

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

*CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA
PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO*

TESI DI LAUREA

In

TELERILEVAMENTO E GIS M

**TELERILEVAMENTO SATELLITARE NELLA GESTIONE
DELLE EMERGENZE DA CATASTROFI NATURALI:
L'ALLUVIONE TRA L'ENZA E IL PARMA DEL DICEMBRE 2017**

CANDIDATO
Francesca Trevisiol

RELATORE:
Chiar.mo Prof. Gabriele Bitelli

CORRELATORI
Dott. Ing. Francesca Franci
Dott. Francesco Immordino

Anno Accademico 2017/18
Sessione I

*«A meno che uno come te non ci tenga molto,
niente andrà meglio o sarà risolto»*

Dr Seuss

INDICE

ABSTRACT

INTRODUZIONE.....	1
CAPITOLO 1: EUROPA E CATASTROFI NATURALI.....	3
1.1 INQUADRAMENTO DELLE CATASTROFI NATURALI.....	3
1.2 LA POSIZIONE DELL'UNIONE EUROPEA.....	6
CAPITOLO 2: IL RISCHIO DI CATASTROFI NATURALI.....	9
2.1 CONCETTO DI RISCHIO	9
2.2 ELEMENTI CHIAVE DELLA VALUTAZIONE DEL RISCHIO.....	12
2.3 IL CICLO DELLA GESTIONE DELLE CATASTROFI	14
2.4 CATASTROFI DA ALLUVIONI.....	16
2.4.1 IL RISCHIO ALLUVIONE.....	16
2.4.2 INQUADRAMENTO NORMATIVO	18
CAPITOLO 3: IL TELERILEVAMENTO NELLA GESTIONE DELLE CATASTROFI NATURALI.....	21
3.1 TELERILEVAMENTO NEL CICLO DI GESTIONE DELLE CATASTROFI.....	21
3.2 PROGRAMMA COPERNICUS	25
3.2.1 COMPONENTE SERVIZI.....	27
3.2.2 SERVIZIO DI GESTIONE DELLE EMERGENZE.....	28
3.2.3 COMPONENTE SPAZIALE	30
CAPITOLO 4: IL CASO DI STUDIO.....	37
4.1 DESCRIZIONE DELL'EVENTO	38
4.1.1 PARMA	41
4.1.2 ENZA.....	42

4.2 MAPPATURA IN FASE EMERGENZA.....	45
4.2.1 PRE-PROCESSAMENTO	47
4.2.2 ANALISI MULTITEMPORALE.....	49
4.2.3 CONFRONTO CON PRODOTTO COPERNICUS	56
4.3 INTEGRAZIONE DATO OTTICO.....	65
4.4 MONITORAGGIO	72
4.5 CRITICITÀ : RADAR E COPERTURA DEL SUOLO.....	80
4.6 RISCONTRI DA SOPRALLUOGO	83
CONCLUSIONI.....	91
BIBLIOGRAFIA	93

ABSTRACT

Le alluvioni sono tra le principali catastrofi che gli stati europei hanno dovuto affrontare negli ultimi anni. Il numero di eventi alluvionali in Europa è più che duplicato dal 1980 ad oggi e si prevede che nei prossimi anni, a causa del cambiamento climatico, tali calamità saranno sempre più frequenti e di maggiore impatto.

In questo contesto, le tecniche di osservazione della Terra sono diventate strumenti essenziali per la gestione di questo tipo di rischio, sia nella fase di mappatura dei danni a seguito degli eventi calamitosi che nelle fasi precedenti e successive di mitigazione e ripristino. Il telerilevamento satellitare consente infatti l'individuazione delle aree allagate e fornisce preziose informazioni sull'intensità, sull'evoluzione degli allagamenti e sugli eventuali danni ad argini o opera di difesa; le immagini SAR e le immagini ottiche costituiscono dunque il mezzo più efficiente e rapido per la raccolta dei dati utili ad analisi in pre- e post-evento.

Il programma di osservazione della Terra "Copernicus", gestito dalla Commissione Europea, è stato concepito per fornire informazioni accurate, aggiornate e facilmente accessibili al fine di una corretta gestione dell'ambiente e di situazioni di emergenza di origine naturale o antropica. I satelliti della missione Sentinel sono stati creati per raggiungere gli obiettivi del programma fornendo immagini multispettrali e radar di alta qualità e liberamente scaricabili.

Il presente elaborato di tesi presenta un'analisi dell'evento alluvionale che ha colpito la regione Emilia-Romagna nel dicembre 2017. Tra il 10 e l'11 dicembre, piogge eccezionali hanno causato il significativo innalzamento dei livelli idrometrici dei principali affluenti del Po e del Reno; in alcune sezioni di Parma, Enza e Secchia si sono superati i massimi storici. Lungo il fiume Enza, l'onda di piena ha danneggiato in tre punti l'argine provocando l'esonazione nella frazione di Lentigione (RE), coinvolgendo l'abitato e la campagna limitrofa. Alcune tracimazioni del Parma sono state registrate nella cittadina di Colorno (PR).

L'obiettivo dello studio è la delineazione degli allagamenti causati dagli eventi eccezionali sopra descritti, attraverso l'utilizzo dei dati Sentinel. Sono state analizzate sia immagini radar della missione Sentinel-1, sia immagini multispettrali della missione

Sentinel-2, sia per mappare l'area colpita durante l'evento che per monitorare gli effetti del disastro nei giorni e mesi successivi all'evento.

INTRODUZIONE

Negli ultimi trent'anni è stato registrato un forte aumento delle catastrofi naturali in Europa. Gli eventi calamitosi più frequenti sono quelli di origine idrologica e meteorologica, primi fra tutti le alluvioni. L'Unione Europea ha una profonda consapevolezza a riguardo [1]. Riconosce non solo che i disastri naturali continueranno ad avvenire ma che a causa del cambiamento climatico saranno sempre più frequenti e di maggiore impatto. Percepisce l'urgenza di individuare soluzioni concrete per affrontare questi disastri in un contesto di cooperazione e solidarietà tra stati membri. Nel 2013, per realizzare tali obiettivi, la Commissione Europea ha istituito un meccanismo comunitario di protezione civile al fine di migliorare l'efficacia dei sistemi di prevenzione, preparazione e risposta alle catastrofi naturali e provocate dall'uomo.

Vengono infatti abitualmente adottate oggi politiche di gestione delle catastrofi cicliche, volte a un continuo miglioramento, in cui lo sviluppo attento di ogni fase della gestione del rischio è indispensabile per avere risultati efficaci nelle altre. In passato la concentrazione si era focalizzata solo sulla fase di risposta; la consapevolezza di dover convivere sempre più di frequente con eventi calamitosi ha imposto di sviluppare nuove prospettive. Attualmente viene data particolare attenzione a tutte le pratiche di prevenzione e riduzione del rischio: l'obiettivo finale di queste attività è quello di costruire un'Europa resiliente, capace dunque di affrontare e reagire alle catastrofi, riducendo al minimo la propria vulnerabilità. Buone politiche di gestione devono partire da un'approfondita conoscenza e valutazione del rischio e di tutte le sue componenti (vulnerabilità, esposizione, pericolosità e capacità); l'Unione Europea si fa portavoce di tale messaggio e si impegna a diffondere le migliori pratiche oltre che supportare e trarre tesoro dai più recenti sviluppi scientifici e tecnologici.

All'interno della ricerca scientifica, negli ultimi vent'anni l'Unione Europea ha molto investito sul programma di osservazione della Terra denominato Copernicus (in precedenza GMES). Attraverso la visione del nostro pianeta offerta da sensori montati su piattaforme satellitari, è infatti possibile un monitoraggio del territorio dettagliato e costantemente aggiornato. Il programma Copernicus è stato sviluppato proprio per soddisfare le esigenze degli utenti finali (tecnici e *decision maker*) riguardo il monitoraggio ambientale e la protezione civile. Il programma è stato sviluppato mediante un complesso sistema di servizi e prodotti con cui l'Unione Europea può

garantire in questo ambito la propria indipendenza. Copernicus è costituito da tre componenti: spazio, servizi e *in situ*. Ciascuna componente è a servizio delle altre e nasce appositamente per completarle. Nel dettaglio, per la componente spaziale l'Agencia Spaziale Europea (ESA) ha sviluppato la missione di satelliti Sentinel, ideati appositamente per soddisfare gli obiettivi e le necessità dei servizi offerti. Le mappe tematiche che si possono ottenere attraverso l'analisi di immagini satellitari danno un contributo essenziale all'interno di tutto il ciclo di gestione del rischio. I prodotti di *rapid mapping* del servizio di gestione delle emergenze di Copernicus offrono in particolare informazioni indispensabili ai primi soccorritori in caso di catastrofe.

In questo contesto si inserisce il presente lavoro di tesi in cui si è voluta analizzare l'alluvione che ha colpito la regione Emilia Romagna tra l'11 e il 12 dicembre 2017 in un'ottica di valutazione dei danni e mitigazione del rischio. Per le alluvioni la Commissione Europea ha previsto una direttiva specifica e individua come principali strumenti di valutazione e gestione del rischio le mappe del rischio e della pericolosità. Tali prodotti devono partire dall'analisi degli eventi passati; è fondamentale quindi possedere dei *database* il più possibile aggiornati con delineazione delle estensioni e informazioni dettagliate sulle alluvioni passate. Nel presente elaborato di tesi, sviluppato in collaborazione con ENEA, si sono volute testare le potenzialità dei dati telerilevati (immagini ottiche e radar) distribuiti dalle missioni Sentinel, con l'obiettivo di produrre mappe tematiche dell'estensione degli allagamenti subito dopo l'evento. Inoltre, l'analisi multitemporale effettuata sulle immagini Sentinel ha permesso di mappare il ritiro delle acque esondate, utile al monitoraggio della fase di recupero delle aree colpite. Si tratta di un tema di grande importanza, e tuttavia spesso sottovalutato, per le evidenti ricadute che una calamità può avere nei riguardi dell'economia locale, dei costi per la collettività, degli strumenti per la tutela dal rischio in termini assicurativi; in particolare, è di grande importanza valutare l'impatto del disastro sulla produzione agricola e seguire l'evoluzione post-evento per apprezzare il ripristino di condizioni idonee all'attività stessa.

CAPITOLO 1: EUROPA E CATASTROFI NATURALI

1.1 INQUADRAMENTO DELLE CATASTROFI NATURALI

L'Université Catholique de Louvain di Bruxelles, nel database EM-DAT (The Emergency Events Database), raccoglie i principali dati relativi a disastri di origine naturale e antropica avvenuti nel mondo dal 1900 ad oggi. In particolare, all'interno di tale database sono registrati come disastri tutti gli eventi che corrispondono ad almeno uno dei seguenti criteri:

- almeno dieci decessi causati dall'evento,
- almeno cento persone coinvolte,
- la dichiarazione di stato di emergenza,
- la richiesta di assistenza internazionale.

Alla luce di questi criteri di valutazione, di seguito si riportano i dati disponibili sul sito del database sopracitato [2] relativi agli eventi calamitosi di origine naturale.

Secondo la classificazione EM-DAT (tabella 1), i vari tipi di disastri naturali, registrati dal 1900 ad oggi, sono raggruppati in quattro categorie: climatologici, meteorologici, idrologici e geofisici.

Gruppo	NATURALI			
Sottogruppo	meteorologici	idrologici	geofisici	climatologici
Tipo	-temperature estreme -tempesta -nebbia	-alluvioni -frane	-terremoto -attività vulcanica -movimento di masse	-siccità -incendi

Tabella 1. Classificazione dei disastri naturali di EM-DAT

In generale, come mostra il Grafico 1. 1, dopo gli anni settanta in Europa è stato registrato un aumento nel succedersi di disastri naturali. Nei primi decenni del novecento, infatti, sono state registrate una o due catastrofi all'anno, salvo qualche rara eccezione. Con l'inizio degli anni ottanta, invece, il numero totale di eventi calamitosi annuali non è mai sceso al di sotto della decina. Soffermando l'attenzione su tempi più recenti, dal 1960 ad oggi, e distinguendo la natura degli eventi in idrologici, geofisici, climatologici e meteorologici, è possibile fare due osservazioni principali.

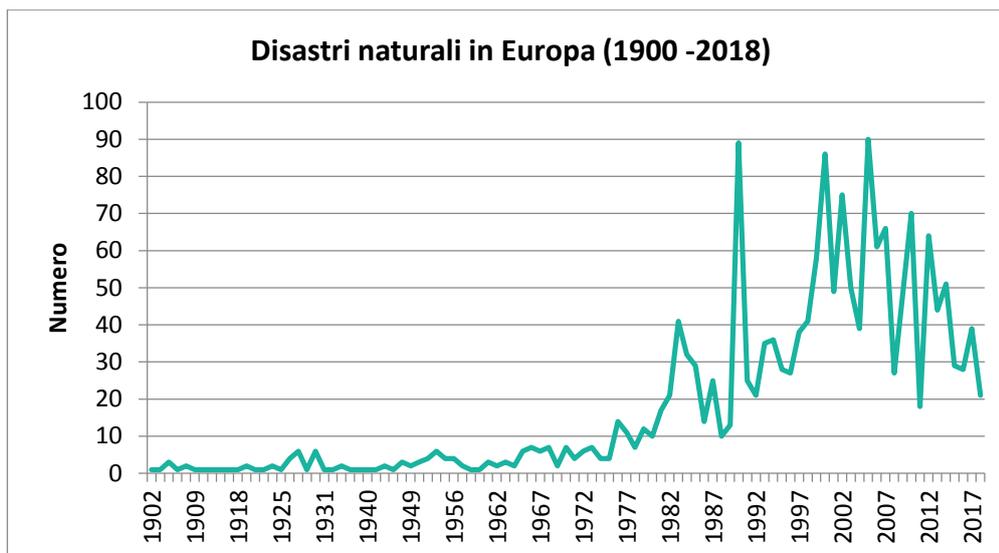


Grafico 1. 1 Totale dei disastri di origine naturale registrati dal 1900 ad oggi in Europa (Fonte EM-DAT)

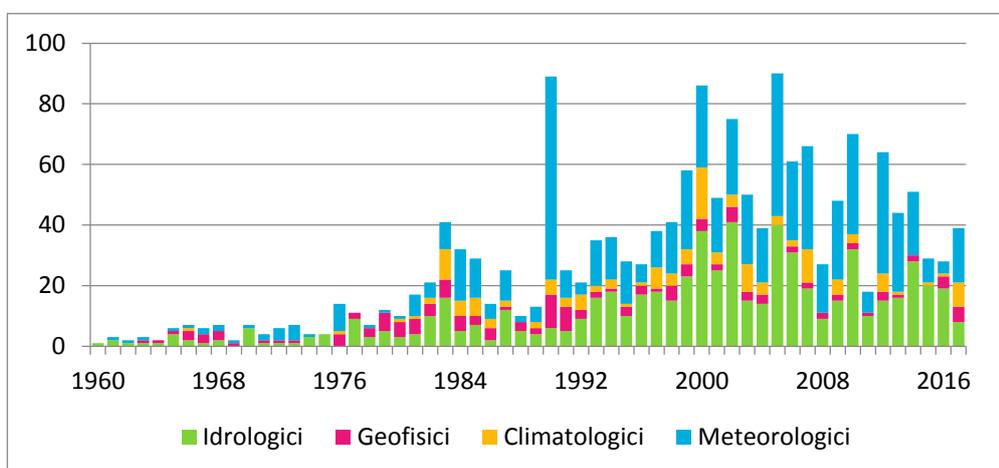


Grafico 1. 2 Disastri naturali in Europa dal 1960 ad oggi. Distinzione per sottogruppo (Fonte EM-DAT)

E' evidente come negli ultimi quarant'anni in Europa il numero di disastri naturali sia decisamente aumentato. Basti pensare che dal 1960 ad oggi si sono verificati in totale 1680 eventi calamitosi, di cui oltre il 65% è stato registrato negli ultimi 25 anni. Per quanto riguarda la natura degli eventi, i disastri del sottogruppo idrologico e meteorologico sono i più frequenti (82%), come dimostra il Grafico 1. 3(A). All'interno di tale categoria (Grafico 1. 3B) le catastrofi più frequenti sono alluvioni (42%) e tempeste (35%). Il territorio europeo è stato colpito dagli anni sessanta a oggi da 585 alluvioni e 481 tempeste.

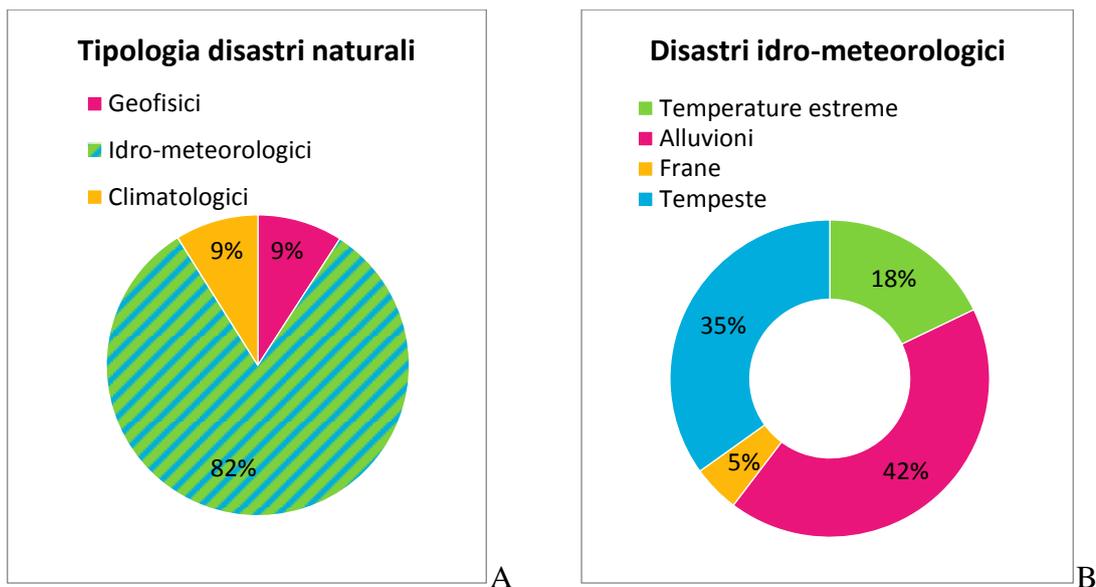


Grafico 1. 3 Disastri naturali in Europa dal 1960 ad oggi. Tipologia di disastri divisi per categoria (A). Tipologia di disastri della categoria idrologica e meteorologica (B)

L'andamento messo in risalto dai dati a livello europeo è del tutto simile a quello riscontrato sullo scenario italiano. Nello specifico, le calamità naturali che colpiscono in maniera più frequente e più grave il nostro Paese sono le alluvioni e i terremoti. Come evidenzia il Grafico 1. 4, in Italia dal 1900 ad oggi sono state registrate 47 alluvioni e 37 terremoti.

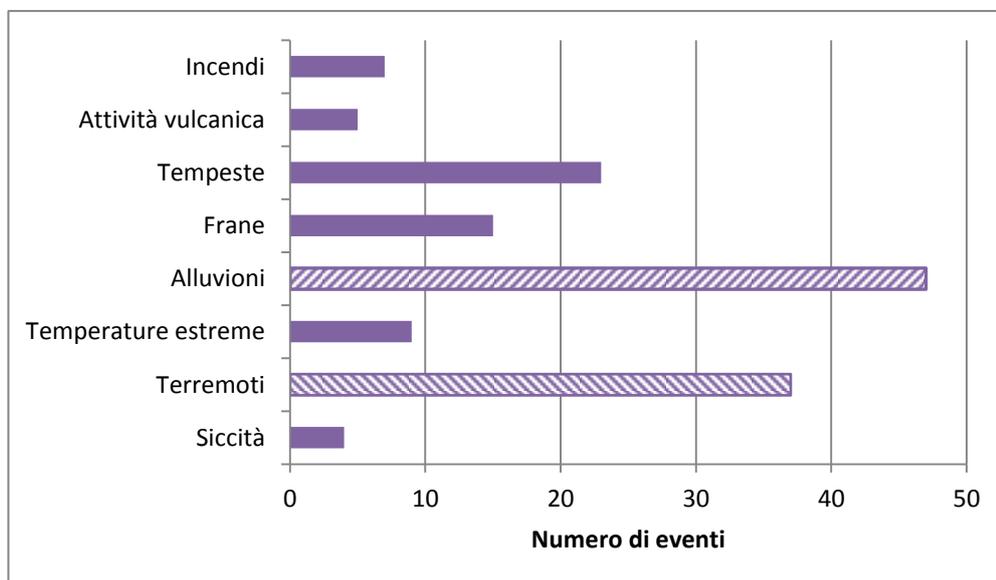


Grafico 1. 4 Numero di disastri naturali in Italia dal 1900 ad oggi (fonte EM-DAT)

1.2 LA POSIZIONE DELL'UNIONE EUROPEA

I dati sopracitati evidenziano come i disastri naturali costituiscano ormai una problematica che affligge costantemente i cittadini europei. Un'altra tendenza messa in luce riguarda la frequenza e la complessità sempre maggiore con cui si verificano questi eventi calamitosi che hanno effetti negativi in termini di danni alle persone (mortalità nei casi più drammatici), ai territori, all'ambiente e all'economia.

In un contesto comunitario di interconnessione dei mercati, quale quello europeo, in cui gli effetti drammatici delle catastrofi stanno aumentando col passare del tempo, è evidente che non si possa più ragionare limitandosi ai confini delle singole nazioni [3]. L'Unione Europea, infatti, riconosce come "urgente" la necessità di individuare strategie comuni di valutazione dei rischi, quali strumenti di prevenzione e sviluppo di piani di emergenza sia a livello nazionale che europeo. Dove, per prevenzione si intende l'impedire, ove possibile, che le catastrofi avvengano, e, ove ciò non fosse possibile, intervenire per ridurne al minimo le conseguenze [1]. Tali preoccupazioni, esposte più volte nei documenti ufficiali della Commissione Europea [1], [4], hanno portato alla creazione di un meccanismo unionale di protezione civile. L'esigenza di promuovere la solidarietà e facilitare il coordinamento delle azioni tra stati membri nel settore della protezione civile è nata d'altra parte dalla consapevolezza che il cambiamento climatico porterà in futuro a un aumento del numero e della gravità delle catastrofi [5].

Nel 2009 la Commissione Europea, con la comunicazione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato economico e sociale Europeo e al Comitato delle regioni, ha iniziato a porre l'attenzione sulla necessità di adottare sistemi di prevenzione più efficaci a livello comunitario [1]. La CE si è impegnata nella diffusione delle conoscenze per sviluppare le politiche attraverso le seguenti iniziative: l'istituzione di un inventario delle informazioni sulle catastrofi; la diffusione delle migliori pratiche tra gli stati membri in cui i più virtuosi diffondono e condividono le loro buone pratiche; l'elaborazione di linee guida per la mappatura del rischio/pericolo [1].

Le indicazioni poste dalla Commissione si concretizzano nel 2013 quando il Parlamento Europeo istituisce un meccanismo Unionale [5] "tendente a rafforzare la cooperazione tra l'Unione e i diversi Stati membri e a facilitare il coordinamento nel settore della protezione civile al fine di migliorare l'efficacia dei sistemi di prevenzione, preparazione e risposta alle catastrofi naturali e provocate dall'uomo" (Art.1). La cooperazione nel settore della protezione civile comprende sia azioni di prevenzione e preparazione all'interno dell'Unione, sia le azioni di assistenza in risposta alle

conseguenze negative immediate di una catastrofe (Art.2). Tale meccanismo “sostiene, integra e facilita il coordinamento dell'azione degli Stati membri per perseguire i seguenti obiettivi specifici comuni:

- a) conseguire un livello elevato di protezione contro le catastrofi prevenendone o riducendone gli effetti potenziali, promuovendo una cultura di prevenzione e migliorando la cooperazione tra la protezione civile e gli altri servizi competenti;
- b) migliorare la preparazione a livello di Stato membro e dell'Unione in risposta alle catastrofi;
- c) facilitare una risposta rapida e efficace in caso di catastrofi in atto o imminenti; e
- d) rafforzare la consapevolezza e la preparazione dei cittadini nei confronti delle catastrofi.” (Art.3)

La prevenzione è di primaria importanza all'interno del piano d'azione “per favorire un approccio coerente ed efficace in materia di prevenzione e preparazione alle catastrofi” (Art. 6), e prevede obblighi sia per la Commissione che per gli stati membri. In particolare, la Commissione Europea interviene per:

- Migliorare la conoscenza sui rischi
- Promuovere la valutazione e mappatura dei rischi
- Diffondere informazioni e migliori prassi

Gli stati membri:

- Effettuano la valutazione dei rischi, riportando i risultati alla commissione Europea
- Elaborano la pianificazione della gestione del rischio

La Commissione Europea si impegna anche nell'ambito della preparazione attraverso iniziative quali: l'istituzione del Centro di coordinamento della risposta alle emergenze (ERCC) (capacità operativa h.24); pianificazione delle operazioni, sviluppo di capacità europea di risposta emergenziale; formazione, esercitazioni, e divulgazione delle conoscenze. Infine si impegna a fornire fondi e attrezzature necessarie in fase di risposta qualora avvenga una catastrofe in territorio europeo.

E' evidente come a livello europeo si percepisca sempre più l'urgenza di trovare soluzioni per fronteggiare le future emergenze in un clima di cooperazione e collaborazione tra stati membri e allo stesso tempo tra vari enti creati *ad hoc* dall'unione stessa (ad esempio programma europeo di osservazione della Terra Copernicus, *Disaster Risk Management Knowledge Centre (DRMKC)*). Le catastrofi naturali dagli ultimi dieci anni sono percepite come una delle principali sfide da affrontare per la

sicurezza civile ed economica, anche in relazione al cambiamento climatico, e si riconosce la necessità di lavorare con grande impegno al fine di rafforzare i meccanismi di resilienza attraverso lo sviluppo di adeguate soluzioni scientifiche e tecnologiche.

CAPITOLO 2: IL RISCHIO DI CATASTROFI NATURALI

2.1 CONCETTO DI RISCHIO

Nel corso degli anni sono state date varie definizioni di rischio. Di seguito si riportano alcuni esempi:

- “Rischio è la probabilità che un particolare evento avverso accada in un definito intervallo di tempo”(United Kingdom’s Royal Society, 1992) [6];
- “Rischio è la combinazione delle conseguenze dovute a un evento (pericolo) e la relativa probabilità di accadimento.” (ISO Guide 73) [7];
- “Rischio è la potenziale perdita di vite, lesioni, distruzione e danneggiamento di beni che potrebbero affliggere un sistema, società o comunità in un determinato periodo di tempo, determinati in modo probabilistico in funzione di pericolo, esposizione, vulnerabilità e capacità " (UNISDR, 2017) [8]

E’ evidente come nel tempo il concetto di rischio sia andato incontro a una continua evoluzione (Figura 2.1). La definizione data nel 1992 teneva in considerazione solo l’aspetto della probabilità di accadimento, successivamente sono state introdotte anche le conseguenze negative (impatto) dovute all’evento. Col passare del tempo, infine, si è sviluppato ulteriormente anche il concetto di impatto: le conseguenze negative di un evento calamitoso dipendono quindi da ciò che è esposto e alla sulla vulnerabilità, che è funzione delle misure preventive e preparatorie che sono state adottate per ridurre quel rischio associato [4].

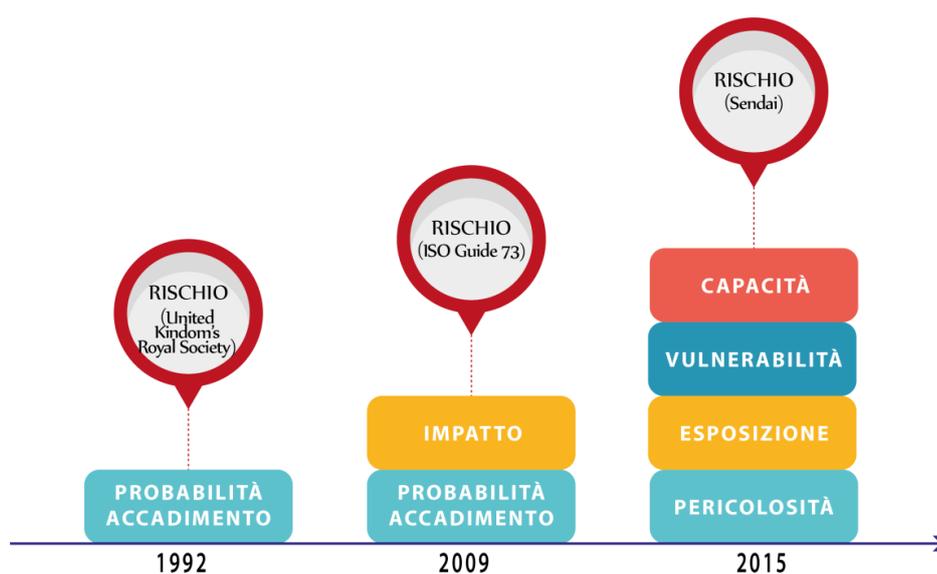


Figura 2. 1. Evoluzione del concetto di rischio nel tempo

Questi termini compaiono nell'ultima definizione proposta dall'*United Nations International Strategy for Disaster Reduction* (UNISDR) in base alle linee guida della conferenza internazionale per la riduzione del rischio catastrofi di Sendai (2015), in cui vengono così definiti [8]:

- Catastrofe (*Disaster*): una grave interruzione del funzionamento delle attività di una comunità o società a qualsiasi scala a causa di un evento pericoloso che interagisce con condizioni di esposizione, vulnerabilità e capacità di risposta, incidendo su uno o più dei seguenti ambiti: perdite o danneggiamenti a persone, materiali, economici e ambientali.
- Pericolo (*Hazard*): un processo, fenomeno o attività umana che può causare perdite di vite, danni o altri impatti sulla salute, danneggiamenti di beni, interruzioni sociali ed economiche o degrado ambientale.
- Evento pericoloso (*Hazardous event*): il manifestarsi di un pericolo in un determinato luogo e in un preciso lasso di tempo.
- Esposizione (*Exposure*): la condizione di persone, infrastrutture, abitazioni, capacità produttiva e altre attività umane situate in prossimità delle zone di pericolo.
- Vulnerabilità (*Vulnerability*): la condizione determinata da fattori o processi fisici, sociali, economici e ambientali che aumentano la suscettibilità individuale e comunitaria all'impatto derivante da un pericolo;
- Capacità (*Capacity*): la combinazione di forze, attributi e risorse disponibili di un'organizzazione, comunità o società per gestire e ridurre il rischio di disastro e rafforzare la resilienza (spesso considerate parte della vulnerabilità).

Nel presente lavoro si fa riferimento al rischio di catastrofi naturali. Come detto sopra, una catastrofe naturale nasce nel momento in cui un evento pericoloso si verifica in un contesto vulnerabile [9] (Figura 2. 2). Ad esempio, se avviene un terremoto in un'area disabitata, nessuno risente degli effetti di quell'evento, di conseguenza non si può parlare di catastrofe naturale. Se invece lo stesso terremoto avviene in un'area abitata il suo effetto sarà tanto maggiore quanto maggiore sarà la vulnerabilità della zona colpita.

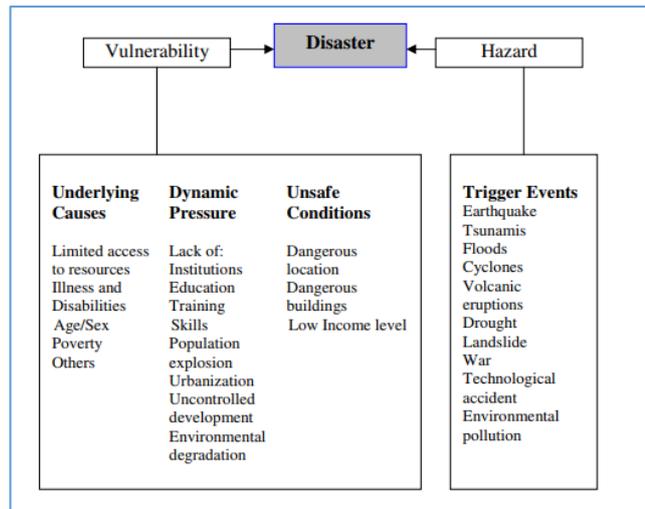


Figura 2. 2 Nascita di una catastrofe [9]

Durante la sopracitata conferenza sono state fissate le basi in materia di riduzione del rischio per i prossimi quindici anni. In particolare, nel *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030* sono state individuate le seguenti priorità (Figura 2. 3). Priorità definite dal Sendai Framework for Disaster Risk Reduction (2015-2030) Figura 2. 3):

1. Comprendere il rischio catastrofe
2. Rafforzare la gestione del rischio
3. Investire nella riduzione del rischio in favore della resilienza
4. Sviluppare la preparazione alle catastrofi per avere un'efficace risposta e per operare con il concetto di «*Build Back Better*» durante la ripresa, riabilitazione e ricostruzione.

