

L'ALLUVIONE DI MAGGIO 2023 IN EMILIA-ROMAGNA: MONITORAGGIO DELLE COLTURE CON IMMAGINI SATELLITARI

Gabriele Esposito¹, Roberta Ravanelli²,

¹ Sapienza Università di Roma, DICEA, Area di Geodesia e Geomatica, Italia

<gabriele.esposito,roberta.ravanelli>@uniroma1.it

PAROLE CHIAVE: Synthetic Aperture Radar, Normalized Difference Vegetation Index, Radar Vegetation Index, Emilia Romagna

SOMMARIO:

L'aumento della frequenza delle inondazioni comporta gravi e onerosi danni territoriali, colpendo sia le aree urbane che quelle rurali. In questo contesto, il presente studio propone una metodologia per monitorare gli effetti delle inondazioni nelle aree agricole mediante l'analisi integrata delle immagini multispettrali di Sentinel-2 e di quelle SAR di Sentinel-1.

In particolare, sono stati calcolati il "Normalized Difference Vegetation Index" (NDVI) dalle immagini multispettrali di Sentinel-2 e il "Radar Vegetation Index" (RVI) dalle immagini SAR di Sentinel-1, al fine di valutare l'impatto della prolungata presenza d'acqua sui campi agricoli colpiti dall'alluvione verificatasi in Emilia Romagna il 16 maggio 2023.

L'obiettivo principale è analizzare l'effetto delle precipitazioni intense su diverse tipologie di colture e sui dati di backscatter di Sentinel-1, evidenziando il potenziale della tecnologia SAR, che grazie alla capacità di penetrare le nuvole, può integrare efficacemente le informazioni fornite dalle immagini multispettrali. Queste ultime risultano infatti spesso limitate dalla copertura nuvolosa durante e dopo eventi meteorologici estremi, riducendone l'efficacia nel monitoraggio post-alluvionale.

1. INTRODUZIONE

Il significativo incremento degli eventi meteorologici estremi, legato al cambiamento climatico globale, costituisce una seria minaccia per tutti i settori della società. Tra questi eventi, le inondazioni rappresentano il disastro naturale più comune, costituendo il 44% degli eventi estremi e colpendo circa 1,6 miliardi di persone nel periodo tra il 2000 e il 2019 (Aronsson-Storrier, 2022). Oltre a un numero crescente di persone esposte alle inondazioni, il settore agricolo risulta particolarmente vulnerabile, subendo danni significativi che compromettono la produzione e la sicurezza alimentare.

L'impatto delle inondazioni sulla resa agricola varia in funzione delle caratteristiche specifiche dell'evento (quali frequenza, durata, profondità e stagionalità) e delle tipologie di coltura coinvolte (resistenza all'eccesso d'acqua e adattamento a condizioni di suolo anaerobico). Oltre alle inondazioni fluviali, le inondazioni lampo, generate prevalentemente da eventi di pioggia intensa, sono particolarmente pericolose poiché si verificano all'improvviso, ostacolando le attività di allerta e di risposta d'emergenza. Anche le inondazioni costiere possono causare danni immediati ai terreni agricoli, e l'accumulo di sale marino nei suoli può avere effetti prolungati nel tempo, ostacolando la produttività per anni.

Il telerilevamento satellitare offre un contesto spaziale e temporale accurato per rilevare l'estensione delle inondazioni, misurarne l'intensità e valutare i pericoli associati, inclusi i danni diretti e il processo di recupero post-alluvione. Molti studi si concentrano sull'estrazione delle aree allagate mediante telerilevamento, poiché questa rappresenta una base essenziale per il monitoraggio e la gestione delle inondazioni. Tuttavia, il rilevamento delle inondazioni presenta sfide specifiche rispetto ad altre applicazioni di segmentazione delle acque, come la mappatura delle zone umide o delle linee costiere, a causa delle frequenti condizioni di cielo nuvoloso e piovoso. Inoltre, poiché

le inondazioni avvengono spesso all'improvviso e il ritiro delle acque varia in base alle condizioni meteorologiche e della superficie, osservazioni satellitari con frequenze di rivisitazione elevate sono essenziali per evitare una sottostima dei pericoli associati alle inondazioni di breve durata.

Di conseguenza, la risoluzione spaziale e temporale delle osservazioni satellitari è cruciale nel monitoraggio delle inondazioni. Attualmente, per mappare le aree inondate si utilizzano principalmente due tipi di dati satellitari: le immagini radar ad apertura sintetica (SAR, telerilevamento attivo) e le immagini multispettrali (telerilevamento passivo). I satelliti SAR consentono acquisizioni indipendenti dalle condizioni di illuminazione diurna o notturna, grazie alla propria fonte di illuminazione attiva, e il segnale radar è in grado di penetrare le nuvole durante gli eventi alluvionali. Le informazioni derivate dai dati SAR, come l'intensità del backscatter, i parametri polarimetrici e la coerenza interferometrica, sono comunemente impiegate per classificare le aree allagate. Le immagini multispettrali, invece, sono spesso utilizzate per l'estrazione dell'estensione delle inondazioni prima o dopo l'evento, data la loro suscettibilità alla copertura nuvolosa. L'ampiezza delle informazioni spettrali fornite consente di identificare le tipologie di copertura del suolo colpite dall'inondazione. I metodi per l'estrazione delle aree allagate possono essere classificati in approcci basati su pixel o su oggetti, e in ulteriori categorie come metodi supervisionati e non supervisionati. (Li et al., 2022).

