

Remote sensing e spatial modelling per strategie di adattamento ai cambiamenti climatici: caso studio Valle Savio

Gianfranco Pozzer

Università Iuav di Venezia
Culture del progetto
Email: gpozzer@iuav.it

Denis Maragno

Università Iuav di Venezia
Culture del progetto
Email: dmaragno@iuav.it

Filippo Magni

Università Iuav di Venezia
Culture del progetto
Email: fmagni@iuav.it

Francesco Musco

Università Iuav di Venezia
Culture del progetto
Email: francesco.musco@iuav.it

Abstract

Gli effetti indotti dai cambiamenti climatici (CC) su città e territori stanno ponendo seri interrogativi sulla necessità di definire nuove pratiche di governo del territorio. Sistemi insediativi e naturali sono chiamati ad aggiornare le proprie strategie di resilienza nei confronti di fenomeni come la convergenza spaziale di impatti e vulnerabilità di diversa natura. I domini della vulnerabilità richiedono la definizione di un nuovo paradigma della 'conoscenza spaziale' articolabile per diversi contesti ambientali. Il presente contributo guida la possibilità di testare questa ipotesi mediante tecniche di *spatial modelling* e *remote sensing*. L'obiettivo è quello di agevolare il riconoscimento delle correlazioni fisico-ambientali tra fattori esogeni ed endogeni, ossia: morfologie del terreno (DTM), *hazard* climatici (IPCC 2014), indici satellitari (*Land Surface Temperature*, *Normalized Difference Moisture Index*, *Vegetation Health Index*).

Il presente contributo si inserisce nel progetto europeo *Adriadapt Interreg Italia-Croazia* coordinato dal CMCC (Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici) testando la associazione e la correlazione spaziale tra gli impatti *Urban flooding* (inondazioni urbane), *Landslides* (frane), *Wildfire* (rischio di incendio) e *Drought* (rischio di siccità e desertificazione). Il test è condotto nel territorio dell'Unione Valle del Savio (FC – Emilia-Romagna): area geografica interessata periodicamente da onde di calore, siccità ed eventi atmosferici estremi. I risultati dell'indagine evidenziano una significativa associazione tra variabili VHI e dinamiche idrogeologiche. Il metodo, di aiuto nell'elaborazione di nuove informazioni spaziali, orienta le regioni adriatiche verso nuove pratiche di governo del territorio in chiave *climate proof*.

Parole chiave: *climate impacts, information technology, climate proof.*

1 | Introduzione

Il presente contributo si colloca nel programma europeo *Adriadapt Interreg Italia-Croazia*¹ coordinato dal CMCC (Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici) e avente come obiettivo l'incremento della capacità dell'Alto Adriatico di adattare i territori urbani e costieri al cambiamento climatico (CC)².

L'articolo si sofferma sull'avanzamento dello studio relativo a tre tipologie di impatto particolarmente avverse ai territori dell'Unione Valle Savio³ (FC, Emilia-Romagna): *Urban flooding*, *Landslides*, *Drought*⁴. L'analisi relaziona due componenti informative del sistema ambientale, una endogena e l'altra esogena.

La componente endogena considera come usi del suolo e coefficienti di deflusso contribuiscano ad alterare il regime idraulico superficiale del territorio, quantificando e spazializzando l'impatto idraulico a scala di bacino idrogeologico (*surface run-off*). La performance idraulica viene stimata con un apposito modello di simulazione della dinamica 'afflussi-deflussi' capace di riconoscere la correlazione tra *pattern* d'uso territoriali (*agricolo; urbano residenziale e industriale; boschivo; umido e semi-naturale*), orografia e morfologie del terreno (nello specifico, *pendenze, depressioni, orientamenti e avvallamenti*). Questa prima indagine consente di effettuare un *overlay* topologico tra fenomeno franoso e *run-off* superficiale.

Per evidenziare l'associazione e la correlazione spaziale tra siccità e dinamiche idrogeologiche, è necessario considerare nel processo di analisi anche quei caratteri esogeni che possono descrivere il rapporto che sussiste tra rischio idrogeologico e cambiamento climatico. I fattori che possono essere considerati variano in funzione della disponibilità dei dati e dall'obiettivo dell'indagine, nel caso specifico vengono considerati parametri e proprietà fisiche acquisite mediante tecniche di *remote sensing*.

L'apprendimento simultaneo di fattori endogeni ed esogeni agevola la costruzione di un geo-database integrato in grado di valorizzare la correlazione spaziale fra le due fenomenologie in un processo di rappresentazione cartografica orientato agli obiettivi del *climate proof planning*⁵ (Magni 2019; Musco 2014, Musco e Zanchini 2014). Il risultato aiuta a definire una dimensione di *planning* in grado di riconoscere la vulnerabilità territoriale come esito di impatti cumulativi generati da CC (Wilby e Dessai 2010, Wilby e Keenan 2012). Il concetto di 'associazione spaziale' (contiguo semanticamente a quello di correlazione, ma diverso sul piano metrico) emerge da strati informativi strutturabili per differenti contesti ambientali (O'Brien *et al.* 2007, Fritzsche *et al.* 2014, Wamsler *et al.* 2013).

La ricerca si è sviluppata in quattro fasi di lavoro connesse.

Fase 1: remote sensing analysis. In questa fase si sono identificati i descrittori (variabili) utili a riconoscere spazialmente le conseguenze di CC in termini di ondate calore (Stewaed e Oke 2014), siccità e propensione agli incendi (Cunha *et al.* 2019). Si sono analizzati i dati satellitari Landsat-8, considerando l'incidenza di parametri vegetazionali e termici capaci di descrivere la struttura delle relazioni morfologiche del territorio, e i diversi gradi di vulnerabilità degli elementi antropici e naturali.

Fase 2: analisi morfo-dinamica. La seconda fase di lavoro si avvale di un modello morfo-dinamico di associazione spaziale tra coefficienti di deflusso e modello digitale del terreno (DTM). Con l'applicazione delle funzioni di direzione ed accumulo (*GIS-based hydrologic modelling*) è possibile studiare il comportamento dinamico dei deflussi superficiali e di quantificare gli impatti idraulici per variazione d'uso del suolo (Ungaro *et al.* 2014; Pistocchi 2018).

¹ Il progetto analizza tipologie d'impatto che interagiscono con le dinamiche di vulnerabilità dei seguenti territori: Comune di Udine, Comune di Cervia (RA), territorio dell'Unione Valle Savio, Comune di Vodice (Croazia), Contea di Šibenik (Croazia). Si riconoscono in modalità analitica e cartografica i seguenti impatti: *Urban Heat Islands* (isola di calore urbana); *Urban flooding* (inondazioni urbane); *Wildfire* (rischio di incendio); *Drought* (rischio di siccità e desertificazione); *Landslides* (frane); *Sea-level rise* (mareggiate/acqua alta/erosione di costa); *Salt intrusion* (risalita del cuneo salino). Il progetto mira a fornire agli enti locali le conoscenze territoriali necessarie alla predisposizione di procedure e modelli pianificatori in grado di interpretare e innalzare i livelli di resilienza degli ambienti insediativi, preparandoli a resistere alle sollecitazioni meccaniche indotte da variazioni climatiche sempre più severe.

