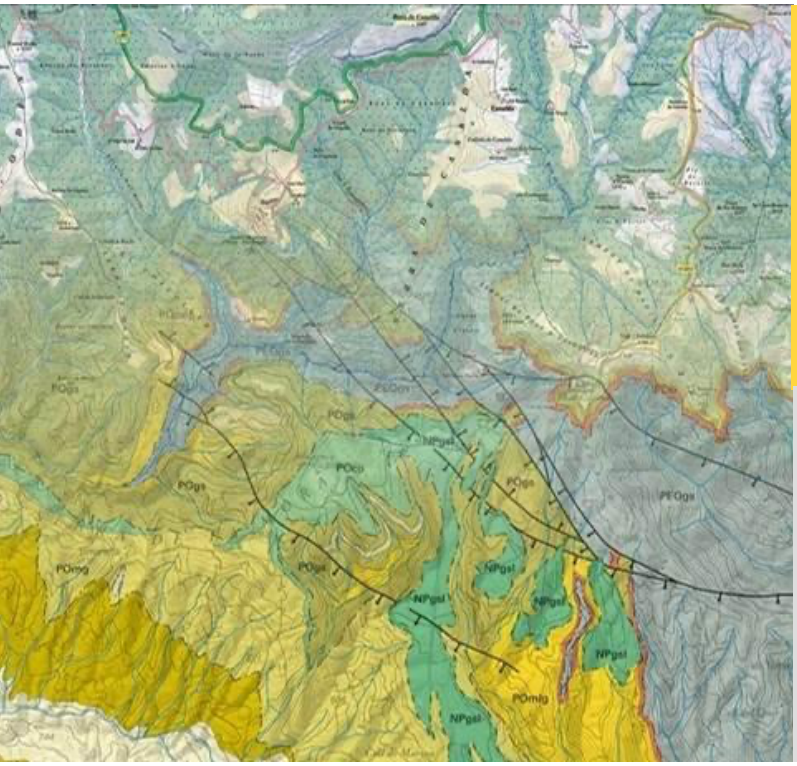
Centre de Recerca Aplicada en Hidrometeorologia
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

ICGC
Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya



Treballs d'assistència tècnica per l'operació i millora d'un sistema regional d'avís d'esllavissades en temps real.

Informe final.

Codi: AP-0061/25
Desembre de 2025

Generalitat de Catalunya

Històric del document

Versió	Data	Autor	Acció
1.0	22/12/2025	A. Berruezo, L. A. Tapia, M. Berenguer	Revisor: J. Becerra
2.0	23/01/2026	A. Berruezo, L. A. Tapia, M. Berenguer	Revisor: J. Becerra
2.1	08/02/2026	A. Berruezo, L. A. Tapia, M. Berenguer	

Índex

1 Objecte del projecte 4
2 Tasques del projecte 6
3 Accés a la informació d'avisos i manteniment del sistema 7
3.1 Càlcul de la precipitació en temps real 7
3.2 Càlcul dels avisos d'esllavissades 8
3.3 Manteniment del sistema 9
4 Millora del servei 10
4.1 Incorporació de les previsions de models de predicció meteorològica 10
4.2 Millora dels algorismes de càlcul del mapa d'avisos 11
4.3 Millora del disseny i adaptació del sistema web de visualització de les noves funcionalitats 11
4.4 Generació i enviament de missatges automàtics 17
5 Avaluació dels resultats obtinguts 18
5.1 Descripció del període analitzat des del punt de vista de l'activitat d'esllavissades i els avisos generats 18
5.2 Avaluació sistemàtica amb el mètode EDuMaP 20
5.3 Anàlisi de dies seleccionats 28
5.4 Anàlisi de l'efecte de l'agregació del nivell d'alerta sobre les unitats de vessant 39
5.5 Anàlisi de les alertes d'esllavissades obtingudes a partir de les previsions de pluja 43
6 Conclusió 49
Referències 51

1 Objecte del projecte

En el marc del projecte "Serveis d'assistència tècnica per la implementació d'un sistema d'avís d'esllavissades en temps real i l'operació del sistema durant 12 mesos" (2022-2023), el Centre de Recerca Aplicada en Hidrometeorologia de la Universitat Politècnica de Catalunya (CRAHI-UPC) va posar en marxa un sistema per l'accés de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC) als productes d'alerta d'esllavissades en temps real.

L'objecte del projecte "Treballs d'assistència tècnica per l'operació i millora d'un sistema regional d'avís d'esllavissades" (2023-2025), ha sigut l'operació del sistema en temps real i el desenvolupament de millores del sistema.

En el marc d'aquest projecte, el sistema ha estat en funcionament entre l'1 de desembre de 2023 i el 30 de novembre de 2025, i s'han utilitzant les dades de precipitació del Servei Meteorològic de Catalunya. Aquestes dades de precipitació s'han pogut utilitzar gràcies a l'acord al que s'ha arribat entre aquesta institució i l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC) per al seu ús en el marc d'aquest projecte.

Com s'explicava a l'informe final del "Serveis d'assistència tècnica per la implementació d'un sistema d'avís d'esllavissades en temps real i l'operació del sistema durant 12 mesos" (Berenguer et al., 2023), el sistema d'alerta d'esllavissades que s'ha utilitzat com a punt de partida d'aquest projecte es basa en les versions de Berenguer et al. (2015) i Palau et al. (2020; 2022): a partir de la combinació de la susceptibilitat del terreny (amb una resolució de 30 m) i de la magnitud de la situació de precipitació (expressada a partir de 3 corbes intensitat-durada llindar), s'avalua el nivell d'avís d'esllavissades en 4 classes: nivells molt baix, baix, moderat i alt (Figura 1).

Aquest informe s'ha preparat com un resum executiu dels resultats de les tasques desenvolupades al llarg del projecte, i se centra, per una banda, en les millores introduïdes al sistema i, per l'altra, en l'avaluació dels resultats obtingut durant l'operació del sistema en temps real.

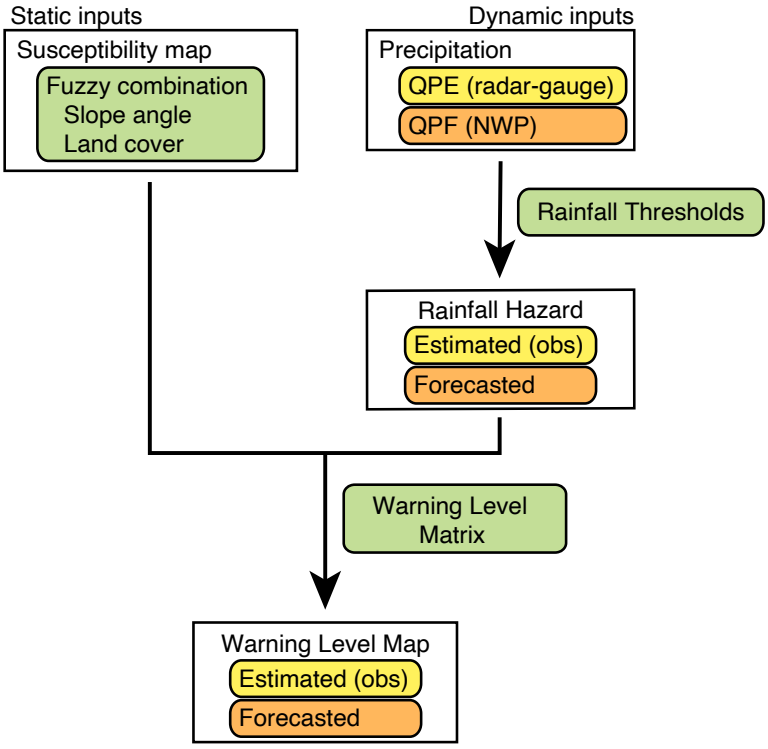


Figura 1. Esquema conceptual del sistema d'avisos d'esllavissades aplicat en el marc del projecte en el que s'han incorporat les previsions de precipitació de models de predicció meteorològica. Font: Adaptat de Palau et al. (2020).

2 Tasques del projecte

El projecte s'ha organitzat en les tasques següents:

- Tasca 1: Accés a la informació d'avisos i manteniment del sistema.
  - Subtasca 1.1: Càlcul de la precipitació en temps real
  - Subtasca 1.2: Càlcul dels avisos d'esllavissades
  - Subtasca 1.3: Manteniment del sistema

- Tasca 2: Millora del servei.
  - Subtasca 2.1: Incorporació de les previsions de models de predicció meteorològica.
  - Subtasca 2.2: Millora del mapa de susceptibilitat del terreny
  - Subtasca 2.3: Millora de l'anàlisi de llindars de pluja
  - Subtasca 2.4: Millora dels algorismes de càlcul del mapa d'avisos
  - Subtasca 2.5: Millora del disseny i adaptació del sistema web de visualització de les noves funcionalitats
  - Subtasca 2.6: Generació i enviament de missatges automàtics

- Tasca 3: Avaluació dels resultats obtinguts i informe final.

3 Accés a la informació d'avisos i manteniment del sistema

Aquesta tasca consisteix bàsicament en l'operació del sistema durant tot el projecte. El sistema va entrar en funcionament a l'inici del contracte (1 de desembre de 2023) i s'ha mantingut en funcionament des de llavors.

La Taula 1 presenta la llista de dades d'entrada i sortida del sistema i de les seves resolucions espacials i temporals.

Taula 1. Detalls de les dades d'entrada i de sortida del sistema d'avís d'esllavissades.

	Descripció	**Resolució**	**Referència principal**
Mapa de susceptibilitat	Obtingut combinant el pendent i la cobertura del terreny	30 m	Palau et al. (2020)
Camp de pluja	Acumulació QPE	1 km, 1 h	Velasco-Forero et al. (2009)
	Acumulació QPF	3 km, 1h, 0-48 h (cada 12 hores)	SMC
Nivell d'avís	Calculat pel sistema d'avisos d'esllavissades	30 m, 1 h	Palau et al. (2022)
Nivell d'avís màxim en una àrea	Sobre un polígon (sub-conca o municipi)	Polígon, 1h	Palau et al. (2020)

3.1 Càlcul de la precipitació en temps real

El sistema re-calcula el nivell d'avís d'esllavissades cada cop que es reben noves dades de precipitació. Aquestes dades es reben als servidors del CRAHI de la UPC, i es processen per calcular les sèries de precipitació utilitzades pel sistema.

A la versió inicial del sistema, les dades de precipitació consistien en les estimacions generades pel Servei Meteorològic de Catalunya a partir de les observacions pluviomètriques i les estimacions per radar. La resolució espacial i temporal d'aquestes dades de precipitació són d'1 km i d'una hora respectivament. A cada pas de temps es generen les sèries de 24 hores, que s'utilitzen per determinar el nivell de perill d'aquesta precipitació (entre les classes "molt baix", "baix", "moderat" i "alt") per comparació amb 3 corbes intensitat-durada (Figura 2).

Per fer-ho, a cada punt i a cada pas de temps s'hi analitzen les sèries de precipitació de durades entre 1 i 24 hores fins al pas de temps actual i s'hi assigna el nivell de perill més desfavorable d'entre els obtinguts de les 24 sèries. En aquesta anàlisi també es fa el seguiment a cada punt de l'inici de l'episodi de precipitació, i s'ha establert que comença un episodi nou quan fa més de 6 hores que no plou.

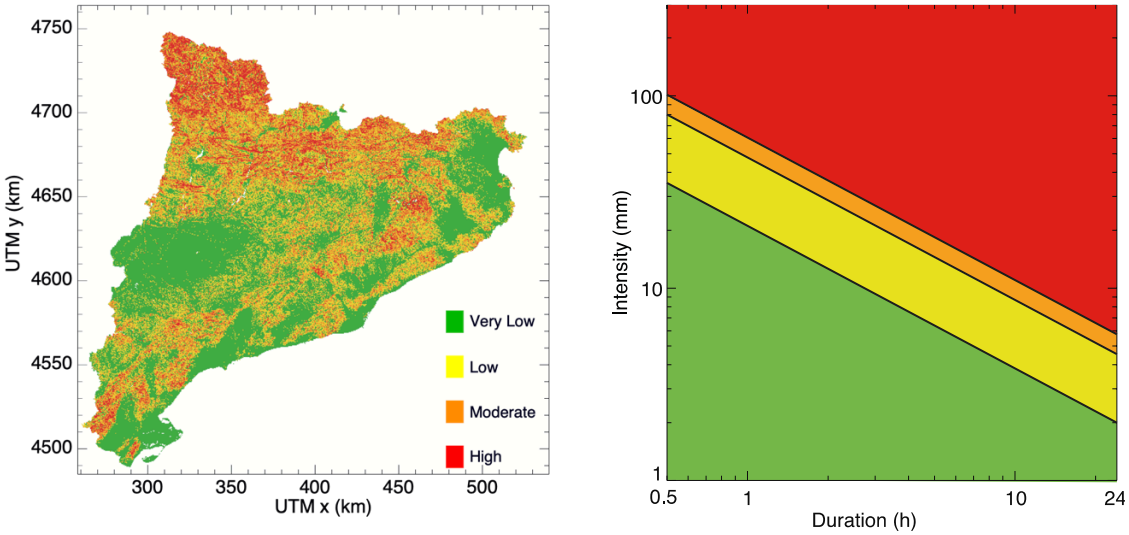


Figura 2. Mapa de susceptibilitat (esquerra), i llindars d'intensitat de pluja-durada (dreta) utilitzats al sistema d'alerta d'esllavissades. Font: Palau et al. (2022).

3.2 Càlcul dels avisos d'esllavissades

Combinant el nivell de perill de la precipitació amb la susceptibilitat del terreny (amb una resolució de 30 m; Figura 2), s'estima el nivell d'avís d'esllavissades a partir d'una matriu de la matriu de confusió de la Figura 3. El mapa resultant s'actualitza amb una freqüència d'1 hora i té la mateixa resolució espacial (30 m) que el mapa de susceptibilitat utilitzat.

Rainfall hazard level \ *Susceptibility*	Susc Very Low	Susc Low	Susc Moderate	Susc High
Rain Very Low	VL	VL	VL	L
Rain Low	VL	L	L	M
Rain Moderate	VL	L	M	H
Rain High	L	M	H	H

Figura 3. Matriu de confusió utilitzada. Font: Palau et al. (2022).

A partir d'aquest mapa, els resultats s'integren territorialment sobre diferents unitats territorials (unitats de vessant, municipis i comarques). En la versió per defecte, aquesta integració es fa assignant a cada unitat territorial el nivell d'alerta màxim a nivell de cel·la de 30 m; i en el marc del projecte s'ha analitzat la possibilitat d'aplicar criteris alternatius (apartat 5.4).

Cada vegada que el nivell d'avís d'esllavissades és significatiu (moderat o alt) en una nova comarca, el sistema envia automàticament un correu electrònic amb la llista de noves comarques i municipis amb un nivell d'avís significatiu.

3.3 Manteniment del sistema

El sistema s'ha mantingut operatiu des de la data d'inici del servei. S'ha donat accés als avisos d'esllavissades a través d'una plataforma web que permet l'anàlisi de la situació en temps real i en mode històric (el sistema permet reproduir la informació).

En la majoria de casos, les incidències que s'han produït (la gran majoria relacionades amb la disponibilitat dels productes a la plataforma web i amb canvis al servei web de mapes base de l'ICGC), s'han resolt amb un temps de resposta de menys de 2 dies.

4 Millora del servei

4.1 Incorporació de les previsions de models de predicció meteorològica

Una de les millores principals del sistema a desenvolupar en el marc del projecte és l'extensió de les sèries de precipitació observada (passada) amb les previsions de pluja generades per un model numèric de predicció meteorològica.

En aquest cas, s'han utilitzat les previsions de pluja generades pel Servei Meteorològic de Catalunya amb la seva configuració de 3 km del model meteorològic WRF. A l'SMC, aquest model s'actualitza cada 12 hores i genera previsions amb resolució horària i fins a 72 hores d'antelació.

En la seva aplicació al sistema d'avís d'esllavissades, les sèries de precipitació observada s'han ampliat amb 48 hores de pluja prevista. Això permet generar previsions del nivell d'avís d'esllavissades per temps de previsió entre 0 hores (estimació) i 48 hores.

La Figura 4 mostra el canvi de funcionament del sistema a l'incorporar les prediccions del model meteorològic WRF al càlcul del perill associat a la precipitació: en mode d'observació, el sistema calcula el nivell d'avís d'esllavissades de l'instant actual a partir de la sèrie de 24 hores de pluja observada (per tant, no utilitza previsions meteorològiques); en canvi, en mode de previsió, la sèrie de pluja observada s'amplia amb 48 hores de prediccions de precipitació horària del model meteorològic (Figura 4).

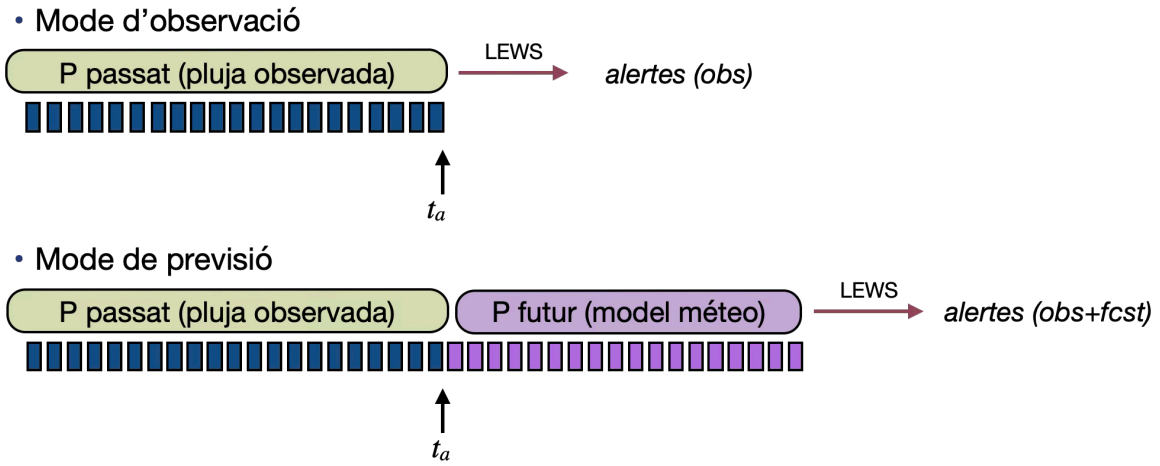


Figura 4. Esquema conceptual dels dos modes de funcionament del sistema: en mode d'observació, el sistema calcula el nivell l'avís d'esllavissades a l'instant present a partir de les observacions (passades) de precipitació de les últimes 24 hores; en mode de previsió, el sistema calcula les previsions del nivell d'avís d'esllavissades des de l'instant actual i fins a una antelació màxima de 48 hores, combinant les observacions de les últimes 24 hores i previsions de precipitació per les properes 48 hores.

Amb aquesta nova configuració, cada hora, el sistema d'alertes d'esllavissades s'executa 49 vegades (una cada hora entre els temps de previsió de 0 i 48 hores) per calcular el nivell d'avís des de l'instant actual fins a la previsió amb 48 hores d'antelació. Per cada temps de previsió, s'analitza la sèrie de pluja de les 24 hores anteriors combinant la pluja observada fins a l'instant actual amb la pluja prevista fins a l'instant de previsió (Figura 5).

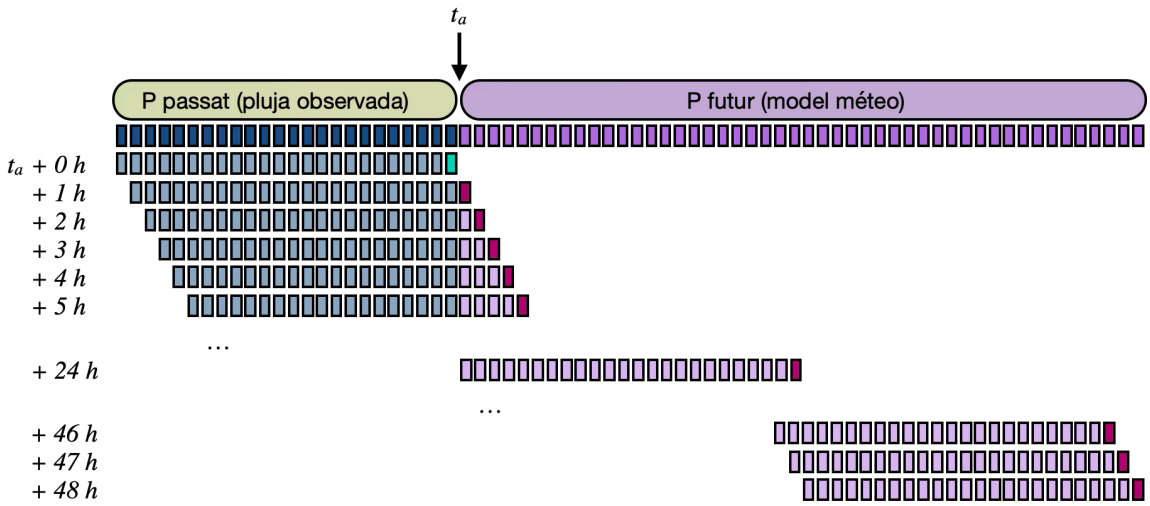


Figura 5. Esquema de la nova configuració del sistema per generar el nivell d'alerta en base a observacions de pluja (a l'instant t_a) i de 48 hores de previsió (pels instants de temps de t_a+1h fins a t_a+48 h). A cada instant de temps, les alertes es calculen a partir de les dades de pluja (observada i/o prevista) de les 24 hores anteriors. A la figura, el rectangle verd clar representa les alertes generades en mode observació, i en vermell fosc les alertes generades en mode previsió.