In questo contesto, Google Earth Engine (GEE) (GEE, n.d.a) consente di eseguire analisi geospaziali su larga scala in un efficiente ambiente di cloud computing, fornendo inoltre un ampio catalogo di dati di telerilevamento accessibile gratuitamente, incluse le collezioni di immagini Sentinel-1 (SAR) (ESA, n.d.a) e Sentinel-2 (satellite multispettrale) (ESA, n.d.b).

Negli ultimi anni, la Regione Emilia Romagna ha sperimentato, tra gli effetti del cambiamento climatico, un aumento nel-

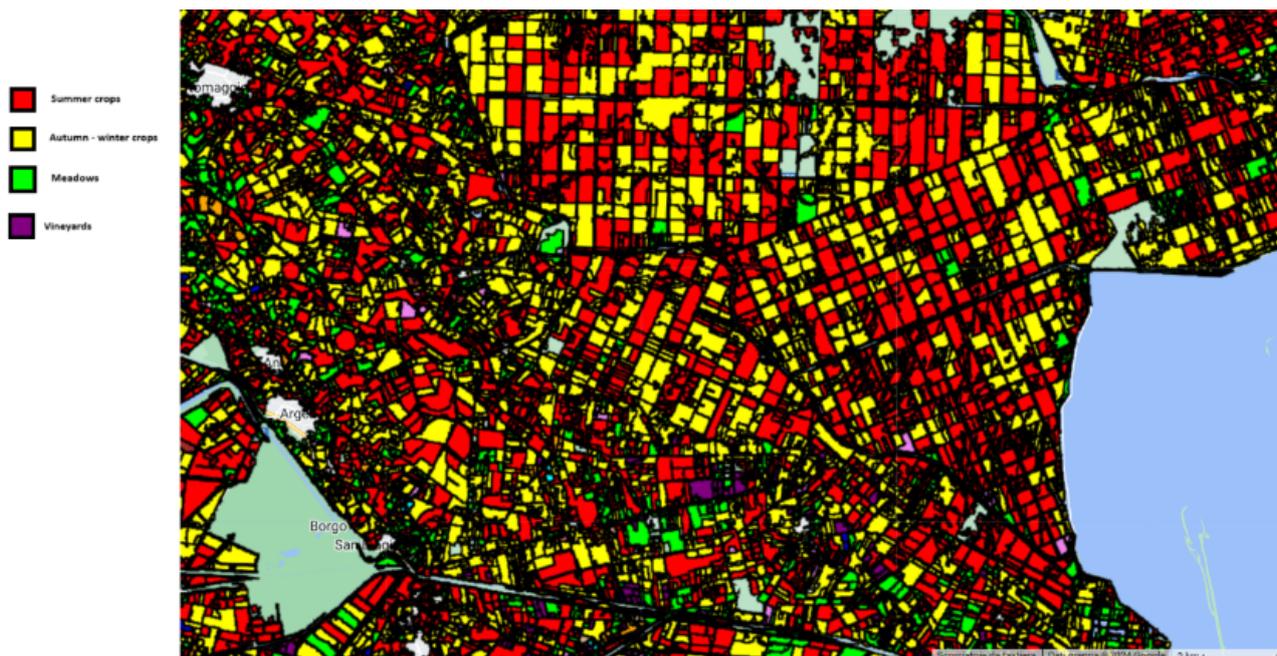


Figura 1. I vari tipo di colture fornite dal geoportale della regione Emilia Romanga: le colture estive in rosso, le colture autunnali-invernali in giallo, i prati in verde.

l'intensità dei fenomeni piovosi, con un incremento dei giorni di pioggia ad alta intensità rispetto al totale annuo delle giornate piovose. Questa tendenza espone le aree rurali a un clima sempre più caratterizzato da estremi idrologici, con eventi di siccità severa alternati a precipitazioni intense. Queste ultime rappresentano un rischio significativo per i territori agricoli, data l'entità dei danni che possono causare; la loro frequenza e intensità, inoltre, sono previste in ulteriore crescita nei prossimi anni. Tale incremento è attribuibile all'aumento delle temperature globali, che comporta una maggiore concentrazione di umidità atmosferica (Di Giustino et al., 2022), aumentando il rischio di eventi alluvionali catastrofici.

2. DATI

Per questo studio ci siamo serviti di diverse dataset disponibili sulla piattaforma Google Earth Engine e di diversi layer importati su GEE, che chiameremo "Feature Collections" di vitale importanza per la riuscita del progetto.

2.1 Collezioni Sentinel su GEE

In questo lavoro, le collezioni di immagini Sentinel selezionata sono state:

- Sentinel-1 SAR GRD (GEE, n.d.b): radar ad apertura sintetica C-band rilevato a terra. Questa collezione include tutte le scene GRD con risoluzioni di 10, 25 o 40 metri, combinazioni di bande di polarizzazione, modalità strumentali e bande di polarizzazione dipendenti dalle impostazioni dello strumento. Le scene sono state preprocessate con Sentinel-1 Toolbox, applicando i seguenti passaggi: rimozione del rumore termico, calibrazione radiometrica e correzione del terreno. I valori corretti sul terreno sono stati convertiti in decibel.
- Sentinel-2 MSI armonizzata: MultiSpectral Instrument, Livello-2A. Questa collezione contiene 12 bande spettrali che rappresentano la riflettanza superficiale (scalate di

10000) e tre bande di qualità (QA), tra cui una (QA60) è una banda maschera di bit con informazioni sulle nuvole (GEE, n.d.c).