² Su cambiamento climatico e processi di adattamento si veda: IPCC 2007; IPCC 2012; IPCC 2013, Musco 2016, Ribeiro *et al.* 2009, Solecki *et al.* 2015.

³ L'Unione comuni Valle del Savio comprende le seguenti unità territoriali: Bagno di Romagna, Cesena, Mercato Saraceno, Montiano, Sarsina, Verghereto.

⁴ La siccità è una risultante di trasformazioni locali (trasformazioni agricole, urbanizzazione, gestioni idrauliche, ecc.) e di variazioni climatiche generali.

⁵ L'adattamento alle variazioni climatiche caratterizza dai primordi la vita umana e le migrazioni, come testimoniano alcune ricostruzioni storiche. Forme di adattamento hanno caratterizzato i periodi in cui l'uomo viveva di caccia e raccolta, quando ha iniziato a sviluppare tecnologie agricole e di allevamento, con la fondazione delle prime città e il loro successivo transito nelle rivoluzioni industriali e post-industriali, così come nelle più recenti fasi analogiche e digitali. L'adattamento è una pratica 'vitale' che produce cultura e nuove regole e la cui eccezionalità viene generalmente vissuta in presenza di catastrofi (reali o minacciate) e in fasi di transizione. Le pratiche di adattamento tendono a modificare sia il contratto sociale che quello naturale con effetti sulla *capacity* (conversazione con prof. D Patassini, Iuav).

Fase 3: valutazione della vulnerabilità territoriale. La terza fase attiva la valutazione della vulnerabilità delle strutture morfologiche, degli ambienti urbanizzati e dei sistemi naturali, evidenziata dalla combinazione di due determinanti ambientali *sensitivity* e *adaptive capacity* (Füssel 2010, IPCC 2014)⁶.

Fase 4: sovrapposizione cartografica dei nuovi livelli informativi. La quarta fase studia il grado di associazione spaziale tra variabili VHI (*Vegetation Health Index*) e *runoff*. L'indagine si conclude con una mappatura delle frane attive presenti nell'area di studio, con lo scopo di evidenziare una possibile relazione di associazione morfologica tra deflussi, siccità e dinamica dei movimenti franosi.

In sintesi, la ricerca cerca di dimostrare come l'elaborazione di nuove informazioni spaziali, generate dalla *remote sensing analysis* e dalla modellizzazione di impatti cumulativi (Magro e Patassini 2013), agevoli la definizione statistico-distributiva e spaziale della vulnerabilità territoriale ai CC (Maragno 2018)⁷. La scelta dell'area studio valorizza la convergenza di questi nuovi dati, confrontandosi con sorgenti informative, aspetti teorici e procedurali validati in diversi contributi scientifici (Pozzer 2015, Maragno *et al.* 2017e Maragno *et al.* 2020).

L'articolo è diviso in tre parti. Nella prima parte (Paragrafo 2), si presenta l'area di studio e si introduce la metodologia della ricerca. Vengono descritte le tecniche e le procedure di analisi dei dati finalizzate a esplorazione e conteggio dei due impatti, illustrando la logica e i passaggi operativi di tutte le fasi, dalla costruzione degli indici cartografici fino alla mappatura della vulnerabilità territoriale. La seconda parte (Paragrafo 3) discute i risultati della ricerca empirica. Essi restituiscono le potenzialità di una metodologia di ricerca in grado di riconoscere la correlazione esistente tra siccità, frane e deflussi superficiali incrementali mediante l'impiego dell'*overlapping* topologico⁸. La terza ed ultima parte (Paragrafo 4), valida i risultati e le tecniche di analisi utilizzate. Il metodo dimostra come usi ed impatti siano in parte collegati alle morfologie del territorio e, in parte, direttamente confrontabili e valutabili con i processi ambientali del contesto ambientale.

2 | Metodologia

La ricerca testa un modello di indagine in grado di analizzare contesti geografici influenzati negativamente da una convergenza spaziale di impatti di diversa natura, ossia: siccità, *runoff* e movimenti franosi. Il metodo di lavoro è di tipo sperimentale e consiste nella: i) raccolta di dati per fonti interoperabili; ii) applicazione di algoritmi per l'elaborazione di informazioni morfologiche degli impatti; iii) mappatura di componenti ambientali per una restituzione cromatica della vulnerabilità secondo coordinate spaziali.

2.1 | Area studio

L'area di studio coincide con l'Unione Valle del Savio. Si tratta di una area geografico-amministrativa che si localizza lungo il percorso del fiume Savio, che si estende per 810 km² quasi interamente in Provincia di Forlì-Cesena, e per un tratto brevissimo in Provincia di Rimini e di Ravenna. Il bacino del Savio si trova tra la Valle del Bidente (Provincia di Forlì-Cesena) e la Valle del Marecchia (Province di Arezzo, Pesaro-Urbino e Rimini). Il profilo morfologico dell'area è caratterizzato da valori di altitudine compresi tra i 5 e i 1520 metri s.l.m. (catene montuose dell'Appennino tosco-romagnolo). Sotto il profilo pedologico i litotipi più diffusi sono: argilliti; marnoso-arenacei; depositi alluvionali⁹. In termini ecosistemici la Valle presenta molteplici habitat naturali e una ricca biodiversità paesaggistica. In termini bioclimatici, la zona è in gran parte riconducibile alla regione temperata. Sotto il profilo antropico le aree pianeggianti dell'entroterra risultano moderatamente urbanizzate, mentre quelle in prossimità dell'area costiera mostrano una intensa attività insediativa (zone urbane di Cesena).

L'analisi prevede un affondo in una area campione del Comune di Bagno di Romagna (Figura 1). Il test trova motivazione nei seguenti aspetti:

1. presenza di intensa urbanizzazione lungo la strada europea E45 che a tratti corre parallela al Fiume Savio;

⁶ La *sensitivity* «nell'approccio dell'IPCC, determina il grado in cui un sistema è negativamente influenzato da una data esposizione» (vedi Maragno 2018: 30). Essa dipende dalle proprietà specifiche del sistema in esame. L'*adaptive capacity* può essere considerata come quella capacità da parte di un sistema naturale o costruito di adattarsi ai cambiamenti climatici, al fine di moderare potenziali impatti e/o danni.

⁷ L'analisi spaziale e i più recenti approcci di geografia quantitativa evidenziano una correlazione semantica, prima che metrica, fra spazio e tempo. L'interpretazione (rappresentata o vissuta) dello spazio è spazializzazione, posizionamento in un dominio più vasto rispetto a linee del tempo. Il posizionamento spazio-temporale diventa così un puntatore provvisorio e oscillante entro scale spaziali e temporali. Questa operazione crea essa stessa spazio e tempo (conversazione con prof. D Patassini, Iuav).

