_a_catalunya.pdf>.
- (2020). «Impacte sobre la franja litoral». A: BERDALET, E.; MARRASÉ, C. i PELEGRÍ, J. L. (eds.). *Resum sobre la formació i conseqüències de la borrasca Gloria (19-24 gener 2020)*. Institut de Ciències del Mar, CSIC, 15-24. <<https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/12496>>

- IBÁÑEZ, C. i PRAT, N. (2020). «El delta de l'Ebre i el canvi global». *L'Agró Negre de Depana*.
- ICC (2010). *Llibre verd. Estat de la zona costanera a Catalunya*. Recuperat de <https://territori.gencat.cat/ca/01_departament/documentacio/territori-i-urbanisme/ordenacio_territorial/llibre_verd_estat_de_la_zona_costanera/>.
- ICGC (2020). *Efectes temporal Gloria. Delta de l'Ebre*. Recuperat de <<https://betaserver.icgc.cat/delta/#11.18/40.7102/0.681>>.
- IHCANTABRIA (2020). *Elaboración de la metodología y bases de datos para la proyección de impactos de cambio climático a lo largo de la costa española*. Recuperat de <https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-costa/tarea_4_pima_adapta_mapa-ma_digitalweb-comprimido_tcm30-523734.pdf>.
- LA PREMSA DEL BAIX (29/1/2020). «El rastre que ha deixat el temporal Gloria al Baix Llobregat». Recuperat de <<https://www.lapremasdelbaix.es/noticies/reportatge/25184-el-rastre-que-ha-%0Adeixat-el-temporal-gloria-al-baix-llobregat.html>>.
- LAVOLA (2014). *Programa municipal d'adaptació al canvi climàtic de Castelldefels*. Recuperat de <<https://www.seu-e.cat/documents/8627323/0/PACCC/>>.
- LÓPEZ-BUSTINS, J. A. i MARTÍN-VIDE, J. (2020). «Causes meteorològiques i contextualització climàtica de la precipitació del temporal Gloria». *Treballs de la Societat Catalana de Geografia*, 89, 39-54.
<<https://doi.org/10.2436/20.3002.01.190>>
- MARCÉ, R.; HONEY-ROSÉS, J.; MANZANO, A.; MORAGAS, L.; CATLLAR, B. i SABATER, S. (2012). «The Llobregat River Basin: A Paradigm of Impaired Rivers Under Climate Change Threats». A: SABATER, S.; GINEBREDÀ, A. i BARCELÓ, D. (eds.). *The Llobregat. The Handbook of Environmental Chemistry*. Berlin: Springer.
<https://doi.org/10.1007/698_2012_152>
- MARÍN-PUIG, A.; ARIZA, E. i CASELLAS, A. (2022). «Unattended gap in local adaptation plans: The quality of vulnerability knowledge in climate risk management». *Climate Risk Management*, 38.
<<https://doi.org/10.1016/J.CRM.2022.100465>>
- MARQUÉS, M. A. (1984). *Les formacions quaternàries del delta del Llobregat*. Barcelona: Institut d'Estudis Catalans.
- MARTÍN-VIDE, J. P.; PRATS-PUNTÍ, A. i FERRER-BOIX, C. (2020). «What controls the coarse sediment yield to a Mediterranean delta? The case of the Llobregat river (NE Iberian Peninsula)». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20 (12), 3.315-3.331.
<<https://doi.org/10.5194/NHESS-20-3315-2020>>
- MATHEVET, R. i BOUSQUET, F. (2014). *Résilience & environnement. Penser les changements socio-écologiques*. Buchet Chastel.
- MEDICC (2020). *Climate and environmental change in the Mediterranean basin. Current situation and risks for the future. First Mediterranean assessment report*. [CRAMER, W.; GUIOT, J. i MARINI, K. (eds.)]. Marsella: Union for the Mediterranean.
<<https://doi.org/10.5281/zenodo.4768833>>
- MENDOZA, E.; JIMENEZ, J. i MATEO, J. (2011). «A coastal storms intensity scale for the Catalan sea (NW Mediterranean)». *Natural Hazards and Earth System Science*, 11 (9), 2.453-2.462.
<<https://doi.org/10.5194/nhess-11-2453-2011>>
- MENDOZA, E. T. i JIMÉNEZ, J. A. (2005). «Factors controlling vulnerability to storm impacts along the Catalanian coast». *29th International Conference on Coastal Engineering*, 3.087-3.099.
<https://doi.org/10.1142/9789812701916_0249>

- MEO, B.; GRAHAM, S.; ARIZA, E.; CASELLAS, A. i DELFINO, D. (2021). «The resident and visitor gaze: A comparison of coastal social values at risk due to sea-level rise». *Environmental Science & Policy*, 123, 202-209.
<<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.05.017>>
- MONTASELL I DORDA, J. (2006). «Els espais agraris de la regió metropolitana de Barcelona». *L'Atzavara*, 14, 73-89.
