

ARTICLE INFO

Received	10 March 2026
Revised	23 April 2026
Accepted	25 April 2026
Published	30 June 2026

ALFABETIZZAZIONE SUL CARBONIO E INFRASTRUTTURE ECOSISTEMICHE

Metodo GIS-R per la valutazione climatica

CARBON LITERACY AND ECOSYSTEM INFRASTRUCTURES

A GIS-R method for climate assessment

Francesca Moraci, Alessandra Barresi, Pietro Bova, Francesco Trimboli

ABSTRACT

Il contributo propone una procedura GIS-R, a codice aperto e replicabile, per stimare lo stock di carbonio e il potenziale di assorbimento nel bacino della Fiumara Calopinace (Reggio Calabria), area di sperimentazione del PP 4.6.1 – Tech4You. Muovendo dalla classificazione ecosistemica di Carta Natura, ricondotta alle categorie dell'IPCC, il metodo traduce dati ecologici locali in metriche biofisiche comparabili, utili a supportare la pianificazione urbanistica responsiva al clima. Il carbonio è considerato non solo come indicatore climatico ma anche come infrastruttura cognitiva capace di connettere servizi ecosistemici, usi del suolo e scelte di Piano. Il modello consente di confrontare lo stato ecosistemico attuale, il quadro urbanistico vigente e gli scenari di trasformazione, offrendo una base conoscitiva per valutazioni ex ante ed ex post e per il contributo agli SDG 9 e 11.

This paper proposes an open-source and replicable GIS-R procedure for estimating carbon stock and sequestration potential in the Fiumara Calopinace basin (Reggio Calabria), the experimental area of PP 4.6.1 – Tech4You. Starting from the ecosystem classification of Carta Natura, reclassified according to IPCC categories, the method translates local ecological data into comparable biophysical metrics that support climate-responsive urban planning. Carbon is considered not only as a climate indicator but also as a cognitive infrastructure capable of connecting ecosystem services, land uses, and planning choices. The model enables comparison between the current ecosystem condition, the statutory planning framework, and transformation scenarios, providing a knowledge base for ex ante and ex post assessments and for contributions to SDGs 9 and 11.

KEYWORDS

gis-r, pianificazione urbanistica climatica, servizi ecosistemici, crediti natura, alfabetizzazione sul carbonio

gis-r, climate-responsive urban planning, ecosystem services, nature credits, carbon literacy

Francesca Moraci, Architect and PhD, is a Full Professor of Urban Planning at the Department of Architecture and Design of the 'Mediterranea' University of Reggio Calabria (Italy). She has coordinated several European and national research projects funded through competitive calls. E-mail: fmoraci@unirc.it

Alessandra Barresi, Architect and PhD, is an Associate Professor of Urban Planning at the Department of Architecture and Design of the 'Mediterranea' University of Reggio Calabria (Italy). Specialised in planning techniques for metropolitan cities, she has carried out research activities in European and national projects. E-mail: alessandra.barresi@unirc.it

Pietro Bova, Architect and PhD, is a Research Fellow at the 'Mediterranea' University of Reggio Calabria (Italy), within Action 0 of Pilot Project 4.6.1 – Goal 4.6 of the Tech4You Innovation Ecosystem. His research focuses on climate-change issues, including investment analysis, impact assessment, and support for decision-making processes. E-mail: pietro.bova@unirc.it

Francesco Trimboli, Architect and PhD, is a Research Fellow at the 'Mediterranea' University of Reggio Calabria (Italy), within Action 6 of Pilot Project 4.6.1 – Goal 4.6 of the Tech4You Innovation Ecosystem. His research focuses on the use of GIS-R methodologies and digital tools for territorial analysis, climate assessment, and decision-process support. E-mail: francesco.trimboli@unirc.it



L'accelerazione dei cambiamenti climatici, il progressivo degrado degli ecosistemi e l'accen- tuarsi delle disuguaglianze socioeconomiche han- no messo in discussione la capacità delle discipli- ne del progetto e della pianificazione di interpretare e governare i processi di trasformazione territoriale e urbana. In questo quadro gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG) promossi dalle Nazioni Unite (UN, 2015) hanno progressivamente assunto il ruolo di riferimento strategico per orientare le traiettorie di sviluppo verso modelli capaci di coniugare sosteni- bilità ambientale, innovazione tecnologica ed equità sociale (Ricci, Poli and Marino, 2025). Numerosi studi hanno evidenziato come tali obiettivi non ope- rino in modo indipendente ma siano caratterizzati da complesse relazioni di sinergie e compromessi che richiedono approcci integrati capaci di valutare gli effetti sistemici delle politiche territoriali (Randers et alii, 2019).

Tra questi obiettivi l'SDG 9 (Industria, innova- zione e infrastruttura) e l'SDG 11 (Città e comunità sostenibili) assumono una particolare rilevanza nel dibattito contemporaneo sul futuro dell'ambiente costruito: da un lato infrastrutture, tecnologie e si- stemi produttivi costituiscono l'ossatura materiale attraverso cui si organizzano lo sviluppo economi- co e le trasformazioni territoriali, dall'altro la distri- buzione spaziale delle risorse ambientali, dei ser- vizi ecosistemici e delle esposizioni ai rischi climatici riflette – e talvolta amplifica – le disuguaglianze so- cio-territoriali esistenti (Barbier and Burgess, 2019; Pham-Truffert et alii, 2020).

