



POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in
Pianificazione Territoriale, Urbanistica e Paesaggistico – Ambientale

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

*ANALISI E MAPPATURA DELLA VULNERABILITÀ TERRITORIALE
NELL'AREA METROPOLITANA DI MILANO*

*Un approccio integrato a supporto delle politiche di mitigazione e
adattamento climatico*

Relatore

Gabriele Garnero

Correlatore

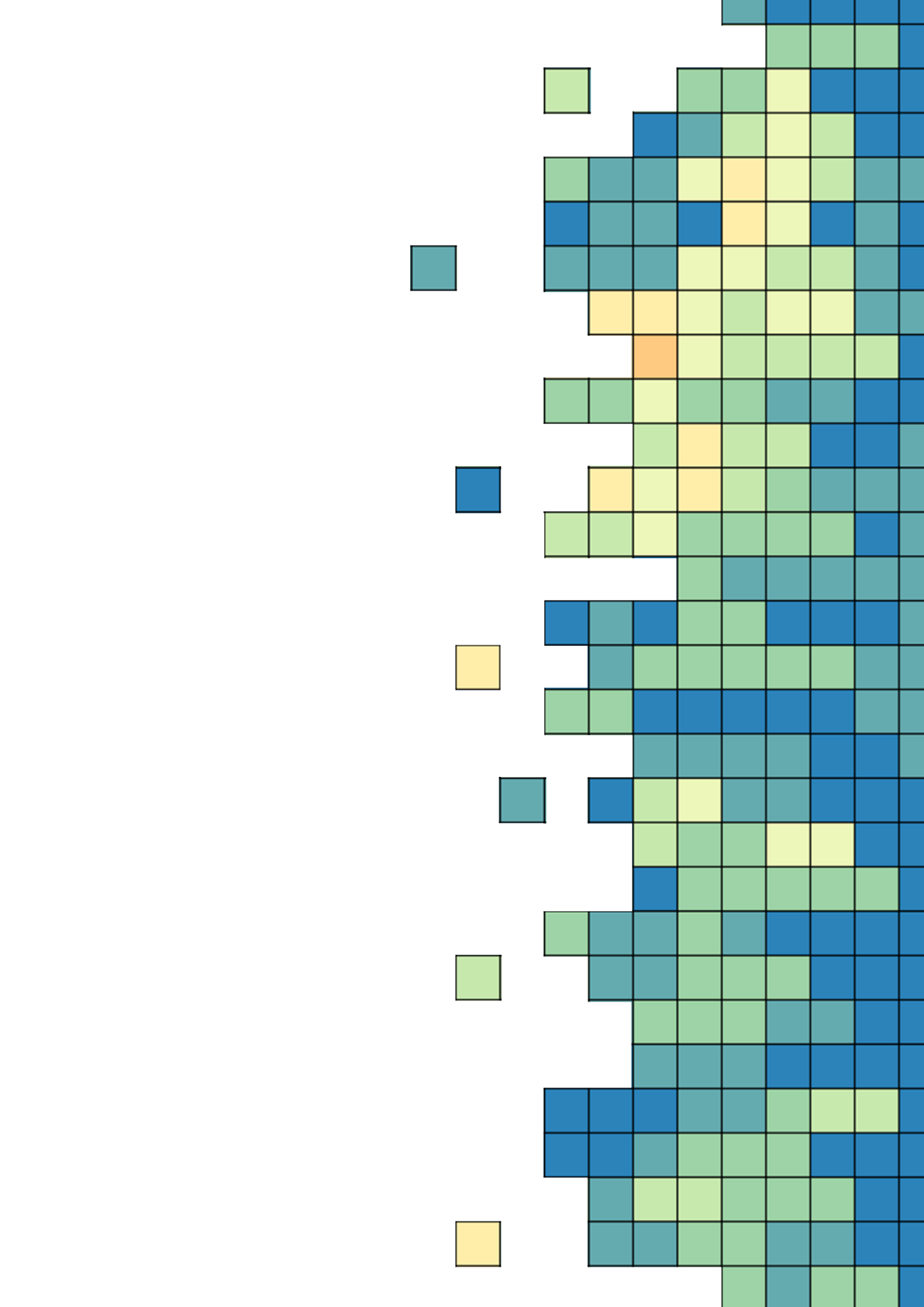
Grazia Brunetta

Danial Mohabat Doost

Candidata

Tecla Raineri

FEBBRAIO 2026

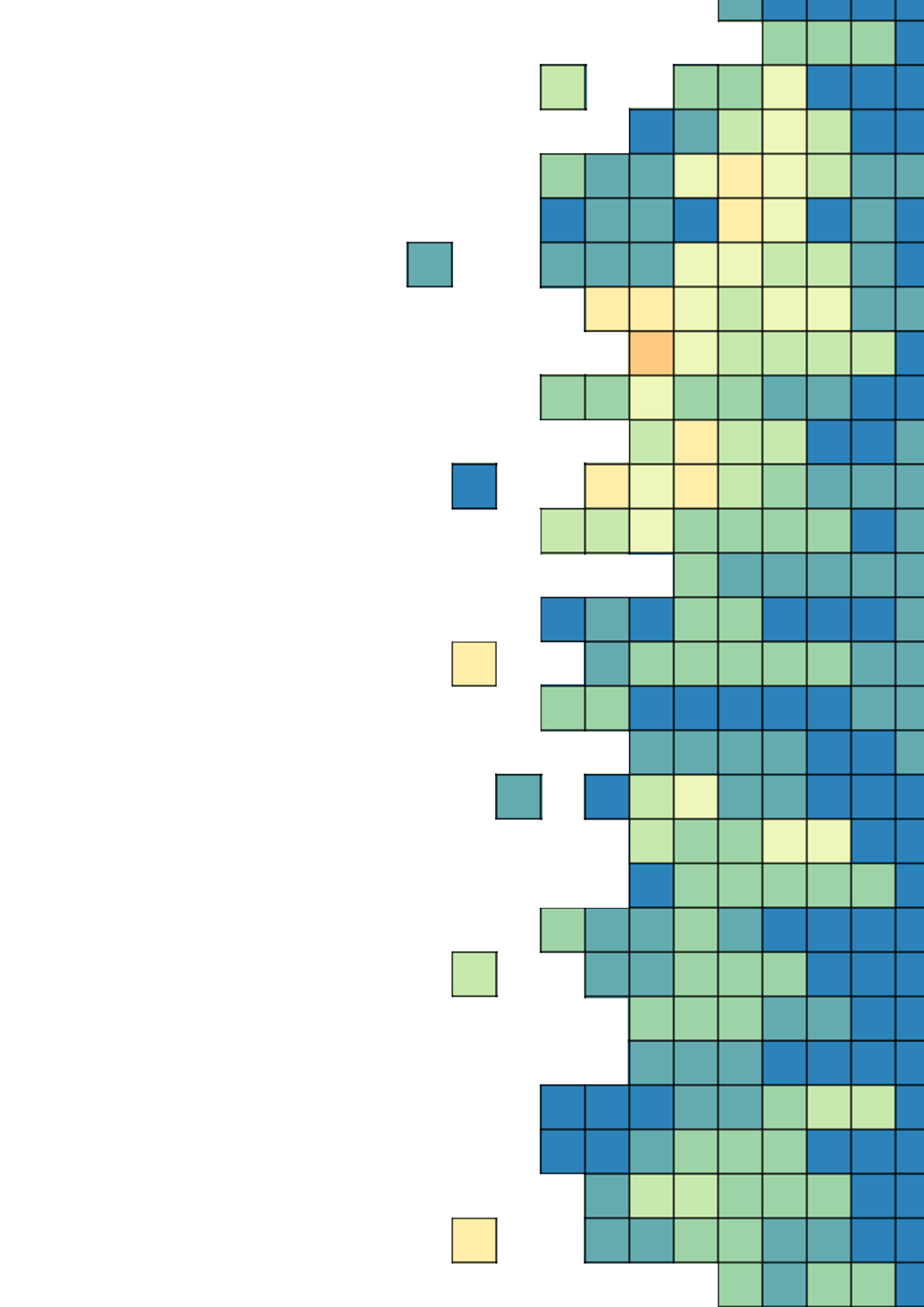


RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro rappresenta il traguardo di un percorso che non avrei potuto intraprendere e portare a termine senza il supporto di molte persone.

Desidero, dunque, aprire questi ringraziamenti esprimendo la mia più sincera gratitudine a coloro che, con la loro guida e disponibilità, hanno contribuito in modo significativo alla sua realizzazione. Per queste ragioni rivolgo i miei più sentiti ringraziamenti al mio relatore, Professor Gabriele Garnero, ai miei correlatori, Professoressa Grazia Brunetta e Dottor Danial Mohabat Doost per il supporto, la disponibilità al confronto e i preziosi consigli che hanno accompagnato e arricchito il lavoro di ricerca.

Inoltre, rivolgo i miei ringraziamenti all'ingegnere Passoni della Città Metropolitana di Milano ed al suo ufficio, per la disponibilità dimostrata.



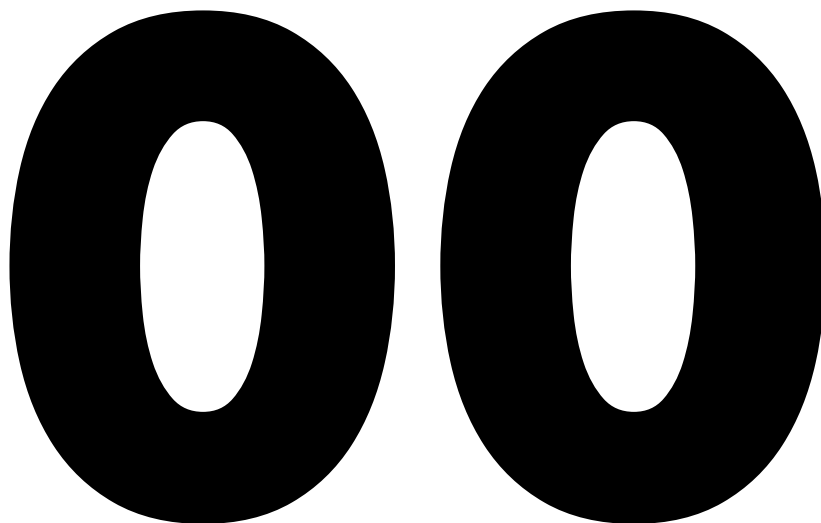
ABSTRACT

La crescente esposizione dei sistemi urbani e metropolitani a fenomeni di rischio ambientale, climatico e socioeconomico rende sempre più centrale il tema della vulnerabilità territoriale come chiave interpretativa per supportare le politiche di pianificazione e governo del territorio. In questo contesto, la tesi analizza le vulnerabilità territoriali della Città Metropolitana di Milano attraverso un approccio spaziale integrato multirischio, con l'obiettivo di superarne la semplice lettura settoriale e di restituire, invece, una visione sistemica delle fragilità del territorio. Nella prima parte dell'elaborato viene sviluppato un inquadramento teorico e metodologico del concetto di vulnerabilità territoriale, ripercorrendone l'evoluzione e le principali declinazioni nei diversi ambiti disciplinari. Successivamente, vengono analizzate e messe a confronto alcune delle principali metodologie di valutazione della vulnerabilità adottate a livello internazionale, tra cui il Social Vulnerability Index, la metodologia del Joint Research Centre, il WorldRisk Index, HAZUS, il Resilience Neighbourhood e la metodologia R3C-GeoResilience. Il confronto critico consente di evidenziarne potenzialità, limiti e ambiti di applicabilità, con particolare attenzione alla scala metropolitana. La seconda parte è dedicata all'analisi applicativa e si concentra sulla Città Metropolitana di Milano, scelta come caso studio per la sua elevata complessità territoriale, funzionale e socioeconomica. Viene illustrata l'applicazione sperimentale della metodologia R3C-GeoResilience, basata su un framework multirischio che integra condizioni strutturali del sistema territoriale e fattori di pericolo attraverso l'utilizzo di indicatori spaziali e strumenti GIS. L'analisi produce mappe di vulnerabilità territoriale capaci di mettere in evidenza pattern spaziali e aree caratterizzate da differenti livelli di fragilità, restituendo una vulnerabilità prevalentemente urbana, legata all'intensità delle pressioni ambientali, alla struttura insediativa e alle componenti sociodemografiche. I risultati mostrano come la metodologia R3C sia in grado di adattarsi a una scala complessa come quella metropolitana, offrendo uno strumento conoscitivo e operativo utile a supporto delle politiche di mitigazione e adattamento climatico. L'elaborato si conclude con una riflessione critica sui limiti dell'approccio adottato e sulle sue potenzialità, sottolineando il ruolo dell'analisi integrata delle vulnerabilità come supporto ai processi di pianificazione territoriale orientati al rafforzamento della resilienza.

INDICE

INTRODUZIONE	1
PARTE I - FONDAMENTI CONCETTUALI E METODOLOGICI DELL'ANALISI DELLA VULNERABILITÀ TERRITORIALE	4
CAPITOLO 1 - LA VULNERABILITÀ NELLE SUE DETERMINANTI TEORICHE E OPERATIVE	5
1.1 Evoluzione concettuale e ruolo della vulnerabilità nell'analisi del rischio di disastro	7
1.2 Modelli di analisi delle vulnerabilità nella Disaster Risk Reduction DDR	11
CAPITOLO 2 - METODOLOGIE E STRUMENTI PER LA MISURAZIONE DELLA VULNERABILITÀ	16
2.1. SOCIAL VULNERABILITY INDEX (SoVI)	19
2.1.1. Origini del SoVI	19
2.1.2. Evoluzioni del SoVI	23
2.1.3. Adattamento ad altri contesti	24
2.1.4. Progetto REACHOUT e SVI-EU	25
2.2 JOINT RESEARCH CENTRE METHODOLOGY (JRC)	29
2.2.1. Origini e sviluppo	29
2.2.2. Indicatori Dashboard	30
2.2.3. Indici sintetici	32
2.2.4. La Resilience Dashboard per il contesto italiano	34
2.3. WorldRiskINDEX	37
2.3.1. Metodologia e fondamenti del WorldRiskIndex	38
2.3.2. Distribuzione Globale del Rischio e delle vulnerabilità secondo il WorldRiskIndex	40
2.4. HAZUS	42
2.4.1. Evoluzione metodologica di HAZUS: dal prototipo sismico alla piattaforma multi-pericolo	43
2.4.2. Valore e utilità di HAZUS	45
2.5 RESILIENCE NEIGHBOURHOOD	46
2.5.1. Building Resilient Neighbourhoods (BRN) per la costruzione della resilienza locale	47
2.5.2. Strumenti operativi di BRN per i quartieri resilienti	48
2.6. R3C-GeoResilience	51
2.6.1. Teoria e struttura concettuale di R3C-GeoResilience	51
2.6.2. Implementazione operativa di R3C-GeoResilience	54
CAPITOLO 3 - CONFRONTO DEI PARADIGMI E DEGLI APPROCCI ALLA VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ	57

PARTE II - APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA R3C-GEORESILIENCE PER IL CONTESTO TERRITORIALE DELLA CITTÀ METROPOLITANA DI MILANO CMMI	61
CAPITOLO 4 - LA CITTÀ METROPOLITANA DI MILANO COME CASO STUDIO	62
4.1 Inquadramento del contesto metropolitano	62
CAPITOLO 5 - MAPPATURA DELLE VULNERABILITÀ IN CMMI TRAMITE L'APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA R3C-GEORESILIENCE	67
5.1. SELEZIONE DEGLI INDICATORI	68
5.1.1. INDICATORI DI CONDITION OF THE SYSTEM	68
5.1.2. Indicatori di hazard	80
5.1.2.1. Indicatori di trends	80
5.1.2.2. Indicatori di Events	82
CAPITOLO 6 - RAPPRESENTAZIONE CARTOGRAFICA DELLE VULNERABILITÀ TERRITORIALI DELLA CITTÀ METROPOLITANA DI MILANO	85
6.1. Elaborazione cartografica per gli indicatori di Condition Of The System	86
6.2. Elaborazione cartografica degli indicatori di Hazard	93
6.2.1. Trends	93
6.2.2. Events	94
6.3. Le tre componenti della vulnerabilità in CMMi	95
CAPITOLO 7 - LA VULNERABILITÀ TERRITORIALE DELLA CMMI SECONDO R3C-GEORESILIENCE	96
7.1. La pesatura degli indicatori nella matrice di correlazione	96
7.2. La mappatura finale delle vulnerabilità territoriali in CMMi	98
7.3. Rappresentazioni spaziali a confronto	99
CAPITOLO 8 - CONCLUSIONI	104
8.1. Riflessione critica dei risultati	105
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	109



INTRODUZIONE

La crescente esposizione dei territori a pressioni ambientali, sociali ed economiche rende sempre più centrale il tema della vulnerabilità come chiave interpretativa per comprendere le dinamiche di fragilità dei sistemi urbani contemporanei. In particolare, i contesti metropolitani rappresentano ambiti complessi, caratterizzati da una forte concentrazione di popolazione, funzioni e infrastrutture, ma anche con marcate disuguaglianze spaziali e sociali che amplificano gli effetti delle pressioni ambientali e delle crisi, siano esse di natura climatica, sanitaria o socioeconomica. In questo quadro, la Città Metropolitana di Milano costituisce un caso di studio emblematico, in cui processi di urbanizzazione intensiva, elevata artificializzazione del suolo e profonde trasformazioni sociodemografiche si intrecciano generando condizioni di vulnerabilità differenziate nello spazio. In questo testo ci si propone di effettuare l'analisi delle vulnerabilità territoriali della Città Metropolitana di Milano attraverso un approccio spaziale multirischio. L'elaborato si propone di indagare come le diverse componenti della vulnerabilità si distribuiscano sul territorio metropolitano e in che modo possano essere lette in una prospettiva sistemica, superando interpretazioni settoriali o esclusivamente amministrative. In questo senso, la vulnerabilità non viene intesa come una condizione statica, ma come il risultato dell'interazione tra fattori ambientali, morfologici e sociodemografici che incidono sulla capacità del territorio di rispondere e adattarsi a pressioni e stress di natura diversa. Uno degli obiettivi principali del lavoro consiste nell'analisi e nella mappatura delle vulnerabilità territoriali a scala metropolitana, attraverso la selezione consapevole di una metodologia di analisi adeguata al contesto di studio. A tal fine, l'elaborato si fonda su una fase preliminare di ricerca e confronto tra diverse tipologie di metodologie per la valutazione della vulnerabilità, ampiamente utilizzate in ambito internazionale. Questo percorso comparativo ha permesso di mettere in luce approcci, finalità, scale di applicazione e limiti di ciascun metodo, fornendo le basi teoriche e operative per la scelta della

metodologia ritenuta più coerente con gli obiettivi dell'elaborato e con le caratteristiche del territorio analizzato.

Lo scopo specifico della tesi è l'applicazione della metodologia R3C alla scala della Città Metropolitana di Milano, al fine di costruire una lettura integrata delle vulnerabilità territoriali e di verificarne l'efficacia in un contesto complesso e fortemente eterogeneo. L'utilizzo della metodologia R3C consente infatti di combinare diversi indicatori all'interno di un quadro unitario, restituendo una rappresentazione spaziale delle condizioni di vulnerabilità che tiene conto delle interazioni tra le diverse componenti del sistema territoriale. L'analisi non è quindi finalizzata esclusivamente alla produzione di un risultato cartografico, ma intende contribuire a una riflessione più ampia sul ruolo degli strumenti di analisi della vulnerabilità come supporto ai processi di pianificazione territoriale e alle politiche orientate alla resilienza.

L'elaborato è strutturato in due parti principali, oltre all'introduzione e alle conclusioni. La prima parte è dedicata all'inquadramento teorico e metodologico del tema della vulnerabilità. In essa viene introdotto il concetto di vulnerabilità territoriale, approfondendone le principali declinazioni e il suo utilizzo nei diversi ambiti disciplinari. A questa prima parentesi teorica segue una descrizione delle principali metodologie di analisi della vulnerabilità prese in considerazione, ovvero il Social Vulnerability Index, la metodologia sviluppata dal Joint Research Centre, il WorldRisk Index realizzato dal Institut für Internationales Recht und Friedensforschung (IFHV) della Ruhr-Universität Bochum, le metodologie di analisi del rischio HAZUS sviluppato dalla Federal Emergency Management Agency (FEMA), il Resilience Neighbourhood e la metodologia R3C-GeoResilience del Centro Interdipartimentale Responsible Risk Resilience Centre (R3C) del Politecnico di Torino. Per ciascun approccio vengono evidenziati i principi di base, le modalità operative e gli ambiti di applicazione, per poi proporre una comparazione critica che ne metta in luce analogie, differenze e limiti, con particolare attenzione alla loro applicabilità a scala metropolitana.

La seconda parte dell'elaborato è invece dedicata all'analisi applicativa. In un primo momento viene descritto il territorio della Città Metropolitana di Milano, delineandone le principali caratteristiche fisiche, insediative e sociodemografiche rilevanti ai fini dell'analisi della vulnerabilità. Successivamente, viene illustrata l'applicazione della metodologia R3C al contesto di studio, descrivendo le scelte metodologiche adottate, la selezione degli indicatori e le modalità di costruzione delle mappe di vulnerabilità. I risultati dell'analisi vengono quindi rappresentati e interpretati, mettendo in evidenza i principali pattern spaziali e le aree caratterizzate da maggiori condizioni di fragilità. Maggiormente dedicata ad una riflessione critica sui risultati ottenuti e sulla metodologia adottata è invece la parte conclusiva dell'elaborato. In questa sezione vengono discussi i limiti del lavoro, le potenzialità dell'approccio R3C applicato a scala metropolitana e le

possibili prospettive di sviluppo futuro della ricerca, con particolare riferimento al ruolo degli strumenti di analisi integrata delle vulnerabilità nei processi di pianificazione e governo del territorio. In questo modo, la tesi si propone non solo come un esercizio di analisi territoriale, ma come un contributo alla comprensione delle dinamiche di vulnerabilità nei contesti metropolitani contemporanei.

**FONDAMENTI
CONCETTUALI E
METODOLOGICI
DELL'ANALISI
DELLA VULNERABILITÀ
TERRITORIALE**

PARTE 1

01

LA VULNERABILITÀ NELLE SUE DETERMINANTI TEORICHE E OPERATIVE

La vulnerabilità è un concetto complesso e sfaccettato, sviluppatosi parallelamente alla nozione di rischio legata a pericoli naturali o antropici. In questo contesto, essa rappresenta la componente più prevedibile, modificabile e, in misura variabile, gestibile. Nella prospettiva attuale, la vulnerabilità costituisce il confine che distingue un evento pericoloso da un vero e proprio disastro, mettendo in evidenza come i disastri siano in larga parte costruzioni sociali. Per questo motivo, le valutazioni di vulnerabilità mirano a comprenderne le diverse forme e variazioni nello spazio e nel tempo, individuando al contempo strategie concrete per ridurla. Solo affrontandola in maniera proattiva, sia a livello individuale che collettivo, le comunità possono aspirare a maggiore sicurezza e a basi solide per il progresso sociale, economico e tecnologico. Acquisire una comprensione chiara e completa della vulnerabilità, sia nei suoi aspetti teorici che operativi, è fondamentale per scienziati e decisori, ma anche per altri attori coinvolti, come politici, responsabili della gestione del rischio, soccorritori, compagnie assicurative e cittadini. Tuttavia, la vulnerabilità è anche un concetto instabile: nel tempo ha assunto numerose definizioni, poiché si è progressivamente intrecciata con diverse discipline. Proprio per questa sua interdisciplinarietà, la vulnerabilità è modellata da un complesso intreccio di fattori e processi fisici, sociali, economici e istituzionali che possono aumentare, ridurre o mantenere i suoi livelli. Tra i fattori che modellano la vulnerabilità a livello globale, il Global Environmental Outlook GEO4 include povertà, globalizzazione, commercio e aiuti, salute, conflitto e cambiamenti nei livelli di governance, scienza e tecnologia (UNEP, 2007). Al contrario, la vulnerabilità è sostenuta da varie forme di inerzia di natura sociale, finanziaria, istituzionale o politica che si manifestano all'interno di diversi sistemi. L'aggressione dello sviluppo, l'alto tasso di disoccupazione, la perpetuazione della povertà, l'uso inadeguato del territorio, l'espansione urbana incontrollata e le tensioni sociali e politiche sono tra i fattori (interni) che aumentano la vulnerabilità. Questi sono spesso problemi che sono stati trascurati o affrontati solo superficialmente e tardivamente, il che

ha permesso loro di perpetuarsi attraverso mandati politici successivi. Queste problematiche si verificano anche a colpa dell'importazione ed esportazione della vulnerabilità. Un esempio concreto di importazione di vulnerabilità riguarda i rifiuti e i materiali pericolosi importati dai paesi sviluppati verso quelli in via di sviluppo, rappresentando una fonte di vulnerabilità. Mentre, per quanto riguarda l'esportazione della vulnerabilità, l'United Nations Environment Programme (UNEP) mette in evidenza gli effetti negativi sull'ambiente percepiti dai gruppi più vulnerabili situati dove le risorse vengono estratte o dove i rifiuti vengono depositati (UNEP, 2007). Affrontare l'importazione/esportazione della vulnerabilità fa parte degli sforzi di Resisting Disaster Risk Creation (RDRC), sottolineando la necessità di riconoscere che non tutte le comunità e le istituzioni coinvolte nella costruzione del rischio percepiscono i rischi allo stesso modo, né condividono gli stessi incentivi per ridurre i rischi (Wisner & Lavell, 2017).

La vulnerabilità emerge come la variabile più significativa e predittiva all'interno dell'equazione del rischio, suscitando al contempo una vasta gamma di interpretazioni, soprattutto nel contesto delle geoscienze. Originariamente legata al diritto e alla sopravvivenza dei mezzi di sussistenza, l'attenzione verso il concetto di vulnerabilità si è intensificata negli anni '80, quando fu introdotta nei rapporti dell'UNDRO, diventando un elemento fondamentale nell'analisi del rischio. Da allora, la vulnerabilità ha assunto un ruolo centrale nella ricerca sui disastri e nella definizione di strategie di mitigazione del rischio su scala diversa, attraverso approcci interdisciplinari. A partire dalla fine del XX secolo, lo studio della vulnerabilità ha cominciato a concentrarsi anche su contesti specifici, come le aree urbane, e successivamente su scale più circoscritte, come quelle insulari. Nel XXI secolo, la vulnerabilità ha consolidato la sua importanza come concetto chiave per la riduzione del rischio nei documenti ufficiali delle Nazioni Unite. Il Quadro di Azione di Hyogo (2005-2015) e il Quadro di Sendai per la Riduzione del Rischio di Disastri (2015-2030) sottolineano entrambi il ruolo cruciale della vulnerabilità. Il Quadro di Hyogo richiama l'attenzione sulla necessità di analizzare i fattori fisici, sociali, economici e ambientali che la determinano, mentre il Quadro di Sendai stabilisce sette obiettivi globali, sei dei quali direttamente legati alla vulnerabilità delle comunità. In entrambi i casi, la vulnerabilità viene considerata come la componente del rischio che, in ultima analisi, determina l'entità dell'impatto di un pericolo. Tuttavia, Birkmann ha criticato il Quadro di Hyogo per non aver individuato chiaramente gli elementi primari della vulnerabilità e per non aver definito percorsi concreti per costruire una cultura della resilienza. Un altro limite del quadro riguarda il fatto che tende a valutare gli impatti dei disastri solo dopo che si sono verificati, senza proporre strumenti predittivi per anticipare la vulnerabilità. Nonostante questi limiti, il quadro di riferimento offre comunque una visione più articolata del rischio, in cui la vulnerabilità viene discussa insieme a concetti come esposizione ed effetti

sequenziali su diverse scale spaziali e sociali. Con l'avvento del Quadro di Sendai e dell'Accordo di Parigi, si è assistito a un cambiamento verso un approccio multi-pericolo e neutrale rispetto al tipo di pericolo. In questo contesto, la vulnerabilità diventa un concetto chiave, poiché le dinamiche spaziali e temporali sono influenzate non solo dagli impatti multipli dei pericoli, ma anche dalle capacità di adattamento delle comunità. Questo approccio presenta nuove sfide per la ricerca sul rischio, ma rafforza al contempo il ruolo centrale della vulnerabilità nel comprendere le interazioni tra esseri umani e pericoli. Una prospettiva recente, proposta da Otto e Raju, sottolinea che la vulnerabilità non dovrebbe essere analizzata solo in termini di "effetti post-disastro", poiché le condizioni che la determinano sono già presenti al momento del manifestarsi degli impatti. Dopo il 2000, si è diffusa una visione più sistemica della vulnerabilità, caratterizzata da diverse definizioni e interpretazioni. La vulnerabilità sistemica viene talvolta fraintesa, ridotta a una semplice "tendenza di un elemento infrastrutturale a subire danni funzionali a causa delle sue interconnessioni con altri elementi dello stesso sistema territoriale". Tuttavia, il crescente riconoscimento della vulnerabilità sistemica mette in luce l'importanza di analizzarne le dinamiche nel tempo e nello spazio, in particolare nell'ambito della gestione multirischio. Le ricerche che indagano le dinamiche della vulnerabilità in contesti multi-pericolo aprono nuove prospettive nella comprensione delle interazioni tra rischi diversi e delle loro connessioni attraverso regioni e sistemi differenti (Armaş & Albuлесcu, 2025).

1.1 Evoluzione concettuale e ruolo della vulnerabilità nell'analisi del rischio di disastro

La vulnerabilità si distingue come la variabile più importante e predittiva nell'equazione del rischio, promuovendo al contempo una vasta gamma di interpretazioni, specialmente quando introdotta nel campo delle geoscienze. Le prime definizioni di vulnerabilità la vedevano come la potenzialità di perdita che può derivare da un fenomeno con potenziale distruttivo, basato sulle particolarità degli elementi a rischio in una data area, simile a definizioni correnti del rischio. Negli ultimi 30 - 40 anni, la definizione è stata modificata più volte. Un contributo rilevante in questo percorso è quello di Bohle (2003), che distingue tra vulnerabilità esterna, legata all'esposizione e al contesto esterno che ruota intorno all'evento dannoso, e vulnerabilità interna, connessa invece alle azioni necessarie per attenuare cambiamenti economici ed ecologici. Da un punto di vista sociale, Boos e colleghi (2009) hanno ampliato questa prospettiva, proponendo un approccio più operativo che considera la vulnerabilità attraverso dimensioni demografiche, tassonomiche, situazionali e contestuali. Tuttavia, nonostante i numerosi tentativi, l'elaborazione di una definizione universale è irraggiungibile: ogni definizione, è influenzata dagli obiettivi specifici delle analisi

nei diversi ambiti scientifici. Nelle scienze naturali, la vulnerabilità viene spesso intesa come una relazione funzionale tra l'intensità di un fenomeno distruttivo, i suoi effetti sugli elementi a rischio e il grado di esposizione. Si tratta però di un approccio che tende a trascurare il contesto sociale, che invece è centrale nelle scienze sociali, dove la vulnerabilità è considerata come il prodotto di processi sociali, una costruzione sociale a tutti gli effetti. Prendendo in considerazione la molteplicità di definizioni presenti è possibile comprendere la natura sfuggente del termine, capace di adattarsi a discipline diverse e di generare interpretazioni molteplici. Emergono però due direzioni principali da questo ampio ventaglio: la vulnerabilità come proprietà indipendente da uno specifico pericolo, e la vulnerabilità come condizione direttamente legata al pericolo stesso. La prima prospettiva descrive la vulnerabilità come il grado in cui un sistema o un suo componente può subire danni a seguito dell'esposizione a un pericolo, sia esso una perturbazione o uno stress. In quest'ottica, la vulnerabilità è interpretata come il risultato dell'interazione tra esposizione, sensibilità e capacità di adattamento. Tale approccio si avvicina ai modelli rischio-pericolo che quantificano la vulnerabilità di un sistema e valutano l'impatto di eventi estremi, spesso di natura climatica. Alcuni approcci integrativi cercano invece di unire le dimensioni biofisiche con quelle sociali, proponendo letture più complesse che tengono conto sia degli aspetti materiali sia di quelli costruttivisti. Nella ricerca sui cambiamenti climatici, ad esempio, la vulnerabilità è vista come l'integrazione tra le caratteristiche e l'intensità del cambiamento climatico, la sensibilità del sistema e la sua capacità di adattamento (Armaş & Albulescu, 2025). Quest'ultima interpreta la vulnerabilità come un insieme di condizioni determinate da fattori fisici, socioeconomici e ambientali che aumentano la suscettibilità di una comunità agli impatti di un pericolo. Una definizione di questo tipo è stata ripresa anche dal United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), che considera la vulnerabilità come *"le condizioni determinate da fattori o processi fisici, sociali, economici e ambientali che aumentano la suscettibilità di individui, comunità, beni o sistemi agli impatti dei pericoli"* (UNDRR, 2017). A livello intergovernativo, la vulnerabilità viene spesso concettualizzata per facilitare gli interventi strategici, ponendo spesso l'accento sulle condizioni e sui processi umani, fisici e ambientali che determinano la probabilità e la gravità dei danni causati da un pericolo.

Volendo ripercorrere l'evoluzione del concetto di vulnerabilità è doveroso iniziare però dai primi studi scientifici che consideravano la vulnerabilità come un fenomeno statico, poiché le analisi non tenevano conto dei suoi cambiamenti nello spazio e nel tempo. I primi lavori sulla vulnerabilità hanno incluso oltre ai modelli di rischio-pericolo anche la prospettiva della teoria dei diritti elaborata da Amartya Sen nei primi anni '80. Approccio originariamente pensato per spiegare l'insicurezza alimentare, dove la vulnerabilità sociale viene intesa come

il risultato di fattori economici e istituzionali che impediscono agli individui di sostenere un adeguato sostentamento. In tal senso, la vulnerabilità riflette l'assenza di diritti e di risorse sufficienti per proteggere o garantire i mezzi di sussistenza di fronte agli eventi climatici. Questa prospettiva si collega strettamente agli approcci basati sui mezzi di sussistenza e al quadro dei mezzi di sussistenza sostenibili sviluppato da Chambers e Conway, che pongono l'accento non solo sulla disponibilità di risorse, ma anche sulla capacità di far fronte a stress e shock e di successivo recupero. La definizione duale di vulnerabilità proposta da Chambers che ha formulato: *"la vulnerabilità si riferisce all'esposizione a contingenze e stress e alla difficoltà di affrontarli. La vulnerabilità ha quindi due facce: una esterna di rischi, shock e stress a cui è soggetto un individuo o una famiglia; e un lato interno che è indifeso, cioè mancanza di mezzi per far fronte senza perdite dannose"* (Chambers, 1989). Questa è stata ripresa ed ampliata da Bohle (1993) con un lavoro che ha sottolineato come le configurazioni locali e storiche di povertà, fame e carestia definiscono lo spazio della vulnerabilità, visto come uno spazio sociale multistrato e multidimensionale, integrando quindi prospettive provenienti dall'ecologia umana, dalla teoria dell'azione e dai modelli di accesso alle risorse. È da sottolineare come i concetti di Chambers (1989) e di Bohle (1993) si siano sviluppati a partire dalla ricerca sui processi di destabilizzazione nei paesi in via di sviluppo, legati principalmente alle crisi e ai disastri indotti dalla siccità e quindi concentrandosi principalmente sui pericoli a lenta insorgenza. Altri contributi pionieristici come quelli di O'Keefe con l'articolo *"Taking the Naturalness out of Natural Disasters"* (1976) e Hewitt con il libro *"Interpretations of Calamity"* (1983) risultano fondamentali per raggiungere ragionamenti come quelli appena citati. Con questi primi lavori, infatti, si afferma una prospettiva più complessa, secondo la quale i disastri sono da considerarsi il risultato dell'interazione tra processi fisici e condizioni di fragilità sociale, economica e politica. Ciò ha aperto la strada a una comprensione più articolata del rischio, in cui la vulnerabilità delle comunità esposte assume un ruolo centrale.

Queste elaborazioni hanno gettato le basi per lo sviluppo dei concetti di vulnerabilità sociale ed economica, che hanno trovato applicazione sia nella letteratura sui rischi sia negli studi economici, con un'attenzione particolare alla multidimensionalità della povertà e ai modelli storici di disuguaglianze sociali. Il concetto di vulnerabilità sociale, in particolare, ha favorito approcci partecipativi che superano le tradizionali misure economiche, come il reddito o il PIL, riconoscendo che chi vive in condizioni di povertà possiede conoscenze preziose sulle proprie difficoltà e capacità di risposta. Tuttavia, questo approccio non è privo di critiche, in quanto la vulnerabilità sociale presenta limiti legati alla sua impostazione settoriale, spesso disconnessa dalle dimensioni ambientali e tende

alla semplificazione del pericolo riducendolo a una generica forza naturale distruttiva.

Parallelamente i primi studi di geografia fisica si sono concentrati sugli approcci rischio-pericolo, in linea con una visione positivista e deterministica. In questo quadro la vulnerabilità era intesa come potenziale di perdita, un concetto valutato a posteriori rispetto al manifestarsi dell'evento pericoloso. Con il tempo, però, la geografia ha progressivamente incorporato approcci umani, culturali ed ecologico-politici, abbandonando la rigidità dei paradigmi deterministici. In quest'ottica, la vulnerabilità è stata analizzata attraverso tre sfere chiave individuate da Birkmann: come fattore intrinseco di rischio, come probabilità di subire danni, e infine in una prospettiva dualista che unisce suscettibilità e capacità di adattamento (Birkmann & UN University, 2013). Questa evoluzione ha condotto verso una comprensione multidimensionale della vulnerabilità, oggi riflessa anche nella definizione fornita dall'UNDRR, che integra esposizione, suscettibilità e capacità di adattamento. Le ultime due sfere individuate da Birkmann, infatti, mostrano come la vulnerabilità si sia progressivamente distaccata da una concezione puramente centrata sull'impatto dei pericoli, per aprirsi a visioni più sistemiche che includono sia fattori ambientali sia strutture sociali. Il dibattito ha così dato vita a due principali paradigmi: da un lato, quello comportamentale (o scuola di Chicago) che si avvicina agli approcci rischio-pericolo e definisce la vulnerabilità come "capacità di essere feriti", concentrandosi sull'adattamento umano ai pericoli naturali; mentre dall'altro, quello strutturale che individua le radici della vulnerabilità nelle condizioni sociali ed economiche che determinano l'accesso alle risorse.