2.2 CHIRPS

Per prendere in considerazione la grande portata di piogge dell'evento meteorologico estremo abbiamo deciso di utilizzare una collezione di dati presenti su GEE che fornisce informazioni sulle precipitazioni in gran parte del mondo. Climate Hazards Group InfraRed Precipitation (CHIRPS, n.d.) with Station data (CHIRPS) è un archivio di dati di precipitazioni quasi globale, copre l'area tra 50°S e 50°N (tutte le longitudini) e va dal 1981 fino al presente. CHIRPS utilizza immagini satellitari ad una risoluzione di 0,05°, e dati di stazione in-situ per creare serie temporali di precipitazione utili per l'analisi delle tendenze ed il monitoraggio della siccità stagionale. Questo dataset si basa su precedenti approcci di tecniche di interpolazione "intelligente" e fornisce stime delle precipitazioni con lunga serie temporale e ad alta risoluzione, basate su osservazioni della durata delle nubi fredde a infrarossi (Cold Cloud Duration, CCD).

2.3 Feature Collections

Per condurre questa analisi, abbiamo importato tre Collezioni di Elementi (Feature Collections, equivalenti ai file shapefile in Google Earth Engine, GEE).

La prima di queste include un layer che rappresenta tutte le tipologie di coltivazioni in l'Emilia Romagna, fornita dal geoportale della regione Emilia Romagna (chiamato "Icolt2023" nel nostro script), che comprende vari tipi di colture, noi abbiamo deciso di soffermarci sulle colture autunno - vernine, estive ed i campi di erba medica poiché presenti nella maggior parte delle aree colpite dall'alluvione (1).

La seconda Collezione di Elementi è un file vettoriale contenente le aree interessate dall'alluvione, ottenute dal Copernicus Rapid Mapping (EU, n.d.) (chiamato "flood" sul nostro script) ed è composto da 8 diverse aree di interesse:

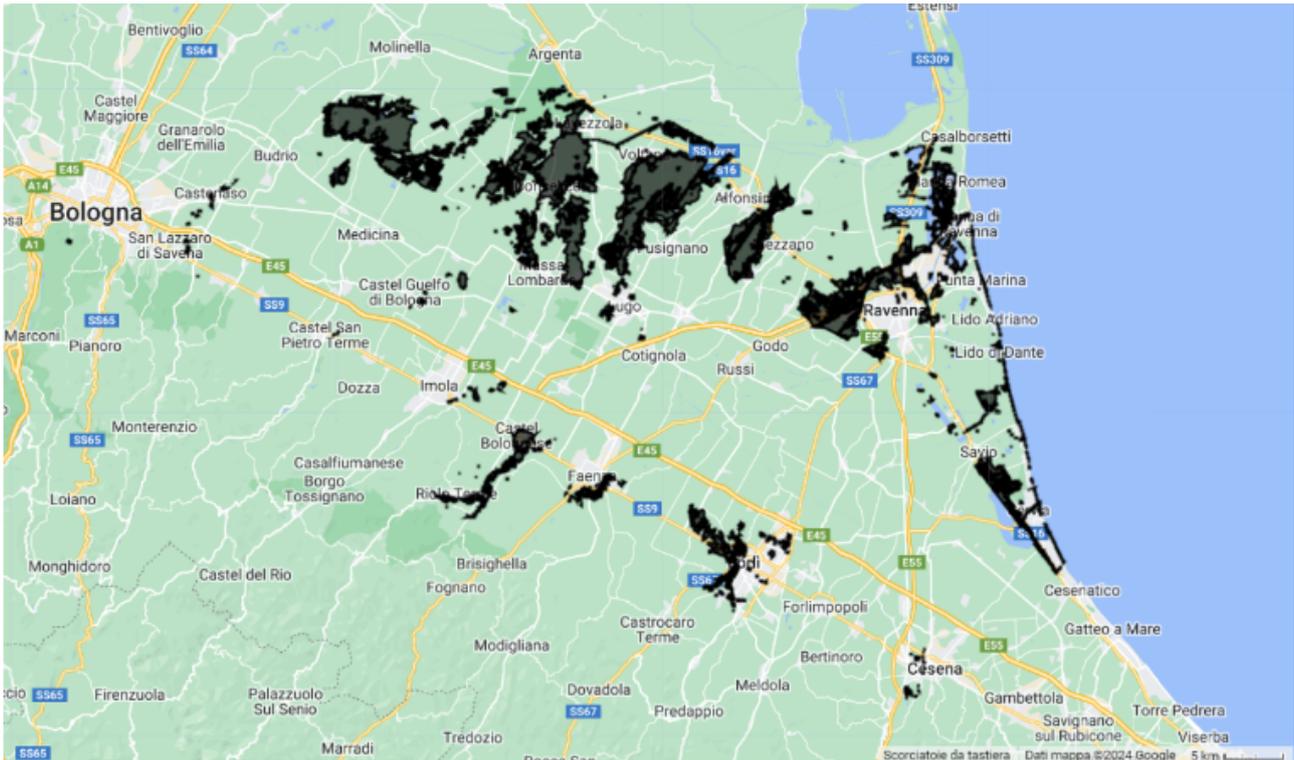


Figura 2. Il risultato dell'unione delle aree alluvionate sulla piattaforma Google Earth Engine.

- AOI1 Forlì,
- AOI2 Lugo,
- AOI3 Castel Bolognese,
- AOI4 Faenza,
- AOI5 Cesena,
- AOI6 Budrio,
- AOI7 Ravenna,
- AOI8 Montalbano.

Questi file vettoriali per le singole aree alluvionate sono stati uniti utilizzando un plugin QGIS, MMQGIS, successivamente il risultato è stato importato su GEE (2).

Infine, utilizzando immagini di febbraio 2023, abbiamo esportato l'immagine da Google Earth Engine con tre diverse bande:

- B11 (SWIR 1) con una risoluzione spaziale (GSD) di 20 m,
- B8 (NIR) con una GSD di 10 m,
- B4 (rosso) con una GSD di 10 m.