Le città emergono come contesti privilegiati in cui le transizioni ambientali, tecnologiche e sociali si manifestano in modo particolarmente evidente. Gli ambienti urbani concentrano infatti la maggior parte della popolazione mondiale e delle attività economiche, ma al tempo stesso rappresentano i principali generatori di pressioni ecologiche, tra cui il consumo di suolo, l'uso intensivo delle risorse e le emissioni climalteranti (UN-Habitat, 2022). Pa- rallelamente la configurazione spaziale dei sistemi determina spesso una distribuzione diseguale dei benefici ambientali e dei rischi climatici, contribuendo alla formazione di vere e proprie forme di disu- guaglianza ambientale.

Affrontare tali sfide richiede lo sviluppo di nuo- vi quadri interpretativi e operativi capaci di integrare conoscenze ecosistemiche, la modellazione spa- ziale e le pratiche progettuali. In questo senso la crescente disponibilità di dati, ambienti di calcolo e strumenti di modellazione geospaziale sta favo- rendo l'affermazione di approcci informati dai dati per la pianificazione urbanistica, nei quali i processi ambientali possono essere quantificati, simulati e integrati nei processi decisionali. Tale prospettiva si inserisce in una lettura dei territori come sistemi dinamici multilivello nei quali le relazioni tra compo- nenti ecologiche, infrastrutturali e socio-territoriali si configurano come reti complesse di interdipen- denza (Gausa, 2024).

In tale contesto si colloca il Programma di Ri- cerca e Innovazione Tech4You¹, finanziato nell' am- bito del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza, che mira a costruire un ecosistema dell'innova- zione orientato allo sviluppo di modelli, tecnologie e strumenti per l'adattamento ai cambiamenti clima- tici nelle regioni dell'Italia meridionale. All'interno di questo quadro il Progetto Pilota 4.6.1² (Fig. 1) svi- luppa approcci integrati per la riduzione della vul- nerabilità climatica attraverso la costruzione di mo-

delli di pianificazione informata dai dati, capaci di in- tegrare analisi ecosistemiche, simulazioni climatiche e sistemi digitali (e fisici) di supporto decisionale.

In questo scenario i servizi ecosistemici e i mo- delli di contabilizzazione del carbonio assumono un ruolo rilevante come metriche operative in grado di tradurre i processi ecologici in indicatori misurabili e comparabili. In particolare il carbonio si configura come parametro strategico nella lettura e nella ge- stione dei territori capace di mettere in relazione di- namiche ecologiche, trasformazioni d'uso del suo- lo e politiche di mitigazione dei cambiamenti clima- tici (Domke et alii, 2019).

Tuttavia, nonostante la crescente produzione scientifica in questo ambito, permane una signifi- cativa distanza tra la conoscenza ecologica e la sua effettiva integrazione nei processi di pianificazione. Molti studi forniscono infatti valutazioni ecologiche dettagliate ma difficilmente traducibili in strumenti operativi, mentre i dispositivi pianificatori tradizionali risultano spesso privi di indicatori ecosistemici ro- busti capaci di supportare valutazioni ex-ante ed ex-post delle trasformazioni.

Permane inoltre una duplice criticità: da un lato numerosi studi sulla contabilizzazione del carbonio sono stati sviluppati in ambiti forestali, agricoli o am- bientali, senza una reale traduzione nei processi ur- banistici; dall'altro molte pratiche di pianificazione climatica operano ancora senza metriche biofisi- che standardizzate e confrontabili. A ciò si aggiun- ge la limitata disponibilità di workflow aperti e repli- cabili, costruiti per confrontare stato di fatto, qua- dro normativo vigente e scenari di trasformazione urbana. A partire da questo presupposto teorico il contributo propone un flusso operativo integrato (Longo et alii, 2024) GIS-R, a codice aperto e repli- cabile, finalizzato alla stima dello stock di carbonio e del potenziale di assorbimento condotto a par- tire dalla classificazione ecosistemica derivata da Carta Natura (Paone et alii, 2023) che descrive lo stato biofisico attuale del territorio. Tuttavia tale rap- presentazione non coincide necessariamente con le destinazioni d'uso previste dagli strumenti urba- nistici vigenti che costituiscono il quadro normativo entro cui si collocano le trasformazioni territoriali. Pertanto l'obiettivo del paper è verificare se e in qua- le misura una procedura geospaziale integrata GIS-R, basata sull'adattamento locale tra classifi- cazioni ecosistemiche e categorie elaborate dall'In- tergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), possa costituire uno strumento operativo per la pia- nificazione urbanistica responsiva al clima. La do- manda di ricerca riguarda la possibilità di trasfor- mare dati ecologici territoriali in indicatori compa- rabili, utili alla valutazione ex ante ed ex post di sce- nari di Piano.