⁸ È importante ricordare che la recrudescenza dei fenomeni geologici (come i movimenti di frana) è una dinamica molto complessa, in cui le associazioni 'siccità-frana' e 'runoff-frana' richiedono adeguate contestualizzazioni interpretative. Il presente lavoro assume un connotato strategico-conoscitivo di supporto alla definizione di pratiche pianificatorie orientate al *climate proof*.

⁹ Fonte: Cartografia dei Suoli della Regione Emilia-Romagna.

2. presenza di aree soggette a periodiche alluvioni;
3. instabilità dei versanti e presenza di eventi franosi.

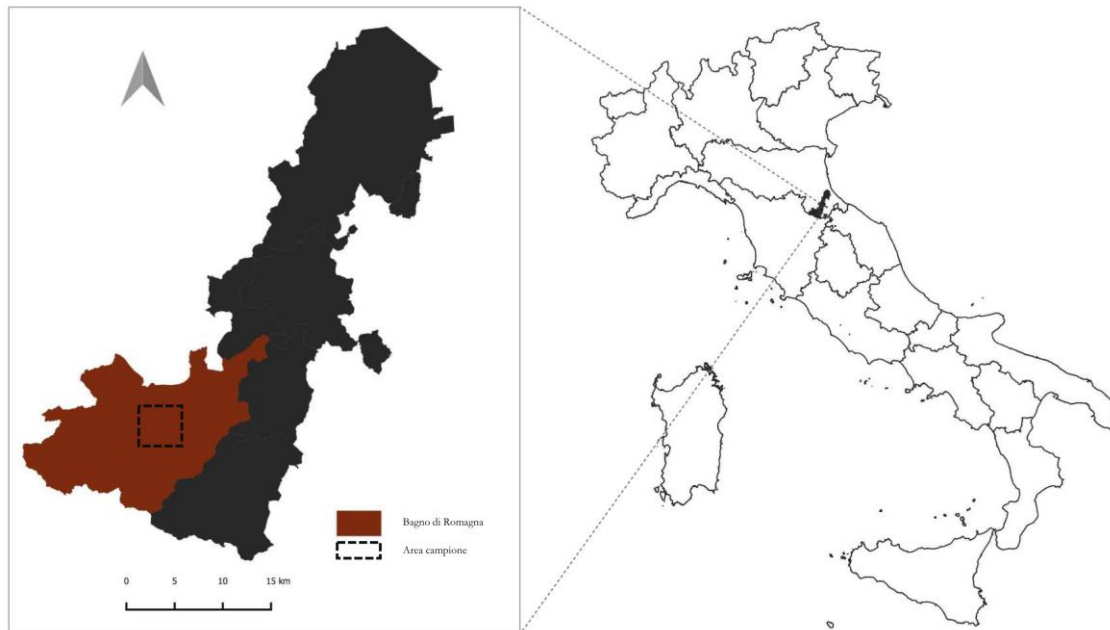


Figura 1 | Localizzazione dell'area di studio

2.2 | Fonti e dati

Lo studio è stato condotto utilizzando diversi bacini informativi (Tabella I). Alcuni dati fanno riferimento a informazioni spaziali e alfanumeriche già in possesso delle Amministrazioni comunali (temi cartografici di base e cartografia tematica generale), altri provengono da elaborazioni *remote sensing*.

Tabella I | Base informativa territoriale

Categoria	Descrizione	Formati	Fonte
temi cartografici di base	rete idrografica della Regione Emilia-Romagna	Vettoriale	Quadro Conoscitivo della Regione Emilia-Romagna
	modello digitale del terreno (DTM) passo 5 metri della Regione Emilia-Romagna	Geotiff	
	uso e copertura suolo della Regione Emilia-Romagna al 2014	Vettoriale e raster	Quadro Conoscitivo della Regione Emilia-Romagna
cartografia tematica	carta inventario delle frane della Regione Emilia-Romagna (edizione 2018): livello deposito frane attive ¹⁰	Vettoriale	Banca Dati geologica della Regione Emilia-Romagna
	cartografia regionale delle aree percorse dal fuoco dal 2011 al 2018 nella Regione Emilia-Romagna	Vettoriale	Catasto regionale delle aree percorse dal fuoco – Regione Emilia-Romagna
remote sensing	LC08_L1TP_192029_20190820_20190903_01_T1	Geotiff	
	LC08_L1TP_192029_20181004_20181010_01_T1	Geotiff	
	LC08_L1TP_192029_20170729_20170811_01_T1	Geotiff	Dati satellitari Landsat 8 (open data)
	LC08_L1TP_192029_20160827_20170321_01_T1	Geotiff	
	LC08_L1TP_192029_20150708_20170407_01_T1	Geotiff	

¹⁰ Per deposito di frana attiva si intende un deposito che ha manifestato evidenze di movimento nell'ultimo ciclo stagionale, indipendentemente dalla entità e dalla velocità (Fonte: Legenda della Carta inventario delle frane dell'Emilia-Romagna).

2.3 | Tecniche e metodi di indagine utilizzate per la valutazione della vulnerabilità

La metodologia di lavoro utilizza tecniche di *remote sensing* e di elaborazione GIS (*Geographic information system*) integrate. La *remote sensing analysis* consente lo studio di un indice di siccità (VHI *index*) legato a parametri derivati dalla elaborazione di immagini satellitari. Le elaborazioni GIS si avvalgono di un algoritmo di modellazione idro-morfologica per la simulazione dinamica del ruscellamento superficiale¹¹. L'uso di queste tecniche agevola la definizione di modelli-guida per la valutazione della vulnerabilità territoriale.

2.3.1 | Stima del Vegetation Health Index

Il fenomeno siccitoso viene valutato mediante studio del VHI¹². Con il calcolo del VHI è possibile determinare l'intensità della siccità e la sua estensione spaziale (Bento *et al.* 2018; Cunha *et al.* 2019; Tripathi *et al.* 2013)¹³. L'indice viene calcolato utilizzando immagini satellitari Landsat 8. La stima è indiretta, in quanto basata sulla risposta della vegetazione, sia forestale che agricola, riferita a stress di natura termica o a variazioni di umidità nel suolo¹⁴. Il VHI è ottenuto attraverso il rapporto di due indici satellitari derivati: il *Temperature Condition Index* (TCI) e il *Vegetation Condition Index* (VCI). Il calcolo del TCI utilizza dati termici ottenuti dalla *Land Surface Temperature* (LST)¹⁵, mentre quello del VCI si basa su dati vegetazionali *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI)¹⁶ capaci di riflettere le condizioni di umidità del suolo. L'indice VCI indica valori standardizzati (in %) che riflettono stress vegetativi legati ad un basso tasso di umidità (Kogan 1995).

$$VCI=(NDVI_j-NDVI_{min})/(NDVI_{max}-NDVI_{min})*100 \quad (1)$$

L'indice TCI riflette valori (in %) relativi a stress vegetativi legati alle alte temperature (Kogan 1995).

$$TCI=(LST_{max}-LST_j)/(LST_{max}-LST_{min})*100 \quad (2)$$

L'indice VHI è una *proxy* dello stato di salute della vegetazione stimato sulla base di un rapporto tra valori di umidità e condizioni termiche più stressanti (Kogan 1995).

$$VHI=a*VCI+b*TCI \quad (3)$$

dove a e b sono coefficienti che quantificano il contributo del VCI e TCI nella risposta della vegetazione (con valori che vanno da 0 a 1). Bassi valori di VHI identificano aree maggiormente affette da fenomeno siccitoso.