Oggi la vulnerabilità non è più intesa come una variabile passiva nell'analisi del rischio, ma come un concetto dinamico e trasformativo, strettamente legato alla resilienza e alla capacità adattativa dei sistemi sociali e ambientali. La definizione più aggiornata e condivisa è quella proposta dall'IPCC AR6 (2022) che descrive la vulnerabilità come la "propensione o predisposizione a subire effetti negativi", includendo elementi come la sensibilità al danno e la mancanza di capacità di adattamento. Tale visione ha reso l'analisi della vulnerabilità uno strumento imprescindibile per comprendere l'impatto delle pressioni ambientali e socioeconomiche sui sistemi uomo-ambiente. Quando un sistema risulta fortemente esposto e con scarse capacità di risposta, esso si trova in una condizione di elevata vulnerabilità. Per questo motivo molte organizzazioni internazionali, tra cui FAO, UNDP, UNEP, la Croce Rossa e la Banca Mondiale, utilizzano oggi l'analisi della vulnerabilità per identificare popolazioni, territori ed ecosistemi maggiormente a rischio e per sviluppare strategie di adattamento e mitigazione. Il concetto ha così contribuito ad ampliare gli studi sul rischio, superando la visione riduzionista basata esclusivamente sul pericolo naturale e includendo anche le determinanti socioeconomiche.

Si può infine concludere che lo sviluppo del concetto di vulnerabilità in diversi campi di ricerca e scuole di pensiero è stato un processo con varie prospettive, che ha portato a diversi approcci su come definire e valutare la vulnerabilità. Nonostante il fatto che le varie comunità definiscano ancora la vulnerabilità in modo diverso, è importante riconoscere che il concetto è stato introdotto con successo come risposta alla percezione puramente orientata al pericolo del rischio di catastrofi negli anni '70 e nella gestione del rischio di catastrofi e nel discorso sull'adattamento orientato alle scienze naturali nella ricerca sui cambiamenti climatici negli anni '90. Oggi emerge un consenso sul fatto che le strategie per la riduzione del rischio e l'adattamento ai cambiamenti climatici non possono basarsi esclusivamente sulla caratterizzazione dei cambiamenti fisici o ambientali. Piuttosto, il concetto di vulnerabilità costituisce un pilastro importante in tutte e tre le comunità di ricerca, aiutando una migliore comprensione dei processi di destabilizzazione e delle capacità di risposta della società alla luce dei cambiamenti climatici, dei pericoli naturali e dei cambiamenti socioeconomici. Il crescente riconoscimento dell'importanza della vulnerabilità nell'adattamento al rischio e ai cambiamenti climatici si rivela anche nel discorso scienza-politica e, quindi, in importanti documenti internazionali.

1.2 Modelli di analisi delle vulnerabilità nella Disaster Risk Reduction DRR

Discipline scientifiche	Modelli di vulnerabilità	Riferimenti Bibliografici
Human Ecology	Alexander	Hewitt (1983); Alexander (2000, 2012).
	Hazard of place model	Cutter (1996, 2003).
Structural perspective	PAR	Blaikie et al. (1994); Wisner et al. (2004).
	Access Model	Blaikie et al. (1994); Wisner et al. (2004).
Holistic prespective	Holistic approch model	Cadorna (1999, 2000); Cadorna e Barbat (2000).
	MOVE framework	Birkmann et al. (2013).
Social ecology	Turner et al. Model	Turner et al. (2003).
	Onion framework	Bogardi e Birkmann (2004).
	BBC framework	Cadorna (1999, 2000); Bogardi e Birkmann (2004).

Tabella 1 - Modelli di analisi della vulnerabilità nella ricerca sulla riduzione del rischio di catastrofi (DRR). Adattato da (Armaş & Albulescu, 2025).

L'evoluzione della vulnerabilità in un concetto ampio, che comprende molteplici definizioni e interpretazioni ha guidato lo sviluppo di vari modelli che integrano la vulnerabilità, ciascuno con la propria logica di base e appartenenti a diverse prospettive e discipline scientifiche.

Nell'ambito dell'ecologia umana, i primi modelli seguivano un percorso lineare e semplice, in cui i pericoli agiscono sulle comunità umane, provocando potenzialmente disastri. Questo approccio implica che i rischi abbiano un ruolo

centrale nell'analisi dei rischi e dei disastri, sostenuto dal predominio delle scienze fisiche naturali sulle scienze sociali all'inizio del XX secolo. L'impatto è stato visto in funzione dell'esposizione al pericolo e della sensibilità dell'elemento esposto. Tali modelli sono stati etichettati come "modelli di rischio-pericolo" e includevano la vulnerabilità solo come elemento implicito o da analizzare separatamente. Questi modelli trascurano l'influenza di diversi componenti del sistema sugli impatti dei pericoli o il ruolo delle strutture sociali e delle istituzioni sull'esposizione e sugli impatti. È stato solo negli anni '80 che la ricerca dei paesi in via di sviluppo ha postulato che la vulnerabilità giocava un ruolo maggiore dei pericoli nell'equazione dei disastri (Hewitt, 1983); secondo questa logica quindi i pericoli agiscono come fattori scatenanti di processi sociali che creano vulnerabilità. Basandosi su questa prospettiva del ciclo di feedback, Alexander ha sviluppato un modello in cui i rischi naturali o antropici, i fattori culturali e storici agiscono sulla vulnerabilità e queste interazioni modellano le particolarità dei disastri. Altri elementi considerati nel modello riguardano lo sfruttamento delle risorse, i cambiamenti ambientali, la crescita della popolazione e la mobilità aumentate nelle aree soggette a rischi, e i progressi tecnologici. Un modello significativo, appartenente alla tradizione dell'ecologia politica o al filone dell'ecologia umana, è stato sviluppato da Cutter ed è strettamente correlato al rischio, visto come una misura oggettiva della probabilità di occorrenza di un pericolo. Il rischio si combina con gli sforzi di mitigazione, risultando nel potenziale pericoloso. La vulnerabilità è correlata all'esposizione (condizioni che rendono persone o luoghi vulnerabili ai pericoli), alla condizione sociale (una misura della resilienza ai pericoli), o viene affrontata come "l'integrazione delle esposizioni potenziali e della resilienza sociale con un focus specifico su luoghi o regioni" (Cutter, Boruff, & Shirley, 2003). Il potenziale pericoloso viene filtrato attraverso il tessuto sociale (espresso tramite indicatori socioeconomici, capacità individuale o collettiva di risposta e cognizione del rischio) per determinare la vulnerabilità sociale di un luogo. Questo è completato dalla vulnerabilità biofisica/tecnologica, che risulta dal filtraggio del potenziale pericoloso attraverso il contesto geografico (espresso come sito, situazione e prossimità). All'interno del modello, le vulnerabilità sociali e biofisiche interagiscono per produrre la vulnerabilità complessiva di un luogo, che a sua volta riduce o aumenta ulteriormente rischio e mitigazione, formando un ciclo di feedback.

Uno dei primi modelli sviluppati nella prospettiva strutturale è il cosiddetto modello Pressure and Release (PAR) di Blaikie e colleghi, attraverso cui si illustrano le modalità con cui si verificano i disastri quando pressioni dinamiche accumulate, comprese da condizioni non sicure, vengono rilasciate dai pericoli naturali. Le pressioni dinamiche vengono viste come collegamenti tra cause strutturali più ampie e condizioni locali, "traducendo gli effetti delle cause profonde nella vulnerabilità delle condizioni non sicure" (Blaikie, Cannon, Davis,

& Wisner, 1994). Le cause profonde di queste pressioni, materializzate dall'esclusione sociale, dalla concentrazione della ricchezza e dall'uso mirato della forza contro gruppi emarginati, sono spesso legate a forze globali sulle quali le comunità locali hanno scarsa o nessuna influenza. Il modello dà uguale importanza a "pericolo" e "vulnerabilità" come pressioni, riconoscendo il carattere progressivo della vulnerabilità. D'altra parte, l'analisi non fornisce una vista sistematica dei meccanismi e dei processi della vulnerabilità, infatti a complemento di questo, gli stessi autori hanno realizzato l'Access Model sviluppato per concentrarsi sul livello di accesso delle comunità umane alle risorse necessarie per sostenere i loro mezzi di sussistenza prima e dopo il verificarsi di un pericolo. Questo modello mette in evidenza le dinamiche della vulnerabilità, che è modellata dai pericoli che modificano la disponibilità delle risorse necessarie alle persone per rispondere e riprendersi. L'Access Model ha come obiettivo *"mirare a spiegare a livello micro la formazione e la traiettoria della vulnerabilità e la sua variazione tra individui e famiglie. Si occupa dell'impatto di un disastro man mano che questo si sviluppa, del ruolo e dell'agenzia delle persone coinvolte, quali sono gli impatti su di loro, come affrontano la situazione, sviluppano strategie di recupero e interagiscono con altri attori"* (Blaikie, Cannon, Davis, & Wisner, 1994).

L'approccio olistico sviluppato da Cardona e Barbat propone un focus multidimensionale sulla vulnerabilità, che integra esposizione, suscettibilità e capacità di coping delle comunità umane colpite dai rischi. L'esposizione fisica e la suscettibilità sono considerati fattori di "rischio duro" e dipendono dal pericolo, guardando quindi agli effetti diretti, mentre la fragilità dei sistemi socioeconomici e la mancanza di resilienza per affrontare e recuperare appartengono al "rischio morbido", essendo indipendenti dal pericolo e comportando quindi effetti indiretti. All'interno del modello, il rischio risulta dall'interazione tra pericolo e vulnerabilità ed è integrato in un ciclo di feedback in cui interagisce con i sistemi di gestione del rischio e con interventi correttivi e prospettici. Distinzione che in seguito è stata modificata in "danno fisico" e "fattore di impatto" nel modello olistico rivisto. Un altro modello che considera la vulnerabilità come focalizzata sul processo, sfaccettata e dinamica è il quadro MOVE sviluppato nell'ambito dell'omonimo progetto. La vulnerabilità è integrata con la gestione del rischio, quest'ultima agisce come motore della riduzione dell'esposizione e della suscettibilità e del miglioramento della resistenza. Il framework MOVE integra anche un sistema di feedback loop che tiene conto della natura dinamica della vulnerabilità, dato che *"la valutazione della vulnerabilità non può limitarsi all'identificazione delle carenze, ma piuttosto prendere in considerazione anche i potenziali cicli di feedback e gli strumenti di intervento che esistono o possono essere sviluppati per ridurre la vulnerabilità"*. Altre caratteristiche importanti di questo modello sono il riconoscimento di fattori causali chiave della vulnerabilità

(esposizione, suscettibilità, mancanza di resilienza), le sue varie sfaccettature e la differenziando anche il coping dall'adattamento.

Il modello dicotomico sviluppato da Turner nel filone dell'ecologia sociale, si è evoluto per essere il quadro concettuale della vulnerabilità all'interno degli studi sullo sviluppo sostenibile, data la sua attenzione all'aggiustamento o all'adattamento. Il quadro è strutturato intorno a: *"(1) collegamenti con le più ampie condizioni e processi umani e biofisici (ambientali) che operano sul sistema accoppiato in questione; (2) perturbazioni e fattori di stress/stress che emergono da queste condizioni e processi; e (3) il sistema di preoccupazione uomo-ambiente accoppiato in cui risiede la vulnerabilità, compresa l'esposizione e le risposte (cioè il coping, gli impatti, gli aggiustamenti e gli adattamenti)"* (Turner II, et al., 2003). All'interno del modello, la vulnerabilità è definita come una funzione dell'esposizione, della sensibilità e della resilienza. L'analisi si concentra sui sistemi ambientali umani accoppiati, che possono essere influenzati da pericoli che hanno origine all'interno o all'esterno del sistema. Il quadro può essere applicato a partire dai pericoli e procedendo verso le conseguenze, oppure al contrario, e anche a scale diverse, a seconda dell'interesse e dello scopo dell'utente. Altri modelli di spicco nell'ambito dell'ecologia sociale sono il quadro a cipolla e il quadro concettuale Bogardi-Birkmann-Cardona (BBC framework), entrambi sviluppati dall'Università delle Nazioni Unite-Institute for Environment and Human Security (UNU-EHS) all'inizio del XXI secolo dagli stessi autori. Il primo, prende il nome dalla sua struttura concentrica, in cui Bogardi e Birkmann identificano: una sfera esterna di eventi naturali, una sfera economica o monetaria ed una sfera interna sociale o di disutilità. Il quadro include anche un asse della realtà o certezza, dove il pericolo può influenzare la sfera economica e causare danni, ed un asse delle opportunità o probabilità, lungo il quale il pericolo può influenzare la sfera sociale, nel caso si verifichi un disastro. Al centro della sfera sociale ci sono varie capacità, che indicano che i disastri sono condizionati sia dai pericoli sia dalla preparazione e capacità di gestione delle comunità umane. Sebbene il modello affronti la vulnerabilità sociale, riferita alla perdita e ai danni alle sfere economiche e sociali, non comprende la vulnerabilità ambientale o l'esposizione; in questo caso, l'ambiente viene attribuito alla sfera dell'evento. Il quadro BBC sviluppato da Cardona, Bogardi e Birkmann assomiglia al precedente, integrando la vulnerabilità come parte di un ciclo di retroazione che include anche lo sviluppo sostenibile. Questo collegamento motiva l'analisi della vulnerabilità e della capacità di gestione a diversi livelli e attraverso sfere ambientali, sociali ed economiche. In questo modello, la definizione di vulnerabilità corrisponde a quella moderna e standard emessa dall'UNDRR. Inoltre, la vulnerabilità è intesa come un processo ed il concetto si estende oltre la stima dei danni e della probabilità di perdita, comprendendo la capacità di gestione e gli interventi potenziali che possono ridurre la vulnerabilità. Il quadro

postula che le valutazioni della vulnerabilità dovrebbero essere adattate al tipo di pericolo. Diversamente dal modello della cipolla, il modello BBC considera in parte l'esposizione, che può essere vista sia come correlata al pericolo, sia come una caratteristica della dimensione spaziale della vulnerabilità. Nel campo della ricerca sul cambiamento climatico, un modello concettuale che ha guadagnato rilevanza nel corso degli anni è stato introdotto da Füssel (2007), in cui la vulnerabilità è esaminata attraverso le prospettive della geografia umana e dell'ecologia umana. Il primo analizza la vulnerabilità di un sistema agli effetti negativi dei pericoli, mentre il secondo mira all'identificazione della componente più vulnerabile e dei fattori che contribuiscono alla sua condizione. Il modello delinea quattro tipi di vulnerabilità: una vulnerabilità socioeconomica interna (reddito, vita sociale, accesso alle informazioni); una vulnerabilità biofisica interna (topografia, condizioni ambientali, uso del suolo); una vulnerabilità biofisica esterna (pericoli gravi, terremoti, ecc.); una vulnerabilità socioeconomica esterna (politica internazionale, nazionale e regionale, globalizzazione economica) (Armaş & Albulescu, 2025).

02

METODOLOGIE E STRUMENTI PER LA MISURAZIONE DELLA VULNERABILITÀ

Sebbene la vulnerabilità sia già utilizzata in vari contesti, intesa in senso lato come una predisposizione a essere danneggiati in caso di evento estremo o pericolo, non è ancora sufficientemente valutata in modo olistico dai vari paesi o comunità. Molti responsabili politici e governi sembrano ancora dare priorità alla valutazione dei cambiamenti fisici e dei pericoli quando è probabile che si verifichino disastri. Tuttavia, negli ultimi decenni la comunità internazionale e vari ricercatori hanno dimostrato che il concetto di vulnerabilità fornisce importanti spunti per comprendere gli impatti e le conseguenze differenziali delle società esposte ai pericoli naturali e ai cambiamenti climatici. Pertanto, la vulnerabilità, una volta adeguatamente valutata e preferibilmente quantificata, è la caratteristica cruciale che serve a stimare le potenziali conseguenze di eventi di pericolo sia a rapida insorgenza che striscianti sulle entità interessate. Inoltre, la valutazione della vulnerabilità e la visualizzazione di alcuni indicatori che rappresentano le caratteristiche dei fenomeni complessi in mappe e figure sono strumenti cruciali per la comunicazione. Come dimostra l'esperienza, è importante non solo identificare la vulnerabilità e il rischio, ma anche sviluppare metodi che consentano la visualizzazione e la comunicazione di fenomeni così complessi in un modo che possa essere compreso dai responsabili politici, dai non esperti e dal pubblico in generale.

La valutazione e il monitoraggio della vulnerabilità possono essere utilizzati anche per identificare obiettivi specifici per la vulnerabilità e la riduzione del rischio. Non è sufficiente dichiarare dopo una catastrofe che sono necessarie misure preventive ma è importante impegnarsi anche ai vari livelli di governance in una discussione approfondita su come utilizzare le valutazioni in modo proattivo. Gli indicatori e i criteri che possono aiutare a tradurre il concetto astratto di vulnerabilità in informazioni che possono essere visualizzate e comunicate sono un passo importante verso il miglioramento delle politiche e dei processi

decisionali. Rispetto agli incidenti mortali e alle perdite materiali visibili dopo un disastro, la vulnerabilità è un concetto più astratto.

Negli ultimi trent'anni ci sono stati sforzi significativi per misurare la vulnerabilità, ma spesso le valutazioni sono dominate da approcci gerarchici, più accessibili agli stakeholder grazie alla sua struttura logica e al supporto statistico, ed è in grado di funzionare con set di dati più disponibili per la valutazione della vulnerabilità nelle aree studiate. Un miglioramento significativo del quadro metodologico gerarchico è stato ottenuto applicando un'analisi esplorativa dei dati spaziali, consentendo una comprensione approfondita delle differenze tra i risultati ottenuti attraverso un approccio basato sull'aggregazione dell'analisi delle componenti principali (PCA) rispetto a un approccio ponderato. Questo sviluppo ha facilitato l'identificazione di cluster spaziali di vulnerabilità contribuendo così a una comprensione avanzata delle relazioni spaziali tra diversi indicatori di vulnerabilità. Al contrario, l'approccio statistico induttivo sviluppato da Cutter, basato sul modello dei pericoli del luogo, utilizza l'analisi delle componenti principali (PCA) per individuare i fattori di vulnerabilità nel tempo ed eliminare gli errori sistematici derivanti da decisioni aggregate (Cutter S. L., 1996).

La necessità di semplificare e fornire risultati comparabili e di facile utilizzo ha portato allo sviluppo di indicatori di vulnerabilità e analisi basate su indicatori. Poiché la vulnerabilità non può essere misurata direttamente, gli indicatori servono da proxy che esprimono le sue diverse dimensioni. Gli indicatori vengono aggregati da diversi indici, a seconda del quadro concettuale sotto il quale viene analizzata la vulnerabilità. La loro rilevanza nel trasmettere un certo tipo di vulnerabilità varia in base al contesto e alla scala. La selezione degli indicatori varia dagli approcci deduttivi (basati sulla comprensione teorica) a quelli induttivi (derivati dalle relazioni statistiche).

Negli ultimi decenni gli approcci basati su indicatori di vulnerabilità composita si sono evoluti per affrontare più dimensioni della vulnerabilità, a differenza delle prime fasi della loro applicazione, quando veniva considerata solo la vulnerabilità fisica. Questo cambiamento riflette l'aumento dell'importanza delle vulnerabilità sociali ed economiche che hanno iniziato a essere integrate nelle valutazioni della vulnerabilità basate sugli indici. La vulnerabilità fisica è solitamente espressa facendo riferimento alle particolarità del patrimonio edilizio o delle infrastrutture, mentre la vulnerabilità sociale viene misurata attraverso indici demografici, socioeconomici o di percezione. Cutter et al. (2003) attribuiscono il dominio iniziale degli indicatori di vulnerabilità fisica alla relativa facilità e disponibilità della raccolta dei dati, mentre la vulnerabilità sociale è più difficile da misurare e richiede generalmente dati a livello familiare. Poiché la vulnerabilità delle comunità umane, dei loro beni e degli spazi che abitano varia a seconda del rischio, anche gli indicatori utilizzati devono essere adattati al rischio.

Negli ultimi anni sono emersi nuovi metodi di analisi della vulnerabilità, come dettagliato nel resto del capitolo, spostando l'attenzione verso l'esame delle dinamiche della vulnerabilità.

2.1 SOCIAL VULNERABILITY INDEX (SoVI)

L'evoluzione delle metriche di vulnerabilità si inserisce in un più ampio processo di maturazione teorica e pratica nello studio del rischio di disastro e dei suoi componenti sottostanti di esposizione e vulnerabilità. Con il miglioramento della comprensione di tali dinamiche è emersa una maggiore chiarezza definitoria, sia nella ricerca sia nella pratica, riguardo alla terminologia e agli approcci da adottare. La natura riflessiva delle interazioni tra sistemi naturali, ambientali costruiti e sociali produce infatti nuovi rischi o amplifica quelli esistenti, mentre l'esposizione e la vulnerabilità riflettono i passati processi sociali, economici, politici, ambientali e culturali che influenzano i sistemi umani. Quando un evento pericoloso interagisce con vulnerabilità ed esposizione preesistenti in una comunità o società, interrompe le sue funzioni di base, supera la capacità di risposta e genera perdite sociali significative: il pericolo si trasforma così in disastro, dimostrando come non esistano veri e propri disastri naturali.

All'interno di questo quadro concettuale, l'approccio alla vulnerabilità si configura come un paradigma interdisciplinare che coinvolge i flussi intellettuali del rischio-pericolo, dell'ecologia/politica economica e della resilienza ecologica, sviluppati e consolidati attraverso contributi fondamentali. Queste basi hanno favorito l'evoluzione delle metriche di vulnerabilità che hanno progressivamente cercato di colmare il divario tra approcci qualitativi e quantitativi, tra unità di analisi differenti (luoghi, comunità, famiglie, gruppi di popolazione), tra tipologie di vulnerabilità (fisica, sociale, infrastrutturale, economica) e tra le diverse minacce considerate (pericoli generici, cambiamenti climatici, rischi specifici come le inondazioni). La crescente consapevolezza della necessità di misurare la vulnerabilità anche nelle sue variazioni spaziali e temporali ha favorito lo sviluppo di indicatori sempre più sofisticati. Tuttavia, permane un limitato consenso sugli strumenti specifici da impiegare: la scelta dipende dallo scopo della valutazione, ovvero chi e cosa è vulnerabile, a quale fattore di stress o pericolo, e chi sono gli utenti previsti dello strumento o metodo.

In particolare, il concetto di vulnerabilità sociale mette in luce il potenziale di danno e perdita derivante dalla suscettibilità umana ad agenti, eventi o processi dannosi e dal livello di esposizione a essi. Si tratta di un concetto che attraversa discipline diverse e trae origine da tradizioni di ricerca consolidate, quali l'emarginazione sociale (sociologia), le disparità sanitarie (sanità pubblica), lo sviluppo diseguale (economia politica) e le disuguaglianze sociali e spaziali (geografia).

2.1.1 Origini del SoVI

La ricerca sugli indicatori sociali, un approccio interdisciplinare basato sulle statistiche per misurare le condizioni e i processi sociali, come la qualità della vita e il cambiamento sociale, è stata il precursore della misurazione della vulnerabilità

sociale. La nozione di contabilità sociale è emersa negli anni '60 e '70 come meccanismo per tracciare le tendenze e i cambiamenti della società. Il monitoraggio di questi indicatori è basato su dati quantitativi del censimento, fornendo così una sintesi annuale delle condizioni sociali del paese a livello di salute, istruzione, sicurezza pubblica, standard di vita o tempo libero. Agli inizi degli anni '70, gli studi sulla qualità della vita si basavano su dati amministrativi raccolti da varie agenzie federali. Successivamente i dati basati su indagini nazionali periodiche sul benessere soggettivo fornivano giudizi qualitativi a livello individuale sulla qualità della vita basati su atteggiamenti personali, norme sociali percepite, valori e soddisfazione per vari aspetti della propria vita. Oggi gli approcci basati sugli indicatori sociali e il concetto complementare di qualità della vita rimangono un campo di ricerca solido nelle scienze sociali, con organizzazioni professionali che incoraggiano sviluppi concettuali ed empirici in pubblicazioni specializzate come Social Indicators Research e Applied Research in Quality of Life. L'utilità delle misurazioni della qualità della vita nel collegare dati sociali quantitativi (o più oggettivi) a valutazioni soggettive del benessere personale, inclusi soddisfazione, felicità e realizzazione nella vita, ha portato alla creazione di una visione multidimensionale più robusta del benessere sociale e alla sua incorporazione nelle politiche e nelle pratiche (Cutter S. L., 2024).

In geografia le radici della misurazione della vulnerabilità sociale risiedono nella geografia sociale, centrata sulle relazioni tra fattori e fenomeni sociali e il loro pattern spaziale. Durante i periodi di massimo splendore negli anni '70 e '80, la geografia sociale negli Stati Uniti era influenzata da approcci quantitativi e orientamenti positivisti derivati dalla Chicago School of Urban Spatial Social Science. L'analisi delle aree sociali e l'ecologia fattoriale erano i metodi dominanti utilizzati per differenziare la struttura sociale delle città basata su razza/etnia, classe e fase del ciclo di vita. Allo stesso tempo c'è stato un aumento dell'attenzione sugli aspetti spaziali dei problemi sociali e del benessere sociale, con un focus su aree tematiche come povertà, criminalità, abitazioni o segregazione residenziale. Questi studi empirici e spazialmente basati hanno posto le basi metodologiche per la ricerca quantitativa basata sul territorio sugli indicatori sociali che è seguita.

Il Social Vulnerability Index (SoVI) è stato sviluppato da S. L. Cutter (1996) in un periodo in cui l'interesse multidisciplinare per i concetti e le teorie della vulnerabilità ai pericoli era ancora agli inizi. Le valutazioni allora disponibili si concentravano soprattutto sull'identificazione dei pericoli fisici (come le zone alluvionali o sismiche) e sulla stima del rischio inteso come probabilità di accadimento di un evento ma trascuravano una dimensione essenziale: la vulnerabilità sociale. Quest'ultima si riferisce al potenziale di danno o perdita determinato dalla sensibilità degli individui o delle comunità a eventi avversi e dal loro grado di esposizione. Poiché i disastri si manifestano spesso in contesti

specifici e localizzati, divenne evidente la necessità di sviluppare metriche di vulnerabilità sociale basate sul luogo e capaci di cogliere gli impatti differenziali delle minacce ambientali sul territorio.

La base intellettuale del SoVI ha origine dal modello teorico Hazards of Place (HOP) il quale concettualizza l'interazione dinamica tra sistemi fisici e sistemi sociali nella produzione della vulnerabilità in specifici contesti spaziali e temporali. Il potenziale di pericolo è condizionato dalle caratteristiche fisiche del paesaggio, fornendo il contesto geografico per la vulnerabilità biofisica. Allo stesso modo il tessuto sociale influenza la suscettibilità al danno derivante dal pericolo, contestualizzando la vulnerabilità sociale nei diversi luoghi. Il contributo del modello HOP si concentra sull'interazione dinamica tra sistemi fisici e sociali e sulla capacità di confrontare diverse località in relazione alla vulnerabilità ai pericoli in funzione dei contesti spaziali e temporali specifici del luogo. La strutturazione del modello HOP ha avuto origine nel paradigma rischio-pericolo ma è stata influenzata dalle prospettive dell'economia politica e dell'ecologia politica (Cutter S. L., 1996). Con l'emergere di altri framework di vulnerabilità e approcci di valutazione, l'interesse per la vulnerabilità sociale e la sua misurazione è cresciuto sia nelle tradizioni rischio/pericolo sia nelle tradizioni dei mezzi di sussistenza sostenibili. Molte delle caratteristiche utilizzate per declinare e rendere operativa la vulnerabilità sociale consistono in variabili assegnate (non modificabili) e variabili acquisite (modificabili) che diventano categorizzate come vulnerabilità intrinseche a causa dei sistemi storici di oppressione. Molti dei framework concettuali della vulnerabilità sociale, incluso l'HOP, si basano su questa realtà per comprendere come la vulnerabilità si manifesta nel paesaggio, con contesti che spesso variano da luogo a luogo.

Inizialmente applicato in Georgetown County, South Carolina, il modello utilizzava un approccio di valutazione empirica della vulnerabilità rivolto a tutti i rischi e basandosi su otto variabili socioeconomiche (popolazione totale, numero totale di unità abitative, numero di donne, numero di residenti non bianchi, numero di persone sotto i 18 anni, numero di persone sopra i 65 anni, valore medio delle abitazioni e numero di case mobili) per rappresentare la vulnerabilità sociale (Cutter S. L., 1996). Lo sviluppo metodologico, combinando la misurazione della vulnerabilità biofisica e sociale e visualizzando spazialmente i risultati, è diventato un punto di riferimento dimostrando che, anche con la stessa esposizione al pericolo, la stratificazione sociale dello spazio comporta che alcune popolazioni vivano i pericoli in modo diverso rispetto ad altre. Tuttavia, le variabili sociali non hanno completamente catturato la vulnerabilità sociale e sono state insufficienti a differenziare geograficamente alcuni dei gruppi sensibili e marginalizzati a livello di blocco censuario e a mostrare dimensioni complesse come bisogni sanitari, struttura familiare o barriere linguistiche.

Il salto di qualità avvenne con l'articolo "*Social vulnerability to environmental hazards*" (2003) in cui Cutter e colleghi forniscono chiarimenti su come rendere operativa la vulnerabilità sociale. Il presupposto era che la vulnerabilità sociale fosse in parte il prodotto delle disuguaglianze sociali e delle disuguaglianze territoriali (caratteristiche delle comunità che influenzano i livelli relativi di vulnerabilità, come il tipo e la proprietà dell'abitazione o le infrastrutture).

Per progettazione, il SoVI era una misura quantitativa, comparativa e basata sul luogo della vulnerabilità sociale preesistente dei luoghi elencati per unità amministrative. Il set iniziale di variabili di input (42 in totale) si basava sui risultati di lavori sul campo post-disastro e sulla ricerca sui carichi sociali differenziali dei rischi da pericolo. L'utilizzo dei dati del censimento statunitense del 1990 forniva una fonte coerente di indicatori socioeconomici per ciascuna contea e serviva come variabili rappresentativa per i noti fattori della vulnerabilità sociale (status socioeconomico, etnia, struttura familiare, occupazione e lavoro). L'obiettivo era sviluppare un insieme comune di indicatori per costruire un indice composito che consentisse tali confronti empirici. Riconoscendo fin dall'inizio che la vulnerabilità sociale non era unidimensionale, si è optato per una scelta statistica di approccio induttivo usando una soluzione di analisi fattoriale, l'Analisi delle Componenti Principali (PCA), riducendo le variabili di input a fattori che spiegano le diverse dimensioni della vulnerabilità sociale per l'area in analisi. Una volta generati i fattori richiedono una revisione da parte di esperti del settore per valutare la rappresentanza generale e l'influenza sulla vulnerabilità sociale. La soluzione PCA iniziale di SoVI ha prodotto 11 fattori (ad esempio, stato socioeconomico, densità dello sviluppo, dipendenza da età, etnia e genere) ed ha spiegato circa il 75% della variazione nei dati di input. I fattori statistici della vulnerabilità sociale nelle contee sono stati un risultato importante dell'analisi, ma è stata la rappresentazione spaziale di questi punteggi a consentire una migliore comprensione della vulnerabilità sociale ai pericoli in tutto il paese.

Il risultato, infatti, era un punteggio SoVI per ciascuna contea, rappresentato cartograficamente con mappe coropletiche, dove l'uso di colori intuitivi (rosso, blu e bianco) rese l'indice accessibile e facilmente interpretabile da un pubblico più ampio, evidenziando le disuguaglianze nella capacità di preparazione e risposta ai disastri. La vera innovazione del SoVI, quindi, non risiedeva soltanto nella metodologia quantitativa, ma nella possibilità di tradurre la vulnerabilità sociale in rappresentazioni spaziali intuitive e comparabili. Oggi, infatti, il SoVI è uno strumento consolidato, ampiamente replicato e adattato a diversi contesti culturali e geografici, utilizzato sia per studi accademici sia per la gestione delle politiche di emergenza.

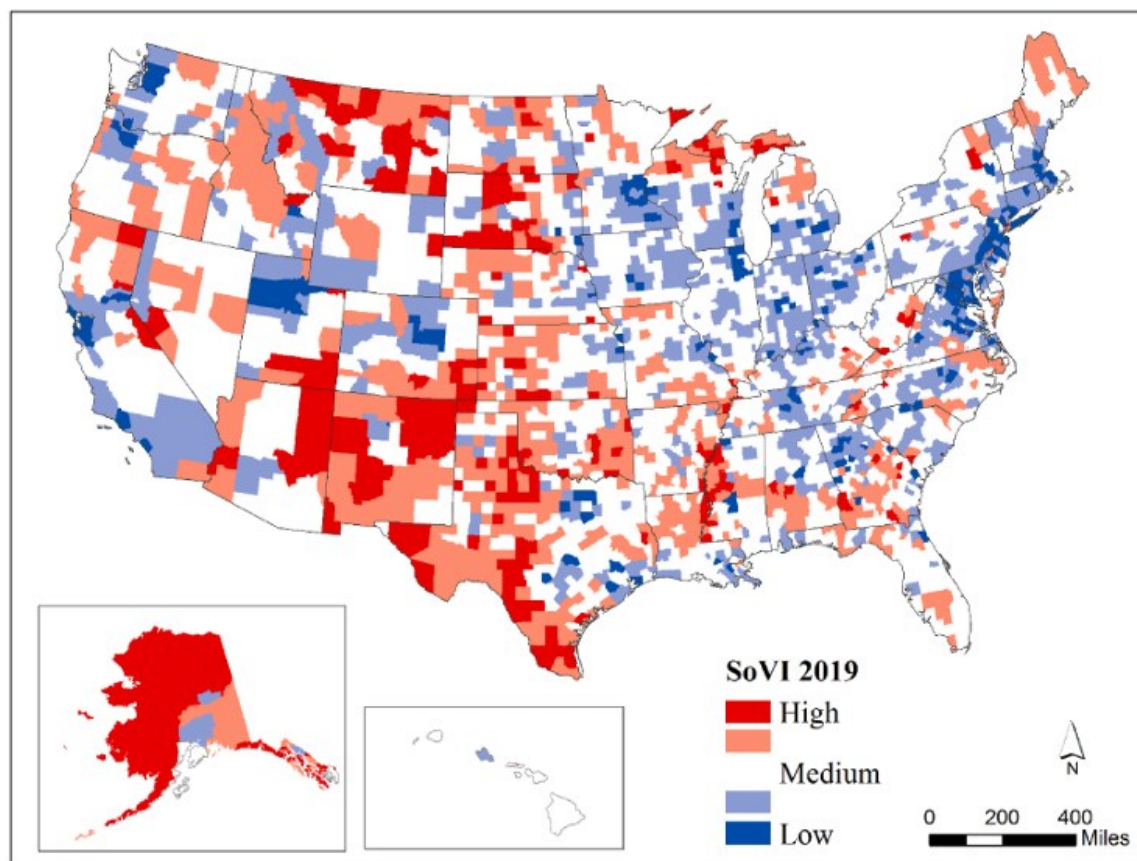


Figura 1 - L'Indice di Vulnerabilità Sociale (SoVI) negli Stati Uniti, suddiviso per contee, basato su 28 variabili di input dell'American Community Survey (ACS) riferito al periodo 2015-2019. La mappa a 5 classi utilizza le deviazioni standard dalla media per evidenziare le contee ad alta (più socialmente vulnerabili) e bassa (meno socialmente vulnerabili) vulnerabilità. Rappresentazione tratta da (Cutter S. L., 2024).

2.1.2 Evoluzioni del SoVI

Tre aree generali di sperimentazione metodologica sono emerse nei primi anni dopo l'articolo di Cutter del 2003. La prima si è concentrata sul peso dei fattori, in quanto la formulazione iniziale utilizzava un approccio a pesi uguali indipendentemente dalla quantità di varianza spiegata. Infatti, veniva effettuata la somma di ciascun punteggio dei fattori senza alcuna giustificazione teorica sul dare priorità o privilegiare un fattore rispetto a un altro nel punteggio totale. Per affrontare questa questione, Emrich (2005) ha utilizzato una tecnica Delphi basata sul sondaggio per analizzare i punteggi di vulnerabilità sociale ponderati e non ponderati a livello sub-contea in alcune aree urbane. Ha scoperto così che i risultati complessivi a livello urbano non differivano tra costruzioni ponderate e non ponderate, e che i fattori ponderati basati sulle risposte del sondaggio erano più influenti nei luoghi che si collocavano nei livelli medi di vulnerabilità, non agli estremi alti o bassi della distribuzione. Il secondo esperimento si è concentrato sui cambiamenti temporali per valutare retrospettivamente quanto il SoVI realizzato nel 1996 avesse funzionato nei decenni precedenti (1960, 1970, 1980),

aggiornato utilizzando i dati del censimento del 2000 allora disponibili, e previsto per il 2010 tramite modellizzazione lineare. La ricerca (Cutter, et al., 2008) ha rilevato che, nel tempo, l'aggregazione spaziale della vulnerabilità sociale è diventata meno concentrata e che il cambiamento nella dimensione e nella densità della popolazione ha avuto un impatto significativo sulle tendenze temporali della vulnerabilità sociale negli Stati Uniti. Un altro studio precoce si è concentrato sui test di sensibilità dell'algoritmo SoVI ai cambiamenti nella costruzione dell'indice, nella scala di applicazione (da contea a quartiere) e nel set di variabili di input. Utilizzando tre siti di prova, Schmidtlein e colleghi (2008) hanno trovato forti somiglianze nella varianza spiegata tra il set di variabili originale e un set di variabili ridotto. Sebbene i cambiamenti di scala influenzino alcune proprietà numeriche dell'indice, le interpretazioni dei componenti rimangono stabili attraverso le scale. Tuttavia, il SoVI è sensibile ai cambiamenti nella sua costruzione, inclusa la regione di studio, l'interpretazione soggettiva dei componenti, la ponderazione statistica dei componenti, e i criteri di selezione dei componenti (Cutter, 2024).

Le sperimentazioni si sono evolute fino ad arrivare con Borden et al. (2008) a modificare le variabili di input per concentrarsi specificamente sugli attributi sociali dei luoghi e non sugli attributi dell'ambiente costruito, portando ad una diminuzione delle variabili considerate. Questa tendenza ha continuato, dovuta anche ad aggiornamenti del ACS nel corso degli anni, portando il SoVI del 2019 a considerare sia a livello di census tract che a livello di contea solo 28 variabili.

2.1.3 Adattamento ad altri contesti

L'articolo originale su SoVI dimostra avere negli anni recenti un'ampia influenza nel campo; infatti, la replicazione dello strumento americano in altri contesti sono molto diffuse. Dimostrando che i concetti e le tecniche di SoVI erano trasferibili ad altri paesi e funzionavano per differenziare popolazioni percepite come omogenee. Prendendo come esempi i tentativi di Cile e Norvegia, le variabili di input hanno prodotto tra 3 e 10 fattori spiegando in media il 76,5% della varianza tra tutti gli studi. Le principali limitazioni riguardavano la riconciliazione dei concetti sociali americani con quelli di altri paesi, la disponibilità e la qualità dei dati. Dal punto di vista metodologico, i confronti tra un SoVI replicato e uno adattato per la Norvegia hanno evidenziato come l'adattamento di SoVI al contesto culturale locale ha fornito una comprensione migliore della vulnerabilità sociale. In Cile, nel 2021, dei ricercatori hanno riscontrato differenze temporali in SoVI e nei suoi fattori determinanti confrontando il 1992, il 2002 e il 2017. Nello stesso paese, un altro gruppo di ricerca nel 2023 ha applicato un'analisi multi-scala di SoVI utilizzando una panoramica nazionale per macroregioni e poi differenziando per luoghi urbani e rurali a livello nazionale e regionale. Ciascuno dei modelli era coerente in termini di fattori prodotti e varianza spiegata, ma i

principali fattori variavano leggermente nella loro importanza tra le regioni (Cutter, 2024). La replicazione/adattamento di SoVI ad altri contesti culturali suggerisce la sua utilità sia in ambienti con dati ricchi sia in quelli con dati limitati. Problemi legati ai dati come la loro attualità, completezza e qualità sono preoccupazioni reali espresse nella maggior parte degli studi, e la scala delle limitazioni dei dati (locale, regionale, nazionale) varia tra gli studi.