Il rischio è di difficile determinazione ed include al suo interno non solo elementi scientifici ma anche soggettivi. Come evidenzia la prima priorità di Sendai, comprendere profondamente il rischio catastrofe e analizzarne ogni sua componente è il primo passaggio necessario per ottenerne una soddisfacente riduzione. Il rischio catastrofi è un concetto dinamico che varia nel tempo in base ai cambiamenti della natura dei pericoli, dell'esposizione e vulnerabilità [6].

E' altresì evidente come in una realtà mutevole come la nostra, anche a causa delle conseguenze negative relative al cambiamento climatico, ci sia la necessità di



Figura 2. 3. Priorità definite dal Sendai Framework for Disaster Risk Reduction (2015-2030)

aggiornare periodicamente le proprie condizioni. Allo stato attuale il rischio spesso non è capito fino in fondo e di frequente vengono commessi errori di sottostima. Proprio per questo, attualmente ci troviamo nella condizione riassunta nello schema in Figura 2. 4, in cui una delle principali sfide del presente è quella di creare un ponte tra conoscenze scientifiche e politiche di gestione: attuare le migliori politiche di gestione basandosi sulle nuove evidenze scientifiche in un ambiente collaborativo tra le varie parti.



Figura 2. 4. The "Bridge concept" (fonte: DRMKC, 2017)

All'interno di questo panorama, è necessario avere strumenti che permettano una quantificazione di tutte le componenti del rischio. Tale strumento è individuato nella stesura di una valutazione del rischio, necessario per identificare ciò a cui si è effettivamente esposti.

2.2 ELEMENTI CHIAVE DELLA VALUTAZIONE DEL RISCHIO

Per raggiungere l'obiettivo sopra citato è necessario elaborare uno schema che permetta di determinare i più appropriati piani di gestione. Una valutazione del rischio comprende le seguenti procedure:

1. Identificare i pericoli che possono colpire il sistema che si sta analizzando.
In questa fase è importante prendere in considerazione gli eventi verificatisi in passato;
2. Valutare la probabilità che il pericolo si verifichi;
3. Determinare l'esposizione al pericolo, cioè chi o che cosa sia a rischio;
4. Stimare la vulnerabilità a quel pericolo per calcolare l'impatto fisico o finanziario su tale entità esposta nel caso in cui si verifichi l'evento.
Questo può essere ottenuto da una revisione di eventi storici, approcci ingegneristici e / o opinioni di esperti e può includere la capacità del sistema di rispondere dopo l'evento in modo da mitigarne la perdita;

5. Stimare le potenziali conseguenze economiche e sociali di eventi di diverse magnitudini

Esistono modelli matematici, fisici, statistici ed economici per modellare ciascuna delle componenti del rischio, e potere fornire una quantificazione dello stesso. All'interno di questa ricerca non ci addentreremo nei dettagli dei vari metodi esistenti per la valutazione del rischio, ci limiteremo, invece, a dare una breve spiegazione delle principali componenti, per poi concentrare l'attenzione sul contributo che il telerilevamento può dare all'interno delle varie fasi relative alla gestione del rischio.

Il rischio di catastrofe viene valutato tenendo in considerazione le tre principali componenti:

- Esposizione
- Vulnerabilità
- Capacità

Riuscire a determinare con precisione l'esposizione a un rischio è di fondamentale importanza per prendere poi le decisioni e intraprendere azioni per ridurre il rischio (mitigazione e prevenzione). L'esposizione a un evento estremo è un concetto dinamico. Flussi di persone e cambiamenti demografici, sviluppo economico e cambiamenti strutturali della società si trasmettono in maniera consequenziale sull'esposizione, che risulta pertanto un parametro molto mutevole in funzione di tempo e spazio. Per valutare l'esposizione sono possibili vari approcci e modelli, che si basano su due tipologie di informazioni (edificato, strade, servizi pubblici, popolazione):

- Informazioni prese sul campo (censimenti, sondaggi)
- Informazioni da immagini telerilevate

E' spesso impossibile avere l'esposizione esatta in un dato luogo e tempo, ma bisogna cercare di implementare le due tipologie di dati per rimanere il più possibile aggiornati.

Capacità sono tutte le competenze e le risorse disponibili di persone, organizzazioni e sistemi, per gestire condizioni avverse, rischi o disastri. Essa può includere infrastrutture, istituzioni, conoscenze, abilità umane e attributi collettivi quali relazioni sociali, *leadership* e *management*. La capacità di fronteggiare tali eventi richiede una continua consapevolezza, risorse e una buona gestione, sia in tempi normali che in caso di disastri o condizioni avverse. Maggiore è la capacità di una società, minore sarà il rischio di calamità per la stessa.

Per avere una buona valutazione del rischio e poter intraprendere politiche efficaci per ridurre i rischi associati a un certo pericolo è necessario partire da una profonda

conoscenza delle vulnerabilità, ovvero le mancanze che rendono, totalmente o in parte, incapaci di affrontare il pericolo senza danni o perdite. La vulnerabilità è strettamente legata alla capacità di risposta e di adattarsi del sistema a un evento. Questi concetti trovano una relazione all'interno della definizione di resilienza. Quest'ultima può identificarsi con l'abilità di assorbire fattori di stress, di affrontare i cambiamenti e riprendersi dagli *shock* [6]. La resilienza di una società è determinata dal grado in cui essa è in grado di organizzarsi per aumentare la sua capacità di risposta e di apprendere dai disastri del passato (quindi dalle vulnerabilità) per una migliore protezione futura e per migliorare le misure di riduzione del rischio [10].

2.3 IL CICLO DELLA GESTIONE DELLE CATASTROFI

La gestione del rischio catastrofi, secondo la definizione adottata da Sendai, è l'applicazione delle politiche e strategie di riduzione del rischio per prevenire nuovi rischi di disastro, ridurre i rischi di disastro già esistenti e gestire il rischio residuo, contribuendo a rafforzare la resilienza e la riduzione delle perdite dovute a catastrofi [11].

L'insieme delle decisioni e azioni che possono essere intraprese riguardo al rischio, prima, durante o dopo una catastrofe con l'obiettivo di evitarla, ridurre il suo impatto o ristabilirsi dalle perdite subite può essere schematizzato in un ciclo (Figura 2. 5), chiamato ciclo di gestione delle catastrofi.

Il ciclo di gestione delle catastrofi si sviluppa su tre periodi:

- **PRE-CATASTROFE:** studio, valutazioni e azioni volte a ridurre l'impatto che potrebbe avere un certo pericolo, attraverso attività di mitigazione e la preparazione.
- **DURANTE LA CATASTROFE:** azioni di risposta volte a soddisfare i bisogni delle vittime e alleviare il più possibile le sofferenze della popolazione.
- **POST-CATASTROFE:** tutte le iniziative attuate in seguito all'evento calamitoso con lo scopo di ristabilire le normalità nel minor tempo possibile (riabilitazione).

La mitigazione comprende tutte le azioni volte a ridurre l'impatto di disastri futuri. Queste di solito si dividono in misure strutturali (le soluzioni ingegneristiche ai problemi di sicurezza) e misure non strutturali, che comprendono la pianificazione dell'uso del territorio, l'assicurazione, la legislazione e la pianificazione dell'evacuazione.

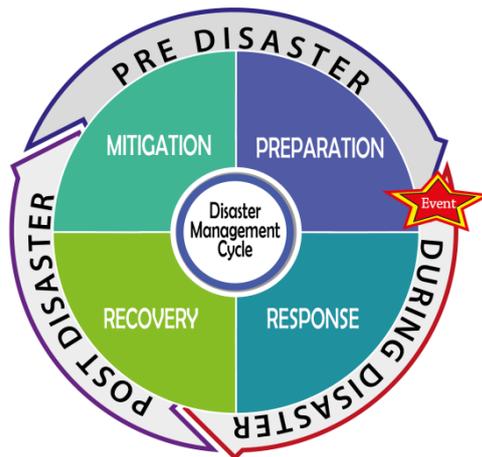


Figura 2. 5. Il ciclo di gestione delle catastrofi

Il termine preparazione si riferisce alle azioni intraprese per ridurre l'impatto dei disastri quando sono previsti o imminenti. Con le azioni di preparazione si deve gestire il rischio residuo che non è stato possibile eliminare con le misure preventive precedentemente adottate. Includono misure di sicurezza, come l'evacuazione di popolazioni vulnerabili e il mettere i sacchi di sabbia a protezione degli argini fluviali mentre le acque di inondazione iniziano a salire (quindi la pianificazione dell'evacuazione è una misura di mitigazione, mentre la sua esecuzione è una forma di preparazione). La preparazione comprende l'educazione pubblica sui pericoli e sulle conseguenze che potrebbero aversi, allenamento e formazione continua degli operatori dell'emergenza, installazione di sistemi di monitoraggio e di allarme di pericolo, verifica dei piani di risposta. Le attività di preparazione consistono nell'educazione pubblica, addestramento all'emergenza, simulazioni, pianificazione dell'evacuazione, monitoraggio dell'evoluzione del pericolo e sistemi di allertamento.

La risposta si riferisce alle azioni di emergenza prese durante l'impatto di un disastro e le conseguenze a breve termine. L'enfasi principale è sul risparmio e sulla salvaguardia delle vite umane. Le vittime vengono salvate e vengono soddisfatte le necessità immediate dei sopravvissuti.

Il recupero è il processo di riparazione dei danni, ripristino dei servizi e ricostruzione delle strutture dopo il disastro: questo, infatti, è un lungo processo, che può durare anche decine di anni nel caso delle catastrofi più rilevanti [12]

In passato, la fase a cui si era dato maggior risalto era quella di risposta. Negli ultimi anni l'attenzione si è spostata nell'insieme di azioni e decisioni prese per prevenire e prepararsi a un evento. In ogni caso, le fasi di questo ciclo sono strettamente collegate

tra loro e ciascuna ricopre un ruolo fondamentale per migliorare le performance delle altre.

Quanto emerso dalla valutazione del rischio, che porta alle decisioni in materia di riduzione dello stesso, influenzerà il livello di pianificazione, di preparazione e di risposta che sarà richiesto. La prontezza nella risposta delle comunità colpite, oltre che dei soccorritori, può determinare se un evento possa o meno trasformarsi in un disastro [13]. L'efficacia della fase di risposta avrà un ruolo significativo e sarà determinante nel modo in cui le comunità colpite si riprenderanno. Le lezioni della fase di risposta possono essere incorporate nella pianificazione della riduzione del rischio e della rapidità di intervento. La fase di recupero, infine, può includere al suo interno misure di riduzione del rischio per aumentare la resilienza e ridurre la vulnerabilità.

Nella gestione ciclica delle catastrofi, infatti, il verificarsi di un evento calamitoso deve essere utilizzato per un'approfondita riflessione su quanto fatto e su ciò che è stato omesso. Le informazioni raccolte dovranno essere sfruttate come base di partenza per il nuovo ciclo, in un'ottica di continuo miglioramento, con l'obiettivo di avere perdite sempre inferiori a causa di disastri naturali che inevitabilmente continueranno a verificarsi.

2.4 CATASTROFI DA ALLUVIONI

L'alluvione è definita dall'art 2 della direttiva europea 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni come "l'allagamento temporaneo di aree che abitualmente non sono coperte d'acqua" [14]. Questo fenomeno naturale, come evidenziato dai dati EM-DAT, è l'evento calamitoso che si verifica in Europa più di frequente. È la catastrofe naturale che colpisce il maggior numero di persone per singolo evento, e causa gravi danni economici, sociali e ambientali.

Si tratta di un fenomeno naturale, con cui bisogna imparare a convivere, adottando strategie per ridurre al minimo il rischio associato.

2.4.1 IL RISCHIO ALLUVIONE

"Esiste un rischio di alluvione quando il sistema di drenaggio naturale o artificiale di un fiume non è in grado di assorbire il volume delle acque dovuto alle precipitazioni piovose o quando risultano inefficaci le opere di difesa" [15].

Le alluvioni, infatti, sono strettamente legate a condizioni meteoriche avverse: eventi di precipitazione estremi si traducono in portate fluviali che, raggiungendo livelli idrometrici superiori alle opere di difesa, ne provocano l'esondazione. Le precipitazioni,

quale causa principale del fenomeno, sono argomenti di studio per modelli di previsione, ma in quanto tali sono soggetti a grande incertezza e sicuramente non controllabili. Tuttavia la probabilità che un evento piovoso persistente si trasformi in alluvione è fortemente influenzata da azioni umane oltre che dal cambiamento climatico. L'uomo interviene sul territorio con l'urbanizzazione, il disboscamento della parte superiore dei bacini idrografici, l'alterazione del corso dei fiumi e l'eliminazione delle pianure alluvionali, pratiche di drenaggio errate e soprattutto l'edilizia in zone ad alto rischio di inondazione [15]. In questo modo si ha un aumento del rischio di alluvione sia perché aumenta l'esposizione a tale fenomeno, con un numero sempre maggiore di persone e beni nelle zone a rischio; sia perché le attività antropiche che impermeabilizzano il suolo fanno in modo che le precipitazioni si trasformino in deflusso superficiale immediato.

A questi fattori si deve aggiungere il ruolo che assume il cambiamento climatico nell'aumento di scala e frequenza di eventi meteorologici estremi che innescano fenomeni alluvionali.

Tutti questi fattori hanno aumentato il rischio di alluvioni in Europa, è evidente quindi che bisogna imparare a convivere con il fenomeno, pur con tutte le incognite relative a luogo e data in cui si manifesterà. Ciò che è possibile, e nostro dovere, fare è prepararsi: costruire la capacità di intervento, ridurre le vulnerabilità al fenomeno per aumentare la resilienza. È possibile attuare miglioramenti in tutto il ciclo di gestione con l'obiettivo di ridurre la frequenza e l'impatto causato delle alluvioni. In particolare elaborare programmi di gestione basati su [15]:

- **PREVENZIONE:** evitando di costruire abitazioni ed impianti industriali in zone già a rischio di inondazione; tenendo conto del rischio di inondazioni per l'edilizia futura e promuovendo una pianificazione adeguata del territorio e buone pratiche nel settore agricolo e forestale;
- **PROTEZIONE:** adottando misure, sia strutturali che non strutturali, per ridurre il verificarsi di inondazioni e/o il loro impatto in una specifica località;
- **PREPARAZIONE:** informando la popolazione sui rischi di inondazione e su cosa fare nel caso si verificano tali fenomeni;
- **REAZIONE ALLE EMERGENZE:** elaborando piani di intervento in caso di inondazione;

- **RECUPERO E INSEGNAMENTI TRATTI:** ritornando il più rapidamente possibile a condizioni normali e attenuando gli effetti sociali ed economici sulle popolazioni colpite.

2.4.2 *INQUADRAMENTO NORMATIVO*

La Direttiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 23 ottobre 2007 relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni “istituisce un quadro per la valutazione e la gestione dei rischi di alluvioni volto a ridurre le conseguenze negative per la salute umana, l’ambiente, il patrimonio culturale e le attività economiche connesse con le alluvioni all’interno della comunità.” (art 1) [14].

Gli stati membri, sulla base delle informazioni disponibili, devono effettuare una valutazione preliminare del rischio di alluvioni per ciascun distretto idrografico o unità di gestione, sì da fornire una valutazione dei rischi potenziali (art. 4). La valutazione preventiva comprende:

1. Mappe del distretto idrografico da cui risulti la topografia e l’utilizzo del territorio;
2. Descrizione delle alluvioni avvenute in passato;
3. Valutazione delle potenziali conseguenze negative di future alluvioni, tenendo in considerazione topografia, posizione dei corsi d’acqua e loro caratteristiche idro-geomorfologiche, efficacia delle infrastrutture di protezione;

Sulla base di ciò che emerge dalla valutazione gli stati devono individuare le zone in cui esiste un rischio da alluvione significativo o si possa ritenere probabile che questo si generi (art. 5).

Gli stati membri, come previsto nel capo III della direttiva, devono produrre mappe della pericolosità e del rischio. Le mappe della pericolosità da alluvione contengono la “perimetrazione delle aree geografiche che potrebbero essere interessate da alluvioni secondo tre possibili scenari: scarsa probabilità di alluvioni, media probabilità (tempo di ritorno probabile maggiore di cento anni) ed elevata probabilità di alluvioni. Per ciascuno scenario previsto bisogna riportare:

- a. Portata della piena
- b. Profondità dell’acqua o livello idrometrico
- c. Velocità del flusso o flusso d’acqua considerato

Le mappe del rischio devono rappresentare le potenziali conseguenze negative derivanti dagli scenari previsti, e devono contenere indicazioni riguardo:

- a. Numero indicativo degli abitanti potenzialmente interessati

- b. Tipo di attività economiche insistenti sull'area potenzialmente interessata
- c. Impianti (direttiva 96/61/CE del Consiglio) che potrebbero provocare inquinamento accidentale.

Sulla base delle mappe per le zone individuate a rischio gli stati membri devono adottare dei piani di gestione del rischio alluvioni. In particolare devono definire degli obiettivi appropriati, ponendo particolare attenzione alla prevenzione e riduzione delle conseguenze negative che potrebbero nascere da un simile evento (art 7). I piani di gestione devono individuare le azioni più adeguate da intraprendere per poter raggiungere gli obiettivi prefissati. Infine, devono ricoprire tutti gli aspetti della gestione del rischio, ovvero la prevenzione, la protezione, la preparazione oltre che sviluppare adeguati sistemi di allertamento e di risposta.

Le fasi del processo di pianificazione introdotte dalla direttiva possono essere schematizzate come segue:

1. Valutazione preliminare del rischio alluvioni
2. Mappe della pericolosità e del rischio alluvioni
3. Redazione del piano di gestione del rischio alluvioni sulla base di quanto emerso dai punti precedenti

Il processo è iterativo e viene ripetuto ogni sei anni. Gli stati membri devono presentare la documentazione rispettando le scadenze fissate dalla Commissione Europea (Figura 2. 6).

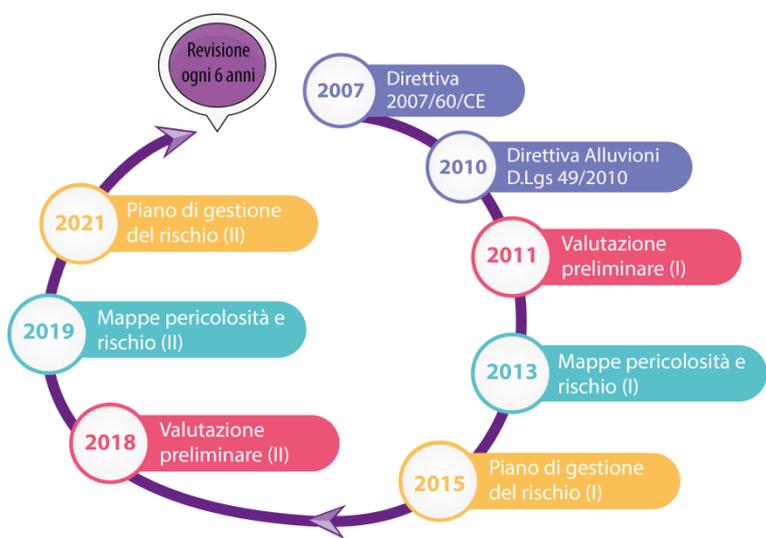


Figura 2. 6. Schema delle scadenze per la direttiva alluvioni [14]

La presente direttiva è stata resa esecutiva in Italia con il Decreto legislativo 49/2010 del 23 febbraio 2010 “Direttiva alluvioni”, che “disciplina le attività di valutazione e di

gestione dei rischi di alluvione al fine di ridurre le conseguenze negative per la salute umana, per il territorio per i beni, per l'ambiente, per il patrimonio culturale e per le attività economiche e sociali derivanti dalle stesse alluvioni”(art. 1) [16]. A livello nazionale la normativa specifica prevede che le mappe di pericolosità debbano essere predisposte secondo i seguenti scenari:

- Alluvioni rare di estrema intensità: tempo di ritorno (T_R) fino a 500 anni;
- Alluvioni poco frequenti: T_R fra 100 e 200 anni;
- Alluvioni frequenti, di elevata probabilità: T_R fra 20 e 50 anni.

CAPITOLO 3: IL TELERILEVAMENTO NELLA GESTIONE DELLE CATASTROFI NATURALI

Da quanto descritto nei capitoli precedenti, risulta evidente come qualsiasi scelta in ambito di catastrofi naturali debba basarsi su informazioni che permettano di modellare i fenomeni naturali a cui siamo esposti per renderli analizzabili e, seppur con molti limiti, in qualche modo prevedibili. Oltre agli indispensabili dati e alle misurazioni raccolti *in situ*, è di fondamentale importanza avere un punto di osservazione più ampio. A tal proposito le tecnologie spaziali consentono di comprendere la fragilità del nostro pianeta in quanto forniscono strumenti per affrontare le sfide in materia di protezione civile e monitoraggio ambientale [17].

I programmi spaziali, attraverso la loro capacità di osservazione globale e la loro azione a lungo termine, forniscono la serie di dati occorrenti alla comunità scientifica per le ricerche in materia di cambiamenti climatici, integrando altri strumenti di osservazione e misura [18]. Tale contributo è unico e sta rapidamente evolvendo grazie ai nuovi prodotti e servizi nell'ambito del telerilevamento applicato. Il telerilevamento è definibile come quell'insieme di tecniche, strumenti e mezzi interpretativi che permettono di estendere e migliorare le capacità percettive dell'occhio umano fornendo all'osservatore informazioni qualitative e quantitative su oggetti posti a distanza e nell'ambiente che lo circonda. In generale, si può dire che il telerilevamento permette di realizzare misure quantitative sulla base di misure di energia elettromagnetica emessa, riflessa o trasmessa che dipendono dalle caratteristiche fisiche delle superfici. Mediante la multispettralità, il telerilevamento permette di disporre di tante immagini dello stessa superficie riprese simultaneamente in varie bande dello spettro elettromagnetico [19]. Il telerilevamento satellitare ricopre quindi un ruolo essenziale nella gestione delle emergenze: aiuta infatti a comprendere fattori di rischio, rilevare catastrofi imminenti, mapparne le possibili conseguenze e preparare le attività di risposta all'emergenza [20].

3.1 TELERILEVAMENTO NEL CICLO DI GESTIONE DELLE CATASTROFI

Di seguito ripercorreremo brevemente le fasi del ciclo di gestione delle catastrofi precedentemente esposte e vedremo per ciascuna il contributo del telerilevamento.

- **MITIGAZIONE:** il principale contributo offerto dai dati telerilevati riguarda la valutazione e conseguente riduzione del rischio. Essi forniscono infatti

informazioni geospaziali riguardanti l'esposizione, la vulnerabilità oltre che la localizzazione degli *hazard* sul territorio. Ad esempio, a partire dalle immagini è possibile evidenziare, tramite analisi di *chang-detection*, evoluzioni sociali, demografiche ed economiche a cui l'area di studio può essere soggetta, e ottenere così delle indicazioni sempre aggiornate su ciò che è esposto all'eventuale pericolo. Esempi di prodotti ottenuti dal telerilevamento sono le mappe tematiche che descrivono il *land-use* o il *land-cover*. Queste informazioni devono essere usate da tutti gli attori della gestione, in particolare dalle amministrazione per le opportune riflessioni in termini di pianificazione [13].

- **PREPARAZIONE:** consiste nell'identificazione e lo sviluppo di sistemi, capacità e risorse prima che si verifichi l'evento calamitoso (Quarantelli, 1997). Una buona riuscita delle attività di mitigazioni, quali mappatura del rischio e della pericolosità, sono essenziali per raggiungere efficaci livelli di prontezza. Mappare il territorio in maniere corretta, precisa e aggiornata permette di conoscere esattamente dove si trovano infrastrutture, edifici ed elementi vari sul territorio. Mappare significa avere conoscenza del territorio che diventa quindi gestibile. In questo ambito, i dati satellitari ad alta risoluzione spaziale risultano di fondamentale importanza, poiché forniscono la rappresentazione dettagliata di un certo territorio. Attraverso procedure di *change-detection* applicate a dati multitemporali è inoltre possibile aggiornare frequentemente suddette mappe. Questo passaggio sta alla base della pianificazione, ad esempio, delle modalità di evacuazione. Le mappe così prodotte, inoltre, forniscono un forte strumento di comunicazione del pericolo a cui si è esposti. È stato verificato che affinché il singolo o la comunità si attivino per prepararsi all'eventuale accadimento calamitoso devono sentirsi chiamati in causa in prima persona. Ovvero, dovranno capire di trovarsi in pericolo. Questo avviene solo se è stata fatta una buona comunicazione della pericolosità cui si è sottoposti; in questo caso le mappe giocano un ruolo basilare [13], poiché in maniera semplice e visiva si possono avere indicazioni sulla propria condizione.
- **FASE DI RISPOSTA:** l'uso coordinato di tali satelliti assicura una risposta rapida e la consegna tempestiva di immagini e informazioni geospaziali dell'area interessata dall'evento ai primi soccorritori [21]. In caso di un evento calamitoso gli attori sul campo devono avere a disposizione una rapida identificazione dell'area interessata e un'indicazione dell'impatto su persone e merci. Per

contribuire in modo efficiente ed efficace alla gestione delle operazioni, le informazioni derivate dalle immagini satellitari devono essere:

- Fornite nel più breve tempo possibile (consegna entro le 24 ore successive l'evento).
- Rilevanti e di facile comprensione per la gestione delle operazioni da parte di tutti gli attori (*decision maker*, squadre di soccorso in campo).
- Facilmente inseribili nel processo di gestione dell'autorità nazionale [21].

Esistono due tipologie di prodotti: prodotti di riferimento (*reference map*) e prodotti di risposta all'emergenza (*disaster extent e damage assessment*)

I prodotti di riferimento sono basati su dati di archivio. Forniscono informazioni di livello base per determinare i principali attributi geografici di una data area come le reti di trasporto (strade, ponti, aeroporti, ferrovie), impianti (linee elettriche, edifici amministrativi, impianti industriali), idrologia e copertura del suolo (fiumi, laghi, dighe, montagne, boschi, terreni soggetti a inondazioni). I prodotti di riferimento sono necessari per organizzare le operazioni di salvataggio. È evidente che mantenere tali informazioni il più possibile aggiornate sia essenziale per riuscire ad organizzare al meglio i soccorsi.

La risposta alle emergenze prevede l'uso dei seguenti prodotti: *disaster extent e damage assessment*. Il primo mostra l'estensione dell'area interessata così come è visibile dalle immagini satellitari. La delimitazione cartografica dell'estensione è funzione delle caratteristiche dei dati disponibili (risoluzione spettrale e spaziale, copertura del suolo, ecc.). La valutazione del danno viene elaborata da immagini ad alta risoluzione acquisite immediatamente dopo l'evento, confrontando le informazioni di archivio disponibili. Forniscono informazioni sul danno agli insediamenti, alle infrastrutture ed eventualmente all'ambiente. Possono essere aggiunte a tali mappe anche informazioni come l'accessibilità di strade, ponti e aree di raccolta.

Sia l'estensione della catastrofe che i prodotti di valutazione del danno possono essere riprodotti a vari intervalli temporali dal momento dell'evento per monitorare eventi dinamici (incendi, inondazioni, eruzioni vulcaniche, campi di sfollati) [21].

Tale tipo di monitoraggio può essere sviluppato anche su un arco di tempo superiore (mesi, anni nei casi di gravi catastrofi) per valutare i tempi impiegati al completo ristabilirsi della normalità (fase di riabilitazione).

Nel caso specifico delle alluvioni è evidente che per una buona gestione del rischio sia indispensabile, per qualsiasi scelta, la conoscenza esatta della sua distribuzione sul territorio. A tal proposito, le mappe del rischio e della pericolosità sono il principale strumento imposto per la gestione del rischio alluvioni (vedi par 2.3).

A seconda dello scopo, le parti interessate hanno esigenze molto specifiche su contenuto, scala, accuratezza o leggibilità della mappa [22]. Le mappe tematiche degli allagamenti vengono principalmente utilizzate per:

- Strategie di gestione del rischio di alluvione (prevenzione, mitigazione)
- Pianificazione territoriale, gestione del territorio
- Pianificazione di emergenza
- Sensibilizzazione pubblica
- Settore privato, in particolare quello assicurativo

Per quanto riguarda le tipologie di mappe attualmente prodotte possiamo distinguerle in due categorie;

➤ Mappe della pericolosità (*hazard*) devono contenere:

- Mappe dell'estensione secondo tre scenari di probabilità di accadimento (basso, medio, alto). Devono contenere, oltre alla superficie di allagamento, le strade di riferimento, ferrovie, case, i confini delle proprietà e i corpi idrici permanenti dai quali possono derivare le alluvioni;
- Mappa della profondità dell'inondazione che fornisce informazioni sulla profondità dell'acqua in una particolare posizione per ogni scenario. I valori del livello dell'acqua (profondità) possono essere ricavati dai modelli di flusso (2D e 1D) per le inondazioni dei fiumi, dalle analisi statistiche o dalle osservazioni;
- Mappe della velocità dell'acqua che fluisce (o del sedimento in caso di colate detritiche) o dalla velocità della propagazione dell'inondazione.

➤ Mappe del rischio:

- Mappe della vulnerabilità e dell'esposizione: devono contenere informazioni sulla popolazione (distribuzione geografica; distribuzione di gruppi particolarmente vulnerabile come case di riposo, scuole o ospedali), identificazione e localizzazione delle attività economiche, *land use*, identificazione delle installazioni potenzialmente interessate che potrebbero causare inquinamento.

- Mappe del danno: devono rappresentare il danno potenziale causato da un particolare evento di alluvione (con una certa probabilità di accadimento) e il numero di vittime potenziali o danni (in euro) per unità di terra.

Oltre a queste mappe, ricopre un ruolo fondamentale nella gestione del rischio, le mappe degli eventi (*event map*). L'analisi e la visualizzazione degli eventi passati costituiscono un primo approccio per valutare i rischi di alluvione. La corretta identificazione delle aree colpite da inondazioni funge da base per un'ulteriore valutazione e fornisce argomenti eccellenti per la sensibilizzazione in merito ai rischi di alluvione e alla gestione del rischio di alluvione [22]. Delineare l'estensione delle inondazioni, infatti, oltre ad essere uno strumento essenziale nella gestione dell'emergenza per organizzare i soccorsi, è uno strumento essenziale e base di partenza per tutte gli studi probabilistici. Infine è uno strumento fondamentale per la validazione dei modelli idraulici e idrologici esistenti inerenti all'evento [23].

Il presente elaborato di tesi ha preso in esame proprio questa tipologia di prodotto.

3.2 PROGRAMMA COPERNICUS

Il monitoraggio globale per l'ambiente e la sicurezza (GMES) era un'iniziativa nel settore del monitoraggio della Terra guidata dall'Unione Europea e realizzata in collaborazione con gli Stati membri e con l'Agenzia spaziale europea (ESA). Le origini del GMES risalgono al maggio 1998, quando le istituzioni coinvolte nello sviluppo delle attività spaziali in Europa un impegno di lungo periodo per lo sviluppo di servizi spaziali di monitoraggio ambientale. Nel 2005 l'Unione decise di sviluppare, congiuntamente con l'ESA, una capacità europea indipendente di osservazione della Terra per erogare servizi in ambito ambientale e della sicurezza [18]. In seguito a tale iniziativa, è stato istituito concretamente solo nel 2010 il programma europeo di monitoraggio della Terra (GMES) e sono state fissate le norme di attuazione della sua fase iniziale di operatività.

In seguito nel 2014 è stato ritenuto opportuno sostituire l'acronimo «GMES» con il nome di «Copernicus» per sancire il passaggio del programma europeo di osservazione della Terra alla fase operativa vera e propria [24].