Els nivells d'alerta obtinguts amb els dos modes (de previsió i d'observació) s'han integrat a la plataforma web de manera contínua (tal i com s'explica a l'apartat 4.3): els productes es mostren en mode d'observació per a instants de temps anteriors al temps de referència (o al temps real), i en mode de previsió per a instants de temps posteriors.

4.2 Millora dels algorismes de càlcul del mapa d'avisos

Al llarg de la durada del projecte, s'ha re-programat completament el sistema informàtic utilitzat pel càlcul dels avisos d'esllavissades. La nova versió s'ha organitzat com una llibreria de Python, en què el sistema s'estructura en 4 mòduls:

- Mòdul de susceptibilitat (defineix el suport dels resultats).
- Mòdul de processat de la precipitació.
- Mòdul de càlcul del perill de la precipitació. Es basa en la configuració dels llindars Intensitat-Durada de la precipitació. Amb la nova configuració, permet tenir en compte la variabilitat espacial dels llindars.
- Mòdul de càlcul del nivell d'avís d'esllavissades (per la combinació de la susceptibilitat i el perill de precipitació).

La nova llibreria és altament configurable i permet una gran flexibilitat en la combinació de diferents alternatives pels diferents mòduls.

4.3 Millora del disseny i adaptació del sistema web de visualització de les noves funcionalitats

En aquest apartat es presenten les millores realitzades a la plataforma web de visualització del nivell d'avís d'esllavissades en temps real.

4.3.1 Mòdul de resum (0-48 hores)

S'ha afegit un mòdul de resum que presenta les previsions del nivell d'avís d'esllavissades de manera compacta en 4 horitzons temporals:

- Nivell màxim d'avís de les últimes 24 hores en base a observacions de precipitació (Figura 6).
- Nivell màxim d'avís previst per les properes 6 hores (Figura 7).
- Nivell màxim d'avís previst per les properes 6-24 hores (Figura 8).
- Nivell màxim d'avís previst per les properes 24-48 hores (Figura 9).

L'avantatge d'aquest mòdul és que presenta de manera concisa la situació actual a partir de les previsions del nivell d'avís d'esllavissades calculat amb resolució horària com s'explica a l'apartat 4.1. En concret, a les capes d'alertes d'esllavissades, s'hi mostra el nivell màxim previst pel període seleccionat. Quan es vol analitzar amb detall l'instant en què es produeix una situació concreta, l'usuari ha d'escollir el "Mòdul de productes horaris" (apartat 4.3.2).

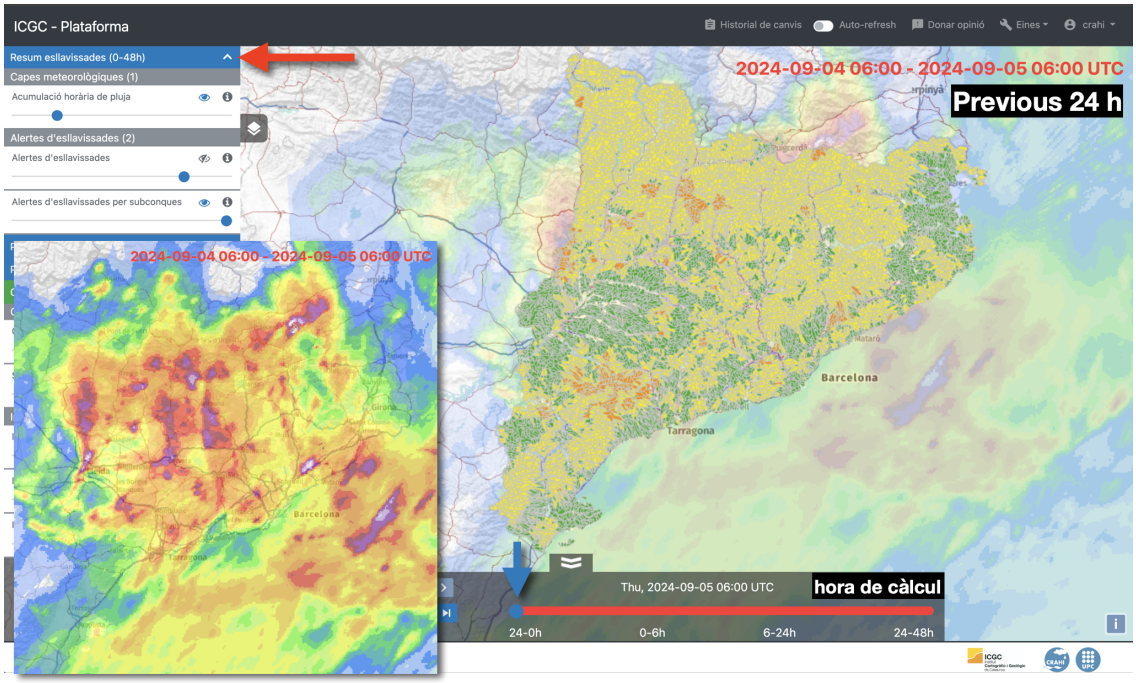


Figura 6. Nivell de d'avís d'esllavissades generat el 5 de setembre de 2024 a les 06:00 UTC per les últimes 24 hores (des del 4 de setembre a les 06:00 UTC fins el 5 de setembre a les 06:00 UTC). La figura inferior esquerra mostra la pluja acumulada durant el mateix període (en aquest cas, calculada a partir de les observacions).

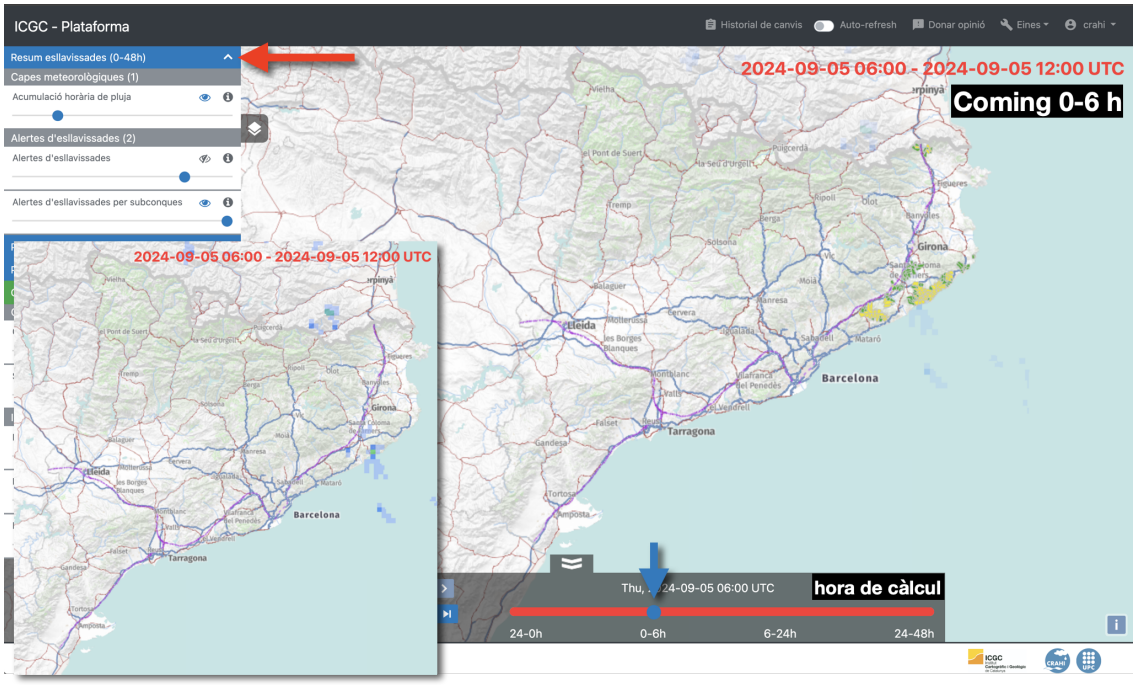


Figura 7. Nivell d'avís d'esllavissades generat el 5 de setembre de 2024 a les 06:00 UTC per les següents 6 hores (des del 5 de setembre a les 06:00 UTC fins el 5 de setembre a les 12:00 UTC). La figura inferior esquerra mostra la pluja prevista pel mateix període (en aquest cas, calculada a partir de les previsions del model numèric de predicció meteorològica).

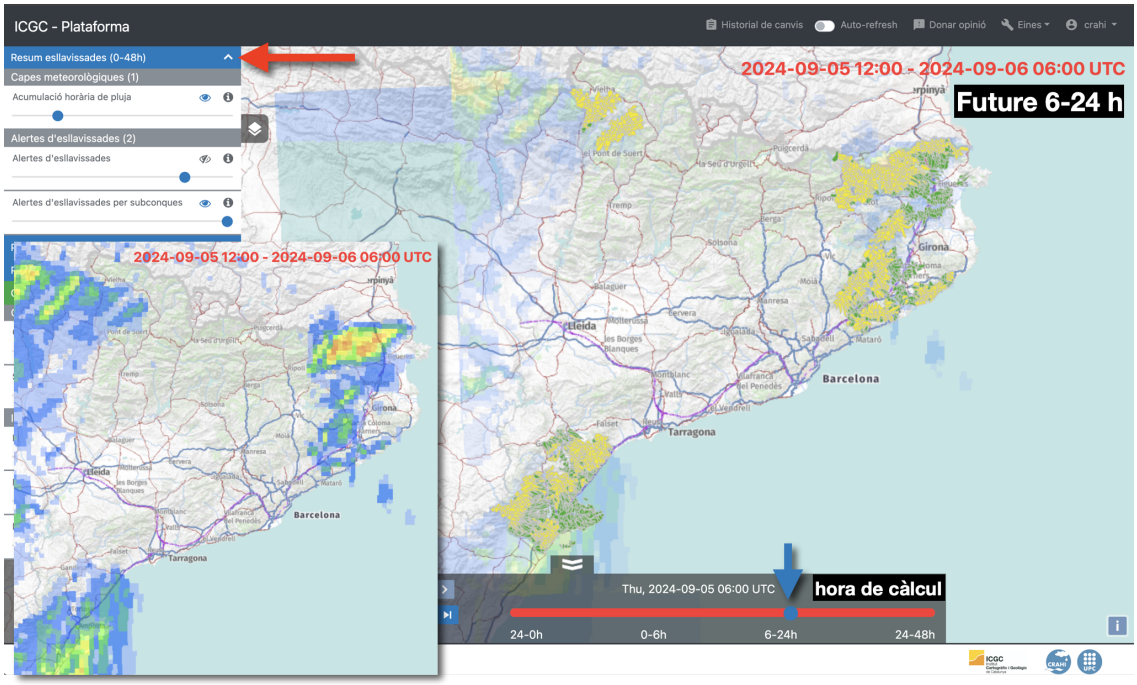


Figura 8. Nivell d'avís d'esllavissades generat el 5 de setembre de 2024 a les 06:00 UTC en el rang de previsió entre 6 i 24 hores (des del 5 de setembre a les 12:00 UTC fins el 6 de setembre a les 06:00 UTC). La figura inferior esquerra mostra la pluja prevista pel mateix període (en aquest cas, calculada a partir de les previsions del model numèric de predicció meteorològica).

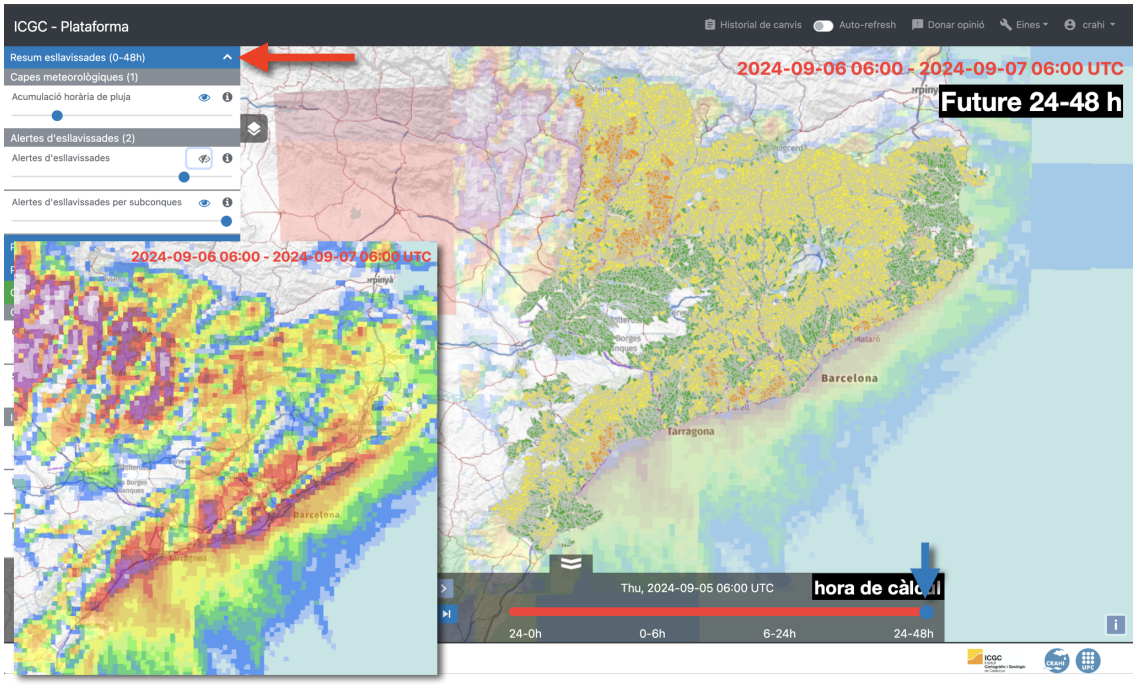


Figura 9. Nivell d'avís d'esllavissades generat el 5 de setembre de 2024 a les 06:00 UTC en el rang de previsió entre 24 i 48 hores (des del 6 de setembre a les 06:00 UTC fins el 7 de setembre a les 06:00 UTC). La figura inferior esquerra mostra la pluja prevista pel mateix període (en aquest cas, calculada a partir de les previsions del model numèric de predicció meteorològica).

4.3.2 Mòdul de productes horaris

Un cop s'han inclòs les previsions de precipitació per la generació de previsions del nivell d'avís d'esllavissades, s'ha adaptat el mòdul de productes horaris per a què, a cada pas de temps, es diferenciï l'evolució del nivell d'avís d'esllavissades entre els modes d'observació i de previsió.

Amb aquest objectiu, la barra temporal d'aquest mòdul s'ha dividit en dues parts: en blanc es mostra el període d'estimacions (a partir de la pluja estimada en el passat), i en vermell el nivell d'avís previst per les properes 12 hores, en base a previsions de pluja (Figura 10).

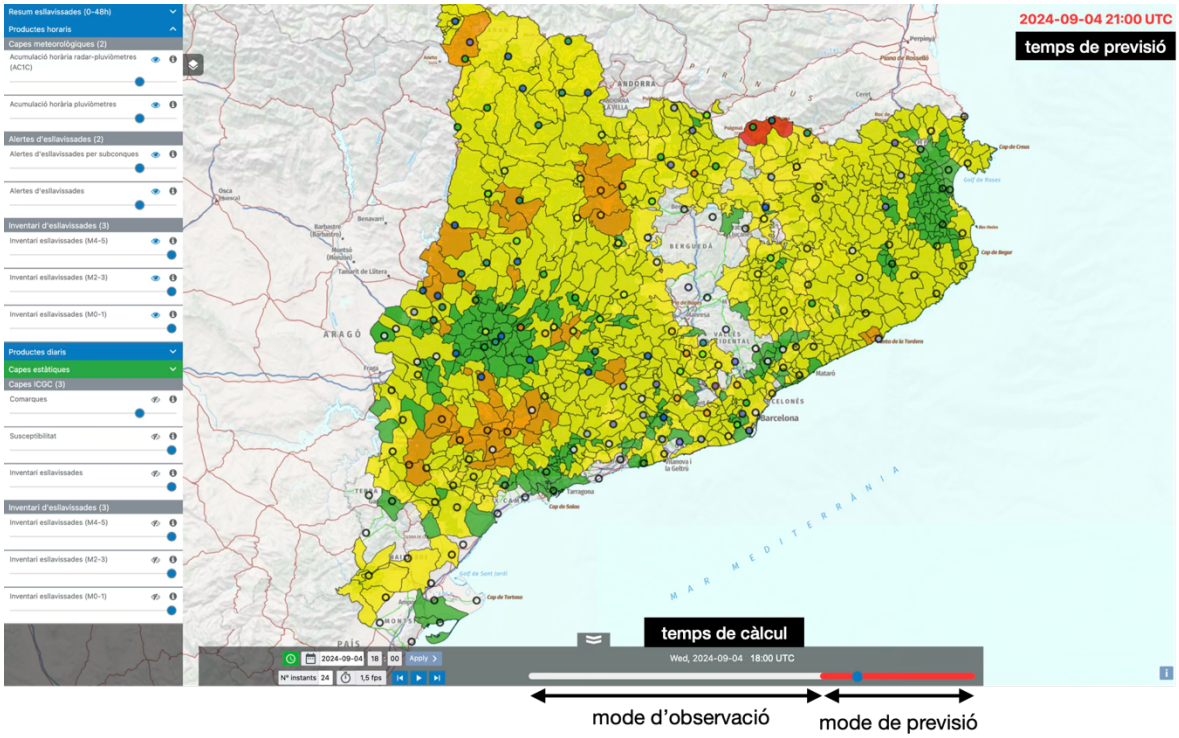


Figura 10. Mòdul de Productes horaris de la plataforma web: es visualitza el nivell d'avís d'esllavissades generat el 4 de setembre de 2024 a les 18:00 UTC per les 21:00 UTCs. La barra temporal permet visualitzar les capes amb resolució horària, calculades en mode d'observació pels durant les 24 hores anteriors al temps de càlcul, i en mode de previsió per les 12 hores posteriors (parts blanca i vermella de la barra, respectivament).

4.3.3 Mòdul de productes diaris

El Mòdul de productes diaris mostra les acumulacions de pluja i el nivell màxim d'alerta d'esllavissades calculats entre les 00:00 i 24:00 UTC de cada dia. Així mateix, s'hi ha inclòs una capa amb les esllavissades de l'inventari corresponents ocorregudes en una finestra temporal de 4 dies (aquelles esllavissades ocorregudes entre el dia anterior i els dos dies posteriors al dia escollit).

4.3.4 Mòdul de capes estàtiques

Al Mòdul de capes estàtiques s'hi inclou informació de referència del sistema que es pot visualitzar amb els productes de qualsevol dels mòduls dinàmics. Actualment, s'hi mostren els límits de les comarques, el mapa de susceptibilitat i l'inventari històric d'esllavissades.

Per incloure l'inventari històric d'esllavissades a la plataforma, s'ha aplicat un sistema per poder actualitzar dinàmicament la informació de l'inventari. Amb aquest objectiu, s'ha creat expressament un usuari de la base de dades on s'emmagatzema aquesta informació per l'ICGC, qui envia la informació actualitzada un cop a la setmana. La informació es mostra com tres capes independents, organitzades en funció de la magnitud dels episodis M0-M1, M2-M3, M4-M5 (Figura 11).

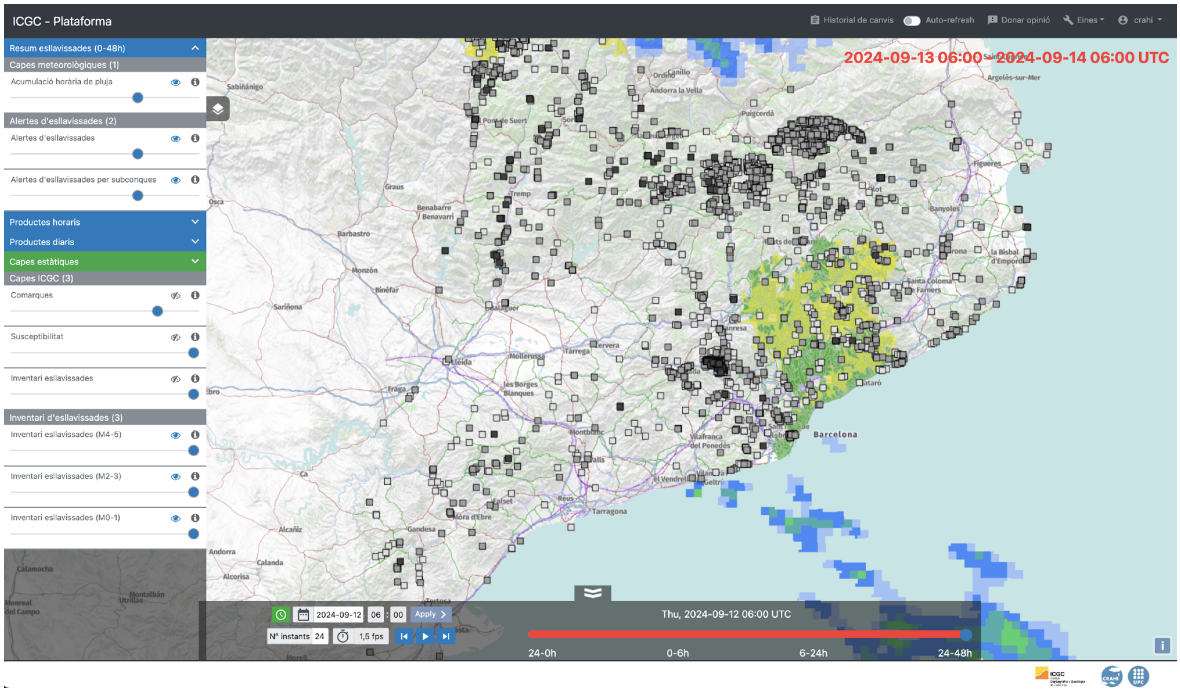


Figura 11. Captura de la plataforma amb l'inventari d'esllavissades al mòdul de capes estàtiques.