2.1.4 Progetto REACHOUT e SVI-EU

In Europa l'interesse per strumenti simili ha portato allo sviluppo del Social Vulnerability Index (SVI) nell'ambito di REACHOUT che mira a promuovere servizi climatici orientati agli utenti e a supportare l'attuazione del Green Deal Europeo. Un elemento chiave di questo lavoro è stato l'adattamento dei servizi e degli strumenti climatici alle esigenze dei 7 hub urbani coinvolti nel progetto (Amsterdam, Milano, Atene, Cork, Gdynia, Lillestrøm e Logroño). Dopo discussioni con gli stakeholder delle città, i rappresentanti di Cork (Irlanda), Logroño (Spagna) e Milano (Italia) hanno espresso interesse nel co-sviluppare lo strumento SVI per supportare priorità più ampie di giustizia climatica nelle loro città. Infatti, SVI ha il potenziale di applicare le idee teoriche di vulnerabilità sociale in un approccio che può fornire informazioni sulle diverse dimensioni sociali presenti in diverse località e regioni. Queste informazioni possono supportare la progettazione di politiche e azioni di adattamento climatico localmente rilevanti e socialmente giuste, aiutando le autorità a raggiungere obiettivi locali e nazionali per una transizione equa. L'uso di un approccio basato su indicatori e di informazioni ad alta risoluzione può fornire una stima accurata della vulnerabilità di base a livello locale, essenziale per i decisori per ridurre gli impatti climatici e il rischio di disastri. A partire dal lavoro di Fitton e colleghi (2021), gli obiettivi principali dell'utilizzo di SVI includono: la mappatura di vulnerabilità ai rischi climatici specifici di calore estremo e inondazioni nelle diverse aree in Europa; realizzare un aggiornamento della metodologia precedente per consentire l'applicazione dello strumento in diversi contesti spaziali, ambientali e decisionali; realizzare una guida dettagliata così da garantire un utilizzo dello strumento da autorità locali ed un'integrazione con ulteriori servizi climatici per fornire applicazioni concrete e risultati più dettagliati per affrontare le sfide climatiche nelle loro aree (Fitton, O'Dwyer, & Maher, 2022). In seguito all'interesse per lo strumento SVI in queste città, l'opportunità di utilizzarlo è stata estesa anche ad altre autorità locali e regionali attraverso i progetti Directed e TALX2. Il progetto Directed mira a ridurre la vulnerabilità agli eventi meteorologici estremi e a promuovere società europee resilienti ai disastri, con quattro laboratori reali situati in tutta Europa, incluso uno a Rimini (Italia), i cui rappresentanti della città desideravano comprendere meglio il rischio climatico per specifiche popolazioni vulnerabili. Il progetto TALX2 mira a supportare e promuovere attività di

adattamento climatico in Irlanda attraverso partenariati basati sul territorio e ha istituito laboratori viventi e un programma transfrontaliero di attività per supportare tali iniziative (Deltares , 2023).

La metodologia aggiornata si concentra sui rischi specifici di alluvioni e ondate di calore che interessano spesso le aree di Cork, Logroño e Milano, piuttosto che sui rischi ambientali generali utilizzati nello studio di Fitton e colleghi (2021), e propone un insieme di indicatori derivati dall'analisi dei dati censuari nazionali più recenti in ciascuna regione e dei dati Copernicus europei. Come proposto da Fitton et al., gli indicatori sono integrati in uno schema gerarchico, raggruppati in domini, con punteggi per ciascun dominio sommati con un peso uguale per l'area spaziale utilizzata. I domini vengono raccolti e associati a dimensioni della vulnerabilità sociale (sensibilità, capacità adattativa ed esposizione accentuata). Successivamente sono state apportate modifiche alla metodologia per garantire che fosse meglio adattata ai rischi specifici di alluvioni o ondate di calore estremo, rilevanti in ciascuna area in base ai dati disponibili. Sono stati così introdotti nuovi indicatori, come quelli per il volontariato e le abitazioni non occupate, mentre altri sono stati spostati da un dominio ad un altro.

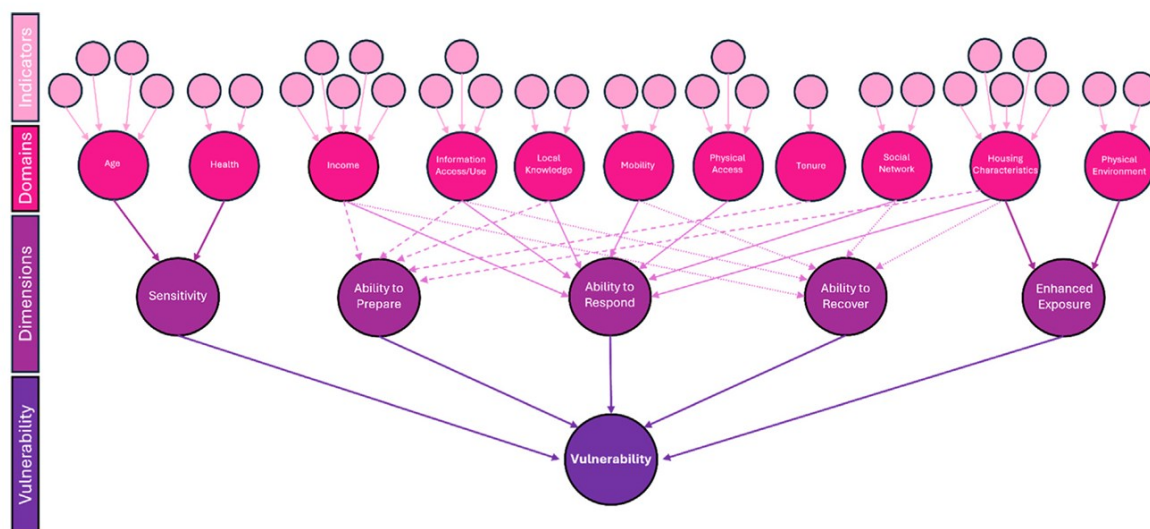


Figura 2 - Rappresentazione grafica della metodologia utilizzata per creare i domini, le dimensioni e la vulnerabilità complessiva nella città di Cork. Partendo dall'alto, vengono rappresentati i diversi indicatori sociodemografici, economici, informativi e ambientali (di colore rosa) che vengono aggregati in domini tematici. I domini contribuiscono alla definizione di cinque dimensioni della vulnerabilità: sensibilità, capacità di preparazione, risposta, recupero ed esposizione aumentata (di colore lilla). L'integrazione delle dimensioni conduce alla stima della vulnerabilità complessiva (di colore viola), concepita come un esito dinamico e sistemico. Tratto da (Fitton, O'Dwyer, & Maher, 2022).

Se per il caso della città di Cork gli studiosi sono riusciti ad ottenere un punteggio SVI, per i casi di Logroño e a Milano si sono verificate complicazioni dovute alla raccolta e disponibilità dei dati. Questa mancanza per alcuni domini e dimensioni

ha comportato che alcuni domini mancassero o che un singolo indicatore potesse rappresentare potenzialmente un intero dominio o dimensione, creando una distribuzione di peso diseguale e sproporzionata nel punteggio SVI. Per tener conto della diversa disponibilità e accessibilità dei dati, gli autori hanno adattato la metodologia originale così da soddisfare le esigenze di tutti gli stakeholder urbani e garantire che la metodologia SVI fosse il più possibile robusta per casi con diversi livelli di disponibilità dei dati. Questo consente anche agli utenti nelle aree con minore disponibilità di dati di identificare facilmente i domini e le dimensioni in cui è necessario aggiungere nuovi indicatori tramite la raccolta di dati locali o acquisiti nelle future campagne censuarie (Fitton, O'Dwyer, & Maher, 2022). La raccolta e il pre-processing dei dati rappresentano una parte chiave del processo traducendo le informazioni grezze raccolte dalle fonti di dati in indicatori standardizzati comparabili tra loro. La ponderazione e l'aggregazione sono passaggi fondamentali nella costruzione di indici composti, come l'SVI.



Figura 3 - Rappresentazione visiva dell'SVI per il rischio di calore a Milano, insieme a rappresentazioni specifiche per dimensione (in alto a sinistra: sensibilità; in basso a sinistra: capacità adattativa; in alto a destra: esposizione aumentata; in basso a destra: vulnerabilità complessiva). Tratto da (Fitton, O'Dwyer, & Maher, 2022).

La ponderazione assegna un'importanza relativa a ciascun indicatore, riflettendo il suo contributo all'indice complessivo. L'aggregazione combina questi indicatori ponderati in un unico punteggio composito riassumendo i dati multidimensionali in una misura comprensibile.

Sebbene l'SVI possa essere utilizzato come strumento autonomo, è stato integrato anche negli strumenti FloodAdapt e Thermal Assessment nel progetto REACHOUT. Ciò ha consentito alle città di utilizzare informazioni personalizzate sui rischi di alluvione e calore insieme alle informazioni socioeconomiche nella pianificazione dei cambiamenti climatici. In futuro l'SVI sarà anche adattato per includere indicatori che trattano ulteriori pericoli, come quelli relativi a incendi boschivi e siccità, per comprendere una gamma di rischi climatici.

2.2 JOINT RESEARCH CENTRE METHODOLOGY (JRC)

La resilienza, intesa come capacità non solo di resistere e fronteggiare le sfide ma anche di gestire processi di transizione in maniera sostenibile, equa e democratica, è divenuta la nuova bussola per l'elaborazione delle politiche pubbliche. Essa può essere monitorata attraverso le Resilience Dashboards (RDB), strumenti che forniscono una valutazione olistica della capacità di avanzare in condizioni di difficoltà lungo quattro dimensioni interconnesse: sociale ed economica, verde, digitale e geopolitica.

2.2.1 Origini e sviluppo

Le Resilience Dashboards sono uno strumento elaborato dal Joint Research Centre (JRC) per offrire una lettura strutturata e comparativa della resilienza degli Stati membri dell'Unione Europea, con l'obiettivo di rafforzare le politiche pubbliche rendendole più consapevoli e informate. Fin dal 2015 il JRC ha posto la resilienza al centro dell'agenda della Commissione Europea. Nel 2016 con il contributo del Segretariato Generale e dei rappresentanti di ciascun dipartimento della Commissione, insieme allo European Political Strategy Centre (EPSC), è stato istituito il Research Network for the Measurement of Resilience (Resil.net), primo tentativo coordinato per integrare la prospettiva della resilienza nei processi decisionali. Da questa esperienza è nato il quadro concettuale del JRC sulla resilienza che fornisce un fondamento teorico e definisce concetti e componenti chiave. Il 2020 Strategic Foresight Report (Commissione Europea, 2020) ha annunciato la resilienza come direzione per le politiche dell'UE ed ha proposto i prototipi delle RDB per il suo monitoraggio. Grazie a questi, la Commissione Europea ha avviato un processo collaborativo volto allo sviluppo di dashboard complete coinvolgendo Stati membri e altri attori chiave. Le Resilience Dashboards sono state pubblicate per la prima volta dalla Commissione nel novembre 2021, diventando lo strumento di riferimento per il monitoraggio della resilienza. Contribuendo così anche alla valutazione ex post della strategia europea di ripresa e resilienza, e rappresentando un passo importante verso un quadro integrato di benessere.

Rispetto ad altri strumenti, le dashboard hanno un carattere olistico poiché coprono più dimensioni della resilienza e le loro interconnessioni, fornendo un quadro completo degli aspetti rilevanti. Inoltre, sono riassunte in indici sintetici di resilienza che illustrano la situazione complessiva delle vulnerabilità e delle capacità di resilienza in ciascuna delle quattro dimensioni e nei loro ambiti sottostanti. Novità nel monitoraggio sistematico della resilienza è che per ogni Paese viene introdotto l'indice complessivo di vulnerabilità (o capacità) ottenuto calcolando il valore mediano di tutte le posizioni degli indicatori di vulnerabilità (o capacità). Questi vengono sviluppati in collaborazione con il centro di

competenza JRC sui Composite Indicators (COIN) che ne ha anche verificato metodologicamente la solidità. Gli indici sintetici delle RDB risultano essere uno strumento rilevante per alimentare la prospettiva della resilienza poiché offrono una panoramica immediata dei punti di forza e di debolezza degli Stati.

2.2.2 Indicatori Dashboard

I 124 indicatori presenti nelle Commission's Resilience Dashboards (RDB) mirano a catturare le vulnerabilità (aspetti che possono amplificare l'impatto negativo delle crisi, o rallentare il raggiungimento di obiettivi strategici di lungo periodo) e le capacità (fattori o competenze per affrontare crisi o cambiamenti strutturali e per gestire le transizioni) in quattro dimensioni o ampie aree tematiche:

Dimensione socioeconomica	1	Disuguaglianze e impatto sociale delle transizioni	considera vulnerabilità che possono essere aggravate dalle trasformazioni in corso (verde, digitale e sociale), come il tasso di rischio di povertà o esclusione sociale. Include anche indicatori relativi ai mezzi per contrastare tali disuguaglianze, come la spesa sociale pubblica, l'impatto dei trasferimenti sociali sulla povertà e il livello di risparmio delle famiglie.
	2	Salute, istruzione e lavoro	analizza gli aspetti principali dei sistemi educativi, centrali per rafforzare la resilienza delle società, valutando anche in che misura promuovano pari opportunità nei risultati scolastici e includendo indicatori sul mercato del lavoro e sui rischi sanitari emergenti, così come sulla capacità dei sistemi sanitari di affrontarli.
	3	Stabilità economica e finanziaria e sostenibilità:	mette in luce le vulnerabilità e le capacità di banche e compagnie assicurative di fronte a shock finanziari e rischi derivanti da una scarsa diversificazione economica, considerando anche la capacità delle società di prepararsi alle transizioni future mediante investimenti negli asset immateriali, il ruolo centrale dello Stato come investitore e le sfide legate alla sostenibilità dei conti pubblici.
Dimensione verde	1	Mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici	La prima area comprende indicatori sulle emissioni e offre una panoramica della transizione verso nuovi modelli di mobilità. Evidenzia fattori che possono ostacolare il raggiungimento della neutralità climatica (come i sussidi ai combustibili fossili) e capacità che ne facilitano il progresso (ad esempio l'uso di energie rinnovabili). Inoltre, tenuto conto del crescente numero di eventi climatici estremi, misura la vulnerabilità complessiva a tali eventi (mortalità dovuta a fenomeni climatici estremi) e la capacità di adattarsi distribuendo in maniera più equa le perdite (perdite assicurate da eventi climatici estremi), entrambi aspetti prospettici di grande rilevanza.
	2		La seconda area riguarda l'uso sostenibile delle risorse, includendo l'estrazione e l'impronta delle risorse, nonché la capacità di promuovere l'economia circolare tramite il monitoraggio della produzione di rifiuti e il riutilizzo dei materiali, inclusi i rifiuti elettronici. Presenta inoltre la dimensione del settore dei beni e servizi ambientali, che contribuisce a ridurre l'impatto delle attività economiche sul consumo di risorse e sul degrado ambientale, aumentando così la resilienza.
	3	ecosistemi, biodiversità e agricoltura sostenibile	La terza area è strettamente collegata agli obiettivi del Green Deal europeo sul ripristino della biodiversità e dei servizi ecosistemici: ecosistemi resilienti rafforzano la capacità di assorbire carbonio, incidono sull'adattamento ai cambiamenti climatici, sull'uso delle risorse e sul benessere complessivo, oltre a essere legati agli obiettivi di sistemi alimentari sostenibili. Gli indicatori monitorano gli aspetti e i driver della

		biodiversità, dell'agricoltura sostenibile e della gestione delle risorse naturali con forte impatto sugli ecosistemi.
Dimensione digitale	1	digitale per la sfera personale osserva l'impatto della transizione digitale sulla vita individuale
	2	digitale per l'industria valuta gli effetti della digitalizzazione sul settore industriale lungo diverse fasi del ciclo di vita delle imprese, considerando aspetti come l'accesso alla banda larga, la vitalità del settore ICT e l'adozione di piattaforme innovative (ad esempio servizi cloud ed e-commerce). Minimizzare l'impatto della transizione digitale su persone e industria contribuisce a rafforzare la resilienza in questa dimensione.
	3	Digitalizzazione dello spazio pubblico rappresenta il nuovo campo di gioco per ridurre i divari digitali e le vulnerabilità connesse alla transizione, includendo indicatori sulle infrastrutture (come il 5G) e sulla disponibilità - o mancanza - di servizi di e-government.
	4	Cybersicurezza
Dimensione geopolitica	1	fornitura di materie prime ed energia svolge un ruolo cruciale per la resilienza europea, includendo vulnerabilità come la concentrazione dei fornitori di metalli di base o di vettori energetici e capacità come il commercio intra-UE di energia o la diversificazione dei fornitori.
	2	catene del valore e commercio osserva i partner commerciali degli Stati membri, i livelli di partecipazione alle catene globali del valore e il grado di apertura commerciale
	3	globalizzazione finanziaria considera vulnerabilità legata a shock finanziari globali, come la concentrazione dei partner negli investimenti diretti esteri, la posizione netta di credito/debito e la posizione patrimoniale internazionale netta, ma anche capacità quali il livello di integrazione finanziaria (con l'UE e Paesi terzi) e la quota di valore aggiunto generata da imprese estere.
	4	sicurezza e demografia include aspetti relativi alla difesa (personale militare, spese militari, disinformazione proveniente dall'estero) e fattori demografici come il tasso di fertilità e l'integrazione dei migranti nel mercato del lavoro.

Tabella 2 - Descrizione dei singoli indicatori e la loro suddivisione nelle quattro dimensioni del RDB. Tratto da (Benczur, et al., 2023).

La selezione degli indicatori si è basata su un'analisi approfondita dei dati disponibili da fonti ufficiali, quali Eurostat, OCSE e Banca Mondiale, ed è stata seguita da una valutazione collegiale della loro rilevanza, della prospettiva futura, della chiarezza e della comparabilità tra Paesi; una volta definiti, tali indicatori vengono impiegati nelle dashboard per valutare in termini relativi le vulnerabilità e le capacità degli Stati membri attraverso una scala cromatica a cinque livelli che rappresenta la situazione di ciascun Paese nell'ultimo anno disponibile fino al 2021, confrontata con i valori registrati da tutti gli Stati membri nel periodo di riferimento 2007-2017. Inoltre, per ogni indicatore è riportata anche la posizione a livello UE calcolata sulla base delle stesse fonti di dati utilizzate per gli Stati membri o, quando non disponibili, ricavata come media ponderata dei valori nazionali, con pesi definiti in funzione del PIL o della popolazione a seconda della natura dell'indicatore. La scelta del periodo di riferimento dipende dalla copertura dei dati e dall'ammontare appropriato di dati per costruire un campione di base. Esso rappresenta il più lungo periodo comune di riferimento possibile. Tra i Paesi la disponibilità dei dati può variare di anno in anno e i Paesi

con serie storiche più lunghe hanno di conseguenza una rappresentazione leggermente maggiore nella distribuzione di riferimento. Con l'obiettivo primario di creare una distribuzione di riferimento rappresentativa, se la disponibilità dei dati per un indicatore risulta insufficiente durante il periodo di riferimento 2007-2017, viene esaminato un periodo alternativo più recente (2015-2021) per ampliare la base dei dati. Infatti, nella dashboard digitale e per l'indicatore relativo alla tecnologia nella dimensione verde, è stato imposto come periodo di riferimento il 2015-2021, a causa della rapida evoluzione in questi settori (Benczur, et al., 2023).

2.2.3 Indici sintetici

Per illustrare le prestazioni complessive degli Stati membri in termini di vulnerabilità e capacità di resilienza, nonché in ciascuna delle quattro dimensioni e delle aree sottostanti, le dashboard sono completate da indici sintetici di resilienza costruiti seguendo una valutazione coerente con quella utilizzata per gli indicatori delle dashboard. Un indice di vulnerabilità (o di capacità) viene ottenuto come valore mediano di tutte le posizioni degli indicatori di vulnerabilità (o capacità) per un'area, una dimensione o un Paese; quindi, un indice elevato indica rispettivamente un alto livello di vulnerabilità/capacità rispetto ad altri Paesi. Questi indici consentono sia i confronti tra Paesi nello stesso anno sia le valutazioni delle variazioni nel tempo per un determinato Paese ed anche a livello UE, come base per confronti con Paesi terzi.

Solo recentemente è stato introdotto un indice complessivo di vulnerabilità e capacità a livello nazionale, che combina rispettivamente tutti gli indicatori di vulnerabilità e capacità, oltre che alla valutazione temporale degli indici di resilienza.

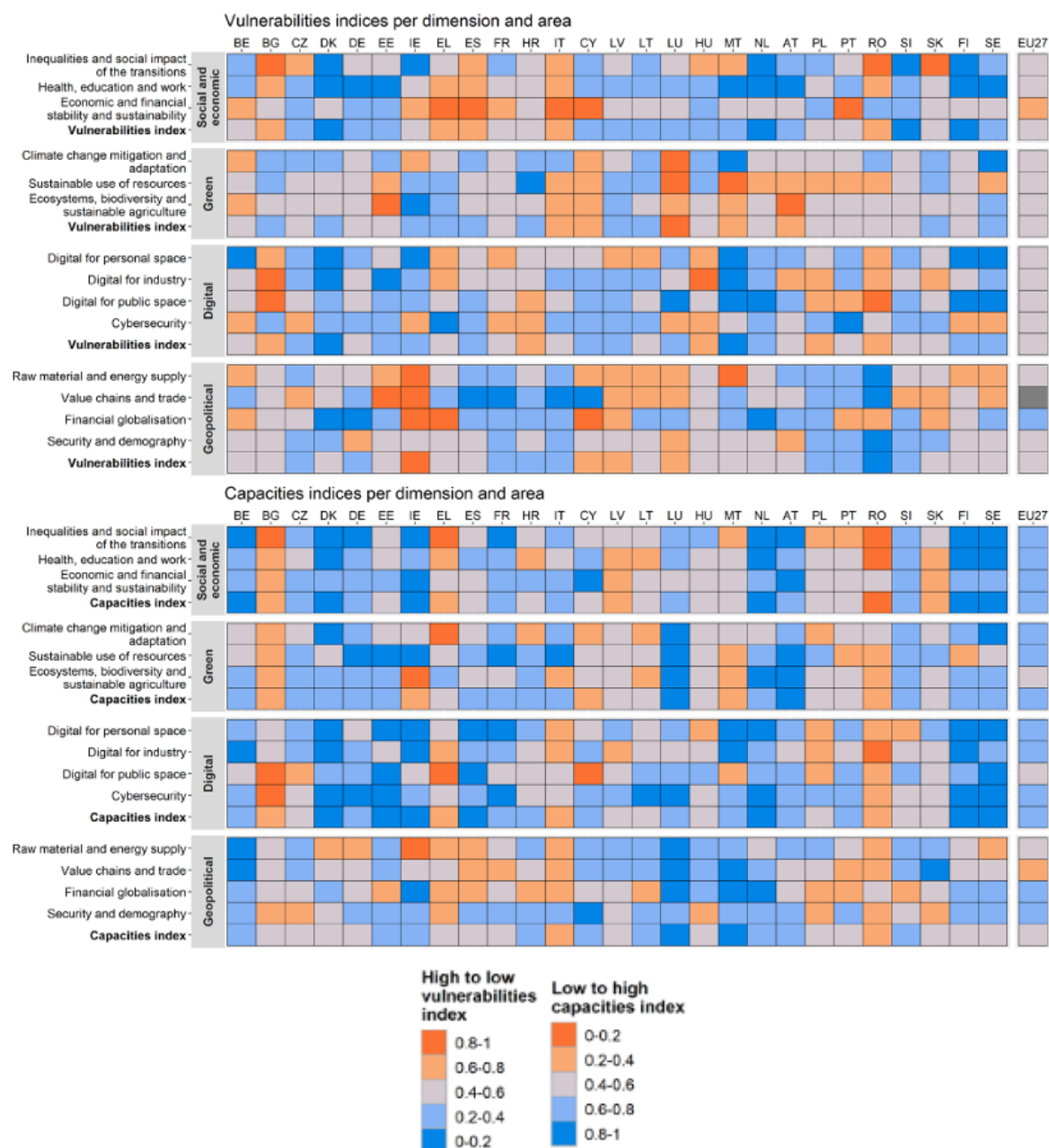


Tabella 3 - Indici sintetici in tutti i settori e in tutte le dimensioni (dati fino al 2021), con relative legende. Tabelle adattate da (Benczur, et al., 2023).

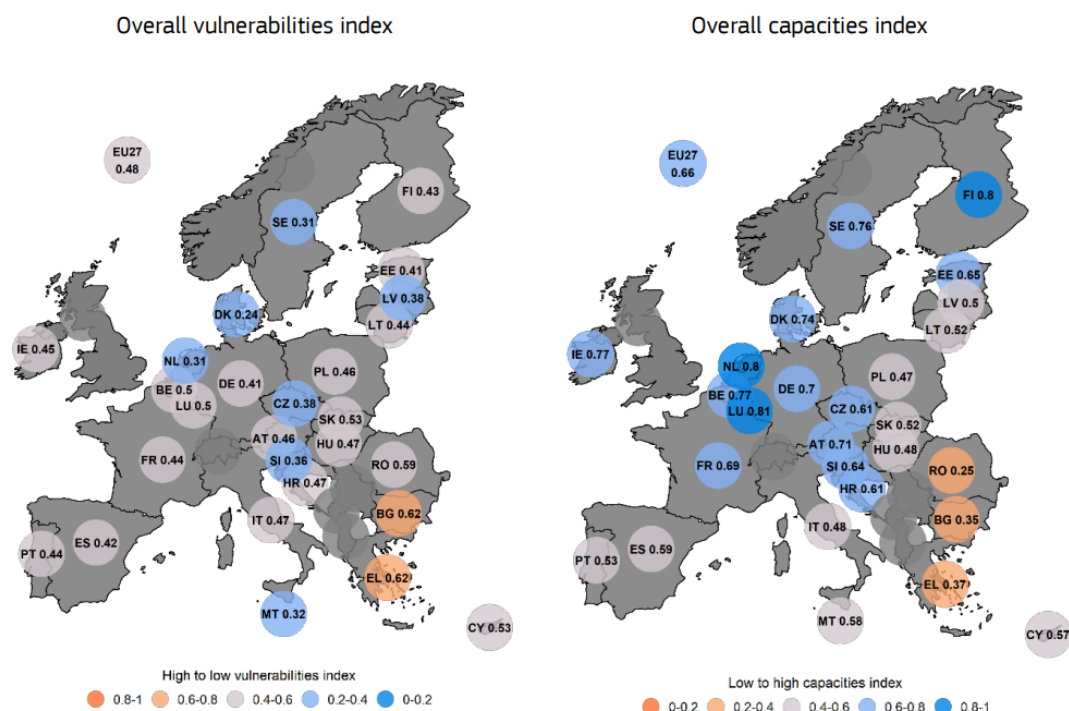


Figura 4 - Le mappe mostrano le differenze significative negli indici complessivi di vulnerabilità e capacità tra i paesi dell'Unione Europea. L'indice complessivo di vulnerabilità varia tra 0,62 (in Grecia e Bulgaria) e 0,24 (in Danimarca), mentre gli indici complessivi di capacità oscillano in un intervallo ancora più ampio tra 0,25 (in Romania) e 0,81 (in Lussemburgo). Tratta da (Benczur, et al., 2023).

2.2.4 La Resilience Dashboard per il contesto italiano

Utilizzando l'ultima versione delle Resilience Dashboards (RDB), di seguito viene riportata come esempio la valutazione delle vulnerabilità e delle capacità di resilienza dell'Italia (Commissione Europea, 2023). La tabella riportata sintetizza gli indicatori sottostanti delle RDB attraverso indici di resilienza sintetici che illustrano la situazione relativa alle vulnerabilità e alle capacità di resilienza nelle quattro dimensioni e nelle aree tematiche sottostanti rispetto alla media UE-27. L'attuale valutazione dei cambiamenti nel tempo degli indici sintetici di resilienza si basa sulle variazioni dello schema cromatico utilizzato per gli indici rispetto all'aggiornamento 2022 delle Resilience Dashboards (Benczur, et al., 2023). Per ciascuna dimensione e area: un segno "+" indica un miglioramento negli indici sintetici (ovvero una riduzione delle vulnerabilità o un aumento delle capacità); un segno "-" indica un peggioramento (ovvero un aumento delle vulnerabilità o un calo delle capacità) rispetto alle dashboard 2020; l'assenza di segni indica che l'indice per lo Stato membro, o per l'UE-27, è rimasto nella stessa categoria in una determinata area o dimensione. Mentre, l'intensità del cambiamento è anch'essa riportata: le aree che hanno subito variazioni di due o tre livelli di categoria negli

indici sono contrassegnate rispettivamente con doppi o tripli segni di addizione o sottrazione.

L'Italia mostra un livello di vulnerabilità simile rispetto alla media europea, presenta vulnerabilità medio-alte nelle dimensioni sociale, economica e verde, medie nella dimensione digitale e medio-basse nella dimensione geopolitica. Presenta livelli di vulnerabilità superiori rispetto alla media EU in tutti i settori della dimensione socioeconomica, così come nell'uso sostenibile delle risorse e negli ecosistemi, biodiversità, agricoltura sostenibile. Mentre riporta vulnerabilità relativamente basse in relazione alla mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici, digitalizzazione per l'industria, sicurezza informatica e fornitura di materie prime ed energia.

Generale		Vulnerabilità		Capacità	
		IT	EU-27	IT	EU-27
Socioeconomico	Disuguaglianze e impatti sociali delle transizioni				
	Salute, istruzione e lavoro				
	Stabilità economica e finanziaria e sostenibilità	-			
Verde	Mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici			+	
	Uso sostenibile delle risorse		+		
	Ecosistemi, biodiversità, agricoltura sostenibile			-	
Digitale	Digitale per spazio personale				+
	Digitale per industria	+			
	Digitale per spazio pubblico				
	Cybersecurity				
Geopolitico	Fornitura di materie prime ed energia			-	
	Catene di valore e commercio			+	
	Globalizzazione finanziaria				
	Sicurezza e demografia	+			

Tabella 4 - Indici di resilienza attraverso dimensioni e aree per l'Italia e l'UE-27. Gli indici sintetici aggregano la situazione relativa della resilienza dei Paesi considerando l'insieme degli indicatori presi in esame. Un indice elevato di vulnerabilità indica livelli più alti di vulnerabilità (con una scala cromatica che va dal blu all'arancione scuro), mentre un indice elevato di capacità segnala livelli più alti di capacità (dall'arancione scuro al blu), in confronto agli altri Paesi. I segni +/- indicano se vi sia stato un miglioramento o un peggioramento corrispondente a un cambiamento nel codice colore della resilienza rispetto al precedente RDB (i simboli ++, +++, --, --- si riferiscono a variazioni doppie o triple nella scala cromatica). I dati sottostanti alle vulnerabilità a livello UE-27 nell'area "catene del valore e commercio" non sono disponibili, poiché comprendono misure di concentrazione dei partner che non risultano comparabili con i valori degli Stati membri. Tabella adattata da (Benczur, et al., 2023).

Per quanto riguarda le capacità, l'Italia mostra un livello complessivo inferiore di capacità in tutti gli indicatori rispetto alla media EU. L'Italia ha capacità di resilienza medio-basse nelle dimensioni digitale e geopolitica, ed invece presenta capacità medio-alte nelle dimensioni socioeconomica e verde. L'Italia mostra capacità più forti rispetto alla media dell'UE nell'area dell'uso sostenibile delle risorse, ma presenta ancora problematiche rispetto al resto dei paesi membri in relazione alla salute, educazione e lavoro, digitalizzazione per l'industria e spazio personale e globalizzazione finanziaria, tra le altre.

Rispetto al Resilience Dashboard del 2020, la posizione complessiva dell'Italia non ha subito variazioni né sul fronte delle vulnerabilità né su quello delle capacità mantenendosi dunque stabile in termini aggregati; tuttavia, un'analisi più approfondita delle singole aree tematiche mette in evidenza alcune dinamiche contrastanti che meritano attenzione. Da un lato, il Paese ha registrato una riduzione delle proprie vulnerabilità nell'area "digitale per l'industria" per la diminuzione del disavanzo commerciale nei servizi ICT e il restringimento del divario nell'accesso alla banda larga da parte delle imprese, e nell'area "sicurezza e demografia", dove si osservano miglioramenti nelle condizioni strutturali; dall'altro lato, le vulnerabilità italiane sono aumentate nell'area della stabilità economica, finanziaria e della sostenibilità, a causa soprattutto di un progressivo calo nella specializzazione economica e di un indebolimento della diversificazione settoriale, fattori che hanno reso il sistema più esposto a rischi esterni (Benczur, et al., 2023).

2.3 WorldRiskINDEX

Ogni anno milioni di persone in tutto il mondo subiscono gravi conseguenze a seguito di eventi naturali estremi, come terremoti, tempeste o alluvioni. Tuttavia, il rischio che un evento naturale si trasformi in un vero e proprio disastro non dipende solo dall'intensità dell'evento stesso. Le condizioni della società e le strutture predisposte per rispondere rapidamente alle emergenze giocano un ruolo altrettanto cruciale. Quando le reti infrastrutturali sono fragili, la povertà e le disuguaglianze sono diffuse e l'accesso ai servizi sanitari è limitato, le popolazioni diventano particolarmente vulnerabili agli eventi estremi. Pur non potendo prevenire direttamente tali eventi, i Paesi possono ridurre il rischio di disastri attraverso politiche mirate al contrasto della povertà e della fame, al rafforzamento dell'istruzione e della sanità, e all'adozione di misure di preparazione efficaci. Oggi le crisi tendono a sovrapporsi ed a interagire tra loro, amplificandosi reciprocamente. Eventi naturali estremi, pandemie, guerre e conflitti non si verificano più isolatamente, ma si intrecciano, mentre tendenze globali come i cambiamenti climatici, la crescita demografica e la polarizzazione politica ne aggravano gli effetti. Il risultato è un mondo sempre più esposto a crisi complesse e interconnesse, che contribuiscono a incrementare povertà e disuguaglianze sociali. Gli effetti delle crisi multiple si manifestano su scala globale, nazionale, regionale e individuale, e la globalizzazione rende possibile la loro rapida diffusione da un Paese all'altro, ampliando l'impatto delle crisi locali a livello internazionale.

Per affrontare efficacemente questi scenari complessi, è necessario sviluppare strumenti avanzati in grado di analizzare i rischi derivanti da crisi multiple. I metodi attuali, spesso concentrati su singoli fattori scatenanti, faticano a gestire la complessità delle interconnessioni tra crisi diverse. È quindi fondamentale tradurre le conoscenze in azioni concrete e operative, attraverso una collaborazione stretta tra data scientist e operatori umanitari sul campo. Solo approcci innovativi e integrati nella gestione del rischio di disastri possono permettere di affrontare le sfide poste dalle crisi multiple e ridurre i loro impatti devastanti. Questo richiede cooperazione internazionale, condivisione di conoscenze e risorse, e lo sviluppo di soluzioni flessibili e adattabili, capaci di integrare interventi di emergenza immediata con strategie di prevenzione a lungo termine.

Uno strumento chiave in questo contesto è il WorldRiskIndex, che misura il rischio di disastri derivanti da eventi naturali estremi e dagli effetti negativi dei cambiamenti climatici per diversi Paesi nel mondo. Tra i suoi obiettivi principali, fornisce indicazioni ai decisori politici e individua ambiti di intervento per la riduzione del rischio di disastri, supportando sia la pianificazione di interventi immediati sia lo sviluppo di strategie preventive a lungo termine.

Il modello di base, con la sua struttura modulare, è stato sviluppato in collaborazione con l'United Nations University Institute for Environment and Human Security (UNU-EHS). Dal 2018, l'Institut für Internationales Recht und Friedensforschung (IFHV) della Ruhr-Universität Bochum ne cura il calcolo e ne perfeziona continuamente metodologia e concetti. Infatti, il più recente aggiornamento risale al 2022, con la sua pubblicazione con un modello completamente revisionato, che include 100 indicatori provenienti da database globali accessibili pubblicamente e rappresenta per la prima volta tutti i 193 Stati membri delle Nazioni Unite (IFHV, 2025).

2.3.1 Metodologia e fondamenti del WorldRiskIndex

Per implementare il nuovo modello, i termini e le definizioni precedenti sono stati adattati e revisionati per allineare il WorldRiskIndex alla terminologia usata da UNDRR e per ottenere così una maggiore comparabilità con altri concetti di rischio. Il rischio viene quindi definito qua come interazione tra le due sfere di esposizione e vulnerabilità, che sorge solo dove entrambe le sfere si incontrano. In questo senso, i rischi sono presenti solo dove le popolazioni prive di sufficiente resilienza, capacità di gestione o di adattamento vivono in regioni dove esistono pericoli derivanti da eventi naturali estremi o negativamente impattate dai cambiamenti climatici. L'esposizione riflette il grado con cui le popolazioni sono soggette agli impatti di eventi naturali estremi; pertanto, l'esposizione comprende gli aspetti della pericolosità, e le popolazioni (oggetto del pericolo). Infine, la vulnerabilità è intesa come la predisposizione delle popolazioni a essere vulnerabili ai danni derivanti da eventi naturali estremi o dagli impatti negativi dei cambiamenti climatici. Questa procede a mappare le capacità e le disposizioni delle persone, delle famiglie e delle società e indica quanto facilmente e in che misura possano essere destabilizzate, danneggiate o addirittura distrutte da eventi estremi. È composta dalle tre dimensioni di suscettibilità, mancanza di capacità di far fronte e mancanza di capacità adattiva (IFHV, 2022).