Il programma Copernicus si basa su un partenariato fra l'Unione, l'ESA e gli Stati membri e si costituisce di tre componenti:

- a) una componente di servizi destinata a fornire informazioni nei seguenti settori: monitoraggio atmosferico, monitoraggio dell'ambiente marino, monitoraggio del territorio, cambiamenti climatici, gestione delle emergenze e sicurezza;
- b) una componente spaziale destinata a garantire osservazioni spaziali sostenibili per i tipi di servizi di cui alla lettera a);
- c) una componente in situ destinata a garantire le osservazioni mediante installazioni a bordo di aerei, di navi e a terra per i tipi di servizi di cui alla lettera a) (Art. 2) [18].

Vi è una forte interconnessione tra le tre componenti, ognuna è funzione delle altre. I satelliti della componente spaziale sono stati creati appositamente per soddisfare la necessità di informazioni dei servizi offerti. I dati *in situ* servono per validare e correggere quelli ottenuti dallo spazio. Tutte le componenti a loro volta sono cucite apposta sulle esigenze degli utilizzatori finali.

Copernicus infatti nasce come “un programma orientato agli utenti, che quindi devono essere coinvolti in modo costante ed effettivo, in particolare per definire e convalidare le esigenze di servizio” [18].

I principali utenti dei servizi di Copernicus sono tecnici e autorità pubbliche che hanno bisogno di informazioni per sviluppare politiche ambientali o per prendere decisioni in caso di emergenza, come un disastro naturale o una crisi umanitaria.

Il progetto è finanziato dall'Unione Europea. La Commissione Europea, in collaborazione con gli Stati membri, sovrintende e coordina il programma e assicura che rimanga orientato ai bisogni degli utenti. Ha inoltre il compito di definire e sviluppare la visione politica del programma e di mettere a punto gli elementi per il corretto e adeguato funzionamento del sistema [25]. Gli Stati membri contribuiscono al programma Copernicus in diversi modi: attraverso lo sviluppo di satelliti all'interno dell'ESA, la fornitura di dati provenienti da infrastrutture spaziali nazionali e la fornitura di dati *in situ*. Lo sviluppo della componente spaziale, infine, è delegato all'ESA. Il complesso sistema del progetto Copernicus è schematizzato in Figura 3. 1.

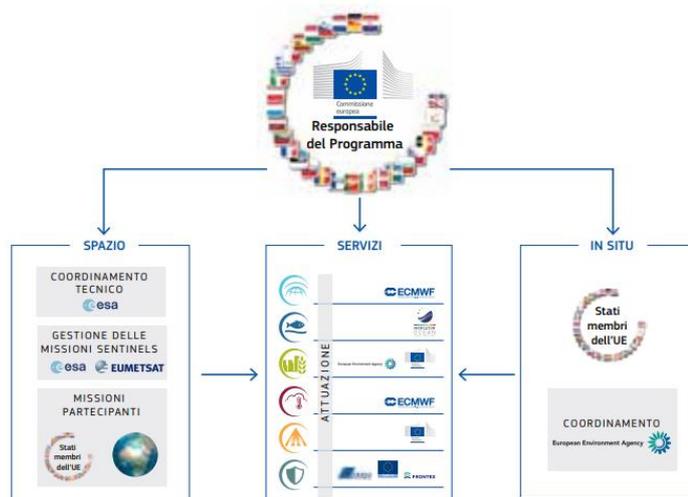


Figura 3. 1. Componenti e attori del Programma Copernicus

Altro aspetto essenziale per il progetto è che i dati e le informazioni ottenuti nell'ambito di Copernicus sono messi a disposizione in modo completo, aperto e gratuito, al fine di promuoverne l'impiego e la condivisione e rafforzare i mercati europei connessi all'osservazione della Terra, favorendo così la crescita e la creazione di posti di lavoro. [18]

3.2.1 COMPONENTE SERVIZI

I servizi Copernicus trasformano i dati ottenuti dalle altre componenti (satelliti e *in situ*), in informazioni a valore aggiunto: analizzandoli ed elaborandoli, integrando gli stessi con altre fonti e infine convalidando i risultati ottenuti [25]. Le serie di dati acquisiti nel corso del tempo, vengono indicizzate e rese comparabili garantendo così il monitoraggio dei cambiamenti territoriali; i modelli strutturali sono esaminati e utilizzati per aumentare la capacità di previsione, ad esempio, nell'analisi degli oceani e dell'atmosfera. Dalle immagini satellitari sono create mappe, identificate caratteristiche ed anomalie ed estrapolate informazioni statistiche. Queste attività a valore aggiunto sono poi organizzate in sei ambiti schematizzati in Figura 3. 2 [25]:



Figura 3. 2 I sei ambiti su cui si sviluppano i servizi offerti dal programma Copernicus

1. Monitoraggio atmosferico: informazioni sulla qualità dell'aria su scala europea e sulla composizione chimica dell'atmosfera, sullo strato di ozono e radiazioni ultraviolette, sulle emissioni e flussi superficiali, radiazione solare e forzanti climatici;
2. Monitoraggio dell'ambiente marino: informazioni sullo stato e sulle dinamiche dell'ecosistema fisico dell'oceano e dei mari, monitoraggio delle risorse marine, previsioni meteorologiche e monitoraggio del clima;
3. Monitoraggio del territorio: informazioni geografiche sulla copertura del suolo e su variabili correlate, ad esempio, allo stato di vegetazione o al ciclo idrico, a sostegno del monitoraggio ambientale, a tutti i livelli, da globale a locale, per quanto riguarda la biodiversità, il suolo, le acque interne e costiere, le foreste e la vegetazione e le risorse naturali, nonché a sostegno dell'attuazione generale delle politiche ambientale, agricola, dello sviluppo, energetica, urbanistica, infrastrutturale e dei trasporti;
4. Cambiamenti climatici: informazioni per ampliare la base di conoscenze a sostegno delle politiche di adattamento e mitigazione. Il servizio contribuisce, in particolare, alla fornitura di variabili climatiche essenziali, analisi, proiezioni e indicatori climatici su scala spazio-temporale rilevanti ai fini delle strategie in materia di adattamento e mitigazione per i vari ambiti in cui l'Unione persegue benefici settoriali e sociali;
5. Servizio di sicurezza: informazioni per rispondere alle necessità in materia di sicurezza civile in Europa migliorando le capacità di prevenzione delle crisi e di preparazione e risposta alle stesse, in particolare per quanto riguarda la sorveglianza delle frontiere di terra e marittime.
6. Servizio di gestione delle emergenze

3.2.2 SERVIZIO DI GESTIONE DELLE EMERGENZE

Il servizio di gestione delle emergenze di Copernicus (EMS) è stato tra i primi attivati, operativo già dal 2012 [26]. Fornisce rapidamente accurate informazioni per la risposta alle emergenze in relazione a differenti tipi di catastrofi, compresi rischi meteorologici, rischi geofisici, catastrofi provocate dall'uomo e altre catastrofi umanitarie, a supporto di attività di prevenzione, preparazione, risposta e ripristino. Tali servizi vengono svolti su richiesta e si rivolgono principalmente agli operatori della protezione civile, ai primi soccorritori, organizzazioni umanitarie e agli organi amministrativi che devono

compiere scelte organizzative durante la catastrofe. Copernicus EMS fornisce essenzialmente due tipologie di servizi:

- EMS MAPPING
- EARLY WARNING

Il servizio cartografico (EMS *mapping*) si organizza in due componenti. Il servizio di mappatura rapida (*rapid mapping*) che fornisce informazioni geospaziali ottenute da immagini satellitari (*reference maps, delineation maps e grading maps*) entro alcune ore o al massimo giorni in seguito ad una catastrofe, come supporto alla fase di risposta. Il servizio di *risk and recovery mapping*, invece, si occupa di fornire prodotti, quali *reference maps, pre-disaster e post-disaster maps*, nell'arco di alcune settimane o anche mesi dalla richiesta. Queste mappe possono essere richieste come supporto nella fase di preparazione e per monitorare la riabilitazione post- catastrofe.

La componente di *early warning* si occupa di diramare le allerte in particolare in tre ambiti:

- Allerta alluvioni. L'*European Flood Awareness System* (EFAS) fornisce previsioni sulla probabilità di alluvioni per tutti i fiumi europei. Le autorità nazionali di ogni stato membro ricevono due volte al giorno previsioni paneuropee di alluvione con attendibilità fino a dieci giorni;
- Allerta incendi. L'*European Forest Fire Information System* (EFFIS) attraverso informazioni geografiche fornisce previsioni del pericolo di incendio fino a 10 giorni in anticipo e informazioni quasi in tempo reale e storiche sugli incendi boschivi in Europa;
- Allerta siccità. Il *Drought Observatory EMS* (DO) dell'EMS fornisce informazioni rilevanti per la siccità e allerta precoce per l'Europa (EDO) e il globo (GDO). Brevi rapporti analitici sono pubblicati in caso di siccità imminenti [27].

E' evidente come i servizi ad alto valore aggiunto offerti dall'EMS di Copernicus offrano un concreto e indispensabile aiuto agli attori del ciclo della gestione delle emergenze (Figura 3. 3).

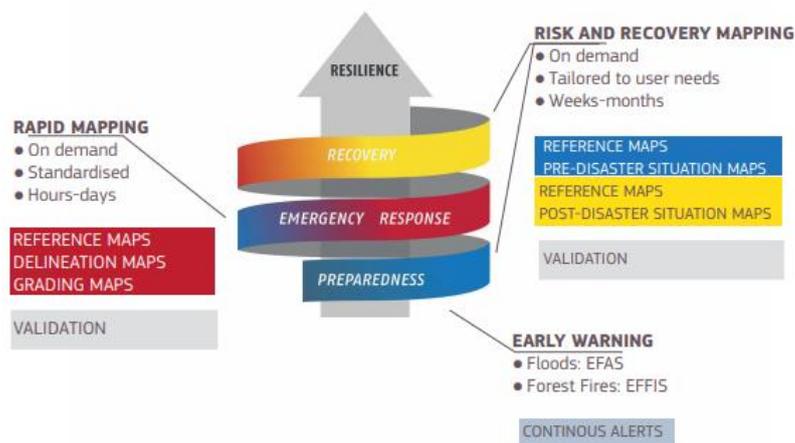


Figura 3. 3 Il contributo del servizio di emergenza del Copernicus nel ciclo di gestione catastrofi [26]

3.2.3 COMPONENTE SPAZIALE

Come detto sopra, il complesso sistema Copernicus è stato creato e sviluppato nel tempo appositamente per ottenere un ruolo di primato nel mercato relativo all'osservazione della Terra, oltre che per raggiungere la completa indipendenza decisionale e operativa europea in tale ambito. Il sistema di servizi è alimentato dalle osservazioni spaziali ottenuti dai satelliti appositamente creati dall'ESA per il raggiungimento degli obiettivi del progetto. La componente spaziale di Copernicus si basa in particolare su due tipologie di missioni:

- Missione Sentinel: comprende sei famiglie di satelliti (Figura 3. 4) ideate e gestite dall'ESA appositamente per il progetto
- Missioni contribuenti: circa trenta missioni operate da organizzazioni nazionali, europee o internazionali.

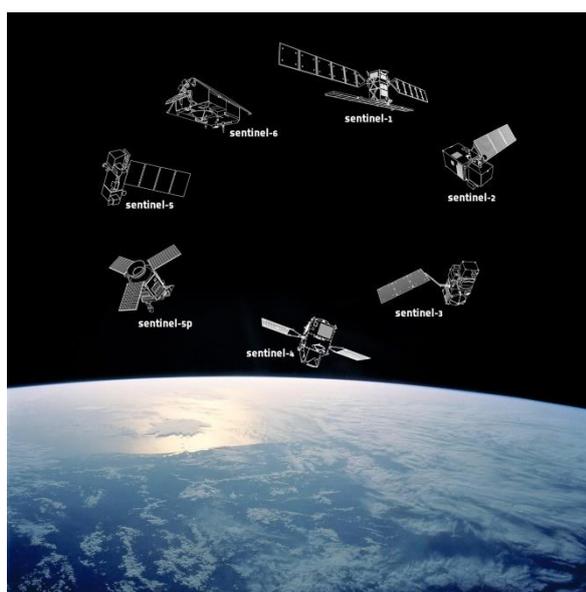


Figura 3. 4 Sei famiglie di satelliti della missione Sentinel [28]

L'obiettivo del programma SENTINEL è di sostituire le attuali missioni di osservazione della Terra più vecchie, come la missione ERS, garantendo una continuità dei dati. Ogni missione Sentinel si basa su una costellazione di due satelliti per soddisfare i requisiti di revisione frequente e copertura [28]. Ognuna inoltre è stata pensata per focalizzarsi su un aspetto diverso dell'osservazione della Terra, come ad esempio il monitoraggio atmosferico, oceanico e terrestre [29], offrendo così un'ampia possibilità di applicazioni.

La missione Sentinel è costituita dalle seguenti famiglie di satelliti:

- Sentinel-1: immagini radar ad alta risoluzione
- Sentinel-2: immagini multispettrali ad alta risoluzione
- Sentinel-3: altimetria e immagini spettrali a media risoluzione
- Sentinel-4: monitoraggio atmosferico da orbita geostazionaria
- Sentinel-5 e Sentinel-5 Precursor: monitoraggio atmosferico da orbita polare
- Sentinel-6 (Jason-CS): altimetro radar ad alta precisione

Nel presente studio, al fine di produrre una mappa degli allagamenti, sono stati utilizzati i dati delle missioni Sentinel-1 e Sentinel-2.

❖ *Sentinel-1*

La famiglia Sentinel-1 è composta da una costellazione di due satelliti identici (Sentinel-1A e Sentinel-1B) progettati per una vita minima di 7 anni nello spazio, che può arrivare a un massimo di 12. Sentinel-1^o è stato lanciato il 3 Aprile 2014 mentre il secondo, Sentinel-1B, il 25 aprile 2016. La configurazione dei due satelliti, con un'orbita eliosincrona ad una altitudine di circa 700 km, è tale per cui è ottimizzata la copertura dell'intero pianeta: il tempo che intercorre tra un passaggio su una certa area e l'altro è di circa tre giorni all'Equatore, un solo giorno per la zona artica. Immagini complete dell'intero pianeta sono ottenute ogni sei giorni. Entrambi i satelliti trasportano un'avanzata strumentazione radar ad apertura sintetica (SAR), con antenna di 12 m, operante in banda C.

Il SAR è un sensore attivo, in grado di produrre da solo l'energia elettromagnetica necessaria per "illuminare" la scena osservata, rilevando poi la risposta riflessa dall'oggetto. Questo meccanismo consente di acquisire immagini in qualsiasi condizione di luminosità, sia di giorno che di notte. Inoltre, grazie alle lunghezze d'onda su cui opera, il segnale radar riesce a penetrare facilmente le nuvole, e quindi l'acquisizione è possibile in qualsiasi condizione climatica. Questi sono i due principali

punti di forza della tecnologia radar. Vediamo brevemente il funzionamento, e alcuni aspetti utili all'interpretazione delle immagini da esso prodotte.

La tecnologia SAR invia attivamente segnali a microonde verso la Terra e riceve una porzione di energia trasmessa come retrodiffusione dal terreno (*backscatter*). Il *backscatter* restituito della scena viene ricevuto dall'antenna dello strumento poco dopo, in una posizione leggermente diversa, poiché il satellite intanto continua a percorrere la sua orbita. L'ampiezza della luminosità del segnale restituito e le insieme all'informazione di fase vengono registrata per costruire un'immagine della scena. La misura del segnale riflesso determinerà la luminosità di ciascun pixel nell'immagine prodotta. Il valore di *backscatter* contiene importanti informazioni riguardo la superficie che l'ha generato. Come linea generale è possibile affermare che: le aree urbane (molto riflettenti) sono caratterizzate da alti valori di *backscatter*, l'acqua restituisce invece bassi valori, e le zone non urbanizzate hanno valori medi.

In particolare, il coefficiente di *backscatter* σ^0 è funzione di parametri di osservazione del radar (frequenza, polarizzazione e angolo di incidenza delle onde) e di quelli relativi alla superfici rilevata (rugosità, forma geometrica e costante dielettrica) [30].

Ai fini del presente studio, hanno avuto particolare rilievo i seguenti parametri:

- FREQUENZA

La frequenza del radar influisce sul grado di penetrazione del segnale. Il Sentinel-1 ha un sensore in banda C che è la tipologia di frequenza che permette di indagare fino a una profondità di qualche centimetro la superficie (Figura 3.5) [30].

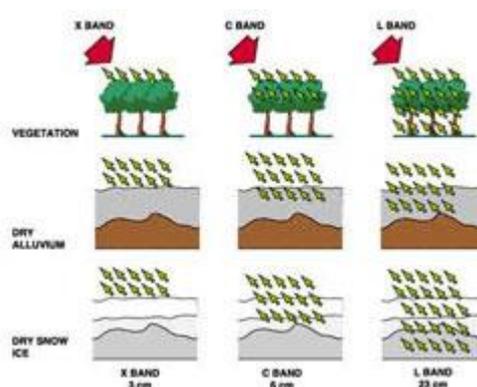


Figura 3.5 Influenza della frequenza sul *backscatter*. Sentinel-1 lavora in banda C [30]

- RUGOSITÀ

Altro parametro che ha grande influenza sul *backscatter* è la rugosità. Tale caratteristica della superficie si basa sulla lunghezza d'onda e l'angolo di

incidenza del segnale. Una superficie è considerata "rugosa" se la sua struttura superficiale ha dimensioni paragonabili alla lunghezza d'onda incidente. Gli effetti possibili sono riassunti in Figura 3. 6. È ben visibile come superfici rugose portino alla diffusione del segnale, portando così all'abbassamento dei valori di σ^0 restituiti al sensore.

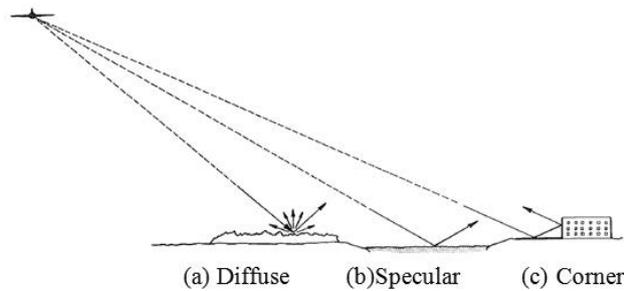


Figura 3. 6 *Backscatter* e rugosità: la diversa risposta di superfici rugose o lisce [31]

- **COSTANTE DIELETTRICA**

Infine, la costante dielettrica è una misura della riflettività e della conduttività di un materiale. Nell'ambito delle microonde i materiali naturali più secchi sulla terra hanno una costante dielettrica compresa tra 1 e 8. L'acqua ha una costante dielettrica molto elevata, circa 80, quindi dieci volte superiore ad un suolo asciutto ad esempio. La presenza di umidità, poi, aumenta notevolmente la costante dielettrica di un materiale, aumenta notevolmente la quantità del *backscatter* [30][31]. L'acqua quindi rifletterà completamente il segnale, e lo stesso suolo restituirà valori superiori in condizioni di saturazione.

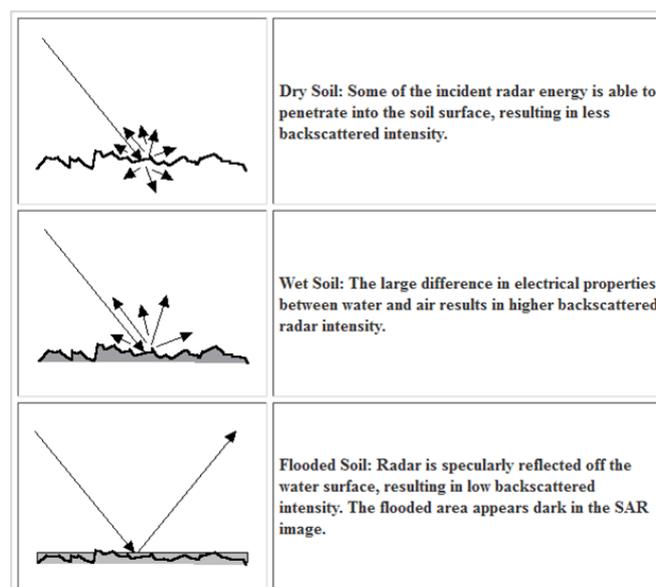


Figura 3. 7. Effetti della costante dielettrica sul *backscattering* [31]

Sentinel-1 ha quattro differenti modalità di acquisizione: Stripmap (SM), Interferometric Wide swath (IW), Extra-Wide swath (EW), Wave (WV).

La modalità principalmente usata sulle terre è operare in diversi schemi di polarizzazione. I prodotti di ogni modalità The Interferometric Wide (IW), ovvero acquisisce immagini a *swath* di 250km con una risoluzione che può andare dai 5 ai 20m. I prodotti IW sono disponibili nella doppia polarizzazione VV+VH. Esistono, infine, diversi livelli dei prodotti, in base al livello di processamento raggiunto:

- livello 0: prodotti grezzi da cui vengono ricavati tutti gli altri livelli;
- livello 1: dati georeferenziati utilizzando i dati orbitali e di assetto del satellite. A loro volta possono subire due livelli di processamento e distribuiti come *Single Look Complex (SLC)* o *Ground Range Detected (GRD)*.
- livello 2: OCN (*Ocean*) per applicazioni riguardanti il vento, le onde e le correnti.

La risoluzione spaziale delle immagini varia a seconda del prodotto utilizzato: immagini L1 GRD si può andare da 4x4 m fino a 40x40 m circa [29].

Nel presente studio sono state usate immagini Sentinel-1 IW GRD con risoluzione a 10m.

❖ *Sentinel-2*

I principali obiettivi per cui è stata sviluppata la missione Sentinel-2 sono:

- acquisizione globale sistematica di immagini multispettrali ad alta risoluzione con un'altra frequenza di revisione;
- garantire continuità alle immagini multispettrali precedentemente fornite da SPOT e LANDSAT;
- garantire dati necessari per i prodotti quali *land-cover maps*, *land change detection maps* e variabili geofisiche.

La famiglia Sentinel-2 è costituita anch'essa da una costellazione di due satelliti identici sulla stessa orbita polare, sfasati di 180° uno rispetto all'altro. Il Sentinel-2A è stato lanciato il 23 Giugno 2015 e successivamente il 2B a Marzo 2017.



Figura 3. 8. Sentinel-2 la visione a colori del progetto Copernicus [30]

Sui satelliti è montato uno sensore multispettrale (MSI) che utilizza un metodo di acquisizione *push-bottom*. L'MSI è un sensore passivo che quindi al suo passaggio si limita a registrare la luce solare riflessa dalla superficie terrestre. I dati vengono costantemente acquisiti dallo strumento man mano che il satellite si sposta lungo la sua orbita. Il fascio di luce in entrata viene diviso da un filtro che lo separa su due piani focali distinti, uno per il visibile e il *near-infra-red* (NIR) e uno per il *short-wave-infra-red* (SWIR). La successiva separazione spettrale di ogni banda in singole lunghezze d'onda è realizzato con filtri *stripe* montati sulla parte superiore dei rivelatori [32]. Sentinel-2 acquisisce quindi in 13 bande a diversa risoluzione con swath di 290km. La risoluzione spaziale è di 10 m nelle quattro bande del visibile e del NIR, 20 m nelle sei bande dell'infrarosso ad onde corte e della zona di *red edge*, 60 m nelle tre bande di correzione atmosferica (Figura 3. 9).

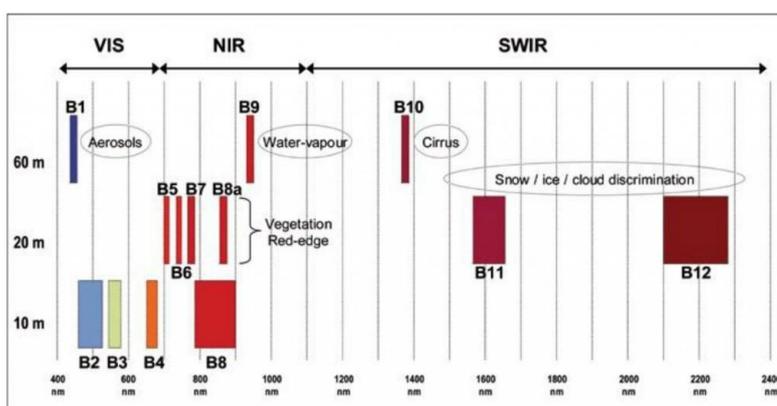


Figura 3. 9. Risoluzione spaziale delle 13 bande del Sentinel-2 [30]

Infine, come per il Sentinel-1, esistono diversi livelli di prodotti in base al grado di processamento che hanno subito. Per gli utenti finali sono a disposizione il livello 1C (TOA) e il livello 2A (BOA) recentemente rilasciato, brevemente descritti in Figura 3. 10.

Name	High-Level Description	Production & Distribution	Data Volume
Level-1C	Top-Of-Atmosphere reflectances in cartographic geometry	Systematic generation and online distribution	~600 MB (each 100km x 100km ²)
Level-2A	Bottom-Of-Atmosphere reflectances in cartographic geometry	Systematic and on-User side (using Sentinel-2 Toolbox)	~800 MB (each 100km x 100km ²)

Figura 3. 10 Sentinel-2 livelli di prodotto disponibili per gli utenti [29]

CAPITOLO 4: IL CASO DI STUDIO

“Sembrava che le cateratte del cielo si fossero aperte, la sfilata dei carri non poté avere luogo, per giorni e notti la pioggia cadde senza interruzione mentre il fiume si gonfiava sempre più minaccioso, in questa atmosfera da cataclisma [...]. Il diluvio riprese, e poco dopo il fiume, dando ragione a Cagnola, fece saltare tutte le dighe, e dando ragione a Peppone, sommerse tutte le vigne di Cagnola, e con esse purtroppo sommerse tutto il paese.

Numerose famiglie dovettero passare la notte accampate sulla diga. L'alba si alzò su una triste domenica gelida e nebbiosa, l'inondazione continuava a crescere”

Da Il ritorno di Don Camillo, 1953

Il comune di Brescello, nella bassa reggiana, noto a molti per essere il paese di Don Camillo e Peppone, è stato storicamente soggetto ad alluvioni. Nel film “Il ritorno di Don Camillo”, uscito nelle sale cinematografiche nel 1953, viene descritto il paese invaso dall'acqua. La pellicola fa riferimento a fatti realmente accaduti due anni prima. Nel 1951, infatti, la grande alluvione del Po, tristemente nota come “l'alluvione del Polesine”, colpì anche Brescello e le località limitrofe. Durante tale catastrofe, lo scrittore Giovanni Guareschi, ideatore dei personaggi Don Camillo e Peppone, fece girare alcuni filmati che documentavano l'esondazione nella città usata come set cinematografico che poi vennero inseriti nel film del 1953 (figura 4.1).



Figura 4. 1 Scena tratta da *Il ritorno di Don Camillo, 1953*. L'alluvione di Brescello del 1951

Gli eventi idro-meteorologici che si sono abbattuti sulla regione Emilia-Romagna a dicembre 2017, causando tracimazioni ed esondazioni sui principali affluenti del Po tra la bassa parmense e reggiana, e colpendo in maniera nefasta l'abitato di Lentigione di Brescello (RE), fanno rivivere inevitabilmente le scene rappresentate dalla pellicola di sessantacinque anni fa.

Lo studio svolto nel presente elaborato di tesi ha avuto come obiettivo la mappatura dell'estensione degli allagamenti causati da questo evento idro-meteorologico. In particolare sono stati elaborati tre prodotti:

1. MAPPA IN FASE DI EMERGENZA attraverso dati radar Sentinel-1 per individuare le aree allagate nelle 72 ore successive all'esondazione dell'Enza e tracimazione del Parma;
2. INTEGRAZIONE CON IL DATO OTTICO Sentinel-2 per avere un miglioramento della mappatura di emergenza e descrivere la massima estensione raggiunta dagli allagamenti;
3. MONITORAGGIO tra il 13 e il 26 dicembre attraverso immagini radar per descrivere l'evoluzione spaziale e temporale degli allagamenti a lungo termine.

4.1 DESCRIZIONE DELL'EVENTO

Le giornate dall'8 al 12 dicembre 2017 sono state caratterizzate da vari fenomeni meteorologici che hanno causato ingenti danni in diverse aree della Regione Emilia-Romagna. Ai fini del presente studio, l'evento può essere schematizzato nei seguenti punti chiave:

- sono state registrate piogge eccezionali tra domenica 10 e lunedì 11 sui settori appenninici centro occidentali con cumulate di 300-500 mm in 36 ore [33];
- significativi eventi di piena con elevato volume su tutti gli affluenti emiliani del Po;
- rotture arginali del fiume Enza nel Comune di Brescello (RE) e tracimazioni del fiume Parma nell'abitato di Colorno (PR) [33].

Com'è possibile osservare nella mappa della pioggia cumulata dell'intero evento (Figura 4.2), sulla parte montana dei bacini di Trebbia, Taro, Parma, Enza, Secchia, Panaro e parzialmente del Reno, si sono registrate piogge mediamente superiori ai 200 mm/48 ore (colore viola chiaro), con punte superiori ai 300 mm/48 ore (colore viola scuro) sull'alto

Trebbia, Taro, Parma, Enza e Secchia, dove anche le intensità orarie sono state piuttosto elevate per il regime pluviometrico della stagione.[33]

pioggia cumulata [mm] in 48 h
 Cumulata dal 10 /12/2017 alle ore 06 UTC al 12/12/2017 alle ore 06 UTC

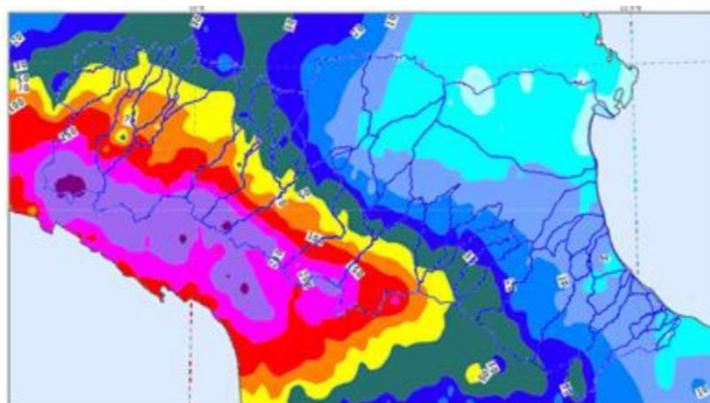
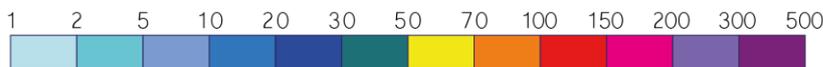


Figura 4. 2 *Pioggia cumulata dell'evento sui bacini della regione Emilia-Romagna*[33]

I bacini che hanno maggiormente risentito di effetti negativi innescati dalle persistenti precipitazioni sono stati quelli di Enza e Parma.

Sul bacino montano del Parma le precipitazioni sono iniziate nel pomeriggio di domenica 10 dicembre, con picchi di 60 mm in sei ore. Nella Figura 4. 3 sono illustrati gli andamenti delle piogge orarie e cumulate durante l'evento, in due stazioni significative del bacino del Parma, Lagdei e Bosco di Corniglio.

