EUT EDIZIONI UNIVERSITÀ DI TRIESTE

Bollettino della ASSOCIAZIONE ITALIANA di CARTOGRAFIA 2024 (180), 156-173

DOI: 10.13137/2282-572X/37651

ISSN 2282-572X (online) ISSN 0044-9733 (print)
https://www.openstarts.units.it/handle/10077/9933

Ubicazione ottimale di Soluzioni Basate sulla Natura alla scala comunale a supporto della pianificazione territoriale

Optimal siting of Nature-Based Solutions at the municipal scale to support spatial planning

Noemi Mannucci*

* Università La Sapienza Roma, noemi.mannucci@uniroma1.it – Università degli Studi di Firenze, noemi.mannucci@unifi.it

Riassunto

L'implementazione di Soluzioni Basate sulla Natura (*Nature-Based Solutions*, NBS) lungo i sistemi fluviali rappresenta una strategia innovativa per mitigare i rischi di inondazione, migliorare la gestione delle risorse idriche e potenziare i servizi ecosistemici collegati al bacino idrografico. Questo studio propone una metodologia scalabile, basata sull'integrazione di dati di telerilevamento e cartografie tematiche, per analizzare il rischio di inondazione e valutare il bilancio tra l'offerta e la domanda di servizi ecosistemici in un territorio di interesse, al fine di supportare i pianificatori territoriali nell'identificazione delle aree più idonee all'implementazione di Soluzioni Basate sulla Natura. Il comune di Pontedera (PI) è stato scelto come caso di studio rappresentativo per testare l'efficacia della procedura in un contesto residenziale e produttivo caratterizzato da un alto rischio idraulico, fornendo un esempio concreto di applicazione. La metodologia proposta rappresenta uno strumento utile per ottimizzare la pianificazione territoriale, favorendo un uso efficiente delle risorse economiche e promuovendo la sostenibilità e la resilienza ambientale, sociale ed economica.

Parole chiave

Soluzioni Basate sulla Natura, rischio idraulico, carte tematiche, telerilevamento, pianificazione territoriale, servizi ecosistemici, sostenibilità.

Abstract

The implementation of Nature-Based Solutions (NBS) along river systems represents an innovative strategy to mitigate flood risks, improve water resources management, and enhance ecosystem services associated to the watershed. This study proposes a scalable methodology based on the integration of remote sensing data and thematic maps to analyze flood risk and assess the balance between the supply and demand of ecosystem services in a target area, aiming to support territorial planners in identifying optimal locations for NBS implementation. The municipality of Pontedera (PI) was selected as a representative case study to assess the effectiveness of the framework in a residential and industrial context characterized by high hydraulic risk, providing a concrete example of its application. The proposed methodology serves as a useful tool for optimizing territorial planning, promoting the efficient use of available economic resources, and fostering environmental, social, and economic sustainability and resilience.

Keywords

Nature-Based Solutions, hydraulic risk, thematic maps, remote sensing, territorial planning, ecosystem services, sustainability.

1. Introduzione

Il bacino idrografico è un sistema complesso che comprende il fiume come corpo principale ma anche gli ecosistemi naturali e antropici che concorrono alla formazione dei deflussi naturali e alla regimazione degli eventi di piena. Questi ecosistemi sono fortemente soggetti alle pressioni esterne come la rapida urbanizzazione, il cambiamento climatico e le pratiche agricole intensive che ne compromettono la loro integrità ed efficienza. Alcuni impatti sono così significativi da essere irreversibili e da determinare importanti cambiamenti negli equilibri ecologici e quindi direttamente sulla vita umana. Questi impatti, spesso invisibili nel breve termine, si manifestano con forza crescente, esacerbando disuguaglianze sociali e aumentando la vulnerabilità delle comunità più esposte (Allan, Castillo, 2007). In questo scenario complesso, emerge la necessità di nuove strategie di gestione che non solo affrontino le sfide immediate, ma garantiscano anche la sostenibilità a lungo termine intesa come capacità di mantenere nel tempo qualità ecologica e servizi idrici misurabili (attenuazione dei picchi di piena, stabilità dei deflussi di base) con costi di gestione proporzionati. Un'opportunità concreta e innovativa risiede nell'integrazione delle Soluzioni Basate sulla Natura (*Nature-Based Solutions*, NBS) nella pianificazione territoriale e nella gestione delle risorse idriche.

1.1 Rischio idraulico

Il rischio idraulico rappresenta una delle sfide più critiche per la gestione sostenibile del territorio, soprattutto in un contesto globale caratterizzato dai cambiamenti climatici e dalle crescenti pressioni antropiche. Questo rischio è definito dalla combinazione di tre fattori principali: la pericolosità degli eventi idraulici, l'esposizione degli elementi vulnerabili e la vulnerabilità intrinseca di tali elementi, che determina la loro capacità di adattamento o resistenza agli eventi avversi. Sulla base di queste variabili si stima il danno, ovvero il grado di perdita prevedibile per fenomeni di specifica intensità, considerando sia il valore che la vulnerabilità degli elementi esposti, oltre alla morfologia del terreno e all'uso del suolo. Negli ultimi decenni, l'aumento della frequenza e dell'intensità degli eventi idrologici e meteorologici estremi è stato ampiamente documentato, con le alterazioni dei cicli idrologici (Allan et al., 2020). Fenomeni come il riscaldamento globale e l'intensificazione delle precipitazioni estreme hanno aumentato il rischio di alluvioni fluviali, che si verificano quando a seguito di piogge persistenti e diffuse viene superata la capacità di contenimento dei corsi d'acqua. Parallelamente, piogge più intense e frequenti, congiuntamente alla crescita non pianificata degli insediamenti umani e l'impermeabilizzazione diffusa del suolo, che riducono significativamente la capacità del terreno di assorbire le acque meteoriche, portano ad alluvioni pluviali, aumentando il deflusso superficiale, il volume e la velocità dell'acqua che raggiunge i corpi idrici. Questi fenomeni non solo intensificano i danni materiali e infrastrutturali, ma compromettono anche la funzionalità ecologica degli ecosistemi fluviali, ostacolando processi naturali come la ricarica delle falde acquifere e il controllo dell'erosione (Bunster et al., 2021). Per far fronte a tali sfide, la gestione del rischio idraulico si è storicamente basata sull'utilizzo di infrastrutture grigie, come argini, dighe e canali di scolo, progettate per contenere e deviare le acque in eccesso. Sebbene queste soluzioni siano efficaci nel breve termine, presentano numerose limitazioni. In molti casi, spostano i problemi idraulici a valle, alterano profondamente gli ecosistemi fluviali e richiedono elevate risorse economiche per la loro costruzione e manutenzione. Inoltre, l'intensificazione degli eventi estremi legata ai cambiamenti climatici ha evidenziato l'insufficienza di tali approcci tradizionali per gestire il rischio idraulico in modo sostenibile ed efficace nel lungo termine (Peduzzi, 2019).

1.2 Le Soluzioni Basate sulla Natura e i servizi ecosistemici

Secondo la definizione fornita dall'IUCN (International Union for Conservation of Nature), le Soluzioni Basate sulla Natura rappresentano un approccio integrato e multifunzionale, ideato per affrontare le sfide della società contemporanea attraverso la protezione e il ripristino degli ecosistemi, migliorando al contempo il benessere umano, la biodiversità e la resilienza ambientale. Basate sul potenziamento dei processi ecologici naturali, le NBS affrontano problematiche complesse come il cambiamento climatico, la gestione delle risorse idriche e la mitigazione dei rischi naturali, inclusi eventi estremi come inondazioni e siccità (Cohen-Shacham et al., 2016). A differenza delle infrastrutture tradizionali "grigie", come dighe e canalizzazioni in cemento, le *Nature-Based Solutions* forniscono e potenziano

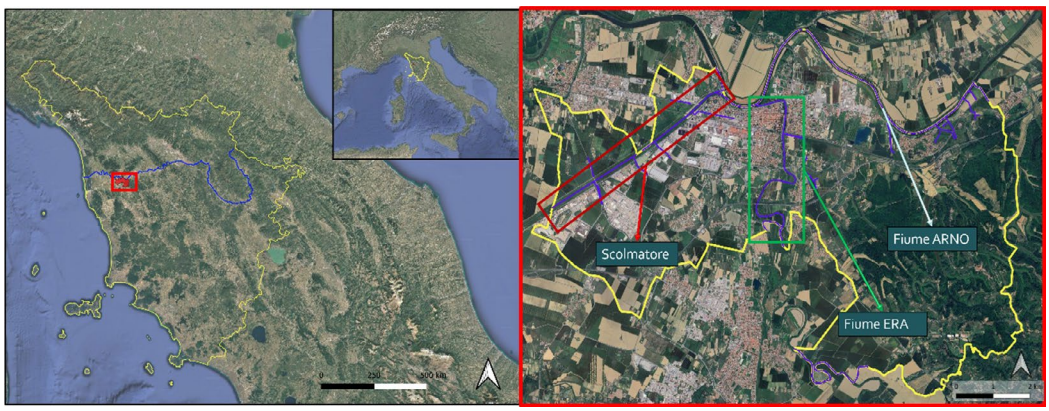
ZISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)