Altri aspetti soggetti a revisione sono stati la struttura e gli indicatori che sono aumentati fino a considerare più aspetti all'interno del calcolo del WorldRiskIndex. Vengono considerati solo indicatori provenienti da fonti riconosciute e pubblicamente accessibili (ad esempio Banca Mondiale, UNESCO, OMS), ed i criteri della loro selezione sono stati notevolmente ampliati: ogni indicatore deve essere preciso, teoricamente rilevante, riproducibile, comparabile, comprensibile, coerente e facilmente accessibile, oltre a essere fornito continuamente dalla sua fonte di dati. Queste significative espansioni del numero di indicatori e dei criteri di selezione erano necessarie, da un lato, per migliorare l'accuratezza e l'affidabilità delle analisi, e dall'altro per catturare un grado più elevato di complessità che consenta un focus più forte sui bisogni degli stakeholder. Seguendo questi criteri, l'aggiornamento del 2022 non include altri modelli di indice rendendo tutti gli elementi del modello visibili ed eliminando

distorsioni dovute a indicatori nascosti. Rispetto al modello precedente, la differenziazione è più pronunciata nell'ambito dell'esposizione, dove l'analisi si basa ora su modellazioni probabilistiche che considerano più periodi di ritorno degli eventi estremi. Un'altra novità è la considerazione, oltre agli eventi che causano il maggior numero di vittime o di perdite finanziarie a livello mondiale, ma anche dei fenomeni regionali. Simultaneamente, nell'analisi vengono inclusi tre livelli di intensità per esposizione, e dati sul numero di popolazione e le proporzioni, così da riflettere l'eterogeneità dell'esposizione e delle sue conseguenze e per evitare distorsioni dovute alla dimensione delle popolazioni. Inoltre, tutte le esposizioni sono ponderate allo stesso modo, poiché qualsiasi forma di ponderazione introdurrebbe un certo grado di soggettività nell'ambito dell'esposizione e comporterebbe risultati meno attendibili.

Altre modifiche al WorldRiskIndex, sono relative al calcolo dell'indice, un processo a quattro fasi che va dalla preparazione dei dati grezzi all'aggregazione finale dei dati. Primo fra questi è l'imputazione dei valori mancanti, ovvero se gli indicatori non sono disponibili per alcuni paesi o in determinati anni, un algoritmo specifico permette di stimarli sfruttando tre tipi di correlazioni: tra paesi nello stesso indicatore, tra indicatori nello stesso paese e tra serie temporali. Questo approccio consente di generare valori plausibili, ed integrando informazioni qualitative come i giudizi degli esperti. Tutti i dati mancanti vengono così stimati contemporaneamente, con un processo iterativo che rafforza la robustezza delle stime. Successivamente avviene la trasformazione degli indicatori, necessaria a ridurre le distorsioni dovute a distribuzioni asimmetriche o valori anomali. Invece del tradizionale logaritmo, si adotta la Trasformazione per Quantili Ordinati, più efficace e priva della necessità di ulteriori correzioni. I valori vengono poi traslati per assicurare che siano tutti maggiori di zero. Il terzo passaggio è la normalizzazione, che riporta tutti gli indicatori su una scala da 0 a 100, dove valori più alti indicano condizioni peggiori. Infine, gli indicatori vengono aggregati tramite media geometrica non ponderata. Questa scelta premia i progressi bilanciati e scoraggia squilibri tra dimensioni diverse del rischio. I risultati producono valori sintetici da 0 a 100 che permettono confronti tra tutti i 193 paesi considerati.

Per rendere i risultati più leggibili, i valori vengono suddivisi in cinque classi stabili nel tempo, così da permettere analisi delle tendenze senza i limiti delle classificazioni variabili anno per anno (IFHV, 2022).

notevoli grazie a dati aggiornati e tempestivi, apparendo come un'anomalia positiva rispetto alla tendenza globale, mentre in altri casi l'assenza di dati aggiornati ha congelato le classifiche.

L'analisi del 2023 conferma come i paesi a più alto rischio comprendano Filippine, India, Indonesia, Colombia, Messico, Myanmar, Mozambico, Russia, Cina e Pakistan, mentre i più vulnerabili rimangono concentrati in Africa, con la sola eccezione di Yemen e Mozambico. Allo stesso tempo, emergono differenze nella capacità di recupero post-pandemia: alcuni paesi, come la Tunisia, hanno migliorato sensibilmente i propri punteggi nella vulnerabilità, mentre altri mostrano solo cambiamenti marginali sul lungo periodo (IFHV, 2023). Il caso della Germania evidenzia che anche paesi altamente sviluppati non sono immuni da deficit strutturali: la pandemia ha fatto emergere debolezze nel sistema sanitario, nella ricerca e negli investimenti, fattori che nel lungo termine potrebbero ridurre la resilienza.

Nel complesso, i principali fattori di rischio globali continuano a risiedere nella vulnerabilità strutturale, nelle disuguaglianze sociali e nella fragilità dei sistemi sanitari. Quando queste criticità superano determinate soglie, la capacità adattiva si riduce drasticamente, indebolendo resilienza e capacità di coping. L'assistenza umanitaria e politiche di investimento mirate possono interrompere questo circolo vizioso, ma resta evidente che persino i paesi più ricchi devono vigilare, poiché tagli e scelte di bilancio sbagliate possono compromettere la resilienza futura (IFHV, 2024); (IFHV, 2025).

2.4 HAZUS

Nell'ambito della gestione del rischio da disastri naturali, la capacità di stimare le perdite attese rappresenta un passaggio cruciale, in quanto ogni evento catastrofico, che si tratti di un terremoto, di un'alluvione o di un uragano, non si traduce solamente in un fenomeno fisico ma comporta conseguenze sociali, economiche e infrastrutturali che incidono profondamente sulla vita delle comunità. Avere strumenti in grado di quantificare in anticipo questi impatti consente di trasformare l'incertezza in scenari concreti su cui basare decisioni operative. La stima delle perdite diventa così un supporto essenziale alla pianificazione, perché permette di individuare le aree e le tipologie edilizie più vulnerabili e di orientare interventi di mitigazione e riduzione del rischio. Al tempo stesso, la possibilità di esprimere in termini economici e sociali l'entità dei danni fornisce una base oggettiva per giustificare investimenti, allocare risorse e definire priorità d'azione. Anche nella fase emergenziale e nel successivo processo di ripresa, disporre di scenari di perdita affidabili consente di programmare evacuazioni, predisporre capacità di accoglienza temporanea e pianificare strategie per il ripristino delle infrastrutture critiche. In questo senso, il calcolo delle perdite non è un esercizio accademico astratto, ma uno strumento operativo che traduce dati e modelli in informazioni utili per la prevenzione, la gestione dell'emergenza e la ricostruzione.

A livello internazionale, dalla fine degli anni '80 sono stati elaborati diversi strumenti e metodologie con l'obiettivo di stimare le perdite associate a eventi naturali, ciascuno con caratteristiche e contesti applicativi differenti. Negli Stati Uniti, ad esempio, l'Applied Technology Council aveva sviluppato ATC-13 e successivamente ATC-25, due sistemi basati su matrici di probabilità che consentivano di valutare i danni agli edifici in seguito a terremoti (Applied Technology Council, 1985; 1992). In America Latina, la Banca Mondiale e l'Inter-American Development Bank hanno promosso lo sviluppo della piattaforma Central America Probabilistic Risk Assessment (CAPRA), un framework probabilistico multi-hazard fondato sull'integrazione con sistemi GIS, pensato per rispondere alle esigenze di pianificazione in Paesi particolarmente vulnerabili (Cardona et al., 2012). In Nuova Zelanda, invece, Geological and Nuclear Sciences (GNS) e National Institute of Water and Atmospheric Research (NIWA) hanno realizzato RiskScape, concepito come un software flessibile in grado di includere diversi pericoli naturali e di adattarsi facilmente a contesti locali attraverso moduli specifici (King & Bell, 2009). A livello globale, la Global Earthquake Model Foundation ha introdotto OpenQuake, un motore open source che si concentra soprattutto sul rischio sismico, adottando un approccio probabilistico e fornendo un ambiente di calcolo accessibile alla comunità scientifica internazionale (Pagani et al., 2014). Questi strumenti condividono un principio metodologico comune, ovvero il passaggio dalla caratterizzazione del

pericolo alla definizione dell'esposizione e della vulnerabilità per arrivare infine alla stima delle perdite, ma differiscono per complessità, accessibilità, copertura geografica e grado di standardizzazione. In questo panorama, nei primi anni '90 nasce HAZUS Loss Estimation Methodology, sviluppato dalla Federal Emergency Management Agency (FEMA) distinguendosi per essere stato il primo strumento ufficialmente promosso a livello federale negli Stati Uniti d'America, con l'intento di uniformare su scala nazionale un approccio metodologico replicabile e al tempo stesso personalizzabile con dati locali (FEMA, 2003). Quest'ultimo strumento integrato nasce per stimare le perdite derivanti da pericoli naturali, ed oggi si configura come un software di supporto decisionale che consente ai funzionari statali, locali, tribali e territoriali (SLTT) di stimare le perdite potenziali derivanti da eventi naturali, anticipando le conseguenze dei disastri e permettendo di predisporre piani e strategie efficaci sia per la mitigazione del rischio, sia per il recupero e la ricostruzione post-evento. Basato su tecnologie GIS, HAZUS può essere applicato a contesti geografici di diversa scala e con caratteristiche demografiche eterogenee, risultando accessibile a un'ampia gamma di utenti con livelli diversi di competenza tecnica e specialistica. La sua architettura si fonda sulla combinazione di dati di esposizione, modelli di pericolosità e funzioni di vulnerabilità, così da produrre stime delle conseguenze per città o regioni, sia in riferimento a scenari definiti sia a valutazioni probabilistiche. Tali stime forniscono un quadro dell'entità e della diffusione dei danni, comprendendo perdite economiche dirette legate a riparazioni e ricostruzioni, costi derivanti dalla perdita di funzionalità come la riduzione di entrate aziendali o i costi di trasferimento, nonché vittime, sfollamenti e quantità di detriti. Vengono inoltre stimati i tempi di ripristino delle infrastrutture essenziali come ospedali, reti elettriche e sistemi idrici.

2.4.1 Evoluzione metodologica di HAZUS: dal prototipo sismico alla piattaforma multi-pericolo

Hazus nasce inizialmente come prototipo sperimentale focalizzato sui terremoti (HAZUS97), per stimare impatti sismici su edifici e infrastrutture e perdite sociali ed economiche a livello di settore censuario, contea o stato, ma viene sviluppato fino a diventare una piattaforma multi-pericolo (HAZUS-MH) in grado di modellare non solo i sismi, ma anche inondazioni, uragani e tsunami. Il modello terremoto (*HAZUS-MH Earthquake Model*) valuta i danni e le perdite a edifici, infrastrutture essenziali, reti di trasporto e servizi, stimando anche la produzione di detriti, il fabbisogno di rifugi, le vittime e gli incendi conseguenti a un sisma. Il modello alluvione (*HAZUS-MH Flood Model*) genera dati su eventi fluviali e costieri attraverso database idrologici nazionali, stimando danni ad edifici e infrastrutture, perdite agricole, necessità di rifugi e quantità di detriti. Il modello tsunami (*HAZUS-MH Tsunami Model*) consente di prevedere le conseguenze di

scenari caratterizzati da specifiche profondità di inondazione, velocità e localizzazione, producendo stime sui danni e sulle interruzioni attese. Infine, il modello uragano (*HAZUS-MH Hurricane Model*) permette di simulare scenari basati su eventi storici, probabilistici o definiti dall'utente, stimando i danni agli edifici e combinando i dati di vento e di alluvione per calcolare le perdite dovute alle mareggiate.

La sua evoluzione è stata scandita da continui processi di aggiornamento: nato come software integrato in ArcMap, ha progressivamente migliorato i moduli e si è adattato alle piattaforme GIS più recenti, risultando via via più accessibile per pianificatori locali e analisti tecnici. Questa traiettoria di sviluppo è stata guidata da due esigenze principali: da un lato fornire una metodologia standardizzata e replicabile a livello nazionale, dall'altro garantire la possibilità di personalizzare le analisi con dati locali. Dal punto di vista concettuale, Hazus opera attraverso tre passaggi chiave: la definizione dell'esposizione, comprendente edifici, infrastrutture e popolazione; la caratterizzazione dello scenario di pericolosità, come scuotimento sismico, livelli di piena o intensità dei venti; l'applicazione delle funzioni di danno e perdita, che traducono la combinazione pericolo-esposizione in stime economiche, interruzioni funzionali ed impatti sulla popolazione (Tate, Muñoz, & Suchan, 2014).

Questa struttura, che riprende il paradigma consolidato della *risk chain* nelle scienze naturali e ingegneristiche, è stata formalizzata per la prima volta nel manuale tecnico FEMA dedicato al modello sismico (FEMA, 1997) e successivamente estesa agli altri pericoli naturali con l'introduzione di HAZUS-MH nel 2004. Il primo passaggio è la caratterizzazione della pericolosità, che descrive l'evento naturale. Nei terremoti si utilizza il campo di scuotimento derivato da modelli di propagazione del moto del suolo; nelle alluvioni il parametro principale è l'altezza dell'acqua, cui si aggiungono effetti di velocità e warning; negli uragani il fulcro è invece la traiettoria e il campo di vento stimato con modelli validati. In ciascun caso il risultato è una superficie geografica che quantifica l'intensità dell'evento nello spazio. Successivamente si ha l'esposizione, costituita dall'inventario degli elementi vulnerabili: edifici residenziali, commerciali e industriali, infrastrutture critiche, popolazione residente e beni mobili. HAZUS fornisce un inventario nazionale predefinito, organizzato in "classi edilizie" e settori infrastrutturali, che può essere integrato o sostituito da dati locali per analisi di dettaglio. Inoltre, vengono effettuate ricerche ed analisi sulla vulnerabilità, ovvero l'insieme di relazioni statistiche che collegano l'intensità dell'evento naturale al grado di danno atteso per ciascuna tipologia costruttiva. Queste curve di vulnerabilità sono derivate da evidenze empiriche e da analisi ingegneristiche, e variano in base al tipo di pericolo: fragilità sismiche per edifici e ponti, *depth-damage functions* per le alluvioni, funzioni vento-danno per gli uragani. Infine, si ha la stima delle perdite, che traduce i danni in conseguenze

socioeconomiche. Le uscite del modello includono costi diretti di riparazione e sostituzione, perdite economiche indirette (interruzioni di attività produttive e servizi), vittime e feriti, fabbisogni di rifugio temporaneo e produzione di detriti. Per ottenere questi risultati, Hazus si basa su un insieme di dati e metodologie standardizzati: include sistemi di classificazione del patrimonio edilizio e dei servizi essenziali, procedure per stimare la tipologia e l'entità dei danni e anche dati nazionali e regionali utilizzabili come riferimento qualora non siano disponibili dati locali. Il software integra tali informazioni in un ambiente GIS user-friendly che consente di analizzare i dati e di visualizzare i risultati in mappe e tabelle intuitive.

La precisione delle perdite stimate dipende in gran parte dalla qualità dei dati di input. Con i dati di base forniti dal sistema è possibile condurre un'analisi preliminare, mentre con dati più accurati e specifici per la regione, la popolazione o il tipo di hazard, gli utenti possono sviluppare analisi più avanzate. L'inserimento di dati locali migliora sensibilmente la precisione degli inventari e dei parametri, e le valutazioni di livello più elevato possono includere anche i risultati di studi di terze parti, garantendo così maggiore affidabilità alle stime finali. Questo rende HAZUS non solo un modello fisico-ingegneristico, ma anche uno strumento di supporto decisionale per la pianificazione della mitigazione e la gestione delle emergenze.

2.4.2 Valore e utilità di HAZUS

In conclusione, HAZUS rappresenta un punto di riferimento metodologico e operativo nella valutazione del rischio da eventi naturali, grazie alla sua capacità di integrare dati di esposizione, scenari di pericolosità e funzioni di vulnerabilità in stime di perdite sociali, economiche e infrastrutturali. La sua architettura modulare e basata su GIS consente non solo di standardizzare le analisi a livello nazionale, ma anche di adattarle alle specificità locali, rendendo le stime più affidabili e utili per decisioni concrete. L'evoluzione dei vari modelli testimonia la flessibilità dello strumento e la sua capacità di affrontare scenari complessi multi-pericolo. Pur riconoscendo i limiti legati alla qualità dei dati, alla complessità tecnica e alle assunzioni semplificative, HAZUS rimane uno strumento essenziale per la pianificazione della mitigazione del rischio, la gestione delle emergenze e il recovery post-evento, trasformando informazioni tecniche e modelli scientifici in decisioni operative concrete e orientate alla sicurezza delle comunità (Scawthorn, et al., 2006); (Tate, Muñoz, & Suchan, 2014).

2.5 RESILIENCE NEIGHBOURHOOD

Oggi molte comunità e individui si trovano ad affrontare una gamma sempre più complessa di sfide sociali, ambientali ed economiche: dai cambiamenti climatici e dall'esaurimento delle risorse naturali, al progressivo aumento delle disuguaglianze economiche e all'instabilità dei sistemi finanziari globali, passando per il declino della salute pubblica e la crescente pressione esercitata dal costo della vita. A queste problematiche si aggiungono i fattori di stress che emergono a livello di quartiere, come criminalità, traffico, inquinamento atmosferico, trasporti pubblici inaccessibili, fino ad arrivare a eventi estremi come disastri naturali o causati dall'uomo. Si tratta di sfide che conosciamo bene, ma che spesso possono apparire sproporzionate rispetto alla nostra capacità di azione individuale. Tuttavia, un punto di partenza significativo si può ritrovare proprio negli spazi quotidiani in cui viviamo: le nostre case, gli edifici, le strade e i quartieri possono diventare luoghi in cui ricostruire connessioni sociali, rafforzare il legame con i luoghi e alimentare quel senso di comunità e appartenenza che oggi appare tanto necessario quanto desiderato. La resilienza, in questo senso, non riguarda soltanto le infrastrutture materiali, ma soprattutto la capacità delle comunità di rispondere e adattarsi a cambiamenti profondi e sfide complesse. Al cuore di tale capacità risiede la qualità delle relazioni sociali: le persone con cui viviamo, lavoriamo e trascorriamo il nostro tempo costituiscono la rete attraverso cui possiamo sviluppare fiducia reciproca, supporto e collaborazione. Cresce, negli ultimi anni, l'attenzione verso approcci partecipativi e intersettoriali, che vedono coinvolti governi locali, imprese, organizzazioni del terzo settore, reti di volontari e cittadini, con l'obiettivo di preparare i quartieri urbani ad affrontare in modo proattivo i molteplici fattori di stress locali. Sebbene ogni individuo viva e percepisca lo spazio comunitario in maniera unica, la resilienza non risiede nell'uniformità delle esperienze, bensì nella capacità di costruire legami sociali che tengano insieme questa diversità. Una delle caratteristiche principali di una comunità resiliente è infatti il grado in cui i suoi membri si sentono connessi tra loro e con il luogo in cui vivono: tali connessioni, radicate in relazioni interpersonali dinamiche e basate sulla fiducia, permettono di trasformare la molteplicità dei vissuti individuali in una forza collettiva, rafforzando la capacità della comunità di adattarsi e sostenersi di fronte a sfide sempre nuove. Per questa ragione, le comunità resilienti si preparano e rispondono in modo proattivo a tali difficoltà, migliorando al contempo la qualità della vita e il benessere collettivo. In questo contesto nasce il progetto Building Resilient Neighbourhoods (BRN), organizzazione nonprofit con sede nella Columbia Britannica in Canada, attiva dal 2012 nella sperimentazione di programmi concreti volti a promuovere le connessioni di vicinato e a rafforzare la resilienza comunitaria.

2.5.1 Building Resilient Neighbourhoods (BRN) per la costruzione della resilienza locale

BRN trae ispirazione da molteplici esempi di buone pratiche nello sviluppo comunitario e di quartiere, distinguendosi per l'attenzione rivolta alla costruzione delle capacità di resilienza. A partire da questi, vengono identificati quattro aspetti fondamentali di una comunità che contribuiscono a rafforzare la resilienza dei quartieri: promuovere un cambiamento negli atteggiamenti e nei valori in direzione di una maggiore coesione sociale e di una prospettiva positiva e orientata alle soluzioni; individuare e affrontare le carenze nelle infrastrutture e nelle risorse umane, naturali e materiali; consolidare la proprietà e il controllo locale delle economie; coinvolgere leader, gruppi e cittadini in processi di pianificazione e azione a livello di quartiere, capaci di rispondere efficacemente ai bisogni locali. Accanto a queste caratteristiche, l'approccio di BRN si fonda su l'adozione di una prospettiva complessiva, multiscalare e intersettoriale che, pur sostenendo piccoli progetti specifici e immediati, favorisca connessioni e collaborazioni interne ed esterne ai quartieri, incoraggiando soluzioni comunitarie più ampie e capaci di incidere positivamente sulle cause strutturali dei problemi. La valorizzazione di una visione a breve e lungo termine, è un altro aspetto cardine del BRN, permettendo di promuovere azioni rapide a livello di strada o di isolato, sostenendo allo stesso tempo percorsi articolati di pianificazione e intervento comunitario. Quest'ultimi, sono spesso mirati ad offrire opportunità di coinvolgimento diversificate ed inclusive, capaci di incontrare le persone nei loro specifici contesti, così da incentivarne la partecipazione secondo la logica che implica l'apertura a legami sociali più profondi con le persone e i luoghi condivisi, l'impegno pratico in piccoli progetti concreti e l'apprendimento collettivo volto a sviluppare le capacità necessarie alla costruzione di resilienza. Un obiettivo del progetto è di superare i limiti della pianificazione convenzionale, includendo questioni quali l'uso di risorse, le proprietà delle imprese locali e i determinanti sociali della salute e del benessere, e promuovendo l'azione dei cittadini affinché governi locali e altri attori possano tradurre le idee in pratiche concrete.

Sebbene l'approccio di BRN assuma forme diverse in ogni comunità con cui viene applicato, alcuni elementi risultano costantemente integrati nella progettazione degli interventi. Questo anche grazie alla realizzazione di eventi formativi per le comunità, con l'obiettivo di sostenere l'azione della comunità fornendo basi concettuali ed esempi di esperienze di resilienza positive ed utili a livello di quartiere. Le iniziative principali sono i *"Neighbour-to-Neighbour"* realizzati in collaborazione con una rete di partner, riuniscono i residenti di uno stesso quartiere al fine di rafforzare i legami sociali, promuovere forme di mutuo supporto e accrescere la preparazione collettiva di fronte a emergenze o condizioni di stress cronico (BRN, 2017). Un'altra iniziativa di rilievo è *Resilient*

Streets, nasce con l'obiettivo di rafforzare il capitale sociale e la capacità di risposta delle comunità locali agendo nello spazio vissuto nel quotidiano: la strada, l'isolato o l'edificio. L'approccio si fonda sull'idea che la resilienza non dipenda esclusivamente da grandi interventi infrastrutturali o da politiche centralizzate, ma possa emergere attraverso iniziative semplici e partecipative che stimolano la connessione tra vicini, la fiducia reciproca e la condivisione delle risorse. La realizzazione del programma incoraggia infatti i residenti di una via o di un isolato a riunirsi per progettare e mettere in atto piccoli interventi locali: questi possono riguardare il miglioramento dell'ambiente fisico, come la creazione di orti comunitari o spazi verdi condivisi, iniziative di condivisione tra vicini, ad esempio biblioteche degli attrezzi o sistemi di mutuo aiuto, oppure occasioni di costruzione di connessioni sociali, come feste di quartiere o attività ricreative. Questi interventi possono essere ricondotti a quattro aree principali: *celebrations & gatherings*, che favoriscono il senso di appartenenza attraverso eventi sociali; *placemaking*, inteso come trasformazione creativa degli spazi comuni; *sharing economy*, basata sullo scambio di beni, competenze e servizi; e *learning together for change*, che promuove percorsi di apprendimento collettivo legati alla sostenibilità e alla resilienza urbana. Quindi, l'importanza di queste pratiche risiede nella loro capacità di rafforzare il capitale sociale, accrescere l'autosufficienza locale e innescare un cambiamento culturale duraturo. In questo senso, l'iniziativa *Resilient Streets* si configura non solo come un insieme di azioni concrete, spesso a basso costo e ad alta partecipazione, ma come un vero e proprio moltiplicatore di resilienza, capace di trasformare la pluralità delle esperienze individuali in una forza collettiva in grado di rispondere in modo proattivo alle sfide sociali, ambientali ed economiche (Wipond, Barter, & Colussi, 2017); (BRN, 2017).

2.5.2 Strumenti operativi di BRN per i quartieri resilienti

I programmi di BRN si articolano attraverso diverse fasi operative, prima fra questa la pianificazione e definizione delle priorità a livello di quartiere, così da consentire la riunione di residenti e leader locali per rivedere i risultati delle valutazioni iniziali e individuare le principali priorità di resilienza, che possono costituire la base di una strategia comunitaria o essere sviluppate in progetti specifici a scala ridotta. La collaborazione intersettoriale che ne consegue rappresenta un elemento cardine permettendo in questo modo la consolidazione di relazioni tra i diversi attori locali e la creazione di reti di cooperazione tra enti pubblici, organizzazioni civiche, gruppi culturali, imprese locali e cittadini. BRN supporta tali processi attraverso formazione integrata, sviluppo di Tavoli delle Risorse per Quartieri Resilienti, ovvero di spazi collaborativi, sia fisici che concettuali, in cui i diversi attori del quartiere, residenti, leader comunitari, organizzazioni locali, enti pubblici, imprese e volontari, si incontrano per coordinare e condividere risorse, conoscenze e competenze.

Questo strumento costituisce quindi un vero e proprio punto di riferimento collettivo che facilitano la pianificazione, l'azione e il monitoraggio delle iniziative di resilienza locale.



Figura 6 - Characteristics of a Resilient Community or Neighbourhood - Checklist

All'interno di questo approccio operativo si inserisce anche il quadro di riferimento sotto forma di checklist, sviluppato come strumento per comprendere e valutare il livello di resilienza presente in un quartiere o in una comunità. Si tratta di uno strumento versatile, concepito non solo come strumento diagnostico, ma anche come catalizzatore di riflessione collettiva e azione partecipativa. Infatti, la checklist consente di esaminare le capacità della comunità in relazione a diverse dimensioni chiave, a partire dagli atteggiamenti e dai valori, intesi come predisposizione alla collaborazione, alla fiducia reciproca e all'adozione di comportamenti orientati alla resilienza. Analizza inoltre le infrastrutture e le risorse disponibili, considerando sia gli ambienti naturali sia quelli costruiti e ponendo attenzione alla capacità di adattamento degli spazi e delle risorse.

L'economia locale rappresenta un'altra dimensione centrale, valutando la solidità, la diversificazione e il controllo delle risorse economiche da parte della comunità stessa. Infine, la checklist tiene conto della leadership, del coinvolgimento e della pianificazione comunitaria, osservando la presenza di leader, gruppi e strutture organizzative in grado di facilitare la partecipazione dei cittadini e promuovere strategie condivise di resilienza. Progettata per essere flessibile, la checklist può essere adottata a più livelli. A livello individuale, offre l'opportunità di un'autovalutazione e di una maggiore consapevolezza del proprio contesto. Nei gruppi di discussione diventa invece occasione per confrontare prospettive differenti, generando una visione condivisa dei punti di forza e delle vulnerabilità locali. Allo stesso tempo, lo strumento può essere impiegato per l'asset mapping, cioè la mappatura delle risorse e delle competenze già esistenti nel quartiere, così da riconoscere e valorizzare gli elementi che contribuiscono alla resilienza collettiva (BRN B. R., 2016). Non meno importante è il suo utilizzo nell'analisi degli indicatori: la checklist permette di focalizzare l'attenzione su specifici parametri da monitorare, facilitando la raccolta di dati statistici, ma anche di percezioni e atteggiamenti dei residenti, restituendo così un quadro che integra dimensioni oggettive e soggettive del vivere quotidiano.

Oltre a queste modalità, la checklist svolge anche un ruolo fondamentale come strumento di mediazione tra cittadini e organizzazioni, che spesso osservano il quartiere da prospettive differenti. Le organizzazioni tendono a privilegiare le strutture, i processi e le risorse disponibili a livello istituzionale, mentre i residenti vivono quotidianamente lo spazio e ne percepiscono sfide e opportunità attraverso esperienze soggettive. Questa differenza di punti di vista può diventare un elemento prezioso se gestita nel modo corretto, poiché le discussioni tra cittadini e organizzazioni offrono l'opportunità di confrontare conoscenze e percezioni complementari, generando una comprensione più completa della realtà locale. Questi momenti di confronto possono avere diverse finalità; prima fra tutte, possono essere dedicati alla raccolta di informazioni generali sulla comunità, consentendo di mappare caratteristiche, risorse, bisogni e dinamiche locali in modo sistematico. In secondo luogo, le discussioni possono concentrarsi sull'identificazione dei punti di forza e delle vulnerabilità della resilienza della comunità, favorendo una valutazione partecipativa che integra dati oggettivi con le esperienze vissute dai cittadini. Parallelamente, è possibile esplorare la resilienza delle stesse organizzazioni coinvolte, analizzando la loro capacità di adattamento, la disponibilità di risorse interne e la predisposizione alla collaborazione con altri attori locali. Infine, questi confronti possono gettare le basi per future collaborazioni intersettoriali, creando reti di fiducia tra organizzazioni e cittadini e stimolando la co-progettazione di interventi mirati a rafforzare la resilienza del quartiere nel lungo periodo. Il valore di queste discussioni risiede nella loro capacità di trasformare la molteplicità di punti di vista in un patrimonio condiviso, in cui le competenze istituzionali e la conoscenza esperienziale dei residenti si integrano per creare strategie di resilienza più efficaci e sostenibili. Quando le differenze di prospettiva vengono riconosciute e valorizzate, emergono soluzioni innovative, progetti concreti e percorsi di collaborazione duraturi che rispondono in modo più completo alle sfide sociali, ambientali ed economiche del quartiere, migliorando non solo la capacità della comunità di adattarsi ai cambiamenti, ma anche la qualità della vita e il senso di appartenenza dei cittadini stessi.

2.6 R3C-GeoResilience

La metodologia sviluppata dal Centro Interdipartimentale Responsible Risk Resilience Centre (R3C) del Politecnico di Torino si fonda sul concetto che, nel contesto contemporaneo di cambiamenti climatici, crisi socioeconomiche e urbanizzazione crescente, la vulnerabilità ambientale e socioeconomica debba essere analizzata come sintomo di sistemi territoriali interconnessi e complessi. Partendo da questa premessa, la proposta metodologica di R3C è stata sviluppata con un approccio multirischio per consentire la conoscenza multidimensionale di fattori correlati misurabili di vulnerabilità territoriale.

La vulnerabilità di un sistema territoriale può essere interpretata come l'esito dell'interazione tra fattori caratterizzanti le *conditions of system* (CoS), ed *hazard*. Per condizioni del sistema si intende rappresentare il grado in cui tutte le componenti del sistema rispondono, in senso positivo o negativo, alle variazioni o ai cambiamenti delle dinamiche interne ed esterne, generando effetti diretti o indiretti sulle diverse componenti (IPCC, 2019). Queste si dividono in tre componenti differenti: (A) *Natural Environment and Landscape*, per quelle condizioni naturali del sistema come la permeabilità del suolo e la qualità ecologica del territorio; (B) *Built Environment, Cultural Heritage and Infrastructure*, riguarda tutte quelle componenti relative all'ambiente costruito come strutture abitative, infrastrutture e patrimonio culturale del territorio; (C) *Economy and Society*, per quelle componenti relative agli aspetti sociali ed economici della comunità del territorio analizzato. Alle CoS si aggiungono gli *hazard* che si suddividono in *events*, ovvero eventi improvvisi e ad alto impatto che possono compromettere in modo significativo ambiente, insediamenti e popolazioni (IPCC, 2021), come terremoti, alluvioni, frane, e *trends*, intesi come processi gradualmente e lineari (consumo di suolo, spopolamento, obsolescenza del patrimonio edilizio) che, nel lungo periodo, erodono progressivamente la capacità di resilienza del sistema (IPCC, 2012). Mentre i primi richiedono risposte rapide e strategie di pronto intervento, i *trends* cronici necessitano di un monitoraggio sistematico e continuativo, accompagnato da azioni di pianificazione di lungo termine orientate alla mitigazione e all'adattamento (IPCC, 2022).

2.6.1 Teoria e struttura concettuale di R3C-GeoResilience

Per effettuare la misurazione della vulnerabilità territorialmente, la metodologia proposta integra due elementi: da un lato la struttura concettuale offerta dalla matrice di correlazione, dall'altro la dimensione spaziale derivante dai dati territoriali. Ogni indicatore viene tradotto in forma cartografica attraverso griglie regolari di diversa risoluzione (200 x 200 metri). Ciascuna cella della griglia rappresenta quindi un'unità spaziale omogenea alla quale sono associati, e georeferenziati, i valori dei singoli indicatori selezionati. Tale scelta consente di

uniformare la distribuzione dei dati relativi ai diversi componenti del sistema e di garantire che i valori calcolati siano riferiti a unità spaziali di pari estensione. Il cuore del procedimento analitico alla base della metodologia R3C-GeoResilience è costituito dalla sovrapposizione spaziale tra le mappe delle CoS e degli *hazard*, arricchita dalle pesature ricavate dalla matrice di correlazione. In termini operativi, per ogni cella vengono considerate tutte le possibili combinazioni tra indicatori di condizione e indicatori di pericolo. Per ciascuna coppia, il valore del primo viene moltiplicato per quello del secondo e il prodotto così ottenuto è ulteriormente ponderato attraverso il coefficiente di relazione presente nella matrice (Brunetta, et al., 2025). L'idea di fondo è che la vulnerabilità non dipenda solo dall'intensità dei fattori di disturbo, ma anche da come questi interagiscono con le condizioni proprie del sistema in un dato momento e in un determinato luogo. L'indice di vulnerabilità di ogni cella deriva dalla somma complessiva di questi prodotti ponderati, che restituiscono un valore numerico in grado di rappresentare l'intensità cumulativa della vulnerabilità nella porzione di territorio considerata. Questo valore non equivale a una semplice media o a una somma aritmetica dei fattori, ma incorpora sia la presenza effettiva delle condizioni e delle minacce sia il grado di interazione fra di esse, definito attraverso la valutazione esperta riportata nella matrice (Brunetta, et al., 2025).

			HAZARD				
			Trends		Events		
			T1	T2	E1	E2	E3
CONDITIONS OF THE SYSTEM	CoSA	A1	0.20	0.80	0.27	0.67	0.20
		A2	0.07	0.73	0.67	0.67	0.07
		A3	0.40	0.53	0.33	0.20	0.00
	CoSB	B1	0.80	0.87	0.20	0.33	0.00
		B2	0.93	0.40	0.13	0.40	0.07
		B3	0.67	0.13	0.20	0.33	0.07
	CoSC	C1	0.80	0.87	0.33	0.40	0.13
		C2	0.80	0.13	0.27	0.27	0.13
		C3	0.93	0.13	0.27	0.27	0.13

Tabella 5 - Esempio di matrice con valori normalizzati 0 - 1. Elaborazione propria.

Per questa fase del processo, viene utilizzata una metodologia partecipativa, coinvolgendo un team di ricercatori partecipanti al progetto, a cui viene chiesto di compilare una versione interattiva della matrice, valutando il grado di relazione tra ciascun indicatore utilizzando una scala ordinale di tipo Likert (Beltramino, et al., 2022). Dopo aver raccolto i diversi contributi, è stata calcolata la media delle valutazioni, normalizzata e riportata in modo interattivo sulla matrice. La matrice ponderata è stata prioritizzata e le celle sono state colorate in base alla loro

correlazione. Un valore vicino a 0 indica l'assenza di relazione tra gli indicatori confrontati (celle verdi); al contrario, più il peso è vicino a 1, più gli indicatori sono correlati tra loro (celle tendenti al rosso).

L'intero processo è sostenuto da un framework matematico, che consente di tradurre in forma quantitativa e replicabile le relazioni tra condizioni territoriali e minacce esterne. Tale struttura poggia sull'integrazione di tre componenti principali: le condizioni del sistema (CoS), *trends* e *events (hazard)*, e i pesi di correlazione derivati dalla matrice valutativa.

Il primo passaggio riguarda il calcolo dell'indice di pressione (*Index of Pressure*, IPR), che misura come le pressioni incidono sugli elementi di sensibilità del sistema. Per ciascun componente (A, B e C), l'indice viene calcolato come somma pesata dei prodotti tra gli indicatori di *hazard* e CoS, tenendo conto della forza della relazione che li lega e di eventuali effetti temporali. Per ciascuna coppia viene calcolato il prodotto dei due valori, che aumenta tanto più la pressione o la sensibilità risultano elevate. Questo prodotto viene poi moltiplicato per un coefficiente di relazione, derivato da una matrice valutativa, che quantifica la forza del legame tra quella specifica pressione e quella specifica sensibilità. In questo modo le interazioni più rilevanti hanno un peso maggiore nel risultato finale, mentre quelle deboli o assenti contribuiscono in misura minima o nulla. La somma complessiva di tutti questi termini viene normalizzata in modo da restituire un valore compreso tra 0 e 1, interpretabile come indice di vulnerabilità alle pressioni per la cella considerata.

$$I_{PR(A)} = \frac{1}{m_A n} \cdot \sum_{i=1}^{m_A} \sum_{j=1}^n K_{ij}(t) \cdot S_i \cdot b_{ij} \cdot PR_j$$

Dove: S_i è il valore dell'indicatore di *Conditions of the System* nella cella;

PR_j è il valore dell'indicatore di pressione;

b_{ij} è il coefficiente che rappresenta la forza della relazione tra CoS e pressione;

$K_{ij}(t)$ è un coefficiente temporale che può includere fattori di variazione (es. ciclicità, evoluzione nel tempo);

m_A e nt sono, rispettivamente, il numero di CoS e pressioni considerate, utilizzati per la normalizzazione.

Lo stesso procedimento è applicato per il calcolo dell'indice di vulnerabilità agli *hazard* (*Index of Hazard* - IHZ), con la differenza che in questo caso vengono considerate le interazioni tra *conditions of the system* e pericoli improvvisi (*hazards*). Anche in questa fase è possibile introdurre un coefficiente aggiuntivo che tiene conto della dimensione temporale o dell'influenza del cambiamento climatico, così da rappresentare meglio l'evoluzione dei rischi nel tempo.

$$I_{HZ(A)} = \frac{1}{m_A p} \cdot \sum_{i=1}^{m_A} \sum_{k=1}^p CC(t)_k \cdot S_i \cdot b_{ik} \cdot HZ_k$$

Dove: HZ_k è l'indicatore del *Hazards* nella cella;

b_{ik} è il peso della relazione tra CoS e pericolo;

$CC(t)_k$ è un coefficiente che rappresenta gli effetti del cambiamento climatico (posto pari a 1 nel caso applicativo);

m_A è il numero di CoS e p è il numero di *Hazards* considerati.