4.3.5 Altres millores de la plataforma web

A banda dels desenvolupaments de la plataforma web descrits als apartats 4.3.1 – 4.3.4, s'han aplicat els canvis següents:

Revisió i actualització de les descripcions dels productes

S'han revisat i actualitzat les descripcions dels diferents productes que s'han anat afegint durant el projecte per millorar-les i assegurar-ne la coherència entre elles.

Agregació de les alertes en funció del nivell de zoom

Inicialment les alertes de la plataforma web estaven agregades per conques. S'ha treballat en modificar-ne el comportament de manera que quan el nivell de zoom del visor és baix, i per tant la zona a mostrar és extensa, les alertes es presenten agregades per municipis. Però quan s'augmenta el nivell de zoom, i per tant la zona que es mostra és més limitada, les alertes s'agrupen per unitats de vessant tot i que continuen mostrant-se els límits municipals.

Durant el 2025 s'han fet proves amb diferents configuracions d'unitats de vessant i es va acordar utilitzar una última configuració que permetia un temps de càrrega raonable i no dificultava la visualització de les alertes (quan les divisions per unitats de vessant són massa petites respecte el nivell de zoom del mapa, el contorn dificulta la visualització del nivell d'alerta i el temps de càrrega és molt elevat).

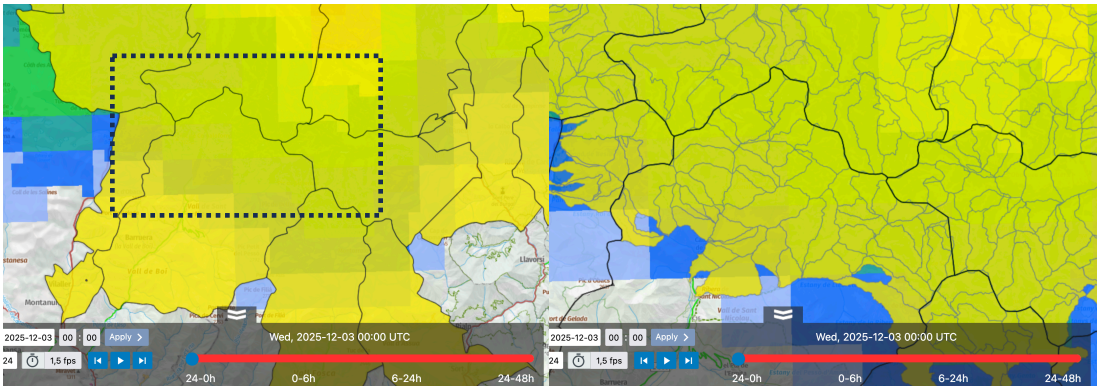


Figura 12. Detall del visor amb un nivell de zoom que mostra l'agregació de les alertes per municipis (esquerra) i detall del visor amb un nivell de zoom que mostra l'agregació de les alertes per la configuració d'units de vessant escollida (per a què serveixin de referència, els límits municipals es segueixen mostrant amb una línia més gruixuda).

4.4 Generació i enviament de missatges automàtics

Des de l'inici del projecte, s'han enviat 775 correus electrònics d'avís d'esllavissades (cada cop que el nivell d'avís és mitjà o alt a una nova comarca) en 224 dies diferents. Aquests missatges inclouen els mapes de precipitació estimada en l'última hora i del nivell d'avís d'esllavissades, i la llista de comarques (i municipis de cada comarca) en què el nivell d'avís és moderat o alt (Figura 13).

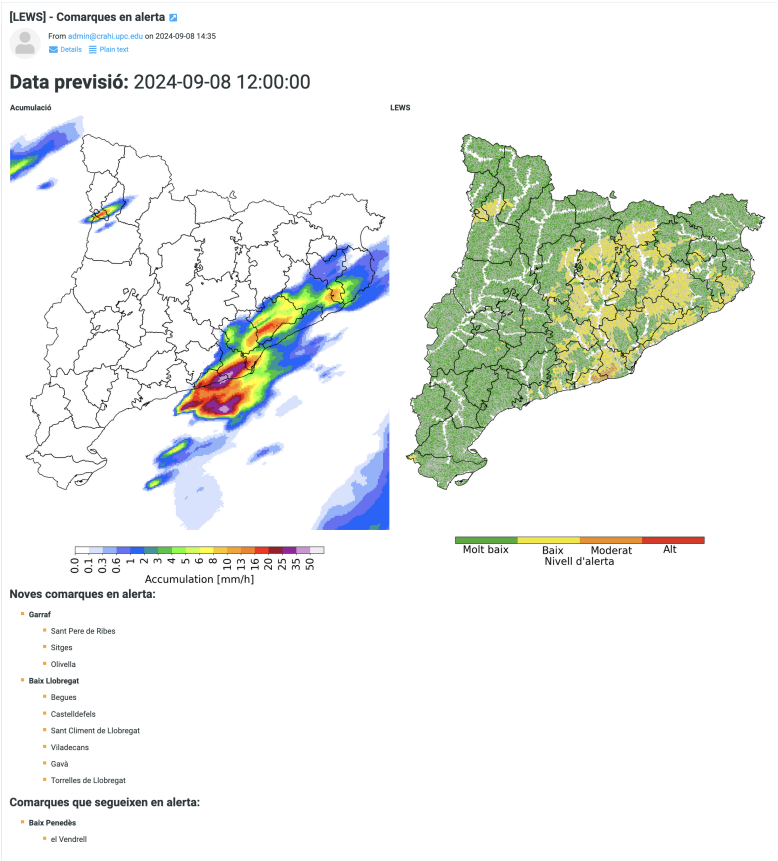


Figura 13. Missatge automàtic enviat el dia 8 de setembre de 2024 pel nivell d'avís d'esllavissades a les 12:00 UTC.

5 Avaluació dels resultats obtinguts

Aquest apartat de l'informe presenta l'anàlisi de la qualitat dels resultats obtinguts entre el mes de gener de 2024 i el mes d'octubre de 2025. Aquesta anàlisi s'ha dividit en diferents parts:

- Avaluació sistemàtica de la correspondència entre els avisos generats amb el sistema i les esllavissades recollides a l'inventari de l'ICGC des de gener de 2024 a octubre de 2025 amb el mètode EDuMaP (Calvello i Piciullo, 2016).
- Anàlisi d'episodis escollits d'especial interès (apartat 5.3).
- Anàlisi dels resultats obtinguts amb diferents configuracions del sistema: efecte del criteri utilitzat en l'agregació de les previsions a nivell de cel·la a nivell d'unitat de vessant (5.4) i anàlisi del funcionament del sistema en mode de previsió (5.5).

5.1 Descripció del període analitzat des del punt de vista de l'activitat d'esllavissades i els avisos generats

El nombre total d'esllavissades reportades en el període d'anàlisi és de 296, de les quals 223 corresponen a l'any 2024 i 73 al 2025. La Figura 14 mostra la distribució temporal d'aquests episodis entre l'1 de gener de 2024 i el 31 d'octubre de 2025.

La Taula 2 presenta el nombre total d'esllavissades classificades per magnitud (M1-M4) i pel període temporal en què van ser reportades.

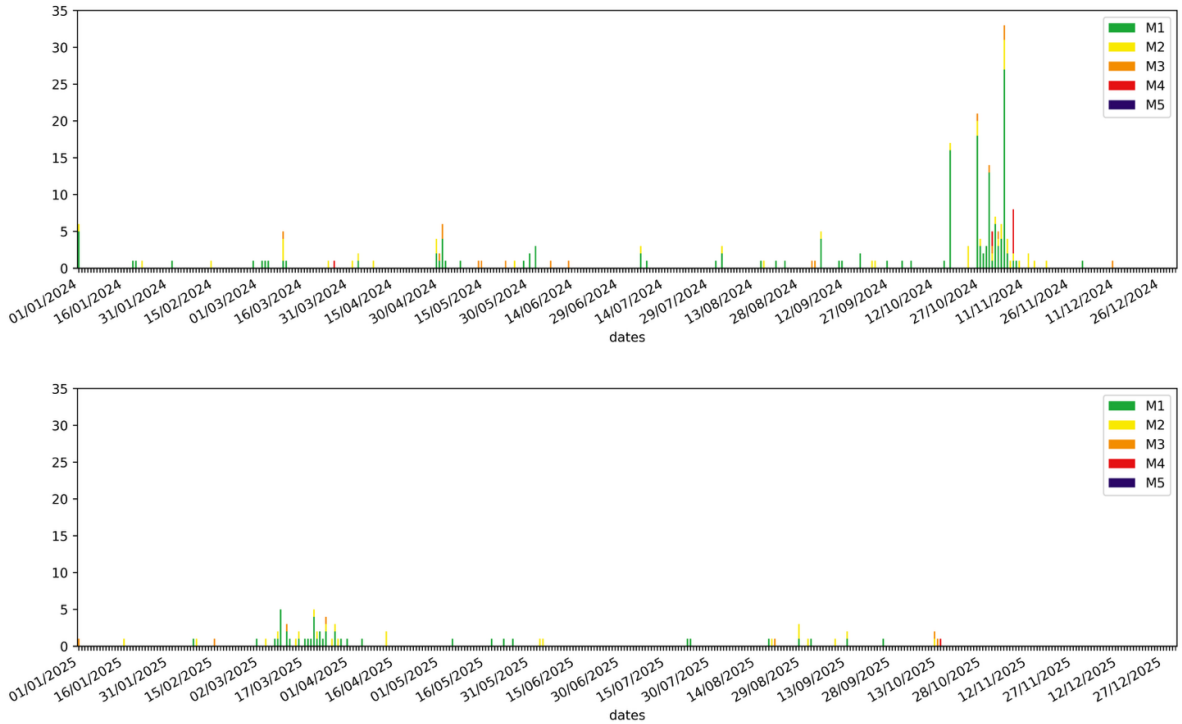


Figura 14. Sèrie temporal del número diari d'esllavissades identificades durant els anys 2024 (a dalt) i 2025 (a baix). El color indica el número d'esllavissades de cada magnitud, entre M1 i M5.

Taula 2. Número d'esllavissades de l'inventari de l'ICGC durant els anys 2024 i 2025.

Període	Total	M1	M2	M3	M4
Gener – desembre 2024	223	152	44	18	9
Gener – octubre 2025	73	42	23	7	1
Total	296	194	67	25	10

La Figura 15 mostra el número d'episodis per municipi durant els anys 2024 i 2025, així com el total combinat dels dos períodes (Figura 16). Aquesta representació espacial permet identificar els municipis amb una major recurrència d'esllavissades. La diferència principal entre ambdós anys és que, mentre que el 2025 el màxim nombre d'episodis per municipi és de 3, l'any 2024 alguns municipis arriben fins a 11 episodis, i fins i tot superen els 13 en els casos més extrems.

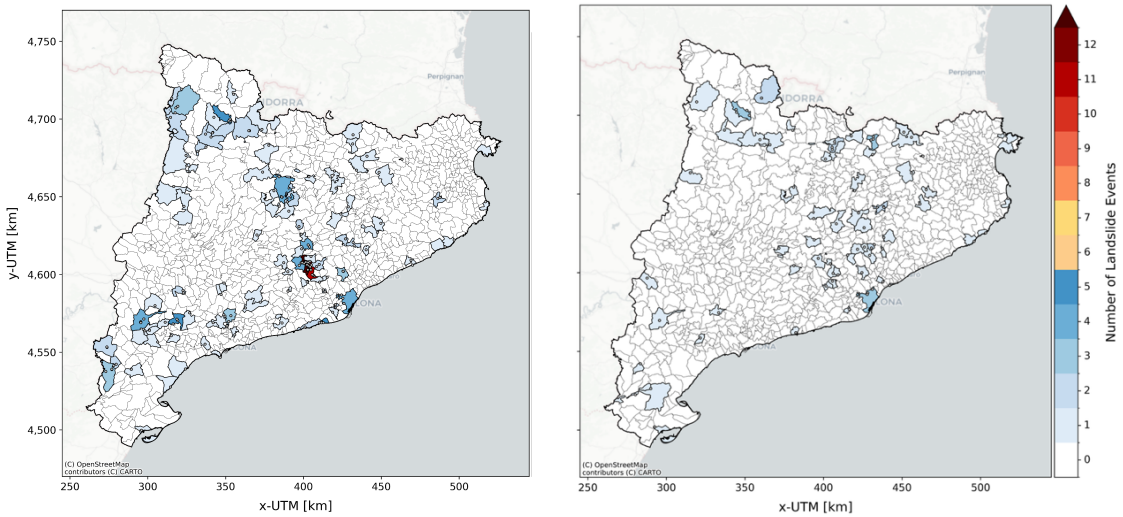


Figura 15. Número d'esllavissades de l'inventari a cada municipi de Catalunya durant els anys 2024 (esquerra) i 2025 (dreta). Els punts amb fons blanc, mostren la localització de les esllavissades de l'inventari de l'ICGC dels dos períodes.

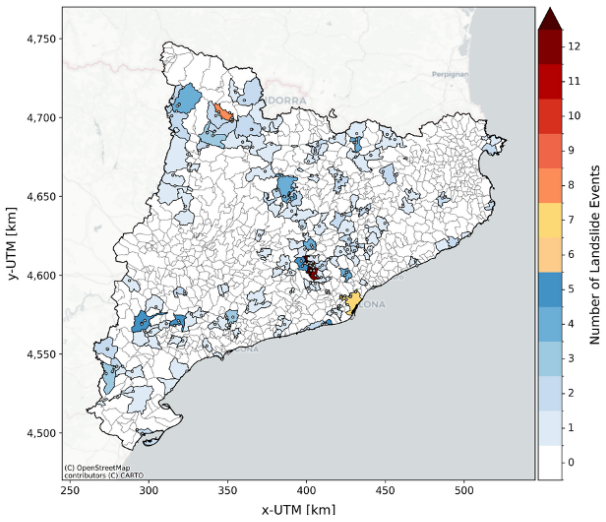


Figura 16. Número d'esllavissades de l'inventari a cada municipi de Catalunya durant els anys 2024 i 2025. Els punts amb fons blanc, mostren la localització de les esllavissades de l'inventari de l'ICGC.

De manera semblant, la Figura 17 mostra el nombre de dies amb avisos moderats o alts generats pel sistema durant els dos períodes analitzats, juntament amb la localització

dels punts on es van produir esllavissades. L'any 2024, el municipi de Camprodon destaca clarament com el territori amb un major nombre de dies amb alerta, arribant a un total de 37. En canvi, durant el 2025 aquest valor es redueix significativament: el màxim nombre de dies amb avisos és de 21, compartit entre Camprodon, les Llosses i Odèn.

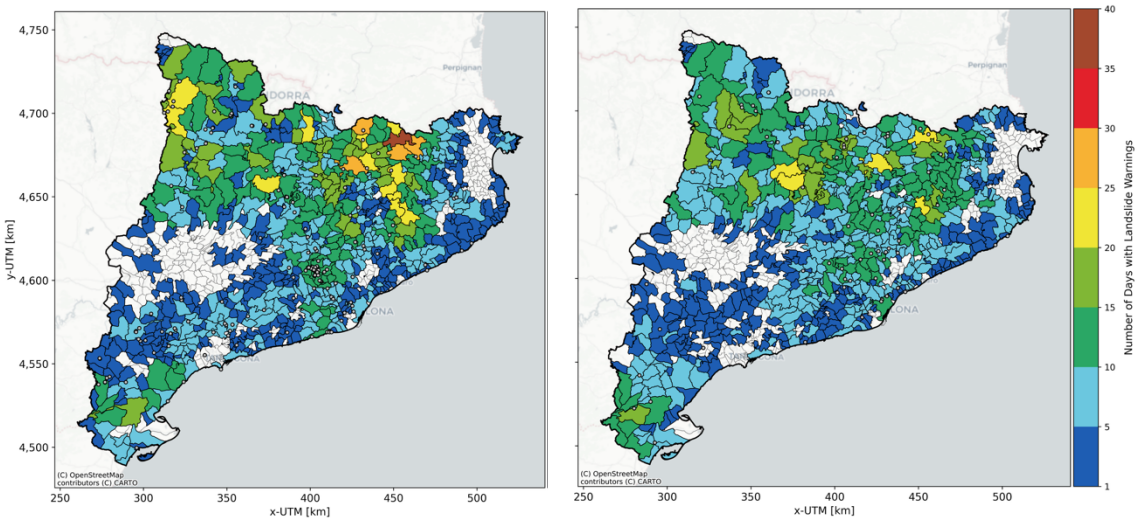


Figura 17. Número de dies amb avisos moderats o alts generats amb el sistema d'avisos a cada municipi de Catalunya durant els anys 2024 (esquerra) i 2025 (dreta). Els punts amb fons blanc, mostren la localització de les esllavissades de l'inventari de l'ICGC d'aquest període.

Cal tenir en compte que el 2024 correspon a un any complet (366 dies), mentre que l'anàlisi de 2025 es limita al període de l'1 de gener al 31 d'octubre (304 dies). Si es considera el percentatge de dies amb alerta respecte del total de dies analitzats, el 2024 presenta un valor aproximat del 10%, mentre que el 2025 aquest percentatge baixa fins al voltant del 7%. Per tant, fins i tot tenint en compte la diferent durada dels períodes, el 2025 mostra una activitat d'alertes globalment inferior.

Per tal de garantir una avaluació rigorosa del sistema d'alerta, s'ha considerat necessari depurar l'inventari abans d'avaluar el funcionament del sistema. En aquest procés, s'han exclòs els episodis registrats l'1 de gener dels anys 2024 i 2025, ja que no és possible determinar-ne amb precisió la data real d'ocurrència. En concret, s'ha eliminat sis episodis del 2024 (cinc de magnitud M1 i un de magnitud M2) i un episodi de magnitud M3 corresponent al 2025.

5.2 Avaluació sistemàtica amb el mètode EDuMaP

Per a l'avaluació sistemàtica del sistema d'alerta s'ha aplicat el mètode EDuMaP ("*Event, duration matrix, performance*"; Calvello i Piciullo, 2016), ja utilitzat en el projecte "Serveis d'assistència tècnica per la implementació d'un sistema d'avís d'esllavissades en temps real i l'operació del sistema durant 12 mesos" (2022-2023; vegeu la descripció a Berenguer et al., 2023).

Per fer l'anàlisi, les alertes generades amb resolucions horària i de 30 m s'han agregat a resolució diària i a escala municipal (el nivell d'alerta assignat és el nivell màxim de les cel·les de 30 m del municipi durant tot el dia). A partir d'aquests resultats s'han calculat els 3 estadístics descrits a l'apartat anterior per analitzar la correspondència entre el nivell d'alerta màxim diari a cada municipi i les esllavissades de l'inventari.

5.2.1 Estadístics utilitzats

El mètode EDuMaP incorpora un conjunt ampli d'indicadors de rendiment basats en la classificació de totes les combinacions possibles entre avisos i episodis realment ocorreguts. Aquest mètode assigna un grau d'encert a cada tipus de coincidència o discrepància en múltiples nivells, classificant-les en encerts (*best*), errors menors (*minor error*s), errors significatius (*significative error*) o errors greus (*worst*), segons la justificabilitat de cadascun d'ells. Aquesta classificació, que es presenta a la Taula 3, implica un cert grau de subjectivitat, ja que depèn del criteri de l'analista a l'hora de determinar quines situacions es consideren errors excusables o inexcusablement greus.

Taula 3. Criteris finals per l'avaluació de la qualitat de les alertes generades pel sistema. Basats en el criteri de classificació d'alertes: True Negatives (TN), True Positives (TP), False Positives (FP) i False Negatives (FN), i en el criteri de grau de correcció: resposta òptima (verd), errors menors (groc), errors significatius (taronja) o errors greus (vermell) del sistema.

	Landslide Event Classification					
Warning Level	**No event**	**M1**	**M2**	**M3**	**M4**	**M5**
No Warning	TN	FN	FN	FN	FN	FN
Very Low	TN	FN	FN	FN	FN	FN
Low	TN	FN	FN	FN	FN	FN
Moderate	FP	TP	TP	TP	TP	TP
High	FP	TP	TP	TP	TP	TP

Tot i que el mètode permet calcular nombrosos estadístics derivats d'aquesta matriu d'avaluació, en aquest estudi només es presenten i analitzen els tres indicadors que són més rellevants per als objectius plantejats: la Taxa d'Encert (HRL), el Poder Predictiu (PP) i la Taxa d'Error (ER). Aquests indicadors es destaquen a la Taula 4, que resumeix tots els estadístics utilitzats per EDuMaP i les equacions emprades pel seu càlcul.

En aquest estudi s'han utilitzat tres estadístics:

- Taxa d'Encert (*Hit Rate*, HR_L), que quantifica la proporció d'episodis reportats que el sistema ha estat capaç d'identificar (el nivell d'alerta generat és moderat o alt). Aquest indicador s'avalua exclusivament en les unitats territorials on s'ha registrat com a mínim un episodi.
- Poder predictiu (*Predictive Power*, PP_W), que mesura el grau de fiabilitat de les alertes generades. Aquest indicador s'analitza només en aquelles unitats territorials on s'ha generat almenys una alerta durant el període estudiat.
- Taxa d'error (*Error Rate*, ER), que reflecteix la freqüència amb què el sistema emet alertes inadequades. Aquest indicador es calcula sobre totes les unitats territorials, excepte aquelles en què no s'ha generat cap alerta ni s'ha produït cap episodi, ja que en aquests casos no pot existir error.

Taula 4. Estadístics utilitzats en el mètode EDuMaP. TP indica el número de casos "true positive", TN "true negative", FP "false positive" i FN "false negative"; els termes "significant errors" i "worst errors" fan referència, respectivament, als errors significatius i als errors greus definits en el mètode (Taula 3). Σdays es refereix al número de dies del període d'anàlisi en què es van produir esllavissades o es van generar alertes (amb nivell Very Low o superior).