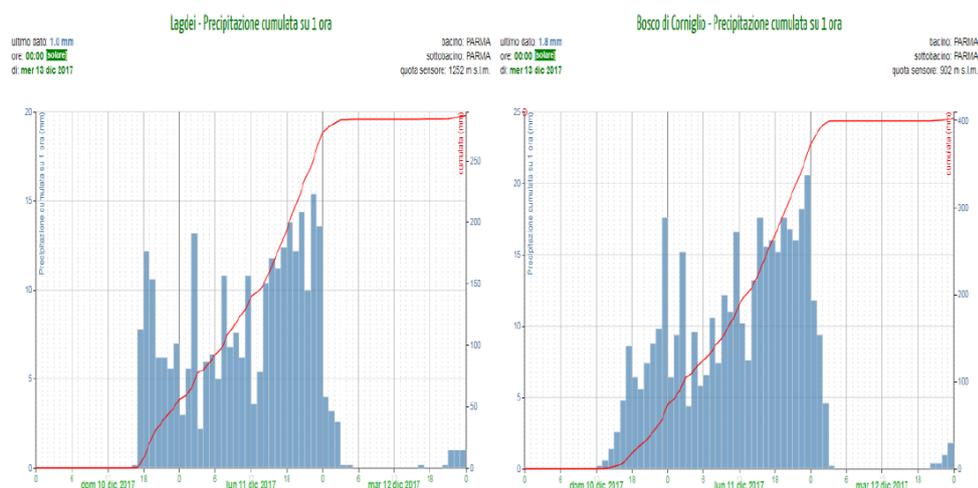


Figura 4. 3 *Precipitazioni orarie e cumulate nelle stazioni più significative del bacino del Parma*[34]

Sul bacino montano dell'Enza le precipitazioni sono iniziate nel pomeriggio di domenica 10 dicembre, con più impulsi successivi, il primo più lungo nella notte tra il 10 e l'11 dicembre, altri tre più brevi ma più intensi, durante tutta la giornata dell'11 fino alle prime

ore del mattino del 12 dicembre. Le intensità di pioggia hanno superato ai 80 mm/6 h, raggiungendo cumulate di oltre 300 mm sul crinale appenninico. In Figura 4. 4 si riportano gli andamenti delle piogge orarie e cumulate durante l’evento, nelle stazioni più significative del bacino montano dell’Enza [34].

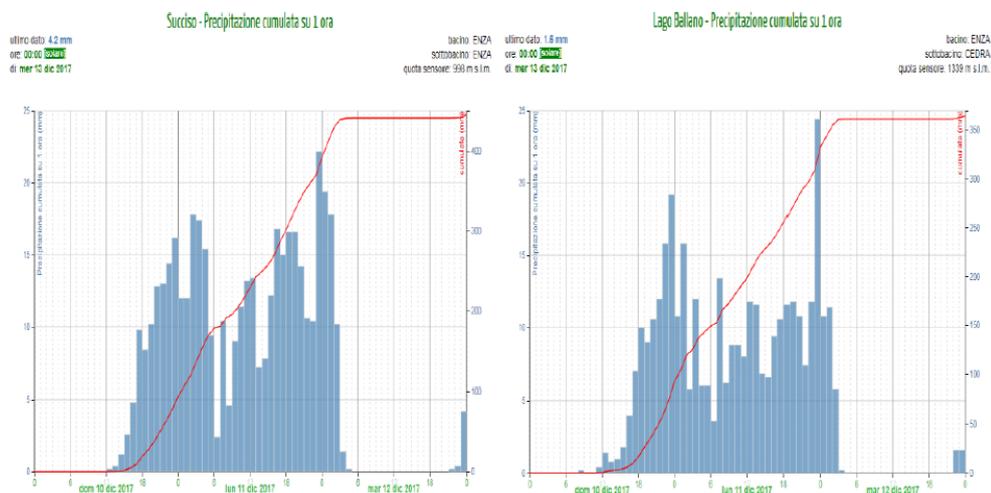


Figura 4. 4 Precipitazioni orarie e cumulate nelle stazioni più significative del bacino dell’Enza[34]

Per dare un’ulteriore indicazione sulla straordinarietà dell’evento si riporta nel Grafico 4. 1 la cumulata di precipitazione giornaliera registrata nelle stazioni di Lago di Ballano (bacino dell’Enza) e di Lagdei (bacino del Parma) nel periodo tra novembre e dicembre.

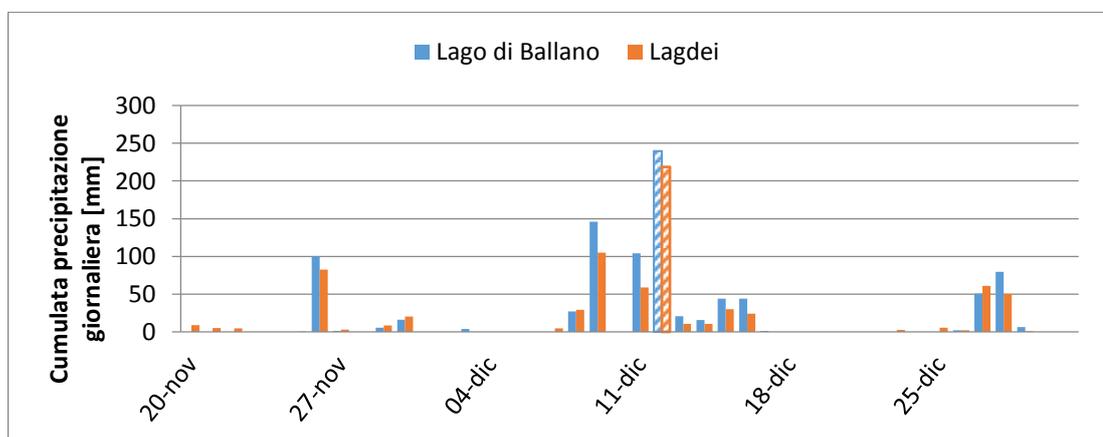


Grafico 4. 1. Precipitazione cumulata giornaliera registrata alle stazioni pluviometriche di Lago di Ballano e Lagdei tra il 20 novembre e il 31 dicembre 2017. Fonte dati [35]

Le intense precipitazioni si sono poi tradotte in significativi eventi di piena con elevato volume su tutti gli affluenti emiliani del Po, con livelli idrometrici superiori ai massimi storici, in alcune sezioni dei fiumi Parma, Enza e Secchia[33]. Nel nostro studio prenderemo in esame la situazione del Parma, per poi focalizzarci sull’alluvione causata dall’esonazione dell’Enza nella frazione di Lentigione (RE).

4.1.1 PARMA

I livelli idrometrici del fiume Parma hanno iniziato a crescere gradualmente dalla giornata del 11 dicembre. Nella sezione valliva di Colorno il colmo ha raggiunto i 9,49 m alle ore 10:30 del 12 dicembre (Grafico 4. 2), massimo storico di sempre, causando numerose tracimazioni in prossimità del centro abitato, dove la piazza in corrispondenza del ponte e gli edifici prospicienti – tra i quali l’omonima reggia – sono stati allagati (Figura 4. 5 e Figura 4. 6). [33]

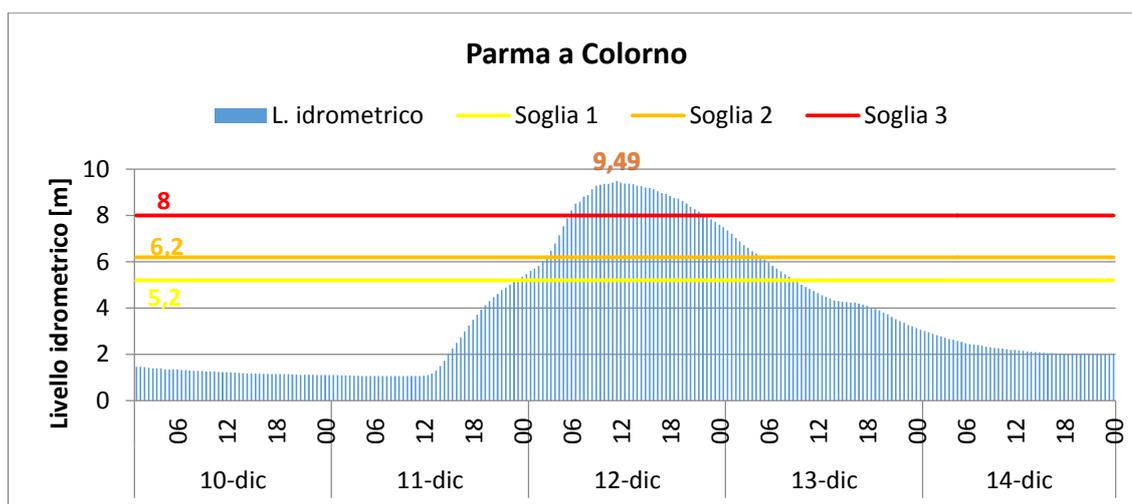


Grafico 4. 2. Livello idrometrico del Parma registrato dalla stazione di misura Colorno (PR). (base dati [35][34])



Figura 4. 5. Tracimazione del Parma a Colorno all’alba del 12 dicembre (fonte [36])



Figura 4. 6 Allagamenti a Colorno. A sinistra vista dall’alto, a destra allagamenti alla reggia (fonte [37])

4.1.2 ENZA

Anche sul fiume Enza le forti piogge si sono tradotte ben presto in colmi di piena nelle sezioni valliva. Nella sezione di Sorbolo, particolarmente stretta, nel primo pomeriggio dell'11 dicembre si è registrato un lungo colmo di 11,35 m, superiore alla soglia 3 di massima allerta, cui corrisponde la chiusura delle luci del ponte sulla strada provinciale. I successivi impulsi di precipitazione hanno generato nuovi incrementi dei livelli idrometrici che, innestati sui colmi precedenti, hanno fatto raggiungere i massimi livelli storici in tutte le sezioni idrometriche da monte a valle [33] Nella sezione di Sorbolo si è registrato alle ore 7:30 del 12 dicembre un nuovo colmo di piena di 12,44 m, massimo storico, prossimo al sormonto del ponte stradale (Grafico 4. 3).

La severità dell'evento e il raggiungimento eccezionale di tale altezza idrometrica, con il conseguente superamento della sommità arginale a valle della sezione di Sorbolo, trovano riscontro nella stima dei tempi di ritorno associati agli afflussi osservati alla sezione di chiusura di bacino, risultando di circa 200 anni per la durata di 12 ore e ancora superiori per la durata di 24 ore. [33]

Dal punto di vista idrometrico è necessario premettere che la piena in esame ha seguito di pochi giorni un precedente evento che, sebbene avesse fatto registrare solo superamenti della Soglia 1 lungo tutto il corso d'acqua, aveva mantenuto un deflusso iniziale sostenuto nelle sezioni vallive, ed un notevole livello di saturazione dei suoli all'inizio dell'evento in esame [33].

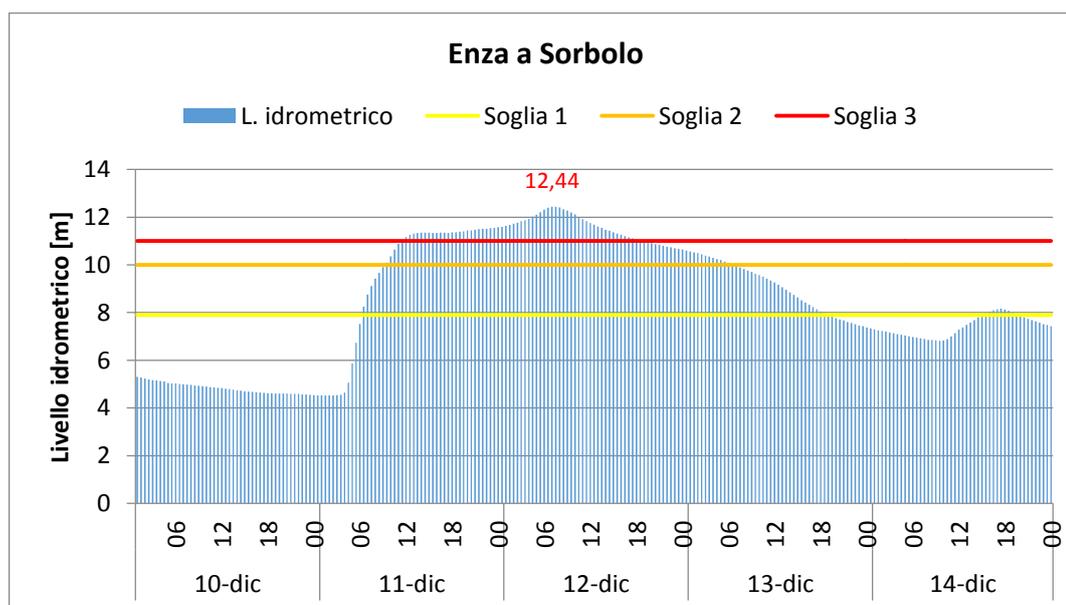


Grafico 4. 3. Livello idrometrico dell'Enza registrato dalla stazione di misura Sorbolo nel comune di Brescello (RE) e relative soglie di allerta. (base dati [35][34])

Nella sezione immediatamente a valle del ponte di Sorbolo alle ore 5:30 del giorno 12 dicembre si è verificato il sormonto della sommità arginale, in tre punti vicini, sull'argine destro del fiume Enza, in località Lentigione di Brescello [33], come documenta la Figura 4. 7. Da quel momento l'acqua ha iniziato ad erodere l'argine fino a raggiungere la massima estensione della breccia alle ore 9.30.



Figura 4. 7. Rotta dell'Enza a Lentigione in tre punti (fonte [36])

Dal punto di rottura arginale l'allagamento si è incanalato in via Imperiale, raggiungendo il centro di Lentigione per poi propagarsi nelle campagne in direzione Nord- Nord-Est, con coinvolgimento delle aree comprese tra le arginature del torrente Enza a Ovest, le arginature di Po a Nord e propagazione verso Est fino alle arginature del Canalazzo di Brescello e ulteriore propagazione, a est del suddetto canale con coinvolgimento di una porzione dei territori comunali di Brescello, Poviglio e Boretto, prima tra tutte l'area edificata della zona edificata di Santa Croce di Boretto [38].

Per limitare la propagazione dell'acqua nei comuni limitrofi, nel pomeriggio è stato predisposto uno sbarramento in terra (figura 4.8a) in prossimità dell'incrocio tra strada della ferrovia regionale (tratto Brescello-Sorbolo) e il canale della Bonifica Emilia Centrale denominato Canalazzo Brescello. In relazione al calo dei livelli avvenuto nel pomeriggio del 12/12 a Foce Enza (per effetto della rottura arginale a monte) e del calo dei livelli del Po, è stato possibile effettuare il "taglio" dell'argine sinistro (figura 4.8b) del Canalazzo di Brescello a valle dello sbarramento in terra e far defluire le acque dalle

aree allagate nel Canalazzo stesso (figura 4.8c), per poi condurle a foce Enza, in golena del fiume Po [38].



a)



c)



b)

Figura 4. 8. Interventi successivi alla rottura dell'argine a Lentigione. a) Sbarramento in terra della ferrovia e della SS della "Cisa". b) Taglio dell'argine del Canalazzo di Brescello per far defluire l'acqua che aveva sommerso l'abitato e la campagna di Lentigione. c) Le acque defluiscono verso il Canalazzo attraverso la breccia artificiale. [39]

Infine, per consentire un prosciugamento più veloce dell'acqua dall'area colpita, topograficamente sfavorita, ed essendo impedito lo scarico a gravità dovuto dalla presenza dell'argine destro del Canalazzo, sono stati installati due impianti di drenaggio:

- quattro motopompe (portata complessiva 1000 l/s) a monte del taglio in località Ponte Alto;
- motopompe e elettropompe posizionate a monte della Chiavica della Scutellara [38].

Di seguito si riporta una mappa con la locazione dei punti salienti sopradescritti (Figura 4. 9).



Figura 4. 9. Posizione geografica degli eventi che hanno caratterizzato l'esonazione dell'Enza.

4.2 MAPPATURA IN FASE EMERGENZA

L'area presa in esame da questo elaborato di tesi, è delimitata a est dal fiume Parma e a ovest dal fiume Enza. La zona maggiormente colpita è stata la località di Lentigione su cui l'argine del fiume Enza ha ceduto all'altezza di via Imperiale, andando ad allagare per vari giorni la campagna compresa tra Lentigione e Brescello (Figura 4. 10, Figura 4. 11)

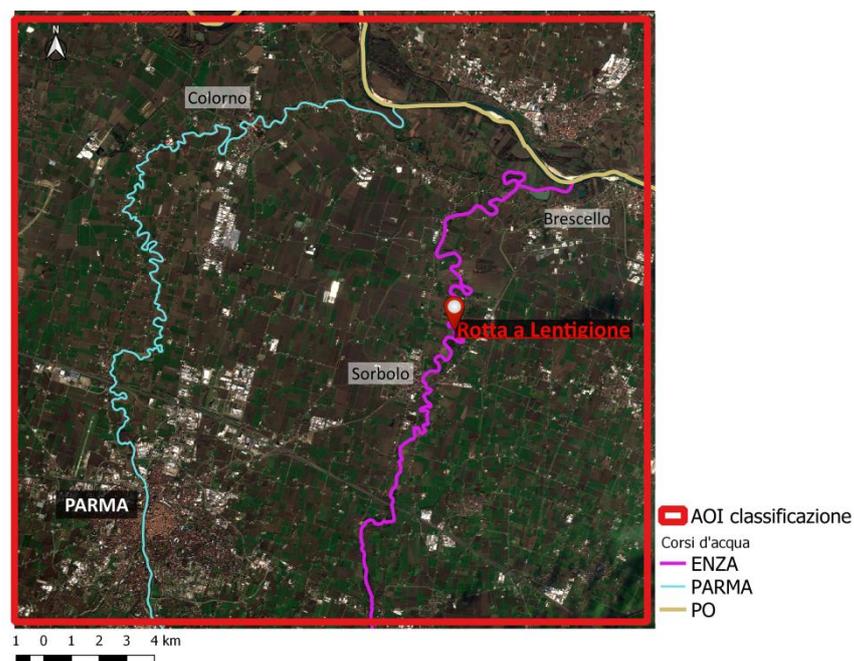


Figura 4. 10 Subset dell'area di studio presa in considerazione nella mappatura di emergenza

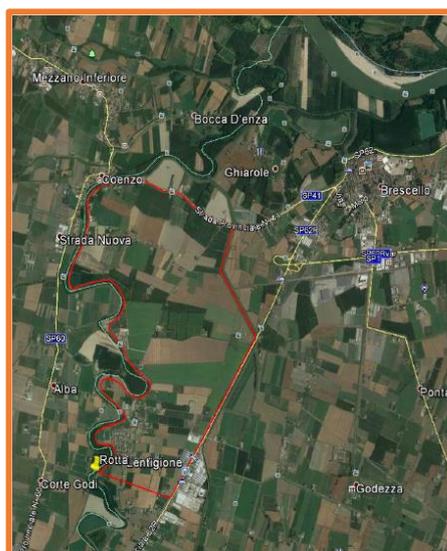


Figura 4. 11 Dettaglio area rimasta allagata per più tempo (Fonte [33])

La mappatura di emergenza in caso di alluvione si basa sulla definizione stessa di alluvione: “l’allagamento temporaneo di aree che abitualmente non sono coperte d’acqua” [14]. L’obiettivo della mappatura è proprio quello di distinguere queste aree. Per fare ciò si utilizza normalmente un approccio di *change-detection*, in cui si confronta il territorio come risulta dalle immagini disponibili precedenti all’evento e quelle durante o immediatamente dopo l’evento. Per avere un’idea introduttiva del procedimento, si riporta un esempio di due immagini ottiche Sentinel-2 relative all’area di studio del 3 dicembre 2017 (pre-evento) e una del 13 dicembre (post-evento) (Figura 4. 12).



Figura 4. 12. Seninel-2. A sinistra il pre-evento (3/12/17) a destra gli evidenti effetti dell’alluvione nel post evento (13/12/2017). Composizione a colori naturali.

Già dal confronto visivo dei due prodotti sono evidenti gli stravolgimenti che l'alluvione ha portato sul territorio.

Per la mappatura di allagamenti è ormai consuetudine usare immagini radar [23], [40], [41]. Distinguere le aree coperte da acqua si rivela piuttosto facile grazie al comportamento del segnale di *backscattering* in corrispondenza di acqua, poiché come spiegato in precedenza, il segnale inviato dal sensore viene riflesso specularmente (quindi in direzione opposta al sensore), attribuendo al relativo pixel un valore vicino allo zero.

La prima parte dello studio è stata quella di reperimento dei dati. Tutte le immagini usate sono state reperite dal portale *Copernicus Open Access Hub* [42], che mette a disposizione i dati delle missioni Sentinel-1, Sentinel-2 e Sentinel-3 in tempo quasi reale e in forma gratuita. È stata rilevata una buona disponibilità di dati nell'intervallo temporale tra il 12 e il 14 dicembre. Per descrivere l'evoluzione dell'alluvione in fase di emergenza, cioè nelle ore successive alle esondazioni e tracimazioni di Enza e Parma sono stati impiegati i dati mostrati in Tabella 4. 1:

Sensore	Ottico	Radar	Level	Data acquisizione	Modalità acquisizione
S1A		√	GRD	12/12/2017 05.27 UTM	Discendente
S2A	√		1C	13/12/2017 10.24 UTM	
S1A		√	GRD	13/12/2017 17.15 UTM	Ascendente
S1B		√	GRD	14/12/2017 17.06 UTM	Ascendente

Tabella 4. 1. Dati scaricati da Copernicus Open Access Hub

In Figura 4. 13 è possibile vedere la disponibilità di dati radar in relazione alla successione temporale degli eventi.



Figura 4. 13. Evoluzione cronologica dell'evento e disponibilità dei dati radar.

4.2.1 PRE-PROCESSAMENTO

Prima di poter elaborare i dati ai fini della mappatura, le immagini radar devono essere pre-processate. La necessità di tale passaggio è evidente quando si osserva un'immagine

radar non processata (Figura 4. 14). Le modalità di acquisizione del sensore, infatti, comportano una distorsione geometrica del prodotto in uscita, in altre parole l'immagine risulta sottosopra.

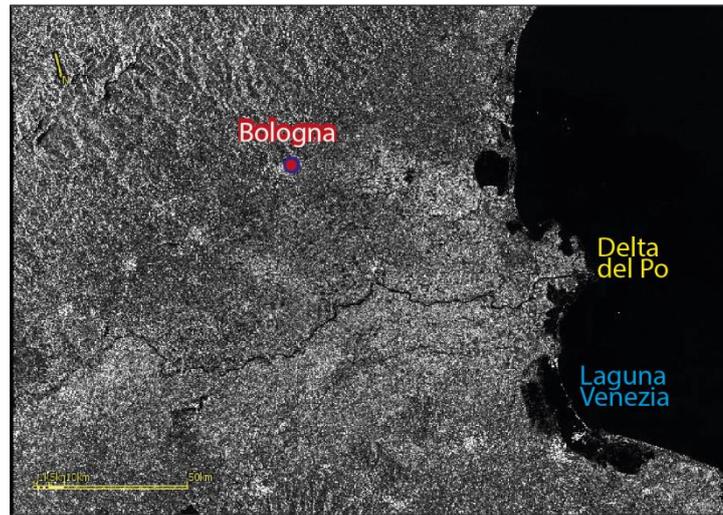


Figura 4. 14. Sentinel-1 14/12/17 non processata. I punti di riferimento sono specchiati rispetto la loro posizione reale

Per questa fase è stato usato SNAP, software gratuito sviluppato dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA) che ha al suo interno le *suite* Sentinel-1 toolbox (S1TBX), Sentinel-2 toolbox, ciascuna specifica per il rispettivo dato. Attraverso S1TBX si è provveduto, in sequenza, alla calibrazione radiometrica e alla correzione geometrica.

La calibrazione radiometrica consente di restituire un'immagine in cui il valore di ciascun pixel sia proporzionale all'effettivo segnale che la superficie ha restituito al sensore durante l'acquisizione (*backscatter*). Un'immagine il cui segnale non è stato calibrato può essere usata solamente a fini qualitativi, ad esempio per la fotointerpretazione. In un'immagine calibrata, invece, è possibile analizzare i valori di *backscatter* restituiti dai pixel. Per il presente studio la calibrazione è stata necessaria perché è stata fatta un'analisi multitemporale di immagini acquisite da sensori diversi (Sentinel 1B e Sentinel 1A). Nel caso specifico, il dato Sentinel-1 contiene al suo interno le informazioni necessarie per la conversione dell'intensità dell'immagine in σ^0 (*backscatter*). Si ottiene come output un *file* con la doppia polarizzazione VV (invio del segnale verticale e ricezione verticale) e VH (verticale, orizzontale). Saranno analizzate solo immagini VV, poiché è stato osservato che tale polarizzazione mette maggiormente in evidenza i fenomeni di nostro interesse.

E' stata in seguito applicata una correzione geometrica *range-doppler terrain correction*. In questo passaggio vengono corrette le distorsioni geometriche e topografiche. L'algoritmo utilizza informazioni riguardanti l'orbita (informazioni

presenti nel dato) e il DEM (*digital elevation model*) dell'area disponibile in rete per poter geocodificare correttamente l'immagine [43]. In questo passaggio è anche possibile proiettare l'immagine nel sistema di riferimento desiderato. Il prodotto Sentinel-1 è rilasciato nel sistema di riferimento WGS 84 *decimal degree* (coordinate geografiche). Tuttavia nelle fasi successive dello studio si dovrà procedere al calcolo delle aree allagate, per questo è stato ritenuto opportuno convertire tutte le immagini nel sistema di riferimento WGS 84 UTM 32 N. Abbiamo ottenuto così il nostro *dataset* di immagini geometricamente e radiometricamente corrette, con risoluzione a 10 m e polarizzazione VV.

Si è ritenuto inopportuno applicare filtri poiché filtrando l'immagine si ha inevitabilmente una perdita di informazioni.

4.2.2 ANALISI MULTITEMPORALE

Avendo a disposizione un buon numero di immagini nell'intorno temporale del momento dell'esondazione, si è voluto procedere con una classificazione basata su un'analisi multitemporale senza limitarsi a restituire solamente una classificazione di presenza-assenza tra pre e post evento. Proprio dalla prima osservazione delle immagini radar relative al 12 e al 13 dicembre (Figura 4. 15) è sorto l'interesse nel dare rilievo all'evoluzione temporale della piena. Osservandole in sequenza, infatti, risulta evidente che nella situazione registrata dell'immagine del 12 le zone più critiche erano quelle lungo il corso del Parma, mentre solo nell'immagine del 13 si vedono gli effetti dell'esondazione dell'Enza.

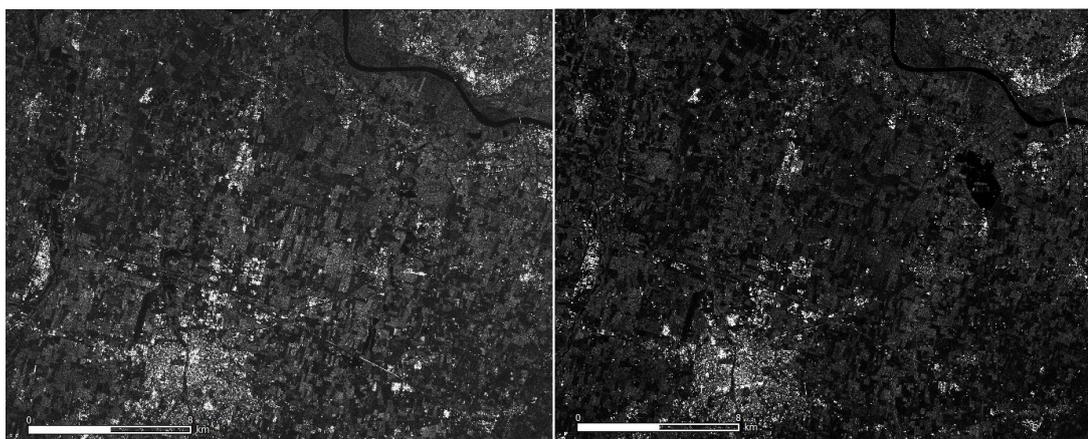


Figura 4. 15. A sinistra S1 12/12/17 a destra S1 13/12/17

Per fare un'analisi multitemporale, finalizzata a mappare l'evoluzione dell'estensione delle aree allagate, si è scelto di creare un unico file, in cui ogni banda è costituita da

un'immagine radar acquisita in date differenti. Tramite il comando *Layer stacking* di ENVI, è stato prodotto il file costituito da tre bande corrispondenti alle date riportate in Tabella 4. 2.

	Sensore	Data acquisizione	Modalità acquisizione	Visualizzazione RGB
Banda 1	S1A	12/12/2017 05.27 UTM	Discendente	RED
Banda 2	S1A	13/12/2017 17.15 UTM	Ascendente	GREEN
Banda 3	S1B	14/12/2017 17.06 UTM	Ascendente	BLU

Tabella 4. 2. Struttura file ottenuto dal *layer stacking* per la classificazione multitemporale

In questa prima fase, in un'ottica di emergenza, la necessità di descrivere nel maggior dettaglio possibile la situazione sul territorio ha richiesto l'utilizzo di tutti i dati a disposizione. Per tale motivo, sono stati considerati trascurabili gli eventuali errori introdotti dall'analisi congiunta di immagini registrate dal sensore in fase ascendente (13 e 14 dicembre) e discendente (12 dicembre).

Obiettivo di una classificazione è associare ogni pixel dell'immagine a una definita classe, in maniera tale da tradurre le informazioni del territorio in una mappa tematica. La classificazione sulla presenza o assenza di acqua su una superficie deve essere fatta tenendo in considerazione il fatto che l'acqua annulla il segnale. Pertanto, nei pixel che rappresentano zone ricoperte d'acqua il valore di *backscatter* sarà molto vicino allo zero, in tutte le altre condizioni tale valore sarà più alto. Alla luce di questa premessa, per entrare in familiarità con l'immagine ottenuta dall'unione delle tre, ci siamo aiutati con alcune tecniche di visualizzazione. Come riportato in Tabella 4. 2, è stata applicato una visualizzazione RGB, in cui è stato assegnato al 12 dicembre il rosso, al 13 il verde e al 14 il blu. Si ottiene il risultato in Figura 4. 16. Per poter capire e interpretare ciò che vediamo, dobbiamo richiamare la teoria dei colori e in particolare la sintesi additiva dei colori (Figura 4. 17).

A ogni pixel viene associato un valore di *backscattering* in ogni data e, facendo riferimento a un singolo pixel, è possibile osservare la variazione del suo *backscattering* nell'intervallo considerato. In Figura 4. 18, ad esempio, si è riportato il valore che il pixel nella zona A di Figura 4. 16 ha restituito nelle tre diverse date. E' evidente una netta riduzione del valore tra il 12 e il 13 dicembre dovuta all'esonazione. Il pixel, preso come esempio, avendo valori così bassi nelle date 13 e 14, rappresenta un'area che in quei giorni era coperta d'acqua.



Figura 4. 16. *Layer stacking*. Visualizzazione RGB R:12 dicembre, G: 13 dicembre, B: 14 dicembre

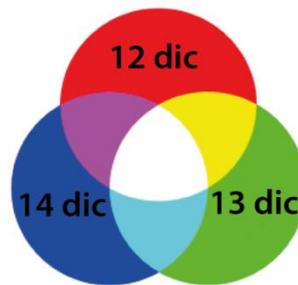


Figura 4. 17. Schema della sintesi additiva dei colori applicata alla nostra visualizzazione RGB

Tornando alla visualizzazione RGB, e riferendoci allo stesso pixel di esempio, al valore di *backscatter* assunto il 12 verrà assegnato il colore rosso, a quello del 13 il blu e quello del 14 il verde. Come si vede nella Figura 4. 19, il rosso è il colore predominante sugli altri. Pertanto, nella mappa, come risultato della composizione RGB, vedremo quel pixel rosso.