servizi ecosistemici. Questi servizi, definiti come i benefici diretti e indiretti forniti dagli ecosistemi naturali, comprendono funzioni cruciali come la regolazione del clima, la purificazione dell'acqua, il controllo dell'erosione, il sequestro di carbonio e il supporto alla biodiversità, che sono indispensabili per il benessere umano (Costanza et al., 1997; Haines-Young, Potschin, 2010). Ad esempio, la rinaturalizzazione dei corsi d'acqua migliora la capacità di assorbimento e regolazione del deflusso idrico, riducendo il rischio di inondazioni e incrementando la qualità delle acque, mentre le zone umide agiscono sia come filtri naturali sia come habitat fondamentali per la biodiversità locale. In contesti urbani, infrastrutture verdi come parchi e tetti verdi forniscono servizi essenziali quali la riduzione dell'effetto isola di calore, il miglioramento della qualità dell'aria e la creazione di spazi ricreativi che favoriscono il benessere psicofisico delle comunità (Kabisch et al., 2017; Raymond et al., 2017). Questi interventi, adottati con successo in numerosi contesti, dimostrano che le Soluzioni Basate sulla Natura non solo risolvono problemi specifici, ma producono vantaggi economici significativi nel lungo termine, grazie alla loro capacità di autogenerarsi e adattarsi ai cambiamenti ambientali. Ad esempi, il progetto europeo "Urban GreenUP" ha dimostrato come il greening urbano possa ridurre del 15% le temperature locali durante i periodi estivi, mitigando gli effetti del cambiamento climatico (Turhan, Gökçen Akkurt, 2018). L'integrazione della valutazione dei servizi ecosistemici nella pianificazione delle NBS consente di progettare interventi che non si limitano a rispondere a sfide immediate, ma che promuovono una gestione territoriale sostenibile e multifunzionale. Strumenti di analisi quantitativa e qualitativa, come modelli spaziali, dati satellitari e GIS, permettono di identificare i benefici ecosistemici a diverse scale e ottimizzare le soluzioni in funzione delle caratteristiche ecologiche e sociali dei territori (Nemec, Raudsepp-Hearne, 2013). Questo approccio non solo massimizza i benefici ambientali, ma favorisce il consenso sociale, rendendo gli interventi più accettabili e inclusivi. In definitiva, le Soluzioni Basate sulla Natura devono essere concepite come parte integrante di una visione olistica e multi-scalare del territorio, capace di affrontare le sfide attuali e future, contribuendo al raggiungimento degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile e alla conservazione degli ecosistemi (Müller et al., 2010; Nations (UN), 2015).

2. Materiali e metodi

2.1 Area di studio

FIGURA 1 – Inquadramento geografico dell'area di studio: Comune di Pontedera, situato in Toscana, Italia, con evidenza del fiume Arno, del fiume Era e dello scolmatore



FONTE: Elaborato con QGIS. Google Earth (2024) Pontedera (PI), Italia. Dati di Airbus, SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO, Landsat/Copernicus[1]

1 https://earth.google.com, ultimo accesso 23/11/24

ZISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)

L'area di studio selezionata per testare la metodologia proposta è il Comune di Pontedera, situato in provincia di Pisa, in area pianeggiante nel cuore della Toscana (Fig. 1). Il territorio è attraversato da tre principali corsi d'acqua: il fiume Arno, asse idrico principale della Toscana; il fiume Era, un affluente con caratteristiche torrentizie; e lo scolmatore di Pontedera, un canale artificiale costruito tra il 1953 e il 1987 per mitigare le piene dell'Arno e salvaguardare la città di Pisa. Tuttavia, nonostante la presenza di questa e altre opere di mitigazione di minore entità, il territorio continua ad essere altamente vulnerabile ad eventi di allagamento, soprattutto di origine pluviale, come dimostrano gli episodi ricorrenti registrati negli ultimi decenni (Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale, 2021). Dal punto di vista idrogeografico, Pontedera si trova a valle del bacino del fiume Arno, un'area particolarmente critica per la gestione delle risorse idriche e del rischio idraulico nel Distretto dell'Appennino Settentrionale. La posizione del comune, situato alla confluenza tra il fiume Era e l'Arno, amplifica il rischio di esondazioni fluviali, mentre la crescente impermeabilizzazione del suolo, tipica dei contesti urbani, incrementa la frequenza e la gravità degli allagamenti pluviali generati da precipitazioni intense. Questi fenomeni richiedono interventi mirati per ottimizzare la capacità del territorio di gestire eventi meteorologici estremi attraverso l'applicazione di Soluzioni Basate sulla Natura. Dal punto di vista gestionale, Pontedera, come molte comuni italiani, rappresenta un territorio complesso a causa della molteplicità di soggetti coinvolti nella pianificazione e gestione territoriale. La governance urbana è spesso caratterizzata dalla frammentazione delle competenze tra enti diversi, ciascuno con obiettivi e priorità potenzialmente divergenti (Sharma et al., 2018). Nel caso di Pontedera, la gestione del rischio idraulico coinvolge l'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale, la Regione Toscana e l'amministrazione comunale, con un'intersezione di competenze che include la pianificazione idraulica, lo sviluppo urbanistico e la tutela ambientale. Questa sovrapposizione di responsabilità può dar luogo a conflitti o ritardi nelle decisioni, influenzando negativamente l'efficacia degli interventi (Knieper, Pahl-Wostl, 2016). In questi contesti, le politiche di mitigazione del rischio, come l'implementazione di NBS, devono essere integrate con piani urbanistici e normative ambientali, il che rende necessario un coordinamento efficace tra i vari livelli di governance. Tuttavia, l'assenza di strumenti di gestione condivisi e di una visione strategica unitaria costituisce uno dei principali ostacoli all'implementazione efficace di interventi innovativi. Pontedera, in quanto nodo strategico per infrastrutture e attività produttive, riflette queste sfide in modo emblematico e rende questo territorio un caso studio ideale per testare approcci integrati e scalabili, come la metodologia proposta, che mira a individuare punti di applicazione delle Soluzioni Basate sulla Natura in modo efficace. Infine, Pontedera rappresenta anche un contesto strategico dal punto di vista economico e insediativo. La città è sede di importanti attività industriali, come lo stabilimento della Piaggio, ed è al centro di un sistema infrastrutturale che collega Pisa, Firenze e Livorno, tre delle principali città della Toscana. Questo fa sì che gli impatti di un evento alluvionale non si limitino al territorio comunale, ma abbiano ripercussioni su scala regionale, amplificando la necessità di un'efficace pianificazione e gestione del rischio. La combinazione di vulnerabilità fisiche, criticità gestionali e rilevanza economica rende Pontedera un'area di studio ideale per validare la metodologia proposta.

2.2 Carte tematiche e dati di telerilevamento

L'integrazione di diverse fonti di dati (tabella 1) è fondamentale per garantire un'analisi completa e accurata del territorio, specialmente in relazione a problematiche complesse come il rischio idraulico e la valutazione dei servizi ecosistemici. Le carte tematiche rappresentano uno strumento indispensabile per la pianificazione territoriale, poiché offrono una rappresentazione spaziale dettagliata delle caratteristiche del territorio e delle dinamiche in atto, facilitando l'identificazione delle aree ad alto rischio e l'analisi delle opportunità di intervento. La loro utilità risiede nella capacità di sintetizzare informazioni complesse in modo visivo e immediato, rendendo evidenti relazioni spaziali che difficilmente emergerebbero con altre tipologie di dati (Kraak, Ormeling, 2020). Ad esempio, le carte di pericolosità idraulica delimitano le aree soggette a inondazione e i relativi livelli di pericolosità attraverso l'applicazione di modelli idrologici e idraulici avanzati, considerando variabili chiave come i tempi di ritorno degli eventi estremi e la configurazione morfologica del territorio (Lastoria et al., 2021). L'efficacia di queste carte aumenta quando sono integrate con telerilevamento ottico da satellite e altimetria LiDAR (Light Detection and Ranging). In concreto, per la valutazione

ZISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)

dei servizi ecosistemici è stato utilizzato il prodotto Corine Land Cover (CLC) del Copernicus Land Monitoring Service/ EEA, una mappatura pan-europea derivata da immagini ottiche (Sentinel-2A/B MSI e Landsat 8 OLI) che classifica l'uso/ copertura del suolo in 44 classi e garantisce copertura omogenea e comparabilità su ampie estensioni. Per la componente morfologica e le limitazioni tecniche all'installazione delle NBS sono stati utilizzati Modelli Digitali del Terreno (DTM) da LiDAR, da cui è stata ricavata la pendenza dei siti. Questi dataset consentono monitoraggi multitemporali dei cambiamenti del paesaggio (de Araujo Barbosa, Atkinson, Dearing, 2015) e, grazie alla loro ampia copertura geografica e disponibilità periodica supportano metodologie scalabili come quella proposta. L'integrazione tra carte tematiche e prodotti derivati dal telerilevamento supera le limitazioni delle singole fonti e fornisce una visione multidimensionale del territorio, fondamentale per individuare le aree ottimali in cui implementare NBS, che richiedono una valutazione multicriterio che consideri una molteplicità di fattori ambientali e sociali (La Notte, Zulian, 2021). La metodologia si avvale di strumenti avanzati di analisi spaziale, in particolare dei Sistemi Informativi Geografici (GIS), fondamentali per l'elaborazione, la gestione e la rappresentazione dei dati territoriali. I GIS consentono di integrare e analizzare grandi volumi di informazioni provenienti da fonti eterogenee, come cartografie tematiche e dataset derivati da telerilevamento, garantendo una restituzione spaziale chiara e coerente. Tutti i layer sono stati elaborati in QGIS, ricondotti a un unico sistema di riferimento (Monte Mario / Italy zone 1 – Fuso Ovest, EPSG:3003) e ritagliati sull'area di studio. Quando opportuno, i raster sono stati convertiti in vettori (*polygonize*) per consentire interrogazioni sugli attributi (*extract by attribute*) e operazioni topologiche (ad esempio *intersect*). Sono state inoltre eseguite riclassificazioni e normalizzazioni per rendere confrontabili le variabili spaziali e migliorarne la resa cartografica. Ulteriori dettagli operativi sull'impiego del GIS sono riportati nel paragrafo 2.3 per ciascuna fase della metodologia.