¹¹ Algoritmo sviluppato sulla base di un aggiustamento del metodo per l'invarianza idraulica dell'Autorità dei Bacini regionali romagnoli (AdBRR – Emilia-Romagna, Italia). Il concetto operativo di invarianza idraulica della AdBRR permette di misurare il volume minimo d'invaso da destinare alle aree sottoposte a trasformazione (consumo di suolo, impermeabilizzazione, urbanizzazione), attraverso l'uso di un indice urbanistico espresso in volume di invaso da associare alle nuove impermeabilizzazioni (Pistocchi 2001). Al criterio di invarianza idraulica si associano gli effetti positivi apportati dalle reti di drenaggio urbano e dalla naturale laminazione delle piene, dovuta alle altimetrie del terreno (pendenze e avvallamenti: Pozzer; 2015).

¹² Si tenga conto che la misura della siccità può avvenire secondo diversi indici. Tra quelli più usati e riconosciuti a livello internazionale si segnala lo SPI (*Standardized Precipitation Index*). Si tratta di un indicatore standardizzato per rilevare e valutare il deficit di precipitazione (siccità) a diverse scale temporali. Lo SPI consente di quantificare il surplus o il deficit idrico rispetto alla climatologia dell'area in esame (vedi: https://www.isprambiente.gov.it/pre_meteo/siccitas/index.html). Per un approfondimento del tema, si vedano anche Vergni e Todisco (2010) e (2011).

¹³ Le finalità relative allo studio VH possono essere ricondotte alla forte correlazione inversa che esiste tra NDVI e LST, presumendo che un costante e intenso aumento della temperatura del suolo agisca negativamente sul vigore della vegetazione, causandone importanti stress vegetativi. Ciò può contribuire facilmente all'aumento della propensione delle diverse specie arboree a essere percorse più o meno facilmente dal fuoco.

¹⁴ Per utilizzare al meglio le potenzialità delle immagini Landsat-8 è necessario che la scelta del dato satellitare venga effettuata conducendo in parallelo una valutazione delle temperature durante i periodi di caldo più intenso. Si procede quindi alla selezione di un set di immagini satellitari scelte sulla base di quattro criteri: i) anno di acquisizione; ii) mese di acquisizione; iii) temperatura media giornaliera; iv) assenza di annuvolamenti significative. La selezione valuta i momenti orbitali di acquisizione con una minor presenza di nuvole nell'atmosfera.

¹⁵ La LST viene elaborata con apposito algoritmo per l'estrazione della temperatura superficiale del terreno basato sul processamento dei dati termici acquisiti dal Landsat 8 (vedi Maragno *et al.* 2020).

¹⁶ Il parametro NDVI viene calcolato misurando l'andamento spettrale di vegetazione, acqua e suolo nudo nello spettro del visibile, nel vicino infrarosso e nel rosso (vedi Maragno *et al.* 2020).

Elaborazioni VHI di lungo periodo (condotte su diverse scale temporali) possono esprimere realtà territoriali geomorfologicamente, vegetazionalmente e climaticamente complesse. In particolare, in condizioni di eventi estremi intensi e prolungati i valori di VCI consentono di identificare aree maggiormente affette dal fenomeno climatico, in periodi di siccità (ambito boschivo), normalità o in presenza di un surplus pluviometrico. La spazializzazione del VHI può dunque aiutare ad identificare diversi gradienti di stress siccitoso che, se adeguatamente correlati a specifiche informazioni di contesto (endogene ed esogene), possono esprimere la propensione potenziale di una specifica tipologia boschiva, o arborea, ad essere percorsa da incendio¹⁷.

2.3.2 | Stima del run-off superficiale

La stima delle *performance* idrauliche di un territorio viene spesso affidata ad appositi modelli di simulazione della dinamica ‘afflussi-deflussi’ (Ungaro *et al.* 2014; Pistocchi 2018). Questa metodologia sviluppa un modello logico per la modellizzazione dei deflussi superficiali sulla base di una associazione spaziale tra usi del suolo e morfologie del terreno. L’uso di un apposito modello statistico – *sviluppato in ambiente GIS* – consente di ‘clusterizzare’ le dinamiche di deflusso superficiale nelle diverse categorie di uso del suolo (*agricolo; urbano residenziale e industriale; boschivo; umido e semi-naturale*) mediante l’utilizzo delle funzioni di direzione (FlowDir)¹⁸ ed accumulo (FlowAcc)¹⁹ calcolate a scala di bacino idrogeologico. Mediante l’utilizzo delle funzioni idrologiche viene definita la relazione (4), la quale consente di stimare gli impatti idraulici per variazioni d’uso del suolo. I dati necessari per il lavoro di modellazione idrologica sono i seguenti: 1) DTM; 2) usi del suolo (uso e copertura suolo della Regione Emilia-Romagna 2014); 3) rete idrografica a delimitazioni dei consorzi di bonifica.

L’equazione per la stima del *runoff* è la seguente (Poizzer 2015):

$$\varphi_i = \left\{ \frac{[p \cdot F_U + p^\circ \cdot (F - F_U)]}{F} \right\}_i \quad (4)$$

dove,

p= coefficiente di deflusso associato ad aree impermeabili,

p°= coefficiente di deflusso associato ad aree permeabili,

F= accumulo di flusso calcolato su DTM,

F_U= accumulo di flusso correlato alla copertura del suolo,

U= uso del suolo in *i*.

La relazione consente di assegnare al valore p l’accumulo di flusso F restituendo gli impatti idraulici φ_i . Tale correlazione viene espressa come % di pioggia che si trasforma in deflusso superficiale (*range* da 0,2 a 0,9)²⁰. Il procedimento, calibrato a scala di bacino idrogeologico, è cumulativo²¹.

2.3.3 | Valutazione della vulnerabilità territoriale

La combinazione delle componenti per la definizione degli scenari di vulnerabilità può avvenire secondo diverse strategie di governo del territorio. Si tratta di logiche aritmetiche in grado di ospitare modalità di connessione basate sull’utilizzo di informazioni di natura metrica per la quantificazione spaziale degli impatti (Tabella II).

¹⁷ Le letture del VHI in aree boschive possono restituire condizioni di stress idrico e termico moderate, severe o estreme. Foreste con un tasso di umidità basso possono favorire il rapido propagarsi di incendi, anche di ampie proporzioni.

¹⁸ La funzione “Flow Direction” elabora una griglia raster di scorrimento che assegna ad ogni pixel un valore numerico (D8) in funzione della massima pendenza. Il metodo D8 riconosce otto possibili direzioni di drenaggio: 1 – Est; 2 – Nordest; 4 – Nord; 8 Nordovest; 16 – Ovest; 32 – Sudest, 64 – Sud; 128 – Sudest. Il primo pixel contiene l’informazione spaziale che indica verso quale degli 8 pixel adiacenti sta drenando il pixel stesso.