- NICHOLLS, R. J.; HOOZEMANS, F. M. J. i MARCHAND, M. (1999). «Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise: regional and global analyses». *Global Environmental Change*, 9 (SUPPL.), S69-S87.
<[https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(99\)00019-9](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(99)00019-9)>
- NÓBLEGA-CARRIQUIRY, A. (2022). «Contributions of Urban Political Ecology to sustainable drainage transitions». *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 68 (2), 363-391.
<<https://doi.org/10.5565/rev/dag.701>>
- PALACIOS, D. (2019). «La erosión en las playas del Área Metropolitana de Barcelona. La perspectiva del gestor». A: DURÁN, R.; GUILLÉN, J. i SIMARRO, G. (eds.). *X Jornadas de Geomorfología Litoral: libro de ponencias*. Barcelona: Instituto de Ciencias del Mar, 100-104.
- PALAU ROBERT (2021). *Aprenem del Gloria al Delta: Mapes de risc d'inundació i component marina*. Sicom TV. Solidaritat i Comunicació. Recuperat de <<https://www.youtube.com/watch?v=nU6R-17QuSY>>.
- PELEGRÍ, J. L.; GARCÍA-LADONA, E. i SALAT, J. (2020). «Característiques sobre el litoral català». A: BERDALET, E.; MARRASÉ, C. i PELEGRÍ, J. L. (eds.). *Resum sobre la formació i conseqüències de la borrasca Gloria (19-24 gener 2020)*. Barcelona: Institut de Ciències del Mar, CSIC, 5-14.
- PERELLÓ, M. X.; DURÁN, R.; VALERO, L. i GUILLÉN, J. (2019). «Evolución geomorfológica de la costa del delta del Llobregat mediante datos LIDAR. Geomorphological evolution of the Llobregat Delta coast based on LIDAR data (2008 to 2017)». A: DURÁN, R.; GUILLÉN, J. i SIMARRO, G. (eds.). *X Jornadas de Geomorfología Litoral: libro de ponencias*. Barcelona: Instituto de Ciencias del Mar, 177-180.
- PINO, J. i ISERN, R. (2018). «El paisatge funcional i el mosaic dels ecosistemes terrestres». A: GERMAIN I OTZET, J. i PINO I VILALTA, J. (eds.). *Els sistemes naturals del delta del Llobregat*. Barcelona: Institució Catalana d'Història Natural, 97-112.
- PINTÓ, J.; GARCIA-LOZANO, C.; SARDÀ, R.; ROIG-MUNAR, F. X. i MARTÍ, C. (2020). «Efectes del temporal Gloria sobre el litoral». *Treballs de la Societat Catalana de Geografia*, 89, 89-109.
<<https://doi.org/10.2436/20.3002.01.192>>
- PRATS-PUNTÍ, A.; MARTÍN-VIDE, J. P. i BOIX-FERRER, C. (2021). «Regressió del delta del Llobregat. Efecte de les obres d'enginyeria al riu d'ençà del segle XIX». *Cuadernos de Geografía*, 107, 123-148.
<<https://doi.org/10.7203/CGUV.107.21307>>
- QUERALT, E. i ISLA, E. (2018). «L'aigua al Delta». A: GERMAIN I OTZET, J. i PINO I VILALTA, J. (eds.). *Els sistemes naturals del delta del Llobregat*. Barcelona: Institució Catalana d'Història Natural, 43-70.
- RATSIMANDRESY, A. W.; SOTILLO, M. G.; CARRETERO ALBIACH, J. C.; ÁLVAREZ FANJUL, E. i HAJJI, H. (2008). «A 44-year high-resolution ocean and atmospheric hindcast for the Mediterranean Basin developed within the HIPOCAS Project». *Coastal Engineering*, 55 (11), 827-842.
<<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.02.025>>

- ROA, E. de i ESTEBAN, P. (2018). «Els reptes actuals i futurs per a la conservació de la biodiversitat en el delta del Llobregat. A: GERMAIN I OTZET, J. i PINO I VILALTA, J. (eds.). *Els sistemes naturals del delta del Llobregat*. Barcelona: Institució Catalana d'Història Natural, 679-689.
- RODA, R. (2015). «El consorci del parc agrari del Baix Llobregat». *Materials del Baix Llobregat*, 21, 19-26.
- SALLENGER, A. H. (2000). «Storm impact scale for barrier islands». *Journal of Coastal Research*, 16 (3), 890-895.
- SÁNCHEZ-ARCILLA, A.; GRACIA, V. i SIERRA, J. P. (2016). «Sistemes costaners i dinàmica litoral». A: *Tercer informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*, 189-210.