TABELLA 1 – Carte e dati di telerilevamento utilizzati

Tipologia	**Fornitore**	**Risoluzione**
Pericolosità idraulica	ISPRA[1](2021)	10 m
Elementi a rischio	ISPRA[1](2021)	10 m
Classi di rischio	ISPRA[1] (2021)	10 m
Corine Land Cover (CLC)	Copernicus Land Monitoring Service[2] (2018)	100 m
Copertura del suolo	ISPRA (2023)[3] – Regione Toscana[4]	10 m
Modello Digitale del Terreno (DTM)	TINITALY (INGV)[5] – Regione Toscana[4]	10 m - 1 m
Gruppi idrologici del suolo	Regione Toscana[4]	10 m

FONTI: Geoportale Nazionale[2], Copernicus Land Monitoring Service[3], SINAnet Groupware[4], Geoportale GEOscopio Regione Toscana[5], Tinitaly[6]

2 http://www.pcn.minambiente.it/viewer/index.php?services=progetto_mappe_di_pericolosita_e_rischio_di_alluvioni, ultimo accesso 05/01/25

3 https://land.copernicus.eu/en/products/urban-atlas/urban-atlas-2018, ultimo accesso 23/12/24

4 https://groupware.sinanet.isprambiente.it/uso-copertura-e-consumo-di-suolo/library/copertura-del-suolo/carta-di-copertura-del-suolo, ultimo accesso 23/12/24

5 https://www502.regione.toscana.it/geoscopio/cartoteca.html, ultimo accesso 17/01/25

6 https://tinitaly.pi.ingv.it/, ultimo accesso 24/01/25.

ZISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)

2.3 Metodologia

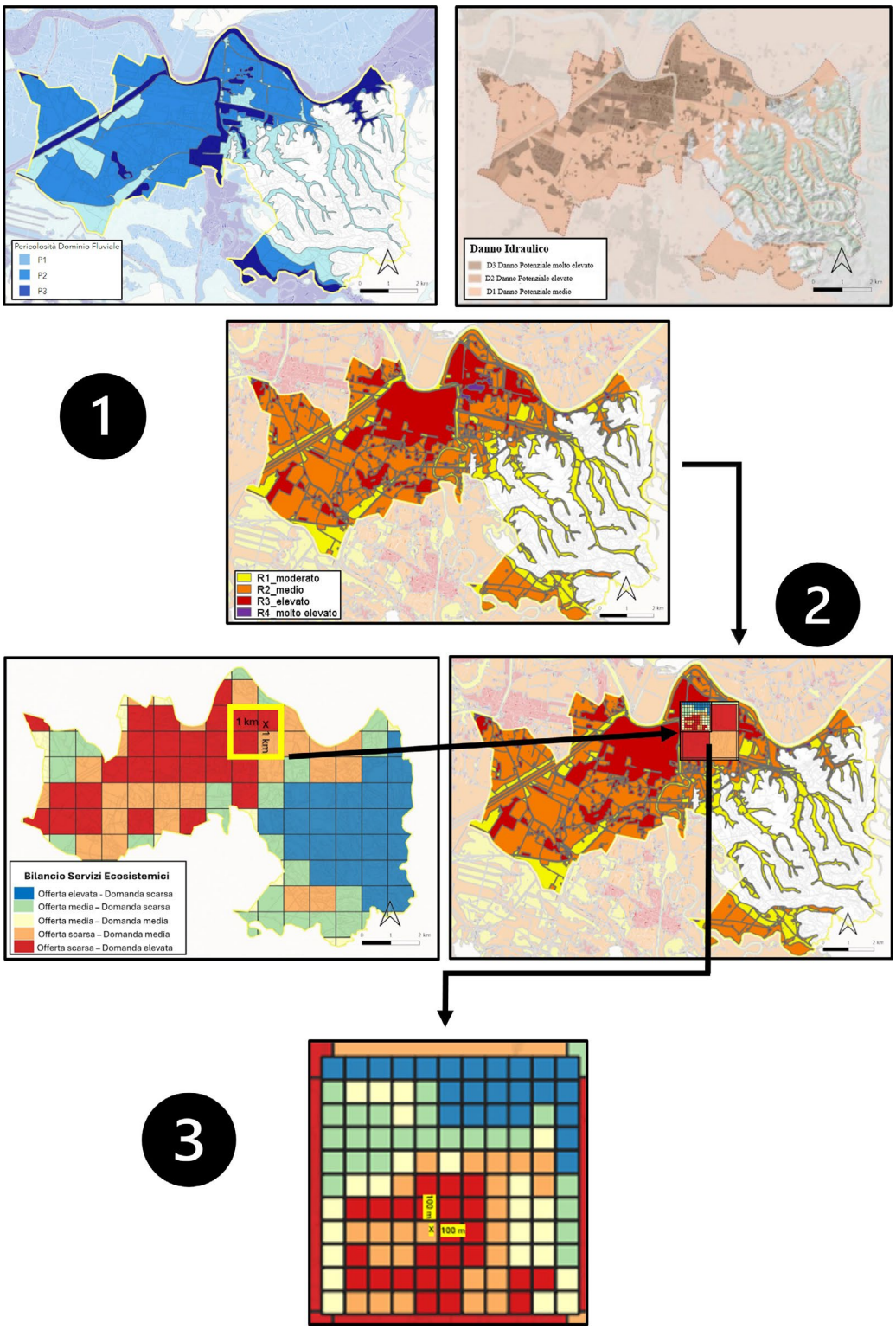
L'implementazione delle Soluzioni Basate sulla Natura richiede una pianificazione integrata che consideri non solo gli aspetti ecologici e territoriali, ma anche il coinvolgimento attivo di una pluralità di stakeholder. Tuttavia, il processo di implementazione può risultare complesso per i pianificatori tradizionali, che potrebbero non possedere le competenze necessarie per gestire approcci olistici e interdisciplinari (Nesshöver et al., 2017). Oltre alle difficoltà interne legate alla governance e alle capacità organizzative (Hamann, April, 2013), lo scetticismo iniziale verso le NBS è amplificato dalla riluttanza ad accettare interventi diversi dalle infrastrutture "grigie". Le comunità tendono infatti a preferire opere tradizionali (canalizzazioni, vasche, tombini), percepite come più affidabili, rispetto a Soluzioni Basate sulla Natura, considerate meno familiari (Colding, Barthel, 2013). Questo atteggiamento conservatore, unito a barriere istituzionali, può rallentare l'integrazione delle Soluzioni Basate sulla Natura nella gestione del rischio idraulico. In questo contesto, la metodologia proposta si pone come strumento di supporto operativo per le amministrazioni locali, che devono affrontare sfide complesse, tra cui risorse economiche limitate. Strutturata in fasi successive, adotta un approccio gerarchico che permette di affinare progressivamente l'individuazione delle aree più idonee per l'implementazione delle Soluzioni Basate sulla Natura, garantendo interventi mirati ed efficaci (Fig. 2). A differenza di un'analisi multicriterio tradizionale, che richiederebbe la definizione e l'assegnazione di pesi ai diversi criteri di valutazione, questa metodologia evita un processo eccessivamente complesso, risultando più adatta a un'indagine esplorativa e a una valutazione preliminare di fattibilità. L'approccio gerarchico consente di escludere gradualmente le aree meno critiche o non idonee, ottimizzando la selezione e riducendo il dispendio di risorse ed energie. La metodologia si articola in tre livelli successivi, integrando cartografia tematica e dati di telerilevamento, come illustrato nella Sezione 2.2. Nel primo, le carte di pericolosità idraulica e degli elementi esposti vengono impiegate per individuare le zone a rischio di inondazione. Le aree classificate a rischio elevato e molto elevato vengono selezionate per ulteriori approfondimenti. Nel secondo livello, il territorio identificato come critico viene suddiviso in una griglia con celle di 1 km, al fine di valutare il bilancio tra offerta e domanda di servizi ecosistemici. Le aree in cui la domanda supera significativamente l'offerta vengono considerate prioritarie per l'implementazione delle NBS, poiché rappresentano i contesti in cui l'intervento può generare il massimo beneficio. Nel terzo, l'analisi si concentra esclusivamente sulle aree prioritarie individuate, aumentando la risoluzione della griglia a 100 m. A questa scala, oltre al bilancio dei servizi ecosistemici, vengono analizzati vincoli urbanistici e tecnici che influenzano la fattibilità delle Soluzioni Basate sulla Natura. I vincoli urbanistici includono normative comunali e destinazioni d'uso del suolo, mentre quelli tecnici riguardano fattori come la pendenza del terreno, valutata tramite dati LiDAR, e le caratteristiche idrologiche del suolo, classificate in base ai gruppi idrologici.