In QGIS, ciascuna banda è stata inizialmente ridimensionata dividendo i valori per 10,000 tramite il calcolatore raster, e successivamente le tre bande sono state combinate in un unico raster virtuale. Il risultato di questa operazione è un'immagine in formato .tif, successivamente importata in Orfeo Toolbox (OTB) per eseguire una segmentazione, che ha generato un

layer geometrico dei campi, denominato "segmentazione" nello script di lavoro.

Poiché la segmentazione prodotta in OTB non includeva informazioni sui tipi di coltivazione, è stata effettuata un'unione spaziale in QGIS utilizzando la funzione "Unisci Attributi per Posizione" tra il livello "classi" e il livello "segmentazione." Questa operazione ha consentito di trasferire le proprietà del livello "classi" alla segmentazione in base alla loro correlazione spaziale. Per ottenere immagini aggiornate delle aree agricole, sono stati importati dati da Google Earth Engine (GEE), evitando il layer del geoportale della Regione Emilia Romagna, poiché l'obiettivo era rappresentare accuratamente le forme e dimensioni attuali delle colture. Il layer risultante è stato caricato su GEE con il nome "segmentation."

3. METODOLOGIA

In questo studio, sono stati impiegati due indici di vegetazione derivati da immagini satellitari, l'NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e l'RVI (Radar Vegetation Index), per valutare l'impatto dell'inondazione verificatasi in Emilia Romagna nel maggio 2023 su diverse tipologie di colture presenti nella regione.

L'obiettivo principale è stato sviluppare una metodologia per investigare i danni causati dall'inondazione su vari tipi di coltivazioni, utilizzando l'analisi delle immagini multispettrali di Sentinel-2 e monitorando l'impatto delle intense precipitazioni sui dati di retrodiffusione acquisiti da Sentinel-1. Questa analisi mira anche a evidenziare come la tecnologia SAR, capace di "osservare" attraverso la copertura nuvolosa, possa integrare efficacemente le informazioni delle immagini multispettrali, spesso limitate dall'elevata presenza di nubi durante e subito dopo le forti piogge che precedono e seguono le inondazioni, migliorando così il monitoraggio del recupero post-evento.

In particolare, è stata condotta un'analisi su una selezione di campi all'interno dell'area colpita dall'alluvione, confrontati con campi esterni ad essa, e classificati in base alla tipologia colturale. Sono stati osservati i cambiamenti nei valori degli indici tra i campi inondata e quelli non inondata, con l'intento di stabilire un metodo per valutare i danni indotti dall'inondazione su diverse colture in Emilia Romagna, attraverso l'impiego combinato delle immagini satellitari di Sentinel-1 e Sentinel-2.

3.1 Indici di Vegetazione

Nel campo delle applicazioni di telerilevamento, gli indici di vegetazione (VI) sono stati sviluppati per valutare qualitativamente e quantitativamente le coperture vegetative attraverso misurazioni spettrali. La risposta spettrale delle aree vegetate è il risultato di una complessa interazione tra la vegetazione, la luminosità del suolo, le condizioni ambientali, le ombre, il colore e l'umidità del suolo. Inoltre, i VI sono sensibili alle variazioni spazio-temporali dell'atmosfera, rendendoli misure quantitative utili per stimare il vigore della vegetazione, con una sensibilità maggiore rispetto alle singole bande spettrali nel rilevare la biomassa.

L'interesse per questi indici risiede nella loro utilità nell'analisi e interpretazione delle immagini di telerilevamento. Essi costituiscono un metodo efficace per rilevare i cambiamenti nell'uso del suolo (in dati multitemporali), valutare la densità della copertura vegetale, distinguere le colture e prevederne la crescita. Molti di questi indici, inoltre, contribuiscono a migliorare la classificazione tematica delle immagini, risultando particolarmente utili nella mappatura tematica.

Le diverse coperture vegetative possono essere distinte in base al loro comportamento spettrale, soprattutto nella banda visibile del rosso (630-690 nm) e nel vicino infrarosso (760-900 nm): la clorofilla assorbe la radiazione rossa, mentre le strutture cellulari delle foglie riflettono intensamente la radiazione nel vicino infrarosso. La differenza tra il rosso e il vicino infrarosso, ben visibile nella curva di riflettanza della vegetazione, è un indicatore sensibile della presenza di vegetazione verde. La risposta spettrale della vegetazione nel rosso è strettamente correlata alla concentrazione di clorofilla, mentre quella nel vicino infrarosso dipende dall'indice di superficie fogliare e dalla densità della vegetazione verde. La combinazione di queste bande spettrali consente quindi di distinguere la vegetazione dal suolo nelle immagini multispettrali e di stimare la biomassa fotosinteticamente attiva in termini di densità della copertura vegetale.

In parallelo, i dati SAR presentano un elevato potenziale per le applicazioni agricole, grazie alla capacità dei sistemi SAR di monitorare in tutte le condizioni meteorologiche e alla sensibilità del segnale a microonde alle proprietà dielettriche e geometriche delle colture. In particolare, la disponibilità di dati SAR a doppia polarizzazione forniti dalla missione Sentinel-1 rappresenta un'opportunità unica per potenziare il monitoraggio operativo, aprendo nuove possibilità per applicazioni agricole avanzate (Mandal et al., 2020).

3.1.1 Normalized Difference Vegetation Index Il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) quantifica la vegetazione misurando la differenza tra la luce del vicino infrarosso (NIR, che la vegetazione riflette fortemente) e quella rossa (RED, che la vegetazione assorbe). Il risultato della formula genera un valore compreso tra -1 e +1: se un pixel è in grado di riflettere poco nel canale rosso e molto nel canale NIR, otterrà

un valore NDVI elevato (e viceversa). I sensori multispettrali satellitari come Landsat-8, Landsat-9 e Sentinel-2 dispongono delle bande necessarie per calcolare l'NDVI (Ravanelli, n.d.).