Estadístic	Símbol	Equació
Efficiency Index	I_{eff}	$\frac{TP + TN}{\sum days}$
Hit Rate	HR_L	$\frac{TP}{TP + FN}$
Predictive Power	PP_W	$\frac{TP}{TP + FP}$
Threat Score	TS	$\frac{TP}{TP + FP + FN}$
Misclassification Rate	MR	1 - Ieff
Missed Warning Rate	R_{MW}	1 - HRL
False Warning Rate	R_{FW}	1 - PP
Error Rate	ER	$\frac{Significant + Worst}{\sum days}$

5.2.2 Resultats obtinguts

El valor mitjà del HR_L del 2024 és del 23.6% (és a dir, el sistema ha sigut capaç d'identificar aproximadament una de cada quatre esllavissades), mentre que el del 2025 és del 19.7% (un de cada cinc episodis). Com es pot observar a la Figura 18, aquestes diferències reflecteixen, en part, que el 2024 compta amb prop del triple d'esllavissades que el 2025, fet que pot influir en la comparabilitat dels resultats: un volum d'episodis més elevat tendeix a donar lloc a un HR_L més elevat

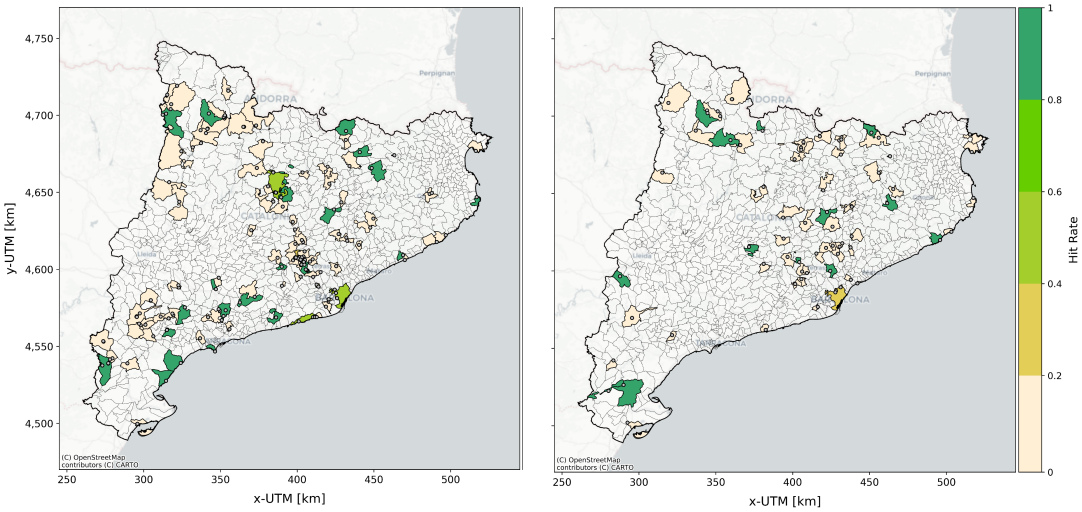


Figura 18. HRL calculat a cada municipi de Catalunya durant els anys 2024 (esquerra) i 2025 (dreta). En blanc es representen els municipis on no s'hi va produir cap esllavissada. Els punts mostren la localització de les esllavissades de l'inventari de l'ICGC d'aquest període.

Pel que fa al PP, els valors globals són molt baixos en ambdós períodes (0.75% el 2024 i 0.33% el 2025). Aquests resultats indiquen que, del total d'alertes generades pel sistema, menys d'1% coincideixen amb episodis registrats a l'inventari. En principi, a escala global aquests resultats indiquen un excés de falsos positius. Tanmateix, l'anàlisi territorial revela diferències més significatives (Figura 19). L'any 2024, un total de set municipis presenten un PP superior al 20%: quatre se situen per sobre d'aquest llindar, dos superen el valor del 40% i un arriba fins a valors superiors a 80%. El 2025, tot i el menor nombre d'episodis, encara s'identifiquen tres municipis amb PP superior a 20%, mentre que només un supera el valor de 40%. Aquest patró suggereix que, malgrat la baixa capacitat predictiva global, hi ha sectors on el sistema mostra un rendiment clarament superior.

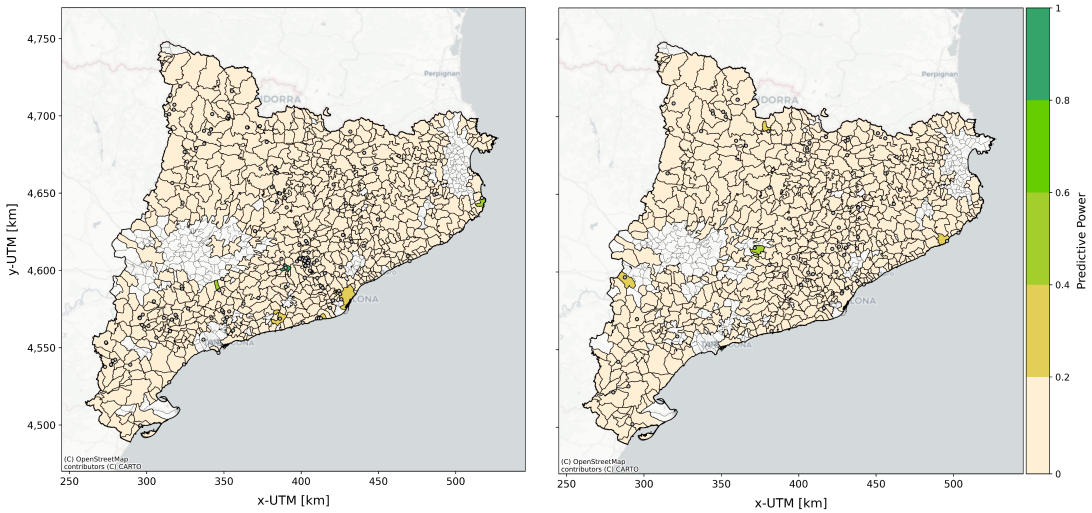


Figura 19. PP calculat a cada municipi de Catalunya durant els anys 2024 (esquerra) i 2025 (dreta). En blanc es representen els municipis n no s'hi va generar cap avís d'esllavissada. Els punts mostren la localització de les esllavissades de l'inventari de l'ICGC d'aquest període.

Els valors mitjans de PP a escala comarcal són també baixos, amb una mitjana aproximada de 4.0% el 2024 i 2.4% el 2025, fet que indica una capacitat predictiva limitada quan l'avaluació es fa en unitats territorials més grans. Tot i aquesta baixa variabilitat, en el període de 2025 destaca el Baix Llobregat, que és l'única comarca que supera el valor de 20%.

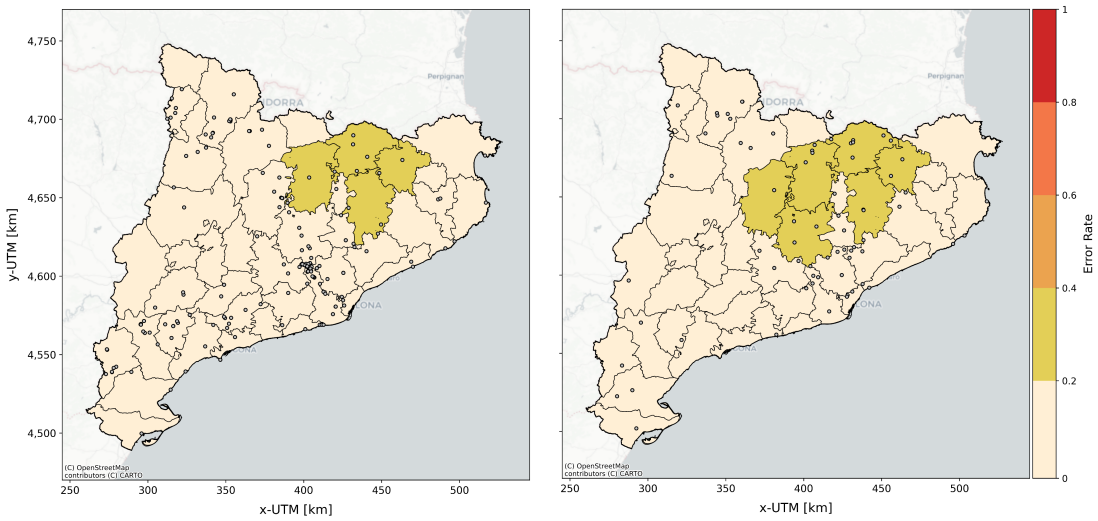


Figura 20. ER calculat a cada comarca de Catalunya durant els anys 2024 (esquerra) i 2025 (dreta). Els punts mostren la localització de les esllavissades de l'inventari de l'ICGC d'aquest període.

L'anàlisi de l'ER es presenta a escala comarcal, ja que a nivell municipal tots els valors es mantenen molt baixos (entre 0 i 20%), cosa que indica un percentatge reduït d'errors significatius i greus en comparació amb el nombre total de dies en què hi va haver una alerta o es va produir un episodi. Tot i que aquest bon comportament del sistema és positiu, també limita la capacitat de distingir diferències rellevants entre municipis. A escala comarcal, en canvi, s'observa una variabilitat més marcada que permet identificar patrons territorials més clars i detectar aquelles zones on la proporció d'errors és més elevada (Figura 20).

Les comarques que presenten valors d'ER més elevats, entre 20 i 40%, són principalment el Ripollès, la Garrotxa, el Berguedà i Osona, que apareixen de manera consistent tant el 2024 com el 2025. El 2025, a més, s'hi afegeixen dues comarques addicionals amb valors d'ER dins del mateix rang (Bages i Solsonès), la qual cosa suggereix un lleuger increment de la presència d'errors durant el segon període analitzat.

En aquestes zones el percentatge de dies amb errors del sistema tendeix a ser més alt que a la resta. En part, aquests resultats s'atribueixen a l'alt número d'alertes que s'hi generen (Figura 17), que en molts casos s'han comptabilitzat com a falsos positius, tot i que també s'hi han produït alguns falsos negatius (com es pot apreciar a la Figura 18).

La Taula 5 resumeix la capacitat del sistema per identificar els episodis registrats durant el període analitzat en funció de la seva magnitud. L'objectiu d'aquesta anàlisi és avaluar si la capacitat del sistema d'identificar els episodis depèn de la magnitud d'aquests.

A escala municipal, hi ha diferències entre els resultats obtinguts els anys 2024 i 2025: els resultats de 2024 són pitjors que els de 2025 excepte pels episodis M1 (35% vs. 14% el 2025). Per als M2, els valors d'HR_L són molt similars entre ambdós períodes (23% el 2024 i 26% el 2025), i per als M3, el 2025 mostra un HR_L més alt (33% vs. 22% el 2024). En cap dels períodes s'han reproduït esdeveniments de magnitud M4 a escala municipal.

A escala comarcal, els resultats del 2024 són globalment millors que els del 2025. El 2024 presenta taxes d'encert clarament superiors per a les magnituds més baixes (M1 i M2), amb valors del 53% i del 42%, respectivament. També destaca el cas dels episodis

de magnitud M4, amb un 89% d'encert el 2024, mentre que el 2025 no va ser capaç d'identificar l'únic episodi ocorregut.

Taula 5. Valors de la taxa d'encert (HR_L) a escala municipal (a dalt) i comarcal (a baix) per al períodes analitzat, desglossats segons la magnitud de les esllavissades (de M1 a M4). Entre parèntesis s'indica el nombre d'esllavissades de cada categoria i període. Els episodis registrats l'1 de gener no s'han inclòs en els càlculs.

Període	M1	M2	M3	M4
Gener – desembre 2024	35% (147)	23% (43)	22% (18)	0% (9)
Gener – octubre 2025	14% (42)	26% (23)	33% (6)	0% (1)
Total	30% (189)	24% (66)	25% (24)	0% (10)

Període	M1	M2	M3	M4
Gener – desembre 2024	53% (147)	42% (43)	28% (18)	89% (9)
Gener – octubre 2025	33% (42)	26% (23)	33% (6)	0% (1)
Total	49% (189)	36% (66)	29% (24)	80% (10)

5.2.3 Discussió dels resultats

La Taula 6 presenta de manera detallada els resultats del sistema durant el període analitzat. En general, el període gener-desembre de 2024 presenta millors resultats que gener-octubre de 2025, amb més capacitat de detecció i menys errors globals.

El 2024 mostra un HR_L i un PP més elevats a escala municipal i comarcal que el 2025, la qual cosa indica una millor correspondència entre els episodis i els nivells d'alerta. Per la manera en què es calcula (es dona el mateix pes als FP que als FN). El 2025 augmenten lleugerament les falses alarmes i el valor d'ER, i disminueix el PP del sistema. Tot i que millora el número total d'esllavissades no detectades (es redueix), això no implica que els valors d'HR_L també millorin, ja que el número total d'episodis de l'inventari és molt menor que pel 2024.

Finalment, l'ER, que es calcula només quan els errors són significatius (Taula 3), està clarament dominat pels falsos positius i creix a mesura que augmenta l'àrea de la unitat territorial. Això és degut a que el criteri d'agregació utilitzat es basa en prendre el nivell d'alerta màxim sobre la unitat, fent que el nombre relatiu de falsos positius sigui més alt com més gran és l'àrea d'agregació.

Els resultats de la Taula 6 mostren que a l'augmentar la mida de la unitat territorial on es fa l'avaluació dels resultats, els diferents indicadors dominats per la identificació dels episodis ocorreguts (HR_L i PP) milloren, ja que augmenta la tolerància al fer l'anàlisi de la correspondència entre l'alerta i el punt en què s'ha produït l'esllavissada. En canvi els estadístics dominats pel número de falsos positius (I_{eff} i ER), empitjoren. Això és degut a que el nivell d'alerta assignat a la unitat territorial és el màxim de les cel·les, de manera que proporcionalment augmenten el número de falsos positius.

Taula 6. Avaluació dels resultats en tres tipus d'unitat territorial (unitats de vessant, municipi, comarca) amb finestra temporal 24 hores durant els anys 2024 (a dalt) i 2025 (a baix).

Gener - desembre 2024	Unitats de vessant	Municipi	Comarca
TN	6141665	341934	14532
TP	27	34	45
FP	39547	4524	1080
FN	135	110	81
Best Performance	99.4%	98.7%	92.6%
Minor Error	0.0%	0.0%	0.2%
Significant Error	0.0%	0.0%	0.1%
Worst Performance	0.6%	1.3%	7.1%
Efficiency Index (I_{eff})	97.6%	95.5%	85.2%
Hit Rate (HR_L)	16.7%	23.6%	35.7%
Predictive Power (PP)	0.1%	0.7%	4.0%
Error Rate (ER)	2.4%	4.4%	14.4%

Gener - octubre 2025	Unitats de vessant	Municipi	Comarca
TN	5059945	283541	12152
TP	12	14	21
FP	40467	4276	851
FN	54	57	48
Best Performance	99.2%	98.5%	93.1%
Minor Error	0.0%	0.0%	0.1%
Significant Error	0.0%	0.0%	0.1%
Worst Performance	0.8%	1.5%	6.6%
Efficiency Index (I_{eff})	96.8%	94.5%	83.8%
Hit Rate (HR_L)	18.2%	19.7%	30.4%
Predictive Power (PP)	0.0%	0.3%	2.4%
Error Rate (ER)	3.2%	5.5%	15.8%

Un cop analitzats els resultats obtinguts amb la finestra temporal de 24 hores, s'ha estès l'avaluació augmentant progressivament l'interval de comparació fins a 48 i 72 hores. Aquest pas és especialment rellevant perquè permet examinar com varia el rendiment del sistema quan es concedeix un marge temporal més ampli per establir correspondències entre els esdeveniments del registre i els avisos emesos (com van proposar Palau et al., 2022).

Tot i que l'anàlisi completa s'ha realitzat tant per a municipis com per a comarques, en aquest apartat es presenten únicament els resultats municipals. La Taula 7 mostra els resultats per a finestres temporals de 24, 48 i 72 hores durant els anys 2024 i 2025.

A partir d'aquests resultats, s'observa que a l'augmentar la mida de la finestra temporal millora de manera sistemàtica la correspondència entre els episodis registrats i les alertes, tot i que amb patrons diferents segons el període analitzat.

A nivell municipal, el HR_L de l'any 2024 passa del 23% al 38% i al 43% per les finestres de 24, 48 i 72 hores, respectivament (20%, 30% i 40% el 2025), de manera que s'observa un canvi més gran quan s'amplia la finestra d'encert de 24 a 48 hores que de 48 a 72 hores.

Taula 7. Avaluació dels resultats a nivell municipal amb finestres temporals de 24, 48 i 72 hores per els anys 2024 (a dalt) i 2025 (a baix).

Gener - desembre 2024	24 hores	48 hores	72 hores
TN	341934	341934	341934
TP	34	62	73
FP	4524	4506	4500
FN	110	100	95
Best Performance	98.7%	98.7%	98.7%
Minor Error	0.0%	0.0%	0.0%
Significant Error	0.0%	0.0%	0.0%
Worst Performance	1.3%	1.3%	1.3%
Efficiency Index (I_{eff})	95.5%	95.6%	95.6%
Hit Rate (HR_L)	23.6%	38.3%	43.4%
Predictive Power (PP)	0.7%	1.4%	1.6%
Error Rate (ER)	4.4%	4.4%	4.4%

Gener - octubre 2025	24 hores	48 hores	72 hores
TN	283541	283541	283541
TP	14	24	34
FP	4276	4268	4261
FN	57	55	52
Best Performance	98.5%	98.5%	98.5%
Minor Error	0.0%	0.0%	0.0%
Significant Error	0.0%	0.0%	0.0%
Worst Performance	1.5%	1.5%	1.5%
Efficiency Index (I_{eff})	94.5%	94.5%	94.5%
Hit Rate (HR_L)	19.7%	30.4%	39.5%
Predictive Power (PP)	0.3%	0.6%	0.8%
Error Rate (ER)	5.5%	5.5%	5.5%

Quant al PP, el canvi amb la mida de la finestra temporal és relativament petit, degut a que la millora del número d'encerts (TP) és molt petita en comparació amb el número d'alertes que genera el sistema. El resultat és que el PP segueix sent inferior al 2%.

Finalment, pel que fa a l'ER, els valors obtinguts continuen sent baixos en tots els períodes analitzats, però amb diferències entre els dos anys. El 2024, l'ER es manté per sota del 5%, mentre que el 2025 se situa lleugerament per sobre d'aquest llindar. L'ampliació de la finestra temporal només redueix l'ER de manera molt modesta (de l'ordre del 0,02%), la qual cosa indica que la influència d'augmentar la finestra és mínima. Això suggereix que una part dels esdeveniments reportats podrien haver-se produït en dies sense presència de pluja rellevant en les 24-72 hores prèvies, fet que limita la capacitat del sistema per disminuir els errors encara que la finestra temporal s'ampliï.

Aquests resultats es confirmen en l'anàlisi a escala comarcal (els resultats no s'inclouen a la taula): l'any 2024, el HR_L passa del 35,7% amb una finestra de 24 hores al 61,5% en estendre-la a 48 hores, i arriba fins al 68,2% quan s'amplia fins a 72 hores. De manera similar, l'any 2025 el HR_L augmenta del 30,4% a 24 hores al 42,9% a 48 hores, assolint el 52,9% amb una finestra de 72 hores. Aquesta tendència també es reflecteix en el nombre de comarques que milloren el seu rendiment: el 2024, tretze comarques mostren una

millora clara en ampliar la finestra a 48 hores i cinc ho fan en estendre-la fins a 72 hores; mentre que el 2025 les xifres corresponents són de sis i cinc comarques.

D'aquesta manera, hi ha una millora significativa dels resultats al canviar la finestra temporal de 24 a 48 hores; o sigui, a l'ampliar l'anàlisi de la coincidència entre les alertes i els episodis de l'inventari per considerar un encert si s'han generat alertes en aquella unitat territorial el dia abans de l'assignat al registre de l'inventari. Aquesta millora s'atribueix per una banda a la incertesa inherent al model utilitzat, que pot generar alertes el dia abans de que es produeixin les esllavissades, però en gran part també a la incertesa de la datació de les esllavissades de l'inventari.

5.3 Anàlisi de dies seleccionats

5.3.1 Anàlisi de dies amb un nombre significatiu d'episodis

Aquest apartat examina dies específics en què es van registrar nombroses esllavissades, fet que permet avaluar el comportament del sistema d'alerta en situacions d'activitat elevada i explicar els resultats obtinguts.

5.3.1.1 2 d'agost de 2024

La Figura 21 mostra la comparació entre els episodis registrats i els nivells màxims d'alerta assignats pel sistema el mateix dia del report, tant a escala municipal com comarcal. En aquesta data es van registrar tres esllavissades de magnituds compreses entre M1 i M2.