2.3.1 Rischio inondazioni

La valutazione del rischio di inondazioni nella metodologia proposta si basa sull'utilizzo integrato delle carte di pericolosità idraulica e delle carte degli elementi a rischio, fornite dall'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale). Le carte di pericolosità idraulica, aggiornate nell'ultima edizione del 2021, sono state realizzate mediante l'applicazione di modelli idraulici e idrologici avanzati, utilizzando dati ad alta risoluzione spaziale ottenuti da rilievi LiDAR, con una precisione che raggiunge fino 10 m. Queste carte sono basate sui Piani di Assetto Idrogeologico (PAI) e sono state sviluppate in conformità con gli 'Indirizzi operativi' del Ministero dell'Ambiente, con il contributo dell'ISPRA, delle Autorità di Bacino Nazionali e del Tavolo Tecnico Stato-Regioni, applicando modelli idraulici e idrologici avanzati. Il territorio è classificato in tre livelli di pericolosità in base al tempo di ritorno degli eventi di inondazione: alta pericolosità (P3) per eventi con tempo di ritorno inferiore a 20 anni, media pericolosità (P2) per eventi tra 20 e 200 anni, e bassa pericolosità (P1) per eventi superiori a 200 anni. Parallelamente, le carte degli elementi a rischio, anch'esse aggiornate al 2021, analizzano i potenziali impatti di un evento alluvionale, includendo indicatori relativi a popolazione, edifici, attività produttive e beni culturali ed ambientali. Questi dati derivano da censimenti territoriali e catastali, integrati con valutazioni economiche e ambientali. Le informazioni sulla pericolosità e sulla vulnerabilità degli elementi esposti

ZISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)

FIGURA 2 - Metodologia gerarchica per l'individuazione delle aree idonee all'implementazione di Soluzioni Basate sulla Natura in zone a rischio idraulico



FONTE: Elaborazioni su dati ISPRA (2021), Regione Toscana e PAESC Comune di Pontedera

ZISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)

costituiscono la base per la costruzione delle carte di danno (PAESC Comune di Pontedera, 2018). A partire dalle carte di danno e da quelle di pericolosità, sono state derivate le carte di rischio per l'area di studio applicando la matrice riportata in Tabella 2 (Duijm, 2015), che consente di distinguere classi da rischio moderato (R1) a molto elevato (R4). Operativamente, in QGIS i layer di pericolosità e di danno sono stati riproiettati nello stesso sistema di riferimento, vettorializzati, e armonizzati per risoluzione ed estensione. I valori sono stati quindi riclassificati nelle classi P1–P3 (pericolosità) e D1–D3 (danno). I due strati informativi sono stati sovrapposti mediante intersezione spaziale, ottenendo unità omogenee sulle quali applicare la matrice P×D (Tabella 2) e attribuire a ciascun poligono la corrispondente classe di rischio R1–R4. Le aree risultate a rischio elevato o molto elevato sono state infine selezionate tramite query sugli attributi ed estratte come layer dedicato, che costituisce l'input per la fase successiva della metodologia (2.3.2).

TABELLA 2 – Matrice di rischio

	Classi di Pericolosità			
Classi di rischio		**P3**	**P2**	**P1**
Classi di danno	**D3**	R4	R3	R2
	D2	R3	R2	R1
	D1	R2	R1	R1

2.3.2 Servizi ecosistemici

La valutazione dei servizi ecosistemici rappresenta un elemento centrale per identificare le aree prioritarie per l'implementazione di Soluzioni Basate sulla Natura. Tra i diversi approcci disponibili per quantificare i servizi ecosistemici, è stato adottato il modello di Burkhard et al. (2012) poiché risulta particolarmente idoneo alle finalità dello studio e alla scala di dettaglio richiesta. Questo metodo consente infatti di stimare il bilancio tra offerta e domanda di servizi ecosistemici in modo chiaro e facilmente interpretabile, rendendolo ideale per la pianificazione e la gestione territoriale. In tale approccio, a ogni classe di uso del suolo viene assegnato un punteggio che varia tra 0 e 5 per l'offerta di servizi ecosistemici e tra -5 e 0 per la domanda. Questa classificazione consente di evidenziare le aree con bilanci negativi, ovvero dove la domanda supera l'offerta, identificandole come critiche per interventi mirati. Nell'applicazione di questa metodologia, la selezione dei servizi ecosistemici viene adattata alle specificità del territorio oggetto di studio, includendo nel bilancio esclusivamente quelli pertinenti alle caratteristiche ambientali e socioeconomiche locali. Ad esempio, nel caso del Comune di Pontedera, caratterizzato da un contesto prevalentemente urbano, non sono stati considerati i servizi ecosistemici relativi alla pesca naturale o all'acquacoltura, poiché tali attività risultano assenti nell'area. Il territorio viene suddiviso in una griglia, con l'attribuzione di un valore complessivo a ciascuna cella. Questo valore viene determinato sommando i punteggi relativi ai servizi ecosistemici offerti e richiesti, calcolati sulla base della copertura del suolo presente all'interno di ogni cella. Il processo di valutazione è strutturato per essere scalabile e adattabile a diversi contesti territoriali. Nella fase iniziale, la metodologia proposta utilizza una griglia con celle di 1 km, basata sui dati forniti dal Copernicus Land Monitoring Service, in particolare la classificazione Corine Land Cover 2018 con risoluzione spaziale di 100 m. Questo livello preliminare consente uno screening su larga scala, utile per identificare le macroaree con criticità nei servizi ecosistemici. In una fase successiva, l'analisi viene perfezionata utilizzando una griglia con celle di 100 m, che integra dati più dettagliati, come le carte sull'uso del suolo fornite dall'ISPRA e, in alcuni casi, quelle ancora più precise fornite dalle Regioni. Per l'area di studio scelta sono state utilizzate carte aggiornate al 2021 fornite dalla Regione Toscana con una risoluzione di 10 m. Il bilancio dei servizi ecosistemici è rappresentato attraverso una classificazione in cinque intervalli, con particolare attenzione alle celle appartenenti al quintile inferiore, ovvero il 20% delle celle che mostrano i valori più negativi in termini di bilancio tra offerta e domanda di servizi ecosistemici. Queste celle identificano le particelle in cui la carenza di offerta rispetto alla domanda è più significativa, rendendole prioritarie. Tali zone rappresentano punti critici, dove l'implementazione di Soluzioni Basate sulla Natura può avere un impatto significativo, contribuendo al miglioramento dell'equilibrio ecosistemico e alla riduzione delle vulnerabilità territoriali. L'output è un layer di aree prioritarie da sottoporre alla verifica dei vincoli nell'ultima fase della metodologia proposta (2.3.3).

ZISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)

2.3.3 Limitazioni urbanistiche e tecniche

La valutazione della fattibilità è specifica per ciascuna tipologia di Soluzione Basata sulla Natura e deve pertanto essere condotta in relazione all'intervento considerato. Questo processo richiede l'integrazione di considerazioni urbanistiche e tecniche, entrambe indispensabili per garantire che gli interventi siano realizzabili, oltre che efficaci e sostenibili (Datola, Oppio, 2023). Dal punto di vista urbanistico, l'analisi fa riferimento agli strumenti vigenti che definiscono l'uso consentito del suolo e individuano i vincoli, in particolare il Piano Strutturale Comunale (PSC) e, nel contesto della Regione Toscana, cui appartiene l'area di studio, il Regolamento Urbanistico (RU) o il Piano Operativo Comunale (POC). La nomenclatura di strumenti omologhi può variare tra regioni. Questi documenti forniscono informazioni cruciali sulle aree protette, i vincoli paesaggistici e ambientali, nonché le destinazioni d'uso stabilite per particolari settori del territorio. Inoltre, delineano limitazioni aggiuntive, come le fasce di rispetto lungo i corsi d'acqua o i divieti relativi a specifici tipi di interventi. La verifica di fattibilità è stata condotta a partire dalle celle prioritarie individuate nella fase precedente (2.3.2); all'interno di ciascuna cella, il territorio è stato ulteriormente suddiviso in unità elementari poligonali di dimensione non superiore alla massima area di applicazione della specifica NBS che si intende implementare. Su queste unità è stata quindi eseguita l'intersezione spaziale con la cartografia del PSC e del POC del comune di Pontedera, includendo, ove previsto, le fasce di rispetto ricavate mediante buffer; le porzioni non compatibili sono state escluse tramite operazioni di ritaglio e differenza, in modo da conservare unicamente quelle ricadenti in aree conformi alla pianificazione. Dal punto di vista tecnico, è necessario analizzare le caratteristiche fisiche del terreno, come la pendenza e il gruppo idrologico del suolo, poiché influenzano direttamente la fattibilità e l'efficacia delle Soluzioni Basate sulla Natura. La pendenza del terreno riveste particolare importanza per tipologie di intervento come i bacini di accumulo o le strutture di fitodepurazione, che richiedono superfici con inclinazioni limitate. Questo parametro è stato derivato dal Modello Digitale del Terreno (DTM) derivato da rilievi LiDAR: la pendenza è stata calcolata con lo strumento *Slope* in QGIS, espressa in percentuale. Il raster ottenuto è stato vettorializzato, mantenendo il valore di pendenza come attributo; i poligoni derivati dalla vettorializzazione, con lato pari alla risoluzione del DTM (1 m nell'area di studio), sono stati utilizzati come maschera per l'intersezione con le porzioni candidate, escludendo quelle ricadenti su valori di pendenza superiori alla soglia progettuale. Per l'intero territorio italiano, è possibile utilizzare il modello TINITALY (Tarquini et al., 2007; 2023), che offre una risoluzione spaziale di 10 m. Per testare la metodologia nell'area di studio, si è impiegato il DTM fornito dalla Regione Toscana, caratterizzato da una risoluzione spaziale di 1 m. La diversa risoluzione dei dati LiDAR può influire in modo significativo sull'accuratezza delle analisi della pendenza: una risoluzione di 10 m tende a smussare le variazioni locali del terreno (Gillin et al., 2015), con il rischio di sovra- o sottostimare l'idoneità di alcune aree all'implementazione delle NBS. Questo effetto è particolarmente rilevante per soluzioni che occupano superfici ridotte, come i giardini della pioggia o le canalette vegetate, che possono avere un'estensione inferiore a 10 m. Un'ulteriore limitazione tecnica riguarda la capacità del terreno di infiltrare o trattenere l'acqua, che viene classificata tramite i gruppi idrologici del suolo. Questa classificazione, sviluppata secondo metodologie standardizzate come quelle del Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti (USDA, 2009), suddivide i suoli in quattro classi principali, da A a D, con l'aggiunta di una categoria intermedia C/D per i terreni con caratteristiche miste. Le classi A e B sono associate a suoli con elevata capacità di infiltrazione, mentre le classi C e D rappresentano terreni con elevata impermeabilità e maggiore propensione al deflusso superficiale. Queste ultime possono costituire una limitazione significativa per l'efficacia di *Nature Based Solutions*, come i bacini di bioritenzione o i giardini della pioggia, che richiedono terreni più permeabili per operare in modo ottimale. Per questa analisi sono state utilizzate le carte dei gruppi idrologici del suolo, fornite per l'area di studio dalla Regione Toscana, aggiornate al 2021, che offrono una risoluzione di 10 m. Le porzioni precedentemente filtrate per pendenza sono state intersecate con la carta dei gruppi idrologici e filtrate tramite selezione per attributi in modo da mantenere solo le porzioni ricadenti nelle classi compatibili. I dati urbanistici e tecnici sono stati integrati nella metodologia per escludere, all'interno delle celle identificate come critiche, le porzioni in cui l'implementazione delle NBS non è possibile.

ZISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)

2.4 Valutazione dell'efficacia

Per valutare l'efficacia della metodologia di prioritizzazione proposta per l'implementazione delle Soluzioni Basate sulla Natura, sono stati confrontati tre scenari: il caso di riferimento senza interventi (S0), uno scenario con allocazione casuale delle NBS entro le aree ammissibili (S1), e uno scenario con allocazione guidata dall'approccio metodologico proposto (S2). L'analisi ha riguardato sia l'impatto idrologico sia lo sviluppo connesso dei servizi ecosistemici. La valutazione idrologica è stata condotta adottando il metodo SCS–Curve Number (Hawkins et al., 2008; USDA NRCS, 2009), particolarmente indicato per stimare il deflusso superficiale dovuto a eventi di precipitazione. La classificazione delle condizioni di umidità antecedente è stata stabilita come AMC II, in coerenza con la caratterizzazione degli eventi di precipitazione intensa desunta dalle serie pluviometriche delle stazioni regionali prossime a Pontedera (ad esempio Gello–Pontedera, cod. TOS01005262) fornite dal Servizio Idrologico Regionale (SIR) della Regione Toscana[7]. Il parametro di ritenzione potenziale *S* è calcolato tramite il Curve Number (*CN*) relativo all'uso del suolo, con la componente di astrazione iniziale definita come = 0.2 . Lo scenario di precipitazione considerato, corrispondente a un evento con tempo di ritorno di 10 anni, è stato fissato pari a 50 mm. Il volume di deflusso è stato calcolato con la formula:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

dove *P* è la precipitazione, e *S* rappresenta la capacità di ritenzione regolata dal valore di *CN*, variabile tra condizioni pre- e post-intervento per riflettere le modifiche apportate dalle Soluzioni Basate sulla Natura e dalle capacità di invaso aggiuntivo. Per valutare l'efficacia degli interventi, è stata quindi calcolata la differenza tra il volume di deflusso negli scenari pre-intervento (S0) e post-intervento (S1 e S2), con l'obiettivo di quantificare la riduzione del deflusso attribuibile all'adozione delle Soluzioni Basate sulla Natura e alla loro allocazione spaziale.

Per i servizi ecosistemici, l'efficacia è stata valutata nei due diversi scenari confrontando il miglioramento cumulato del bilancio netto tra offerta e domanda nelle celle selezionate per la collocazione delle Soluzioni Basate sulla Natura. In particolare, è stata calcolata la variazione del bilancio tra le condizioni pre-intervento (S0) e post-intervento (S1, S2) e la percentuale di celle che hanno superato il quintile inferiore di criticità a seguito dell'implementazione di Soluzioni Basate sulla Natura.

3. Risultati

3.1 Selezione delle NBS

Nel presente studio sono state selezionate le Soluzioni Basate sulla Natura incluse nel Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile e il Clima (PAESC) del 2018 del Comune di Pontedera. L'obiettivo principale di queste soluzioni è la mitigazione del rischio di alluvioni pluviali, causate da precipitazioni intense che generano deflussi superficiali significativi. La selezione è stata guidata da criteri di compatibilità con il tessuto urbano esistente, possibilità di integrazione in spazi pubblici o infrastrutture già presenti, comprovata efficacia in contesti simili e capacità di garantire benefici multipli (idraulici, ecologici e sociali) a fronte di un ingombro ridotto. Tali criteri risultano particolarmente rilevanti in un contesto come quello di Pontedera, dove gli spazi disponibili per interventi sono limitati e legati alla gestione delle alluvioni pluviali. Sono state individuate quattro tipologie principali di intervento per la mitigazione del rischio di alluvioni pluviali: bacini di detenzione, canalette vegetate (*swales*), pavimentazione permeabile e giardini della pioggia (*rain gardens*) (WWAP, 2018; Commissione Europea et al., 2015). La descrizione e i limiti di applicazione di ciascuna soluzione sono di seguito riportati sulla base della letteratura scientifica (Pacetti et al., 2022; Jiménez Ariza et al., 2019; Ávila et al., 2016; Jato-Espino et al., 2016; Progetto LIFE Metro Adapt, 2021):

- i bacini di detenzione sono piccoli invasi a fondo permeabile che raccolgono temporaneamente le acque meteoriche, rilasciandole gradualmente nell'arco di 24 ore per ridurre il deflusso superficiale e favorire la

7 Servizio Idrologico Regionale, https://www.sir.toscana.it/, ultimo accesso 23/08/25

ZISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)

sedimentazione dei solidi sospesi. Sono installabili in parchi e isole spartitraffico, richiedendo una pendenza inferiore al 15% e una distanza minima di 6 m dagli edifici;

- le canalette vegetate (*swales*) sono canali poco profondi progettati per convogliare, assorbire e depurare il deflusso delle acque superficiali provenienti da superfici impermeabili, come parcheggi e isole spartitraffico. Favoriscono la rimozione di inquinanti e sedimenti, migliorando la qualità dell'acqua prima della sua dispersione. Possono essere installate in aree con pendenza <10%, con una distanza minima di 4 m dagli edifici e trovano applicazione ideale in parcheggi e isole spartitraffico;
- la pavimentazione permeabile è un sistema di drenaggio urbano che consente l'infiltrazione dell'acqua meteorica nel terreno attraverso superfici modulari dotate di vuoti o giunti riempiti con materiali drenanti come sabbia o ghiaia. Questo sistema riduce il deflusso superficiale e favorisce la ricarica delle falde acquifere, migliorando la gestione delle acque pluviali nelle aree urbanizzate. Dal punto di vista tecnico, la pavimentazione permeabile è adatta a suoli con classificazione del suolo USDA A-B, con una pendenza inferiore al 5% e una distanza minima di 6 m dagli edifici per evitare rischi strutturali. È indicata per l'applicazione in piazze, piattaforme, parcheggi, parchi e percorsi pedonali e ciclabili, contribuendo alla riduzione del rischio idraulico senza compromettere la funzionalità dello spazio urbano;
- i giardini della pioggia (*rain gardens*) e le aree di bioritenzione sono depressioni poco profonde del suolo, ricoperte da vegetazione, progettate per raccogliere e trattare le acque meteoriche provenienti da superfici impermeabili. Adatti a pendenze <12% e con distanza minima di 6 m dagli edifici, possono essere installati in parchi, piazze e percorsi pedonali.

Pur presentando numerosi benefici, la letteratura segnala che le prestazioni delle NBS possono ridursi in assenza di un'adeguata manutenzione o se realizzate in condizioni non ottimali rispetto alle caratteristiche del sito. Tali aspetti, tuttavia, possono essere superati attraverso un'attenta pianificazione e progettazione site-specific, che consente di massimizzare i benefici senza la necessità di ricorrere a soluzioni ulteriori. Queste considerazioni evidenziano la necessità di una progettazione site-specific e di piani di manutenzione strutturati per garantire prestazioni durature. Sebbene altre NBS, come i tetti verdi o le fasce vegetate riparie, possano offrire benefici idraulici ed ecologici analoghi, queste non sono state incluse per i vincoli tecnici e urbanistici specifici di Pontedera, e per la limitata disponibilità di dati di dettaglio utili a una valutazione spaziale alla scala comunale. Oltre a mitigare il rischio idraulico locale, questi interventi offrono significativi benefici ecologici, estetici e sociali, contribuendo a una gestione integrata e sostenibile delle risorse idriche, in linea con gli obiettivi di resilienza urbana (Progetto NWRM, 2015).