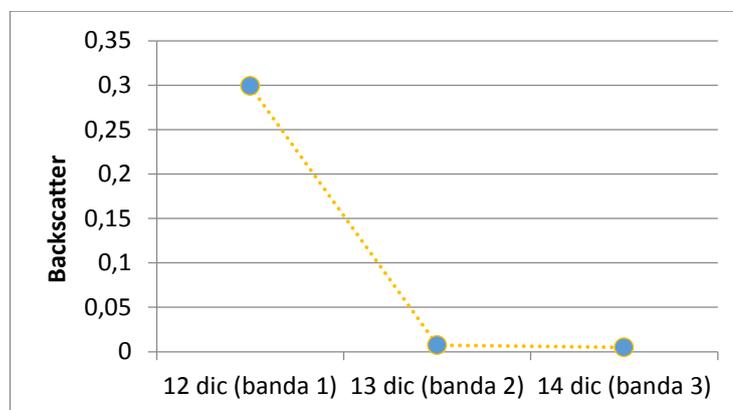


Figura 4. 18. Variazione di *backscattering* di un pixel nelle tre bande nella zona A di Figura 4. 16

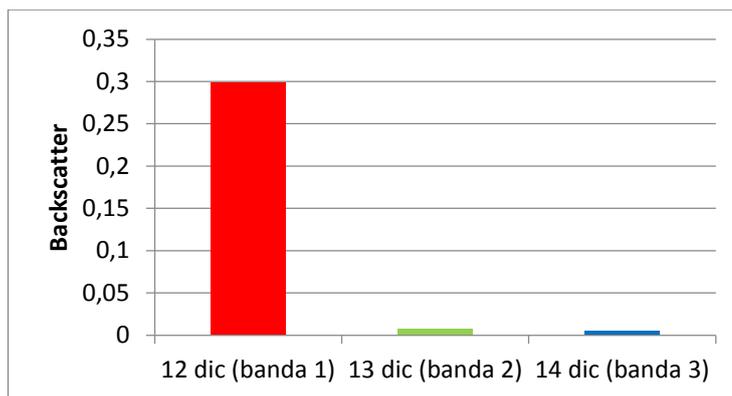


Figura 4. 19. Variazione di *backscattering* del pixel di esempio e visualizzazione RGB. Il pixel verrà visualizzato in rosso

Si riporta un altro esempio, in Figura 4. 20, del comportamento di un pixel identificato dal punto B in Figura 4. 16. In questo caso il pixel preso in esame ha un *backscattering* molto basso solo il 13, i valori assunti il 12 e il 14, invece, sono superiori e simili. Questo significa che sul pixel l'acqua è rimasta solo il giorno 13. Tale pixel avrà quindi un notevole contributo sia nel canale del rosso che nella banda blu. Il pixel risulta quindi magenta (vedi Figura 4. 17)

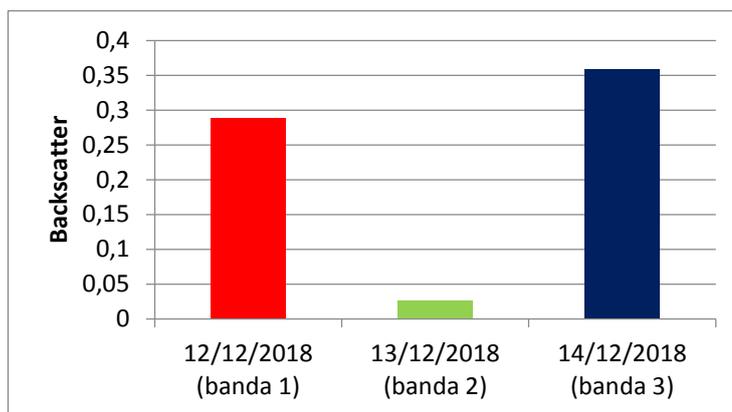


Figura 4. 20. Variazione di *backscatter* di pixel (B) che verrà visualizzato in magenta

Quanto spiegato con l'esempio dei singoli pixel vale per tutti gli altri, seguendo lo schema della sintesi additiva dei colori (Figura 4. 17). A questo punto, bisogna associare i colori alle variazioni di *backscattering* che essi rappresentano e che ci permettono di identificare la comparsa o scomparsa di acqua dalla superficie.

In ciano (pixel di esempio C in Figura 4. 16) sono rappresentate le aree asciutte sia in data 13 che 14, e quindi allagate solo il giorno 12. Tali pixel avranno infatti alti valori di *backscatter* sia nel canale del blu che in quello del verde, la cui sovrapposizione restituisce il colore ciano appunto.

Fatte queste precisazioni, è possibile fare una prima analisi cromatica dell'immagine (Figura 4. 16) andando a individuare le aree che sono state colpite dall'alluvione, messe in evidenza proprio dalla visualizzazione appena descritta.

La mappatura degli allagamenti è stata prodotta in ENVI utilizzando una classificazione *supervised*, con l'algoritmo di *maximum likelihood*. L'algoritmo presuppone la distribuzione normale delle statistiche per ogni classe in ciascuna banda e calcola la probabilità che un dato pixel appartenga a una determinata classe. Ogni pixel è assegnato alla classe che ha la probabilità più alta (ovvero la massima verosimiglianza). Se la probabilità più alta è inferiore a una eventuale soglia specificata, il pixel rimane non classificato[44].

Preliminarmente all'assegnazione, è necessario per ogni classe identificare, gruppi di pixel di addestramento (*region of interest, ROI*) rappresentativi di ciascuna classe su cui il software possa calcolare le statistiche. Nel nostro caso, le statistiche per ogni classe vengono calcolate sulla variazione del *backscattering* nelle tre bande. In Tabella 4. 3 sono riassunte le classi sviluppate per la classificazione, mentre in Figura 4. 21 si riporta un'immagine di esempio di alcuni pixel selezionati come ROI.

CLASSI	
<i>water basin</i>	Corpi d'acqua. Superfici su cui l'acqua è sempre (e normalmente) presente
<i>flooded 12th</i>	Aree allagate solo il 12 dicembre 2017
<i>flooded 13th</i>	Aree allagate solo il 13 dicembre 2017
<i>flooded 12th and 13th</i>	Aree allagate sia il 12 che il 13 dicembre 2017
<i>flooded 13th and 14th</i>	Aree allagate sia il 13 che il 14 dicembre 2017
<i>urban</i>	Aree urbanizzate
<i>bare soil</i>	Suolo nudo
<i>vegetated agricultural land</i>	Suolo agricolo vegetato

Tabella 4. 3 Classi usate per la delimitazione degli allagamenti

Nella classificazione finale, le classi *urban*, *bare soil* e *vegetated agricultural land* verranno accorpate nella classe "Altro" per distinguere le aree in cui l'acqua non è mai arrivata. Tuttavia in fase di addestramento è stato ritenuto opportuno distinguere le tre classi, che effettivamente, hanno comportamenti molto diversi.

Di seguito si riporta la media dell'andamento di *backscatter* per ciascuna classe (Grafico 4. 4). Per avere un'idea si riportano nel grafico anche la media della classe

bare soil, come riferimento di un territorio non allagato e il riferimento che abbiamo usato per individuare la presenza d'acqua ovvero *water basin*, che individua zone coperte da acqua in maniera permanente (il fiume Po, ad esempio).

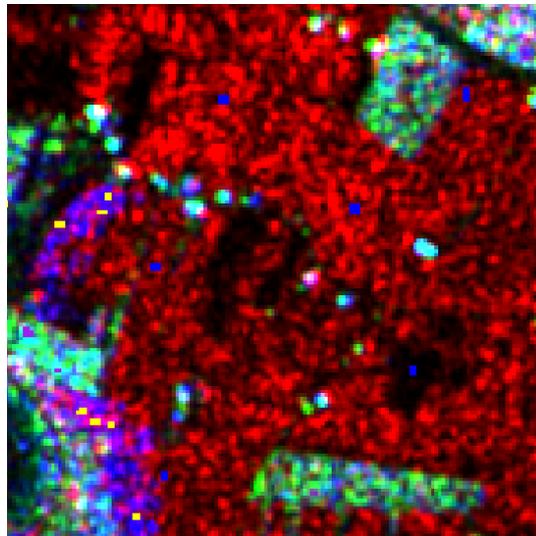


Figura 4. 21. Dettaglio di alcuni pixel selezionati per le *region of interest*

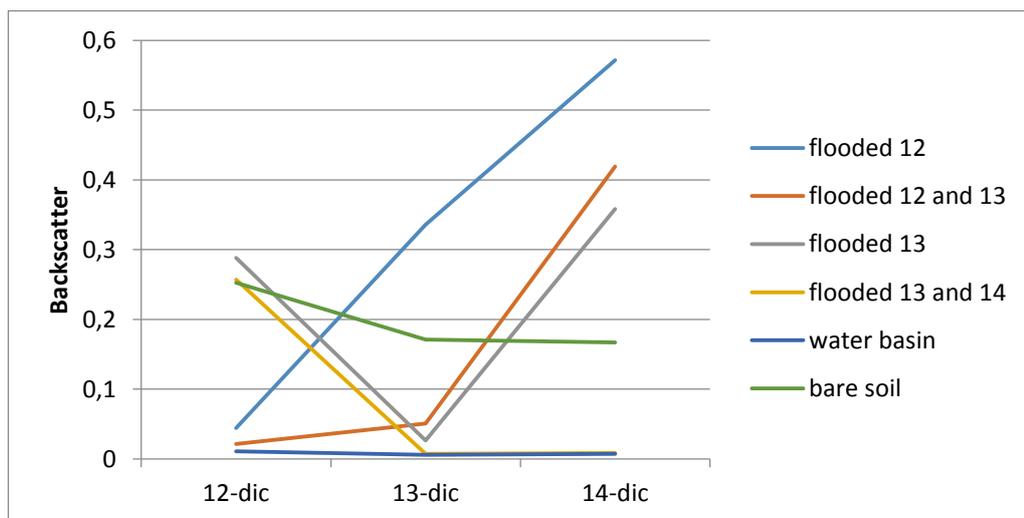


Grafico 4. 4. *Backscatter* medio delle *region of interest* raccolte per ogni classe

E' interessante osservare l'andamento del segnale medio della classe *bare soil*, non interessato da allagamenti: è più alto il 12 dicembre e poi quasi costante il 13 e 14. Questo comportamento, come approfondiremo in seguito, è probabilmente dovuto all'effetto dell'umidità del suolo che fa aumentare il *backscatter* a parità di altre condizioni. È plausibile pensare, infatti, che il 12 dicembre il terreno fosse umido a causa delle intense precipitazioni delle giornate precedenti e che si sia via via asciugato nelle ore seguenti.

In fase di classificazione è stato molto interessante notare come non esistano concetti assoluti, ma ogni segnale vada valutato in funzione di un paragone. Quindi, ad esempio, il *backscatter* dei pixel relativi al Po, che rappresentavano la certezza della presenza costante d'acqua sono stati presi come riferimento per determinare di quanto si dovesse abbassare il segnale per poter classificare il pixel come allagato in un certo momento. Questo aspetto si rivelerà particolarmente interessante nella classificazione relativa al monitoraggio dell'area per un periodo maggiore.

La classificazione è stata condotta impostando una soglia al 95% di probabilità.

La mappa ottenuta è stata sottoposta ad un'operazione di filtraggio al fine eliminare/ridurre l'effetto sale e pepe. Il filtro applicato, ha aggregato i gruppi di almeno 9 pixel rimuovendo gli altri isolati. Il risultato finale è riportato in Figura 4. 23. In Figura 4. 24 si può, invece, osservare l'evoluzione dell'alluvione dal 12 al 14 dicembre. Si è scelto di mostrare solamente le aree classificate come allagate sulla base offerta dall'immagine ottica Sentinel-2 precedente all'evento (3 dicembre 2017).

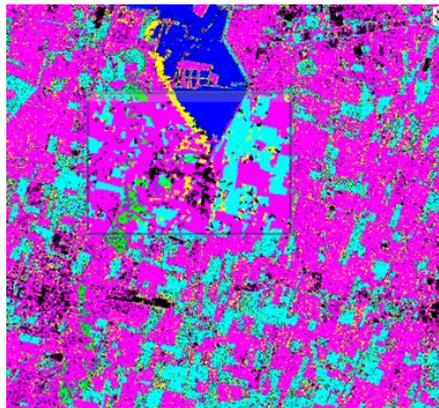


Figura 4. 22. Effetto del filtro sulla classificazione visibile nel riquadro centrale

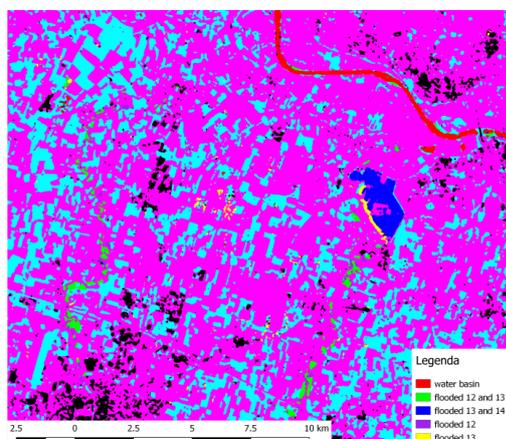
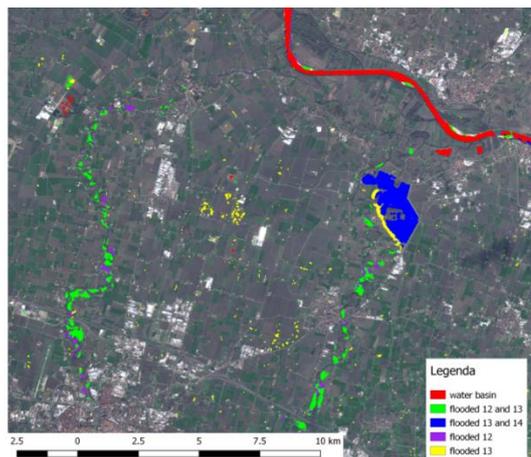
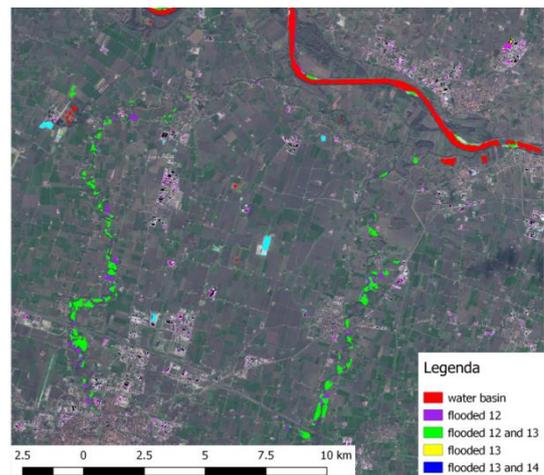


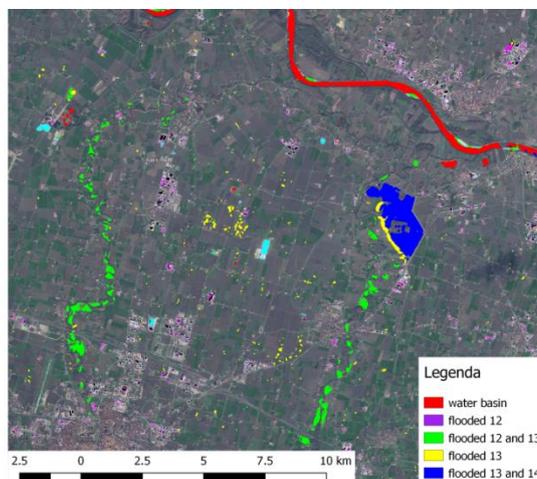
Figura 4. 23. Classificazione del *layer stacking* di immagini radar S1 del 12, 13 e 14 dicembre. In magenta il suolo nudo, in ciano il suolo agricolo vegetato e in nero urbano o non classificato



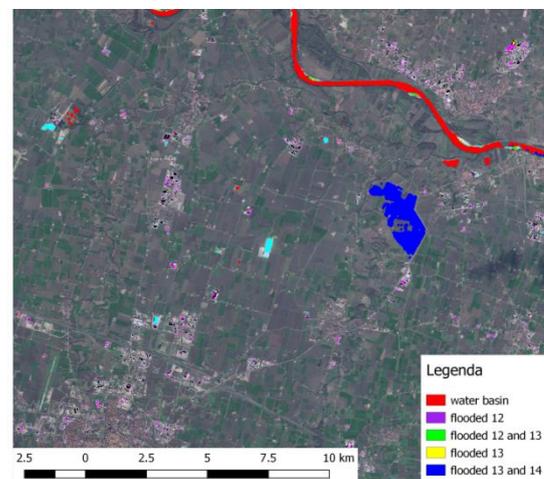
Classificazione allagamenti dal 12 al 14 dicembre



Situazione degli allagamenti al 12 dicembre



Situazione degli allagamenti al 13 dicembre



Situazione degli allagamenti al 14 dicembre

Figura 4. 24. Evoluzione degli allagamenti dal 12 al 14 dicembre ottenuta dalla classificazione. Base Sentinel-2 del 03/12/17

4.2.3 CONFRONTO CON PRODOTTO COPERNICUS

Il servizio di gestione delle emergenze di Copernicus come visto in precedenza (cap. 3), fornisce informazioni per la risposta alle situazioni di crisi in relazione a diversi tipi di disastri, con particolare attenzione alle alluvioni. Tra i servizi di mappatura, è previsto quello di *rapid-mapping*, ovvero nella fornitura rapida (entro ore o pochi giorni al massimo) di informazioni geospaziali a supporto delle attività di gestione delle crisi immediatamente dopo un evento calamitoso.

Esistono tre tipologie di prodotto:

- Mappe di riferimento (*Reference Maps*)
- Mappe di delimitazione (*Delineation Maps*): forniscono la valutazione dell'estensione dell'evento

- Mappe del danno (*Grading Maps*): forniscono una valutazione del grado di danno e della sua distribuzione spaziale

Questi servizi vengono effettuati su richiesta dopo il verificarsi del disastro.

Il 12 dicembre, in seguito alle gravi inondazioni causate dalle forti piogge in Emilia-Romagna, il Dipartimento della Protezione Civile italiano ha richiesto l'attivazione del servizio Copernicus EMS di *Rapid Mapping* per fornire 10 mappe di delineazione che mostrassero l'estensione dell'inondazione. L'attivazione è identificata con il codice EMSR260 e si riportano in Figura 4. 25 le dieci aree (*Area of Interest - AOI*) e la loro estensione. La AOI 01 relativa a Cicognara e l'AOI 03 relativa a Sorbolo sono quelle che comprendono l'area oggetto dal presente studio.

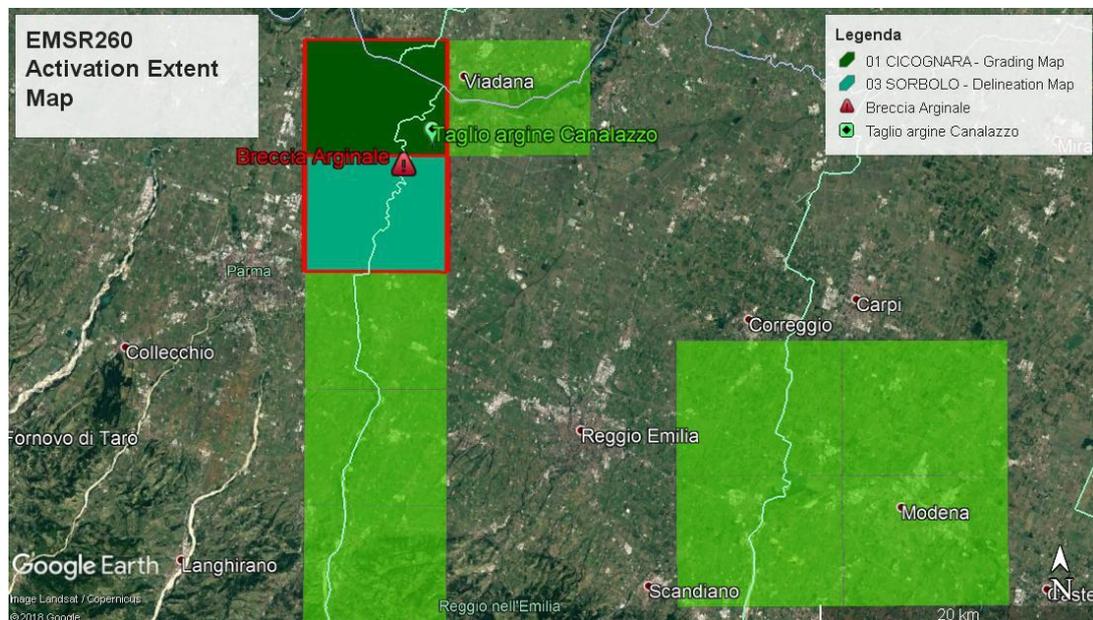


Figura 4. 25. Copertura delle dieci *delineation maps* prodotte per l'attivazione EMSR260 dal servizio di Emergenza del Copernicus

Le mappe relative a suddette aree di interesse sono state impiegate per il confronto con la classificazione di emergenza prodotta.

Le *delineation maps* prodotte dal servizio EMS in fase di *Rapid-Mapping* [45] sono essenzialmente classificazioni di presenza-assenza di acqua e definiscono le aree colpite dall'evento tra il 12 e il 13 dicembre. Nella nostra classificazione, fatta sull'evoluzione degli allagamenti, è stato quindi necessario far confluire in un unico *shapefile* tutte le classi relative agli allagamenti, così come tutte quelle relative all'assenza di acqua. Il risultato è una mappa tematica che suddivide il territorio in “*flooded*” e “*not flooded*” (Tabella 4. 4). Suddetta mappa è stata quindi confrontata con la *delineation map*.

CLASSI NELLA CLASSIFICAZIONE	CLASSI PER IL CONFRONTO
flooded 12 th	FLOODED
flooded 13 th	
flooded 12 th and 13 th	
flooded 13 th and 14 th	
urban	NOT FLOODED
bare soil	
vegetated agricultural land	
water basin	
Unclassified	

Tabella 4. 4. Raggruppamento delle classi in "flooded" e "not flooded" attraverso *combine classes* di ENVI

È stato poi necessario fare un *resize* della classificazione al fine di lavorare in ambiente GIS sulla stessa area comune ai due prodotti. Il confronto è stato fatto su un'area totale di 197.55 km². In Figura 4. 26 vengono mostrati a sinistra la classificazione dopo il *resize* rispetto le AOI fornite dal Copernicus, e a destra la mappa tematica usata per il confronto. In Figura 4. 27 viene mostrato il prodotto Copernicus.

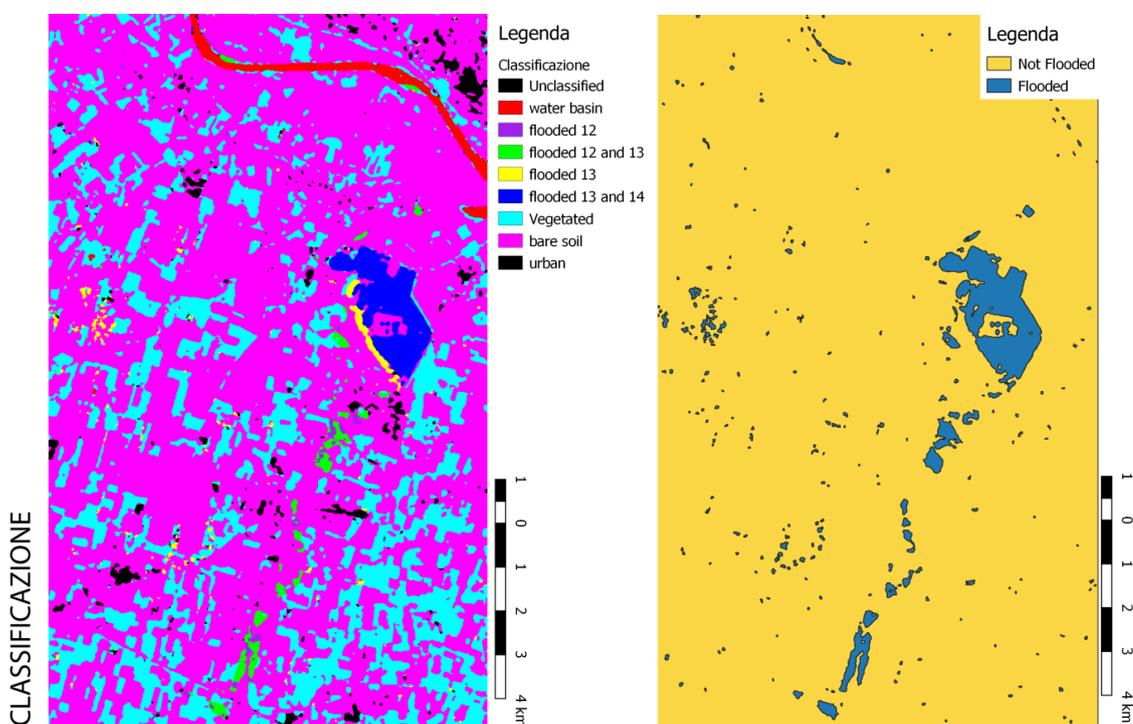


Figura 4. 26. *Resize* della classificazione rispetto AOI01 e AOI03 (a sinistra) successivo raggruppamento delle classi in "flooded" e "not flooded".

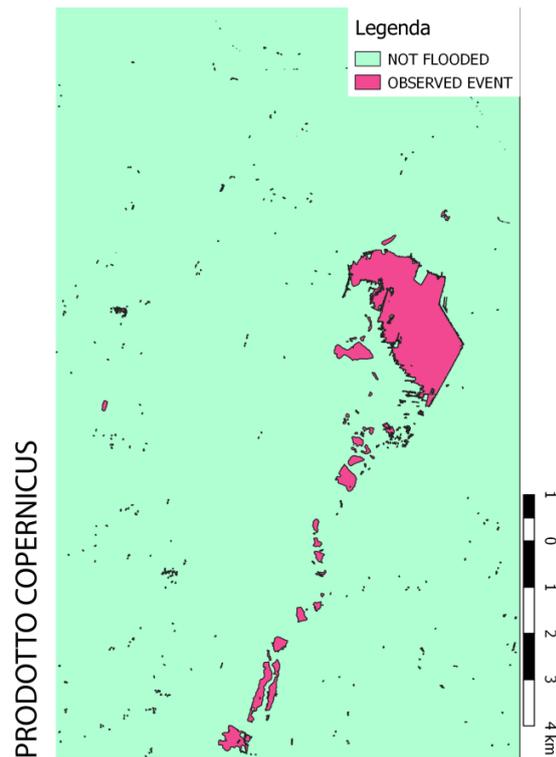


Figura 4. 27. Delineation map EMSR260 Copernicus di Sorbolo (AOI 03) e Cicognara (AOI 01)

Come mostrato in Tabella 4. 5 la procedura presentata ha classificato come allagata un'area di totale di 5,88 km², il Copernicus, invece, 5,45 km².

	Classificazione	Copernicus
flooded areas [km ²]	5,88	5,45
not flooded [km ²]	191,67	192,10
Tot [km ²]	197,55	197,55

Tabella 4. 5. Calcolo delle aree classificate come flooded e not flooded nei due prodotti

Per quantificare la corrispondenza tra i due prodotti si è proceduto alla realizzazione della matrice di confusione e al calcolo degli indici di accuratezza.

Mediante operazioni di *overlay* in ambiente GIS sono stati quantificati la corrispondenza, l'omissione e la commissione.

➤ **CORRISPONDENZA**

Sono state individuate le aree in comune ai due prodotti, ovvero quelle che sono state classificate allagate o non allagate in entrambi i casi. Lo *shapefile* si ottiene in GIS attraverso lo strumento di *geoprocessing* intersezione tra i due input. In Figura 4. 28 si riporta un dettaglio dell'output ottenuto con questo passaggio.

La corrispondenza è stata calcolata sia per la classe *flooded* (4,21 km²) che per quella *not flooded* (190,43 km²).

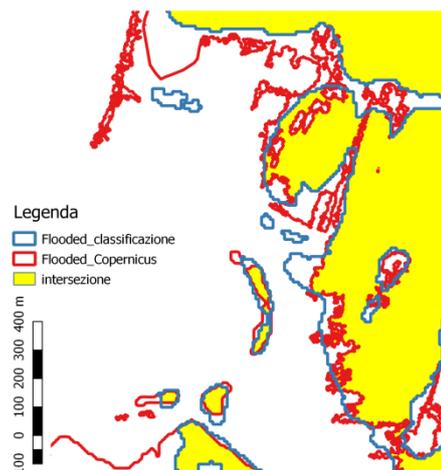


Figura 4. 28. Dettaglio intersezione tra prodotto classificato e Copernicus

➤ OMISSIONE

Si ricava dalla differenza tra il prodotto Copernicus e l'intersezione precedentemente ottenuta. Il file di output corrisponderà quindi alle aree che il nostro prodotto non ha riconosciuto allagate, mentre risultano tali secondo il nostro riferimento dato dal Copernicus (Figura 4. 29). L'omissione è stata quantificata in 1,25 km².

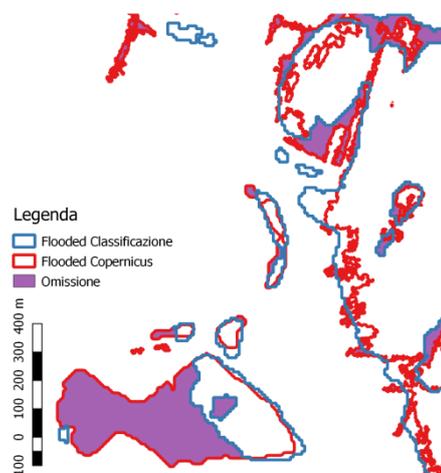


Figura 4. 29. Dettaglio errore di omissione

➤ COMMISSIONE

Risulta dalla differenza tra la nostra classificazione e l'intersezione (Figura 4. 30). Rappresenta le aree che sono state classificate allagate da noi ma non dal Copernicus, si tratta quindi di una sovrastima rispetto alla *delineation map*. La commissione è stata stimata pari a 1,67 km².

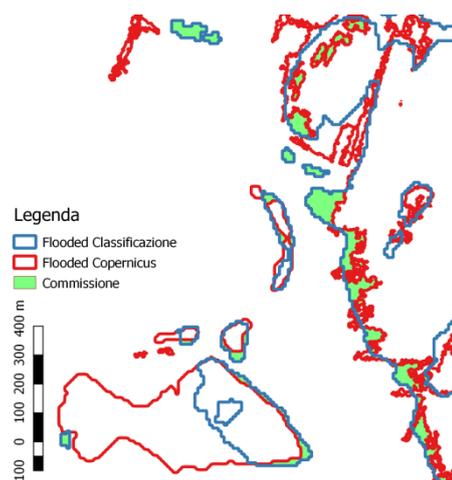


Figura 4. 30. Dettaglio errore di commissione

Con i dati sopra descritti è stata impostata una matrice di confusione del tipo schematizzato in Figura 4. 31, in cui è ancor più chiaro come la commissione sia ciò che noi abbiamo classificato come *flooded* ma che per il Copernicus non ha subito allagamenti, e l’omissione sia quello che la nostra classificazione non è riuscita a riconoscere come allagato pur essendolo secondo il nostro riferimento.

		COPERNICUS	
		FLOODED	NOT FLOODED
CLASSIFICAZIONE	FLOODED	Corrispondenza	Commissione
	NOT FLOODED	Omissione	Corrispondenza

Figura 4. 31. Struttura matrice di confusione per confronto Classificazione e prodotto Copernicus

Si riportano in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** i risultati quantitativi della matrice di confusione.

		Copernicus		Totale
		FLOODED	NOT FLOODED	
Classificazione	FLOODED	4,21 km ²	1,67 km ²	5,88 km ²
	NOT FLOODED	1,25 km ²	190,43 km ²	191,67 km ²
Totale		5,45 km ²	192,10 km ²	

Corrispondenza globale 0,98

Tabella 4. 6. Risultati della validazione: matrice di confusione

Partendo dalla matrice di confusione possiamo poi calcolare i parametri per la valutazione della corrispondenza con il prodotto Copernicus, per avere un’indicazione sulla qualità del nostro prodotto. Sono stati calcolati i seguenti parametri:

- COEFFICIENTE DI CORRISPONDENZA GLOBALE.

La corrispondenza come detto sopra rappresenta la correttezza della nostra classificazione rispetto al nostro riferimento, ovvero quelle aree classificate da entrambi allo stesso modo. La corrispondenza globale è data dal rapporto tra la somma delle corrispondenze (*flooded* e *not flooded*) e la superficie totale dell'area di interesse.

$$\text{Corrispondenza globale} = \frac{4.21 + 190.43}{197.55} \cdot 100 = 98\%$$

La nostra classificazione ha una corrispondenza totale pari al 98%, il restante 2% è quello rappresentato in bianco in Figura 4. 32.