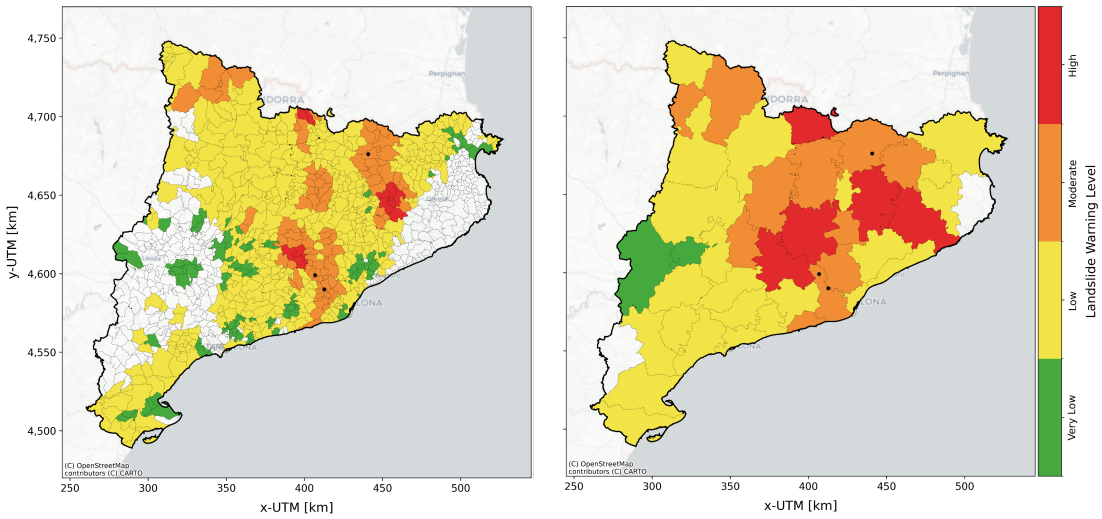


Figura 21. Comparació entre els episodis registrats i els nivells màxims d'alerta assignats el mateix dia del report de les esllavissades (finestra temporal de 24 hores), tant a escala municipal com comarcal.

En analitzar l'episodi s'observa que el nivell d'alerta augmenta progressivament a mesura que s'amplia l'escala territorial: tot i que a escala de cel·la el sistema no supera el nivell d'alerta "Baix", en considerar unitats de vessant, municipis o comarques s'assoleix un nivell d'alerta "Moderat" (Taula 8, per una finestra temporal de 48 hores).

Un aspecte destacable és que la cel·la afectada per un dels episodis presenta una susceptibilitat "Molt baixa", fet que, d'acord amb la matriu de confusió de la Figura 3, no

permet generar un nivell d'alerta superior a "Baix". Tanmateix, quan s'utilitzen unitats territorials més àmplies, aquest episodi queda perfectament representat sense necessitat d'ampliar la finestra temporal, evidenciant el paper de l'escala espacial en la capacitat del model per captar episodis puntuals.

Taula 8. Descripció de les característiques dels esllavissades seleccionats, juntament amb la susceptibilitat (resolució de 30 m) i els nivells màxims d'alerta -obtinguts amb una finestra temporal de 48 hores- per als diferents tipus d'unitats territorials.

Localització (comarca)	**Baix Llobregat**	**Ripollès**	**Baix Llobregat**
Característiques de l'episodi			
Desenc.	Pluja	Pluja	Desconegut
Àrea font	Natural	Element de contenció	Terraplè
Magnitud	M1	M2	M1
Tipus	Flux	Lliscament	Flux
Susceptibilitat	Low	Low	Very Low
Nivell d'alerta amb finestra temporal de 48 hores			
Cel·la	Low	Low	Very Low
U. de vessant	Moderate	Moderate	Moderate
Municipi	Moderate	Moderate	Moderate
Comarca	Moderate	Moderate	Moderate

5.3.1.2 26 d'octubre de 2024

En aquesta data es van registrar un total de 21 esllavissades (18 M1, 2 M2 i 1 M3). Aquest cas és representatiu de situacions en què el model respon de manera coherent i estable independentment de la finestra temporal considerada.

La Figura 22 mostra la comparació entre els episodis reportats i els nivells màxims d'alerta assignats el mateix dia del report, tant a escala municipal com comarcal. La distribució espacial de les alertes reflecteix una resposta coherent amb la presència de nombrosos episodis menors.

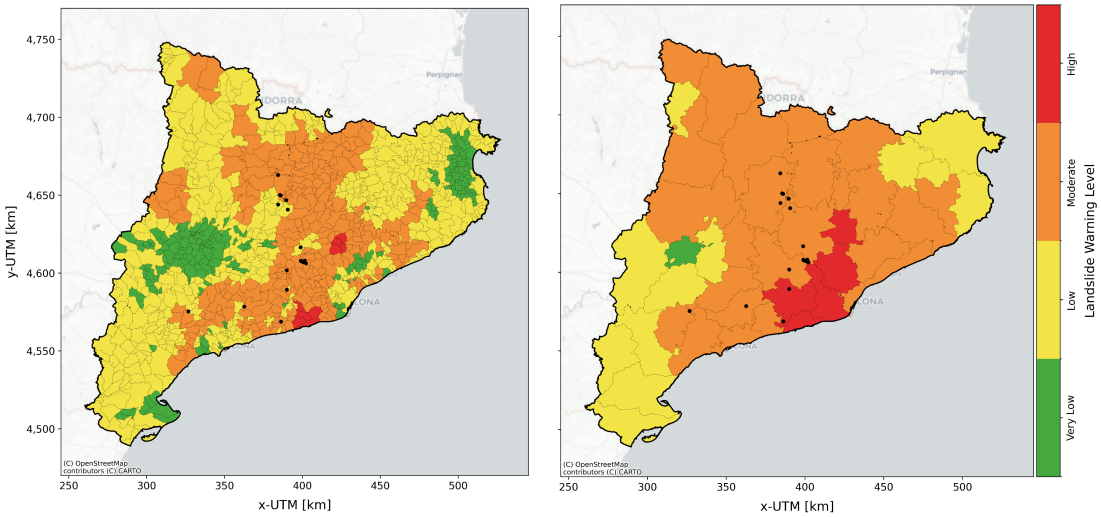


Figura 22. Comparació entre els episodis registrats i els nivells màxims d'alerta assignats el mateix dia del report de les esllavissades (finestra temporal de 24 hores), tant a escala municipal com comarcal.

Des del punt de vista de la qualitat dels resultats obtinguts amb el mètode EDuMaP (Taula 9, per una finestra temporal de 48 hores), a escala municipal s'obté un encert global del 81% considerant totes les magnituds. Destaquen especialment les esllavissades M1, que assoleixen un 89% d'encert, mentre que no va ser capaç d'identificar dos municipis on es van produir dues esllavissades de magnituds M2 i M3, respectivament.

Taula 9. Valors de la taxa d'encert (HRL) per als esdeveniments reportats -obtinguts amb una finestra temporal de 48 hores-, desglossats segons la magnitud de les esllavissades. Entre parèntesis s'indica el nombre d'esllavissades de cada categoria.

	M1 (18)	M2 (2)	M3 (1)
Cel·la	17%	0%	0%
Unitats de vessant	50%	50%	0%
Municipi	89%	50%	0%
Comarca	100%	100%	100%

5.3.1.3 4 de novembre de 2024

El dia 4 de novembre de 2024 es va produir una activitat notable, amb 33 esllavissades identificades a l'inventari (27 M1, 4 M2 i 2 M3), distribuïdes de manera extensa pel territori. La Figura 23 mostra la comparació entre els episodis registrats i els nivells màxims d'alerta assignats del dia 4 de novembre, tant a escala municipal com comarcal. En general, el sistema va generar nivells d'alerta alts a les àrees amb més densitat d'esllavissades.

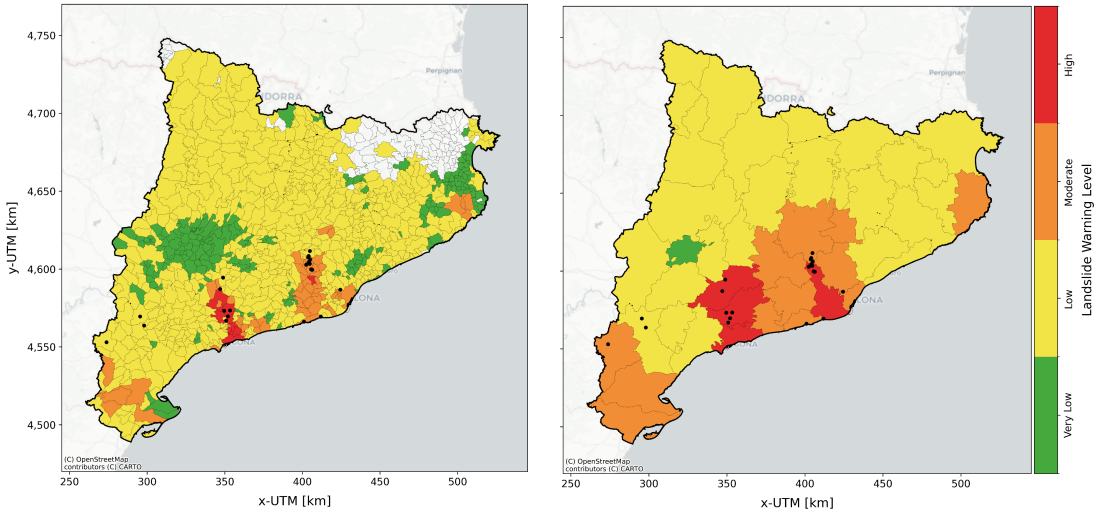


Figura 23. Comparació entre els episodis registrats i els nivells màxims d'alerta assignats el dia 4 de novembre de 2024 (finestra temporal de 24 hores), tant a escala municipal com comarcal.

En analitzar l'efecte de l'ampliació de la finestra temporal, s'observa un comportament molt estable del sistema: l'únic canvi és a escala de vessant, en què s'identifica un episodi M1 més quan s'utilitza la finestra de 48 hores, mentre que la resta d'unitats territorials mantenen exactament els mateixos resultats.

Pel que fa al rendiment del sistema (Taula 10), les taxes d'encert per unitat territorial indiquen una resposta satisfactòria i consistent: 21% a escala de cel·la, 67% a unitats de vessant, 79% a escala municipal i 94% a escala comarcal, valors que reflecteixen la capacitat del model per capturar l'episodi en funció de la mida de la unitat territorial d'agregació.

Taula 10. Valors de la taxa d'encert (HR_L) per als episodis de l'inventari -obtinguts amb una finestra temporal de 48 hores-, desglossats segons la magnitud de les esllavissades. Entre parèntesis s'indica el nombre d'esllavissades de cada categoria.

	M1 (27)	M2 (4)	M3 (2)
Cel·la	22%	25%	0%
Unitats de vessant	70%	50%	50%
Municipi	78%	100%	50%
Comarca	96%	100%	50%

5.3.1.4 9 de març de 2025

La Figura 24 presenta la comparació entre els episodis registrats i els nivells màxims d'alerta assignats pel sistema el mateix dia del registre de l'inventari, tant a escala municipal com comarcal. En aquesta data es van registrar cinc esllavissades de magnitud M1.

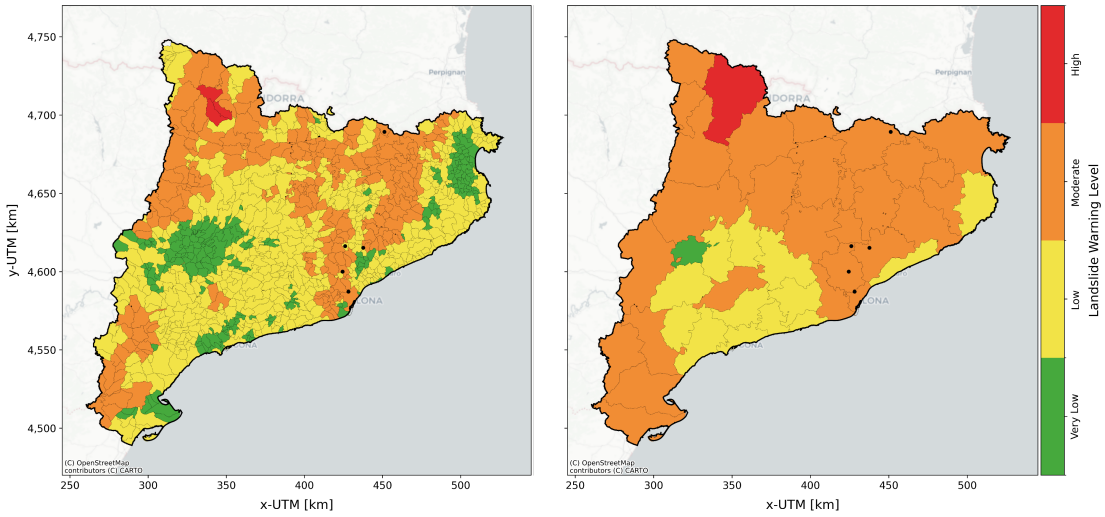


Figura 24. Comparació entre els episodis registrats i els nivells màxims d'alerta assignats el dia 9 de març de 2025 (finestra temporal de 24 hores), tant a escala municipal com comarcal.

Els resultats de la Taula 11 mostren un increment progressiu en la capacitat de reproducció de l'esdeveniment a mesura que l'escala territorial s'agrega: 0% a escala de cel·la (en tres d'aquestes cel·les, el nivell de susceptibilitat és "Molt baix" o "Baix"), 60% a escala municipal i 100% a escala comarcal.

En ampliar la finestra temporal a 48 hores, només s'observa una millora a escala municipal, on s'identifica un episodi més (i, per tant, el HR_L passant del 60% al 80%). Les altres unitats territorials no presenten variacions.

Taula 11. Descripció de les característiques dels esllavissades seleccionats, juntament amb la susceptibilitat (resolució de 30 m) i els nivells màxims d'alerta -obtinguts amb una finestra temporal de 48 hores- per als diferents tipus d'unitats territorials.

Localització (comarca)	Ripollès	Vallès Oriental	Vallès Occidental	Vallès Occidental	Barcelonès
Característiques de l'episodi					
Desenc.	Pluja	Pluja	Pluja	Pluja	Pluja
Àrea font	Natural	Natural	Natural	Natural	Altres
Magnitud	M1	M1	M1	M1	M1
Tipus	Lliscament	Lliscament	Despreniment	Lliscament	Enfonsament
Susceptibilitat	Moderate	Low	High	Very Low	Very Low
Nivell d'alerta amb finestra temporal de 48 hores					
Cel·la	Low	Very Low	Low	Very Low	Very Low
U. de vessant	Moderate	Low	Low	Low	Moderate
Municipi	Moderate	Low	Low	Moderate	Moderate
Comarca	Moderate	Moderate	Moderate	Moderate	Moderate

5.3.2 Anàlisi dels casos amb episodis M3 i M4

5.3.2.1 Resum dels resultats

Per tal d'analitzar amb més detall la resposta del sistema davant d'episodis d'esllavissades de major magnitud, la Taula 12 sintetitza tots els dies en què es van registrar esdeveniments M3 i M4, juntament amb el nivell d'alerta generat pel sistema per a finestres temporals de 24 i 48 hores. Aquesta comparació permet valorar si el nivell d'alerta generat pel sistema va permetre identificar aquests episodis i si l'ampliació de la finestra temporal millora la seva capacitat de detecció.

Taula 12. Dies amb episodis de magnitud M3 i M4 i correspondència amb les alertes generades amb finestres temporals de 24 h i 48 h. Els colors indiquen el nivell d'alerta d'esllavissades: verd ("Molt baix"), groc ("Baix"), taronja ("Moderat") i vermell ("Alt").

Data	Desenc	Magn	Sus	Tipus	Cel·la		Vessant		Municipi		Comarca	
					24h	48h	24h	48h	24h	48h	24h	48h
2024-03-26	Pluja	M4	M	Natural								
2024-05-13	Desconegut	M3	H	Natural								
2024-05-14	Pluja	M3	H	Natural								
2024-05-22	Pluja	M3	H	Natural								
2024-06-06	Pluja	M3	H	Natural								
2024-06-12	Pluja	M3	M	Natural								
2024-09-01	Desconegut	M3	L	Natural								
2024-09-02	Desconegut	M3	M	Desmunt								
2024-12-10	Pluja	M3	VL	Desmunt								
2025-02-15	Desconegut	M3	H	Natural								
2025-08-20	Pluja	M3	H	Natural								
2025-10-13	Pluja	M3	H	Desmunt								
2025-10-14	Pluja	M4	L	Natural								

A partir d'aquesta informació, s'han seleccionat alguns episodis representatius per descriure'ls amb més detall. Aquests casos permeten examinar de manera qualitativa el comportament del sistema davant situacions específiques.

5.3.2.2 26 de març de 2024

El 26 de març de 2024 es va registrar una esllavissada de magnitud M4 desencadenat per pluja al municipi de Tremp (Pallars Jussà). Malgrat ampliar la finestra temporal de verificació, els resultats del sistema d'alerta no varien. L'objectiu és analitzar per què l'alerta generada no assoleix el nivell necessari per identificar l'episodi *(TP)*, tot i considerar finestres temporals de 24 i 48 hores, i revisar tant el comportament de la pluja com la resposta del model.

L'anàlisi de la precipitació (Figura 25) mostra que les intensitats més elevades es concentren durant les últimes hores del dia anterior al del registre de l'inventari, amb un màxim proper als 6 mm/h. Aquestes intensitats no superen els llindars necessaris per desencadenar un nivell d'alerta igual o superior al que es requereix en una zona amb susceptibilitat "Moderada".

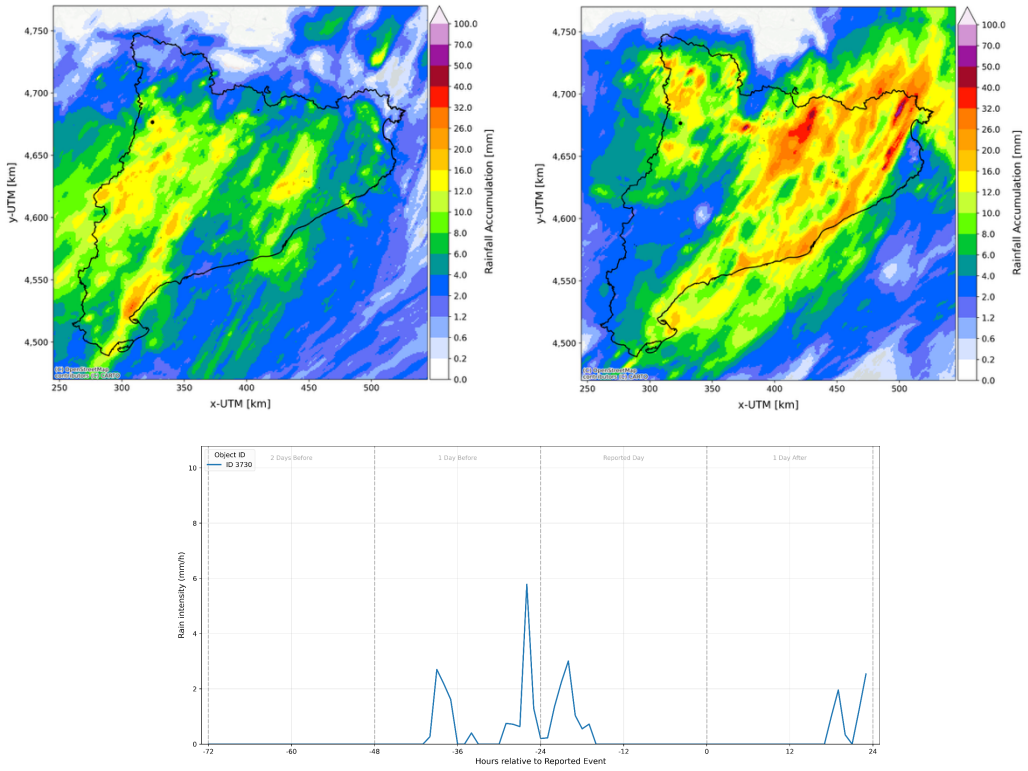


Figura 25. D'esquerra a dreta, acumulació diària de pluja dels dies 25 i 26 de març de 2024. El gràfic inferior mostra la línia temporal d'intensitat corresponent a la cel·la on es va reportar l'esdeveniment.

Com a conseqüència, el nivell d'alerta es manté en "Molt baix" a escala de cel·la i en "Baix" a la resta d'unitats territorials. Aquest resultat és idèntic tant per a la finestra de 24 hores (Figura 26) com per a la de 48 hores.

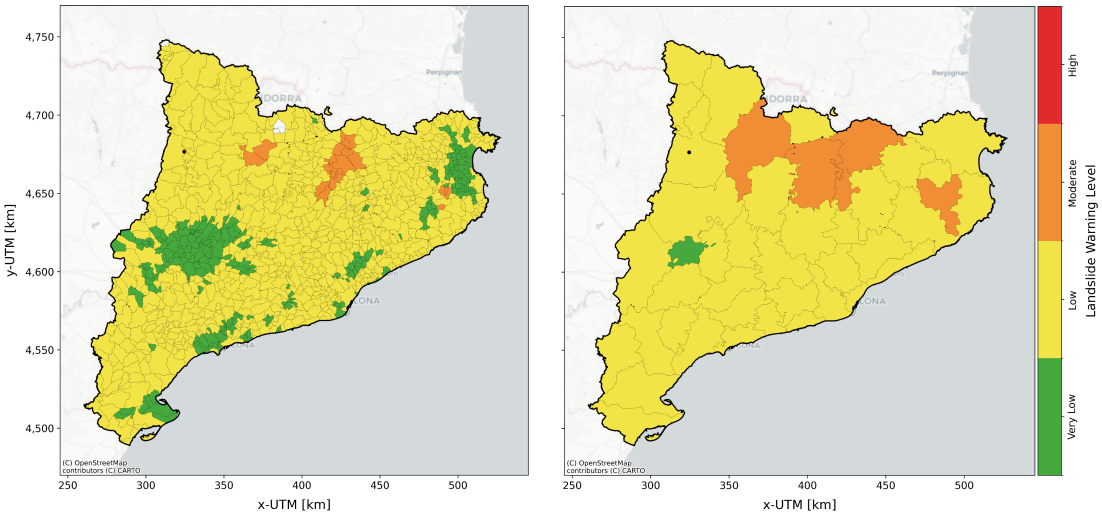


Figura 26. Comparació entre els episodis registrats i els nivells màxims d'alerta assignats el dia 26 de març de 2024, tant a escala municipal com comarcal.