Gli indici calcolati per i singoli componenti vengono poi aggregati in indici sintetici di *trends* e *events* complessivi, utilizzando pesi β_w che permettono di attribuire maggiore o minore rilevanza a ciascun ambito. Le formule estese sono quindi:

$$I_{PR(A)} = \sum_{w=1}^W \frac{\beta_w}{m_w n} \cdot \sum_{i=1}^{m_w} \sum_{j=1}^n K_{ij}(t) \cdot S_i \cdot b_{ij} \cdot PR_j$$

$$I_{HZ} = \sum_{w=1}^W \frac{\beta_w}{m_w p} \cdot \sum_{i=1}^{m_w} \sum_{k=1}^p CC(t)_k \cdot S_i \cdot b_{ik} \cdot HZ_k$$

Infine, per ciascuna cella viene calcolato l'Indice di Vulnerabilità complessivo (IV), che rappresenta il risultato finale del framework, attraverso una media pesata tra *trends* ed *events*:

$$I_V = \alpha \cdot I_{PR} + (1 - \alpha) \cdot I_{HZ}$$

Il coefficiente α , compreso tra 0 e 1, regola l'importanza relativa attribuita a *trends* ed *events*. Questa formula consente di restituire una misura sintetica della vulnerabilità sistemica, frutto di tutte le interazioni tra struttura interna del territorio e stimoli esterni (Beltramino, et al., 2022).

L'approccio proposto da R3C si fonda su un sistema di relazioni incrociate tra CoS, *trends* ed *events*, in cui ogni interazione viene ponderata in funzione della sua importanza. Il risultato è un quadro analitico che restituisce, per ciascuna cella del territorio, un indice di vulnerabilità capace di rappresentare la complessità dei fenomeni e di renderla leggibile attraverso misure sintetiche e comparabili.

2.6.2 Implementazione operativa di R3C-GeoResilience

L'analisi congiunta di questi fattori ha portato allo sviluppo di un plug-in completo, capace di delineare scenari futuri sotto forma di mappe di vulnerabilità territoriale e di fornire a pianificatori, stakeholder e decisori pubblici strumenti conoscitivi utili alla definizione di politiche di adattamento e di transizione verso la resilienza. Il tool open-source R3C-GeoResilience, implementato come

estensione della piattaforma QGIS, realizzato in Python e sviluppato attraverso le librerie Qt. La sua efficacia è stata testata e validata mediante workshop di formazione, che hanno permesso di verificare sia la solidità metodologica dello strumento sia la sua applicabilità in contesti reali di pianificazione. Questo strumento traduce la valutazione della vulnerabilità in un ambiente operativo intuitivo e flessibile, pensato per essere utilizzato anche da non specialisti GIS. Lo strumento consente infatti di definire, aggiornare e gestire indicatori spaziali basati sulle specificità locali, di integrare progressivamente nuovi dataset e di restituire i risultati sotto forma di mappe di vulnerabilità facilmente leggibili. In questo modo, il plugin non solo agevola l'analisi tecnica, ma fornisce anche un supporto concreto ai processi decisionali, aiutando professionisti e amministratori a perfezionare la scelta degli indicatori e a sviluppare strategie di adattamento e resilienza radicate nelle caratteristiche del territorio. Il plugin consente la realizzazione di mappature tematiche place-based delle vulnerabilità territoriali complessive basate sulla precedente realizzazione di una matrice di correlazione. Questo output costituisce uno strumento fondamentale in grado di evidenziare le aree più esposte a rischi ed a fragilità sistemiche (Mohabat Doost, Pincegher, Garnero, Pellerey, & Brunetta, 2025).

La fase metodologica preliminare è la costruzione di un ricco dataset spazializzato, che viene successivamente modificato tramite elaborazioni con QGIS; così come è fondamentale la definizione dell'area di studio. A questo processo si affianca la creazione dei layer, ognuno dei quali corrisponde a un indicatore scelto tra quelli considerati più rilevanti per l'analisi. Questi vengono organizzati in base alla loro funzione analitica, ovvero se si parla di condizioni intrinseche del sistema o di eventi cronici o improvvisi. La costruzione di questi layer avviene trasformando i dati, e garantendo che l'informazione a loro riferita sia distribuita sull'intero territorio. Successivamente, viene creata una griglia con celle di dimensione variabile in base al contesto territoriale (200x200, 500x500, ecc.), che costituisce l'unità minima di analisi. Con l'operazione di *zonal statistic*, i valori medi vengono trasferiti nelle celle della griglia, generando un layer vettoriale standardizzato. Si prosegue quindi con una normalizzazione dei dati ottenuti nella griglia, passaggio essenziale per rendere possibile un confronto. La normalizzazione si esegue su una scala tra 0 e 1, dove 0 rappresenta il valore minimo e 1 il massimo all'interno del dataset.

Altro elemento fondamentale è la costruzione in Excel della matrice delle vulnerabilità, che raccoglie tutte le informazioni descrittive e semantiche degli indicatori. All'interno della matrice, è necessario effettuare una ponderazione differenziata, attribuendo a ciascun indicatore un peso specifico in base alla rilevanza delle sue correlazioni, attraverso un approccio partecipativo. I punteggi raccolti vengono infine aggregati per calcolare le medie ponderate e successivamente normalizzati.

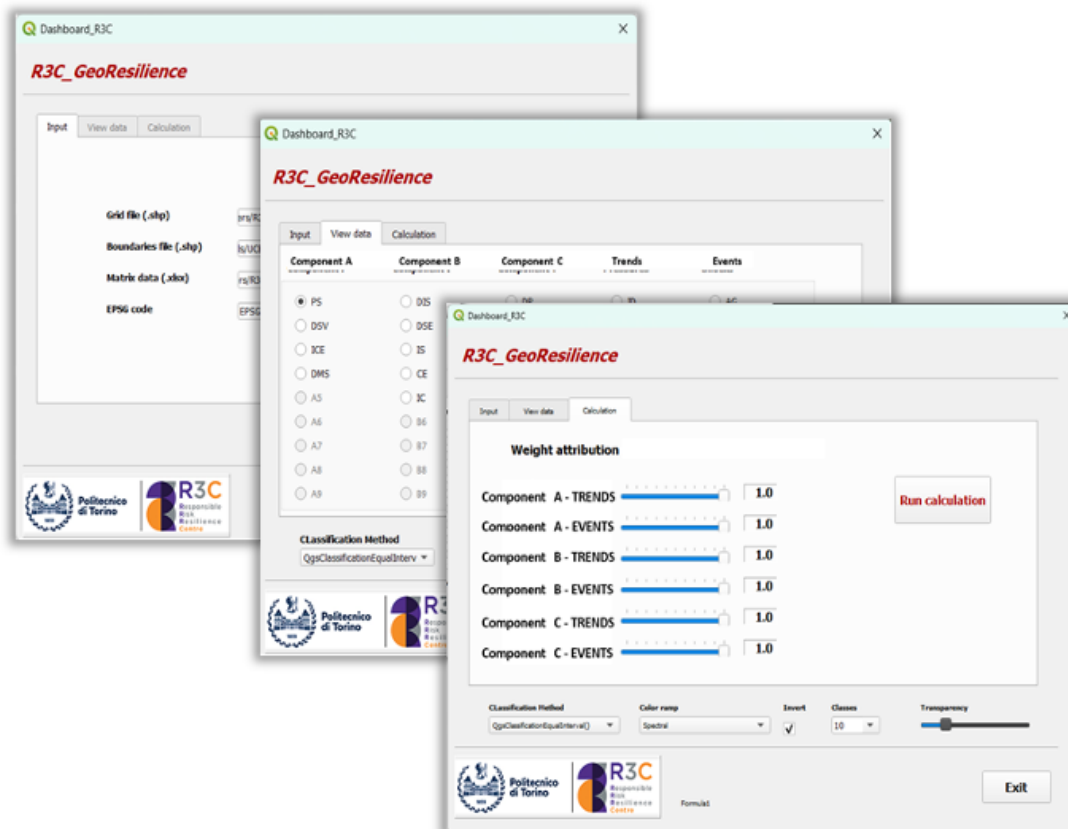


Figura 7 - Visualizzazione delle tre finestre principali del plugin R3C-GeoResilience. Dall'alto verso il basso: la prima scheda viene utilizzata per inserire i dati di input; la seconda scheda consente la visualizzazione delle singole mappe che rappresentano ciascun componente delle condizioni, tendenze ed eventi del sistema; la terza scheda mostra la mappa finale della vulnerabilità dopo aver cliccato sul pulsante 'Esegui Calcolo'. Tratta da (Brunetta, et al., 2025).

03

CONFRONTO DEI PARADIGMI E DEGLI APPROCCI ALLA VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ

Nell'ambito della sicurezza e della gestione del rischio, l'analisi della vulnerabilità rappresenta uno strumento fondamentale per identificare e comprendere le debolezze di sistemi, infrastrutture o processi. La capacità di individuare in maniera preventiva i punti critici consente infatti di pianificare misure di protezione e mitigazione più efficaci, riducendo la probabilità che minacce o eventi imprevisti possano tradursi in conseguenze gravi. In un contesto caratterizzato da crescente complessità e interconnessione, come quello delle infrastrutture tecnologiche e organizzative, la valutazione delle vulnerabilità assume un ruolo ancora più centrale, costituendo il punto di partenza per qualsiasi strategia di resilienza. Tuttavia, le metodologie disponibili per condurre tale analisi sono numerose e si differenziano sensibilmente per approccio, livello di dettaglio e finalità applicativa. Alcune si concentrano su aspetti quantitativi, mirando a tradurre il rischio in valori numerici attraverso indicatori, metriche e calcoli probabilistici. Questo tipo di approccio ha il vantaggio di fornire risultati oggettivi e comparabili, utili soprattutto quando si devono giustificare decisioni in contesti normativi o in ambienti caratterizzati da elevata formalizzazione dei processi decisionali. Altre metodologie, invece, adottano un'impostazione qualitativa, facendo leva sull'esperienza e sulla conoscenza degli esperti per valutare la gravità delle vulnerabilità e la loro rilevanza rispetto al contesto di riferimento. Pur rinunciando a una misurazione precisa, queste modalità consentono di cogliere aspetti più sfumati, difficilmente traducibili in dati numerici, e si rivelano spesso più flessibili e adattabili a situazioni nuove o poco strutturate.

La scelta della metodologia più appropriata dipende quindi da una pluralità di fattori: non solo dal contesto di applicazione, ma anche dagli obiettivi che si intendono perseguire e dalle risorse che possono essere effettivamente impiegate. In questo senso, non esiste una soluzione universalmente valida, ma

piuttosto un insieme di strumenti che devono essere selezionati e adattati in funzione delle esigenze specifiche. Per tale motivo, l'analisi comparativa delle diverse metodologie costituisce un passaggio necessario per acquisire consapevolezza dei criteri che guidano la scelta e per comprendere i limiti intrinseci di ciascun approccio. Il confronto non ha come scopo esclusivo quello di individuare la metodologia "migliore" in termini assoluti, ma piuttosto di mettere in evidenza i punti di forza e di debolezza dei vari approcci, così da delinearne i possibili ambiti di applicazione. Questo permette di costruire una cornice critica entro la quale collocare la metodologia che sarà effettivamente utilizzata nella seconda parte della tesi. In questo senso, la comparazione non va intesa come un esercizio isolato, ma come un passaggio propedeutico all'analisi sviluppata nella seconda parte dell'elaborato. Essa costituisce infatti una base di riferimento utile per interpretare in maniera più consapevole l'applicazione concreta della metodologia adottata. Anche se la scelta finale non è derivata direttamente dal confronto, l'analisi comparativa consente di comprenderne meglio la collocazione all'interno del panorama metodologico e di evidenziare le ragioni per cui essa può risultare adeguata agli obiettivi della ricerca. Alla luce di queste considerazioni, la sezione che segue propone una tabella di sintesi nella quale vengono messi a confronto gli elementi principali delle metodologie analizzate. Lo scopo è quello di fornire una rappresentazione chiara e immediata delle differenze tra i vari approcci, facilitando così la comprensione critica dei criteri che guidano la loro applicazione e il ruolo che possono svolgere nella gestione delle vulnerabilità.

Descrizione metodologia			Dimen- sione spaziale	Mappatura	Livello spaziale di analisi	Rischio
2	SoVI	Tiene conto di fattori sociodemografici ed ambientali per valutare il livello di esposizione di una popolazione e quale sia la capacità di reagire ad eventi avversi, come disastri naturali o emergenze sanitarie.	Si	Si	NUTS 3	Multiris- chio
2	JRC	Valuta la vulnerabilità e la resilienza dei territori attraverso indicatori socioeconomici, ambientali ed infrastrutturali, con un approccio multirischio comparativo, con l’obiettivo di supportare le politiche di gestione integrata del rischio e di adattamento climatico del paese considerato.	Si	Si	Nuts0 (livello di stato membro UE)	Multiris- chio

3	WorldRiskIndex	Indice realizzato per misurare il rischio di disastri naturali a livello globale combinando quattro dimensioni: esposizione, suscettibilità, capacità di coping e capacità di adattamento. Fornisce una classifica annuale dei Paesi, evidenziando quanto siano vulnerabili e preparati ad affrontare eventi estremi.	Si	Si	NUTS 0	Multirischio
4	HAZUS	Software sviluppato per utilizzare i sistemi GIS con il fine di stimare le potenziali perdite economiche, fisiche e sociali causate da disastri naturali come terremoti, inondazioni e uragani. Permette di valutare danni ad edifici, infrastrutture e popolazione, supportando la pianificazione della mitigazione dei rischi e la gestione delle emergenze.	Si	Si	NUTS 2	Multirischio (ma dipende dalla versione)
5	BRN	Programma nato per rafforzare la resilienza delle comunità attraverso il potenziamento dei legami sociali e la promozione di azioni collettive. Supporta i residenti nell'organizzare iniziative che migliorano le relazioni interpersonali, stimolano l'economia locale e aumentano l'autosufficienza delle comunità.	No	No	LAU (livello di quartiere o addirittura di via)	Non multirischio
6	R3C	Si fonda su un'analisi integrata delle vulnerabilità territoriali attraverso la realizzazione di processi partecipativi. Finalizzata per progettare strategie resilienti attraverso strumenti operativi, formazione specialistica e tecnologie GIS applicative.	Si	Si	LAU1	Multirischio

Tabella 6 - Comparazione delle diverse metodologie analizzate nel capitolo precedente con distinzione tra le differenti scale e modalità di analisi del rischio. Elaborazione propria.

Dalla comparazione delle diverse metodologie emerge chiaramente come ciascun approccio presenti caratteristiche distintive in termini di scala di analisi, strumenti impiegati e focus sul rischio. Alcune metodologie, come JRC, SoVI e WorldRiskIndex, operano su livelli nazionali o sovranazionali, privilegiando indicatori quantitativi e multirischio, utili per supportare politiche di gestione integrata e decisioni basate su dati oggettivi. Al contrario, approcci come BRN o R3C si concentrano su scale locali, enfatizzando la partecipazione della comunità e la valutazione qualitativa delle vulnerabilità, risultando più flessibili e sensibili

alle dinamiche territoriali e sociali. HAZUS, infine, rappresenta un caso intermedio, combinando analisi GIS e stime quantitative a livello regionale, con possibilità di adattamento in base al tipo di rischio considerato. Questa varietà di strumenti evidenzia come la scelta della metodologia più appropriata debba essere guidata non solo dagli obiettivi della valutazione, ma anche dalle caratteristiche del contesto e dalle risorse disponibili.

Nella seconda parte di questo elaborato, una di queste metodologie sarà selezionata ed applicata ad un caso studio concreto, permettendo di verificare sul campo la sua efficacia e di illustrare in maniera pratica come i principi teorici e le differenze metodologiche analizzate fino a questo punto si traducano in risultati operativi e utili per la gestione delle vulnerabilità.

2

E

T

R

A

P

**APPLICAZIONE DELLA
METODOLOGIA
R3C-GEORESILIENCE
PER IL CONTESTO
TERRITORIALE DELLA
CITTÀ METROPOLITANA
DI MILANO**

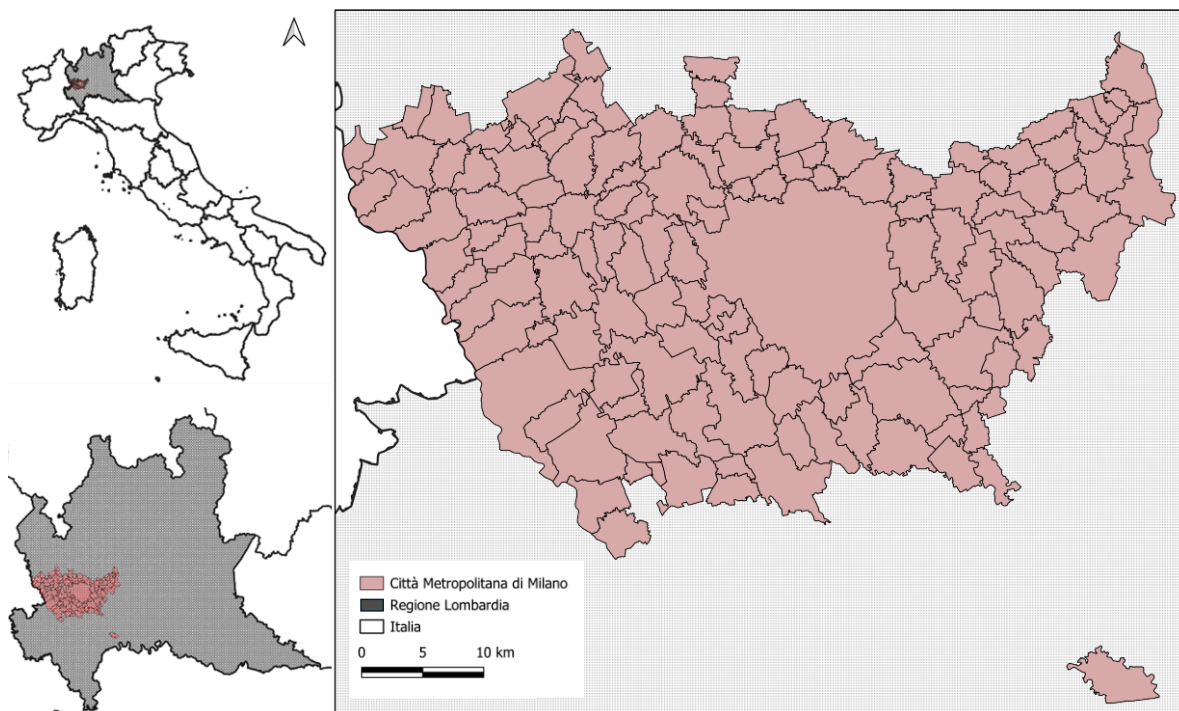
04

LA CITTÀ METROPOLITANA DI MILANO COME CASO STUDIO

La scelta di analizzare la Città Metropolitana di Milano come caso studio si inserisce all'interno di un percorso di ricerca che collega il tema generale della vulnerabilità territoriale con le recenti esperienze maturate dalle città resilienti a livello internazionale. Milano, infatti, è stata inclusa nel network delle 100 Resilient Cities promosso dalla Rockefeller Foundation nel 2019, elaborando un Piano di Resilienza volto a delineare strategie e indirizzi di lungo periodo. Tuttavia, tale strumento ha prevalentemente carattere programmatico e non fornisce indicazioni operative per la misurazione e la localizzazione delle vulnerabilità urbane (CMMi, 2025). In questo contesto, la scala metropolitana rappresenta un campo di indagine particolarmente significativo. Le vulnerabilità territoriali, infatti, raramente si arrestano ai confini amministrativi del Comune di Milano: fenomeni quali il rischio idrogeologico, le pressioni ambientali, le disuguaglianze socioeconomiche e la distribuzione delle infrastrutture critiche assumono una dimensione che riguarda l'intero sistema metropolitano. L'estensione dell'analisi alla Città Metropolitana di Milano consente quindi di cogliere la complessità delle dinamiche territoriali, offrendo una visione più ampia e sistemica. L'attività di mappatura delle vulnerabilità su scala metropolitana si configura così come un passaggio necessario per rendere "operativa" la resilienza: se il Piano di Resilienza del Comune definisce il quadro strategico, l'analisi proposta in questa tesi mira a individuare in modo puntuale e localizzato le fragilità del territorio, contribuendo a trasformare la resilienza da principio astratto a strumento pratico di supporto alle politiche territoriali.

4.1 Inquadramento del contesto metropolitano

Il territorio in analisi necessita quindi di una introduzione, in quanto rientra in un ambito metropolitano che richiede una lettura preliminare del quadro geografico, amministrativo e funzionale di riferimento. La Città Metropolitana di



Milano è collocata nella parte occidentale della Lombardia, in una posizione strategica all'interno della Pianura Padana e lungo uno dei principali assi di connessione tra l'Italia settentrionale e l'Europa continentale. Il suo territorio confina a nord con le province di Monza e Brianza, Como, Lecco e Varese, a est

Figura 8 - Inquadramento territoriale Città Metropolitana di Milano. Elaborazione propria.

con la provincia di Bergamo, a sud con quelle di Lodi e Pavia e a ovest con la provincia di Novara, in Piemonte. Questa collocazione ne fa un ambito di cerniera tra sistemi territoriali diversi, fortemente interconnessi dal punto di vista economico, infrastrutturale e insediativo. Dal 2015 la Città Metropolitana ha sostituito la Provincia di Milano, assumendo funzioni di coordinamento sovracomunale in materia di pianificazione territoriale, mobilità, tutela ambientale e sviluppo socioeconomico, secondo quanto stabilito dalla Legge Delrio (2014)

Il territorio metropolitano si estende per circa 1.575 chilometri quadrati e comprende 133 comuni, con Milano nel ruolo di capoluogo e principale polo urbano. La popolazione supera i 3,2 milioni di abitanti, configurando l'area come la più popolosa del Paese. Dal punto di vista fisico e morfologico, l'area si presenta prevalentemente pianeggiante, con lievi ondulazioni nella fascia settentrionale riconducibili all'alta pianura e superfici più uniformi e alluvionali nella parte meridionale, tipiche della bassa pianura irrigua. Il territorio è attraversato da importanti corsi d'acqua, tra cui il Ticino, l'Adda, il Lambro e l'Olona, ed è caratterizzato da una storica e capillare rete di canali artificiali, come il Naviglio Grande, il Naviglio Pavese e la Martesana, che hanno svolto un ruolo fondamentale nello sviluppo agricolo e urbano dell'area. A sud del capoluogo si estendono ampie superfici agricole, in gran parte tutelate dal Parco Agricolo Sud

Milano, mentre ai margini occidentali e orientali si collocano importanti aree protette come il Parco del Ticino e il Parco Adda Nord. L'assetto insediativo è contraddistinto da un'elevata urbanizzazione e da una forte continuità edificata tra il capoluogo e numerosi comuni dell'hinterland, soprattutto nelle fasce settentrionali ed orientali, dove prevalgono tessuti residenziali e produttivi ad alta densità. Al contrario, la porzione meridionale conserva una struttura territoriale maggiormente agricola, con una minore pressione insediativa e una più netta distinzione tra centri urbani e spazi rurali. L'intero sistema è supportato da una rete infrastrutturale di rilevanza nazionale, costituita da autostrade, tangenziali e linee ferroviarie che fanno di Milano uno dei principali nodi logistici del Paese, oltre alla presenza degli aeroporti di Linate e Malpensa, quest'ultimo collocato nell'area metropolitana allargata. Nel suo insieme, la Città Metropolitana di Milano svolge un ruolo di primo piano a scala regionale, nazionale ed europea, esercitando una forte capacità di attrazione e polarizzazione. Il territorio si configura come un sistema complesso e articolato, in cui funzioni urbane avanzate, aree produttive, spazi agricoli e corridoi ecologici convivono e si intrecciano, richiedendo politiche di governo del territorio orientate all'equilibrio tra sviluppo, sostenibilità ambientale e qualità insediativa.

In coerenza con il ruolo di ente di area vasta, la Città Metropolitana di Milano (CMMi) esercita le proprie funzioni attraverso il Piano Territoriale Metropolitano (PTM), che definisce dal 2021, gli indirizzi per l'assetto insediativo, la tutela ambientale, il sistema infrastrutturale e le politiche di contenimento del consumo di suolo, ponendosi come quadro di riferimento per creare le condizioni e predisporre strumenti necessari per concretizzare le strategie metropolitane e coordinare l'azione della pianificazione comunale sui temi territoriali di area vasta (CMMi, 2021). Questo strumento è previsto dalla Legge 56/2014 come strumento per governare il sistema territoriale metropolitano, molto più complesso, interrelato e integrato nelle sue componenti rispetto ai sistemi provinciali. Allo stesso tempo aggiorna gli strumenti per il coordinamento degli aspetti sovracomunali, per tenere conto delle profonde modifiche introdotte nella natura degli organi istituzionali e nell'organizzazione del livello intermedio di governo. Alcuni elementi innovati portati da questo strumento sono la definizione di norme tese a disciplinare il tema delle emergenze ambientali e della vulnerabilità del territorio e dei sistemi urbani, le previsioni che recepiscono e contestualizzano alla scala metropolitana gli obiettivi dell'Agenda. Altro aspetto estremamente importante è l'introduzione di azioni di adattamento del territorio che puntano a incrementare la resilienza più che a potenziare le mitigazioni in risposta agli effetti dei cambiamenti climatici, muovendosi verso la riduzione dei consumi energetici da fonti non rinnovabili, contenendo il consumo di risorsa idrica attraverso il riuso delle acque meteoriche, introducendo corridoi verdi di mitigazione dell'isola di calore ed altre azioni di quel tipo. A tal proposito, il PTM prevede anche progetti

di rete verde metropolitana, intesa non solo come estensione agli aspetti fruitivi e paesaggistici della rete ecologica, ma identificata quale progetto di lungo termine per garantire l'integrità e la continuità degli spazi non costruiti di fondamentale importanza in un territorio densamente urbanizzato come quello metropolitano. Uno dei temi centrali affrontati dal PTM riguarda il governo delle trasformazioni insediative e il contenimento del consumo di suolo, considerato una risorsa limitata e strategica in un contesto fortemente urbanizzato come quello metropolitano milanese. Il piano promuove un modello di sviluppo orientato alla rigenerazione e al riuso del patrimonio edilizio esistente, incentivando il recupero delle aree dismesse e sottoutilizzate e scoraggiando l'espansione insediativa su suoli agricoli e naturali. Tale impostazione si inserisce in una più ampia riflessione sulla qualità dell'abitare e sulla necessità di riequilibrare il rapporto tra spazi costruiti e spazi aperti, riconoscendo a questi ultimi un ruolo fondamentale non solo dal punto di vista ambientale, ma anche sociale, economico e paesaggistico. Parallelamente, il PTM attribuisce grande rilevanza alla tutela e alla valorizzazione del sistema ambientale e paesaggistico, inteso come infrastruttura fondamentale per la sostenibilità del territorio metropolitano. Il piano rafforza il ruolo dei grandi sistemi verdi e agricoli, dei parchi regionali e delle aree protette, promuovendo la continuità ecologica e la connessione tra ambiti naturali, agricoli e urbani. In questo quadro, la rete verde metropolitana assume una valenza strategica come progetto di lungo periodo volto a garantire l'integrità degli spazi non edificati, a migliorare la qualità ambientale e a contribuire alla mitigazione degli effetti dei cambiamenti climatici, in particolare attraverso la riduzione dell'isola di calore urbana, il miglioramento della permeabilità dei suoli e la regolazione dei cicli idrologici. Il tema della mobilità e delle infrastrutture rappresenta un ulteriore ambito di intervento prioritario del PTM, che mira a promuovere un sistema di trasporti integrato, sostenibile e accessibile a scala metropolitana. Il piano riconosce il ruolo di Milano come nodo infrastrutturale di rilevanza nazionale ed europea, ma allo stesso tempo evidenzia la necessità di riequilibrare il sistema della mobilità, riducendo la dipendenza dal trasporto privato su gomma e incentivando il trasporto pubblico, la mobilità dolce e le connessioni intermodali. In questa prospettiva, le infrastrutture non sono considerate esclusivamente come elementi tecnici, ma come componenti strutturanti del territorio, capaci di influenzare l'assetto insediativo, l'accessibilità ai servizi e le condizioni di equità territoriale. Un aspetto particolarmente innovativo del PTM del 2021 riguarda l'attenzione dedicata ai temi della resilienza territoriale, dell'adattamento ai cambiamenti climatici e della gestione delle vulnerabilità ambientali e urbane. Il piano recepisce e declina a scala metropolitana gli obiettivi dell'Agenda 2030 e i principi della Carta di Bologna, introducendo indirizzi e criteri orientati alla prevenzione dei rischi, alla riduzione delle fragilità e al rafforzamento della

capacità del territorio di rispondere a eventi estremi. In questo quadro, assumono rilievo le politiche legate alla gestione sostenibile delle risorse idriche, al riuso delle acque meteoriche, alla riduzione dei consumi energetici e alla promozione di fonti rinnovabili, nonché le azioni volte a migliorare la sicurezza idraulica e a mitigare il rischio idrogeologico lungo i principali corsi d'acqua e nei contesti più esposti. Infine, il PTM pone una forte enfasi sulla dimensione socioeconomica dello sviluppo territoriale, riconoscendo la necessità di affrontare le disuguaglianze spaziali e sociali che caratterizzano l'area metropolitana. Il piano promuove una visione policentrica del territorio, volta a rafforzare i comuni dell'hinterland e a valorizzare le specificità locali, contrastando i fenomeni di polarizzazione e marginalizzazione. In questo senso, la pianificazione metropolitana diventa uno strumento fondamentale per favorire una maggiore coesione territoriale, migliorare l'accesso ai servizi e sostenere uno sviluppo più equo e sostenibile. Nel complesso, il Piano Territoriale Metropolitano del 2021 si configura come uno strumento avanzato e articolato, capace di affrontare la complessità del sistema metropolitano milanese attraverso una visione integrata delle diverse componenti territoriali. La sua impostazione strategica e la centralità attribuita ai temi della sostenibilità, della resilienza e della riduzione delle vulnerabilità ne fanno un riferimento essenziale per l'analisi proposta in questa tesi, offrendo il quadro entro cui collocare la mappatura e la lettura critica delle fragilità territoriali a scala metropolitana (CMMi, 2021).

05

MAPPATURA DELLE VULNERABILITÀ IN CMMI TRAMITE L'APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA R3C-GEORESILIENCE

La scelta della Città Metropolitana di Milano come ambito di studio per l'analisi delle vulnerabilità territoriali si fonda sulla volontà di confrontarsi con un contesto caratterizzato da elevata complessità spaziale, funzionale e socioeconomica, nonché da una pluralità di fattori di rischio interagenti. Tale complessità rende il territorio metropolitano un caso di studio particolarmente significativo per la sperimentazione di approcci metodologici avanzati orientati alla lettura sistemica del rischio e della resilienza. In questo quadro si colloca l'applicazione sperimentale della metodologia sviluppata dal Centro Interdipartimentale Responsible Risk Research Centre del Politecnico di Torino, che come già spiegato nella prima parte è stata usata fino ad ora per una applicazione in contesti territoriali e urbani a scale limitate. L'estensione di tale approccio alla Città Metropolitana di Milano rappresenta pertanto un contributo originale, sia sul piano applicativo sia su quello metodologico. Il territorio metropolitano milanese presenta infatti una combinazione di elementi che ne accrescono l'interesse analitico: un'elevata densità insediativa, un sistema infrastrutturale fortemente interconnesso, una significativa eterogeneità socio-territoriale e una pluralità di pressioni ambientali e antropiche. Queste caratteristiche rendono particolarmente rilevante un approccio in grado di cogliere le interdipendenze tra sistemi territoriali, le differenze di esposizione agli hazards e le variabili che concorrono a determinare condizioni di vulnerabilità differenziate all'interno dello stesso ambito metropolitano.

L'applicazione della metodologia R3C a questo contesto assume quindi un duplice valore. Da un lato, consente di restituire una lettura articolata delle vulnerabilità territoriali della Città Metropolitana di Milano; dall'altro, permette di testare la capacità della metodologia di adattarsi a una scala territoriale complessa, verificandone la flessibilità nella selezione degli indicatori e nella costruzione del quadro conoscitivo. Il territorio non viene pertanto considerato come semplice supporto applicativo, ma diventa parte integrante del processo di

riflessione metodologica, contribuendo ad evidenziare potenzialità e limiti dell'approccio R3C quando applicato a sistemi multi-scalari.

5.1 Selezione degli indicatori

In continuità con quanto esposto nella sezione precedente in relazione alla metodologia adottata, la fase preliminare dell'analisi ha riguardato la definizione degli indicatori, elemento cardine dell'intero processo valutativo. Tali indicatori sono stati ricondotti alle dimensioni di *conditions of the system* e *hazards*, articolate nelle componenti di *trends* ed *events*, in coerenza con il quadro metodologico di riferimento.

Non è stato tuttavia previsto un processo strutturato di coinvolgimento di esperti o stakeholder di settore finalizzato all'attribuzione di pesi differenziati agli indicatori. Di conseguenza, in questo elaborato, è stato assegnato a ciascun indicatore un valore uniforme, che implicando che tutti gli elementi considerati, sia quelli di *conditions of the system* sia quelli relativi a *trends* ed *events*, siano valutati sullo stesso piano in termini di capacità di incidere sul territorio, indipendentemente dalla diversa intensità o temporalità degli impatti. L'applicazione di tale impostazione ha condotto alla definizione dell'insieme di indicatori riportato nelle tabelle successive, nelle quali per ciascuno sono specificati la descrizione, le caratteristiche principali e le fonti dei dati utilizzate.

5.1.1 Indicatori di Conditions Of The System

La tabella che segue, riporta gli indicatori delle *conditions of the system* che, in conformità con il quadro metodologico adottato, sono organizzati in tre macrocategorie permettendo così la realizzazione di una base solida per la valutazione delle diverse vulnerabilità territoriali della CMMi: *Natural environment and landscape* (CoS A), *Built environment, cultural heritage and infrastructure* (CoS B) ed *Economy and Society* (CoS C).