- SÁNCHEZ-JUNY, M. i DOLZ RIPOLLÉS, J. (2004). «El riu, un camí d'aigua». A: PRAT, N. i TELLO, E. (eds.). *El Baix Llobregat, història i actualitat ambiental d'un riu*. Centre d'Estudis Comarcals del Baix Empordà, 30-49.
- SANS, J. i PANAREDA, J. M. (2012). «Le canal de la rive droite du fleuve Llobregat. Paysages et biodiversité de l'espace métropolitain de Barcelone (Espagne)». A: ASPE, C. (ed.). *De l'eau agricole à l'eau environnementale. Résistance et adaptation aux nouveaux enjeux de partage de l'eau en Méditerranée*. París: Quae, 175-186.
- (2016). *Els paisatges de l'aigua al delta del Llobregat*. Barcelona: Institut d'Estudis Catalans.
- SEMPERE, J. (2004). «La pagesia del delta del Llobregat: un futur incert». *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 43, 45-68.
- SGM (2021). *Estudi sobre els episodis recents d'inundacions i entollament de la zona agrícola a Viladecans*.
- SIMPSON, N. P.; MACH, K. J.; CONSTABLE, A.; HESS, J.; HOGARTH, R.; HOWDEN, M.; LAWRENCE, J.; LEMPERT, R. J.; MUCCIONE, V.; MACKEY, B.; NEW, M. G.; O'NEILL, B.; OTTO, F.; PÖ, H.-O.; REISINGER, A.; ROBERTS, D.; SCHMIDT, D. N.; SENEVIRATNE, S.; STRONGIN, S... i TRISOS, C. H. (2021). «A framework for complex climate change risk assessment». *Perspective*, 4 (4), 489-501.
<<https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.03.005>>
- SOLÉ I PERICH, L. (2005). «El risc d'inundacions al delta del Llobregat. Viure contra l'aigua?». *Treballs de la Societat Catalana de Geografia*, 42, 223-264. Recuperat de <<http://revistes.iec.cat/index.php/TSCG/article/view/37098/37081>>.
- STOCKDON, H. F.; HOLMAN, R. A.; HOWD, P. A. i SALLENGER, A. H. (2006). «Empirical parameterization of setup, swash, and runup». *Coastal Engineering*, 53 (7), 573-588.
<<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.12.005>>
- (2007). «A simple model for the spatially-variable coastal response to hurricanes». *Marine Geology*, 238 (1-4), 1-20.
<<https://doi.org/10.1016/j.margeo.2006.11.004>>
- TARAZONA, Y.; ZABALA, A.; PONS, X.; BROQUETAS, A.; NOWOSAD, J. i ZURQANI, H. A. (2021). «Fusing Landsat and SAR Data for Mapping Tropical Deforestation through Machine Learning Classification and the PVts-β Non-Seasonal Detection Approach». *Canadian Journal of Remote Sensing*, 47 (5), 677-696.
<<https://doi.org/10.1080/07038992.2021.1941823>>
- TAVUS, B.; KOCAMAN, S.; GOKCEOGLU, C. i NEFESLIOGLU, H. A. (2018). «Considerations on the use of Sentinel-1 data in flood mapping in urban areas: Ankara (Turkey) 2018 floods». *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 578-571.

- TSYGANSKAYA, V.; MARTINIS, S.; MARZAHN, P. i LUDWIG, R. (2018). «Detection of temporary flooded vegetation using Sentinel-1 time series data». *Remote Sensing*, 10 (8), 1286.
<<https://doi.org/10.3390/rs10081286>>
- UNFCCC (2015). *Adoption of the Paris agreement*. United Nations Framework Convention on Climate Change, p. 31.
- VITOUSEK, S.; BARNARD, P. L.; FLETCHER, C. H.; FRAZER, N.; ERIKSON, L. i STORLAZZI, C. D. (2017). «Doubling of coastal flooding frequency within decades due to sea-level rise». *Scientific Reports*, 7 (1), 1-9.
<<https://doi.org/10.1038/s41598-017-01362-7>>
- WAHL, T.; JAIN, S.; BENDER, J.; MEYERS, S. D. i LUTHER, M. E. (2015). «Increasing risk of compound flooding from storm surge and rainfall for major US cities». *Nature Climate Change*, 5 (12), 1.093-1.097.
<<https://doi.org/10.1038/nclimate2736>>
- WHITE, I.; KINGSTON, R. i BARKER, A. (2010). «Participatory geographic information systems and public engagement within flood risk management». *Journal of Flood Risk Management*, 3 (4), 337-346.
<<https://doi.org/10.1111/J.1753-318X.2010.01083.X>>
- WILBY, R. L. i DESSAI, S. (2010). «Robust adaptation to climate change». *Weather*.
<<https://doi.org/10.1002/wea.543>>
- WILSON, E. (2007). «Adapting to Climate Change at the Local Level: The Spatial Planning Response». *The International Journal of Justice and Sustainability*, 11 (6), 609-625.
<<https://doi.org/10.1080/13549830600853635>>