3.2 Mappatura delle priorità di intervento

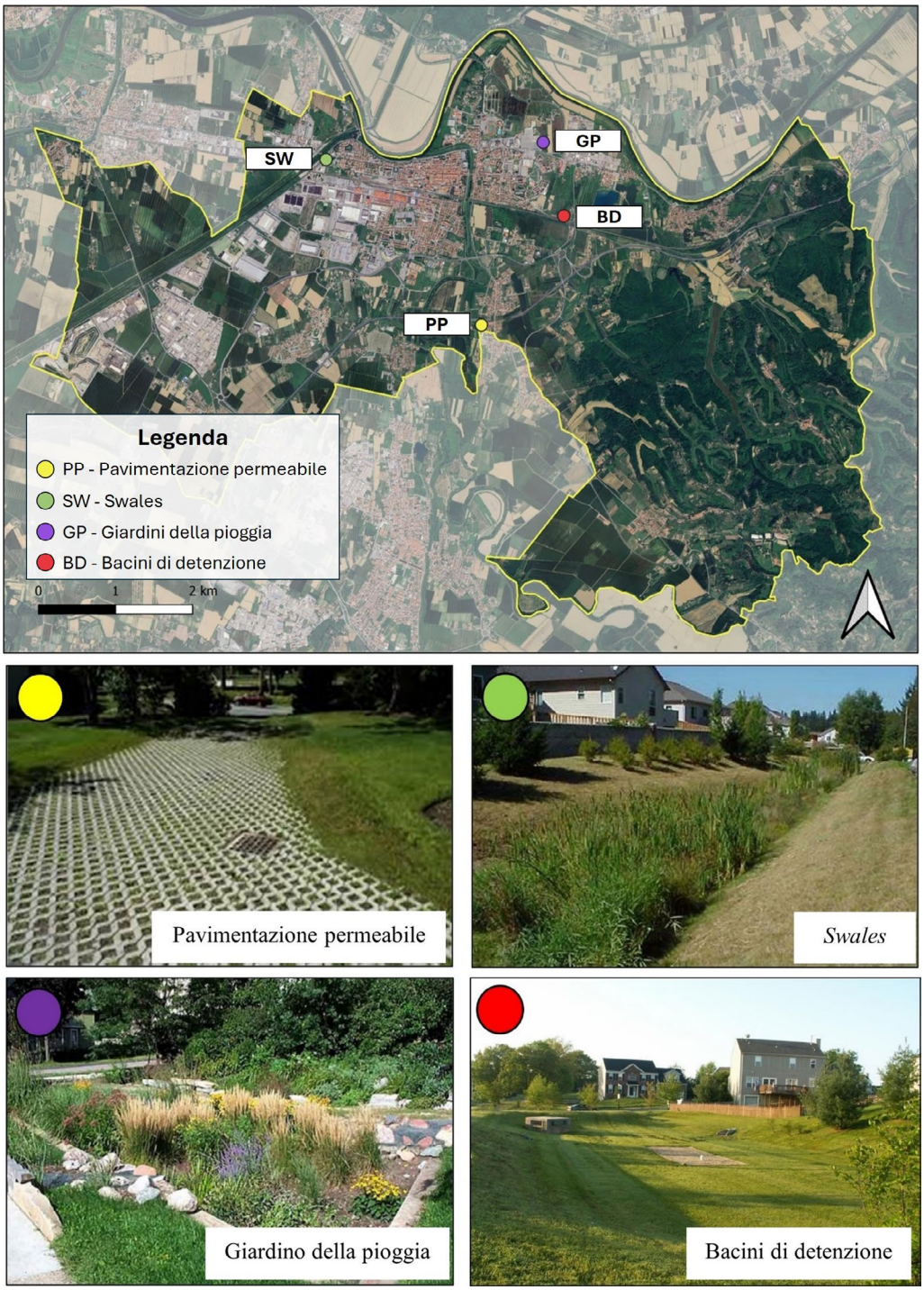
Nelle particelle identificate come prioritarie per l'intervento, sono stati individuati, in base alle limitazioni tecniche e urbanistiche, i possibili punti di applicazione delle NBS scelte. La figura 3 illustra un possibile scenario di miglioramento per il comune di Pontedera, evidenziando come interventi mirati possano favorire una gestione idraulica più efficace e sostenibile. L'efficacia della metodologia, come descritto nella Sezione 2.4, è stata valutata attraverso il confronto tra scenari. I risultati mostrano che la localizzazione degli interventi guidata dalla metodologia proposta (scenario S2) conduce a miglioramenti significativamente superiori rispetto a un'allocazione non prioritaria (scenario S1), mantenendo costanti la superficie totale di nuove aree verdi (~2,76 ha) e la capacità complessiva di invaso (~9.153 m^3). In particolare, nello scenario S2 si è osservata una riduzione del volume di deflusso diretto pari al 79% (da 4.000 m^3 a 840 m^3), superando il 52% di riduzione rilevato in S1 (da 3.942 m^3 a 1.892 m^3).

Per quanto riguarda i servizi ecosistemici, considerando le quattro celle coinvolte nell'analisi, corrispondenti alla collocazione di quattro NBS, lo scenario S2 ha mostrato un miglioramento netto del bilancio totale tra offerta e domanda pari a +12 unità (secondo il modello di Burkhard et al., 2012, descritto nella Sottosezione 2.3.2), con tutte e quattro le celle che hanno superato il quintile inferiore di criticità. Al contrario, in S1 il miglioramento totale è stato di +5 unità, con una sola cella che è uscita dal quintile di criticità, essendo l'unica che vi ricadeva.

Ciò sottolinea l'importanza di un'allocazione spaziale ottimale per massimizzare i benefici ambientali, idraulici e sociali.

ZISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)

FIGURA 3 – Possibile scenario di miglioramento per il comune di Pontedera (PI) secondo la metodologia proposta



FONTI: Elaborato con QGIS. Google Earth (2024) Pontedera (PI), Italia. Dati di Airbus, SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO, Landsat/Copernicus e Catalogue of NWRM[8]

8 https://www.nwrm.eu, ultimo accesso 27/01/25

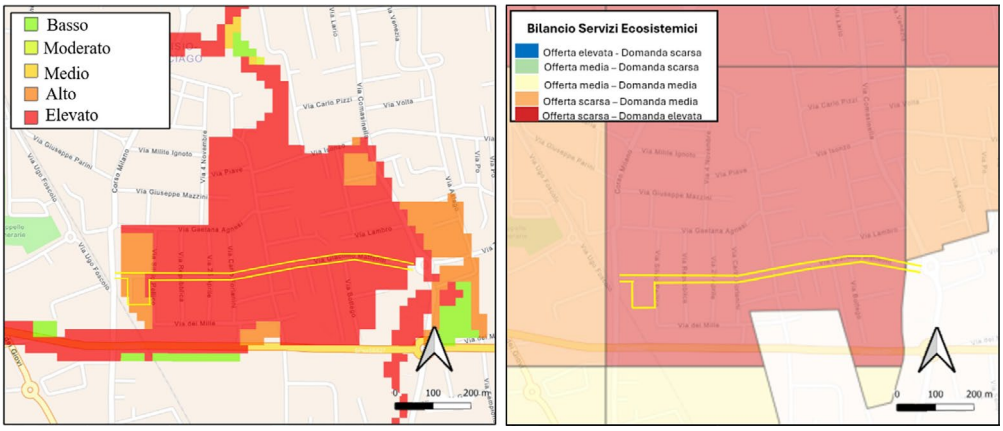
ZISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)

TABELLA 3 – Caratteristiche dei punti scelti per l'implementazione di Soluzioni Basate sulla Natura

NBS	Rischio Idraulico	Servizi Ecosistemici (Griglia 1km)	Servizi Ecosistemici (Griglia 100m)	Classe USDA	Pendenza	Regolamento Urbanistico[1]	Vincoli[2]
Giardini della pioggia	Molto elevato	Offerta scarsa, domanda elevata	Offerta media, domanda media	C	0%	Sottozona F1a - Aree destinate a verde e attrezzature pubbliche	/
Swales	Elevato	Offerta scarsa, domanda elevata	Offerta scarsa, domanda media	Dati non disponibili	<5%	Zona P - Aree destinate a parcheggio pubblico o di uso pubblico	/
Bacini di detenzione	Elevato	Offerta scarsa, domanda media	Offerta media, domanda media	C	0%	Sottozona F1b - Aree destinate a parco	/
Pavimentazione permeabile	Molto elevato	Offerta scarsa, domanda elevata	Offerta scarsa, domanda elevata	B	<2%	Zona P - Aree destinate a parcheggio pubblico o di uso pubblico	Fascia di rispetto dai Fiumi

FONTI: SIT del Comune di Pontedera[9] e sito dell'Amministrazione Trasparente del Comune di Pontedera[10]

FIGURA 4 – Carte di rischio idraulico e del bilancio dei servizi ecosistemici per l'identificazione delle aree critiche per l'implementazione di NBS nel comune di Bovisio Masciago (MB)



FONTE: Geoportale Regione Lombardia[11]

9 http://159.213.141.6/pontedera/map_uilayout.phtml, ultimo accesso 24/01/25

10 https://trasparenza.comune.pontedera.pi.it/files/13/other/Tav%202%20Corografia%20dei%20Vincoli.pdf, ultimo accesso 26/01/25

11 https://www.geoportale.regione.lombardia.it/en-GB/home, ultimo accesso 09/01/25

ZISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)

4. Discussione

L'analisi condotta evidenzia chiaramente come le aree urbane siano più esposte al rischio idraulico e presentino un elevato squilibrio tra domanda e offerta di servizi ecosistemici. Questo risultato è coerente con precedenti studi che hanno dimostrato come l'urbanizzazione riduca significativamente la capacità di infiltrazione del suolo, a causa della presenza estesa di superfici impermeabili quali piazze e strade asfaltate, con conseguente incremento del deflusso superficiale (Kamali et al., 2017; Quan, 2021). Tali condizioni favoriscono il verificarsi di alluvioni pluviali, specialmente in contesti urbani dove i servizi ecosistemici sono scarsamente disponibili. La metodologia adottata, che prevede un'analisi del bilancio dei servizi ecosistemici su una griglia a risoluzione di 100 m, si è rivelata efficace nell'individuare le particelle critiche in cui l'implementazione delle Soluzioni Basate sulla Natura può contribuire sia alla mitigazione del rischio idraulico che all'incremento dei benefici ecosistemici. I risultati ottenuti dimostrano come l'approccio proposto consenta di identificare con precisione i punti strategici per l'installazione delle NBS (tabella 3). Per valutare la replicabilità e l'adattabilità della metodologia proposta, si fa riferimento a interventi già realizzati, come il progetto di rigenerazione urbana di una strada a Bovisio Masciago, in provincia di Monza e Brianza. Nel 2022, in questo territorio sono stati implementati interventi quali un bacino di detenzione in Piazzetta Silvio Pellico e giardini della pioggia (*rain gardens*) con aree di bioritenzione in Via Matteotti, progettati da IRIDRA[12] per BrianzAcque e parzialmente finanziati da Regione Lombardia.