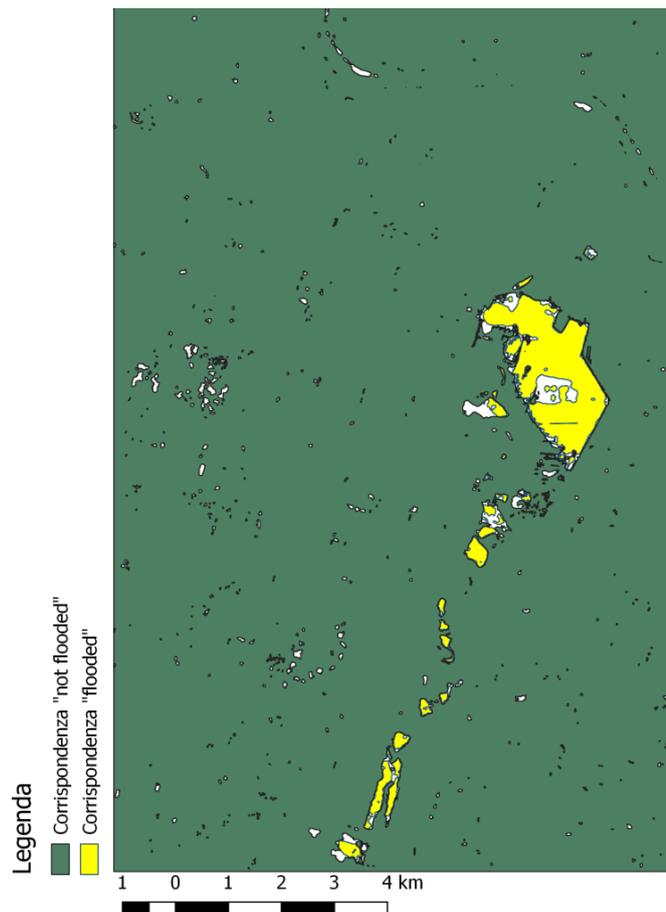


Figura 4. 32. Corrispondenza totale tra la classificazione e il prodotto Copernicus.

➤ **ERRORE DI COMMISSIONE**

E' dato dal rapporto tra la commissione e l'area totale che la nostra classificazione ha identificato come *flooded*.

$$\text{Errore di commissione} = \frac{1.67}{5.88} \cdot 100 = 28.4 \%$$

Il 28.4% della superficie che abbiamo classificato come allagata è una sovrastima rispetto quanto riportato dal Copernicus.

➤ **ERRORE DI OMISSIONE**

E' il rapporto tra l'omissione e l'area totale classificata *flooded* dal Copernicus.

$$\text{Errore di omissione} = \frac{22.94}{5.45} \cdot 100 = 22.94\%$$

Circa il 23% dell'area allagata secondo il Copernicus, non è stata identificato come tale dalla nostra classificazione.

A questo punto è possibile fornire i seguenti parametri di accuratezza:

$$\text{USER ACCURANCY} = 100 - \text{COMMISSION ERROR} = 71,60\%$$

$$\text{PRODUCER ACCURANCY} = 100 - \text{COMMISSION ERROR} = 77,06 \%$$

Dal confronto sopra descritto è possibile fare due osservazioni principali.

L'errore di commissione che sfiora il 30% può sembrare un errore di un certo peso. Bisogna tener presente, tuttavia, che il caso di studio si colloca in una situazione di emergenza dovuta a catastrofi naturali, in cui sono stati attuati sfollamenti ed evacuazioni, quindi situazioni di pericolo per la cittadinanza, oltre che di danni al territorio e ai beni materiali. Pertanto gli errori di commissione, ovvero di "sovrastima", nella delimitazione delle aree colpite dall'alluvione possono essere visti come errori in favore di sicurezza, o comunque in un'ottica cautelativa.

Gli errori di omissione, invece, in questo caso sono i più gravi, poiché non sono state identificate aree realmente colpite e quindi in pericolo. Questa seconda osservazione è stata di spunto per un'analisi sui punti di discrepanza tra i due prodotti.

Maggiori zone di discordanza sono state rilevate in corrispondenza dell'area allagata a nord est di Lentigione (Figura 4. 33). in Figura 4. 34 viene mostrata l'suddetta area sul dato S1 e S2 post evento.

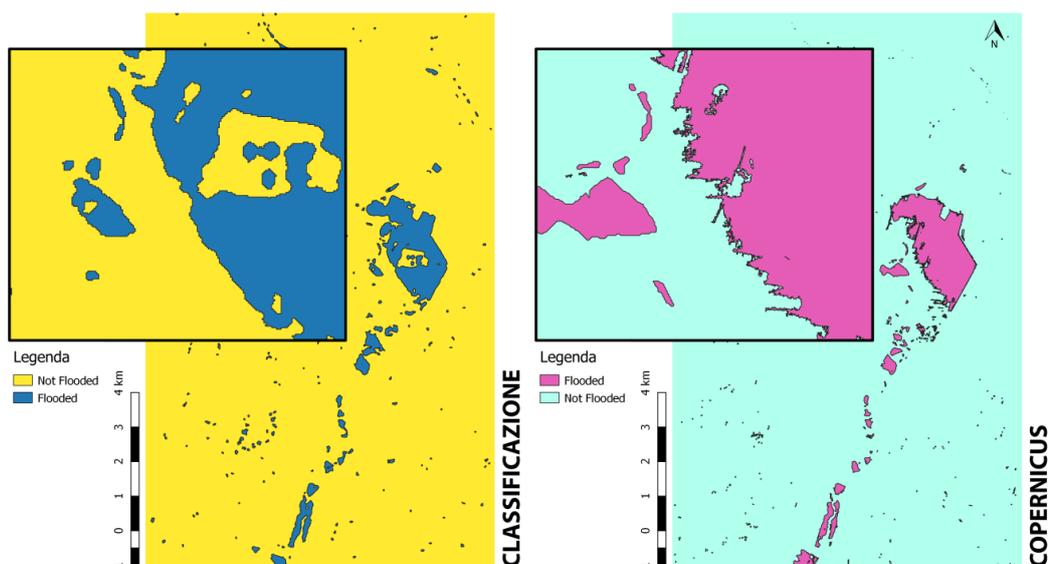


Figura 4. 33. Dettaglio omissione visualizzato nelle mappe tematiche di classificazione

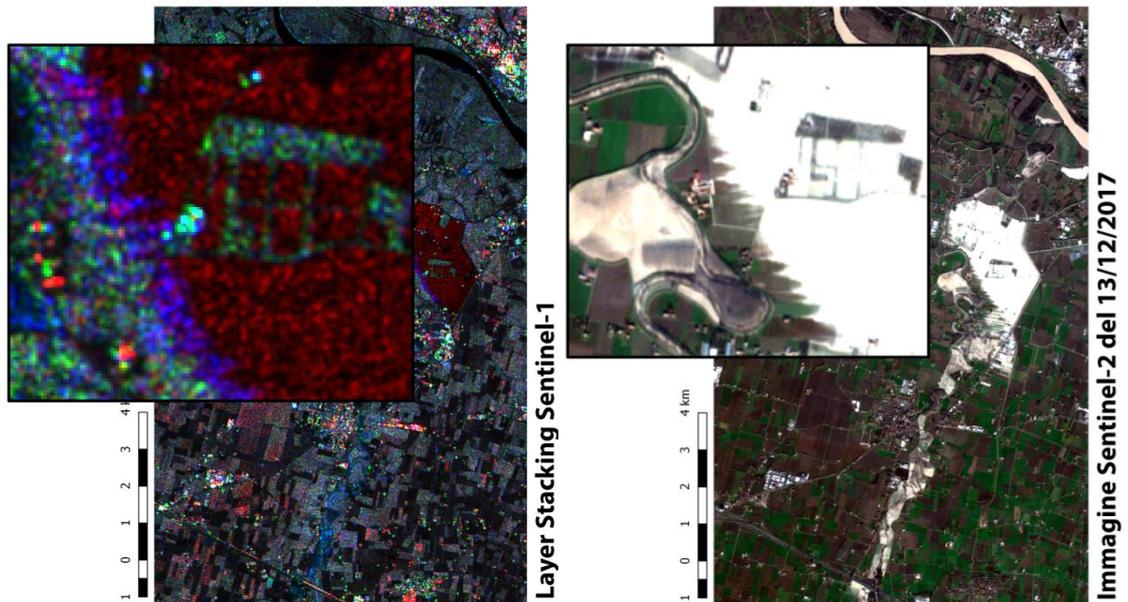


Figura 4. 34. Dettaglio omissione visualizzato nelle immagini satellitari. A sinistra il *layer stacking* delle immagini Sentinel-1 del 12, 13 e 14 dicembre 2017. A destra l'immagine Sentinel-2 relativa al 13 dicembre 2017.

Il dato Sentinel-1, mostra una zona con valori di *backscattering* diversi rispetto all'intorno descrivendo una geometria specifica e una situazione di non allagamento. Analizzando solo il radar non è possibile stabilire la tipologia di copertura del suolo in quel punto. Perciò è stato utilizzato il dato ottico Sentinel-2 del 13/12/2017. L'immagine evidenzia la stessa geometria che non risulta sommersa dall'acqua o dal fango. Le considerazioni sono state confermate anche da un'immagine ad alta risoluzione disponibile sul portale Google Earth (Figura 4. 35). L'area in questione è alberata, quindi, né radar né ottico possono individuare la presenza di acqua sul terreno poiché nascosta in quei punti dalle chiome degli alberi. Si può concludere, quindi, dicendo che l'area era sicuramente allagata, ma questo non è possibile determinarlo attraverso procedure automatiche o semiautomatiche di analisi del *backscattering*.



Figura 4. 35. Immagine aerea da Google Earth (data acquisizione immagine 20/06/2017). Dettaglio della copertura dell'area omessa nella classificazione radar.

Infine, alla luce delle specifiche fatte sull'area oggetto di omissione, tale errore può essere positivamente rivalutato, poiché la classificazione delinea in maniera abbastanza fedele ciò che poteva riconoscere come allagato.

4.3 INTEGRAZIONE DATO OTTICO

La classificazione di emergenza ottenuta dai dati Sentinel-1 si basa sulla presenza d'acqua sulla superficie del terreno e descrive quindi in maniera puntuale l'estensione degli allagamenti nei tre momenti di acquisizione delle immagini che sono state analizzate.

L'alluvione tuttavia è un fenomeno dinamico, l'acqua si è mossa sul territorio ed è transitata su aree che non sono state classificate dal radar poiché nel momento di acquisizione delle immagini l'acqua era già defluita altrove. Per identificare tali aree e per definire tutte le zone colpite è stato introdotto il dato ottico Sentinel-2 disponibile per il 13 dicembre 2017. In questo caso inoltre, il lasso temporale che passa tra la prima e la seconda immagine radar utilizzate è quasi di 36 ore. La mancanza di informazione nel radar può essere sopperita dall'introduzione del dato ottico (Figura 4. 36)

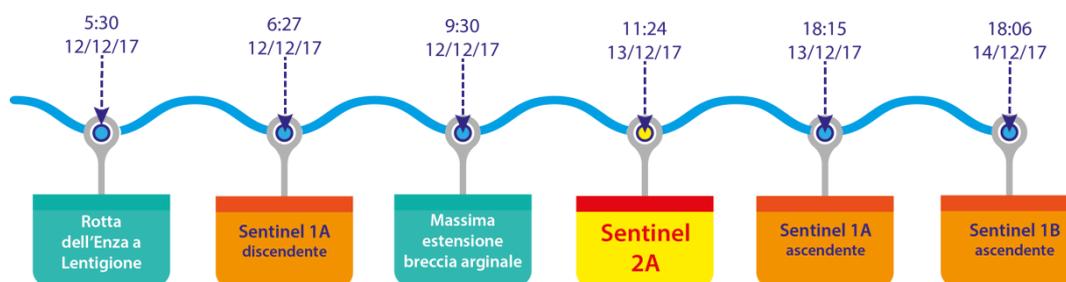


Figura 4. 36. Evoluzione temporale degli eventi e disponibilità di dati

La semplice visualizzazione a falsi colori (Figura 4. 37) evidenzia nell'immagine Sentinel-2 relativa al post evento la presenza di fango o acqua (area in color ciano), situazione completamente assente nell'immagine del 3 dicembre.

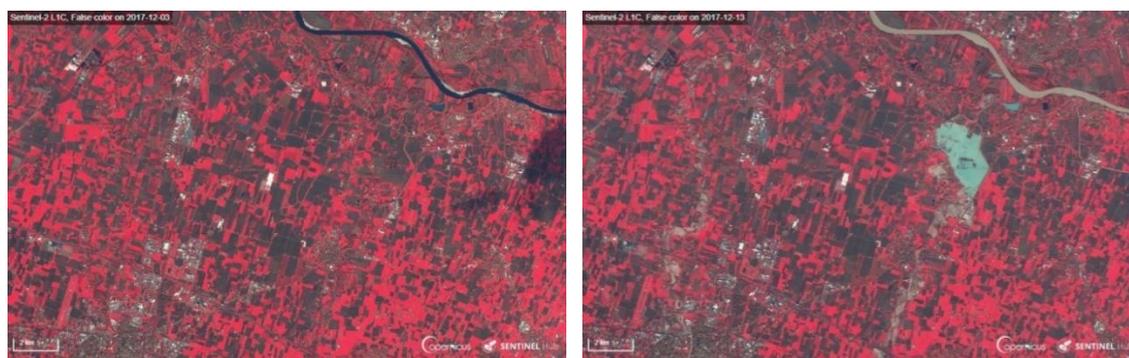


Figura 4. 37. Visualizzazione in falso colore. A sinistra Sentinel-2 03/12/2017 (pre-evento) a destra Sentinel-2 13/12/2017 (post-evento) [46]

Il dato ottico, in questo senso, ha una grande capacità descrittiva, che assume ancor più forza se viene collocata all'interno del set di informazioni che abbiamo acquisito analizzando il radar.

Tale prima osservazione ha fatto nascere l'interesse per indagare in maniera più approfondita i valori di riflettanza. I suoli e la vegetazione hanno firme spettrali diverse in corrispondenza della regione del rosso e dell'infrarosso, è proprio tale caratteristica che viene usata come discriminante tra le due coperture nell'indice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Si è pensato che tale indice potesse evidenziare i fenomeni di nostro interesse poiché è sensibile alla presenza d'acqua superficiale ed è basso in presenza di suolo nudo (suoli argillosi circa 0,1). L'NDVI nello specifico è il rapporto tra la differenza e la somma dei valori di riflettanza ρ nel vicino-infrarosso e nel rosso.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad -1 \leq NDVI \leq 1$$

Tale indice, essendo normalizzato, restituisce un valore compreso tra -1 e +1. Indicativamente varia in funzione della copertura del suolo nel seguente modo:

- Valori negativi : acqua
- Valori positivi prossimi a zero: suolo (0 - 0.2)
- Valori compresi tra 0.2 e 0.8: vegetazione (0.2 - 0.35 per una vegetazione rada, NDVI>0.35 vegetazione rigogliosa)

Si è pensato che gli effetti dell'alluvione sul terreno siano principalmente due.

- Presenza di acqua. L'effetto più evidente è la presenza di acqua superficiale nelle zone in cui l'alluvione è ancora in corso.
- Presenza di materiale fangoso. Nel caso in cui l'acqua esondata dal fiume sia transitata, ma non sia più presente si potrebbero essere verificati due fenomeni, anche complementari: l'acqua del fiume in piena ricca di sedimenti fangosi li ha depositati al suolo al suo passaggio; oppure nei punti in cui la corrente ha raggiunto velocità sostenute si potrebbero essere verificati fenomeni di erosione ed estirpamento della vegetazione presente.

Gli effetti visibili da satellite, quindi, possono essere presenza d'acqua o residui fangoso-argillosi su suoli precedentemente coperti, eventualmente, da vegetazione rigogliosa (Figura 4. 38). Entrambi i fenomeni dovrebbero portare all'abbassamento del NDVI. Ovviamente si ipotizza che la copertura del suolo tra il 3 e il 13 dicembre

sia pressoché la stessa, e che quindi gli unici cambiamenti siano dovuti proprio al passaggio dell'alluvione.



Figura 4. 38. Dettaglio dell'area attorno al Parma prima e dopo l'esondazione in due immagini Sentinel-2: S2 del 03/12/17 a sinistra e S2 del 13/12/17 a destra, con visualizzazione a falsi colori. Nell'immagine a destra sono evidenti i segni del passaggio dell'acqua tracimata durante l'evento alluvionale [46]

Sulla base di tali osservazioni si è passato a produrre gli NDVI sia per l'immagine del 03/12/2017 sia per quella del 13/12/2017.

Dovendo confrontare due immagini acquisite in momenti differenti è stato necessario eseguire la correzione atmosferica sui due dati. Nello specifico è stato applicato l'algoritmo ATCOR in Geomatica 2017. Nel dato Sentinel-2 la banda relativa al NIR è la 8, mentre il rosso è la 4. L'NDVI calcolato per ciascuna immagine è mostrato in Figura 4. 39.

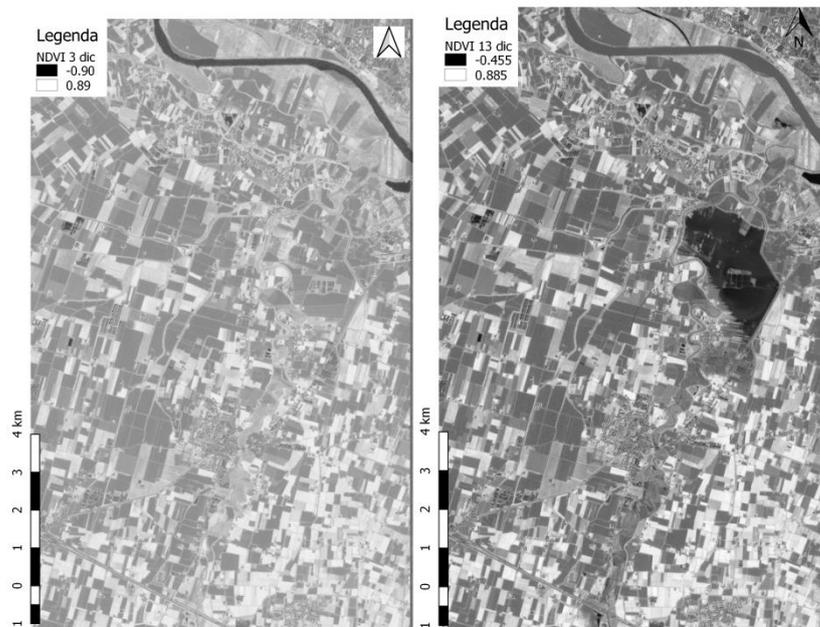


Figura 4. 39. NDVI del 03/12/2017 (sinistra) e 13/12/2017 (destra)

Analizzando le variazioni dell'indice tra le due date si ha avuto conferma di quanto ipotizzato sopra. In termini di NDVI si sottolinea come l'acqua, dove è passata, ha

abbassato l'indice, sia su suoli vegetati (Figura 4. 40) sia su suoli nudi (Figura 4. 42); nei corsi d'acqua in piena, invece, si veda il Po ad esempio (Figura 4. 41), c'è stato un aumento dell'indice, dovuto al materiale organico e fangoso presente in sospensione.

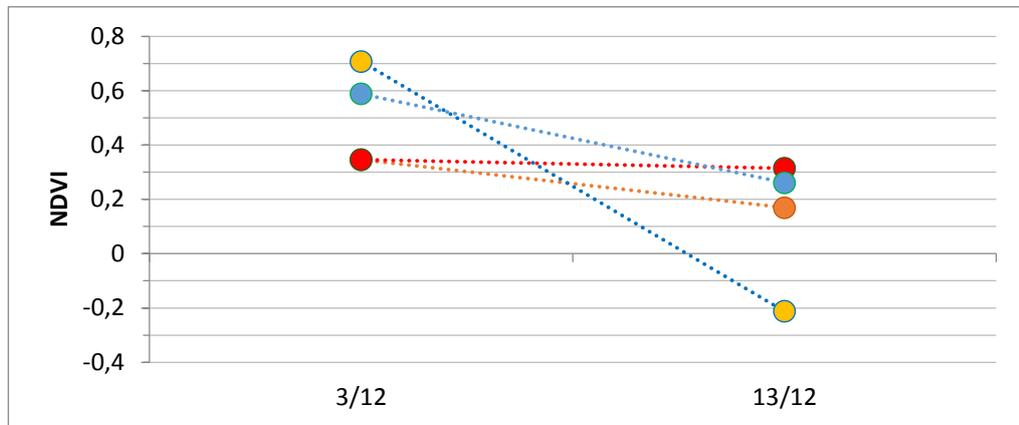


Figura 4. 40. Variazione di NDVI tra pre e post evento in pixel coperti da vegetazione. Il 3 dicembre hanno tutti NDVI>0.3. Il punto blu corrisponde a un pixel che il 3 era caratterizzato da una vegetazione rigogliosa e il 13 era allagato (NDVI negativo).

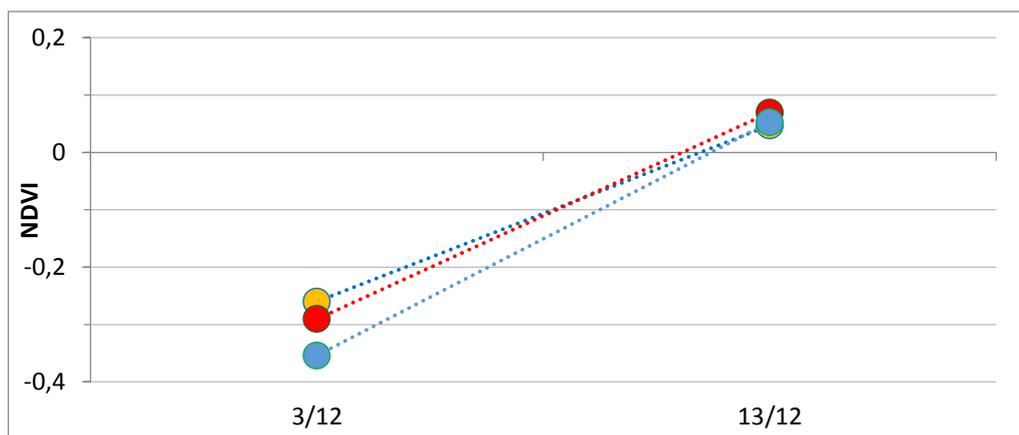


Figura 4. 41. Variazione di NDVI tra pre e post evento in pixel corrispondenti al Po. NDVI in seguito all'evento diventa positivo.

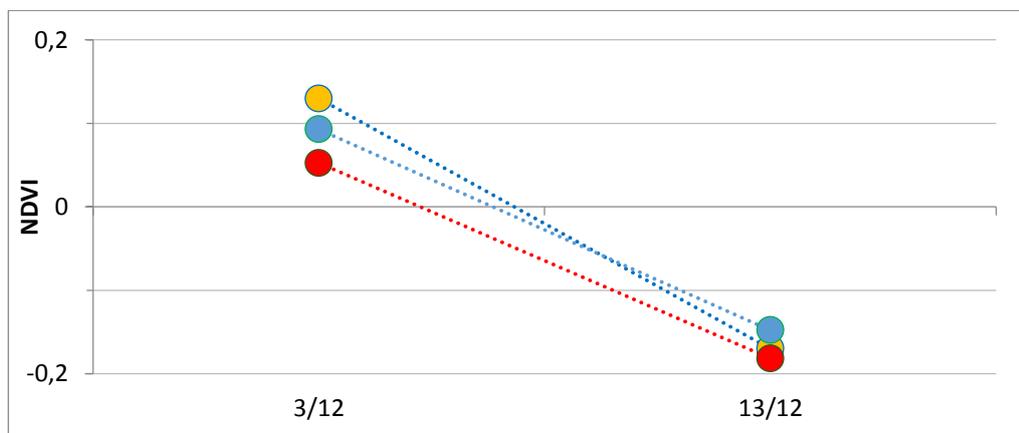


Figura 4. 42. Variazione di NDVI tra pre e post evento in pixel "suolo nudo". Il 3 dicembre NDVI<0.2.

Si è scelto di individuare una soglia che quantificasse l'abbassamento di NDVI delle aree che hanno subito il passaggio dell'alluvione.

Layer Stacking NDVI	
Banda 1	NDVI Sentinel-2 03/12/2017
Banda 2	NDVI Sentinel-2 13/12/2017

Tabella 4. 7. Layer Stacking NDVI pre e post evento

Partendo dal *layer stacking* (Tabella 4. 7), si è proceduto calcolando la differenza tra i due NDVI, ottenendo il file di output in Figura 4. 43, in cui ogni pixel è dato dalla differenza tra il valore che l'indice assumeva prima e dopo l'esonazione. Le differenze positive sono indicazione dell'abbassamento dell'indice, quelle negative di aumento. Notiamo dalla mappa che solo nel caso del Po, si ha avuto un aumento di NDVI che, come evidenziato in precedenza, in seguito alle forti piogge porta con sé molti sedimenti.

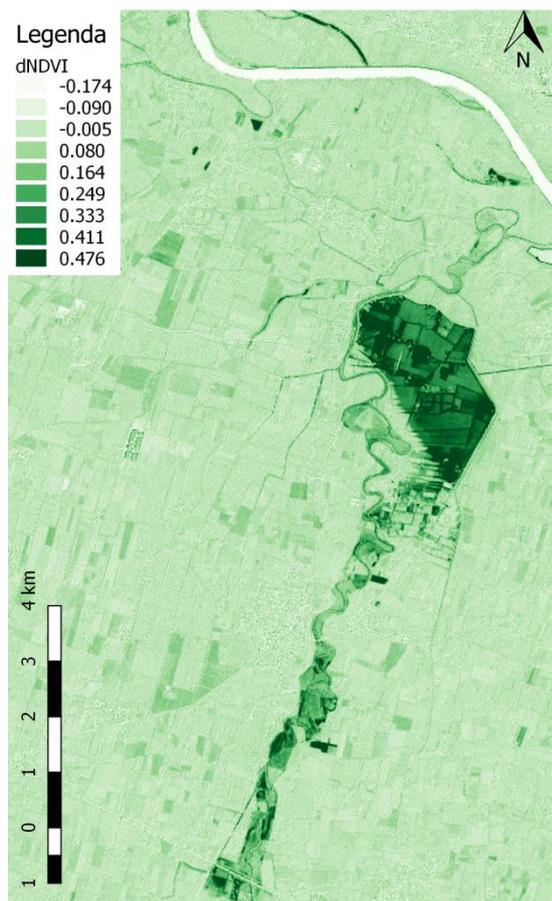


Figura 4. 43. Differenza di NDVI tra pre e post evento

È stato individuato come buon valore di soglia un ΔNDVI maggiore o uguale a 0.18.

$$\text{Allagamenti} \rightarrow \Delta\text{NDVI} = \text{NDVI}_{3 \text{ dic}} - \text{NDVI}_{13 \text{ dic}} \geq 0.18$$

Il risultato ottenuto è riportato in Figura 4. 44.

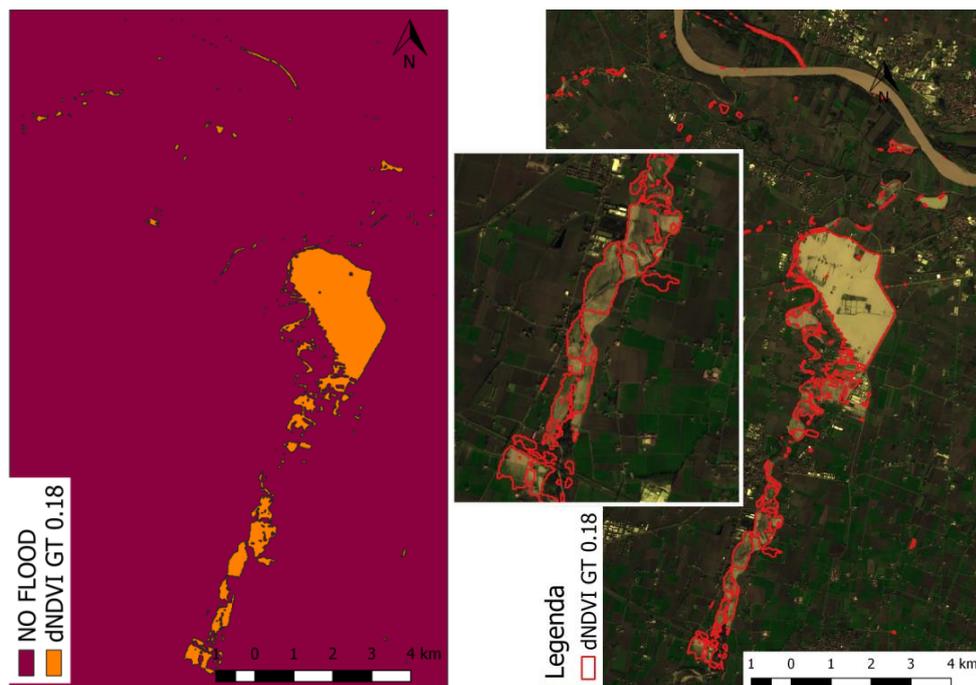


Figura 4. 44. Classificazione ottenuta con soglia su variazione di NDVI a sinistra. A destra sovrapposizione degli allagamenti ottenuti dalla classificazione con le tracce lasciate dall'esondazione visibili sull'immagine Sentinel-2 del 13 dicembre.

La classificazione ottenuta delinea quasi completamente le aree che si volevano identificare. Si è poi confrontato il risultato con la classificazione svolta sulle tre immagini radar. Da tale sovrapposizione (Figura 4. 45), si evince come i due prodotti siano complementari, e vadano a completarsi a vicenda, andando a descrivere quella che potremmo definire la massima estensione dell'alluvione. Dove, per massima estensione, intendiamo tutte le aree che in un certo momento sono state soggette al transito dell'acqua di esondazione.

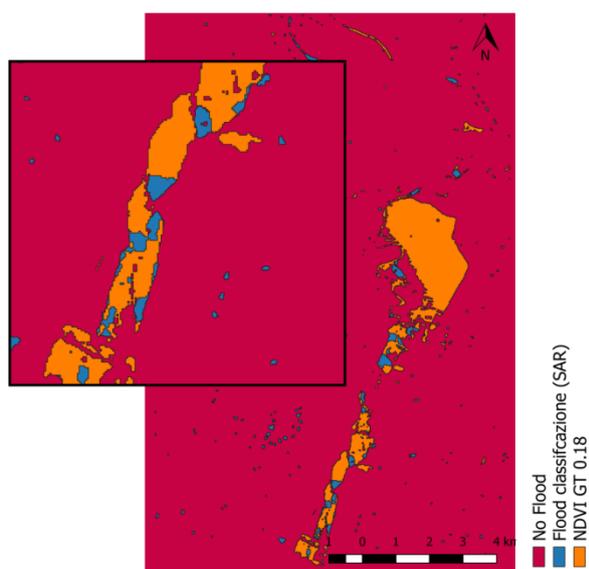


Figura 4. 45. Dettaglio sovrapposizione della classificazione ottenuta dal radar e quella dal dato ottico. Le due classificazione sembrano completarsi a vicenda

A tal proposito, il servizio di Emergenza del Copernicus, all'interno della stessa attivazione EMSR260, ha in seguito prodotto una *grading map*, in cui vengono delineate tutte le aree colpite dall'alluvione. Il prodotto ottenuto dall'unione delle due classificazioni, ottica e radar, ben rappresenta le superfici identificate da tale *grading map* come si mostra in Figura 4. 46.

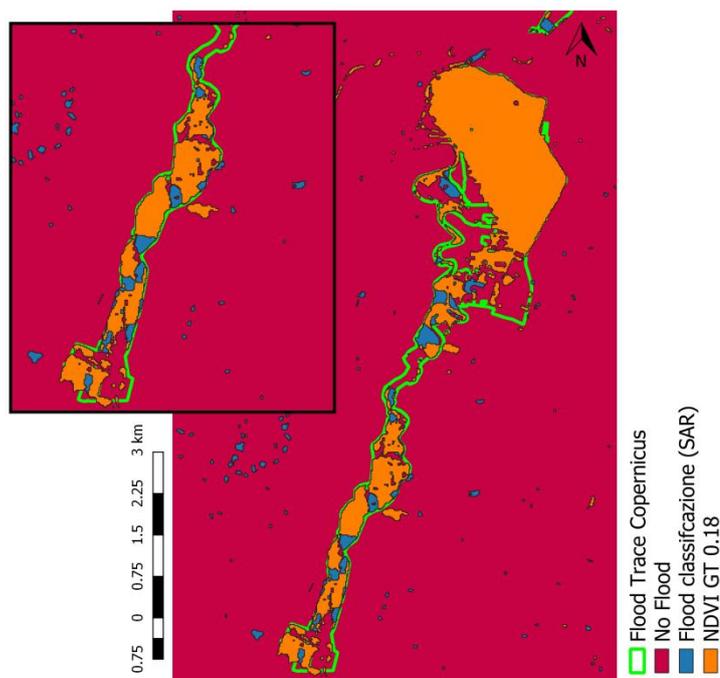


Figura 4. 46. Sovrapposizione della classificazione SAR, ottica con la *grading map* del Copernicus

Infine, come ultima osservazione si riporta il fatto che l'area a est di Lentigione, che non viene identificata da nessuna delle nostre classificazioni, ma che rientra invece nell'area indicata come alluvionata dal Copernicus, è un'area industriale (Figura 4. 47), la cui superficie, per come viene vista da satellite (ottico o radar che sia), è per la maggior parte costituita da tetti molto riflettenti dei capannoni, che pertanto non potranno essere mai classificati come aree allagate lavorando con una risoluzione a 10m o superiore.