¹⁹ La funzione “Flow Accumulation” rende visibili i percorsi preferenziali di scorrimento dell’acqua. Dove i valori dei pixel sono molto alti l’acqua converge in modo massiccio (i valori saranno più alti quanto più ci si avvicina verso valle). Si ottiene così una griglia raster che assegna ad ogni cella un valore numerico riferito al numero di celle che sono collegate mediante il cammino di massima pendenza a tale cella. Le celle corrispondenti allo spartiacque avranno valore 1, la cella della sezione di chiusura avrà come valore la somma di tutte le celle dell’intero bacino. Va precisato che nella “Flow Accumulation” non emerge la rete idrica effettiva. Essa non dipende solamente dalle altezze topografiche (DEM), ma anche dalla tipologia del suolo (pedologia, substrato geologico, ecc.) e dall’artificializzazione del territorio (creazione d’argini, deviazione del corso di fiumi e torrenti, canalizzazioni artificiali, ecc.).

²⁰ La scelta dei coefficienti di deflusso per tipologia d’uso del suolo si attiene alle indicazioni dei manuali di ingegneria civile e di progettazione idraulica. Poiché i coefficienti di deflusso sono caratterizzati da margini di errore si ricorre spesso a formulazioni stocastiche o probabilistiche.

²¹ Tra le principali opportunità di miglioramento dell’indagine emerge la necessità di ricalibrare i risultati di *runoff* in un intervallo di accettazione sulla base di approfondimenti anche di natura geologica e climatica (indicatori del micro-clima locale e simulazioni).

Tabella II | Elaborazioni di supporto alla valutazione della vulnerabilità territoriale

Impatto	Unità statistica	Dati, indicatori e indici	Componenti (V)		Elaborazione per il calcolo della vulnerabilità V= S-AC
			Sensitivity (S)	Adaptive capacity (AC)	
Siccità (Incendi)	Pixel 30x30 metri	Vegetation Health Index (VHI)	Temperature Condition Index TCI	Vegetation Condition Index VCI	La relazione 'V= S-AC' è misurata in termini di VHI.
Surface runoff	Pixel 5x5 metri	<ul style="list-style-type: none"> modello digitale del terreno (DTM) usi del suolo coefficienti di deflusso 	0,9 aree impermeabili	0,1 aree permeabili	<p>La relazione 'V= S-AC' viene elaborata in ambiente Gis mediante la funzione <i>Hydrology</i>. <i>Hydrology</i> consente di restituire un raster di comportamento qualitativo/ quantitativo del sistema idraulico del territorio.</p> <p>La relazione consente di assegnare ai coefficienti di deflusso l'accumulo di flusso Flow_Acc restituendo gli 'impatti idraulici' ψ ($\psi = \varphi_{cella \cdot raster}$). Tale correlazione viene espressa come % di pioggia che si trasforma in deflusso superficiale (con range da 0,1 a 0,9). Il procedimento, calibrato a scala di bacino, è cumulativo.</p>
Frane	perimetrazioni in formato vettoriale	classificazione delle frane in base alla combinazione di stato di attività e di tipologia del movimento	Il fenomeno franoso viene mappato e studiato in associazioni allo studio dell' <i>urban flooding</i>		

Il presente contributo utilizza due componenti, *sensitivity* e *adaptive capacity*. La loro adozione consente di attivare uno studio di vulnerabilità replicabile sia di scala urbana che territoriale, sulla base della seguente funzione additiva (Maragno 2018):

$$\text{vulnerability (V)} = \text{sensitivity (S)} - \text{adaptive capacity (AC)} \quad (5)$$

In questa sede la vulnerabilità è un concetto composto ed indica generalmente la predisposizione di un territorio o ecosistema (sia naturale che antropico) ad essere affetto negativamente da un certo tipo di fenomeno²². La formula (5) restituisce una risposta morfologica di un impatto 'x' localizzata mediante operazione di sottrazione tra *sensitivity* (propensione di un sistema a subire l'impatto) e *adaptive capacity* (propensione intrinseca di un sistema a mitigare l'impatto).

3 | Sintesi dei risultati e discussione

Le tecniche per la stima del VHI e del *runoff* descritte sinteticamente nel paragrafo 2.3 hanno consentito l'individuazione delle principali aree territoriali vulnerabili a lunghi periodi di siccità e a eventi di deflusso superficiale particolarmente intensi. La metodologia di valutazione consente di contestualizzare spazialmente i livelli di criticità idraulica, evidenziando come e quanto gli usi influiscano sulle performance idrogeologiche e sul processo di consolidamento del terreno franoso. Per quanto gli impatti in esame siano dotati di caratteristiche fisiche e meccaniche differenti, tutti e tre concorrono ad una definizione cumulativa della vulnerabilità territoriale facilmente deducibile con la tecnica dell'*overlapping* topologico²³.

²² Lo studio di vulnerabilità non è stato al momento integrato con la valutazione dell'esposizione. La componente espositiva verrà approfondita in futuro, in relazione alle esigenze localizzative e ai criteri fisico-spaziali (usi, consumi, spazi sociali, densità, centralità, problematiche, opportunità, ecc.) dei territori in cui i cambiamenti climatici produrranno i loro effetti. Pertanto, l'economia del presente articolo è rivolta ad un contesto di valutazione e mitigazione di scala macro-territoriale.

²³ Nell'analisi spaziale l'*overlapping* topologico consente di categorizzare e classificare spazi dotati di propria struttura o di componenti riconducibili ad una struttura. La topologia combinatoria evidenzia come uno spazio possa risultare dalla combinazione di spazi più semplici o semplificati. La topologia algebrica consente di interpretare e rappresentare spazi mediante invarianti algebriche in grado di riconoscere relazioni di omeomorfismo.

3.1 | Risultato dello studio del fenomeno siccitoso

Per un maggiore approfondimento conoscitivo del fenomeno siccitoso si è proceduto al calcolo dell'indice VHI per i seguenti periodi: luglio 2015, agosto 2016, luglio 2017, ottobre 2018 e agosto 2019. Utilizzando le medie aritmetiche calcolate sui *pixel value* dei 5 VHI è stato possibile identificare le zone boscate che nei mesi estivo/autunnali del periodo 2015-2019 hanno manifestato una maggiore propensione alla siccità (Figura 2). Lo studio sul VHI dimostra come l'aumento di temperatura agisca negativamente sullo stato di salute della vegetazione.