L'applicazione della metodologia proposta nel Comune di Bovisio Masciago ha consentito di individuare come punti critici le stesse particelle su cui sono stati effettivamente realizzati gli interventi (Fig. 4), con risultati significativi in termini di mitigazione del rischio idraulico e miglioramento dei servizi ecosistemici. I risultati ottenuti confermano la robustezza e la trasferibilità della metodologia adottata, dimostrando che approcci standardizzati possono risultare efficaci per una gestione integrata e sostenibile delle risorse territoriali (Bauduceau et al., 2015). Tuttavia, la trasferibilità e l'efficace applicazione della metodologia a contesti differenti possono essere condizionate da vincoli istituzionali e sociali. La frammentazione delle competenze tra autorità di bacino, amministrazioni comunali, consorzi di bonifica e gestori dei servizi idrici può generare conflitti di priorità, ritardi autorizzativi e duplicazioni procedurali, riducendo l'efficienza complessiva del processo di attuazione (Mott Lacroix, Megdal, 2016). Inoltre, l'adozione delle NBS può essere ostacolata da barriere di tipo sociale: in assenza di strategie di sensibilizzazione, co-progettazione e partecipazione attiva, tali soluzioni possono essere percepite come meno affidabili rispetto alle infrastrutture grigie tradizionali, con conseguente riduzione del sostegno e della collaborazione da parte della comunità (Anderson, Renaud, 2021; Sari et al., 2023). Una governance coordinata e processi partecipativi inclusivi rendono operativa la metodologia per l'individuazione dei siti ottimali di implementazione delle NBS. Ciò migliora la resilienza urbana – intesa come capacità di far fronte a eventi pericolosi mantenendo funzioni, identità e struttura del sistema (IPCC, 2022) - grazie alla localizzazione mirata degli interventi, che concentra permeabilità e capacità di laminazione nei punti critici della rete di drenaggio urbana e, di conseguenza, riduce il deflusso superficiale e le portate di piena (Bell et al., 2020) e ritarda il tempo al colmo (Hood et al., 2007). Un esempio applicativo coerente è la vasca d'infiltrazione, anch'essa una NBS, nel bacino di Asprela, a Porto, che migliora le condizioni idrauliche anche per eventi severi, aumentando la resilienza urbana (Beceiro et al., 2022). Contestualmente, l'approccio proposto, che considera anche le aree a scarsa offerta di servizi ecosistemici, consente, a parità di risorse, di massimizzare i cobenefici e, di conseguenza, orientare strategie di gestione sostenibile (Bush, Doyon, 2019).

5. Conclusioni

Il presente studio ha sviluppato e validato una metodologia di supporto alla pianificazione territoriale, basata sull'integrazione di carte tematiche e dati di telerilevamento, finalizzata a individuare le aree critiche per l'installazione di Soluzioni Basate sulla Natura. Questo approccio si è rivelato efficace nell'affrontare in maniera integrata il rischio di inondazioni pluviali, in particolare nei contesti urbani, favorendo contestualmente il miglioramento dell'offerta di servizi ecosistemici e la

12 IRIDRA, https://www.iridra.eu/it/, ultimo accesso 23/01/25

ZISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)

mitigazione del rischio idraulico. L'applicazione al caso studio di Pontedera (PI), situato a valle del bacino del fiume Arno, in un'area particolarmente esposta a eventi alluvionali. ha confermato la capacità della metodologia di individuare con precisione le aree prioritarie di intervento per l'implementazione di NBS e di supportare scelte progettuali. L'efficacia della metodologia proposta apre la strada a futuri sviluppi. In primo luogo, l'analisi potrebbe essere estesa alla scala di bacino idrografico, tenendo conto che, a questa scala, andrebbe arricchita per includere la dimensione delle connessioni idrologiche tra sottobacini e degli effetti cumulativi degli interventi nelle diverse aree. Inoltre, l'integrazione tra soluzioni NBS e infrastrutture grigie (*gray solutions*) già presenti rappresenta una prospettiva promettente (Zhu et al., 2025) e come possibile sviluppo futuro consentirebbe di ottenere sinergie e benefici aggiuntivi. Ulteriori sviluppi potrebbero includere l'ampliamento del ventaglio di tipologie di NBS considerate e la sperimentazione della metodologia su contesti territoriali differenti, così da confrontare le prestazioni in scenari urbani e rurali diversificati. In sintesi, la metodologia proposta si configura come uno strumento operativo, flessibile, replicabile e trasferibile, in grado di supportare politiche territoriali orientate alla resilienza climatica e alla gestione sostenibile delle risorse idriche, contribuendo in modo tangibile alla riduzione del rischio idraulico e al miglioramento della qualità ambientale.

Ringraziamenti

Si ringrazia Enrica Caporali e Margherita Azzari per gli stimoli ricevuti e per i suggerimenti che hanno accompagnato l'elaborazione del contributo.

ZISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)

Bibliografia

Allan J.D., Castillo M.M. (2007), "An introduction to fluvial ecosystems", in: Allan J.D., Castillo M.M. (a cura di), *Stream Ecology: Structure and function of running waters*, Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 1-12, DOI: 10.1007/978-1-4020-5583-6_1

Allan R.P., Barlow M., Byrne M.P., Cherchi A., Douville H., Fowler H.J., Gan T.Y., Pendergrass A.G., Rosenfeld D., Swann A.L.S., Wilcox L.J., Zolina O. (2020), "Advances in understanding large-scale responses of the water cycle to climate change", *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1472(1), pp. 49-75, DOI: 10.1111/nyas.14337

Anderson C. C., Renaud F. G. (2021), "A review of public acceptance of nature-based solutions: The 'why','when', and 'how'of success for disaster risk reduction measures", *Ambio*, 50(8), pp. 1552-1573, DOI: 10.1007/s13280-021-01502-4

Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale (2021), "Relazione metodologica" in *Aggiornamento e revisione del Piano di gestione del rischio di alluvione redatto ai sensi dell'art. 7 del D.Lgs. 49/2010 attuativo della Direttiva 2007/60/CE. Secondo ciclo di gestione.* (https://www.appenninosettentrionale.it/itc/?page_id=5262)

Ávila H., Amaris G., Buelvas J. (2016), "Identifying Potential Areas for SUDS Application in Consolidated Urban Watersheds Based on GIS", in: Pathak C.S., Reinhart D. (a cura di), *World Environmental and Water Resources Congress 2016*, West Palm Beach, Florida, pp. 106-114, DOI: 10.1061/9780784479889.012

Bauduceau N., Berry P., Cecchi C., Elmqvist T., Fernandez M., Hartig T., Krull W., Mayerhofer E., N S., Noring L., Raskin-Delisle K., Roozen E., Sutherland W., Tack J. (2015, a cura di), *Towards an EU Research and Innovation Policy Agenda for Nature-based Solutions & Re-naturing Cities: Final Report of the Horizon 2020 Expert Group on 'Nature-based Solutions and Re-naturing Cities'*, Publications Office of the European Union, Bruxelles. DOI: 10.2777/479582.