CONDITIONS OF THE SYSTEM				
Indicatore		Descrizione e metodo	Unità di misura	Fonte
A1	Permeabilità del suolo (PSuolo)	Per la realizzazione grafica rappresentativa delle aree permeabili, si è partiti dalla classificazione del consumo di suolo nazionale realizzata da ISPRA nel 2023, selezionando solo l'area della Città Metropolitana di Milano. In generale, all'interno di questa classificazione si trovano superfici completamente impermeabilizzate, come quelle occupate in modo permanente da edifici,	Indice normalizzato	ISPRA, Consumo del suolo, 2023

		infrastrutture, insieme a superfici a consumo reversibile, che possono recuperare permeabilità tramite interventi di ripristino. Esistono poi superfici a permeabilità parziale, come strade non pavimentate, che consentono una certa capacità di infiltrazione. Infine, il suolo non consumato comprende superfici agricole e coltivate, aree naturali con boschi e vegetazione spontanea, zone umide e corsi d'acqua, caratterizzate da un'elevata permeabilità naturale. Per la mappa sono state selezionate tutte le classi della carta ISPRA che permettono l'infiltrazione, includendo aree naturali, agricole e verdi urbane non impermeabilizzate, mentre sono state escluse tutte le superfici impermeabili. Ad ognuna di queste è stato assegnato un valore da 0 a 1, dove il valore minore equivale alle aree con minore presenza di suolo impermeabile mentre il valore maggiore rappresenta le aree fortemente urbanizzate.		
A2	Funzionalità ecologica (FunEco)	Per la realizzazione dell'analisi dell'indicatore sulla funzionalità ecologica è stato utilizzato il dataset DUSAF7 fornito dal Geoportale della Regione Lombardia. Questo fornisce una divisione dettagliata delle classi di uso e della copertura del suolo, le quali sono state riclassificate in funzione della loro funzionalità ecologica, distinguendo aree ad elevata o bassa funzionalità. La riclassificazione è stata condotta sulla base dei principi dell'ecologia del paesaggio, facendo riferimento al contributo teorico di Vittorio Ingegnoli, che definisce la funzionalità ecologica del territorio in relazione alla capacità dei	Indice ecologico adimensionale	Geoportale Lombardia, Uso e copertura del suolo, 2021; (Ingegnoli, 1993)

	diversi ecosistemi di sostenere processi ecologici, biodiversità e livelli di naturalità. In questo quadro, sono stati assegnati valori differenti alle diverse classi che strutturano il file DUSAF7. Tessuto residenziale denso, discontinuo e sparso, cascine, insediamenti industriali, artigianali, commerciali, cave, impianti tecnologici e di servizi pubblici e privati, insediamenti produttivi agricoli, insediamenti ospedalieri, cimiteri, aree militari obliterate, impianti fotovoltaici a terra, reti stradali e spazi accessori, discariche, reti ferroviarie e spazi accessori, aree degradate non utilizzate e non vegetate, impianti sportivi, campeggi e strutture turistiche e ricettive, parchi divertimento, alvei fluviali e corsi d'acqua artificiali, bacini idrici artificiali o interessati da attività estrattive a livello di falda con valore attribuito uguale a 0, ovvero con funzionalità ecologica nulla. Colture estensive, Bacini d'acqua, Sistemi colturali e particellari complessi. Parchi e giardini, aree verdi incolte, seminativi arborati e semplici, colture orticole a pieno campo e colture protette, colture floro-vivaistiche a pieno campo e protette, orti familiari, risaie, spiagge, dune ed alvei ghiaiosi a cui viene attribuito un valore di 0.25. Vigneti, frutteti e frutti minori, pioppeti ed altre legnose agrarie a cui viene qui attribuito un valore pari a 0.50. Prati permanenti in assenza di specie arboree ed arbustive o con presenza di specie arboree ed arbustive sparse, boschi di latifoglie a densità bassa governati a ceduo ed ad alto fusto, rimboschimenti recenti e cespuglieti in aree di agricole		
--	---	--	--

		abbandonate a cui viene attribuito il valore di 0.75. Boschi di latifoglie a densità media e alta governati a ceduo ed ad alto fusto, formazioni ripariali, boschi conifere a densità media e alta, boschi misti a densità media e alta governati a ceduo ed ad alto fusto, praterie naturali d'alta quota con assenza di specie arboree ed arbustive, vegetazione dei greti, cespuglieti e con anche la presenza significativa di specie arbustive alte ed arboree, vegetazione delle aree umide interne e delle torbiere, bacini idrici naturali a cui viene attribuito un valore maggiore equivalente ad 1, ovvero ad alta funzionalità ecologica. Questo approccio ha consentito di ottenere una rappresentazione spaziale della funzionalità ecologica del territorio più articolata rispetto a una semplice distinzione tra aree naturali e artificiali, permettendo di evidenziare i gradienti di naturalità e il ruolo differenziato delle diverse tipologie di uso del suolo all'interno del paesaggio.		
A3	Distribuzione delle aree verdi pubbliche (VerdeDis)	L'indicatore sulla distribuzione delle aree verdi pubbliche esprime la quota di superficie comunale occupata da spazi verdi attrezzati ed accessibili alla popolazione, quali parchi e giardini urbani pubblici. L'indicatore è finalizzato alla rappresentazione grafica della disponibilità di aree verdi fruibili considerando sia le aree individuate dalla classificazione DUSAF7 con parchi e giardini, sia i Parchi Locali di Interesse Sovracomunale (PLIS), come elementi rilevanti per il benessere ambientale e sociale della popolazione. La somma di questi due elementi porta ad una	%	Geoportale Lombardia, Uso e copertura del suolo, 2021 e Aree Protette, 2023

		rappresentazione realistica degli spazi verdi realmente accessibili alla popolazione.		
A4	Densità delle infrastrutture ciclabili (CInfDI)	Per la realizzazione della rappresentazione grafica dell'indicatore sulla densità dell'infrastruttura ciclabile a scala metropolitana sono stati utilizzati shapefile relativi al Piano Regionale della Mobilità Ciclistica (PRMC) della regione lombardia. L'utilizzo di tale dataset ha permesso di ottenere un quadro il più possibile completo e aggiornato della rete ciclabile esistente. Le reti ciclabili sono state unificate in un unico layer lineare rappresentativo dell'infrastruttura ciclabile complessiva, comprendendo piste ciclabili in sede propria ed itinerari ciclabili segnalati. Il risultato è una mappa che evidenzia la distribuzione e la concentrazione della rete ciclabile sul territorio, consentendo di individuare le aree caratterizzate da una maggiore dotazione infrastrutturale rispetto a quelle in cui la presenza di percorsi ciclabili risulta più scarsa o frammentata.	km/km ²	Geoportale Lombardia, Rete Ciclabile Piano Regionale della Mobilità Ciclistica (PRMC), 2014
B1	Età media del patrimonio edilizio (yEdif)	La rappresentazione grafica dell'indicatore sull'età media del patrimonio edilizio è stata realizzata a partire dalle informazioni censuarie del 2011 relative all'anno di costruzione degli edifici. Per permettere una valutazione corretta è stato scelto per ogni sezione di censimento il periodo di edificazione prevalente, così da permettere la realizzazione di una mappa su base censuale con una maggiore qualità nei dettagli. Quest'indicatore permette quindi di restituire una lettura spaziale del grado di vetustà del patrimonio edilizio, evidenziando le	Classi di costruzione	ISTAT, Censimento della popolazione, 2011

		differenze tra ambiti urbani caratterizzati da edificazione più recente e aree contraddistinte da tessuti edilizi storici o consolidati. Valori elevati dell'indicatore corrispondono a sezioni con un patrimonio edilizio mediamente più datato, mentre valori più bassi indicano una maggiore incidenza di edifici di recente costruzione.		
B2	Esposizione al rumore ambientale (InqAcus)	L'indicatore di esposizione all'inquinamento acustico rappresenta il livello di esposizione al rumore ambientale sul territorio, restituendo una misura sintetica dell'intensità del disturbo sonoro generato principalmente dalle infrastrutture di trasporto, dalle attività produttive e dalle funzioni urbane. La rappresentazione cartografica consente di visualizzare la distribuzione spaziale delle classificazioni dei livelli massimi di inquinamento acustico permesso nelle diverse aree della Città metropolitana di Milano secondo quanto espresso dalle linee guida della direttiva europea 2002/49/CE e del D.Lgs. 194/2005. Questa rappresentazione consente di visualizzare la distribuzione spaziale dei livelli di rumore e di individuare le aree maggiormente esposte rispetto a quelle caratterizzate da condizioni acustiche più favorevoli.	Decibel (dB)	Geoportale Lombardia, Attuazione classificazione acustica comunale, 2017
B3	Densità delle strutture sanitarie (HFDI)	La realizzazione grafica dell'indicatore sulla densità delle strutture sanitarie è realizzata usando i dati forniti in formato excel o cvs dal sito della Regione Lombardia. La rappresentazione cartografica è costruita a partire dalla localizzazione delle principali tipologie di infrastrutture sanitarie, quali ospedali,	n° strutture/ km ²	Regione Lombardia, Strutture sanitarie e sociosanitarie, 2021

		presidi sanitari, poliambulatori, strutture di pronto soccorso e servizi di base. Questo indicatore permette una rappresentazione spaziale della distribuzione di strutture sanitarie sul territorio e fornisce una misura sintetica della dotazione di servizi sanitari a scala urbana o metropolitana. L'obiettivo dell'indicatore è valutare il grado di copertura territoriale del sistema sanitario, evidenziando le differenze nella disponibilità dei servizi tra i diversi ambiti insediativi. L'indicatore consente di individuare aree caratterizzate da un'elevata concentrazione di servizi sanitari, coincidenti con i principali poli urbani, e ambiti periferici o marginali in cui la dotazione infrastrutturale risulta più limitata. In questo senso, la mappa restituisce una lettura spaziale delle potenziali disuguaglianze nell'accesso ai servizi sanitari, fornendo un supporto conoscitivo utile per l'analisi dell'equità territoriale.		
B4	Densità dei servizi educativi (ESDI)	L'indicatore sulla densità dei servizi educativi permette una rappresentazione chiara della distribuzione spaziale e della concentrazione di tali servizi, permettendo di comprendere la disponibilità e la copertura del sistema scolastico a scala urbana e metropolitana. L'indicatore è stato elaborato a partire dalla georeferenziazione degli istituti scolastici presenti sul territorio comprendendo sia scuole primarie che secondarie così come anche istituti universitari e Centri Territoriali Permanenti. Ciascuna tipologia di istituto è stato pesato in	n° strutture /Km ²	Geoportale Lombardia, scuole in Lombardia, 2017 e Ministero dell'Università e della ricerca, Atenei, 2013

		funzione della propria distribuzione sul territorio e del ruolo che riveste all'interno del sistema educativo, attribuendo un valore maggiore rispetto alle altre strutture alle sedi universitarie. Il risultato conclusivo evidenzia le aree caratterizzate da un'elevata concentrazione di servizi educativi, generalmente coincidenti con i principali centri urbani, e quelle in cui la dotazione risulta più rarefatta, tipicamente in ambiti periferici o a bassa densità insediativa.		
C1	Vulnerabilità demografica agli eventi (DVI)	L'indicatore di vulnerabilità demografica rappresenta il rapporto tra la popolazione considerata vulnerabile agli eventi, ovvero le persone con età minore di 5 anni e maggiore di 65, e la popolazione residente totale, fornendo una misura sintetica del grado di esposizione e fragilità demografica del territorio. L'obiettivo dell'indicatore è individuare gli le aree in cui una quota significativa di residenti presenta caratteristiche che possono amplificare gli effetti negativi di eventi avversi, quali rischi ambientali, climatici, sanitari o socioeconomici. Il valore dell'indicatore è espresso come rapporto ed è calcolato a livello di sezioni censimento basandosi sui dati censuali del 2011, consentendo una lettura spaziale delle differenze nella composizione demografica. Valori elevati dell'indicatore indicano una maggiore incidenza della popolazione vulnerabile rispetto al totale dei residenti e, di conseguenza, un più alto livello di criticità potenziale in caso di eventi estremi o situazioni di emergenza.	%	ISTAT, Censimento della popolazione, 2011

C2	Indice di dipendenza strutturale (SDI)	L'indicatore rappresentativo dell'indice di dipendenza strutturale misura il carico demografico esercitato dalla popolazione non attiva sulla popolazione in età lavorativa, fornendo una sintesi della struttura per età della popolazione e del potenziale equilibrio tra fasce produttive e non produttive. L'indicatore è calcolato sulla base dei dati censuari del 2011 a scala di sezione di censimento, come il rapporto tra la popolazione dipendente, generalmente costituita dalla somma dei residenti di età inferiore ai 15 anni e di quelli di età superiore ai 65 anni, e la popolazione in età attiva, compresa tra i 15 e i 64 anni. Il valore dell'indice esprime il numero di persone potenzialmente a carico per ogni individuo in età lavorativa ed è spesso rappresentato in forma percentuale o come rapporto. Valori elevati dell'indicatore indicano una maggiore incidenza delle fasce di popolazione dipendente, segnalando una struttura demografica caratterizzata da un più alto carico sociale ed economico a carico della popolazione attiva. Al contrario, valori più bassi riflettono una maggiore presenza di popolazione in età lavorativa e un potenziale equilibrio più favorevole tra le diverse classi di età. La rappresentazione spaziale dell'indice di dipendenza strutturale consente di evidenziare le differenze territoriali nella composizione demografica, mettendo in luce aree caratterizzate da invecchiamento della popolazione o da un'elevata presenza di popolazione giovane.	%	ISTAT, Censimento della popolazione, 2011
----	--	---	---	---

C3	Reddito medio (RedMed)	L'indicatore del reddito medio permette una rappresentazione spaziale del livello medio comunale delle risorse economiche percepite dalla popolazione residente. I dati sul reddito sono forniti dall'Agenzia delle Entrate e riguardano l'anno d'importa 2023, permettendo di fornire un'indicazione del potere economico della popolazione e della capacità di accesso ai beni e ai servizi, consentendo di evidenziare le differenze territoriali nelle condizioni di benessere materiale. Valori più elevati dell'indicatore sono associati ad aree caratterizzate da una maggiore disponibilità di risorse economiche, mentre valori più bassi indicano contesti con maggiori criticità socioeconomiche. La rappresentazione spaziale del reddito medio permette di individuare pattern di disuguaglianza economica e di concentrazione della ricchezza, spesso correlati alla struttura insediativa, alle dinamiche del mercato del lavoro e al livello di dotazione di servizi.	€/abitante	Agenzia delle Entrate, IRPEF, reddito comune, 2023
C4	Indice di pressione abitativa (FabbAb)	L'indice di pressione della domanda abitativa misura il livello di pressione esercitato dalla domanda di alloggi sul patrimonio residenziale disponibile, fornendo una valutazione sintetica dello squilibrio tra fabbisogno abitativo e offerta esistente in un determinato ambito territoriale. L'indicatore è finalizzato a individuare le aree in cui la richiesta di abitazioni risulta più elevata rispetto alla capacità del mercato e del sistema insediativo di rispondere in modo adeguato. L'indice di pressione della domanda abitativa è costruito a partire da un insieme di variabili	%	Regione Lombardia, Fabbisogno abitativo, 2021

		sociodemografiche e insediative selezionate in fase di predisposizione del dataset di base. La struttura dell'indicatore e la selezione delle variabili componenti erano già definite nel file Excel presente sul sito della Regione Lombardia. Valori elevati dell'indicatore indicano una maggiore pressione della domanda abitativa, spesso associata a contesti urbani attrattivi, dinamiche demografiche positive o limitata disponibilità di alloggi. Valori più bassi, al contrario, segnalano una minore tensione abitativa o una condizione di equilibrio più favorevole tra domanda e offerta. La rappresentazione spaziale dell'indice di pressione della domanda abitativa consente di evidenziare le differenze territoriali nei livelli di accessibilità al mercato della casa e di individuare ambiti caratterizzati da potenziali criticità, quali carenza di alloggi, aumento dei prezzi o difficoltà di accesso all'abitazione.		
C5	Indice di valore immobiliare territoriale (TPVI)	L'indice del valore immobiliare territoriale rappresenta il livello medio dei valori immobiliari all'interno di un determinato ambito geografico e fornisce una misura sintetica dell'attrattività economica e della qualità insediativa del territorio. L'indicatore è costruito a partire dai valori di mercato definiti dalle fasce dell'Osservatorio del Mercato Immobiliare (OMI), che suddividono il territorio comunale in zone omogenee caratterizzate da differenti livelli di valore immobiliare. I valori associati a ciascuna fascia OMI sono stati pesati in funzione della loro	€/m ²	Agenzia delle Entrate, Fasce Osservatorio Mercato Immobiliare, 2025 e (OMI, 2016)

		distribuzione spaziale sul territorio comunale, al fine di ottenere un indicatore rappresentativo del valore immobiliare complessivo e non influenzato dalla sola presenza di aree puntuali ad alto o basso valore. Tale approccio consente di restituire una stima più equilibrata e realistica del valore immobiliare territoriale, tenendo conto sia dell'intensità dei valori di mercato sia dell'estensione delle diverse zone OMI. Valori elevati dell'indice risultano generalmente associati ad ambiti caratterizzati da una forte domanda abitativa, da una buona accessibilità ai servizi e alle infrastrutture e da condizioni urbane e ambientali favorevoli. Al contrario, valori più contenuti indicano aree con minore attrattività immobiliare, spesso correlate a criticità socioeconomiche, carenze infrastrutturali o minore qualità del contesto insediativo. La rappresentazione spaziale dell'indice del valore immobiliare territoriale consente di individuare pattern di concentrazione del valore e differenze tra ambiti urbani, periurbani e rurali, offrendo un supporto conoscitivo utile per l'analisi delle dinamiche del mercato immobiliare e per le politiche di pianificazione e riequilibrio territoriale.		
C6	Tasso di dipendenza dall'assistenza economica (TBAE)	L'indicatore sul tasso di dipendenza dall'assistenza economica misura il livello di dipendenza della popolazione dai sistemi di assistenza economica attraverso il rapporto tra beneficiari e totale dei residenti per ogni comune della Città Metropolitana di Milano. L'indicatore fornisce una misura sintetica	%	ISTAT, Utenti e spesa, 2023

		delle condizioni di fragilità socioeconomica e del grado di esposizione della popolazione a situazioni di disagio economico. Nel caso specifico, l'indicatore è costruito a partire dai dati messi a disposizione dalla Regione Lombardia relativi ai beneficiari di interventi di assistenza economica e di sostegno al reddito, aggregati a livello territoriale omogeneo. Valori elevati dell'indicatore indicano una maggiore incidenza di popolazione che ricorre a forme di supporto economico pubblico, segnalando potenziali criticità legate a condizioni di povertà, disoccupazione o vulnerabilità sociale. Al contrario, valori più contenuti suggeriscono una minore dipendenza dai sistemi di assistenza e una struttura socioeconomica relativamente più stabile.		
--	--	---	--	--

Tabella 7 - Elenco degli indicatori riferiti alle tre macrocategorie A, B e C riconosciute all'interno dei conditions of the system. Elaborazione propria.

5.1.2 Indicatori di Hazards

Le tabelle che seguono presentano gli indicatori afferenti alla dimensione degli *hazards*, ciascuno accompagnato da una descrizione approfondita e dall'indicazione delle fonti dei dati utilizzate. In coerenza con l'impostazione metodologica adottata, tali indicatori sono suddivisi in due categorie distinte. Da un lato, i *trends*, che descrivono pressioni di natura cronica e progressiva esercitate sul territorio e sulla popolazione nel medio-lungo periodo, riportati nella *Tabella 8*; dall'altro, gli *events*, ovvero eventi improvvisi e potenzialmente altamente impattanti, in grado di produrre effetti significativi e immediati sul territorio, elencati nella *Tabella 9*.

5.1.2.1 Indicatori di Trends

HAZARDS			
Indicatore	Descrizione e metodo	Unità di misura	Fonte

T1	Dinamica demografica (DDemTer)	L'indicatore di dinamica demografica misura le variazioni della popolazione in un determinato ambito territoriale nel tempo, fornendo una sintesi dei processi di crescita, stabilità o diminuzione demografica. Esso consente di analizzare come la popolazione residente si modifica in termini assoluti o relativi, evidenziando trend di incremento, decremento o stagnazione dal 2011 al 2021 attraverso l'utilizzo dei dati forniti da ISTAT sui censimenti della popolazione. Valori positivi indicano una crescita della popolazione, mentre valori negativi segnalano una diminuzione. Un valore prossimo allo zero rappresenta una popolazione stabile. La rappresentazione spaziale dell'indicatore permette di identificare aree caratterizzate da dinamiche demografiche differenti, evidenziando comuni o zone metropolitane in crescita, aree in contrazione demografica o contesti stabili. Tale indicatore è particolarmente utile per la pianificazione territoriale, urbana e dei servizi, in quanto fornisce informazioni sui fabbisogni abitativi, infrastrutturali e sociali e sulle possibili pressioni su servizi educativi, sanitari e di mobilità.	%	ISTAT, Censimento della popolazione, 2011 e 2021
T2	Dinamica consumo di suolo (DCSuolo)	L'indicatore è calcolato confrontando i dataset di uso del suolo forniti da ISPRA relativi agli anni 2012 e 2023, consentendo di misurare le variazioni nella superficie artificializzata nel corso di questo	%	ISPRA, Consumo del suolo, 2012 e 2023

		periodo. Valori positivi indicano un aumento del consumo del suolo, mentre valori nulli o negativi segnalano stabilità o eventuali processi di riduzione della superficie artificializzata, ad esempio tramite interventi di rinaturalizzazione o rigenerazione urbana. La rappresentazione spaziale dell'indicatore permette di individuare le aree maggiormente soggette a pressione antropica tra il 2012 e il 2023, evidenziando i fronti di espansione urbana e le zone più vulnerabili a fenomeni come frammentazione del paesaggio, perdita di biodiversità e incremento del rischio idrogeologico.		
--	--	---	--	--

Tabella 8 - Elenco indicatori Trends. Elaborazione propria.

5.1.2.2 Indicatori di Events

HAZARDS				
Indicatore		Descrizione e metodo	Unità di misura	Fonte
E1	Indice sintetico di pressione emissiva (IndPEAria)	L'indicatore di indice sintetico della pressione emissiva rappresenta, su scala comunale, il livello relativo di pressione esercitata dalle emissioni atmosferiche di origine antropica. L'obiettivo dell'indicatore è quello di sintetizzare in un unico valore numerico l'informazione derivante da un insieme eterogeneo di inquinanti (dati al 2021 di ARPA Lombardia), integrando sia le quantità emesse sia la diversa pericolosità dei composti considerati. Gli inquinanti considerati sono: metalli e	t/km2	(INEMAR, ARPA Lombardia, 2025); (WHO, 2025); (Xue, 2025); (WHO, 2021)

		metalloidi (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se e Zn), composti organici e idrocarburi policiclici aromatici (BaP, BbF, BkF, IcdP, BC, OC, EC, COV), Gas serra e inquinanti gassosi (CH₄, CO, CO₂, N₂O, H₃, NO_x e SO₂), particolato (PM10 e PM2.5). L'indice misura la pressione emissiva potenziale associata alle attività presenti sul territorio, intesa come combinazione tra intensità delle emissioni e rilevanza sanitaria e ambientale degli inquinanti. Il valore ottenuto consente quindi di confrontare i comuni tra loro in termini relativi, evidenziando quelli caratterizzati da un carico emissivo complessivo più elevato rispetto al contesto di riferimento. L'indicatore assume valori compresi tra 0 e 1, dove valori prossimi a zero indicano una pressione emissiva contenuta e valori prossimi a uno segnalano una pressione emissiva elevata.		
E2	Isole di calore urbane (UHI)	L'indicatore sulle isole di calore urbano misura l'intensità del fenomeno delle UHI a scala metropolitana attraverso la quantificazione del surplus di temperatura superficiale rispetto a un riferimento rurale. Esso si basa sulla differenza tra la temperatura superficiale del suolo e la temperatura media delle aree rurali, assumendo che tali aree rappresentino condizioni termiche di equilibrio non influenzate dall'urbanizzazione. In questo modo l'indicatore consente di evidenziare le porzioni di territorio che	°C/km2	EarthExplorer, LANDSAT_8, 2022

		presentano un eccesso di calore rispetto al contesto rurale, indipendentemente dalla loro classificazione urbanistica, restituendo una misura continua e spazialmente esplicita dell'intensità del fenomeno delle isole di calore sull'intera area metropolitana. La normalizzazione dei valori permette di esprimere tale intensità in forma relativa, rendendo l'indicatore confrontabile e integrabile con altri fattori di vulnerabilità territoriale. I dati grezzi utilizzati sono stati esportati dal sito EarthExplorer utilizzando nel particolare i dati forniti da Landsat-8, satellite ottico multispettrale della NASA/USGS che permette di ricavare anche dati termici dell'area di interesse.		
--	--	---	--	--

Tabella 9 - Elenco indicatori di Events. Elaborazione propria.

06

RAPPRESENTAZIONE CARTOGRAFICA DELLE VULNERABILITÀ TERRITORIALI DELLA CITTÀ METROPOLITANA DI MILANO

Superata la prima fase di decisione ed analisi degli indicatori, questi vengono elaborati su QGIS ed i risultati, successivamente caricati sull'interfaccia del plugin R3C-GeoResilience permettendo di condurre un'analisi esplorativa della distribuzione spaziale delle variabili considerate. Tale fase ha consentito di mettere in evidenza elementi territoriali caratterizzati da specifiche criticità e peculiarità, offrendo una lettura approfondita delle dinamiche in atto. Le elaborazioni cartografiche prodotte, presentate nelle pagine successive, restituiscono in modo puntuale la distribuzione spaziale dei singoli indicatori e costituiscono un supporto essenziale per l'interpretazione dei fenomeni osservati all'interno dell'area di studio. La rappresentazione disaggregata degli indicatori ha inoltre favorito l'individuazione di correlazioni spaziali e di anomalie localizzate, fornendo elementi conoscitivi utili alla formulazione di osservazioni di carattere tecnico e al progressivo affinamento del framework analitico. Nel complesso, questa fase si è rivelata strategica per garantire che l'impianto valutativo fosse in grado di rappresentare in modo efficace la natura multidimensionale delle condizioni di vulnerabilità analizzate.

6.1 Elaborazione cartografica per gli indicatori di Conditions Of The System

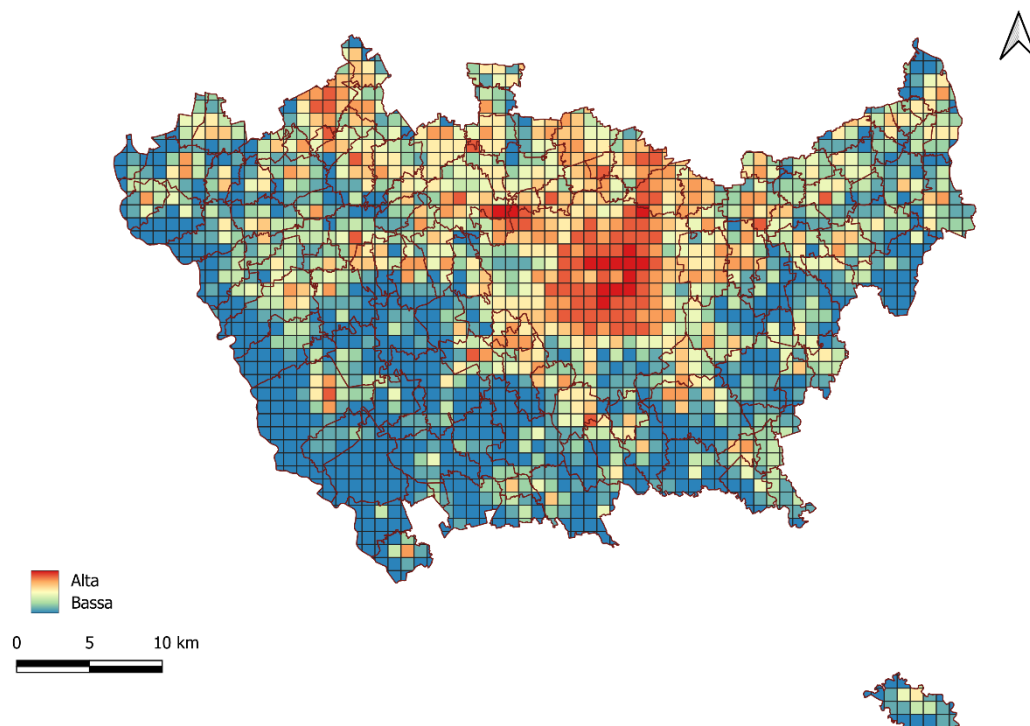


Figura 9 - Rappresentazione spaziale dell'indicatore CoS A1 sulla permeabilità del suolo.
Elaborazione propria.

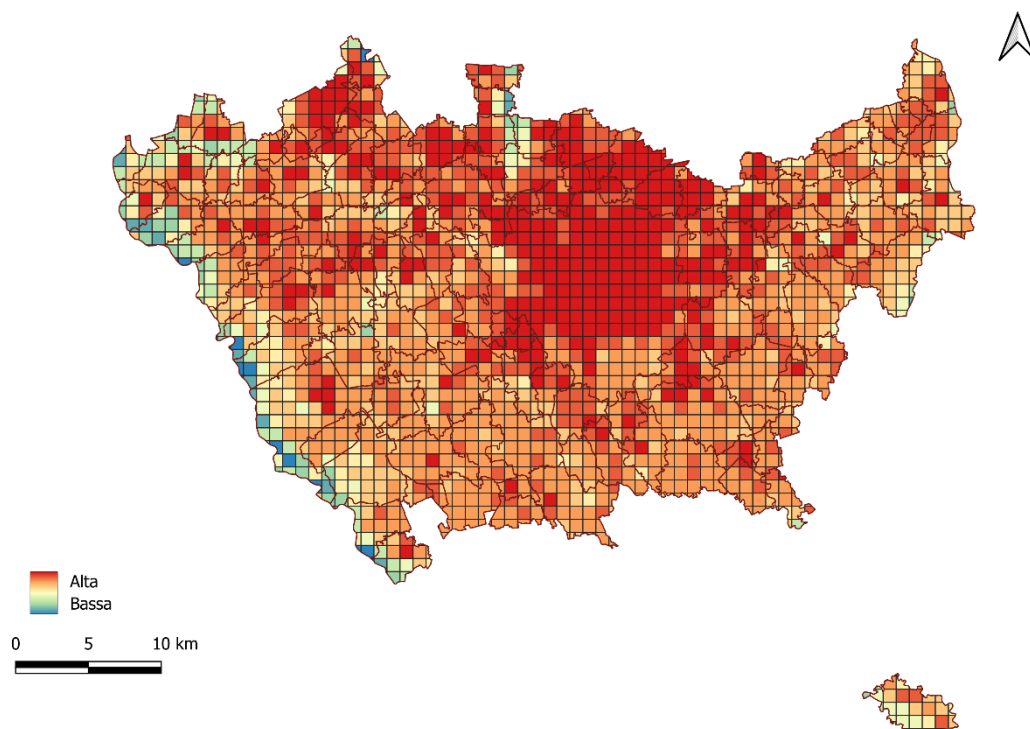


Figura 10 - Rappresentazione spaziale dell'indicatore CoS A2 sulla funzionalità ecologica.
Elaborazione propria.

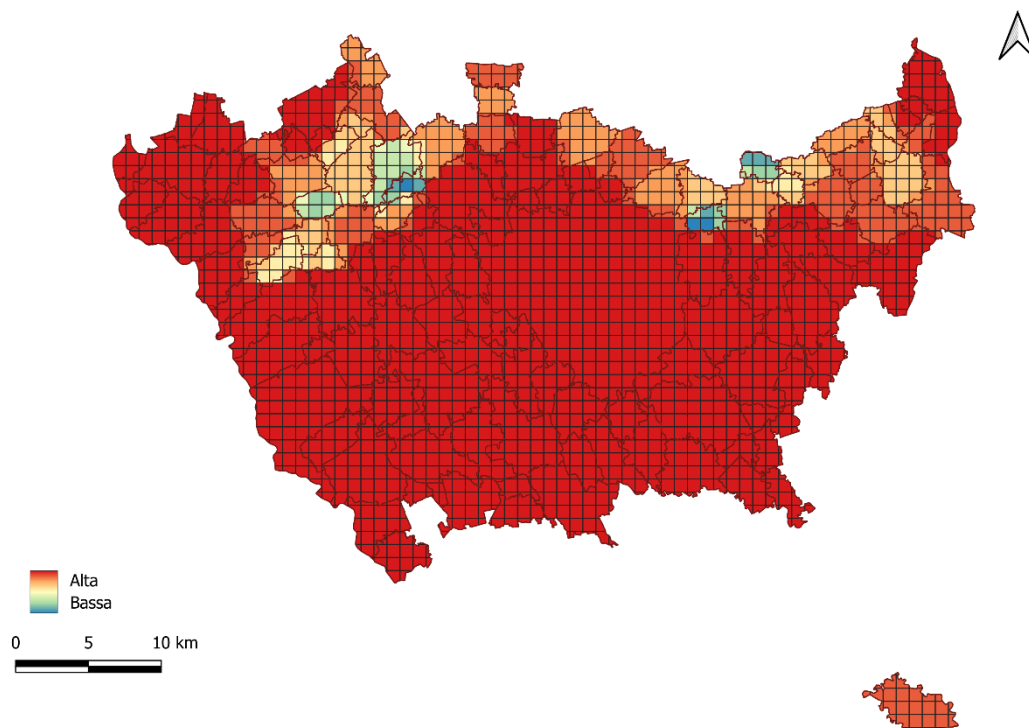


Figura 11 - Rappresentazione spaziale dell'indicatore CoS A3 sulle aree verdi pubbliche. Elaborazione propria.

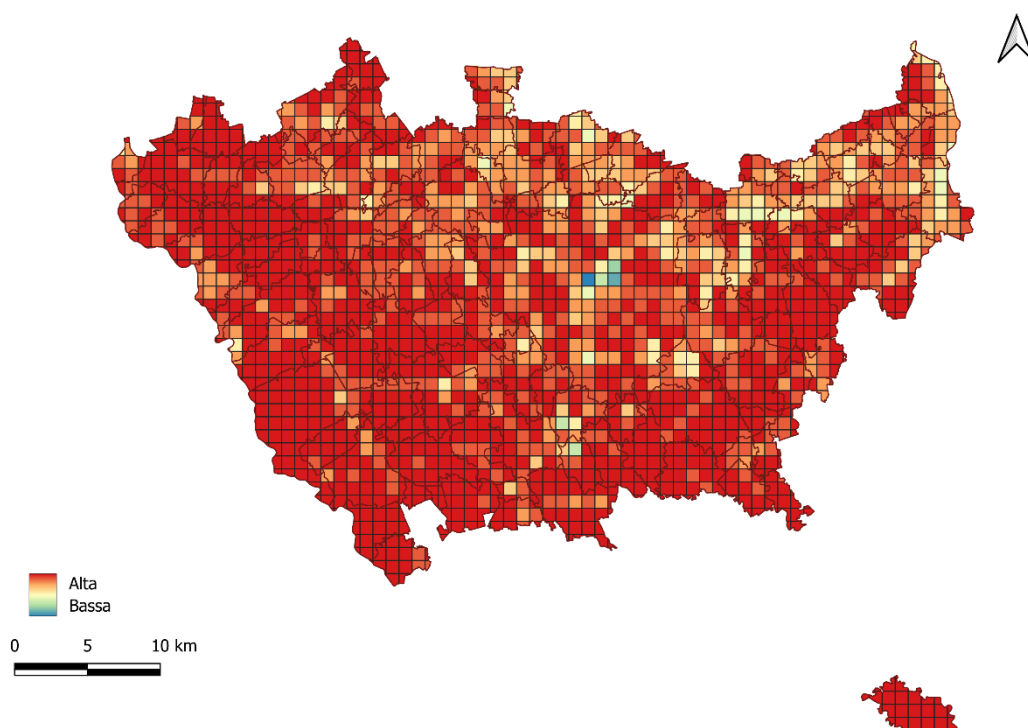


Figura 12 - Rappresentazione spaziale dell'indicatore CoS A4 sulla densità delle infrastrutture ciclabili. Elaborazione propria.

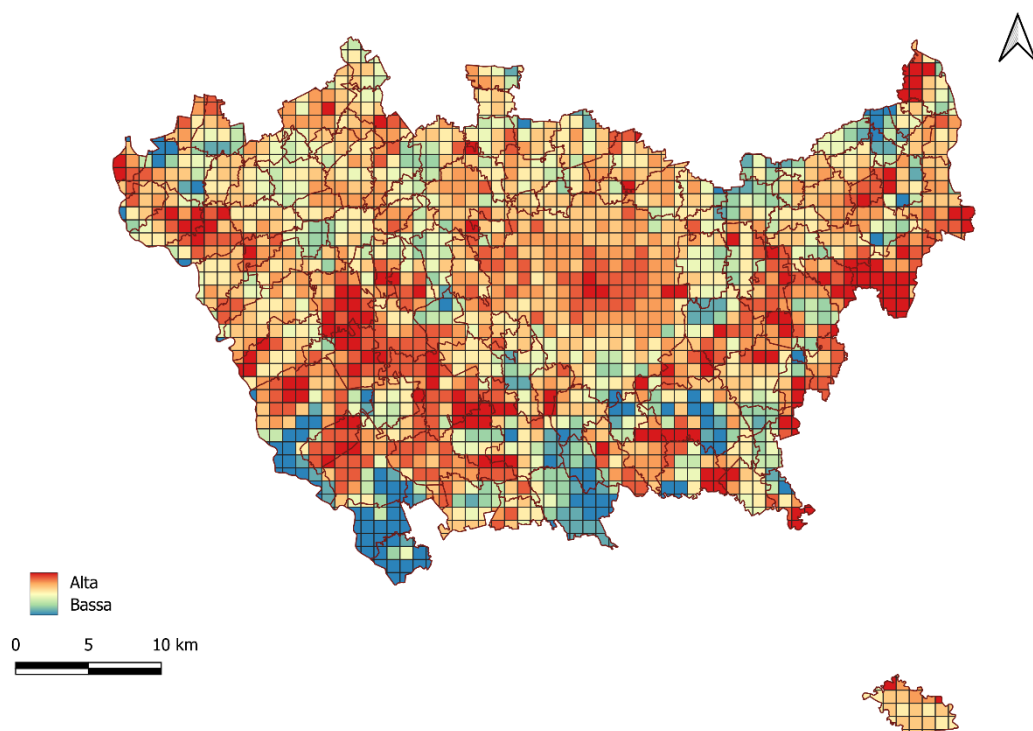


Figura 13 - Rappresentazione spaziale dell'indicatore CoS B1 sull'età media del patrimonio edilizio. Elaborazione propria.

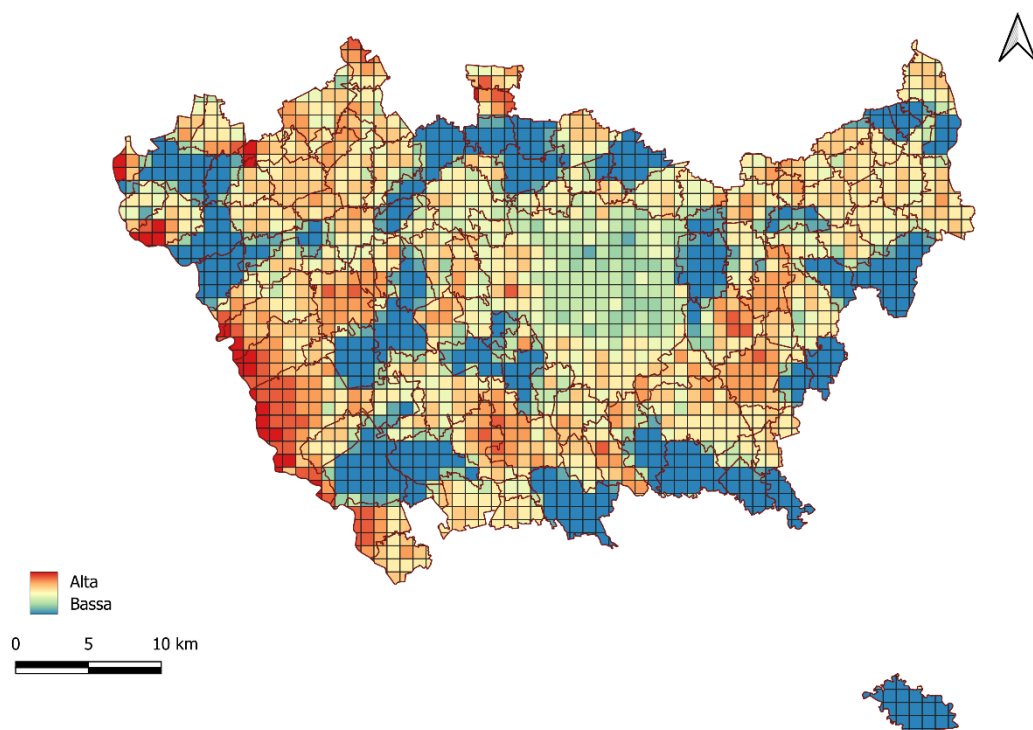


Figura 14 - Rappresentazione spaziale dell'indicatore CoS B2 sull'esposizione al rumore ambientale. Elaborazione propria.

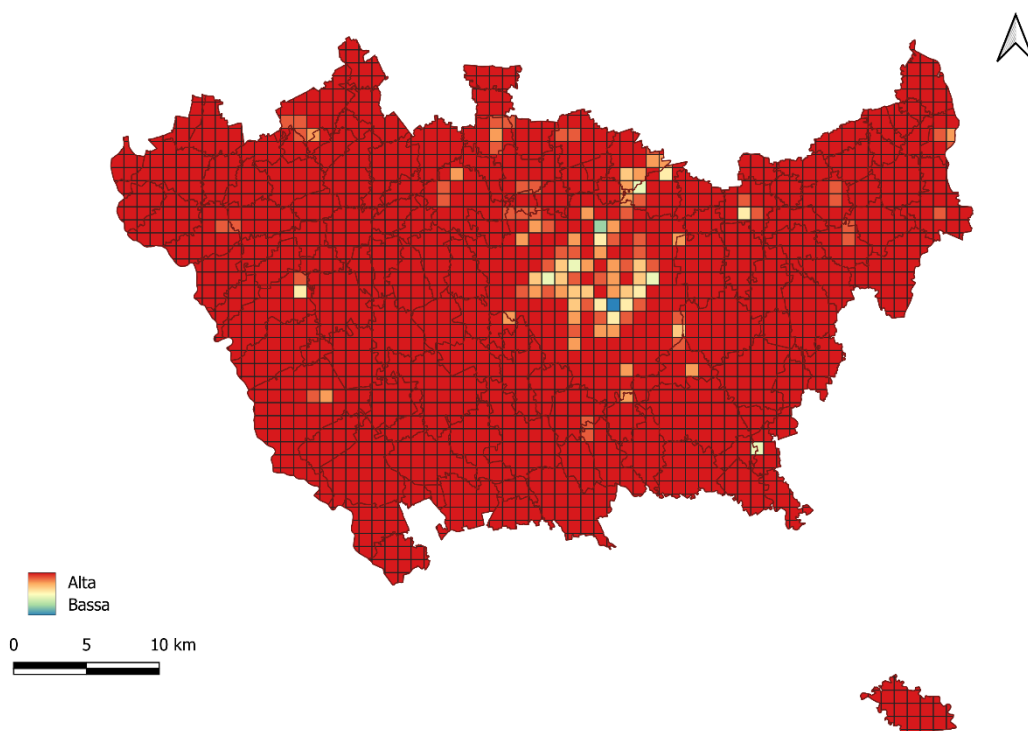


Figura 15 - Rappresentazione spaziale dell'indicatore CoS B3 sulla densità delle strutture sanitarie. Elaborazione propria.