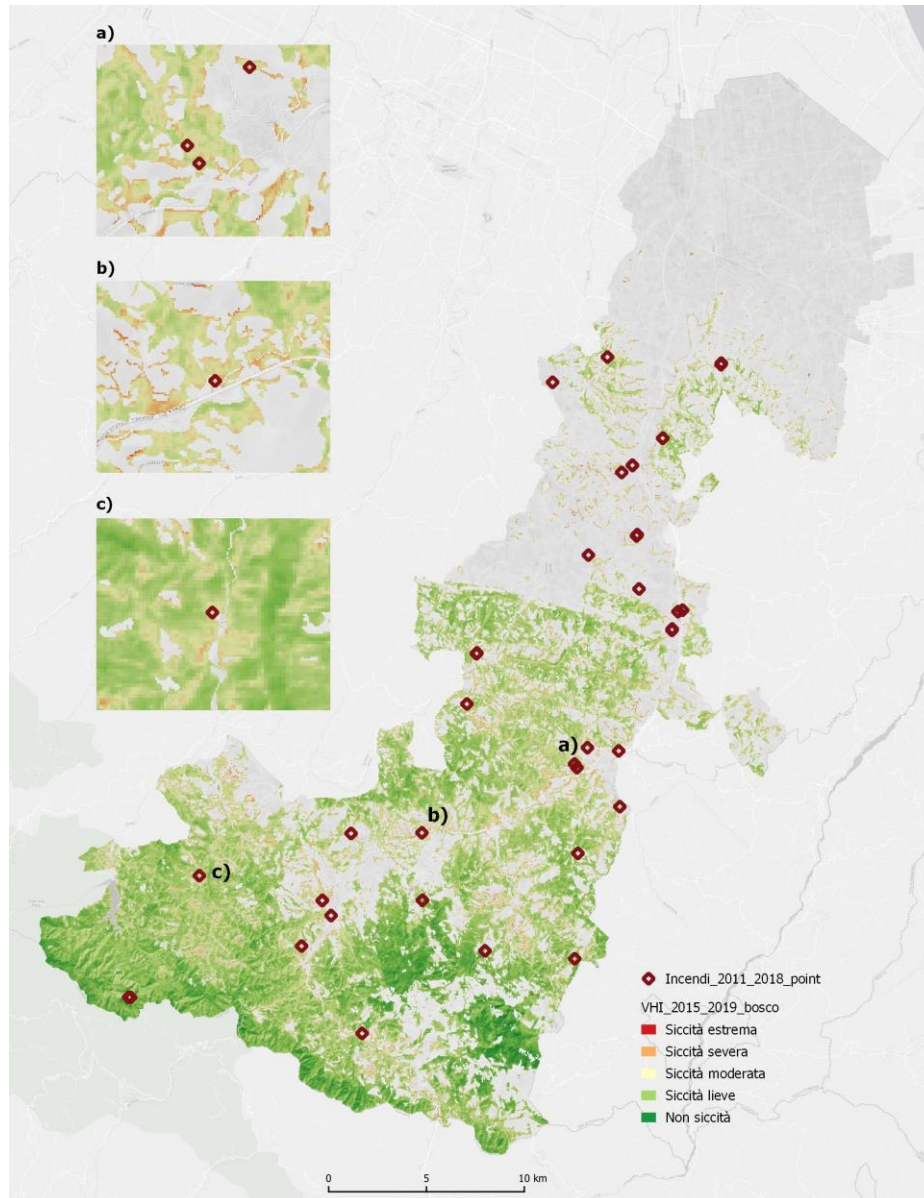


Figura 2| Unione Valle Savio: siccità e propensione agli incendi in aree boscate²⁴
(zonizzazione del VHI basata sulla media aritmetica dei VHI 2015-2019)

Le tipologie di vegetazione prevalenti sono querce, carpini e castagneti, con una estensione territoriale di circa 239 kmq (Tabella III). Seguono i faggi su 72 kmq e i boschi misti di conifere e latifoglie con una estensione di circa 44 kmq. Querce, carpini e castagneti insieme a salici e pioppi presentano un VH medio del 57% (siccità moderata), mentre farnie e frassini dimostrano una maggior propensione alla siccità con un VH medio di circa il 48%.

²⁴ Fonte della copertura boscosa: uso e copertura suolo della Regione Emilia-Romagna al 2014 (vedi Tabella I).

Tabella III | Variazioni del VHI per tipologia di vegetazione

Descrizione	Superficie (Kmq)	VHI min	VHI max	VHI medio
Boschi a prevalenza di faggi	72,35	55,40	75,91	66,35
Boschi a prevalenza di querce, carpini e castagni	229,85	0,00	72,55	57,43
Boschi a prevalenza di salici e pioppi	1,37	46,69	61,60	56,34
Boschi di conifere	13,84	42,42	72,70	61,51
Boschi misti di conifere e latifoglie	43,72	47,68	76,66	62,26
Boschi planiziari a prevalenza di farnie e frassini	0,06	44,96	52,08	48,20

Una sovrapposizione del VHI medio con la mappatura incendi (2011-2018)²⁵ ha infine consentito la restituzione di una sensibile associazione spaziale tra fenomeno siccitoso e aree già interessate da incendi (vedi riquadri di dettaglio ‘a), ‘b)’ e ‘c)’ di Figura 2).

3.2 | Risultato dello studio del runoff

Lo studio del *runoff* restituisce un indice spaziale di criticità idraulica. Le soglie di criticità sono calcolate e ponderate sulla morfologia del terreno e sulla risposta idraulica degli usi del suolo in termini di capacità di assorbimento delle acque meteoriche (Figura 3). La modellizzazione consente di stimare i coefficienti di deflusso a scala di bacino, ma anche di capire quali usi contribuiscano a modificare maggiormente la salute idraulica del territorio con effetti su esposizione e vulnerabilità. I risultati dimostrano come il rapporto tra i volumi idrici generati dalla modellizzazione idrologica del DTM subiscano un significativo aumento del coefficiente di deflusso in aree ad urbanizzazione intensiva e complessa²⁶. Negli insediamenti residenziali e industriali il coefficiente di deflusso oscilla fra lo 0,7 e lo 0,82, mentre nelle aree rurali o poco urbanizzate si rileva una riduzione dei deflussi superficiali con valori che tendono allo 0,5/0,6. Il *runoff* tende a diminuire significativamente nelle aree naturali, con valori compresi nell’intervallo 0,1-0,4 a seconda delle caratteristiche fisico-chimiche del suolo. Nelle zone altimetriche di montagna e di collina l’indice tende ad aumentare, restituendo dei valori compresi nell’intervallo 0,6-0,65.

²⁵ La propensione al fuoco dei boschi e la distribuzione spaziale degli incendi dipendono da diversi fattori, tra alcuni: tipologia arborea, condizioni morfologiche, condizioni climatiche, cambiamenti climatici, complessità ecosistemiche, ecc.

²⁶ È opportuno considerare queste aree solo come partizioni geografico-territoriali dotate di una certa vulnerabilità all’allagamento. Questa varia con l’intensità dell’evento pluviometrico e in base alla sua distribuzione spaziale.