Figura 4. 47. Dettaglio area non classificata né da ottico né da radar. A sinistra classificazioni su Sentinel 2 del 13/12 a destra immagine da Google Earth

4.4 MONITORAGGIO

La classificazione precedente, definita di emergenza, delimitava l'estensione degli allagamenti dovuti alla tracimazione o rottura degli argini nelle ore successive a tali eventi sia lungo il Parma sia lungo l'Enza.

Nel caso del Parma, con il cessare delle piogge la situazione di emergenza è rientrata rapidamente.

Per quanto riguarda l'evento lungo l'Enza invece, la rottura dell'argine all'altezza di Lentigione nella mattina del 12 dicembre ha causato la dispersione di grandi volumi di acqua su tutto il territorio compreso tra l'abitato di Lentigione e il comune di Brescello. Alle ore 14:00 del 12 dicembre è stato stimato un volume esondato di circa 10 milioni di metri cubi [33], che ha interessato l'area compresa tra il corso dell'Enza ed il canale consortile.

Anche nel caso dell'Enza, con il cessare delle piogge, i livelli idrometrici sono tornati nella norma e il fiume è tornato nel suo alveo naturale, l'acqua non ha più potuto alimentare il bacino alluvionale che la rottura aveva creato a valle. Già nella mattina del 13, infatti, si può vedere nella Figura 4. 48 che nel punto della breccia, il fiume si è ormai ritirato nel suo corso, lasciando solo devastazione.

Tuttavia, l'acqua (e il fango) dal punto di fuoriuscita si è spostata a valle in direzione nord nord-est dove, il naturale deflusso a gravità è stato bloccato dall'argine maestro del Po a nord e quello del Canalazzo di Brescello a nord-est, e quindi i volumi esondati sono stati trattenuti nell'area (Figura 4. 48).



Figura 4. 48. Ciò che rimane dell'argine dell'Enza nel punto di rottura a Lentigione il 13/12/2017 (fonte "meteo da Correggio", Facebook). A destra l'argine maestro del Po impedisce il deflusso a gravità dell'acqua (foto di Elisa Contini/LaPresse)

Nella sera del 12 dicembre, non appena l'abbassamento dei livelli idrometrici lo hanno permesso, è stato predisposto un taglio sull'argine del canale consortile per far defluire

l'acqua rimasta intrappolata che ha completamente coperto la campagna. L'apertura della breccia ha permesso il deflusso di una parte dei volumi. Tuttavia è stato necessario l'utilizzo di pompe per permettere il prosciugamento dell'area, altrimenti impossibile (Figura 4. 49).



Figura 4. 49. Utilizzo di pompe per il prosciugamento dei volumi di acqua esondati [39]

Per tali motivi, in questa seconda fase dello studio, si è ritenuto importante concentrare l'attenzione sull'Enza, andando a valutare lo spostamento geografico e temporale delle acque esondate. Si è scelto di proseguire l'analisi andando a monitorare e stimare i tempi di ritenzione dell'acqua esondata. L'analisi si è focalizzata sull'area maggiormente colpita, ovvero la zona delimitata a Est dall'Enza, a nord dall'arginatura del Po e a nord Est da quello del Canalazzo (subset in Figura 4. 50), dove l'acqua esondata ha coperto il territorio per giorni.

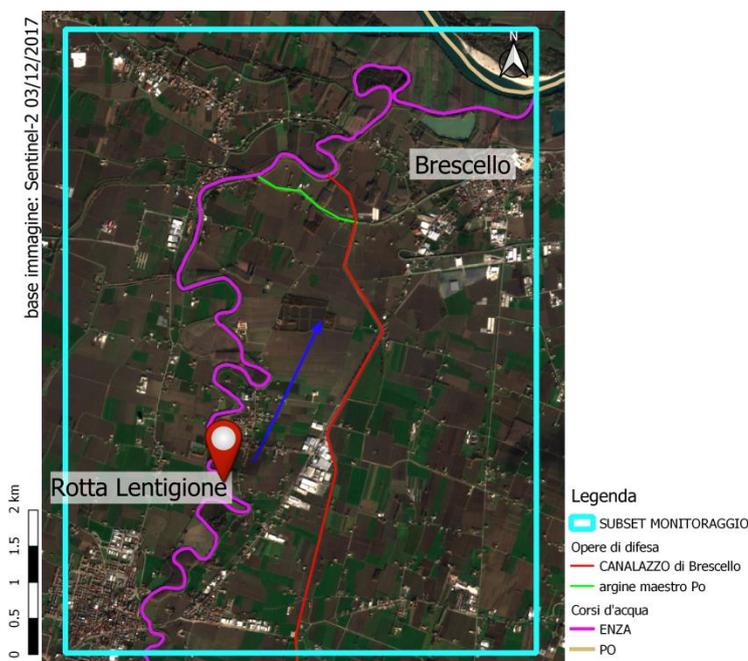


Figura 4. 50. Subset su cui è stato condotto il monitoraggio. La freccia blu indica la direzione in cui si è propagata l'esondazione. Sono stati evidenziati i tratti arginali che bloccavano il deflusso dell'acqua a valle.

L'analisi ha riguardato il monitoraggio di suddetta area nei quindici giorni seguenti l'esonazione.

Le giornate successive al 12 dicembre sono state caratterizzate da cielo coperto, salvo rare eccezioni (13, 20 e 23 dicembre), perciò non è stato possibile procedere a un monitoraggio attraverso i dati Sentinel-2. Si è quindi optato per l'impiego di immagini radar Sentinel-1.

Per produrre la mappa di emergenza, la necessità di dati, aveva imposto l'utilizzo di tutti quelli disponibili, quindi sono state analizzate insieme immagini acquisite in modo ascendente e discendente. Per il monitoraggio, invece, si è cercato di selezionare i dati per poter lavorare con informazioni il più possibile omogenee. Aumentando il numero di immagini da analizzare contemporaneamente, distribuite su un più esteso arco temporale, il segnale è di più difficile interpretazione. In caso di emergenza si era assunto che le uniche variazioni fossero imputate alla presenza-assenza di acqua, essendo questo passaggio molto netto. Nel monitoraggio, tale passaggio diventa più incerto, ed è necessaria molta più attenzione per riconoscere tale fenomeno, ed escludere eventuali altri contributi.

Per tale motivo, sono state ridotte almeno le variabili dovute alla modalità di acquisizione delle immagini. Valutare assieme acquisizione ascendente o discendente, infatti, all'interno di questa analisi, potrebbe provocare aumenti o abbassamenti del *backscatter* non trascurabili e che potrebbero portare alla sbagliata interpretazione del segnale, e quindi a una classificazione errata.

In base alla disponibilità, si è optato per lavorare solo su immagini SAR ascendenti (Tabella 4. 8).

Sensore	Data acquisizione	Modalità acquisizione
S1A	13/12/2017 17.15 UTM	Ascendente
S1A	14/12/2017 17.05	Ascendente
S1B	19/12/2017 17.14	Ascendente
S1A	20/12/2017 17.06	Ascendente
S1B	26/12/2017 17.05	Ascendente

Tabella 4. 8. Dati radar Sentinel-1 disponibili tra il 12 e il 26 dicembre 2017 in modalità ascendente

Come spiegato in precedenza, tutte le immagini, dopo essere state scaricate dal *Copernicus Open Access hub* [42], hanno subito un *pre-processing*: correzione radiometrica e geometrica (*range-doppler terrain correction*) con il software SNAP. Sono state poi tutte importate in ENVI, dove sono state accorpate in un unico file, attraverso un layer stacking, per poter procedere con l'analisi multitemporale. E' stato ottenuto un file con cinque bande, ciascuna con le informazioni di una data specifica.

In Tabella 4. 9 sono riportate le classi, e la loro descrizione, scelte considerando che l'obiettivo della classificazione è la generazione di informazioni geospaziali relative all'evoluzione della superficie coperta da acqua.

CLASSI	
Flooded until the 13th	Aree allagate solo fino al 13 dicembre
Flooded until the 14th	Aree allagate solo fino al 14 dicembre
Flooded until the 19th	Aree allagate solo fino al 19 dicembre
Flooded until the 20th	Aree allagate solo fino al 20 dicembre
Flooded until the 26th	Aree allagate solo fino al 26 dicembre
Water basins	Corpi idrici
Urban	Aree urbanizzate
Vegetated	Suolo (agricolo) vegetato
Bare soil	Suolo (agricolo) nudo

Tabella 4. 9. Classi per la produzione della mappa tematica relativa al monitoraggio degli allagamenti

Lavorare su cinque bande, invece che con tre, è ovviamente più complesso. La classificazione risulta più difficile, oltre che per i motivi spiegati sopra, perché l'aiuto che può darci la visualizzazione cromatica in questo caso è limitata. L'occhio umano può gestire solo tre colori primari (e loro combinazioni) alla volta, proprio per questo la visualizzazione RGB ci permette di visualizzare contemporaneamente le informazioni di tre immagini differenti associando un colore tra rosso, verde e blu a ciascuna. Quindi, visualizzare in un'unica immagine le informazioni date da tutte e cinque è impossibile. Le composizioni RGB mostrate in Figura 4. 51 sono risultate indispensabile per individuare i pixel di addestramento di ciascuna classe.

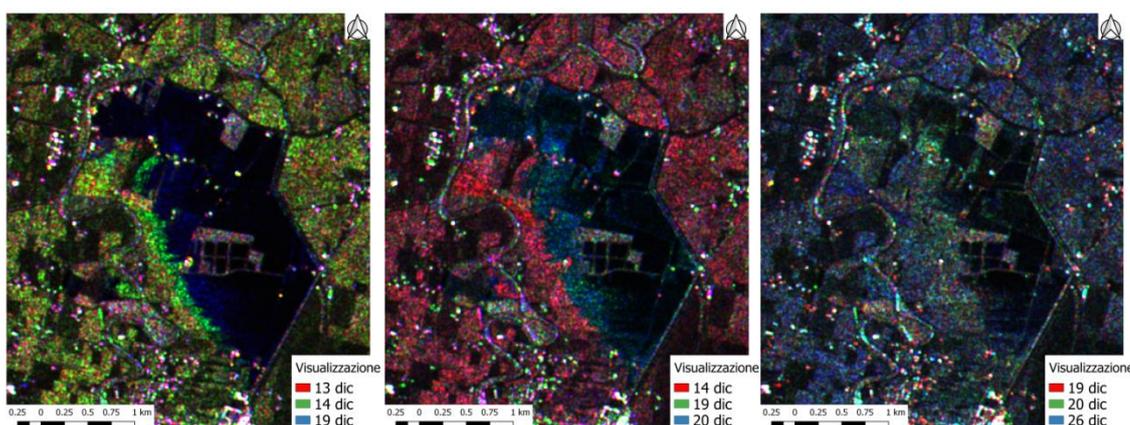


Figura 4. 51. Composizioni RGB delle diverse acquisizioni sentine1 disponibili.

Ricordiamo che secondo la sintesi additiva dei colori precedentemente spiegata, quello che viene visualizzato in nero, ha assunto valori prossimi a zero in tutte le bande visualizzate, quindi dovrebbe risultare allagato. Osservando le visualizzazioni proposte in successione Figura 4. 51, vediamo che le zone scure vanno via via riducendosi nel tempo. Basandoci solo sulla prima composizione è possibile notare che tutta l'area in

nero era allagata il 13 il 14 e il 19, ma non sappiamo se l'acqua è rimasta solo fino al 19 o anche il 20 o il 26. Quindi, di tutta l'area che vediamo in nero, non avremmo potuto distinguere la classe *flooded until 19th*, da quella *flooded until 20th o 26th*. Per tale motivo, nel definire le ROI, è stato necessario procedere per *step*, lavorando ogni volta sulla composizione che meglio evidenziava la classe di nostro interesse.

Come supporto alla classificazione, è stato sfruttato il fatto che il segnale radar è in grado di penetrare il terreno per qualche centimetro, ed è particolarmente sensibile alla presenza di umidità. Il SAR è così sensibile a tale parametro che viene spesso impiegato per misurare l'umidità del suolo (*soil moisture*) [47], [48]. L'influenza dell'umidità sul *backscatter* per noi è di grande aiuto poiché è un meccanismo diametralmente opposto al contributo della presenza di acqua superficiale. Nell'analizzare il segnale, ai fini della classificazione, dobbiamo tenere presente due fattori:

- Presenza di acqua sulla superficie del terreno: pixel caratterizzato da abbassamento (quasi annullamento) del valore di *backscattering*
- Umidità del suolo: innalzamento del valore di *backscattering*

Nel caso di un monitoraggio di un'alluvione i due fenomeni sono consequenziali e vanno a identificare in maniera precisa con un picco ben visibile nella variazione di *backscatter* la scomparsa dell'acqua dalla superficie. Prendiamo come esempio l'andamento di alcuni pixel che fanno parte della classe *flooded until 13th* riportati nel Grafico 4. 5. Il 13 dicembre *backscatter* è praticamente nullo, quindi sicuramente i pixel rappresentano una superficie coperta d'acqua. Con ogni probabilità tra il 13 e il 14 l'acqua è drenata spostandosi in zone limitrofe per gravità; l'acqua è scomparsa dalla superficie lasciando il suolo completamente saturo. Questo si traduce in un picco del *backscatter* il giorno 14. I pixel a cui ci stiamo riferendo, quindi, saranno quelli verdi nella prima composizione di Figura 4. 51, avendo un picco alla data associata al canale del verde. Tornando al Grafico 4. 5, vediamo che in seguito i pixel si "asciugano" e assumono valori intermedi.

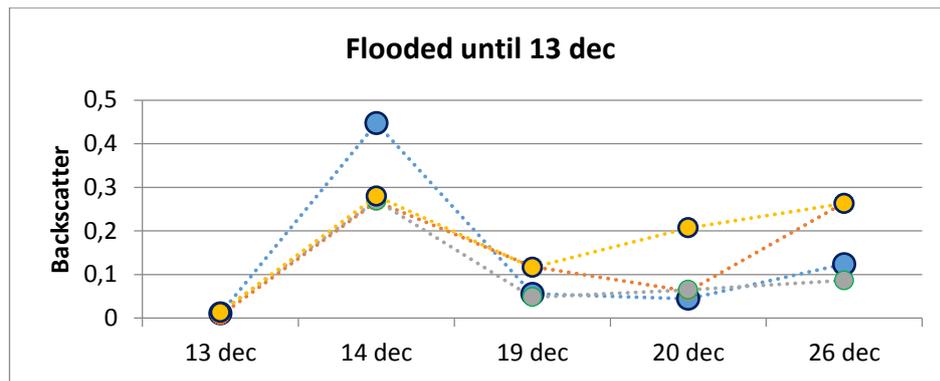


Grafico 4. 5. Valori di *backscatter* nelle date considerate di alcuni pixel di esempio per le “Aree allagate solo fino al 13 dicembre”

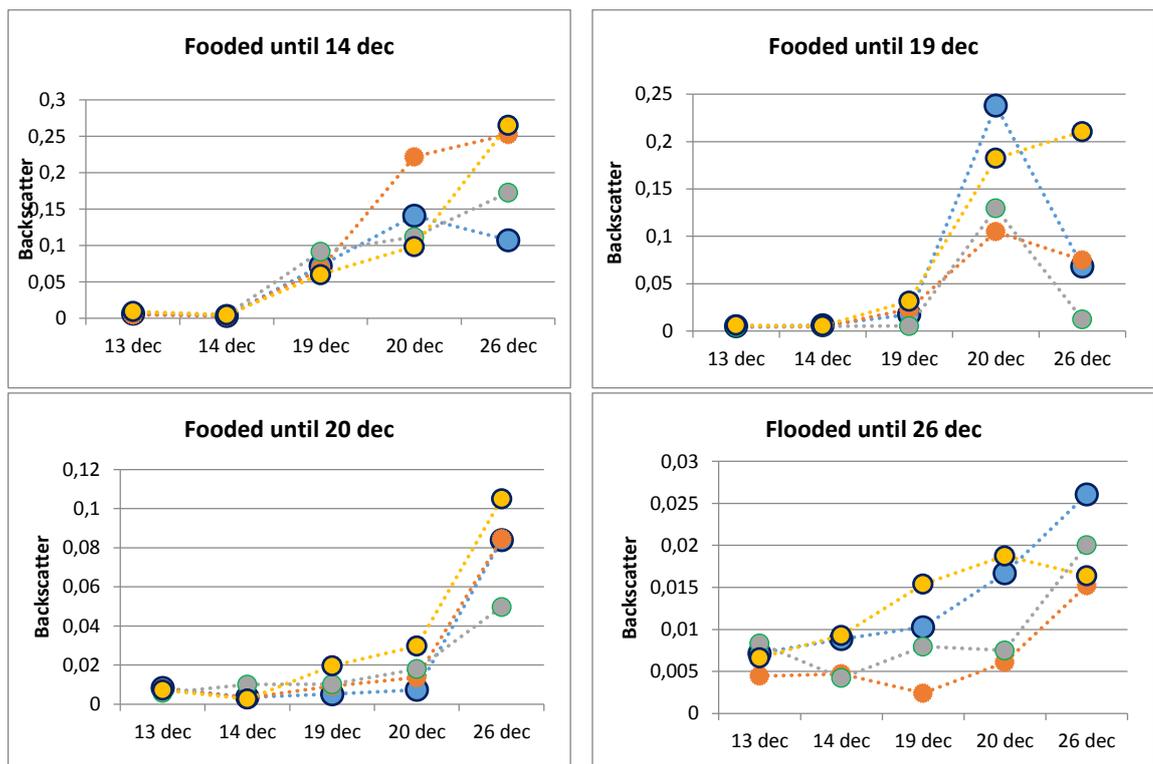


Figura 4. 52. Andamento del *backscatter* per alcuni pixel di esempio rappresentativi per ciascuna classe. Dall’alto in senso orario: allagamenti fino al 13, al 14, al 26 e al 20 dicembre.

In Figura 4. 52 sono riportate le variazioni di *backscatter* di alcuni pixel rappresentativi per ogni classe. Per tutte le classi è abbastanza evidente il picco (o almeno l’innalzamento) di *backscattering* sopradescritto; fa eccezione, ovviamente, la classe *flooded until 26th* che corrisponde alla presenza costante di acqua su tutto l’intervallo temporale preso in considerazione.

Proprio in riferimento a questa classe, è possibile fare un’osservazione riguardo la relatività dei valori di *backscatter* a cui accennavamo in precedenza. Guardando esclusivamente i pixel che entreranno nella classe *flooded until 26th* (Figura 4. 52), quindi allagati per tutto il periodo che ha coperto il nostro studio, potrebbe sembrare difficile individuare un comportamento omogeneo nella variazione di segnale tra i vari

pixel, e quindi difficilmente classificabile. Addirittura, ad una frettolosa osservazione, senza prestare attenzione all'ordine di grandezza del *backscatter* restituito, potrebbe sembrare che tali pixel non corrispondano ad allagamenti. Introducendo, invece, come riferimento nella visualizzazione (Figura 4. 53) l'andamento del segnale, nello stesso file, di un pixel classificato come *flooded until 13th*, risulta evidente la netta differenza tra le due classi, ed emerge, quindi, la suddetta omogeneità anche per la classe *flooded until 26th*.

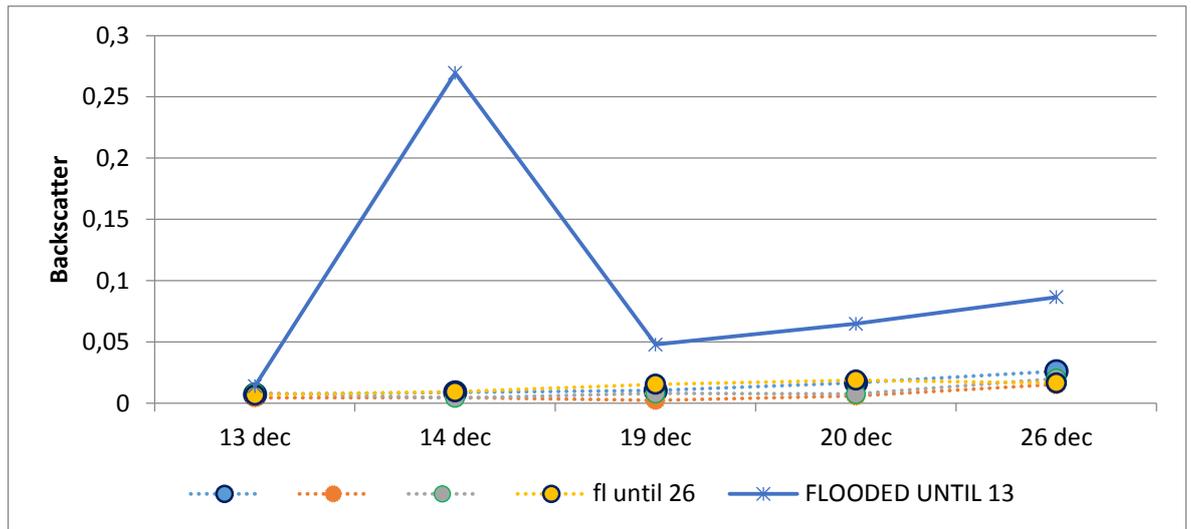


Figura 4. 53. Andamento del *backscatter* di pixel appartenenti alla classe *flooded until 26th* a confronto con un pixel allagato solo fino al 13 dicembre

Aiutandoci, quindi, con tecniche di visualizzazione e fotointerpretazione delle variazioni di segnale, è stato possibile selezionare per ciascuna classe un set di pixel di addestramento. Nella Figura 4. 54 si riporta l'andamento medio del *backscatter* per le *ROI* identificate per ciascuna classe.

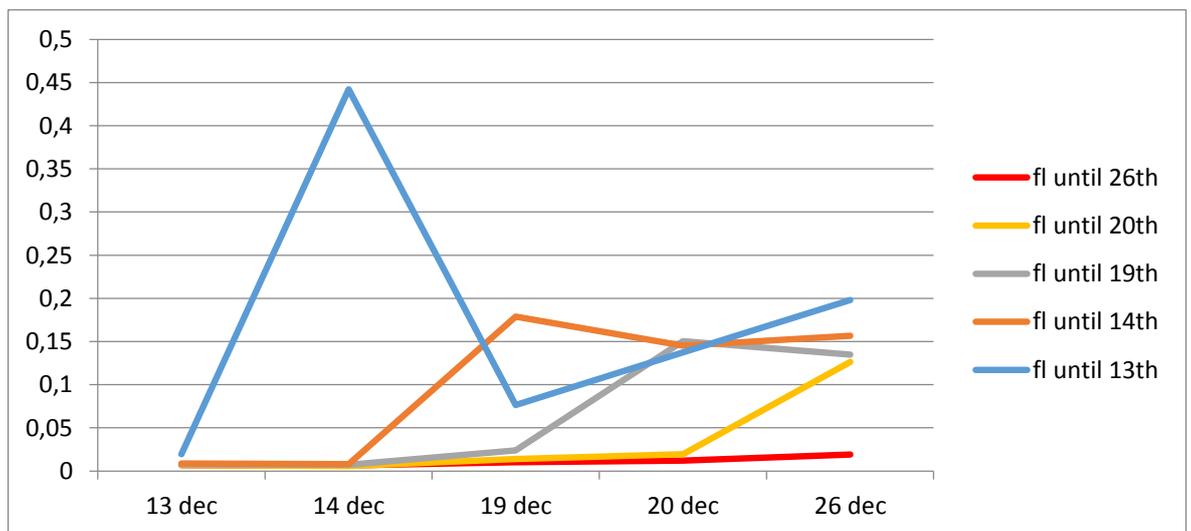


Figura 4. 54. Media del *backscatter* per le *region of interest* di ogni classe relativa ad allagamenti

Infine, è stata applicata la classificazione *supervised* con algoritmo di massima verosomiglianza fissando una probabilità di ricadere nella classe pari al 95%. Il risultato ottenuto è mostrato in Figura 4. 55. Come fatto per la classificazione di emergenza, le classi non relative agli allagamenti (*urban, vegetated, bare soil e unclassified*) sono state fatte confluire tutte nella macroclasse “*not flooded*”.

Il prodotto finale, pur avendo subito un filtraggio, risulta caratterizzato da geometrie piuttosto complesse. Per semplificarne la comprensione e l’interpretazione sono state generate cinque mappe tematiche che rappresentano l’estensione degli allagamenti in ciascuno dei giorni analizzati. Questo passaggio è stato possibile combinando le varie classi. È evidente, ad esempio, che il giorno 26 dicembre, gli allagamenti saranno descritti solamente dalla classe *flooded until 26th*, tutte le altre aree ormai non sono più allagate. Si ottengono, così, le cinque mappe tematiche, riportate in Figura 4. 56, con una semplice distinzione tra *flooded* e *not flooded* (oltre ai corpi d’acqua sempre presenti), che, se osservate in sequenza, permettono di individuare il ritrarsi dell’acqua nel tempo.

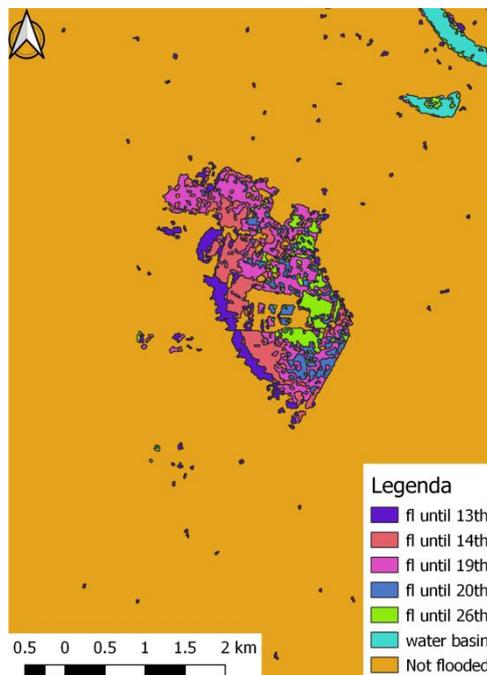


Figura 4. 55. Risultato della classificazione per il monitoraggio

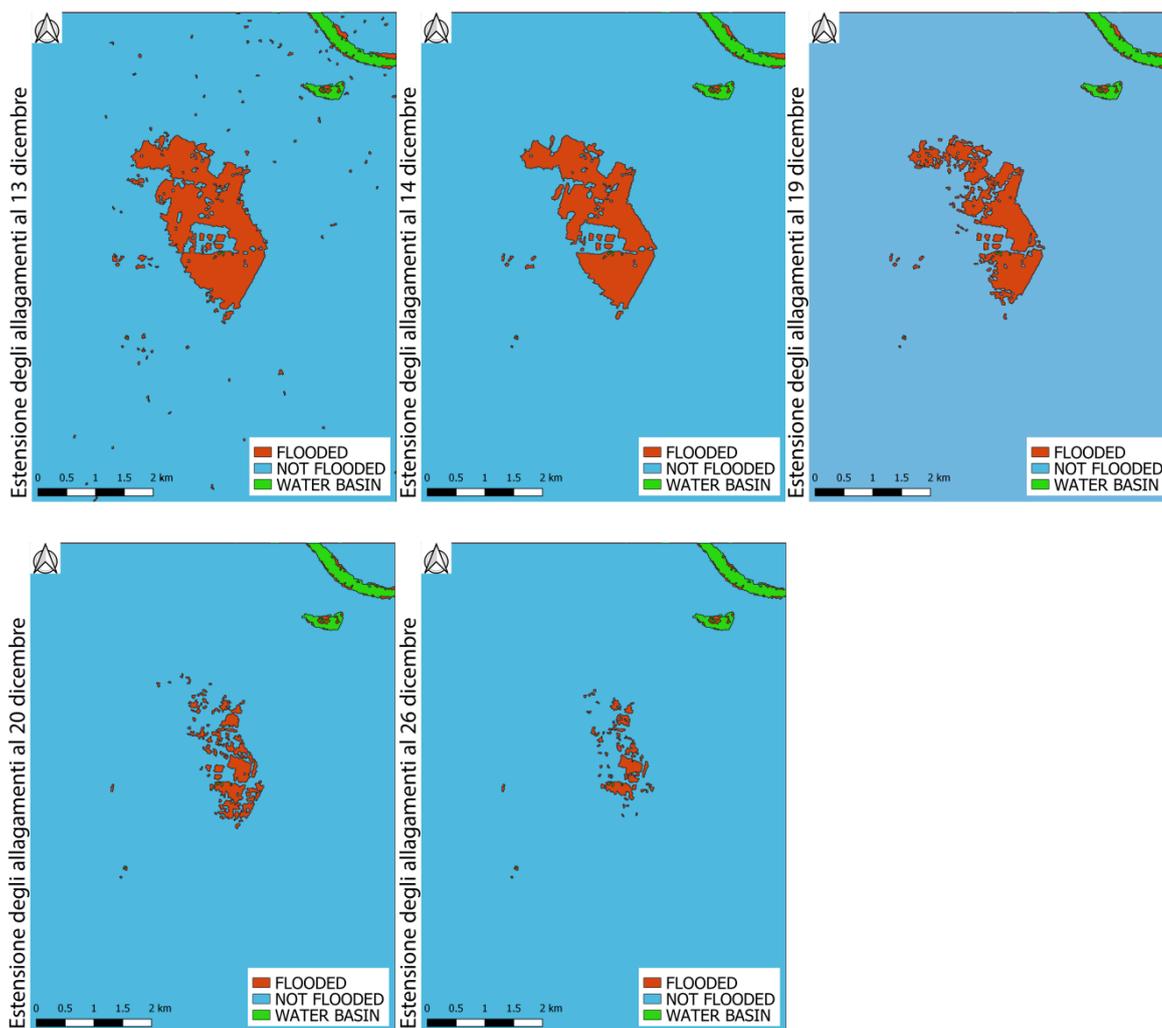


Figura 4. 56 Risultati della classificazione. Evoluzione dell' estensione degli allagamenti dal 13 al 26 dicembre

4.5 CRITICITÀ : RADAR E COPERTURA DEL SUOLO

Monitorare la riduzione degli allagamenti attraverso immagini radar prendendo in esame un maggior arco temporale rispetto al caso di emergenza, si è rivelato un processo complesso. Oltre alle difficoltà già espresse in precedenza, la diversa risposta del segnale di *backscattering* in funzione alla copertura del suolo ha costituito la principale criticità durante la classificazione.

L'area presa in analisi, situata nel pieno della pianura padana, è costituita principalmente da territorio agricolo. La copertura del suolo, quindi, è costituita da un'alternanza sistematica di suolo nudo e densamente vegetato.

Come visto in precedenza (cap. 3) il segnale radar varia in funzione di rugosità della superficie e costante dielettrica. In condizioni normali, a causa della rugosità, il suolo nudo restituisce valori di *backscattering* maggiori rispetto alla vegetazione, poiché il fogliame comporta un'ulteriore dispersione del segnale. In presenza di acqua, a causa

della costante dielettrica, in entrambi i casi si ha la riflessione del segnale radar che quindi annulla il *backscattering*.

Prendiamo come esempio il comportamento di due pixel caratterizzati da coperture diverse che sono stati colpiti dall'alluvione il giorno 13, come mostrano le immagini Sentinel-2 (Figura 4. 57).



Figura 4. 57. Dettaglio caratteristiche pixel di esempio in immagine pre e post evento: (A) suolo nudo, (B) vegetazione.