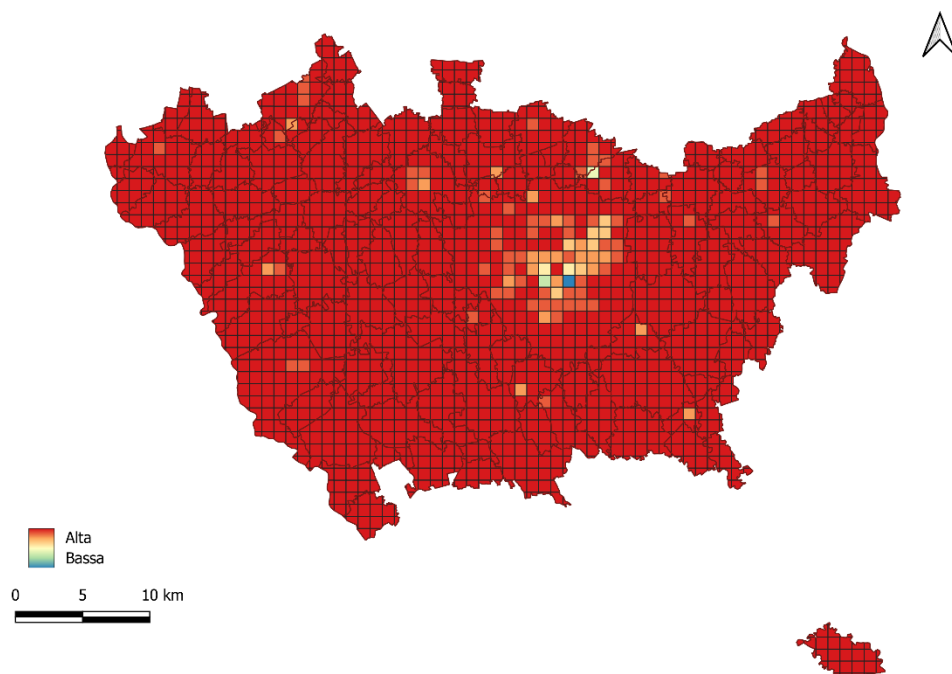


Figura 16 - Rappresentazione spaziale dell'indicatore CoS B4 sulla densità dei servizi educativi. Elaborazione propria.

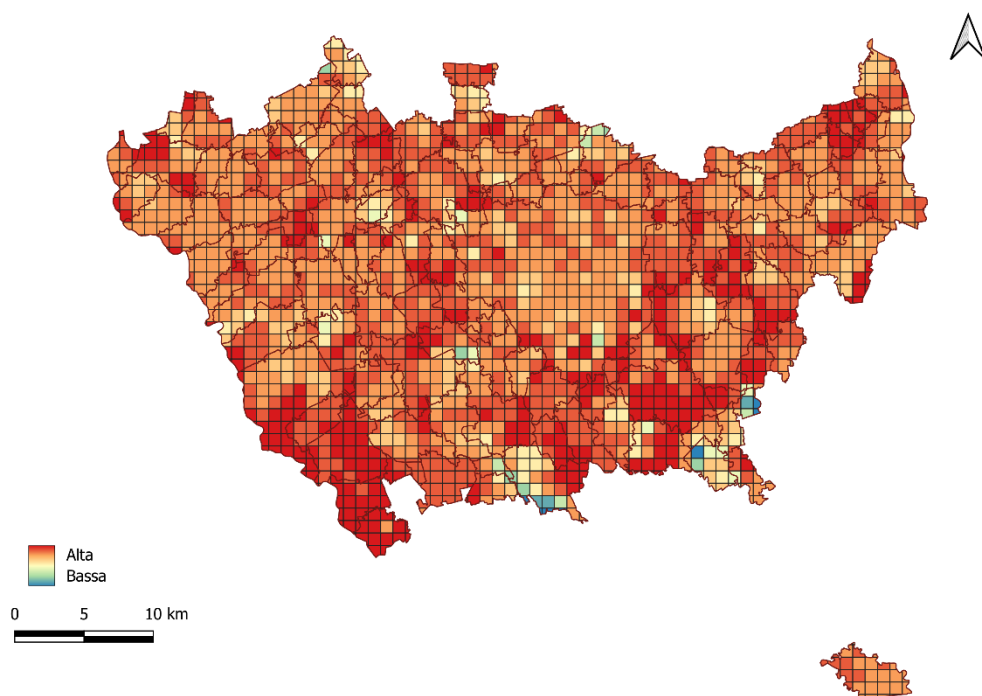


Figura 17 - Rappresentazione spaziale dell'indicatore CoS C1 sulla vulnerabilità demografica agli eventi. Elaborazione propria.

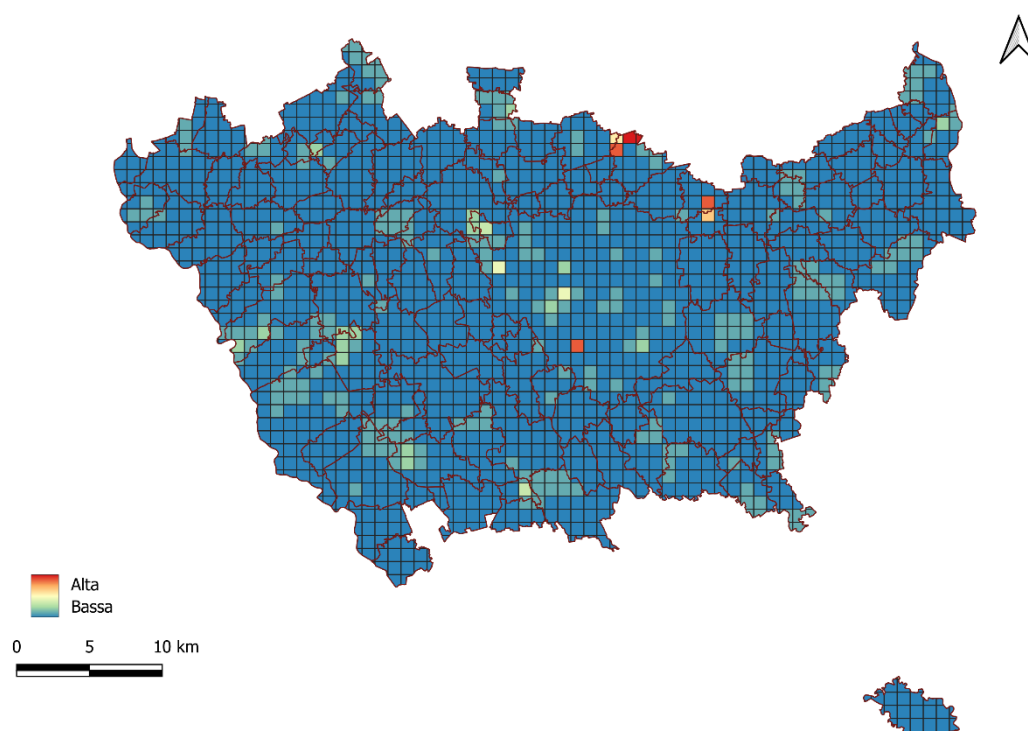


Figura 18 - Rappresentazione spaziale dell'indicatore CoS C2 dell'indice di dipendenza strutturale. Elaborazione propria.

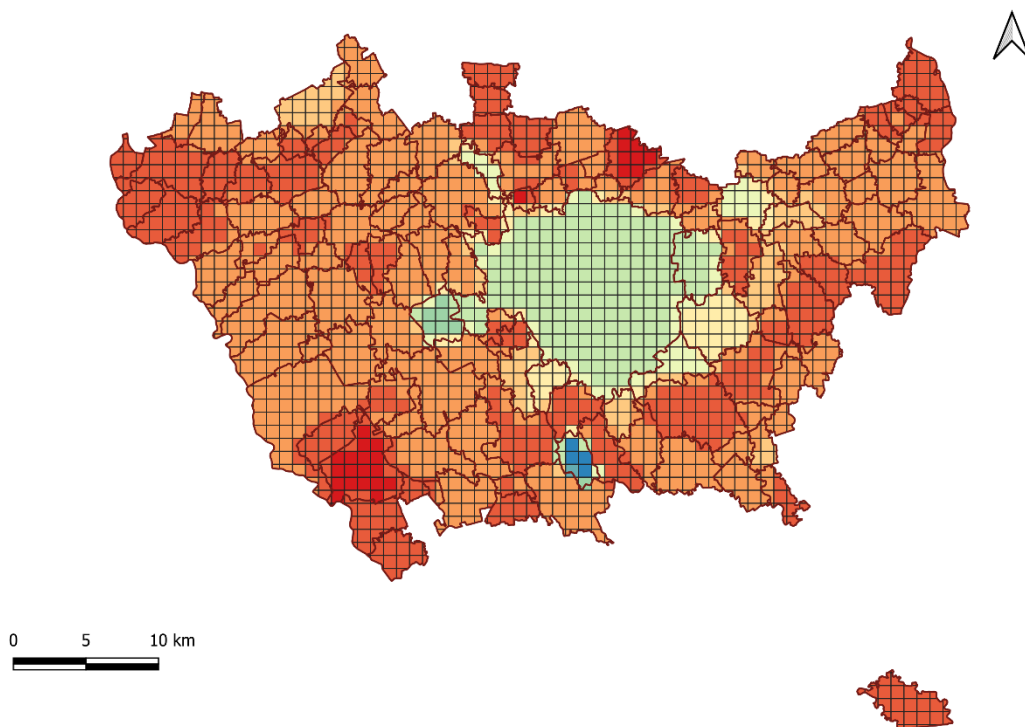


Figura 19 - Rappresentazione spaziale dell'indicatore CoS C3 sul reddito medio. Elaborazione propria.

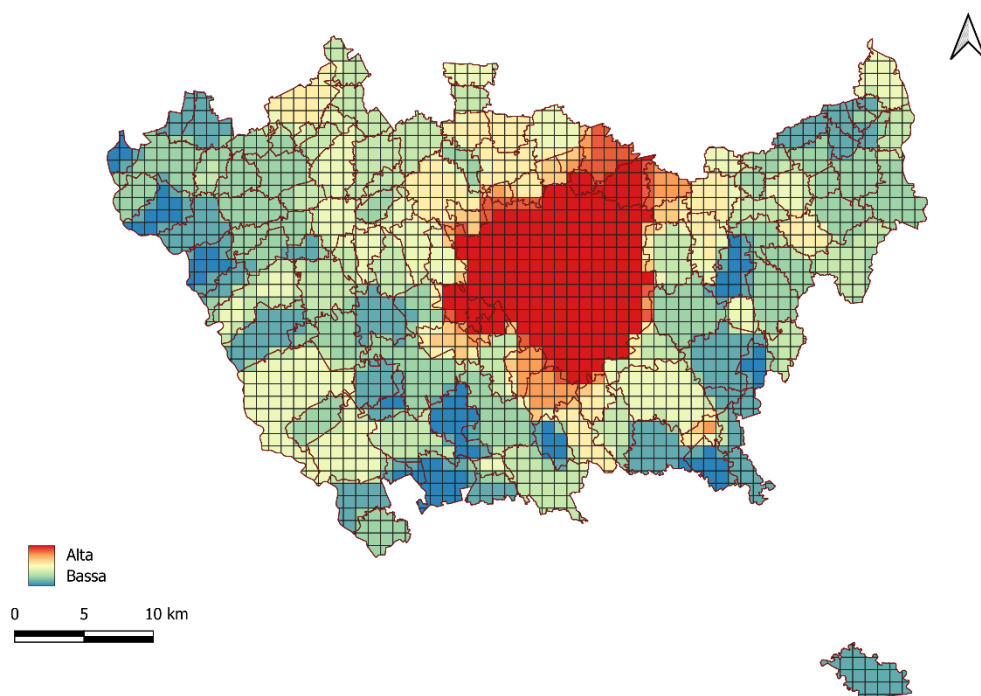


Figura 20 - Rappresentazione spaziale dell'indicatore CoS C4 dell'indice della domanda abitativa. Elaborazione propria.

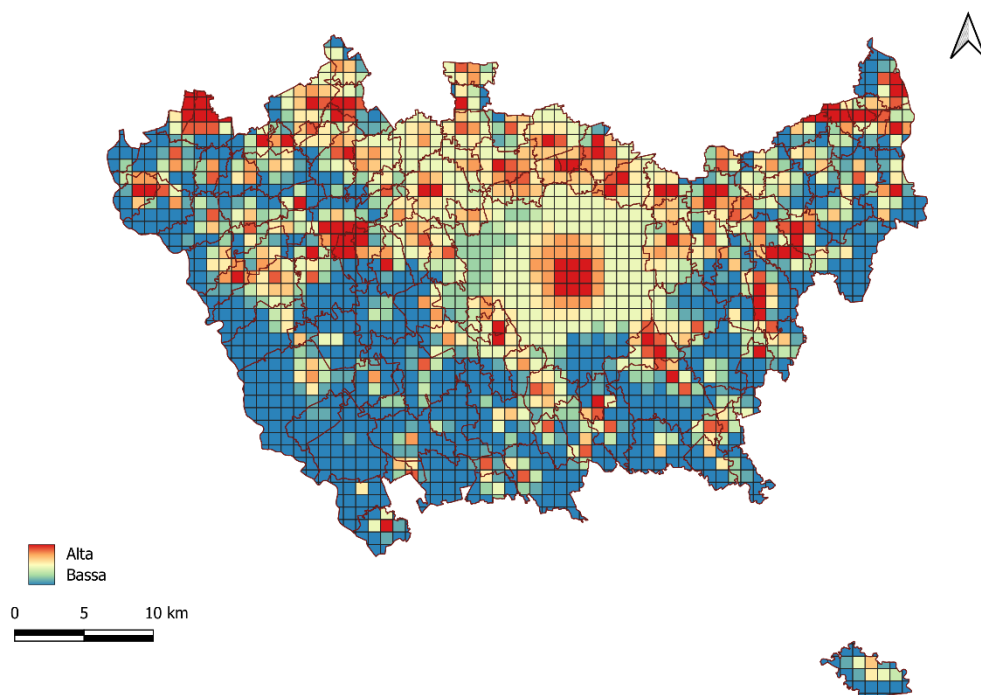


Figura 21 - Rappresentazione spaziale dell'indicatore CoS C5 del valore immobiliare territoriale. Elaborazione propria.

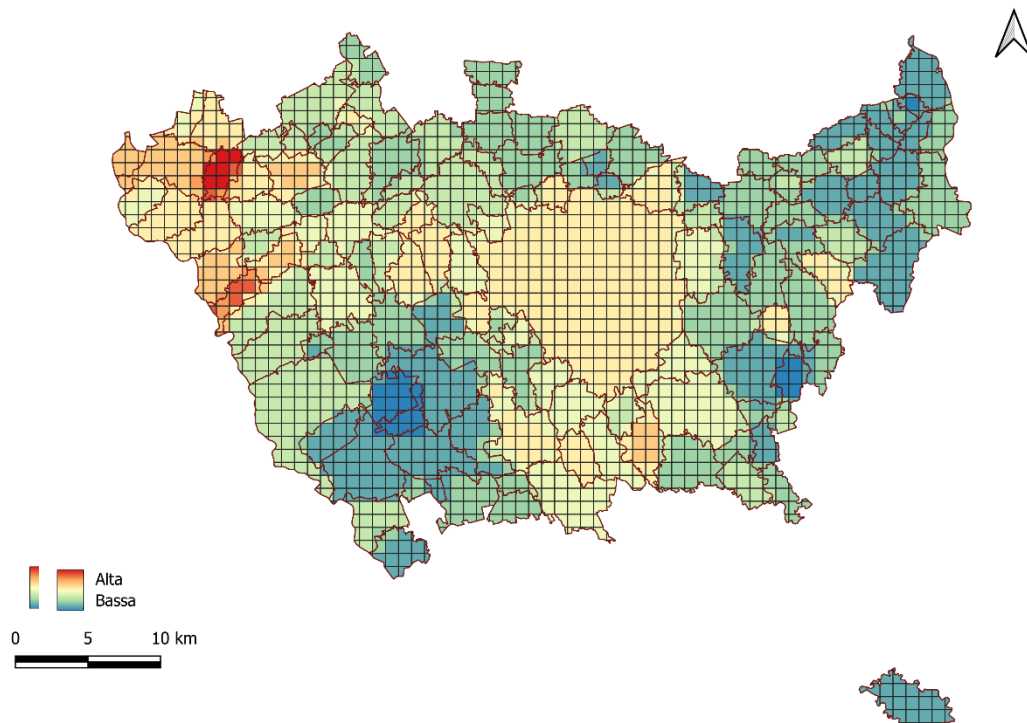


Figura 22 - Rappresentazione spaziale dell'indicatore CoS C6 del tasso di dipendenza economica. Elaborazione propria.

6.2 Elaborazione cartografica degli indicatori di Hazards

6.2.1 Trends

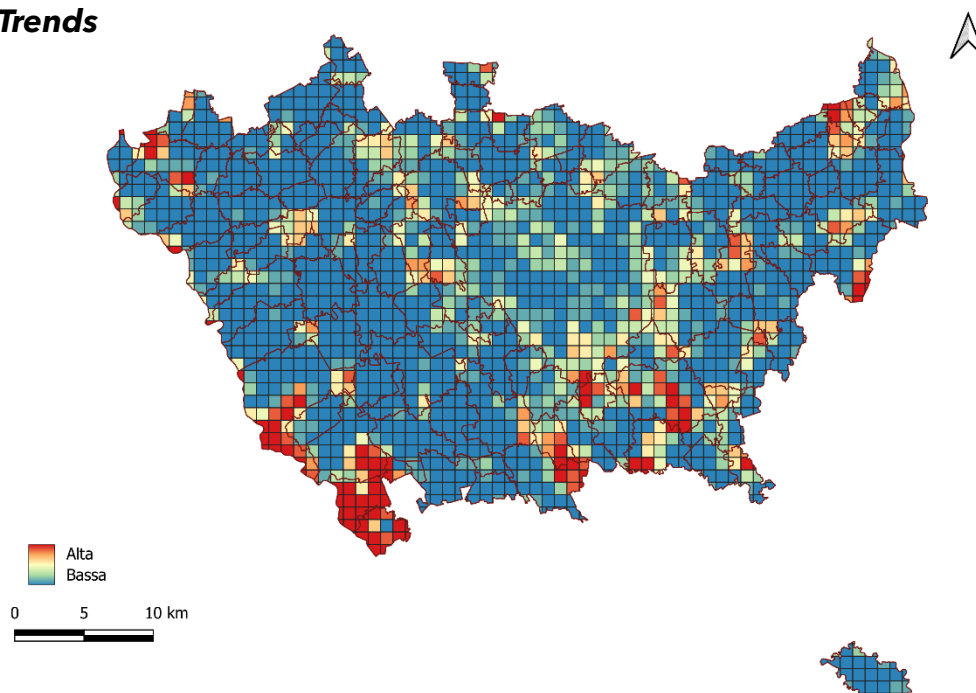


Figura 23 - Rappresentazione spaziale dell'indicatore T1 sulla dinamica demografica. Elaborazione propria.

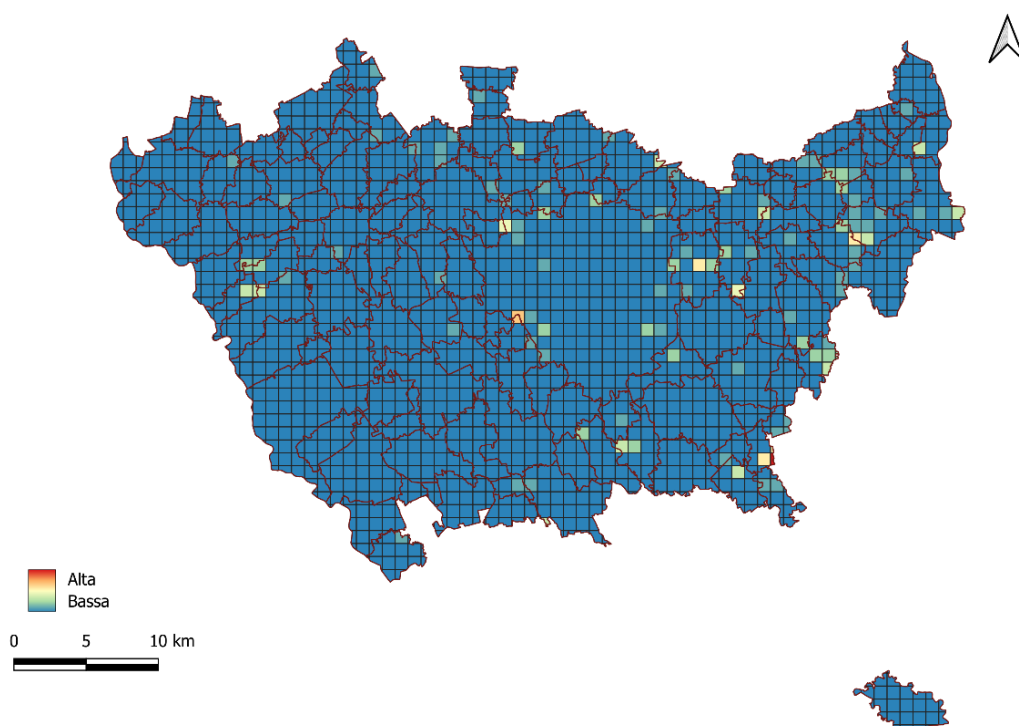


Figura 24 - Rappresentazione spaziale dell'indicatore T2 sulla dinamica di consumo del suolo. Elaborazione propria.

6.2.2 Events

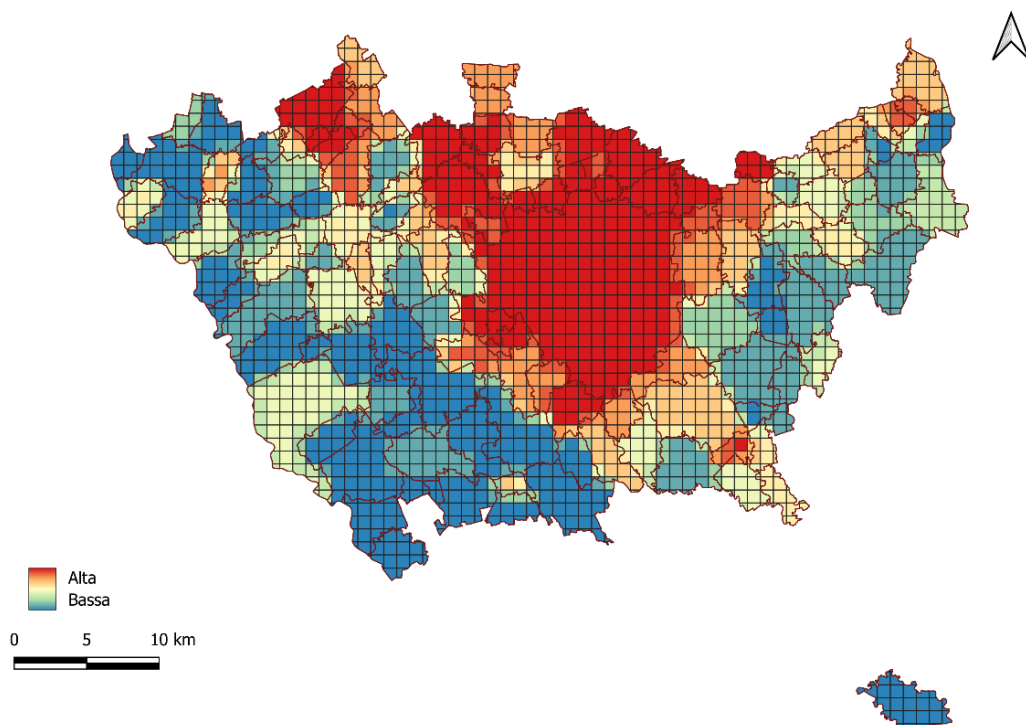


Figura 25 - Rappresentazione spaziale dell'indicatore E1 dell'indice sintetico di pressione emissiva. Elaborazione propria.

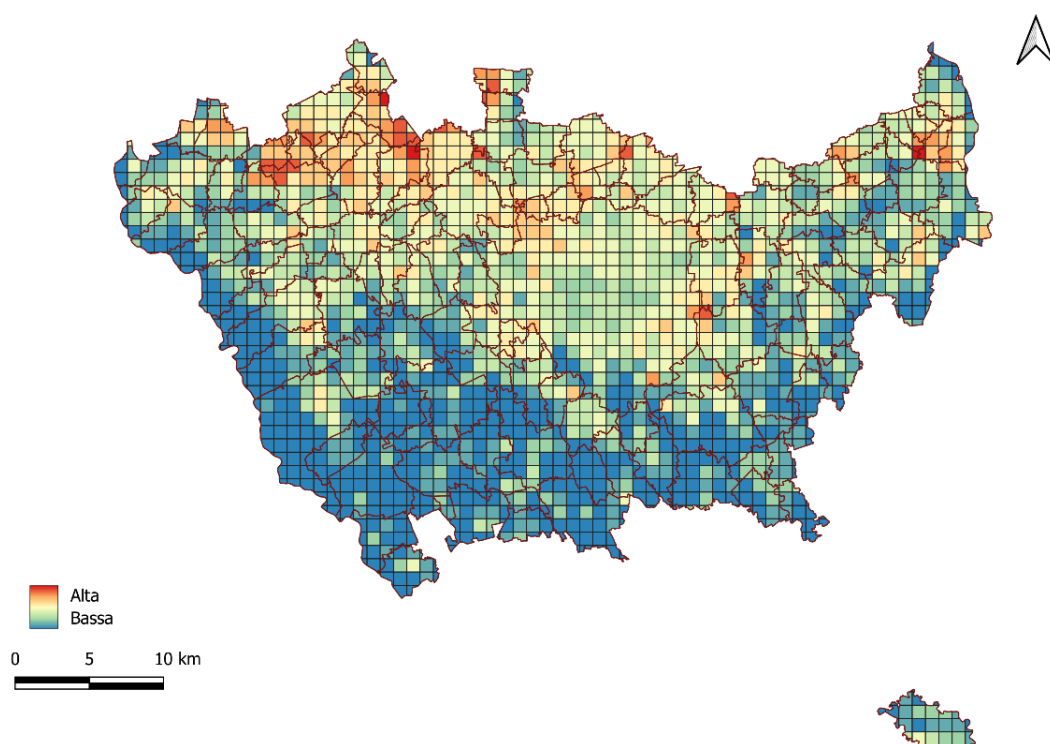


Figura 26 - Rappresentazione spaziale dell'indicatore E2 delle isole di calore urbane. Elaborazione propria.

6.3 Le tre componenti della vulnerabilità in CMMi

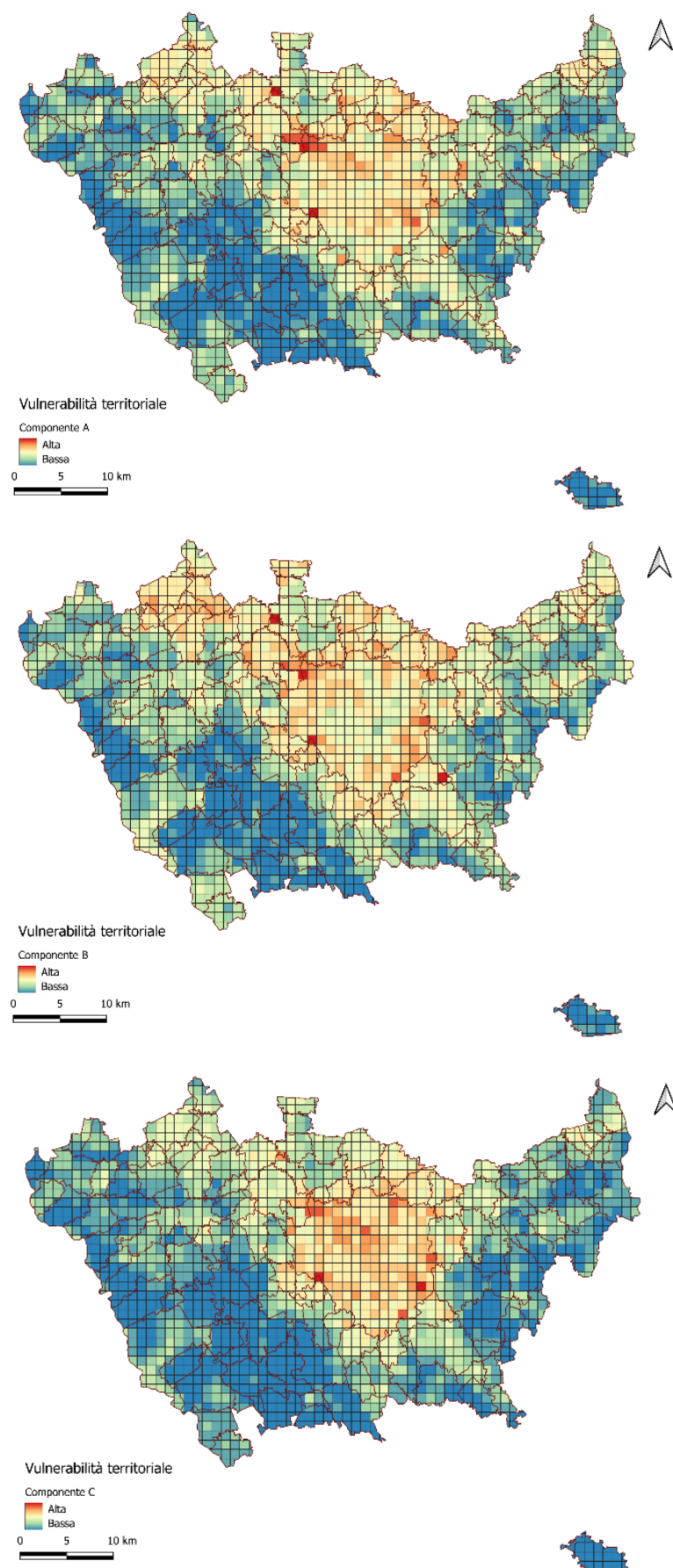


Figura 27 - Rappresentazione spaziale delle tre componenti delle Conditions of the System: Natural environment and landscape (CoS A), Built environment, cultural heritage and infrastructure (CoS B) ed Economy and Society (CoS C). Elaborazione propria.

07

LA VULNERABILITÀ TERRITORIALE DELLA CMMI SECONDO R3C-GEORESILIENCE

Seguendo il processo metodologico finalizzato alla costruzione di una rappresentazione cartografica complessiva delle vulnerabilità territoriali, alla fase iniziale di elaborazione degli indicatori dovrebbe idealmente seguire un passaggio cruciale di pesatura, basato sull'interazione con esperti del territorio. Nel presente lavoro di tesi tale fase non è stata realizzata, come già evidenziato in precedenza. In assenza di un processo di differenziazione dei pesi, gli indicatori illustrati nelle sezioni precedenti sono stati pertanto considerati con la medesima importanza all'interno della valutazione complessiva delle vulnerabilità. Nonostante questa limitazione, ai fini metodologici si è resa comunque necessaria la costruzione della matrice di vulnerabilità, elemento strutturale imprescindibile per il corretto funzionamento del plugin R3C-GeoResilience, in quanto strumento di supporto analitico per la produzione delle mappe conclusive. In mancanza di una gerarchizzazione degli indicatori, la matrice è stata quindi impostata attribuendo valori uniformi alle variabili considerate. Tale scelta, pur consentendo l'implementazione del modello, comporta una semplificazione dell'analisi e riduce la capacità della metodologia di cogliere in modo differenziato gli impatti esercitati dai diversi fattori sul territorio. La rappresentazione cartografica risultante deriva pertanto dalla sovrapposizione degli indicatori selezionati e dalla loro proiezione spaziale sull'area di studio.

7.1 La pesatura degli indicatori nella matrice di correlazione

In relazione all'estensione territoriale della Città Metropolitana di Milano e alla scala dell'analisi, l'implementazione del plugin Geo-Resilience richiede l'adozione di una griglia di riferimento più estesa di quelle realizzate fino ad ora. Infatti, l'unità minima di analisi viene fissata con dimensione pari a 1000 m × 1000 m, risoluzione spaziale che rappresenta un compromesso coerente tra la necessità di restituire pattern territoriali significativi e l'esigenza di evitare un livello di dettaglio eccessivo, non adeguato alla scala di osservazione e

difficilmente gestibile dal punto di vista computazionale. L'utilizzo di una griglia chilometrica consente inoltre di attenuare effetti di rumore locale, favorendo una lettura più strutturale delle dinamiche di vulnerabilità e una maggiore confrontabilità dei risultati all'interno dell'area metropolitana.

	T1 DDemTer	T2 SCSuolo	E1 IndPEAria	E2 UHI
A1 Psuolo	1,00	1,00	1,00	1,00
A2 FunEco	1,00	1,00	1,00	1,00
A3 VerdeDis	1,00	1,00	1,00	1,00
A4 CInfDI	1,00	1,00	1,00	1,00
B1 yEdif	1,00	1,00	1,00	1,00
B2 InqAcus	1,00	1,00	1,00	1,00
B3 HFDI	1,00	1,00	1,00	1,00
B4 ESDI	1,00	1,00	1,00	1,00
C1 VulnDemo	1,00	1,00	1,00	1,00
C2 SDI	1,00	1,00	1,00	1,00
C3 RedMed	1,00	1,00	1,00	1,00
C4 FabbAb	1,00	1,00	1,00	1,00
C5 TPVI	1,00	1,00	1,00	1,00
C6 TBAE	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabella 10 - Matrice di vulnerabilità con stessa pesatura per ogni indicatore. Elaborazione propria.

Il plugin permette di realizzare sia una rappresentazione per singola componente o macrocategoria, che un quadro interpretativo unico con al suo interno tutti gli indicatori considerati nell'analisi. Quest'ultima tipologia di elaborazione restituisce una lettura unitaria e integrata della distribuzione territoriale della vulnerabilità, superando la frammentazione delle singole componenti analizzate e consentendo una visione complessiva delle criticità presenti sul territorio. In tal senso, la carta di sintesi non si limita a una funzione descrittiva, ma assume un ruolo eminentemente operativo, configurandosi come uno strumento di supporto fondamentale ai processi decisionali e strategici. La possibilità di individuare con immediatezza le aree maggiormente vulnerabili, così come i gradienti spaziali di criticità, fornisce infatti un quadro conoscitivo essenziale per orientare le priorità di intervento, allocare in modo più efficace le risorse e supportare la definizione di politiche e strategie finalizzate al rafforzamento della resilienza territoriale. All'interno di contesti complessi e articolati come quello metropolitano, una rappresentazione integrata delle vulnerabilità diventa pertanto un elemento chiave per la costruzione di decisioni informate e per

l'attivazione di percorsi di pianificazione capaci di rispondere in modo mirato e consapevole alle specificità locali.

7.2 La mappatura finale delle vulnerabilità territoriali in CMMi

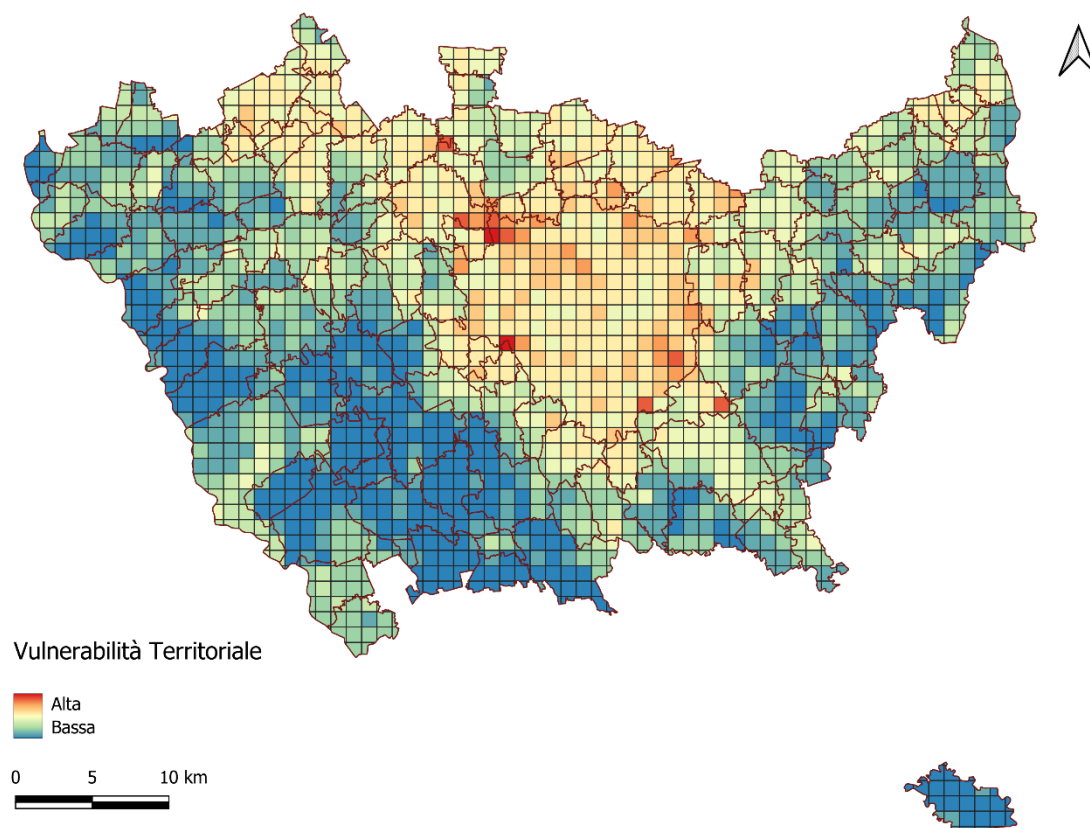


Figura 28 - Rappresentazione spaziale delle vulnerabilità territoriali. Elaborazione propria.