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

Valori negativi sono principalmente generati da nuvole, acqua e neve, e valori vicini a zero sono generati principalmente da rocce e suolo nudo. Valori molto bassi (0,1 e inferiori) dell'NDVI corrispondono ad aree aride come rocce, sabbia o neve. Valori moderati (0,2 - 0,3) rappresentano arbusti e praterie, mentre valori elevati (0,6 - 0,8) indicano foreste pluviali temperate e tropicali. L'NDVI viene spesso utilizzato a livello mondiale per monitorare la siccità, prevedere la produzione agricola, assistere nella previsione delle zone a rischio di incendi e mappare l'avanzamento del deserto. In questo caso, l'NDVI derivato dalle immagini multispettrali di Sentinel-2 risulta molto efficace e utile per analizzare le condizioni della vegetazione, poiché Sentinel-2 è caratterizzato da una buona risoluzione spaziale di 10 metri, permettendo di mappare la vegetazione con una risoluzione elevata. Inoltre, questi dati forniscono anche informazioni utili sullo stato dell'ambiente, come la temperatura superficiale del suolo, l'umidità dell'aria e la qualità dell'acqua (Rakuasa and Sihasale, 2023).

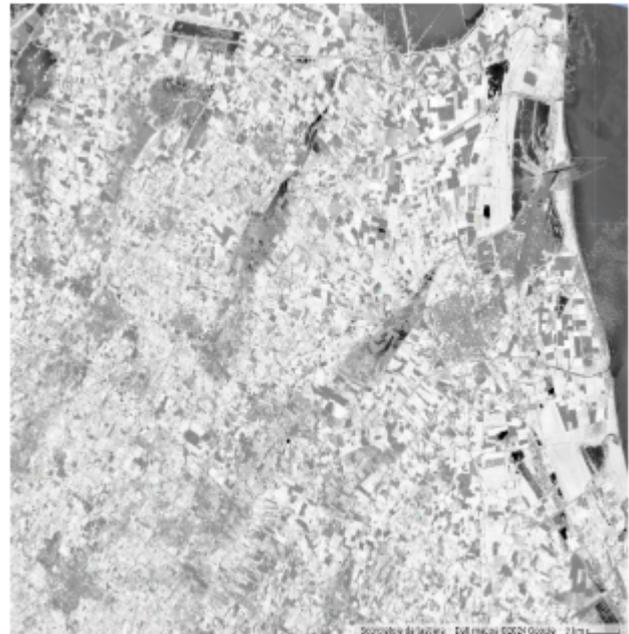


Figura 3. Una immagine NDVI nell'area di Ravenna (21/05/2023 - 31/05/2023)

3.1.2 Radar Vegetation Index Il SAR ha la capacità di penetrare la copertura nuvolosa, offrendo il vantaggio di acquisire dati a terra anche in condizioni meteorologiche avverse. In questo contesto, Kim e Van Zyl (Kim and Van Zyl, 2009) hanno introdotto il Radar Vegetation Index (RVI), un indice sviluppato specificamente per i dati SAR a polarizzazione completa (Full Polarization, FP). L'RVI per i dati SAR FP è dato da:

$$RVI(q) = \frac{(8HV)}{(HH + VV + 2HV)} \quad (2)$$

dove HH, VV e HV sono i coefficienti di backscatter nelle polarizzazioni HH, VV e HV. Successivamente, Charbonneau

(Charbonneau et al., 2005) ha ridotto questa formulazione per i dati SAR a polarizzazione doppia (DP). Tuttavia, l’RVI per i dati DP SAR è stato formulato utilizzando i coefficienti di backscatter HH e HV.

$$RVI(h) = \frac{4HV}{HH + HV} \quad (3)$$

In contrasto, i dati SAR di Sentinel-1 consistono nelle polarizzazioni VV e VH. Di conseguenza, le informazioni del coefficiente di backscatter HH sono assenti in questo set di dati. In questo caso, i coefficienti di backscatter VV e VH vengono utilizzati al posto di HH e HV, come specificato. Pertanto, la formulazione dell’Indice di Vegetazione Radar (RVI) per i dati SAR di Sentinel-1 è la seguente (Dey, n.d.):

$$RVI(h) = \frac{4VH}{VV + VH} \quad (4)$$

L’RVI è stato proposto come metodo per monitorare il livello di crescita della vegetazione, in particolare quando sono disponibili serie temporali di dati. L’RVI varia generalmente tra 0 e 1 e misura la casualità della dispersione, ed è sensibile alla biomassa. L’RVI è vicino a zero per una superficie liscia e aumenta con la crescita delle colture.

3.2 Image Processing

3.2.1 SAR Il primo passo della procedura ha riguardato l’identificazione di un campo specifico per le indagini, selezionato sulla base della proprietà DN (Digital Number) del file vettoriale ”segmentazione”. L’analisi è stata condotta nella nostra area di interesse, la regione Emilia Romagna, su due diversi periodi temporali in due script distinti: un primo periodo breve, dal 1 agosto 2022 al 31 ottobre 2023, e un secondo periodo esteso, dal 1 agosto 2016 al 31 dicembre 2023, per un’analisi a lungo termine. La funzione *’ee.Date’* è stata utilizzata per filtrare la collezione di immagini SAR di Sentinel-1 (COPERNICUS/S1 GRD) in base al range temporale selezionato, alla polarizzazione (VV e VH), alla modalità strumentale (IW) e a un numero di orbita relativa specifico.