Aquest episodi representa un cas en què l'ampliació de la finestra temporal no modifica els resultats. Per a què es produís un encert (TP) en aquest punt de susceptibilitat "Moderada", la pluja hauria d'haver superat el nivell "Moderat", cosa que no va ocórrer ni dins de les 24 hores prèvies ni en les 24 següents. Per això, fins i tot ampliant la finestra temporal, el nivell d'alerta no arriba al llindar necessari i el resultat continua essent el mateix.

Segurament, les característiques del punt on es va produir l'esllavissada no es corresponien al nivell de susceptibilitat "Moderada", i possiblement l'esllavissada no es va produir únicament per la pluja ocorreguda durant l'episodi (Figura 27).



Figura 27. Foto del despreniment que es va proudir al veïnat de Santa Engràcia (municipi de Tremp) el 26 de març de 2024.

5.3.2.3 13 d'octubre de 2025

El 13 d'octubre de 2025 es va registrar una esllavissada de magnitud M3 al municipi de Roquetes (Baix Ebre) desencadenada per pluja. Es tracta d'un exemple especialment clar dins l'anàlisi, ja que l'episodi va ser identificat amb un nivell d'alerta "Alt", fins i tot a escala de cel·la.

L'anàlisi de la precipitació (Figura 28) mostra que, el dia previ a l'episodi, es van observar intensitats elevades (20-25 mm/h), fet que explica l'assignació d'un nivell d'alerta tan alt. Aquest patró d'intensitat sostinguda també es pot observar en l'acumulació diària de pluja dels dies 12 i 13 d'octubre, així com en la sèrie temporal d'intensitat corresponent a la cel·la afectada.

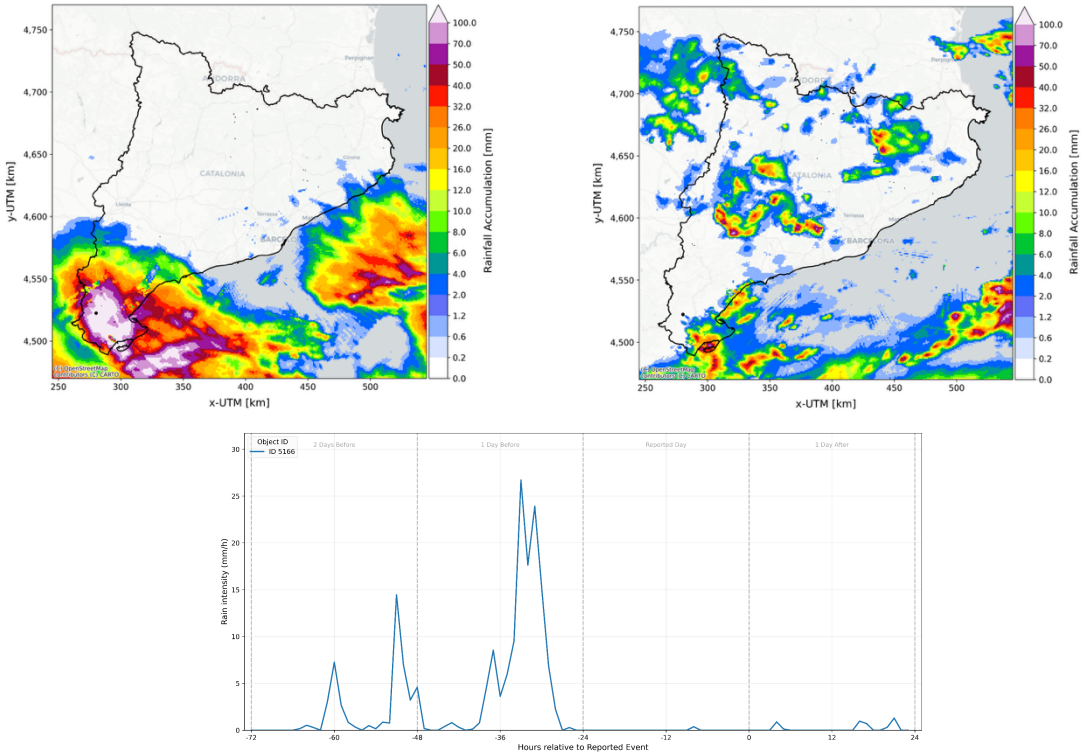


Figura 28. D'esquerra a dreta, acumulació diària de pluja dels dies 12 i 13 d'octubre de 2025. El gràfic inferior mostra la línia temporal d'intensitat corresponent a la cel·la on es va reportar l'episodi.

La comparació entre els episodis registrats i els nivells màxims d'alerta generats (Figura 29) confirma la capacitat del sistema per predir adequadament aquest cas, ja que la resposta del model coincideix amb la magnitud i la intensitat del fenomen observat.

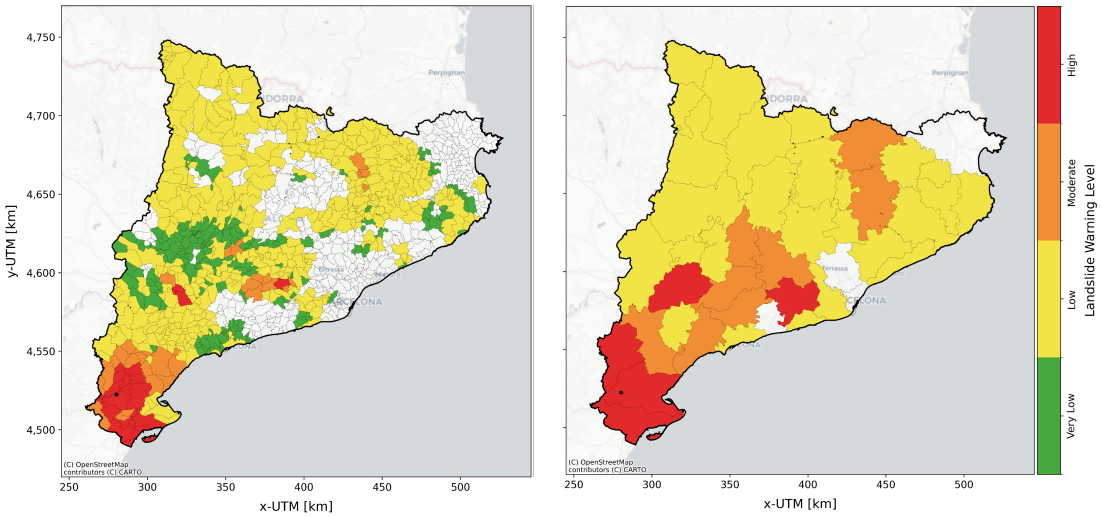


Figura 29. Comparació entre els episodis registrats i els nivells màxims d'alerta assignats el dia 13 d'octubre de 2025, tant a escala municipal com comarcal.

5.3.2.4 14 d'octubre de 2025

El 14 d'octubre de 2025 es va registrar una esllavissada de magnitud M4 al municipi de Sant Carles de la Ràpita (el Montsià) associada a un episodi intens de pluja. Es tracta d'un exemple especialment clar dels efectes positius d'ampliar la finestra temporal de verificació, ja que considerar no només la data reportada sinó també el dia anterior canvia significativament el nivell d'alerta obtingut.

La Figura 30 mostra que, amb una finestra de 24 hores, el sistema assigna nivells d'alerta baixos ("Molt baix" a escala de cel·la i "Baix" a la resta d'unitats territorials).

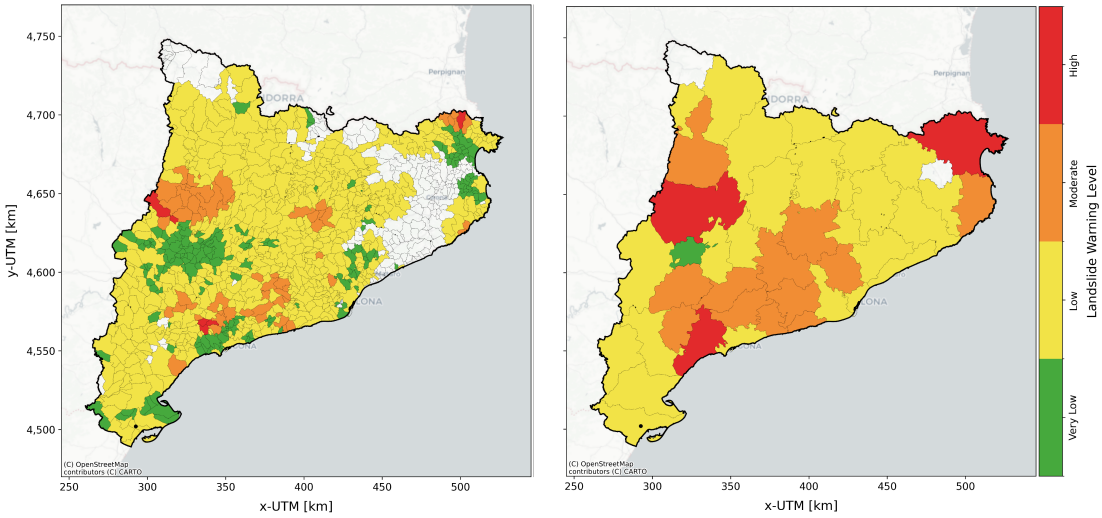


Figura 30. Comparació entre els episodis registrats i els nivells màxims d'alerta assignats el dia 14 d'octubre de 2025, tant a escala municipal com comarcal.

Tanmateix, en ampliar la finestra a 48 hores, els valors augmenten de manera notable: el nivell d'alerta passa a "Moderat" a escala de cel·la i a "Alt" en unitats de vessant, municipi i comarca (Taula 13). Aquest resultat és especialment rellevant tenint en compte que la

zona on es va produir l'esllavissada presentava una susceptibilitat "Baixa", fet que normalment implicaria una resposta del sistema molt més moderada si només es considerés el dia de l'episodi.

Taula 13. Resultats de les alertes màximes generades amb finestres temporals de 24 h i 48 h per a l'episodi del dia elegit.

Finestra temporal	Cel·la	Unitats de vessant	Municipi	Comarca
24 hores	Very Low	Low	Low	Low
48 hores	Moderate	High	High	High

Pel que fa a la precipitació (Figura 31), les dades indiquen que la intensitat màxima de pluja no es va registrar el mateix dia, sinó el 12 d'octubre, és a dir, entre 48 i 72 hores abans de la data reportada, amb un pic excepcional de més de 100 mm/h. Aquest valor extrem justifica que a l'episodi se li assignés un nivell d'alerta "Alt".

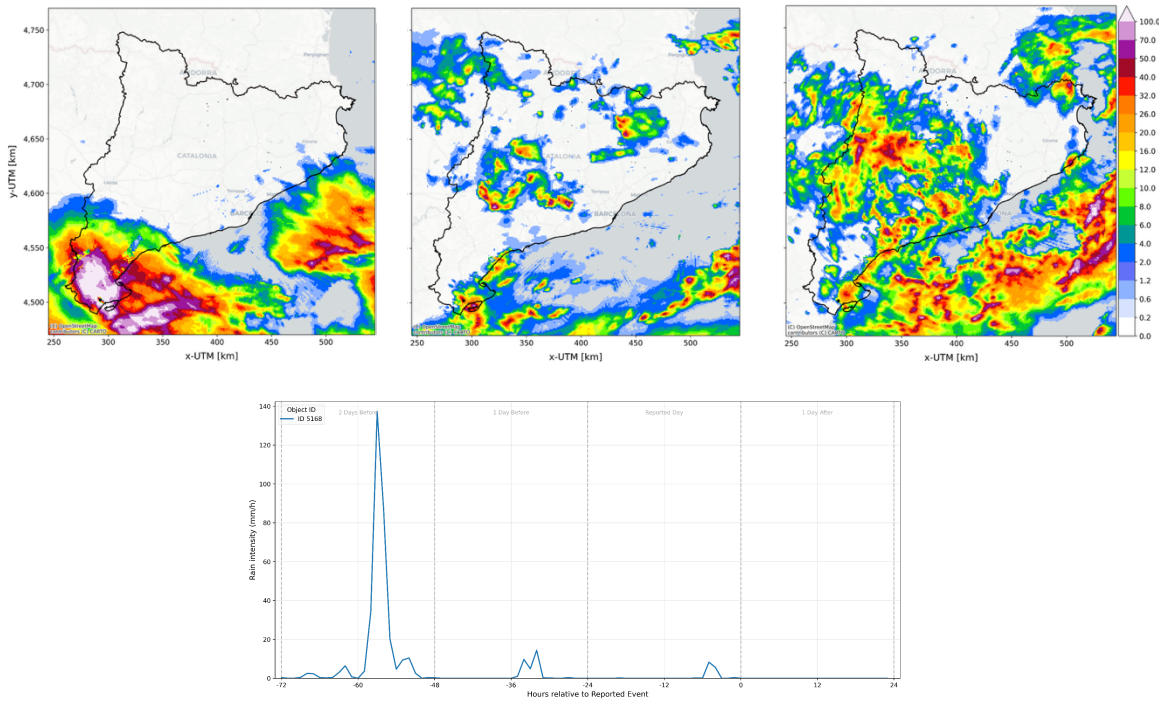


Figura 31. D'esquerra a dreta, acumulació diària de pluja dels dies 12, 13 i 14 d'octubre de 2025. El gràfic inferior mostra la línia temporal d'intensitat corresponent a la cel·la on es va reportar l'episodi.

5.3.2.5 Casos sense precipitació prèvia

En aquesta secció s'analitzen dos episodis de magnitud M3 reportats el 13 de maig de 2024 (Sant Quirze Safaja, el Moianès) i el 6 de juny de 2024 (la Vansa i Fórnols, Alt Urgell), tots dos caracteritzats per la manca de precipitació significativa en les hores prèvies. A diferència dels casos en què la pluja intensa determina clarament el nivell d'alerta, aquests episodis mostren situacions en què el sistema no pot reproduir l'esllavissada perquè la precipitació observada, tant amb finestres de 24 com de 48 hores, és nul·la.

Tot i que el primer cas presenta un desencadenant desconegut i el segon es classifica com a desencadenat per pluja, en ambdós casos la informació disponible no indica cap intensitat rellevant que pogués explicar el desencadenament de les esllavissades. Les línies temporals d'intensitat de pluja per als dos casos mostren que no es van registrar valors significatius durant les 24-72 hores prèvies (Figura 32). Aquesta absència de pluja explica que el sistema no generi alertes.

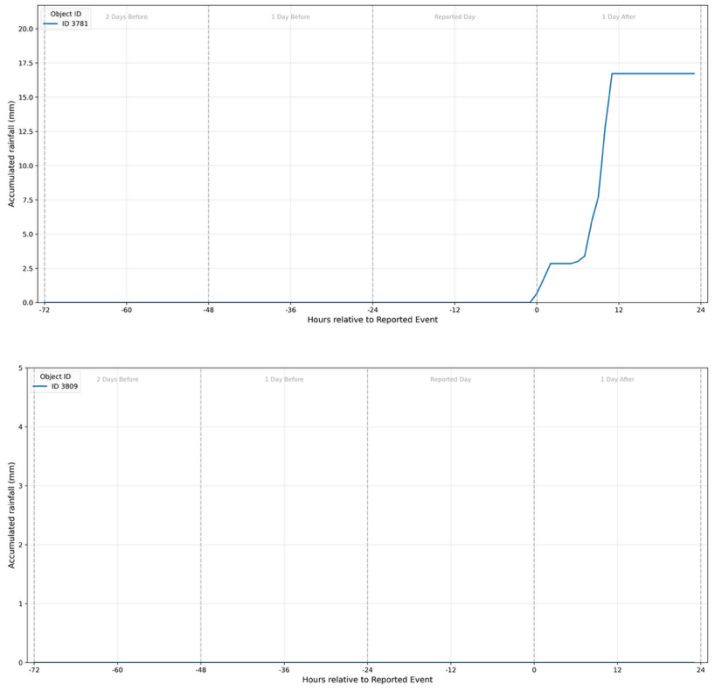


Figura 32. Evolució temporal de la pluja acumulada durant els episodis del 13 de maig de 2024 (a dalt) i del 6 de juny de 2024 (a baix).

La Figura 33 mostra els nivells d'alerta municipal assignats pel sistema el dia dels dos episodis. En cap dels dos casos el model no va generar alertes per l'absència de precipitació detectada en les hores prèvies.

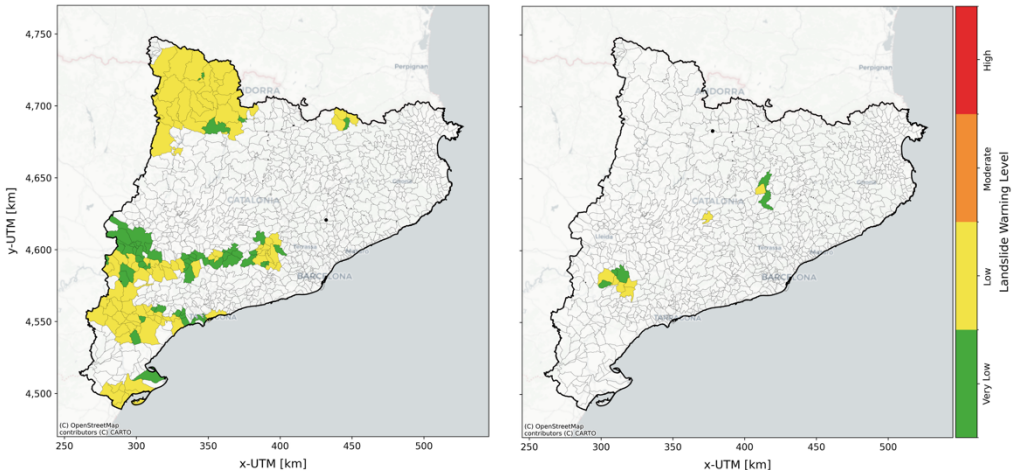


Figura 33. Nivells d'alerta municipals corresponents als episodis del 13 de maig de 2024 i del 6 de juny de 2024 (esquerra i dreta, respectivament).

En el cas del 13 de maig de 2024 (M3, desencadenant desconegut), l'absència total de precipitació és coherent amb la manca d'alertes i suggereix que l'esllavissada podria respondre a factors locals no associats a la pluja.

En canvi, en el cas del 06 de juny de 2024 (M3, desencadenat per pluja), tot i que el registre indica un origen pluvial, les dades mostren precipitació nul·la en tot l'interval analitzat. Aquest fet podria indicar una desalineació en la data de l'episodi, de manera que la pluja desencadenant s'hagués produït fora del període temporal considerat.

5.4 Anàlisi de l'efecte de l'agregació del nivell d'alerta sobre les unitats de vessant

Com s'explica a l'apartat a l'apartat 3.2, en la versió operativa del sistema el nivell d'alerta a escala territorial es calcula com el nivell d'alerta màxim obtingut sobre les cel·les de l'interior de la unitat territorial.

En aquest apartat es presenta l'anàlisi de l'efecte del criteri utilitzat per transformar el nivell d'alerta a escala de cel·la de 30 m (resolució del mapa de susceptibilitat) a la unitat territorial de més resolució, la divisió en unitats de vessant de nivell 1 generada per l'ICGC).

S'hi comparen les alternatives per assignar el nivell d'alerta a cada unitat territorial següents:

- Mediana del nivell d'alerta de les cel·les de 30 m.
- Percentil 90 del nivell d'alerta de les cel·les de 30 m.
- Nivell d'alerta que es supera en una àrea fixada a cada unitat de vessant (0,10 km^2).
- Nivell d'alerta màxim.

Els resultats obtinguts es presenten per alguns dels episodis analitzats a l'apartat 5.3.

5.4.1 26 d'octubre de 2024

Els resultats obtinguts sobre les unitats de vessant amb els quatre criteris analitzats es presenten a la Figura 34. S'hi observa que l'efecte d'aquest criteri fa variar significativament el nivell d'alerta assignat a cada unitat de vessant, de manera que, com era esperable, els nivells d'alerta més baixos s'obtenen amb l'ús de la mediana dels nivells d'alerta de la unitat de vessant i els més alts amb l'ús del màxim.

En aquest cas, de 21 episodis registrats (veure apartat 5.3.1.2), 10 poden ser identificats utilitzant el valor màxim del nivell d'alerta dins de les unitats de vessant, mentre que tant l'agregació mitjançant el percentil 90 com el mètode basat en el nivell superat en una àrea fixa de 0,10 km² permeten identificar 8 episodis (Figura 34). L'agregació basada en els valors medians no permet identificar cap dels esdeveniments analitzats. Cal destacar, però, que l'agregació mitjançant el nivell superat en una àrea fixa de 0,10 km² genera una extensió més àmplia de polígons amb nivells d'alerta moderats i alts en comparació amb l'agregació basada en el percentil 90.