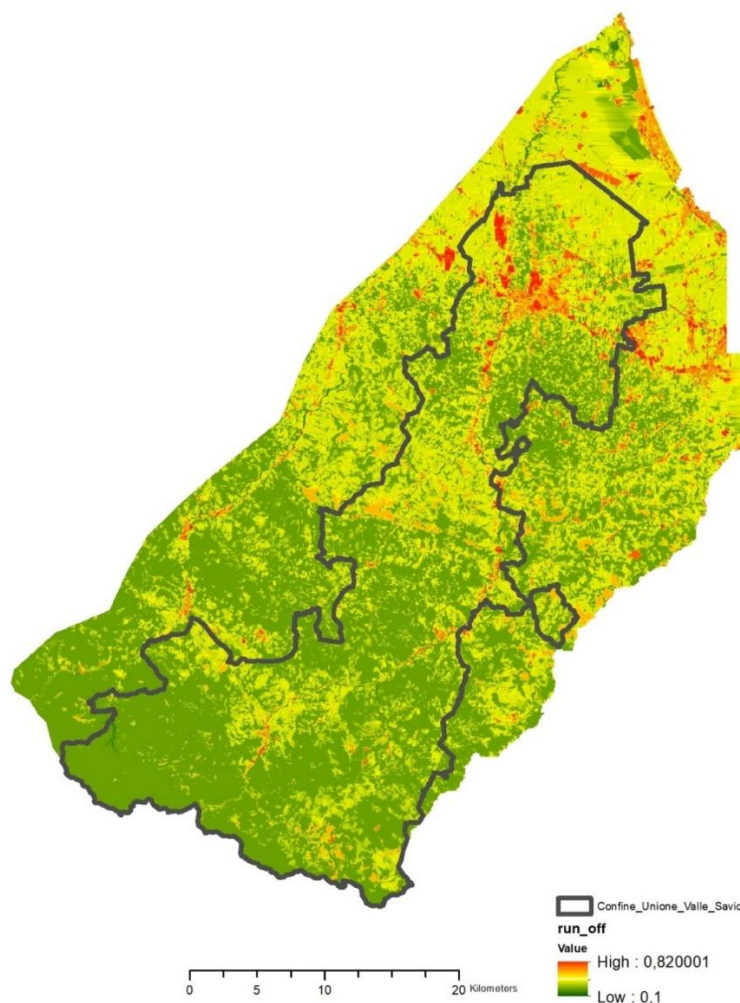


Figura 3 | Stima della performance idraulica di una partizione del bacino imbrifero del Savio, del Rubicone e di parte dei Fiumi Uniti. Uso del suolo riferito all'anno 2014

3.3 | Overlapping topologico tra VHI, runoff e movimenti franosi

L'esercizio di *overlapping* condotto nel riquadro-campione evidenzia la presenza di una associazione geografica tra fenomeno franoso, siccità e *run-off* superficiale (Figura 4). La recrudescenza dei fenomeni di rischio idrogeologico può subire alterazioni dovute a cambiamenti della struttura territoriale, alla intensità della piovosità o alla predisposizione dei suoli a subire un danno chimico-strutturale indotto da un lungo periodo siccitoso. Di conseguenza, deflussi, litologie del terreno, pendenze e diverse tipologie d'uso possono influenzare in modo significativo la siccità e la propensione di incendio per stress vegetativo, sia in termini di propagazione che di diffusione (Moreno *et al.* 2013). Si evidenzia, pertanto, come caratteristiche geomorfologiche e cambiamenti climatici possano condizionare il rischio di stress idrico della vegetazione, con conseguente regressione della dinamica idrogeologica del territorio e della qualità dei suoli verso *performance* meno efficienti.

L'*overlapping* è integrabile con ulteriori indagini empiriche relative alla modellizzazione delle variabili climatiche (per esempio: precipitazioni, temperature, *pattern* di umidità ed eventi estremi) in relazione alla plausibilità di scenari di pericolosità in un contesto di cambiamento globale.

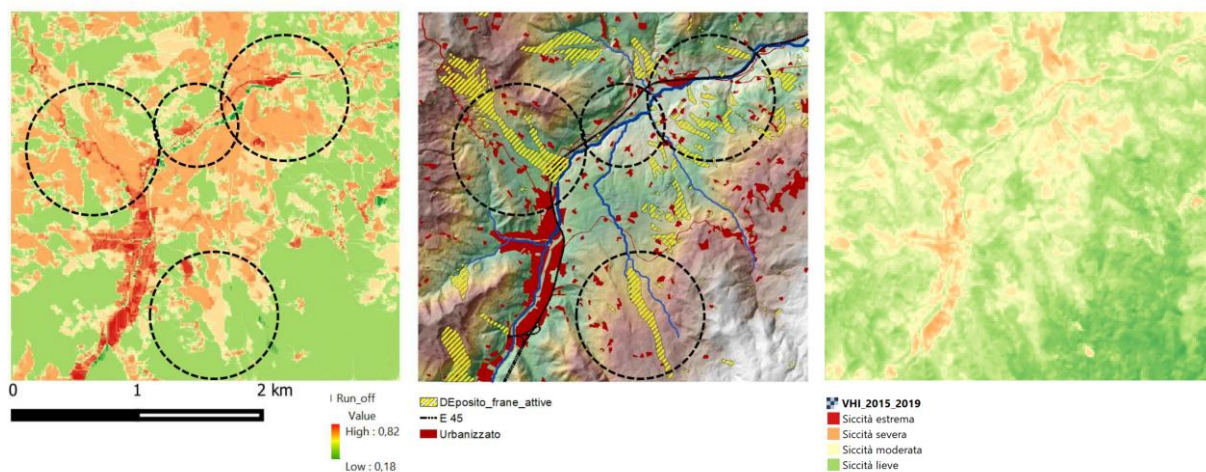


Figura 4 | Riquadro-campione nel comune di Bagno di Romagna: associazione spaziale tra *runoff*, siccità e deposito di frane attive

4 | Conclusioni

I risultati della ricerca confermano l'utilità di un approccio in grado di quantificare impatti morfologici generati da stress climatici convergenti. Al fine di valutare i fattori ambientali che influiscono sui coefficienti di deflusso e sui fenomeni di inaridimento e incendio, è stato predisposto un geo-database basato sull'integrazione spaziale di un set di indicatori morfologico-ambientali.

La ricerca apre, inoltre, una finestra al futuro, rendendo possibili ulteriori test. In particolare, diventa possibile testare l'ipotesi di secondo livello circa il riconoscimento di significative correlazioni fisico-spaziali tra deflusso idrico, variabili climatiche (*temperature, precipitazioni, umidità, vento*) e indici satellitari (*Land Surface Temperature, Normalized Difference Moisture Index, Vegetation Health Index*). Per effettuare questo test si procederà con la costruzione di un geo-database più ricco, basato sull'integrazione spaziale di indicatori morfologico-climatici. L'esercizio consentirà di valutare diverse performance idrauliche del territorio²⁷ e di relazionarle a capacità e flussi dei servizi eco-sistemici presenti. Sarà anche possibile, mediante esplorazione statistica multidimensionale²⁸, riconoscere la rilevanza dei descrittori e costruire un nuovo strato informativo (*multidisciplinare e inter-scalare*) in grado di supportare processi di *spatial planning* e *decision-making*. L'analisi potrebbe aggiornare in modo significativo i parametri di *sensitivity* e *adaptive capacity* per la valutazione del rischio, oltre che 'ridefinire' il concetto di *hazard* e la sua valenza empirica.