La mappa finale delle vulnerabilità territoriali della Città Metropolitana di Milano restituisce un quadro spaziale chiaramente strutturato, nel quale le condizioni di maggiore criticità si concentrano nel nucleo urbano centrale e lungo l'asse dell'urbanizzazione continua, mentre valori progressivamente più contenuti caratterizzano gli ambiti periferici e i contesti a prevalente matrice rurale. Le classi di vulnerabilità più elevate, rappresentate dalle tonalità rosse e arancioni, risultano localizzate in modo compatto nell'area centrale metropolitana, evidenziando una continuità spaziale che riflette l'intensità dei processi di urbanizzazione e di artificializzazione del suolo propri del sistema milanese. Al contrario, le classi di vulnerabilità più basse, espresse dalle gradazioni azzurre e blu, prevalgono nelle porzioni esterne del territorio metropolitano, dove la minore densità insediativa e la presenza di superfici agricole e naturali contribuiscono a una maggiore capacità di regolazione ambientale. Questa distribuzione spaziale appare coerente con la natura degli indicatori utilizzati per la costruzione dell'indice di vulnerabilità e conferma la capacità del modello di intercettare pattern territoriali strutturali, anche in assenza di una pesatura

differenziata delle variabili. L'area centrale emerge come maggiormente vulnerabile in quanto caratterizzata da elevati livelli di consumo di suolo e densità edilizia, che determinano una riduzione significativa della permeabilità e delle funzioni ecosistemiche del territorio. La frammentazione delle superfici verdi e la discontinuità delle reti ecologiche limitano ulteriormente i meccanismi di mitigazione climatica, accentuando la sensibilità del sistema urbano agli stress ambientali. La forma urbana compatta e l'elevata concentrazione edilizia, ben leggibili nella porzione centrale della mappa, favoriscono inoltre l'accumulo di calore e l'esposizione a fenomeni come l'isola di calore urbana, oltre a intensificare le pressioni emissive legate alla mobilità e alle attività antropiche. A queste componenti si affiancano le caratteristiche del patrimonio edilizio, spesso più datato e meno performante sotto il profilo energetico e microclimatico, che contribuisce ad amplificare gli effetti degli stress ambientali anziché attenuarli. La forte concentrazione di infrastrutture e servizi, se da un lato rappresenta un elemento di centralità funzionale del sistema metropolitano, dall'altro riflette un'intensa pressione d'uso del territorio e una maggiore esposizione cumulativa della popolazione. Dal punto di vista sociodemografico, la mappa suggerisce come le aree centrali coincidano anche con ambiti caratterizzati da una presenza significativa di popolazione strutturalmente vulnerabile, elemento che non genera direttamente la vulnerabilità territoriale ma ne incrementa l'intensità, riducendo la capacità di adattamento e di risposta agli stress ambientali e alle pressioni croniche. Le dinamiche demografiche e la pressione abitativa contribuiscono così a rendere il sistema urbano centrale più rigido e meno resiliente rispetto agli ambiti periurbani e rurali.

7.3 Rappresentazioni spaziali a confronto

Nel complesso, la rappresentazione cartografica restituisce una vulnerabilità di natura prevalentemente urbana, chiaramente riconoscibile nella struttura spaziale della Città Metropolitana di Milano. Non si tratta di una semplice mappa della fragilità sociale o economica, ma di una lettura integrata della sensibilità del sistema territoriale agli stress ambientali e antropici, nella quale le dimensioni biofisica, morfologica e urbana assumono un ruolo determinante. In questo senso, la mappa si configura come uno strumento conoscitivo e operativo di particolare rilevanza per la pianificazione metropolitana, in grado di supportare l'individuazione di priorità di intervento e l'elaborazione di strategie mirate al rafforzamento della resilienza territoriale.

Le rappresentazioni spaziali sottostanti rappresentano le tre mappe realizzabili nella terza finestra del plug-in, come mostrato nella

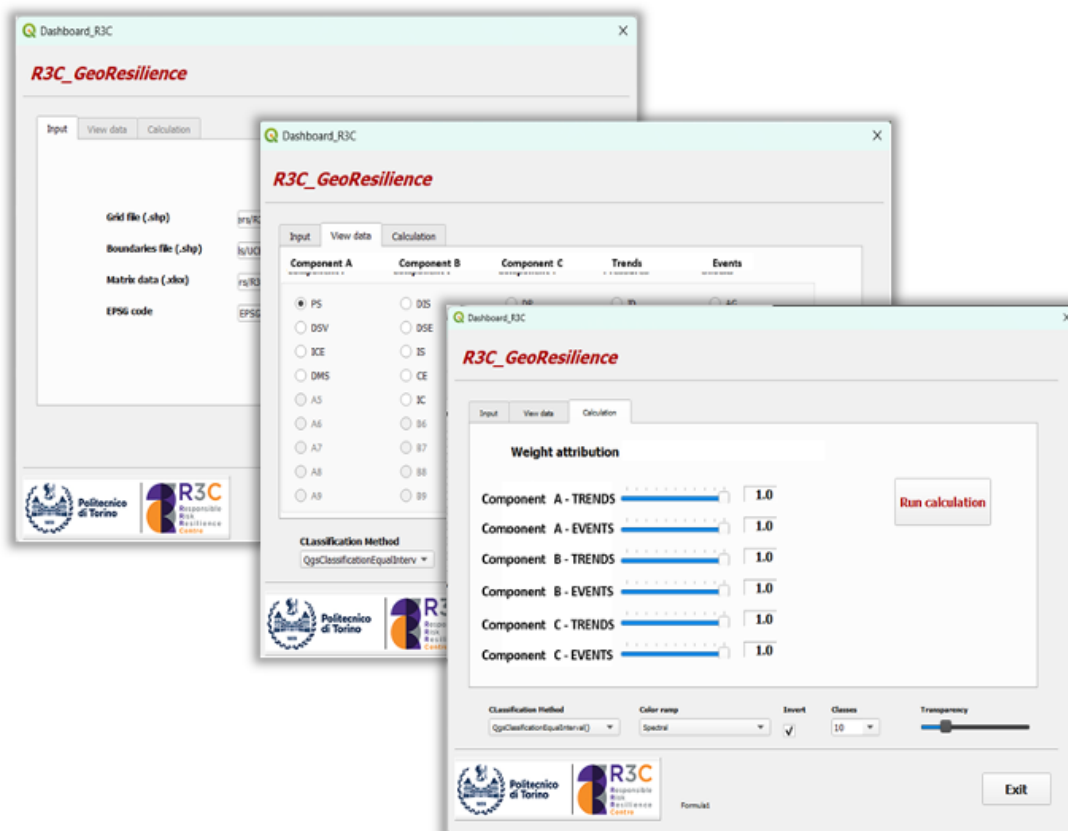
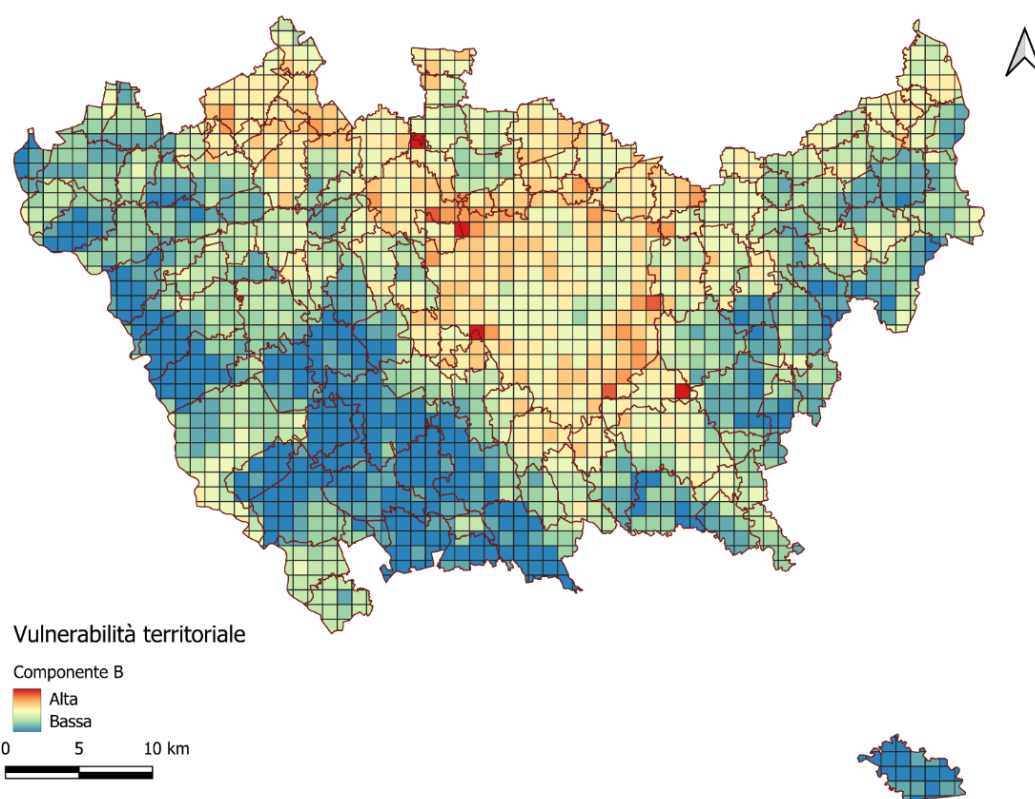
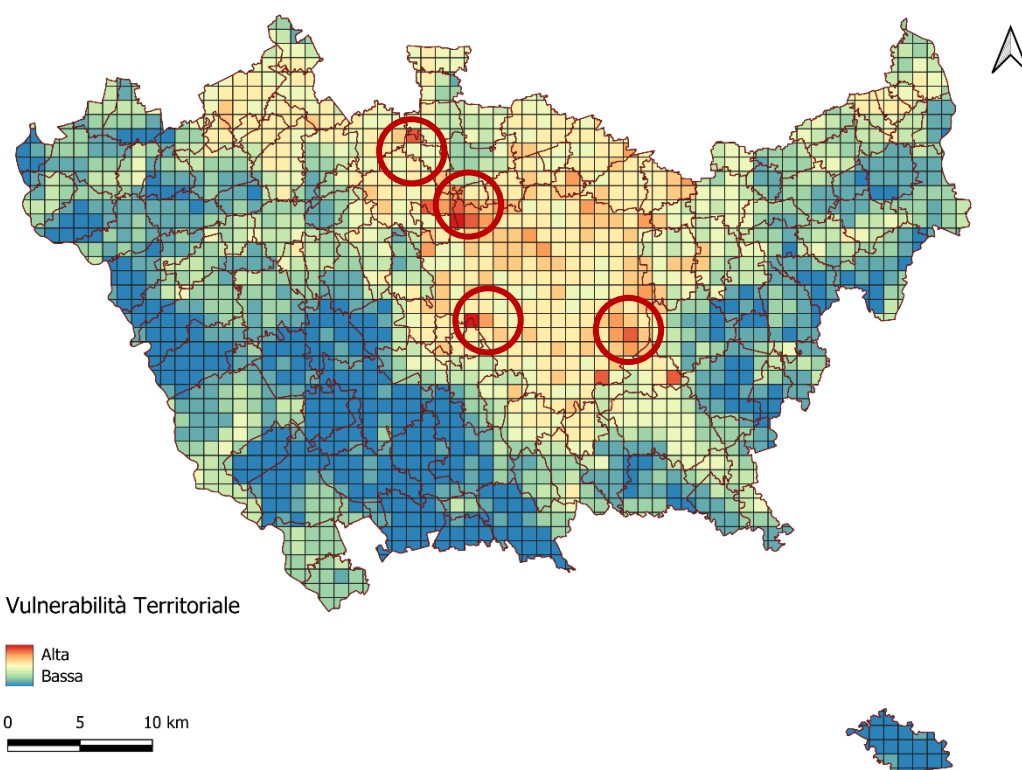


Figura 7, selezionando solo l'una o l'altra componente in analisi è possibile ottenere singole rappresentazioni delle CoS relate con gli indicatori di *Hazard*. Queste mappe delle componenti specifiche permettono di notare differenze nella distribuzione delle vulnerabilità sul territorio che diversamente sarebbe più difficile far emergere.

Per quanto riguarda *Natural environment and landscape* (CoS A) i comuni maggiormente interessati da vulnerabilità sono Milano, con una loro concentrazione in aree periferiche del comune come per l'area confinante con i comuni di Pero, Rho e Baranzate o la zona omogenea Nord Milano comprendente i comuni di Cusano Milanino, Bresso e Cormano. Queste zone con una vulnerabilità diffusa fanno principalmente riferimento ad indicatori che in aree fortemente urbanizzate come tutta la parte Nord Milano e Nord Ovest sono caratterizzati da alti valori di vulnerabilità territoriali.

Per CoS B, *Built environment, cultural heritage and infrastructure*, emerge dubito alla vista il miglioramento della situazione della parte centrale del comune di Milano, si denota invece maggiori vulnerabilità delle aree periferiche del comune. Queste si estendono anche ai comuni direttamente confinanti, come nel caso dei comuni di Rozzano, Opera e San Donato Milanese. Si nota anche una maggiore vulnerabilità diffusa nella parte nord della zona omogenea Adda Martesana, dovuta ad una mancanza diffusa di servizi basilari come servizi scolastici e sanitari (B3 e B4).

Un notevole cambiamento è visibile per la *Conditions of the System C in Economy and Society*, dove è possibile visionare una diffusa riduzione della vulnerabilità nelle aree omogenee del Magentino ed Abbiatese, dell'Alto Milanese e dell'area Adda Martesana, dove risulta predominante il colore blu e verde. Risulta infatti, estremamente visibile, viste le dimensioni del comune, come l'unico comune colpito da maggiori vulnerabilità è quello di Milano. All'interno di questo, infatti, si concentrano la maggioranza delle aree rosse, fatta eccezione dei comuni di Nord Milano che presentano le stesse problematiche diffuse (C1, C4 e C5).



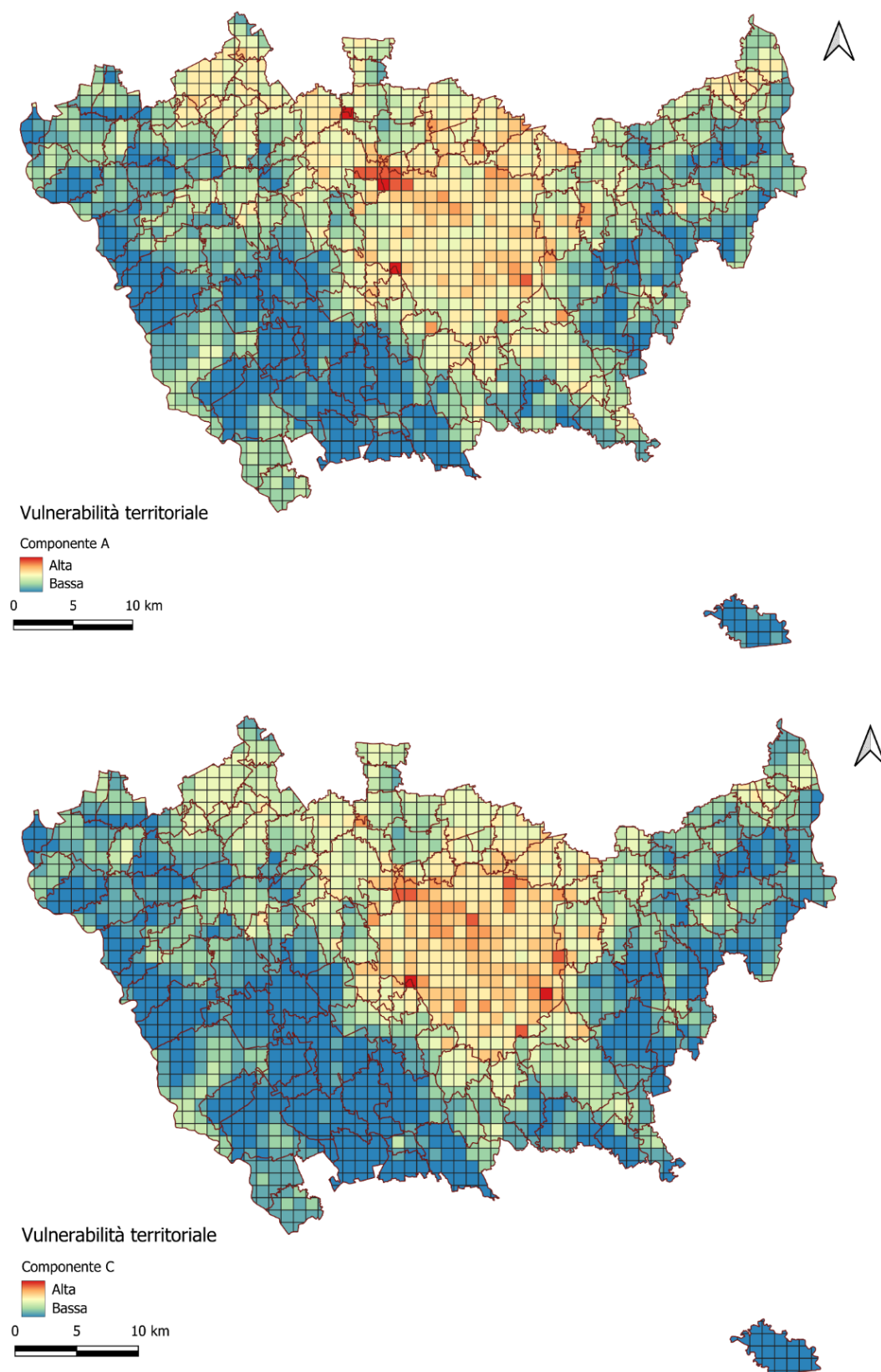


Figura 29 - Rappresentazioni spaziali della vulnerabilità territoriale totale e delle vulnerabilità che emergono dalle tre componenti del CoS A, B e C poste a confronto. Elaborazione propria.

08

CONCLUSIONI

Questo elaborato di tesi ha consentito di costruire una rappresentazione articolata e integrata delle vulnerabilità territoriali della Città Metropolitana di Milano, restituendo un quadro interpretativo capace di mettere in relazione le principali componenti strutturali, ambientali e sociodemografiche del contesto analizzato. I risultati dell'analisi evidenziano con chiarezza come le maggiori condizioni di vulnerabilità si concentrino in ambiti urbani centrali e in aree caratterizzate da forte continuità insediativa, mentre livelli inferiori emergono nelle zone periferiche e nei contesti a maggiore matrice rurale. Questa configurazione spaziale non si limita a descrivere una distribuzione statica delle criticità, ma riflette dinamiche territoriali consolidate, riconducibili ai processi di urbanizzazione intensiva, all'elevato grado di artificializzazione del suolo, alla densificazione edilizia e all'intensificazione delle pressioni antropiche che caratterizzano il sistema metropolitano milanese. La rappresentazione spaziale resa possibile dall'approccio adottato consente di superare una visione settoriale e frammentata della vulnerabilità, offrendo un'interpretazione sistemica fondata sull'interazione tra fattori diversi. Le componenti ambientali, morfologiche e sociodemografiche non vengono considerate isolatamente, ma ricondotte a un quadro unitario che restituisce la sensibilità complessiva del territorio agli stress ambientali e alle pressioni croniche. In questo senso, la mappa finale non rappresenta una semplice sovrapposizione di indicatori, bensì un dispositivo interpretativo in grado di far emergere come la vulnerabilità sia il risultato di relazioni complesse e non riducibili ad una singola dimensione analitica. Un ulteriore elemento di rilievo è rappresentato dalla capacità dell'analisi di intercettare gradienti e discontinuità spaziali anche all'interno dei singoli contesti comunali. L'adozione di una griglia di rappresentazione ha permesso di affiancare e integrare la lettura amministrativa tradizionale del territorio, mettendo in evidenza una distribuzione delle condizioni di vulnerabilità fortemente

eterogenea e strettamente legata alla struttura fisica e funzionale del sistema metropolitano. Questo aspetto rafforza il valore conoscitivo dei risultati, mostrando come le fragilità territoriali non siano uniformi né facilmente riconducibili ai confini istituzionali, ma si articolino in relazione a dinamiche locali e a specifiche configurazioni spaziali. Nel complesso, i risultati confermano la validità di un approccio orientato alla lettura sistemica della vulnerabilità e dimostrano come, anche in assenza di una pesatura degli indicatori, sia possibile individuare pattern territoriali coerenti e significativi, capaci di supportare una riflessione critica sulle condizioni di fragilità del territorio metropolitano.

L'applicazione della metodologia R3C, sviluppata dal Resilient Risk Research Centre del Politecnico di Torino, a una scala territoriale metropolitana ha rappresentato uno degli aspetti più rilevanti e innovativi del lavoro di tesi. L'esperienza ha consentito di testarne la flessibilità e la capacità di adattamento a un contesto complesso come quello della CMMi, caratterizzato da una marcata eterogeneità spaziale e da forti interdipendenze tra sistemi ambientali, insediativi e socioeconomici. In questo senso, l'approccio r3c si è dimostrato efficace nel supportare una lettura integrata delle vulnerabilità, favorendo l'interpretazione delle dinamiche territoriali attraverso l'uso combinato di indicatori e strumenti cartografici. Allo stesso tempo, l'estensione della metodologia a questa scala ha evidenziato alcune criticità e la necessità di un'attenta calibrazione delle scelte analitiche: prima fra tutte, la selezione degli indicatori e le modalità di aggregazione assumono un ruolo centrale nel determinare la capacità del modello di restituire in modo fedele la complessità del territorio analizzato. L'applicazione metropolitana ha infatti reso evidente come strumenti concepiti per contesti più circoscritti richiedano adattamenti metodologici per mantenere la loro efficacia interpretativa su territori estesi e così tanto differenziati. Nonostante ciò, l'esperienza conferma il potenziale della metodologia R3C come quadro concettuale e operativo solido, capace di essere declinato su scale diverse, a condizione di un'attenta riflessione sulle assunzioni di base e sulle scelte analitiche adottate.

8.1 Riflessione critica dei risultati

Al fine di comprendere al meglio le rappresentazioni della vulnerabilità territoriale complessiva, diventa necessario specificare quali sono gli aspetti che influenzano le aree che presentano maggiori elementi di vulnerabilità. Come visibile nella *Figura 29* sono state riportate le mappe di vulnerabilità totale e quelle relative alle *conditions of the system A, B e C* per rendere facilmente comprensibile le motivazioni alla base delle aree di vulnerabilità.

Come già spiegato in precedenza gli aspetti di vulnerabilità non si circoscrivono

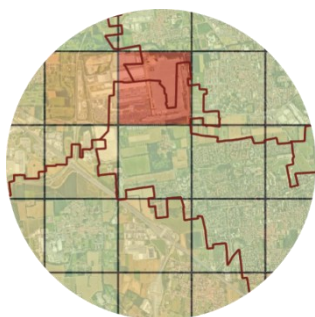


Figura 30 - Zoom n°1.
Elaborazione propria.

ad un solo riquadro ma sono degli aspetti che influenzano anche le aree circostanti, e come spiegato in precedenza il colore dei vari km² sono il risultato della media dei valori dei diversi indicatori. Basandosi su questo aspetto metodologico, è quindi possibile comprendere le motivazioni alla base della area di maggior vulnerabilità del primo zoom in quanto l'unico riquadro rosso corrisponde alla presenza del Centro Commerciale - il

comune limitrofo di Garbagnate Milanese, e la presenza limitrofa di campi coltivati che rappresentano aspetti qualificati come negativi per gli indicatori della componente A delle *conditions of the system*. Il resto del territorio riportato nello zoom riporta degli elementi negativi quali la mancanza di strutture sanitarie (B3) e scolastiche (B4), così come risulta presente anche un'alta percentuale di popolazione vulnerabile ad eventi avversi (C1). Pur non risultando un'area particolarmente colpita da isole di calore (E2) grazie alla presenza di aree coltivate, il territorio risulta un'area vittima di alti livelli di emissioni di inquinanti (E1).

Per quanto riguarda il secondo zoom, l'area in analisi è collocata tra il comune di Pero e Bollate, ed il confine nord-ovest di Milano, area che presenta un elevato tasso di urbanizzazione. Per quanto concerne il CoS A, tutti gli indicatori presentano valori estremamente bassi, così per quanto riguarda gli indicatori su strutture sanitarie (B3) e scolastiche (B4). Per quanto riguarda invece la componente C, si ha un indice di dipendenza strutturale



Figura 31 - Zoom n°2.
Elaborazione propria.

basso (C2) mentre una vulnerabilità non indifferente è la presenza di popolazione vulnerabile agli eventi avversi (C1). In quest'area, la vulnerabilità viene aggravata dalla presenza di entrambi gli *events*, ovvero sia per la presenza di emissioni inquinanti (E1) che per le isole di calore (E2).

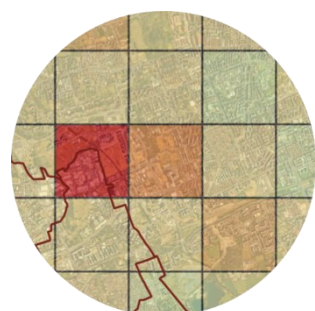


Figura 31 - Zoom n°3.
Elaborazione propria.

Nel caso della terza area riportata negli zoom, riguardante l'area a confine sud-ovest del comune di Milano, questa è evidenziata come vulnerabile in rosso nella rappresentazione complessiva oltre che nelle rappresentazioni delle CoS A, B e C. Trattandosi di un'area completamente urbanizzata, se non per piccole parti, sia la funzionalità ecologica (A2) che la presenza di verde pubblico (A3) presentano valori elevati, quindi estremamente negativi, a questi si aggiunge la quasi completa assenza di tratti di pista ciclabile (A4). Quest'area presenta un'assenza

di servizi quali strutture sanitarie (B3) e scolastiche (B4), pur invece presentando un'alta percentuale di popolazione vulnerabile (C1) di età inferiore ai 5 anni e superiore ai 65 anni. Altro aspetto fondamentale sono gli alti valori di fabbisogno abitativo (C4) che riguardano sia l'area del comune di Milano compresa nello zoom che le parti di comuni Cesano Boscone e Corsico. A differenza delle zone circostanti o visionate in precedenza, qui è presente un valore più alto di dinamica di consumo del suolo (T2) dovuta alla recente realizzazione del plesso residenziale nelle vicinanze del Fiume Lambro, al confine con Cesano Boscone.

L'area analizzata nell'ultimo zoom realizzato rappresenta il confine sud-est del comune di Milano e parti del comune di Ponte Lambro. Il territorio presenta riquadri con valori elevati di vulnerabilità per funzionalità ecologica (A2), presenza di verde pubblico (A3) e presenza di infrastrutture ciclabili (A4), situazione molto simile anche per gli indicatori delle CoS B. Mentre, si nota una diminuzione dei valori relativi agli indicatori di reddito medio (C3), fabbisogno abitativo



Figura 32 - Zoom n°4.
Elaborazione propria.

(C4) solo nella parte non riguardante il comune di Milano, per l'indicatore di valore immobiliare territoriale (C5) relativo alle fasce OMI e del tasso di dipendenza economica (C6). Nel quadrante rosso della figura 32 si ha un valore elevato riguardante la dinamica di consumo del suolo (T2) tra 2012 e 2023 dovuto probabilmente alla realizzazione della Arena Santa Giulia - Ice Hockey Arena, realizzata in previsione delle Olimpiadi Invernali Milano-Cortina 2026. Vista la presenza di numerosi raccordi autostradali nelle vicinanze non stupisce l'elevata presenza di emissioni inquinanti (E1) e di isole di calore (E2).

I risultati ottenuti devono tuttavia essere interpretati alla luce di alcuni limiti metodologici che ne circoscrivono il campo di validità, in primis, l'assenza di un processo partecipativo con esperti del territorio, elemento centrale della metodologia R3C per la costruzione della matrice di vulnerabilità veritiera a livello locale, ha reso necessario attribuire un peso uniforme agli indicatori considerati. Questa scelta, pur consentendo l'implementazione del modello e la produzione delle mappe finali, introduce una semplificazione significativa dell'analisi, riducendo la capacità del metodo di cogliere in modo differenziato l'incidenza dei singoli fattori sulle condizioni di vulnerabilità territoriale. Tale limite non compromette la coerenza complessiva del lavoro, ma ne rafforza piuttosto la natura esplorativa e sperimentale. L'analisi condotta può essere letta come un primo livello di interpretazione delle vulnerabilità territoriali, utile ad individuare tendenze generali e pattern spaziali, ma suscettibile di ulteriori approfondimenti e affinamenti. In questa prospettiva, i limiti metodologici emersi non rappresentano criticità, ma anche elementi di riflessione che contribuiscono a delineare possibili sviluppi futuri del modello

ed a chiarire le condizioni entro cui i risultati possono essere utilizzati in modo consapevole. Nonostante quanto appena evidenziato, il lavoro dimostra come strumenti di analisi integrata delle vulnerabilità possano costituire un supporto significativo per processi di pianificazione territoriale e per la definizione di strategie orientate alla resilienza. La possibilità di individuare ambiti prioritari di intervento, di leggere le criticità territoriali in una prospettiva sistemica e di supportare decisioni informate rappresenta un valore aggiunto rilevante, soprattutto in contesti metropolitani complessi e soggetti a pressioni ambientali e sociali crescenti. La restituzione cartografica delle vulnerabilità, in particolare, si configura come uno strumento conoscitivo estremamente utile per affiancare le politiche di governo del territorio, offrendo una base informativa integrata su cui costruire strategie di adattamento e mitigazione. In prospettiva futura, sviluppi successivi della ricerca potrebbero rafforzare ulteriormente il potenziale operativo dell'approccio adottato. L'integrazione di un processo partecipativo per la pesatura degli indicatori consentirebbe di affinare la rappresentazione delle vulnerabilità, rendendola più aderente alle specificità locali e alle percezioni degli attori coinvolti. Inoltre, il confronto tra scenari alternativi di vulnerabilità, così come l'applicazione della metodologia ad altri contesti territoriali, permetterebbe di testarne la robustezza e la trasferibilità, contribuendo a consolidare il ruolo della metodologia R3C come strumento a supporto delle politiche di resilienza territoriale. In questo senso, questo lavoro di tesi si pone non solo come un esercizio di analisi applicata, ma come un contributo conoscitivo che apre a ulteriori riflessioni e sviluppi nel campo della pianificazione e della gestione dei territori complessi.

09

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR). (2012). *Making cities resilient—My city is getting ready*. Tratto da <http://www.unisdr.org/english/campaigns/campaign2010-2015/>
- Anelli, D. T. (2022). Urban resilience against natural disasters: Mapping the risk with an innovative indicators-based assessment approach. *Journal of Cleaner Production*, 371, 133496., 371(133496). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133496>
- Armaş, I. &. (2025). From static to dynamic: Conceptual and operational developments of vulnerability. *iScience*, 28(112070). doi:<https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.112070>
- Barnes, A. &. (2017). Putting spatial resilience into practice. *Urban Form*. doi:<https://doi.org/10.1007/s12132-017-9303-6>
- Beltramino, S. S. (2022). Assessing territorial vulnerability. *Tema. Journal of Land Use, Mobility and Environment*, 15(3), 355-375. doi:<http://dx.doi.org/10.6092/1970-9870/9069>
- Benczur, P. C. (2023). Monitoring resilience in the EU: Evidence from the 2023 edition of the Resilience Dashboards. *Publications Office of the European Union*. doi:<https://doi.org/10.2760/63111>
- Birkmann. (2013). *Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Towards Disaster Resilient Societies*.
- Birkmann, J. (. (2006). *Measuring vulnerability to natural hazards: Towards disaster resilient societies*. *United Nations University Press*.
- Brunetta, G. &. (2019). Mapping urban resilience for spatial planning—A first attempt to measure the vulnerability of the system. *Sustainability*, 11(2331). doi: <https://doi.org/10.3390/su11082331>
- Brunetta, G. C. (2019). Territorial Resilience: Toward a Proactive Meaning for Spatial Planning. *Sustainability*, 11(8), 2286. doi:<https://doi.org/10.3390/su11082286>

- Brunetta, G. F. (2021). Bridging the Gap: The Measure of Urban Resilience. 13(3), 1113. doi:<https://doi.org/10.3390/su13031113>
- Brunetta, G. M. (2025). Mapping territorial vulnerability for resilience planning: The R3C-GeoResilience tool applied to the Union of Bassa Romagna (Italy). *Urban Science*.
- Carmin, J. N. (2012). *Progress and challenges in urban climate adaptation planning: Results of a global survey*. Cambridge: MIT.
- Commissione Europea. (2020). *Strategic Foresight Report 2020: Charting the course towards a more resilient Europe*. Tratto da https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/strategic-foresight/2020-strategic-foresight-report_en
- Commissione Europea, J. R. (2021). *Resilience dashboards: Monitoring resilience in the EU and its Member States*. Publications Office of the European Union. doi: <https://doi.org/10.2760/609441>
- Cutter. (1996). Vulnerability to Environmental Hazards. *Progress in Human Geography*, 20(4), 529 - 539.
- Cutter. (2024). The origin and diffusion of the Social Vulnerability Index (SoVI). *International Journal of Disaster Risk Reduction*.
- Cutter, B. &. (2003). Social Vulnerability to Environmental Hazards. 84(2), 242 - 261.
- Cutter, S. L. (2008). A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. . *Global Environmental Change*, 18(4), 598 - 606. Tratto da <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.200>
- Davoudi, S. (2012). Resilience: A bridging concept or a dead end? *Planning Theory & Practice*, 13(2), 299-307.
- Davoudi, S. B. (2013). Evolutionary resilience and strategies for climate adaptation. *Planning Practice & Research*, 35(3), 307-322. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/02697459.2013.787695>
- Deltares . (2023). *ReachOut helps European cities with new climate adaptation toolkit*. .
- Deltares. (s.d.). *REACHOUT*. Tratto da <https://www.deltares.nl/en/expertise/projects/reachout>
- Europea, C. (2007). *Libro Verde. L'adattamento ai cambiamenti climatici in Europa - quali possibilità di intervento per l'UE*.
- European Commission. (2023). 2023 European Semester: Spring Package [Communication from the Commission]. Tratto da https://commission.europa.eu/publications/2023-european-semester-spring-package_en
- European Environment Agency. (s.d.). *Social vulnerability index (SVI). Climate-ADAPT*. . Tratto da <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/mission/solutions/tools/social-vulnerability-index-svi>

- FEMA. (s.d.). *Using HAZUS for Mitigation Planning*. Tratto da https://www.fema.gov/sites/default/files/documents/fema_using-hazus-mitigation-planning_6.1.pdf
- FEMA, F. E. (1997). HAZUS: Estimated annualized earthquake losses for the United States. .
- FEMA, F. E. (2003). Map Modernization, Guidelines, and Specifications for Flood Hazard Mapping Partners; Appendix A: Guidance for Aerial Mapping and Surveying.
- Fitton, J. M., O'Dwyer, B., & Maher, B. (2022). Developing a social vulnerability to environmental hazards index to inform climate action in Ireland. *Irish Geography*, 157-180. Tratto da <https://doi.org/10.55650/igj.2021.1464>
- Gallina, V. T. (2016). A review of multi-risk methodologies for natural hazards: Consequences and challenges for a climate change impact assessment. *Journal of Environmental Management*.
- Graveline, M.-H. &. (2022). Disaster risk resilience: Conceptual evolution, key issues, and opportunities. *International Journal of Disaster Risk Science*, 13(3), 330-341. doi:<https://doi.org/10.1007/s13753-022-00419-0>
- Hewitt, C. M. (2025). Smart Citizens Enabling Resilient Neighbourhoods (SCERN): Participatory mapping platform for resilienc. *Cities*, 106101.
- Hosseinpour, V. S.-J. (2021). A comprehensive review of seismic hazard and loss estimation software. *Natural Hazard*, 108, 661-690. Tratto da <https://www.fema.gov/flood-maps/tools-resources/flood-map-products/hazus/documentation>
- IFHV, B. E. (2022). WorldRiskReport 2022: Focus: Digitalization & new completely revised WorldRiskIndex.
- IFHV, B. E. (2024). *WorldRiskReport 2024: Focus: Multiple Crises*. Bündnis Entwicklung Hilft. Tratto da <https://weltrisikobericht.de/worldriskreport/>
- IFHV, B. E. (2025). WorldRiskReport 2025: Focus: floods. Tratto da <https://weltrisikobericht.de/worldriskreport/>
- Imperiale, A. &. (2020). Barriers to enhancing disaster risk reduction and community resilience: Evidence from the L'Aquila disaster. *Politics and Governance*, 8(4), 232-243. Tratto da <https://doi.org/10.17645/pag.v8i4.3179>
- Ingegnoli, V. (1993). *Fondamenti di ecologia del paesaggio*. Pitagora Editrice.
- IPCC, I. P. (2012). Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC, I. P. (2019). Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. .

- IPCC, I. P. (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. .
- IPCC, I. P. (2022). Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- James M. Fitton, B. O. (2022). Developing a social vulnerability to environmental hazards index to inform climate action in Ireland. *Irish Geography*, 157-180. Tratto da <https://doi.org/10.55650/igj.2021.1464>
- Milano, C. M. (2021). *Piano Territoriale Metropolitano: Relazione Generale (Delibera del Consiglio Metropolitano n. 16 dell'11 maggio 2021; pubblicato sul BURL - Serie Avvisi e Concorsi, n. 40 del 06/10/2021)*.
- Milano, C. M. (2025). Piano strategico triennale del territorio metropolitano 2025-2027: Prospettive metropolitane. . Tratto da <https://www.cittametropolitana.mi.it/Portale/PS/index.html>
- Mohabat Doost, D. P. (2025). R3C-GeoResilience. Il plugin open-source per mappare le vulnerabilità territoriali. doi:<http://hdl.handle.net/2318/2039531>
- Neighbourhoods, B. R. (2016). *Characteristics of a resilient community or neighbourhood: Checklist*. Tratto da https://www.resilientneighbourhoods.ca/wp-content/uploads/2016/06/RN_Checklist_web.pdf
- Neighbourhoods, B. R. (2017). *Why resilience? Why today? - Approach to Building Resilient Neighbourhoods*. Tratto da <https://www.resilientneighbourhoods.ca/wp-content/uploads/2017/03/BRN-Approach.pdf>
- Neighbourhoods, B. R. (2025). *About Building Resilient Neighbourhoods*. Tratto da <https://www.resilientneighbourhoods.ca/about/>
- Neighbourhoods, R. (2025). *Neighbours Helping Neighbours: Learning Report*. Tratto da <https://www.resilientneighbourhoods.ca/wp-content/uploads/2025/07/NHN-Learning-Report.pdf>
- OMI, A. d.-O. (s.d.). *Manuale della Banca Dati Quotazioni dell'Osservatorio del Mercato Immobiliare: Istruzioni tecniche per la formazione della Banca Dati Quotazioni OMI*. Agenzia delle Entrate.
- Preston, B. L. (2011). Putting vulnerability to climate change on the map: A review of approaches, benefits, and risks. *Sustainability Science*, 6, 177-202. doi:<https://doi.org/10.1007/s11625-011-0129-1>
- Ran, J. M. (2020). The application of frameworks for measuring social vulnerability and resilience to geophysical hazards within developing countries: A systematic review and narrative synthesis. *Science of The Total Environment*, 711, 134486.

- ReachOut Cities. (s.d.). *ReachOut Cities*. Tratto da <https://reachout-cities.eu/>
- Scawthorn, C. F. (2006). HAZUS-MH flood loss estimation methodology. *Natural Hazard Review*, 45 - 59.
- Tate, E. M. (2014). Uncertainty and sensitivity analysis of the HAZUS-MH flood model. *Natural Hazards Review*. 15(4). Tratto da [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.0000167](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000167)
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2017). *Terminology. Online glossary*. . Tratto da <https://www.undrr.org/terminology>
- Wamsler, C. B. (2013). Planning for climate change in urban areas: From theory to practice. *Journal of Cleaner Production*, 50, 68-81.
- WHO, W. H. (2021). WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.
- WHO, W. H. (2025). Tratto da Types of pollutants. In Air quality, energy and health.: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/health-impacts/types-of-pollutants>
- Xue, T. K. (2025). Health-Oriented Strategy for Clean Air and Climate Actions: Differential Health Effects of Atmospheric Components. *Annual Review of Public Health*, 46(1), . . 275-294. Tratto da <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-071723-01572>