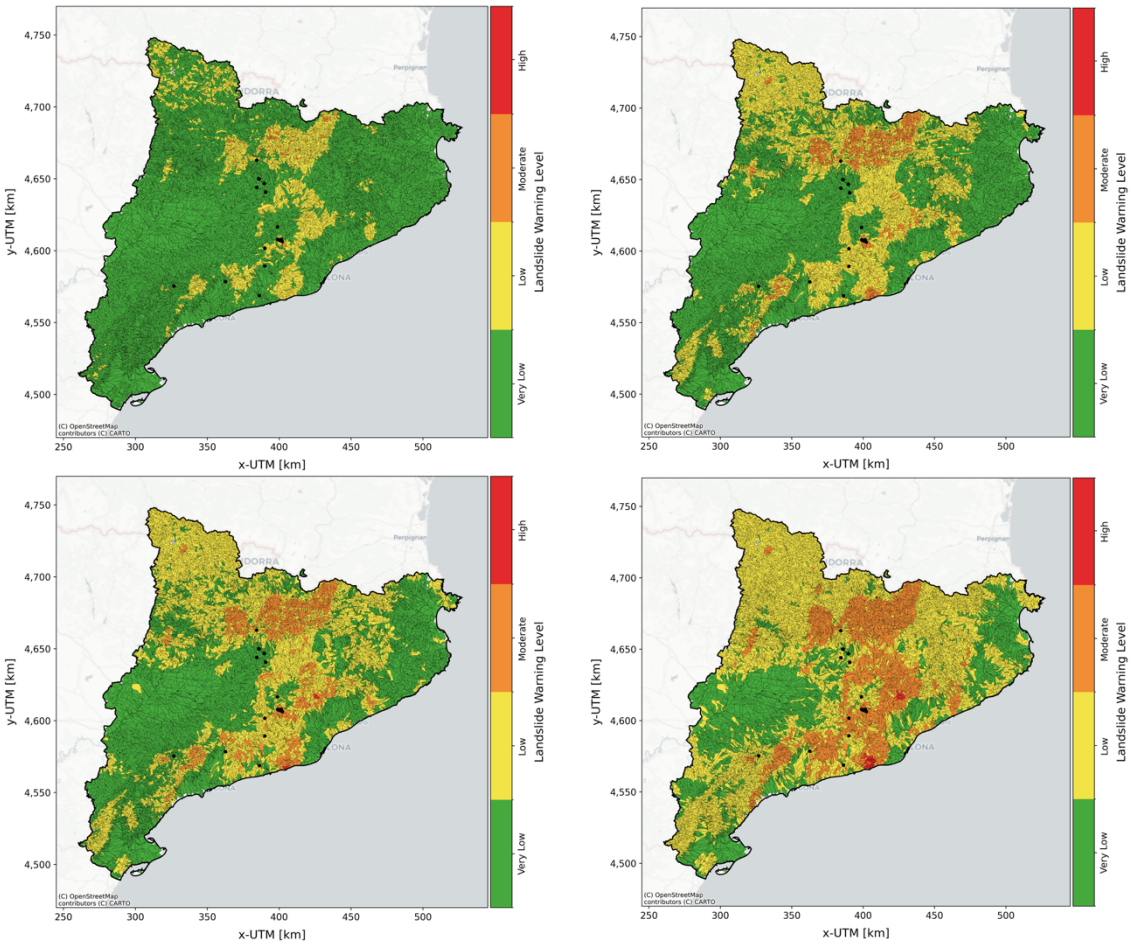


Figura 34. Comparació dels mètodes d'agregació del nivell d'alerta generat a escala de cel·la a les unitats de vessant el dia 26 d'octubre de 2024: mediana (superior esquerra), percentil 90 (superior dreta), nivell superat en una àrea fixa (inferior esquerra) i valor màxim (inferior dreta). Els punts representen les esllavissades registrades.

5.4.2 4 de novembre de 2024

En aquest dia es van registrar un total de 33 esllavissades (veure apartat 5.3.1.3). Utilitzant el nivell d'alerta màxim, és possible identificar el 64% dels episodis a nivell d'unitat de vessant, incloent-hi la meitat de les esllavissades de major magnitud (M2 i M3; Figura 35). En canvi, quan s'empren els valors agregats mitjançant el percentil 90, només es detecta el 24% dels esdeveniments totals, corresponent al 25% dels esdeveniments M2 i al 50% dels M3. De manera semblant, el mètode basat en el nivell superat en una àrea fixa de 0,10 km² permet detectar el 27% dels episodis (de magnitud M2 i M3), que coincideixen amb els identificats amb el percentil 90. Mentre que amb el criteri de la mediana s'identifica una sola unitat de vessant on realment s'hi va produir un episodi (de magnitud M2).

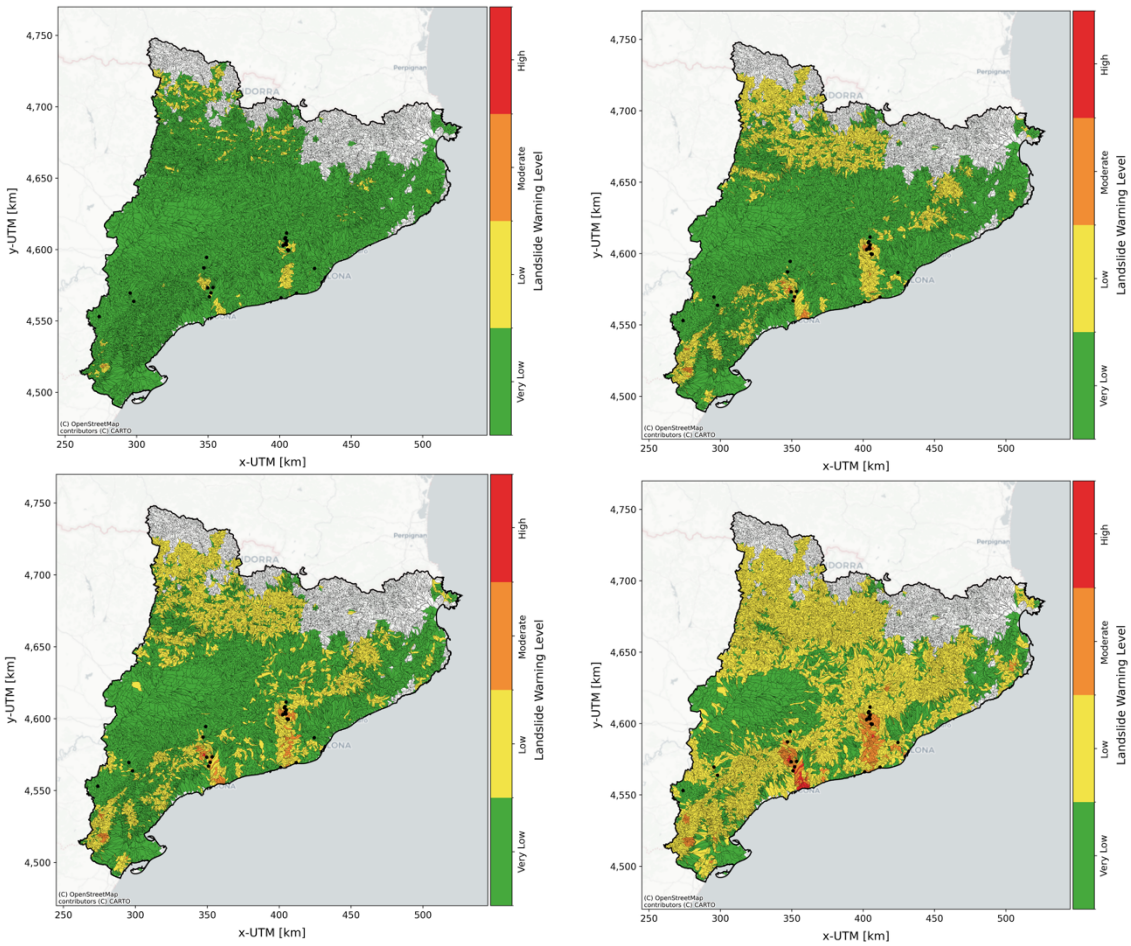


Figura 35. Comparació dels mètodes d'agregació del nivell d'alerta generat a escala de cel·la a les unitats de vessant el dia 4 de novembre de 2024: mediana (superior esquerra), percentil 90 (superior dreta), nivell superat en una àrea fixa (inferior esquerra) i valor màxim (inferior dreta). Els punts representen les esllavissades registrades.

5.4.3 9 de març de 2025

Els resultats d'aplicar els criteris analitzats per aquest dia, mostren àrees amb nivells d'alerta alts al sector nord-oest de Catalunya (Figura 36), i el criteri de la mediana és el que dona nivells d'alerta clarament més baixos que la resta.

Durant aquest dia es van reportar cinc episodis de magnitud M1 (veure apartat 5.3.1.4). L'únic mètode d'agregació que permet identificar episodis és el basat en el nivell d'alerta màxim, amb una detecció de dues esllavissades, mentre que la resta de mètodes d'agregació (mediana, nivell superat en una àrea de 0,1 km^2 i percentil 90) no permeten identificar cap dels episodis ocorreguts a nivell d'unitat de vessant.

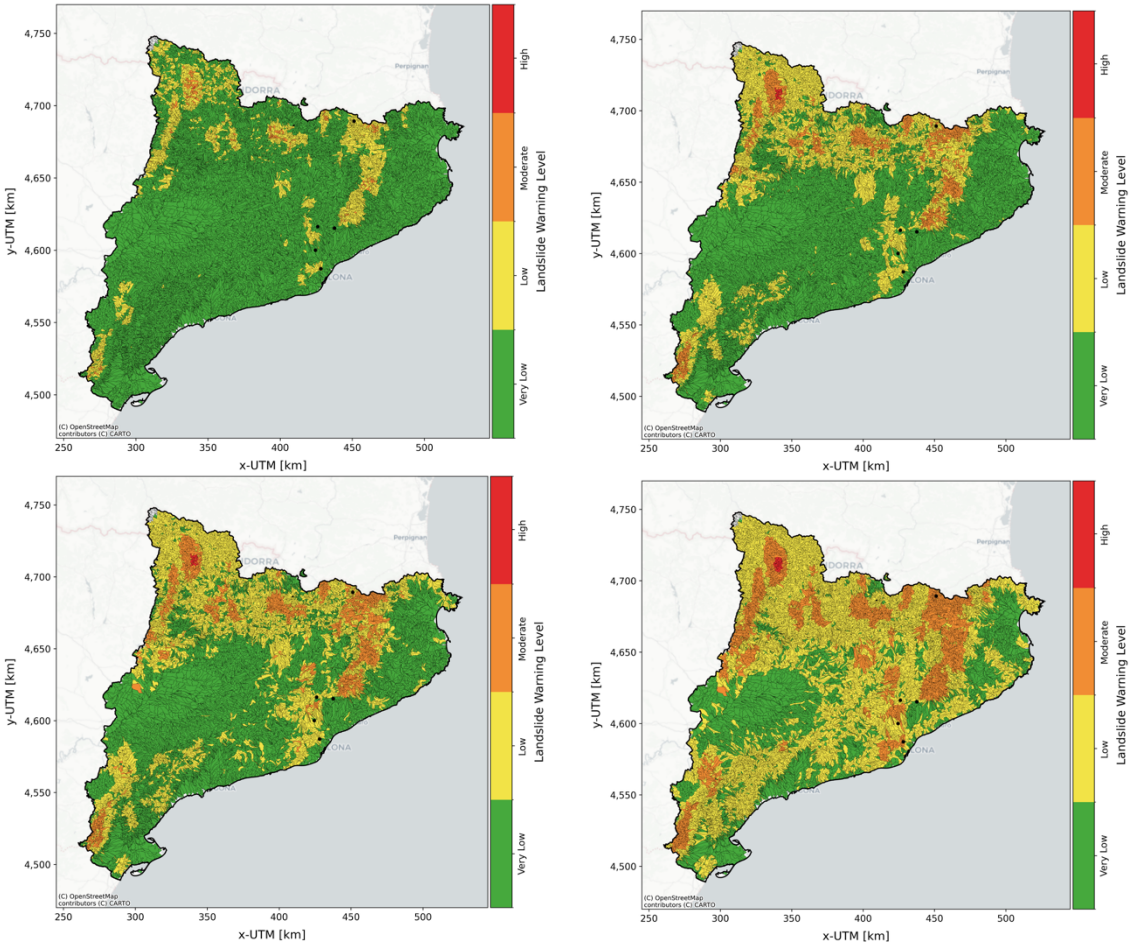


Figura 36. Comparació dels mètodes d'agregació del nivell d'alerta generat a escala de cel·la a les unitats de vessant el dia 9 de març de 2025: mediana (superior esquerra), percentil 90 (superior dreta), nivell superat en una àrea fixa (inferior esquerra) i valor màxim (inferior dreta). Els punts representen les esllavissades registrades.

5.4.4 13 d'octubre de 2025

En aquest cas es va produir un episodi de magnitud M3 (veure apartat 5.3.2.3). Els mètodes d'agregació basats en el valor màxim, el percentil 90 i el nivell superat en una àrea fixa de 0,10 km² assignen un nivell d'alerta "Alt" a la unitat de vessant on es va reportar l'esllavissada (Figura 37), mentre que l'agregació mitjançant la mediana dona lloc a un nivell d'alerta "Moderat". Aquests resultats indiquen que els quatre mètodes d'agregació permeten identificar l'episodi, tot i amb diferències en el nivell de l'alerta assignada.

Pel que fa a la distribució espacial de les àrees simulades amb alerta, la zona de major perillositat es concentra principalment al sud de Catalunya. En aquest context, l'agregació mitjançant la mediana destaca per generar l'extensió més reduïda de polígons amb nivells d'alerta, coincidint de manera molt precisa amb la unitat on es va produir l'esdeveniment. Els resultats obtinguts amb el percentil 90 i amb el mètode del nivell superat en una àrea fixa de 0,10 km² són molt semblants; no obstant això, aquest darrer tendeix a simular una extensió lleugerament més gran de polígons amb nivells d'alerta "Moderat" i "Alt".

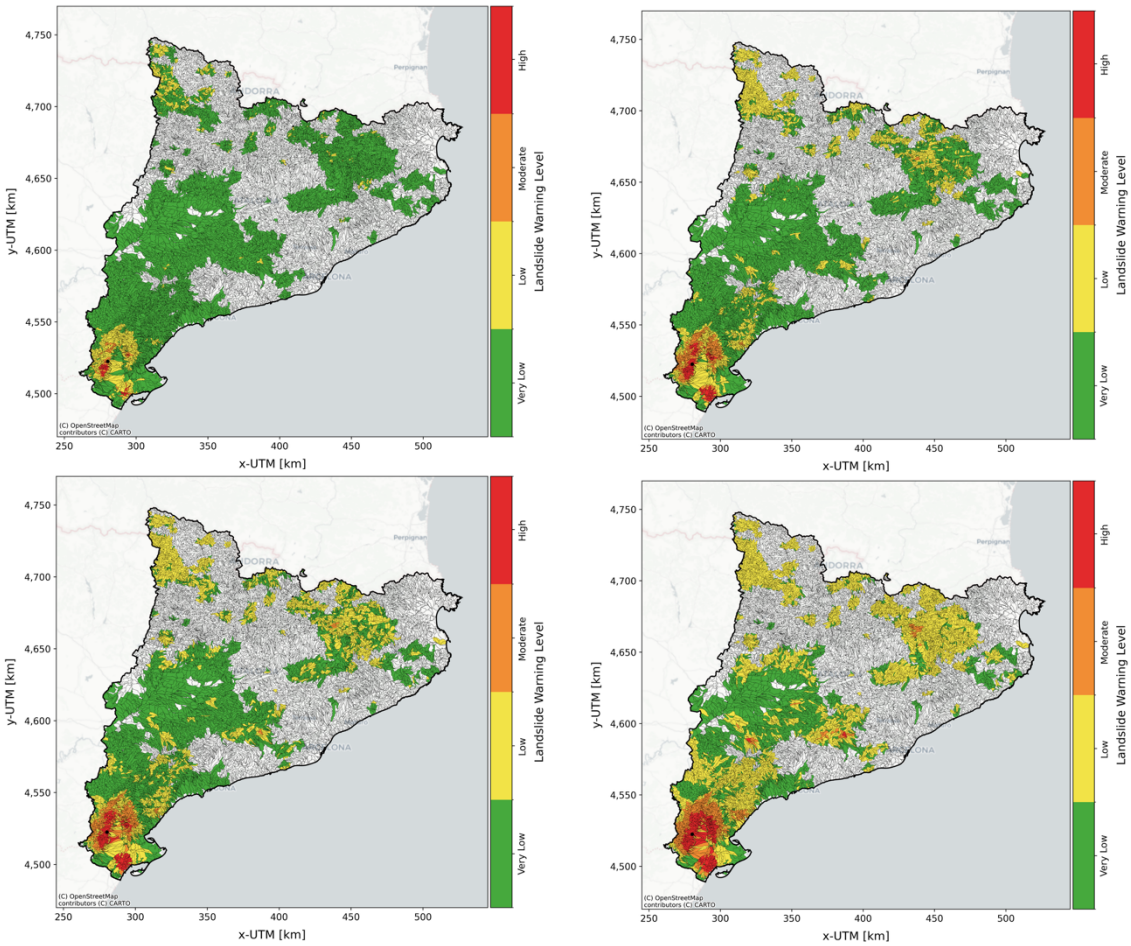


Figura 37. Comparació dels mètodes d'agregació del nivell d'alerta generat a escala de cel·la a les unitats de vessant el dia 13 d'octubre de 2025: mediana (superior esquerra), percentil 90 (superior dreta), nivell superat en una àrea fixa (inferior esquerra) i valor màxim (inferior dreta). Els punts representen les esllavissades registrades.

5.5 Anàlisi de les alertes d'esllavissades obtingudes a partir de les previsions de pluja

En aquest apartat s'analitza la qualitat de les previsions d'esllavissades. Per fer-ho es comparen les previsions del nivell d'alerta (funcionament del sistema en mode de previsió; veure apartat 4.1) amb el nivell d'alerta a partir de les observacions de pluja (mode d'observació; veure apartat 4.1).

L'anàlisi es presenta per uns quants episodis i s'analitzen les alertes previstes per dos rangs de *lead times* (temps de previsió): entre 0 i 24 hores i entre 24 i 48 hores. Es prenen com a referència les alertes diàries estimades a partir de les observacions de pluja.

5.5.1 26 d'octubre de 2024

Tal i com s'ha analitzat a l'apartat 5.3.1.2, les alertes generades a partir de la pluja observada aconsegueixen reproduir amb encert les àrees on es van produir les esllavissades reportades, identificant el 81 % dels municipis on es van produir. En aquest escenari, els municipis amb alertes de nivell "Alt" es localitzen principalment al voltant del

Garraf i el Moianès, i el nivell d'alerta "Moderat" es troba principalment a les comarques del centre de Catalunya.

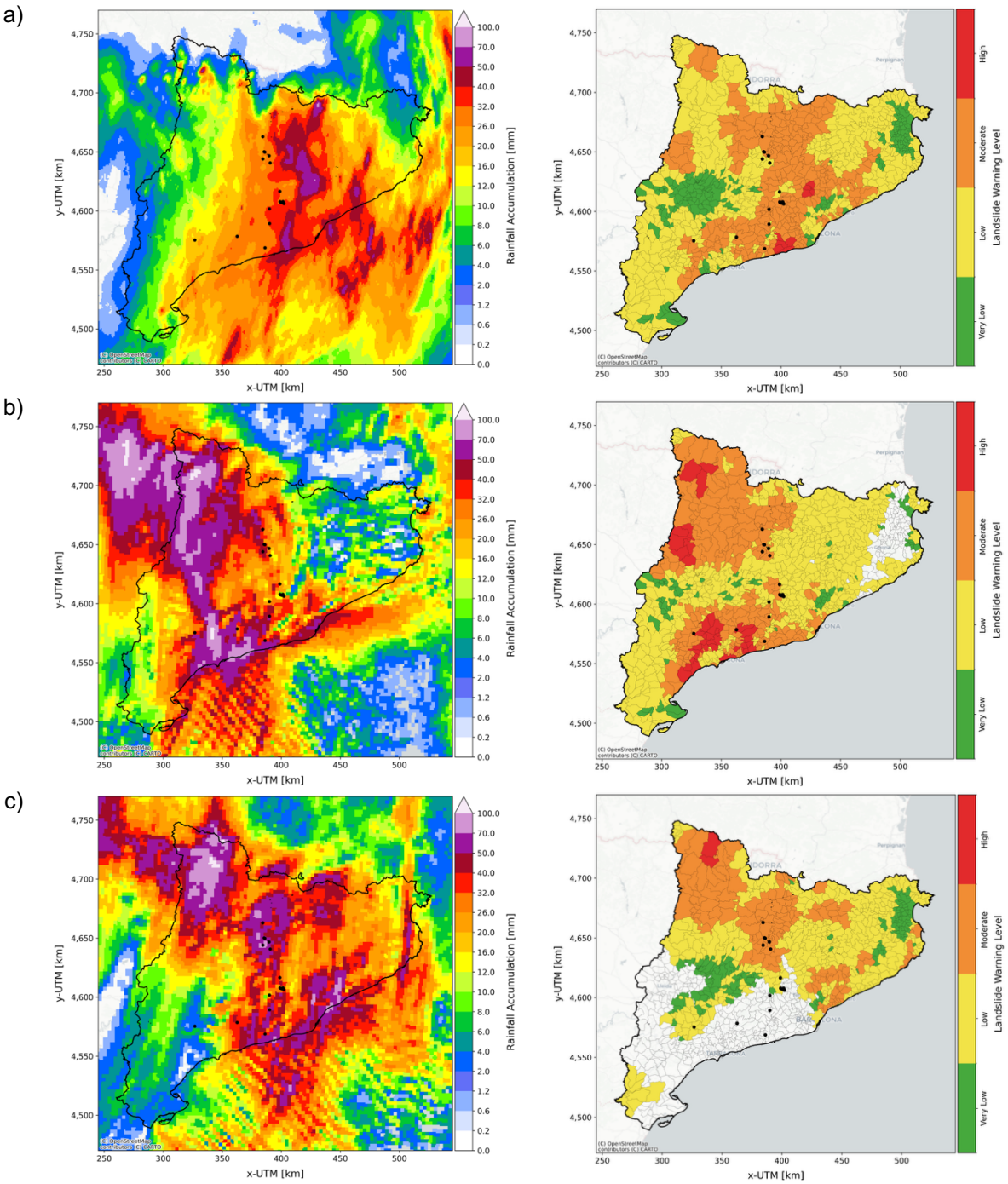


Figura 38. Comparació entre els les acumulacions de pluja i els nivells màxims d'alerta d'esllavissades del dia 26 d'octubre de 2024. Les 3 files mostren els resultats obtinguts en a) mode observació, b) mode previsió per lead times *entre 0 h i 24 h, c) mode previsió per* lead times *entre 24 h i 48 h; l'alerta observada mostra els episodis de l'inventari com a punts.*

Les alertes previstes amb *lead times* de 0 h a 24 h es van generar amb la pluja prevista el dia anterior que es mostra a la Figura 38b. En general, les acumulacions de pluja prevista identificaven que les acumulacions superarien els 50 mm en una zona extensa, però la

localitzaven en una franja entre la costa de Tarragona i la Vall d'Aran, més a l'oest que la franja entre el Garraf i la Cerdanya on es van acabar produint les acumulacions de pluja més importants. Això es tradueix en les alertes previstes que va generar el sistema, que va generar alertes amb nivells "Moderat" i "Alt" en els municipis amb les acumulacions de pluja més altes, més a l'oest que on realment es van produir les alertes en mode observació i, per tant, les esllavissades de l'inventari.