In Figura 4. 58 si riporta la variazione di segnale riscontrata durante la classificazione di emergenza sulle tre immagini Sentine-1 (12, 13 e 14 dicembre) per i due pixel. In entrambi i casi la comparsa di acqua il giorno 13 comporta un annullamento dello stesso. Se invece si vanno ad analizzare insieme i due pixel, nella stessa scala di riferimento, si rischia di perdere il picco negativo di segnale del pixel vegetato, che quindi, a confronto con il suolo nudo, potrebbe essere erroneamente classificato come allagato già dal 12 dicembre (Figura 4. 59).

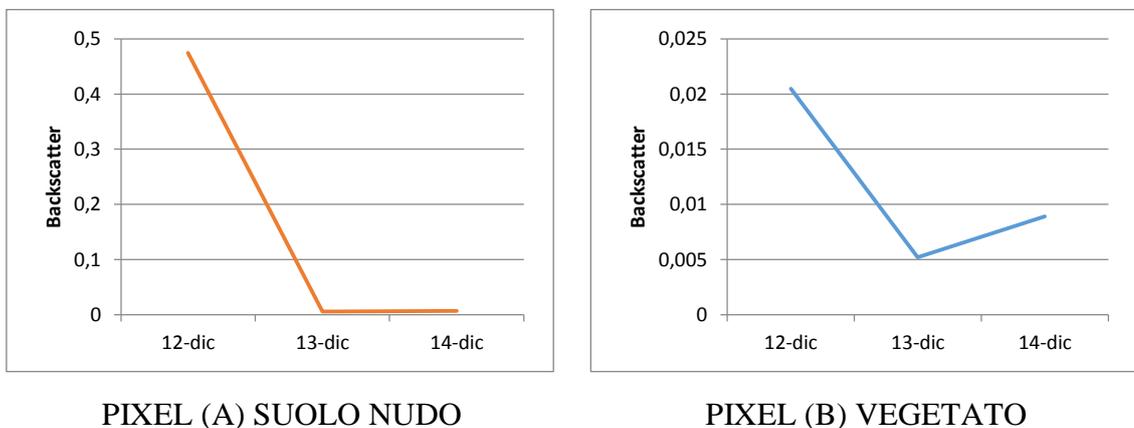


Figura 4. 58. Variazione di *backscattering* per un pixel di suolo nudo (sinistra) e un pixel vegetato (destra) su cui l'acqua è arrivata il 13 dicembre 2017

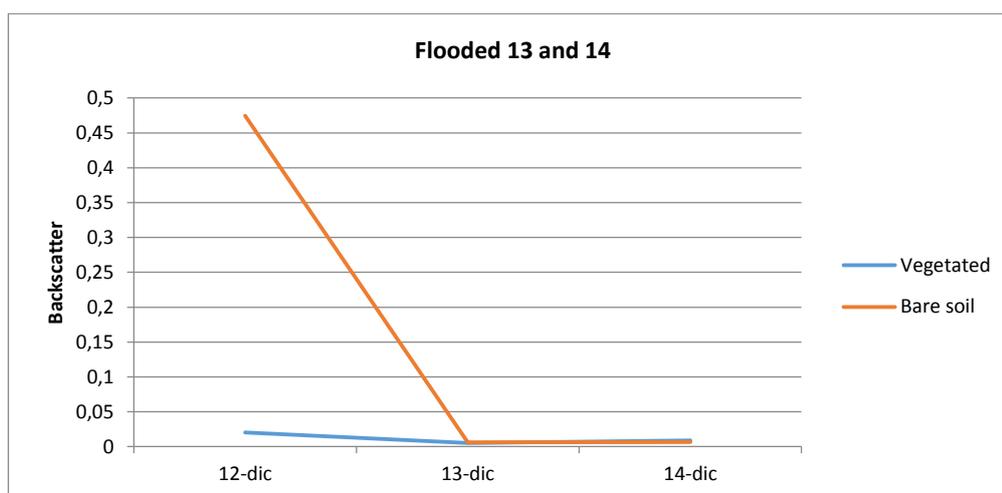


Figura 4. 59. Confronto tra pixel appartenenti alla stessa classe "flooded 13 and 14" ma relativi a coperture diverse

Questa problematica riscontrata nella prima classificazione, si è accentuata durante la classificazione di monitoraggio. Per comprendere la difficoltà è sufficiente osservare l'andamento della media del *backscatter* di alcune ROI riportate nel Grafico 4. 6: è evidente come il segnale restituito dal suolo vegetato (non allagato) sia molto vicino alla classe relativa agli allagamenti permanenti (fino al 26).

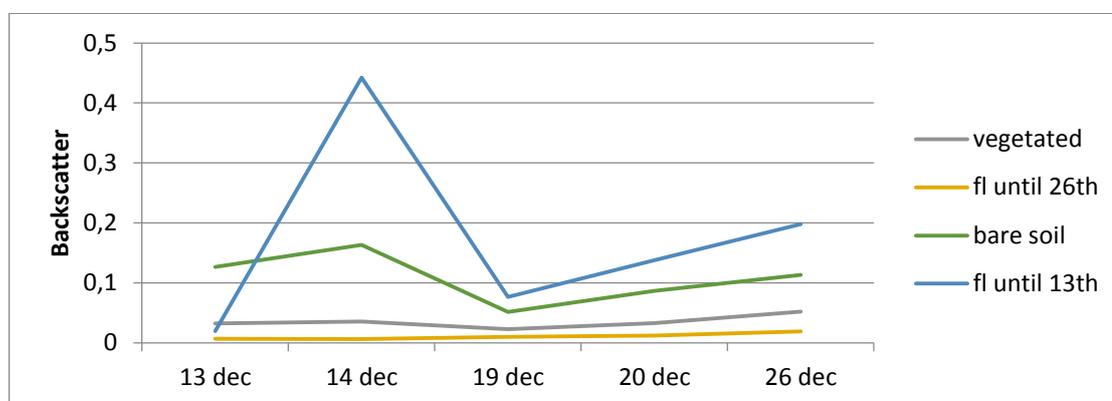


Grafico 4. 6. Media del *backscatter* delle ROI per alcune classi usate per il monitoraggio. Si evidenziano i bassi valori restituiti dalla vegetazione

Su analisi di lungo periodo risulta difficile valutare se il suolo sia effettivamente allagato o se si tratti solamente di un suolo vegetato. Tale difficoltà non è riscontrata solo dall'operatore in fase di individuazione delle *region of interest*, ma anche da parte del software in fase di classificazione. Nei primi tentati di classificazione ad esempio, alcuni pixel vegetati e allagati non sono stati riconosciuti dall'algoritmo come allagati. Il riscontro con dato ottico ci ha permesso di individuare tale mancanza. In seguito è stata prestata maggiore attenzione nella selezione delle ROI in quelle aree che nella Sentinel-2 del pre-evento erano vegetate.

Per eventuali studi su future alluvioni, soprattutto in assenza di dati ottici relativi all'evento di supporto all'analisi, sarebbe quindi interessante procedere con la stessa procedura di classificazione lavorando però separatamente per tipologia di copertura. Ciò sarebbe possibile creando delle maschere da applicare alle immagini radar, ad esempio sulla base dell'NDVI calcolato sul dato ottico pre-evento.

4.6 RISCONTRI DA SOPRALLUOGO

In data 20 maggio 2018, quasi sei mesi dopo l'evento alluvionale, è stato fatto un sopralluogo dell'area oggetto del presente studio. In particolare ci si è diretti da Parma verso Lentigione. Appena superato Sorbolo, ultimo comune del Parmense, si attraversa il ponte sull'Enza su cui si trova la stazione di misura dei livelli idrometrici di cui si è parlato nel paragrafo 5.1.

Da questo punto si iniziano a vedere i primi segnali dell'alluvione: ai lati del ponte si trovano dei depositi di sacchi di sabbia nell'evenienza ci siano nuove allerte (Figura 4.60). A causa del danneggiamento dell'argine a Lentigione, infatti, sono state adottate in via precauzionale soglie di allertamento e conseguenti fasi di emergenza "scalate" di un livello rispetto a quanto previsto dalla pianificazione di emergenza provinciale e comunale vigente [38].



Figura 4. 60. Enza a Sorbolo. Sacchi di sabbia ai lati del ponte

Seguendo il corso del fiume è stato raggiunto il punto in cui l'argine il girono 12 dicembre 2017 ha ceduto in tre punti. AIPO ha ripristinato l'argine leso per un tratto di

260 m (100 m rifacimento completo dell'arginatura e 100 m di ripristino della scarpata lato campagna), con la sezione e le quote precedenti l'evento del 12/12/17. Attualmente, però, questa porzione di manufatto non garantisce la stessa funzionalità di un tratto integro, poiché necessita di un tempo fisiologico di consolidamento [38]. La situazione attuale è mostrata in figura Figura 4. 61 e Figura 4. 62.



Figura 4. 61. Il tratto di argine ricostruito in fase di consolidamento (20/05/2018)



Figura 4. 62. Dettaglio argine ricostruito nel punto in cui l'Enza aveva aperto la breccia il 12/12/17

Il sopralluogo è proseguito dirigendosi verso la campagna oltre Lentigione, andando a cercare le zone che la classificazione di monitoraggio aveva identificato con la classe “flooded until 26th”. Per addentrarsi nell'area individuata in Figura 4. 63 con un cerchio blu si è percorsa Strada Bernieri da ovest a est terminando nel punto C.

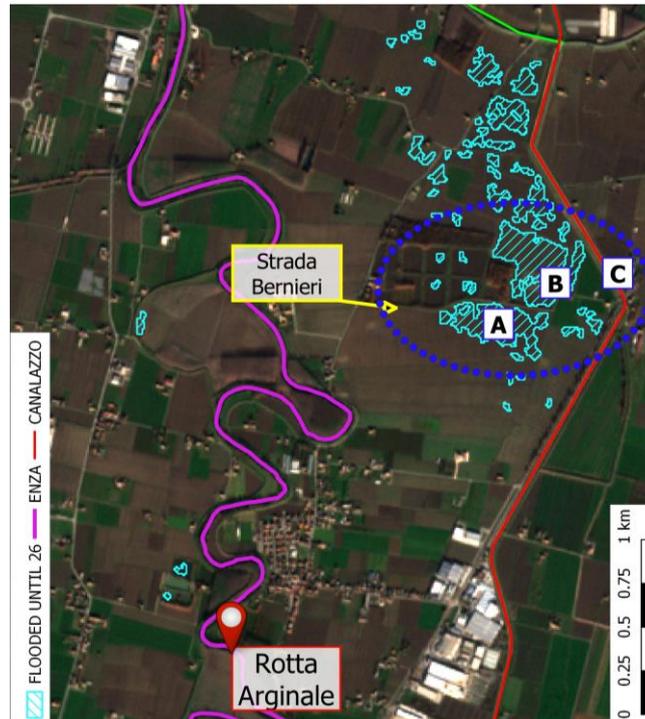


Figura 4. 63. Schema delle aree di interesse visitate durante il sopralluogo. Lo stato delle aree identificate con le lettere A, B e C sono state documentate con materiale fotografico

I campi situati all'imbocco della strada si presentano normalmente coltivati. Man mano che si avanza verso il punto A, però, si iniziano a scorgere delle macchie in cui le coltivazioni sembrano diradarsi Figura 4. 64.



Figura 4. 64. Coltivazioni che si iniziano a diradare in alcuni punti all'inizio di Strada Barbieri

Quando si arriva nei pressi del punto A, le coltivazioni lasciano spazio alla vegetazione spontanea che è cresciuta solo a macchie (Figura 4. 65). Proseguendo si vedono in maniera evidente gli effetti dell'alluvione: nell'area che il monitoraggio aveva classificato come allagata per più tempo: la superficie del sito è coperto da poligoni di disseccamento (Figura 4. 66, Figura 4. 67 e Figura 4. 68), anche detti *mud crack*.



Figura 4. 65. Le coltivazioni spariscono e la vegetazione cresce a macchie

Tali strutture sono tipiche dei sedimenti fangoso-argillosi che normalmente sono in grado di trattenere molta umidità, ma se sottoposti a fattori che ne provocano il disseccamento, arrivano a rottura, creando così le geometrie e i solchi ben visibili nelle immagini.



Figura 4. 66 Distesa di argilla nel punto A. Alternanza tra zone asciutte e umide



Figura 4. 67. Dettaglio dei *mud crack* dovuti all'essiccamento di materiale argilloso



Figura 4. 68. Poligono di disseccamento di materiale argilloso coprono tutta l'area A.

Nel punto B la situazione che si è presentata è leggermente migliore. Sono sempre presenti i *mud crack* ma il grano sta crescendo, seppur a macchie (Figura 4. 69).



Figura 4. 69. Crescita discontinua, a tratti assente, del grano nel punto (B).



Figura 4. 70. Tracce dei livelli raggiunti dall'acqua durante l'esondazione in una stalla vicino al punto (C).

La Strada Bernieri termina nel punto C, sull'argine del Canalazzo di Brescello, punto in cui la sera del 12 dicembre è stato praticato il taglio per permettere all'acqua di defluire. Il tratto di argine che è stato aperto e in seguito ricostruito è ancora ben evidente rispetto al tratto mai rimaneggiato Figura 4. 71.



Figura 4. 71. Tratto dell'argine del Canalazzo di Brescello ricostruito. Il 12 dicembre era stata aperta una breccia per consentire il deflusso dell'acqua esondata

Per dare un'idea sugli effettivi volumi invasati dall'area di studio si riportano di seguito le immagini dell'area vista dall'argine del Canalazzo durante il sopralluogo e sei mesi fa nel pieno dell'alluvione. Si prenda come riferimento l'edificio bianco (stalla della Figura 4. 70), che compare sia in Figura 4. 72 sia in Figura 4. 73.



Figura 4. 72. Visuale dell'area di studio dall'argine del Canalazzo di Brescello (20/05/2018)



Figura 4. 73. L'alluvione del 12/12/2017 vista dal Canalazzo. L'acqua defluisce nel canale attraverso il taglio che è stato aperto.

Il sopralluogo ha rappresentato un interessante spunto di riflessione sul presente studio. L'area oggetto della visita (punti A, B e C) è stata determinata in base ai risultati ottenuti dalle classificazioni delle immagini satellitari. Dalle evidenze sul territorio sembra proprio che le zone indicate siano quelle che hanno subito i maggiori danni dell'alluvione (per quanto riguarda il terreno agricolo). Tale riscontro positivo è stato senza dubbio un punto d'arrivo e una conferma: le tecniche di telerilevamento satellitare dovrebbero essere impiegate sempre di più in futuro proprio per ottimizzare gli interventi sul territorio individuando le criticità dalle immagini.

La situazione riscontrata in loco ha evidenziato alcune tematiche che sarebbe interessante sviluppare in eventuali studi futuri. Nel presente elaborato, infatti, è stata mappata e monitorata solamente la presenza di acqua in seguito all'alluvione. Tuttavia, come evidenziato dalle osservazioni *in situ*, l'acqua d'esonazione porta con sé grandi quantitativi di sedimenti fangosi e argillosi, che vengono depositati al suolo. I sedimenti rimangono anche quando scompare l'acqua interagendo inevitabilmente col terreno. Sarebbe interessante, quindi, ampliare l'idea di monitoraggio post alluvionale, e in seguito all'analisi sull'acqua, concentrarsi sugli effetti negativi che potrebbero avere sulle coltivazioni, ad esempio, i sedimenti da essa lasciati. Tale tipo di monitoraggio, successivo a quello proposto, dovrà interessare un arco temporale molto ampio. Si riportano come esempio le immagini Sentinel-2 dell'area di studio relativi ai sei mesi successivi all'evento (Figura 4. 74). Attraverso la visualizzazione a falsi colori, è

evidente come nell'area più colpita identificata dal presente studio la vegetazione abbia ripreso a crescere in maniera quasi omogenea solo a giugno 2018.

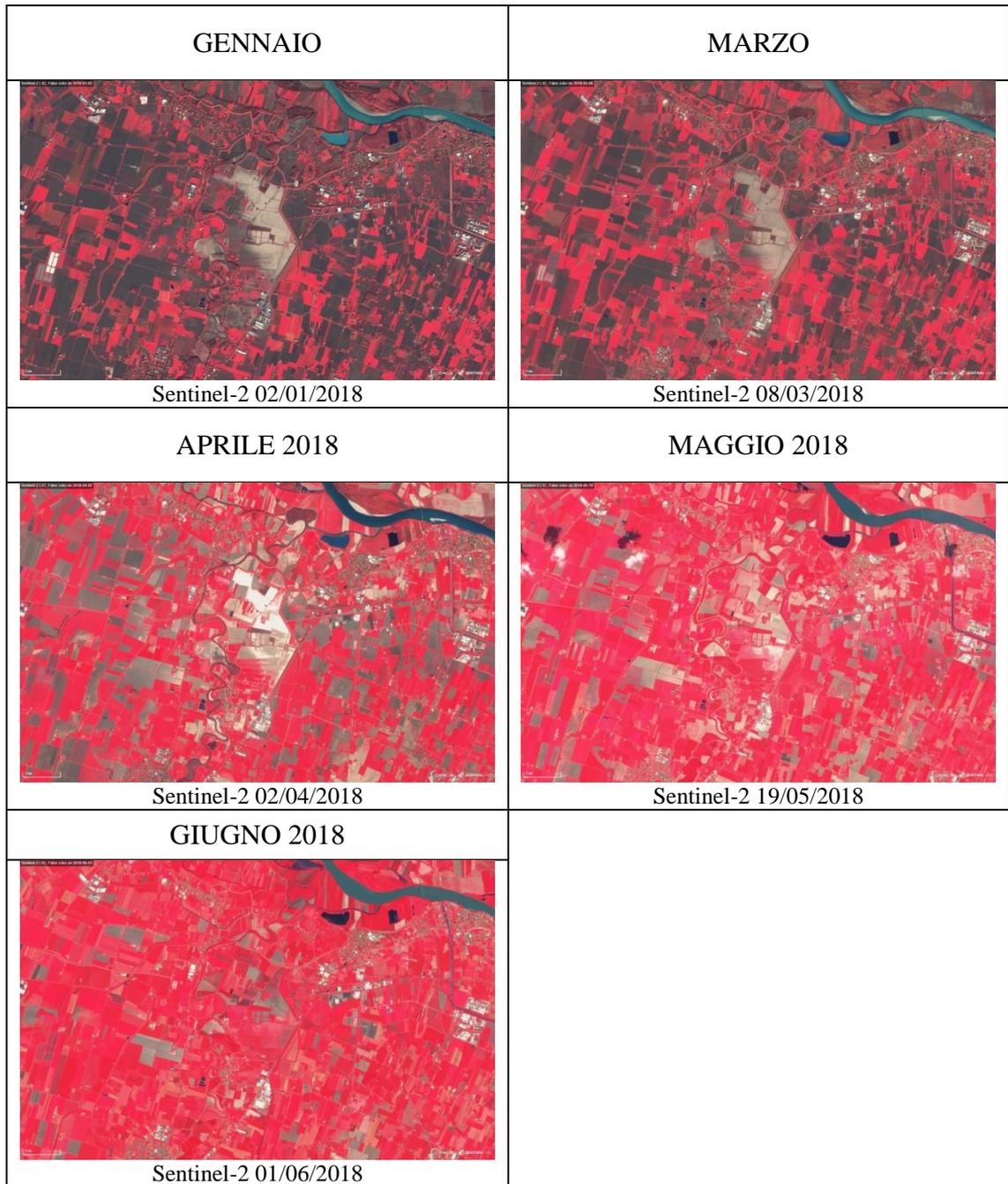


Figura 4. 74. Punto di partenza per monitoraggio a lungo termine per valutare interazione tra sedimenti alluvionali e vegetazione in terreni agricoli

CONCLUSIONI

Il presente elaborato di tesi ha esplorato alcuni dei ruoli che possono ricoprire i prodotti del telerilevamento satellitare all'interno del ciclo di gestione delle emergenze. Tali dati, infatti, permettono di monitorare il territorio anche su larga scala e avere informazioni in tempo quasi reale. Tale requisito di tempestività è essenziale nel caso delle catastrofi naturali per organizzare i soccorsi e avere una prima stima dei danni.

Il caso di studio è stato offerto dagli episodi alluvionali che hanno colpito la pianura Padana tra il Parma e l'Enza in seguito all'evento idro-meteorologico che si è abbattuto sulla regione Emilia-Romagna tra il 12 e 13 dicembre 2017. Il Parma ha causato tracimazioni principalmente nei pressi della città di Colorno, mentre i danni maggiori li ha provocati l'Enza che ha rotto l'argine all'altezza dell'abitato di Lentigione andando ad allagare le campagne limitrofe per giorni, rendendo necessario evacuare la popolazione.

Si è voluto dunque, ispirandosi alle tecniche di *rapid mapping* usate dal servizio Copernicus, produrre una mappa di emergenza che identificasse le aree allagate nelle 72 ore successive all'evento. Sono stati utilizzati dati radar Sentinel-1 particolarmente efficaci nell'identificazione della presenza di acqua superficiale. Si è ritenuto interessante produrre una classificazione multitemporale che descrivesse l'evoluzione del fenomeno alluvionale. Analizzando una vasta area, infatti, gli effetti dell'alluvione si sono manifestati in momenti diversi lungo i due corsi d'acqua, prima lungo il Parma e in seguito l'esonazione dell'Enza. È stata quindi prodotta la mappa degli allagamenti mediante classificazione supervisionata basata sulle variazioni di *backscatter* rilevate su tre immagini multitemporali radar Sentinel-1.

Per tale evento inoltre è stato attivato il servizio di *rapid mapping* del Copernicus (EMS), per cui è stato possibile confrontare il prodotto ottenuto con la *delineation map* fornita dall'EMS. Il confronto ha restituito un valore di corrispondenza globale (*overall accuracy*) pari all'98%, quindi sicuramente soddisfacente. Si evidenzia un errore di commissione del 28,4% che tuttavia in caso di catastrofe naturale è a favore di sicurezza. L'errore di omissione invece ha riguardato aree allagate alberate, che quindi da satellite non è stato possibile individuare poiché l'acqua presente sul terreno è risultata nascosta dalle chiome degli alberi.

L'alluvione è un fenomeno dinamico, l'acqua si è mossa sul territorio, quindi si è voluto implementare la precedente classificazione degli allagamenti con il dato ottico al fine di individuare tutte le aree con evidenze del passaggio dell'acqua (principalmente tracce di fango lasciate al dell'acqua esondata). In questa fase è stata utilizzata un'immagine ottica Sentinel-2 del 13 dicembre. In questo caso è stata svolta un'analisi di *change-detection* tra pre e post evento sulla base dell'indice di vegetazione (NDVI) particolarmente sensibile a acqua e fango. La mappa ottenuta dall'unione delle due classificazioni presenta una buona corrispondenza con la *grading map* delle aree colpite prodotta dal Copernicus.

La seconda parte dello studio si è poi concentrata sull'esonazione dell'Enza. L'acqua dal punto di rottura dell'argine si è spostata a valle in direzione nord nord-est. Qui è stata bloccata dalle arginature del Po e del Canalazzo. L'area si è trasformata in un vaso naturale e, nonostante vari interventi, è rimasta allagata per giorni. Si è pensato quindi di produrre una mappa multitemporale degli allagamenti nei quindici giorni successivi l'evento attraverso la classificazione di immagini radar Sentinel-1. Dai dati satellitari, sono stati individuati allagamenti in alcune aree fino al 26 dicembre.

Alla luce dei risultati ottenuti da quest'ultima classificazione è stato svolto un sopralluogo a circa sei mesi dall'evento. La visita ha confermato che le aree evidenziate dalla classificazione come le più colpite sono quelle che sono state maggiormente danneggiate. Se nelle aree limitrofe la coltivazione è tornata alla normalità, i campi individuati dall'analisi sono delle distese di *mud-crack*, e dopo sei mesi la vegetazione cresce ancora in maniera rada e discontinua. Il sopralluogo ha quindi confermato l'efficacia dei dati utilizzati e delle procedure di classificazione presentate. Le aree coperte dai *mud crack* infatti sono state individuate proprio perché le mappe tematiche ci hanno condotti in quei punti, siti in una zona piuttosto remota nella campagna, lontano dalle strade principali e raggiungibile solo attraverso una strada sterrata.

In conclusione, il presente lavoro di tesi è un esempio di come i dati satellitari possano essere impiegati in maniera efficace nella gestione delle emergenze, con particolare riferimento alla gestione di eventi alluvionali. Nello specifico la tesi ha dimostrato la qualità e le potenzialità dei prodotti offerti dal servizio Copernicus sia nell'ambito della mappatura degli allagamenti, in una situazione di post-evento, sia un'ottica di monitoraggio ambientale, nel caso specifico, nella fase di riabilitazione in seguito all'evento.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Commissione delle Comunità Europee, “Comunicazione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni su un approccio comunitario alla prevenzione delle catastrofi naturali e di origine umana”, Bruxelles, 2009.
- [2] Université catholique de Louvain (UCL), “EM -DAT: The Emergency Events Database.” [Online]. Available: www.emdat.be.
- [3] European Commission, “Commission Staff Working Document: Overview of natural and man-made disaster risks in the European Union may face”, 2017.
- [4] European Commission, “Commission staff working paper. Risk Assessment and Mapping Guidelines for Disaster Management”, Bruxelles, 2010.
- [5] Il Parlamento Europeo e il Consiglio dell’Unione Europea, *DECISIONE N. 1313/2013/UE*, no. 1313. 2013, pp. 924–947.
- [6] C. I. Poljanšek K., De Groeve T., Marín Ferrer M., “Science for disaster risk management 2017”, p. 553, 2017.
- [7] International Organization for Standardization, “ISO Guide 73/2009”, 2009. [Online]. Available: <https://www.iso.org>.
- [8] United Nations, “Report of the open-ended intergovernmental expert working group on indicators and terminology relating to disaster risk reduction”, 2016.
- [9] H. Khan, L. Vasilescu, and A. Khan, “Disaster management cycle - a theoretical approach”, *Manag. Mark. - Craiova*, no. 1, pp. 43–50, 2008.
- [10] S. Baas, S. Ramasamy, J. Dey de Pryck, and F. Battista, *Disaster risk management systems analysis A guide book*. 2008.
- [11] UNISDR, “Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015 - 2030”, *Third World Conf. Disaster Risk Reduction, Sendai, Japan, 14-18 March 2015.*, no. March, pp. 1–25, 2015.
- [12] D. Alexander, *Principles of emergency planning and management*, no. 1. Terra Publishing, 2011.
- [13] Karen E. Joyce, Kim C. Wright, Samsonov Sergey V., and Vincent G. Ambrosia,

- “Remote sensing and the disaster management cycle”, in *Advances in Geoscience and Remote Sensing*, Gary Jedlovec, 2009.
- [14] Parlamento Europeo e Consiglio dell’Unione Europea, *Direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni*. 2007, pp. 27–34.
- [15] Commissione delle Comunità Europee, *Comunicazione al Parlamento Europeo, al comitato economico e sociale europeo e al comitato delle regioni. Gestione dei rischi di inondazione. Prevenzione, protezione e mitigazione delle inondazioni*. 2004.
- [16] Presidente della Repubblica, *DECRETO LEGISLATIVO 23 febbraio 2010, n. 49*. Italia, 2010, pp. 1–30.
- [17] Commissione delle Comunità Europee, “Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato economico e sociale europeo e al Comitato delle regioni: Monitoraggio globale per l’ambiente e la sicurezza (GMES) per un pianeta più sicuro”, Bruxelles, 2008.
- [18] Parlamento Europeo e Consiglio dell’Unione Europea, *REGOLAMENTO (UE) N. 377/2014 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 3 aprile 2014 che istituisce il programma Copernicus e che abroga il regolamento (UE) n. 911/2010*. 2004.
- [19] P. A. Brivio and G. Lechi, “Principi di telerilevamento”, in *Telerilevamento Applicato*, Mako Edizi., M. A. Dessena and M. T. Melis, Eds. 2006.
- [20] OECD Directorate for Science Technology and Innovation, “Monitoring Major Threats: the Contribution of Satellite”, 2014. [Online]. Available: <http://oe.cd/spaceforum>.
- [21] G. Denis, H. De Boissezon, S. Hosford, X. Pasco, B. Montfort, and F. Ranera, “The evolution of Earth Observation satellites in Europe and its impact on the performance of emergency response services”, *Proc. Int. Astronaut. Congr. IAC*, vol. 4, pp. 2945–2964, 2015.
- [22] F. Martini and R. Loat, “Handbook on good practices for flood mapping in Europe”, *Eur. Exch. Circ. flood Mapp.*, p. 60, 2007.
- [23] A. Twele, W. Cao, S. Plank, and S. Martinis, “Sentinel-1-based flood mapping: a

- fully automated processing chain”, *Int. J. Remote Sens.*, vol. 37, no. 13, pp. 2990–3004, 2016.
- [24] Commissione Europea, “Copernicus : il nuovo nome del programma europeo di osservazione della Terra.” 2012.
- [25] Commissione Europea, “Copernicus. Lo sguardo dell’Europa sulla Terra”, 2015.
- [26] Copernicus, “EMS Service Overview”, no. 12, pp. 1–17, 2015.
- [27] Copernicus, “Copernicus Emergency Management Service.” [Online]. Available: <http://emergency.copernicus.eu/>.
- [28] ESA, “Copernicus. Observing the earth.” [Online]. Available: https://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview4.
- [29] ESA, “Sentinel online.” [Online]. Available: <https://sentinels.copernicus.eu>.
- [30] ESA, “Esa Earth online.” [Online]. Available: <https://earth.esa.int/web/guest/home>.
- [31] Humboldt state University, “Interpreting radar data.” [Online]. Available: http://gsp.humboldt.edu/olm_2015/Courses/GSP_216_Online/lesson7-2/interpreting-radar.html.
- [32] ESA, “SENTINEL-2 User Handbook”, no. 1, 2015.
- [33] Unità Radarmeteorologia Radarpluviometria, Nowcasting e Reti non Convenzionali, Unita Gestione Rete Idrometeorologica RIPRER, Area Centro Funzionale e Sala Operativa Previsioni, Area Idrografica e Idrologia, and Area Modellistica Meteorologica Marina, “Rapporto dell’evento idro-meteorologico dall’8 al 12 dicembre”, Bologna, 2017.
- [34] ARPAE, “Monitoraggio meteo idrologico e idraulico in corso di evento”, 2017.
- [35] ARPAE, “Dexter.” [Online]. Available: <https://simc.arpae.it/dext3r/>.
- [36] “Gazzetta di Reggio.” [Online]. Available: <http://gazzettadireggio.gelocal.it>.
- [37] “Gazzetta di Parma.” [Online]. Available: <https://www.gazzettadiparma.it>.
- [38] Unione dei Comuni della Bassa Reggiana and Protezione Civile regione Emilia-Romagna, “Piano speditivo di emergenza per la gestione del rischio idraulico a

seguito del rifacimento dell'argine maestro del t. Enza, post evento emergenziale che ha coinvolto la frazione di Lentigione del comune di Brescello”, 2017.

- [39] “Facebook”, 2017. [Online]. Available: <https://www.facebook.com/>.
- [40] S. Long, T. E. Fatoyinbo, and F. Policelli, “Flood extent mapping for Namibia using change detection and thresholding with SAR”, *Environ. Res. Lett.*, vol. 9, no. 3, 2014.
- [41] F. Franci, “The use of satellite remote sensing for flood risk management”, in *Ricerche di Geomatica 2015*, Gabriele Bitelli, Ed. AUTEc, 2015, pp. 45–54.
- [42] European Space Agency, “Copernicus Open Access Hub.” [Online]. Available: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>.
- [43] ESA, *SNAP Handbook*. 2017.
- [44] Exelis, *ENVI Handbook*. 2017.
- [45] Copernicus, “EMSR260: Flood in Northern Italy”, 2017. [Online]. Available: <http://emergency.copernicus.eu/mapping/list-of-components/EMSR260>.
- [46] ESA, “EO Browser - Sentinel Hub.” [Online]. Available: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>.
- [47] K. Millard and M. Richardson, “Quantifying the relative contributions of vegetation and soil moisture conditions to polarimetric C-Band SAR response in a temperate peatland”, *Remote Sens. Environ.*, vol. 206, no. August 2016, pp. 123–138, 2018.
- [48] Q. Gao, M. Zribi, M. J. Escorihuela, and N. Baghdadi, “Synergetic use of Sentinel-1 and Sentinel-2 data for soil moisture mapping at 100 m resolution”, *Sensors*, vol. 17, no. 9, 2017.