Per esaminare l’impatto delle precipitazioni sul backscattering, le bande VV e VH sono state analizzate separatamente. Successivamente, è stata definita una funzione, *’calc RVI’*, per calcolare l’indice di vegetazione radar (RVI) utilizzando le bande VV e VH di Sentinel-1, secondo la formula precedentemente descritta (4). Questa funzione è stata applicata alla collezione di immagini di Sentinel-1, generando una nuova collezione di immagini RVI che rappresenta l’evoluzione temporale dell’RVI sull’area selezionata.

La funzione *ui.Chart.image.series* di Google Earth Engine (GEE) è stata utilizzata per creare un grafico a serie temporale che mostra l’andamento delle bande VV, VH e RVI nel tempo su una coltura specifica all’interno dell’area alluvionata. Il grafico è stato configurato con un riduttore di mediana e un intervallo di campionamento di 10 m, ed è centrato sull’orbita ascendente con un numero di orbita relativa specifico.

Infine, è stata tentata l’implementazione di una formula simile all’NDVI per i dati radar, utilizzando le bande VV e VH. A tal fine, è stata definita una funzione per calcolare un indice SAR normalizzato, denominato S1, che è stato successivamente aggiunto come nuova banda a ciascuna immagine della collezione.

3.2.2 Sentinel 2 Abbiamo utilizzato la collezione di immagini Sentinel-2 in Google Earth Engine (GEE) per valutare l’impatto della presenza di acqua nei campi agricoli nelle aree alluvionate, in relazione ai tipi di colture, mediante l’analisi dell’NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). A causa delle condizioni meteorologiche sfavorevoli, caratterizzate da pioggia e nuvolosità, è stato necessario aggregare le immagini in periodi di 10 giorni al fine di ottenere dati più completi e valori più consistenti. Per questo motivo, abbiamo definito la risoluzione temporale della serie temporale come *’days’*, specificando la durata di ogni periodo come 10 giorni e calcolando il numero di periodi sulla base delle date di inizio e fine dell’analisi.

Il codice GEE è stato suddiviso in diversi passaggi: inizialmente, abbiamo selezionato le immagini dai due dataset, Sentinel-2 Surface Reflectance e Sentinel-2 Cloud Probability. Successivamente, abbiamo scelto il valore massimo della Cloud Probability per mascherare i pixel con una probabilità di nuvole superiore al 50.

Abbiamo definito una funzione di aggregazione per riunire i dati nei periodi specificati, creando così una serie temporale di immagini aggregate di Sentinel-2. Al termine, abbiamo generato un grafico tramite la funzione *’chart’* per osservare l’andamento temporale dell’NDVI nelle colture analizzate.

Successivamente, utilizzando l’operazione *’merge’*, abbiamo creato una nuova variabile combinando i dati di RVI e NDVI. Questo approccio ci ha permesso di visualizzare un grafico che mostra entrambe le bande, facilitando il confronto dei rispettivi andamenti nelle colture specifiche analizzate.

Infine, i dati delle precipitazioni CHIRPS sono stati filtrati in base alle date di inizio e fine specificate, concentrandosi sul periodo di analisi di interesse. Abbiamo combinato le tre collezioni di immagini (RVI, NDVI e precipitazioni) in una singola collezione, utilizzandola per visualizzare l’andamento temporale delle variabili RVI, NDVI e precipitazioni normalizzate.

3.3 Visualizzazioni delle immagini

3.3.1 SAR Le visualizzazioni delle immagini SAR, nonostante abbiano un potenziale elevato per catturare immagini dettagliate, non ci hanno aiutato a distinguere chiaramente tra le aree alluvionate e quelle non alluvionate.

3.3.2 Sentinel 2 Per analizzare i campi e confermare visivamente le informazioni fornite dai livelli, abbiamo impostato tre visualizzazioni su Google Earth Engine (GEE) per esaminare le differenze tra campi impattati e campi non danneggiati dall’inondazione:

- Visualizzazione RGB con le bande B4 (Rosso), B3 (Verde) e B2 (Blu).
- Visualizzazione NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).
- Visualizzazione a falsi colori con bande B8 (NIR), B11 (SWIR 1) e B4 (Rosso).

Nella visualizzazione RGB i campi sani appaiono vibranti e verdi, mentre i campi alluvionati o danneggiati possono mostrare segni di decolorazione o cambiamenti di consistenza (4).

La visualizzazione NDVI mette in evidenza la salute della vegetazione. I campi sani presentano tipicamente valori NDVI più alti, apparendo più luminosi rispetto ai campi danneggiati o alluvionati che mostrano valori NDVI inferiori, indicando una densità vegetativa ridotta. Nella visualizzazione a falsi colori, utilizzando le bande B8, B11 e B4, la vegetazione sana può essere evidenziata in giallo e arancione, mentre le aree alluvionate appaiono più luminose, segnalando l'impatto dell'inondazione.

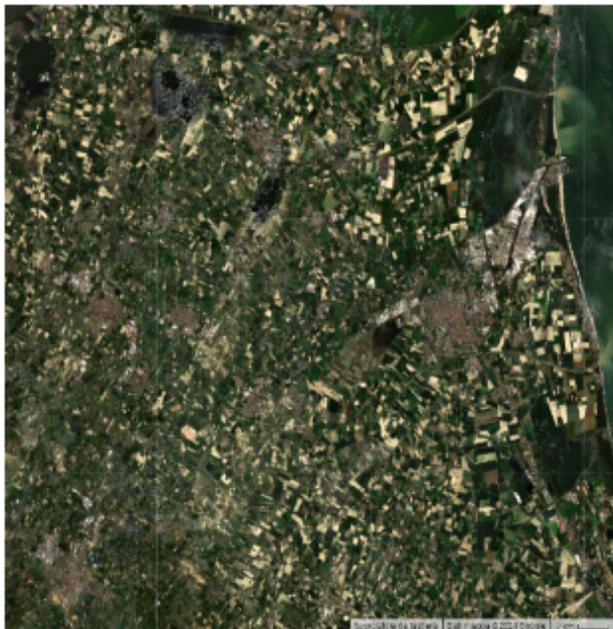


Figura 4. Una immagine RGB nell'area di Ravenna (21/05/2023 - 31/05/2023)

4. RISULTATI

In questa sezione, presenteremo i risultati ottenuti dalla nostra ricerca, concentrandoci principalmente sulle differenze nelle serie temporali dell'Indice di Vegetazione Normalizzato (NDVI) in funzione dei diversi tipi di coltivazioni, al fine di evidenziare quali colture sono state maggiormente influenzate dagli effetti dell'alluvione.