Beceiro P., Brito R. S., Galvão A. (2022). "Assessment of the contribution of Nature-Based Solutions (NBS) to urban resilience: application to the case study of Porto", *Ecological Engineering*, 175, 106489, DOI: 10.1016/j.ecoleng.2021.106489

Bell C. D., Wolfand J. M., Panos C. L., Bhaskar A. S., Gilliom R. L., Hogue T. S., Hopkins K. G., Jefferson A. J. (2020). "Stormwater control impacts on runoff volume and peak flow: A meta-analysis of watershed modelling studies", *Hydrological Processes*, 34(14), pp. 3134-3152, DOI: 10.1002/hyp.13784

Bunster T., Gironás J., Rojas C., Bonilla C. (2021), "Impacts of Urbanization and Land Use Change over Water Resources", in: Fernández B., Gironás J. (a cura di), *Water Resources of Chile*, Springer International Publishing, Cham, pp. 365-387, DOI: 10.1007/978-3-030-56901-3_20

Burkhard B., Kroll F., Nedkov S., Müller F. (2012), "Mapping ecosystem service supply, demand and budgets", *Ecological Indicators*, 21, pp. 17–29, DOI: 10.1016/j.ecolind.2011.06.019

Bush J., Doyon A. (2019). "Building urban resilience with nature-based solutions: How can urban planning contribute?", *Cities*, 95, 102483, DOI: 10.1016/j.cities.2019.102483

Cohen-Shacham E., Walters G., Janzen C., Maginnis S. (2016, a cura di), *Nature-based Solutions to address global societal challenges*, IUCN, Gland, Switzerland. DOI: 10.2305/IUCN.CH.2016.13.en

Colding J., Barthel S. (2013), "The potential of 'Urban Green Commons' in the resilience building of cities", *Ecological Economics*, 86, pp. 156-166, DOI: 10.1016/j.ecolecon.2012.10.016

Comune di Pontedera (2018), *Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile e il Clima (PAESC).*

Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V.,

ZISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)

Paruelo J., Raskin R.G., Sutton P., van den Belt M. (1997), "The value of the world's ecosystem services and natural capital", *Nature*, 387(6630), pp. 253-260, DOI: 10.1038/387253a0

Datola G., Oppio A. (2023), "NBS Design and Implementation in Urban Systems: Dimensions, Challenges and Issues to Construct a Comprehensive Evaluation Framework", in Gervasi O., Murgante B., Rocha A. M. A. C., Garau C., Scorza F., Karaca Y., Torre C. M. (a cura di), *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2023 Workshops*, Springer Nature Switzerland, Cham, pp. 444-454, DOI: 10.1007/978-3-031-37117-2_30

de Araujo Barbosa C.C., Atkinson P.M., Dearing J.A. (2015), "Remote sensing of ecosystem services: A systematic review", *Ecological Indicators*, 52, pp. 430-443. DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.01.007

Duijm N. J. (2015), "Recommendations on the use and design of risk matrices", *Safety Science*, 76, pp. 21-31, DOI: 10.1016/j.ssci.2015.02.014

Gillin C. P., Bailey S. W., McGuire K. J., Prisley S. P. (2015), "Evaluation of LiDAR-derived DEMs through terrain analysis and field comparison", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 81(5), pp. 387-396, DOI: 10.14358/PERS.81.5.387

Haines-Young R., Potschin M. (2010), "The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being", in Raffaelli D., Frid C. (a cura di), *Ecosystem Ecology: a new synthesis*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 110-139

Hamann R., April K. (2013), "On the role and capabilities of collaborative intermediary organisations in urban sustainability transitions", *Journal of Cleaner Production*, 50, pp. 12–21, DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.11.017

Hood M. J., Clausen J. C., Warner G. S. (2007), "Comparison of Stormwater lag times for low impact and traditional residential development", *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 43(4), pp. 1036-1046, DOI: 10.1111/j.1752-1688.2007.00085.x

Hawkins R. H., Ward T. J., Woodward D. E., Van Mullem J. A. (2008, a cura di), *Curve number hydrology: State of the practice*, American Society of Civil Engineers, Reston.

IPCC (2022), "Annex II: Glossary", in Pörtner H.-O., Roberts D.C., Tignor M., Poloczanska E.S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., Rama B. (a cura di), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge – New York, pp. 2897–2930. DOI: 10.1017/9781009325844.029

Jato-Espino D., Sillanpää N., Charlesworth S. M., Andrés-Doménech I. (2016), "Coupling GIS with Stormwater Modelling for the Location Prioritization and Hydrological Simulation of Permeable Pavements in Urban Catchments", *Water*, 8(10), pp. 451, DOI: 10.3390/w8100451

Jiménez Ariza S.L., Martínez J.A., Muñoz A.F., Quijano J.P., Rodríguez J.P., Camacho L.A., Díaz-Granados M. (2019), "A Multicriteria Planning Framework to Locate and Select Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) in Consolidated Urban Areas", *Sustainability*, 11(8), pp. 2312, DOI: 10.3390/su11082312.

Kabisch N., Korn H., Stadler J., Bonn A. (2017, a cura di), *Nature-based solutions to climate change adaptation in urban areas: Linkages between science, policy and practice*, Springer Nature. DOI: 10.1007/978-3-319-56091-5

Kamali M., Delkash M., Tajrishy M. (2017), "Evaluation of permeable pavement responses to urban surface runoff", *Journal of Environmental Management*, 187, pp. 43-53, DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.11.027

Knieper C., Pahl-Wostl C. (2016), "A comparative analysis of water governance, water management, and environmental performance in river basins", *Water Resources Management*, 30(7), pp. 2161–2177, DOI: 10.1007/s11269-016-1276-z

Kraak M.J., Ormeling F. (2020, a cura di), *Cartography: visualization of geospatial data*, CRC Press, Boca Raton. DOI: 10.1201/9780429464195

La Notte A., Zulian G. (2021), "An ecosystem services-based approach to frame NBS in urban context", in Croci E., Lucchitta B. (a cura di), *Nature-based solutions for more sustainable cities – A framework approach for planning and evaluation*, Emerald Publishing Limited, pp. 47-65, DOI: 10.1108/978-1-80043-636-720211005

Lastoria B., Bussettini M., Mariani S., Piva F., Braca G. (2021, a cura di), *Rapporto sulle condizioni di pericolosità da alluvione in Italia e indicatori di rischio associati*, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, ISPRA, Report 353/2021. (https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/rapporto-sulle-condizioni-di-pericolosita-da-alluvione-in-italia-e-indicatori-di-rischio-associati)

LIFE Metro Adapt (2020), *Life Metro Adapt Practical Handbook*, Milano. (https://www.lifemetroadapt.eu/it/documenti-e-pubblicazioni/)

Mott Lacroix K. E., Megdal S. B. (2016), "Explore, synthesize, and repeat: Unraveling complex water management issues through the stakeholder engagement wheel", *Water*, 8(4), pp. 118, DOI: 10.3390/w8040118

Müller F., de Groot R., Willemen L. (2010), "Ecosystem Services at the Landscape Scale: the Need for Integrative Approaches", *Landscape Online*, 23, DOI: 10.3097/LO.201023

Nemec K.T., Raudsepp-Hearne C. (2013), "The use of geographic information systems to map and assess ecosystem services", *Biodiversity and Conservation*, 22(1), pp. 1-15, DOI: 10.1007/s10531-012-0406-z

Nesshöver C., Assmuth T., Irvine K. N., Rusch G. M., Waylen K. A., Delbaere B., Haase D., Jones-Walters L., Keune H., Kovacs E., Krauze K., Külvik M., Rey F., van Dijk J., Vistad O. I., Wilkinson M. E., Wittmer H. (2017), "The science, policy and practice of nature-based solutions: An interdisciplinary perspective", *Science of The Total Environment*, 579, pp. 1215-1227, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.106

NWRM Project (2015), *NWRM practical guide*, Bruxelles. (http://nwrm.eu/)

Pacetti T., Cioli S., Castelli G., Bresci E., Pampaloni M., Pileggi T., Caporali E. (2022), "Planning Nature-Based Solutions against urban pluvial flooding in heritage cities: A spatial multi-criteria approach for the city of Florence (Italy)", *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 41, 101081, DOI: 10.1016/j.ejrh.2022.101081

Peduzzi P. (2019), "The Disaster Risk, Global Change, and Sustainability Nexus", *Sustainability*, 11(4), 957, DOI: 10.3390/su11040957

Raymond C.M., Frantzeskaki N., Kabisch N., Berry P., Breil M., Nita M.R., Geneletti D., Calfapietra C. (2017), "A framework for assessing and implementing the co-benefits of nature-based solutions in urban areas", *Environmental Science & Policy*, 77, pp. 15-24, DOI: 10.1016/j.envsci.2017.07.008

Sari R., Soytas U., Kanoglu-Ozkan D. G., Sivrikaya A. (2023), "Improving the climate resilience of European cities via socially acceptable nature-based solutions.", *npj Urban Sustainability*, 3(1), 9, DOI: 10.1038/s42949-023-00090-4

Sharma A., Gardner T., Begbie D. (2018, a cura di), *Approaches to water sensitive urban design: Potential, design, ecological health, urban greening, economics, policies, and community perceptions*, Woodhead Publishing, Cambridge.

Tarquini S., Isola I., Favalli M., Mazzarini F., Bisson M., Pareschi M.T., Boschi E. (2007), "TINITALY/01: a new triangular irregular network of Italy", *Annals of Geophysics*, 50(3), pp. 407-425, DOI: 10.4401/ag-4424

Id., Isola I., Favalli M., Battistini A., Dotta G. (2023, a cura di), *TINITALY, a digital elevation model of Italy with a 10 meters cell size (Version 1.1)*, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), DOI: 10.13127/tinitaly/1.1

Turhan C., Gökçen Akkurt G. (2018), "Mitigation of Urban Heat Island Effect Through Nature-Based Solutions: H2020 Urban GreenUP Project", in *IV. Uluslararası Katılımlı Anadolu Enerji Sempozyumu*, Trakya Üniversitesi, Edirne

United Nations (2015, a cura di), *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*, United Nations, New York. (https://sdgs.un.org/2030agenda)

WWAP (World Water Assessment Program) (2018, a cura di), *The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-Based Solutions for Water*, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris.

Zhu, L., Gao, C., Wu, M., Zhu, R. (2025), "Integrating Blue–Green Infrastructure with Gray Infrastructure for Climate-Resilient Surface Water Flood Management in the Plain River Networks.", *Land (2012)*, 14(3), pp. 634, DOI: 10.3390/land14030634

ZISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)