In conclusione, la sperimentazione evidenzia l'importanza di procedure di rappresentazione e interpretazione finalizzate ad un governo del territorio *climate-proof*. Con questi test preliminari il progetto Adriadapt cerca di migliorare le capacità decisionali e la consapevolezza civica sulle tematiche di resilienza urbana e territoriale. I risultati di questa ricerca consentono alle regioni adriatiche di testare nuove politiche di adattamento basate sullo sviluppo di algoritmi di modellazione spaziale e sul rafforzamento delle tecniche di *remote sensing* per la valutazione della vulnerabilità territoriale.

Riferimenti bibliografici

- Bento V. A., Trigo I. F., Gouveia C. M., DaCamara C. C. (2018), "Contribution of land surface temperature (T_{CI}) to vegetation health index: A comparative study using clear sky and all-weather climate data records", in *Remote Sensing*, 10(9), 1324.
- Cunha A. P., Zeri M., Deusdará Leal K., Costa L., Cuartas L. A., Marengo J. A., Tomasella J., Vieira R.M., Barbosa A.A., Cunningham C., Cal Garcia J.V., Broedel E., Alvalá R., Ribeiro-Neto G. (2019), "Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019", in *Atmosphere*, 10(11), 642.
- Fritzsche K., Schneiderbauer S., Bubeck P., Kienberger S., Buth M., Zebisch M., and Kahlenborn W. (2014), *The Vulnerability Sourcebook: Concept and guidelines for standardised vulnerability assessments*, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- Füssel H. M. (2010), *Development and climate change: review and quantitative analysis of indices of climate change exposure, adaptive capacity, sensitivity, and impacts*, Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Germany.
- IPCC (2007), *Climate Change Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, Cambridge University Press, Cambridge.

²⁷ Supportate da specifici approfondimenti geologici.

²⁸ L'esplorazione può utilizzare procedure di fattorizzazione (analisi delle componenti principali o delle corrispondenze) combinate a *clustering* gerarchico o non gerarchico.

- IPCC (2012), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special report of Working Group I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC (2013), *Special Report on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC (2014), *Climate Change: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Kogan F.N. (1995), “Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. Advances”, in *Space Research*, 11, pp. 91–100.
- Magni F. (2019), *Climate proof planning: L'adattamento in Italia tra sperimentazioni e innovazioni*, FrancoAngeli, Milano.
- Magro G., Patassini (2013), *Impatti cumulativi e algebra delle esposizioni. Introduzione alla valutazione ambientale strategica in domini interattivi*, lezione (mimeo), Iuav Università di Venezia.
- Maragno D., Musco F., Patassini D. (2017), “La gestione del rischio di ondate di calore e allagamenti in ambiente urbano: un modello applicativo”, in: *Atti della XX Conferenza Nazionale SIU. Urbanistica e/è azione pubblica. La responsabilità della proposta.*, 131-140.
- Maragno D. (2018), *Ict, resilienza e pianificazione urbanistica. Per adattare le città al clima*, FrancoAngeli, Milano.
- Maragno D., dall’Omo Carlo Federico, Pozzer G., Bassan N., Musco F. (2020), “Land–Sea Interaction: Integrating Climate Adaptation Planning and Maritime Spatial Planning in the North Adriatic Basin”, in *Sustainability*, 12(13), 5319.
- Moreno J. M., Torres I., Luna B., Oechel W. C., Keeley J. E. (2013), “Changes in fire intensity have carry-over effects on plant responses after the next fire in southern California chaparral”, in *Journal of Vegetation Science*, 24(2), 395-404.
- Musco F. (2014), “Decarbonizing and climate proof planning: dalla pianificazione alla bassa emissione all’adattamento”, in Musco F., Zanchini E., (a cura di), *Il clima cambia le città: Strategie di adattamento e mitigazione nella pianificazione urbanistica*, FrancoAngeli, Milano.
- Musco F., Zanchini E. (a cura di) (2014), *Il clima cambia le città: Strategie di adattamento e mitigazione nella pianificazione urbanistica*, FrancoAngeli, Milano.
- Musco F. (a cura di) (2016), *Counteracting Urban Heat Island Effects in a Global Climate Change Scenario*, Springer, AG Switzerland.
- O'Brien K., Eriksen S., Nygaard L. P., Schjolden A. (2007), “Why different interpretations of vulnerability matter in climate change discourses”, in *Climate policy*, 7(1), 73-88.
- Pistocchi A. (2001), “La valutazione idrologica dei piani urbanistici: un metodo semplificato per l’invarianza idraulica dei piani regolativi generali”, in *Ingegneria Ambientale*, vol. XXX, n. 7/8, pp. 407- 413.
- Pistocchi Alberto (2018), “Hydrological impacts of soil sealing and urban land take”, in *Urban Expansion, Land Cover and Soil Ecosystem Services*, 157-168.
- Ribeiro M., Losenno C., Dworak T., Massey E., Swart R., Benzie M., Laaser C. (2009), *Design of guidelines for the elaboration of Regional Climate Change Adaptations Strategies. Study for European Commission – DG Environment – Tender DG ENV. G.1/ETU/2008/0093r*. Ecologic Institute, Vienna.
- Solecki W., Seto K. C., Balk D., Bigio A., Boone C. G., Creutzig F., Fragkias M., Lwasa S., Marcotullio P., Romero Lankao P., Zwickel, T. (2015), “A conceptual framework for an urban areas typology to integrate climate change mitigation and adaptation”, in *Urban Climate*, no.14, pp.116-137.
- Stewaed D., Oke T.R. (2014), “Evaluation of the ‘local climate zone’ scheme using temperature observations and model simulations”, in *International Journal of Climatology*.
- Tripathi R., Sahoo R. N., Gupta V. K., Sehgal V. K., Sahoo P. M. (2013), “Developing Vegetation Health Index from biophysical variables derived using modis satellite data in the trans-gangetic plains of india”, in *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 376-384.
- Ungaro F., Calzolari C., Pistocchi A., Malucelli F. (2014), “Modelling the impact of increasing soil sealing on runoff coefficients at regional scale: a hydrogeological approach”, in *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 62(1), 33-42.
- Vergni L., Todisco F. (2010), “Valutazione di un indice standardizzato per lo studio della frequenza e della durata del deficit idrico”, in: *Atti del XXIII Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Palermo, 14–17.
- Vergni L., Todisco F. (2011), “Spatio-temporal variability of precipitation, temperature and agricultural drought indices in Central Italy”, in *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 301-313.
- Wamsler C., Brink E., Rivera C. (2013), “Planning for climate change in urban areas: from theory to practice”, in *Journal of Cleaner Production*, no.50, pp.68-81.
- Wilby R.L., Dessai, S. (2010), “Robust adaptation to climate change”, in *Weather*, 65, pp. 180-185.

Wilby R.L., Keenan R. (2012), "Adapting to flood risk under climate change", in *Progress in Physical Geography*, 36, pp. 349-379.