La nostra analisi ha riguardato principalmente colture estive, colture autunno-invernali, prati e coltivazioni pure di erba medica. Per ciascun tipo di coltura, abbiamo selezionato due campi: uno situato all'interno dell'area alluvionata e uno situato al di fuori dell'area alluvionata. Per ogni tipo di coltura, sono stati analizzati gli indici NDVI e RVI.

Confrontando le serie temporali dell'NDVI con quelle dell'Indice di Vegetazione Radar (RVI), abbiamo osservato che l'RVI non risulta particolarmente sensibile nel mostrare gli effetti diretti dell'alluvione, pur presentando un comportamento opposto rispetto all'NDVI in termini di fase. Tale differenza potrebbe indicare una diversa risposta dei due indici alle variazioni ambientali provocate dalle inondazioni.

Inoltre, sono state analizzate anche le serie temporali delle polarizzazioni di Sentinel-1 (VV e VH) in relazione all'NDVI. A questo scopo, abbiamo introdotto un nuovo indice, denominato S1, calcolato come la differenza normalizzata tra le due polarizzazioni di Sentinel-1, seguendo lo stesso principio utilizzato per il calcolo dell'NDVI. L'analisi di queste serie temporali ci

ha permesso di esplorare in modo più dettagliato l'interazione tra i dati SAR e gli indici di vegetazione, e come questi possano integrare le informazioni fornite dalle immagini multispettrali per monitorare l'impatto delle inondazioni sulle colture.

4.1 Tendenza dell'NDVI in base ai tipi di coltura

4.1.1 Colture Estive I campi all'interno dell'area alluvionata mostrano un calo significativo dell'NDVI (5), segnalando danni evidenti dovuti all'alluvione. L'NDVI non ha mostrato il normale picco stagionale, mentre i campi fuori dall'area alluvionata hanno mantenuto un andamento stagionale regolare (6).

4.1.2 Prati e coltura di erbe mediche Questi campi alluvionati mostrano un valore basso di NDVI che non si concilia con la loro tipica stagionalità dettata da un picco elevato di NDVI osservato negli anni precedenti. I campi fuori dall'area alluvionata hanno mantenuto valori elevati di NDVI, indicando che i prati e le colture di erba medica sono stati gravemente danneggiati.

4.1.3 Colture autunno-vernine Diversamente dalle altre colture, i campi autunno-vernini all'interno dell'area alluvionata non sembrano essere stati significativamente influenzati, mostrando una tendenza stagionale normale e coerente con gli anni precedenti.



Figura 5. Il trend dell'NDVI per una coltivazione estiva nell'area dell'alluvione dal 1 agosto 2016 al 31 dicembre 2023

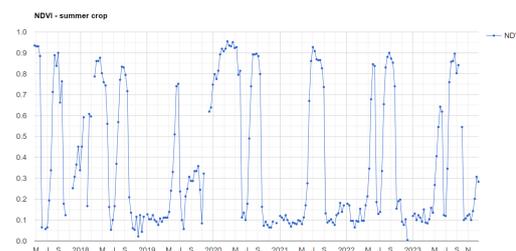


Figura 6. Il trend dell'NDVI per una coltivazione estiva al di fuori dell'area dell'alluvione dal 1 agosto 2016 al 31 dicembre 2023)

4.2 La tendenza degli Indici SAR in base ai tipi di coltura

L'uso dell'RVI e dell'indice S1 per valutare l'impatto delle intense piogge sui dati SAR, ci ha fornito alcune intuizioni interessanti, a differenza della considerazione delle singole polarizzazioni, Vertical Transmit-Horizontal Receive Polarisation (VH) o Vertical Transmit-Vertical Receive Polarisation (VV). In questa sezione, come nel caso della tendenza NDVI, i risultati sono stati classificati in base al tipo di coltura e poi commentati.

4.2.1 Colture Estive Nei grafici che confrontano RVI e NDVI, si osserva uno sfasamento tra i due indici, con tendenze opposte. Tuttavia, i picchi di NDVI non corrispondono a bassi valori significativi dell'RVI. Entrambi gli indici, insieme alle bande VV e VH, subiscono una drastica riduzione durante l'alluvione, ma senza un calo prolungato come per l'NDVI nei campi alluvionati.

4.2.2 Prati e coltura di erbe mediche Per i prati e le colture di erba medica, lo sfasamento di fase dell'RVI è appena percettibile e l'indice S1 non mostra cali drastici nelle bande VV e VH durante l'alluvione, diversamente da quanto osservato nelle colture estive.

4.2.3 Colture autunno-vernine Le colture invernali mostrano una tendenza dell'RVI più simile a quella delle colture estive, con uno sfasamento di fase evidente ma senza significativi cali dell'RVI nei picchi dell'NDVI (7). Anche l'indice S1 riflette questa tendenza, mostrando una somiglianza con il trend delle colture estive.