En mode previsió en el rang de *lead times* de 0 h a 24h, es van identificar gairebé la meitat dels municipis on es van produir episodis.

Finalment, la previsió de 24 h-48 h només aconsegueix reproduir un 15% dels municipis amb episodis, amb nivells alerta "Moderat" i "Alt", concentrats sobretot als municipis del nord i nord-oest de Catalunya (Figura 38c).

5.5.2 4 de novembre de 2024

Les alertes obtingudes en mode observació, basades en la pluja observades durant l'episodi, van ser capaces d'identificar satisfactòriament els episodis reportats.

Les previsions de pluja (tant per *lead times* entre 0 h i 24 h com entre 24 h i 48 h), van ser capaces d'identificar les característiques de l'episodi, amb una gran variabilitat de les acumulacions deguda a tempestes molt local principalment a les serralades Litoral i Pre-litoral i a la part baixa de l'Ebre. Tanmateix, les acumulacions de pluja prevista van ser en general inferiors a les que es van produir realment, i no reprodueixen les acumulacions de pluja entre 5 i 25 mm que es van produir a la Depressió Central i al Prepirineu.

En el cas de la previsió de 0 h–24 h, corresponent al dia anterior a l'episodi, el model aconsegueix reproduir parcialment les àrees amb esdeveniments, destacant especialment la zona propera a Barcelona, on la coincidència és més clara. En canvi, la finestra de previsió de 24 h–48 h no genera cap alerta significativa, la qual cosa indica que la capacitat de predicció a dues jornades vista és limitada en aquest episodi. Aquesta comparació permet valorar la fiabilitat de les previsions a curt i mitjà termini i mostra que, mentre la pluja observada ofereix una representació quasi completa dels esdeveniments, les finestres de previsió només aconsegueixen reproduir parcialment les zones afectades (Figura 39).

5.5.3 9 de març de 2025

Per al cas del 9 de març de 2025, l'anàlisi de la precipitació observada i de les previsions mostra diferències clares en la capacitat de reproduir els esdeveniments reportats (Figura 40). La pluja observada, juntament amb les alertes generades, aconsegueix reproduir 60 % dels casos, indicant que el model respon bastant bé a la precipitació real en aquest episodi. En canvi, tant la previsió de 0 h-24 h com la de 24 h-48 h només aconsegueixen reproduir 2 dels 5 esdeveniments, és a dir, un 40 % en ambdós casos. En els tres casos, es detecten municipis amb alertes de nivell alt localitzats al nord-oest de Catalunya, la qual cosa mostra que, tot i les diferències en la cobertura dels esdeveniments, el model identifica correctament les zones amb risc més elevat en aquesta regió.

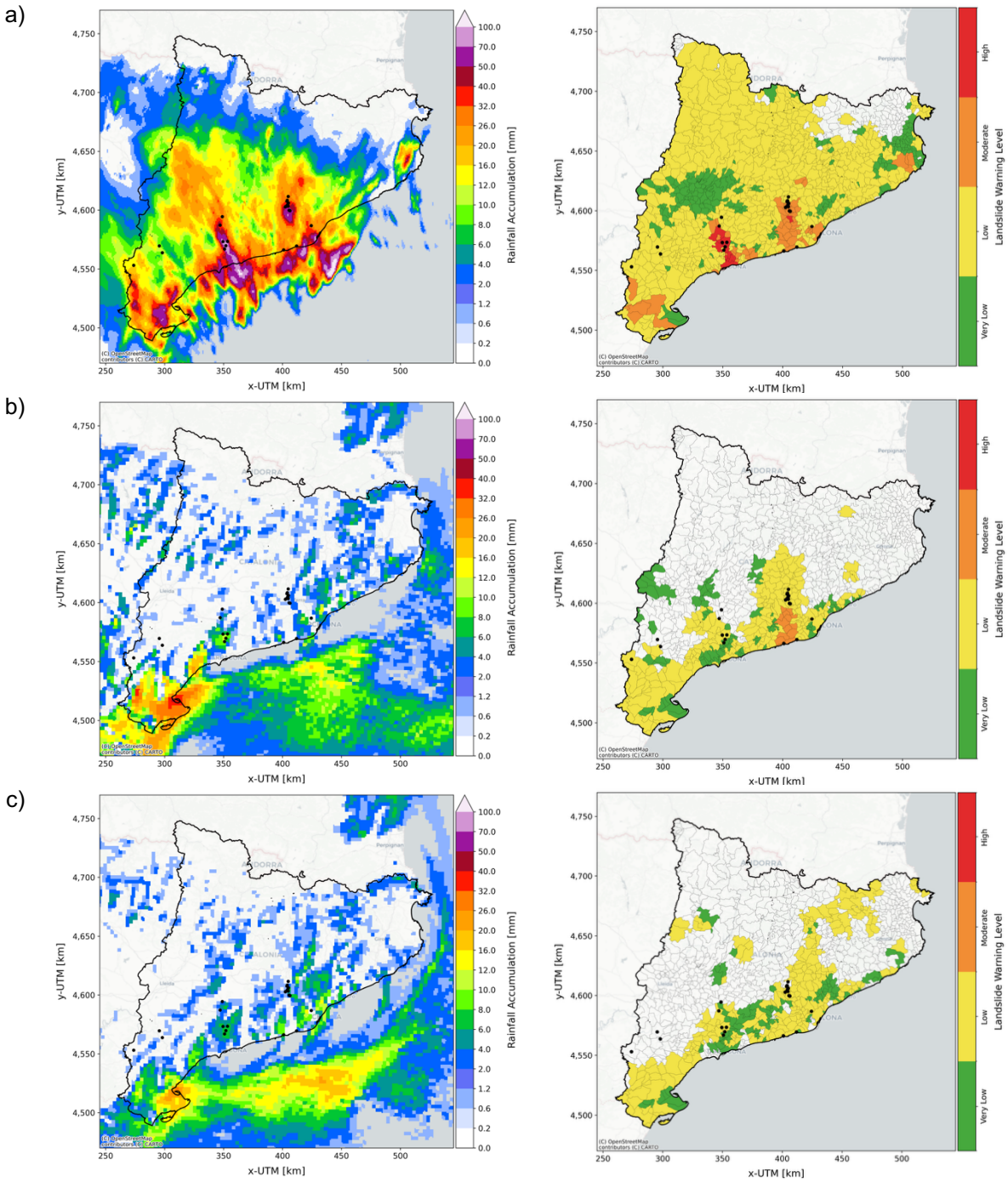


Figura 39. Comparació entre els les acumulacions de pluja i els nivells màxims d'alerta d'esllavissades del dia 4 de novembre de 2024. Les 3 files mostren els resultats obtinguts en a) mode observació, b) mode previsió per lead times entre 0 h i 24 h, c) mode previsió per lead times entre 24 h i 48 h; l'alerta observada mostra els episodis de l'inventari com a punts.

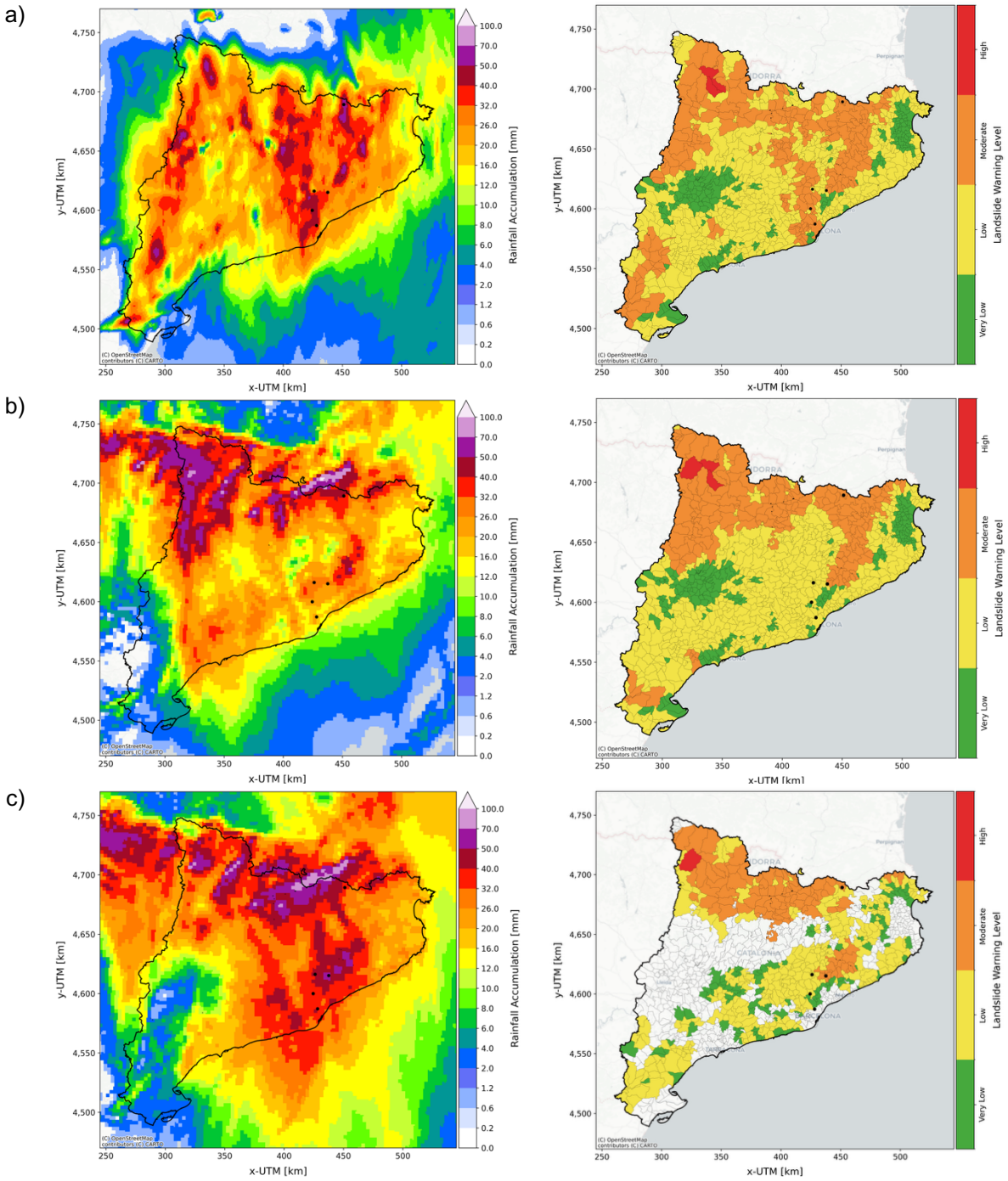


Figura 40. Comparació entre els les acumulacions de pluja i els nivells màxims d'alerta d'esllavissades del dia 9 de març de 2025. Les 3 files mostren els resultats obtinguts en a) mode observació, b) mode previsió per lead times entre 0 h i 24 h, c) mode previsió per lead times entre 24 h i 48 h; l'alerta observada mostra els episodis de l'inventari com a punts.

5.5.4 13 d'octubre de 2025

Per al cas del 13 d'octubre de 2025, corresponent a un episodi de magnitud M3, s'aplica el mateix anàlisi de la pluja prevista a 24 i 48 hores conjuntament amb les alertes generades (Figura 41). En tots els casos, inclosa l'alerta basada en la pluja observada, el municipi amb l'esdeveniment reportat presenta una alerta d'esllavissada correcta (moderada o alta). En les finestres de previsió, els municipis amb alerta es concentren al

sud de Catalunya, mentre que en l'alerta observada apareixen més municipis amb alerta al centre i al nord del territori.

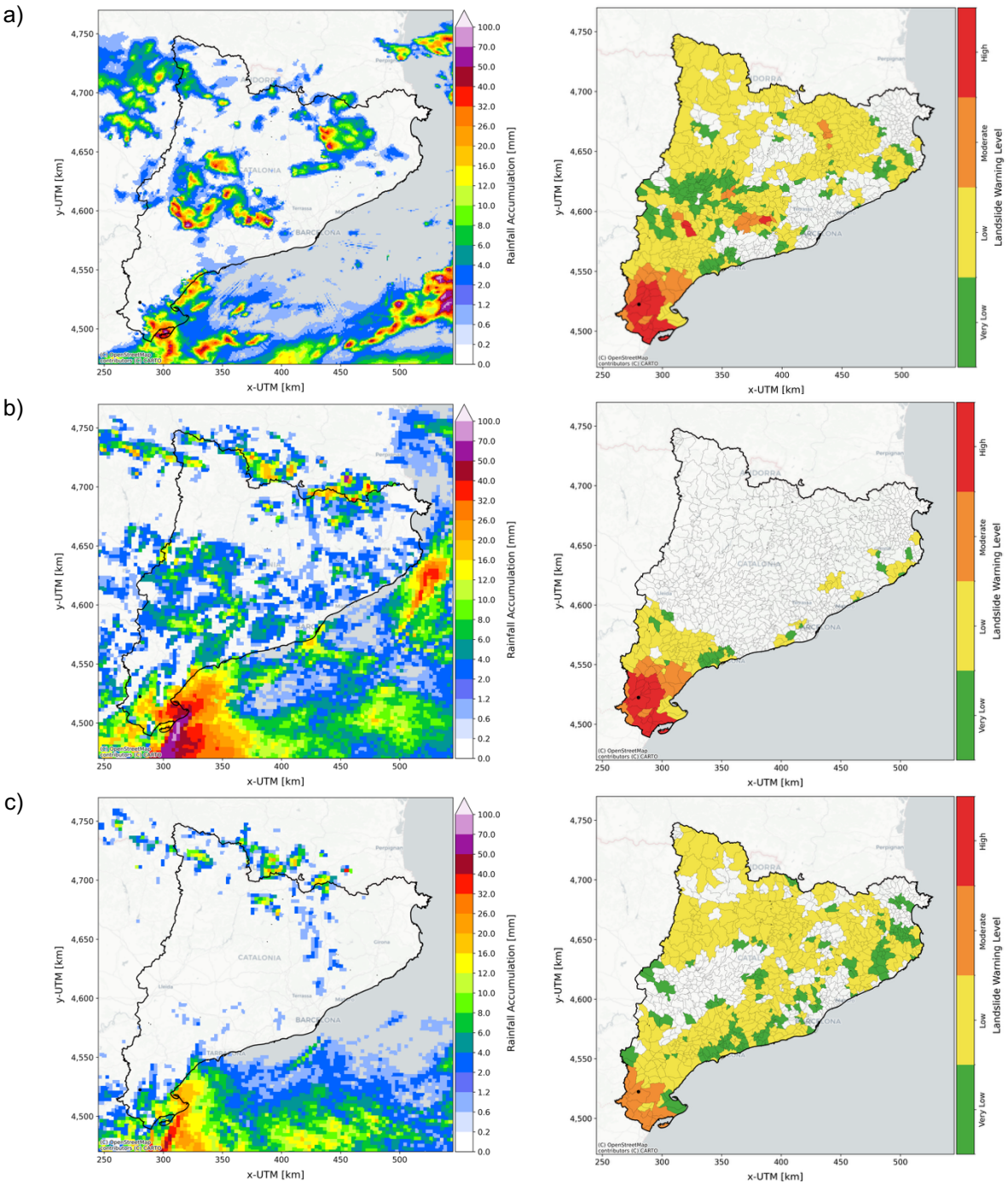


Figura 41. Comparació entre els episodis registrats i els nivells màxims d'alerta d'esllavissades corresponents a la precipitació mostrada a l'esquerra: a) observada 24 h–0 h, b) prevista 0 h–24 h, c) prevista 24 h–48 h; l'alerta observada mostra els episodis reportats com a punts.

6 Conclusió

Aquest informe presenta les millores aplicades al sistema d'alerta d'esllavissades de Catalunya que s'ha operat en temps real en el marc d'aquest projecte, gràcies a la col·laboració entre la UPC i l'ICGC:

- Incorporació de les previsions de precipitació de models de predicció meteorològica.
- Millores del sistema informàtic de càlcul de les alertes d'esllavissada: el sistema s'ha transformat en una llibreria de python completament modular que permet aplicar l'algorisme de manera flexible, amb l'ús de:
    - Mapes de susceptibilitat a nivell de píxel (mapes ràster) i en subunitats territorials (subdivisió vectorial en polígons).
    - Llindars de pluja variables espacialment.
    - Aplicació de l'agregació territorial de les alertes amb múltiples criteris.
- Millora del sistema web de visualització de les alertes generades.
- Enviament de missatges automàtics amb les alertes generades pel sistema.

Així mateix, l'informe resumeix els resultats obtinguts durant el període de funcionament del sistema. En general, el sistema ha generat alertes durant els episodis de pluja més importants i que han provocat més esllavissades. Tanmateix, el percentatge de detecció dels municipis on es van registrar esllavissades a nivell municipal és relativament baix (en mitjana, un 22,6% amb una finestra de 24 hores i un 36,3% amb una finestra de 48 hores). Aquest resultat ens porta a proposar un seguiment exhaustiu de les condicions de pluja de cadascuna de les esllavissades produïdes durant un període prolongat per identificar els motius que fan que el sistema no sigui capaç d'identificar més de la meitat dels episodis ocorreguts durant el període d'estudi.

A més a més, un bon nombre de les esllavissades de l'inventari s'han produït en zones properes a la xarxa viària i/o properes als nuclis de població. Això fa que a mesura ens allunyem d'aquestes zones, l'exhaustivitat de l'inventari decreixi i que per tant se sobreestimi el número de falsos positius (degut a que no s'han inclòs a l'inventari o se'n desconegui la data exacta). D'aquesta manera, una manera d'analitzar l'efecte de la variable exhaustivitat de l'inventari és comparar els resultats obtinguts només en àrees on l'inventari és gairebé complet (a la xarxa viària i en zones urbanes) amb els resultats obtinguts sobre tot el domini d'anàlisi. Per fer-ho també podria ser recomanable analitzar la qualitat del mapa de susceptibilitat per fer aquesta aplicació, sobretot en les zones al voltant de la xarxa viària, per garantir que el mapa de susceptibilitat reflecteix els les característiques de pendent i de cobertura i usos del sòl dels talussos i terraplens.

Finalment, en el marc del projecte s'ha analitzat la possibilitat de dissenyar un nivell d'alerta a escala territorial per Catalunya. L'enfocament que s'ha seguit ha consistit en assignar el nivell d'alerta als episodis històrics en base a variables com:

- Nombre total d'esllavissades a Catalunya.
- Nombre de comarques afectades per esllavissades.
- Màxim nombre d'esllavissades en una comarca.
- Densitat màxima d'esllavissades (esllavissades/100 km^2).
- Acumulació de pluja dels últims 5 dies.
- Nombre d'esllavissades dels últims 5 dies.

En desenvolupaments futurs s'establiran els llindars de les variables escollides per caracteritzar el nivell d'alerta territorial sobre els dies amb esllavissades de l'inventari

històric de l'ICGC, i adaptar el mètode per estendre la seva aplicació sobre els resultats del sistema d'alerta d'esllavissades.

Referències

Berenguer, M., D. Sempere-Torres, and M. Hürlimann, 2015: Debris-flow forecasting at regional scale by combining susceptibility mapping and radar rainfall, **Natural Hazards and Earth System Sciences**, 15, 587-602.

Berenguer, M., M. Hürlimann, A. Berruezo, V. González, L.A. Tapia, 2023: Implementació d'un sistema d'avís d'esllavissades en temps real – Informe final. ICGC. 23 pp.

Calvello M., Piciullo L. (2016) Assessing the performance of regional landslide early warning models: the EDuMaP method. **Natural Hazards**, 16, 103–122.

ICGC, 2021: Guia per l'elaboració d'Estudis d'Identificació de Riscos Geològics per a urbanisme (EIRG). AP-0001/21, 71 pp.

Palau, R. M., M. Hürlimann, M. Berenguer, D. Sempere-Torres, 2020: Influence of the mapping unit for regional Landslide Early Warning Systems. Comparison between pixels and polygons in Catalonia (NE Spain). **Landslides**, 17, 2067-2083.

Palau, R.M., M. Berenguer, M. Hürlimann, D. Sempere-Torres, 2022: Evaluation of a regional-scale landslide early warning system during the January 2020 Gloria storm in Catalonia (NE Spain). **Landslides**, 19, 1599–1616, doi: 10.1007/s10346-022-01854-2.

Velasco-Forero, C., D. Sempere-Torres, E. Cassiraga, J.J. Gómez-Hernández, 2009: A non-parametric automatic blending methodology to estimate rainfall fields from rain gauge and radar data. **Advances in Water Resources**, 32, 986-1002.