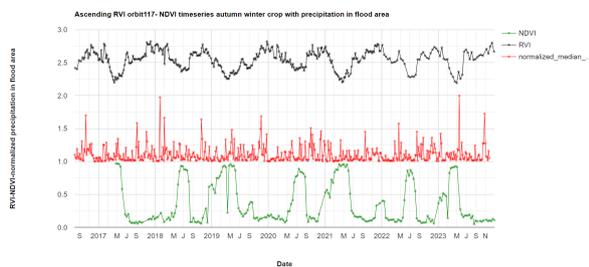


Figura 7. Confronto tra RVI (in nero), NDVI (in verde) e l'indice S1 (in rosso) per una coltura autunno-invernale nell'area alluvionale dal 1 agosto 2016 al 31 dicembre 2023.

5. CONCLUSIONI

L'obiettivo principale di questa tesi è stato sviluppare una metodologia per monitorare l'impatto delle alluvioni sulle aree agricole, integrando immagini multispettrali di Sentinel-2 e immagini radar SAR di Sentinel-1. In particolare, il calcolo dell'Indice di Vegetazione Normalizzato (NDVI) dalle immagini multispettrali di Sentinel-2 e dell'Indice di Vegetazione Radar (RVI) dalle immagini SAR di Sentinel-1 ha avuto l'intento di valutare gli effetti della presenza prolungata di acqua sui campi agricoli.

L'approccio adottato mirava ad analizzare come le intense precipitazioni influenzino i dati di retro-diffusione di Sentinel-1 nelle aree agricole, esplorando come la tecnologia SAR, grazie alla sua capacità di penetrare le nubi, possa integrare le immagini multispettrali. Queste ultime, infatti, spesso riscontrano difficoltà a causa della copertura nuvolosa persistente durante eventi di pioggia intensa e le conseguenti inondazioni, limitando così il monitoraggio efficace del recupero post-alluvione.

I risultati ottenuti hanno mostrato che le colture estive e l'erba medica sono risultate essere le più colpite dalle forti piogge, mentre le colture autunno-invernali sembravano meno influenzate, probabilmente a causa dei valori di NDVI più bassi durante i mesi estivi. Confrontando l'NDVI con l'RVI, è emerso uno sfasamento di fase in tutte le tipologie di coltivazioni: sebbene in alcuni casi questo fosse sottile, era comunque percepibile, e in generale l'RVI tendeva a presentare valori meno estremi rispetto all'NDVI. Inoltre, è stata osservata una

corrispondenza tra l'indice S1 e l'NDVI, con tendenze correlate e picchi negativi e positivi proporzionali. Tuttavia, non sono emersi risultati significativi nel confronto tra le bande VV e VH e l'NDVI, suggerendo che altre variabili o metodologie potrebbero essere necessarie per analizzare in modo più efficace queste polarizzazioni.

Pertanto, saranno necessari ulteriori studi per esplorare meglio le relazioni tra RVI, indice S1 e NDVI per valutare l'impatto delle piogge intense sulle aree coltivate. La metodologia proposta presenta potenzialità di applicazione in altre aree soggette a inondazioni, grazie all'integrazione delle immagini di Sentinel-2 e Sentinel-1.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Aronsson-Storrier, M., 2022. UN Office for Disaster Risk Reduction (2020). *Yearbook of International Disaster Law Online*, 3(1), 417–423.

Charbonneau, F., Trudel, M., Fernandes, R., 2005. Use of dual polarization and multi-incidence sar for soil permeability mapping. *Proceedings of the 2005 advanced synthetic aperture radar (ASAR) workshop, St-Hubert, QC, Canada*, 15–17.

CHIRPS, n.d. <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>.

Dey, S., n.d. Radar vegetation index code for dual polarimetric sentinel-1 data in eo browser.

Di Giustino, G., Bonora, A., Federico, K., Reho, M., Lucertini, G., 2022. Spatial Analysis of the Vulnerability to Flooding in the Rural Context: The Case of the Emilia Romagna Region. *Atmosphere*, 13(8), 1181.

ESA, n.d.a. Sentinel-1 Overview.

ESA, n.d.b. Sentinel 2. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2>.

EU, n.d. Copernicus Rapid Mapping. <https://emergency.copernicus.eu/mapping/ems/rapid-mapping-portfolio>.

GEE, n.d.a. Platform. <https://earthengine.google.com/platform/>.

GEE, n.d.b. Sentinel-1 sar grd: C-band synthetic aperture radar ground range detected, log scaling. https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S1_GRD.

GEE, n.d.c. Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A. https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR.

Kim, Y., Van Zyl, J. J., 2009. A time-series approach to estimate soil moisture using polarimetric radar data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(8), 2519–2527.

Li, M., Zhang, T., Tu, Y., Ren, Z., Xu, B., 2022. Monitoring Post-Flood Recovery of Croplands Using the Integrated Sentinel-1/2 Imagery in the Yangtze-Huai River Basin. *Remote Sensing*, 14(3), 690.

Mandal, D., Kumar, V., Ratha, D., Dey, S., Bhattacharya, A., Lopez-Sanchez, J. M., McNairn, H., Rao, Y. S., 2020. Dual polarimetric radar vegetation index for crop growth monitoring using sentinel-1 SAR data. *Remote Sensing of Environment*, 247, 111954.

Rakuasa, H., Sihasale, D. A., 2023. Analysis of Vegetation Index in Ambon City Using Sentinel-2 Satellite Image Data with Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Method based on Google Earth Engine. *Journal of Innovation Information Technology and Application (JINITA)*, 5(1), 74–82.

Ravanelli, R., n.d. Spectral Indexes. Slide del corso di Geomatica (Gestione e Valorizzazione del Territorio), A.A. 2022/2023.