Il contributo originale del lavoro risiede in tre aspetti: nella costruzione di una matrice di raccor- do operativo tra Carta Natura e classi internazionali di contabilizzazione del carbonio; nella definizione di un workflow a codice aperto replicabile; nell'o- rientamento esplicito del modello al supporto del- le decisioni urbanistiche e alla valutazione di sce- nari trasformativi. Il modello proposto intende con- tribuire al dibattito scientifico sul rapporto tra inno- vazione metodologica, pianificazione urbanistica e adattamento climatico, offrendo una procedura ap- plicabile anche in altri contesti mediterranei carat- terizzati da fragilità ecosistemica, pressione inse- diativa e necessità di strumenti decisionali basati sull'evidenza.

Alfabetizzazione sul carbonio per il progetto: il carbonio come infrastruttura cognitiva per la pianificazione responsiva al clima | Il carbonio

è stato prevalentemente utilizzato come indicato- re per la quantificazione delle emissioni e per il mo- nitoraggio degli obiettivi di mitigazione climatica sta- biliti dagli accordi internazionali, in particolare nel- l'ambito della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UN, 1992) e deg- li inventari nazionali delle emissioni (Domke et alii, 2019). Negli ultimi anni la letteratura scientifica ha tuttavia progressivamente ampliato questa prospet- tiva, evidenziando come il carbonio possa essere interpretato non soltanto come variabile climatica ma anche come parametro territoriale capace di re- stituire informazioni sulla struttura ecologica, sulle dinamiche di uso del suolo e sul funzionamento deg- li ecosistemi (Pan et alii, 2011; Keith et alii, 2024).

Parallelamente il crescente interesse verso i ser- vizi ecosistemici ha contribuito a rafforzare questa convinzione: la capacità degli ecosistemi terrestri di sequestrare e immagazzinare carbonio rappre- senta uno dei principali servizi di regolazione rico- nosciuti dalla letteratura e dalle principali classifica- zioni internazionali (Millennium Ecosystem Asses- sment, 2005; Potschin et alii, 2016). La quantifica- zione dello stock e dei flussi di carbonio consente quindi di tradurre il funzionamento degli ecosistemi in metriche biofisiche misurabili, utili a supportare processi di pianificazione territoriale orientati alla so- stenibilità ma, nonostante questi progressi, l'inte- grazione delle metriche del carbonio nei processi di pianificazione rimane limitata.

Infatti in molti casi le analisi sono sviluppate in ambiti disciplinari separati e non entrano nei dispo- sitivi operativi della pianificazione urbanistica. In que- sto contesto il concetto di 'alfabetizzazione sul car- bonio', originariamente sviluppato nel campo delle politiche climatiche può essere reinterpretato co- me 'alfabetizzazione sul carbonio per il progetto', ossia come insieme di competenze, strumenti e metodi in grado di integrare le metriche del car- bonio nei processi di analisi, valutazione e decisione territoriale.

Interpretata in questa prospettiva la 'alfabetiz- zazione sul carbonio' non si limita alla conoscenza dei processi climatici, ma configura il carbonio co- me parametro operativo capace di orientare stra- tegie di rigenerazione urbana, progettazione delle infrastrutture verdi e gestione sostenibile del terri- torio. Questa prospettiva è particolarmente relevan- te nel contesto delle politiche europee e interna- zionali orientate alla transizione ecologica; l'atten- zione crescente verso strumenti di contabilizzazio- ne del carbonio, sistemi di certificazione ambien- tale e meccanismi di mercato legati ai servizi eco- sistemici evidenzia la necessità di disporre di dati territoriali affidabili e comparabili, capaci di rendere misurabili i benefici ambientali generati dagli eco- sistemi (Zhao and Shaw, 2025).

Numerosi studi hanno infatti evidenziato che la distribuzione dei servizi ecosistemici nei territori ur- bani e periurbani non è omogenea ma spesso ri- flette dinamiche socio-spaziali che influenzano l'ac- cesso ai benefici ambientali e alle infrastrutture eco- logiche. In questo senso la lettura territoriale delle prestazioni ecosistemiche può contribuire a evide- nziare relazioni tra qualità ambientale, modelli urbani e giustizia spaziale (Fiorini et alii, 2025). La map- patura dello stock di carbonio e della capacità eco- sistemica dei territori può quindi contribuire a evi-

Tech4You Innovation Ecosystem – Pilot Project 4.6.1

Assessment of the National Sustainable Development Strategy (SNSVS)

SUSTAINABILITY DRIVERS



VETTORE 1

[Objective 1] - [Trajectory 1.2]
Strengthening the role of the National Sustainable Development Strategy (SNSVS) in fostering a shared vision for sustainable development across actors and territories
[Objective 2] - [Trajectory 2.2]
Ensuring integration and coherence of public policies towards sustainable development
[Objective 3] - [Trajectory 3.2]
Developing shared sustainability assessment tools within the framework of strategic planning



VETTORE 2

[Objective 3] - [Trajectory 3.1]
Strengthening education and training for sustainable development by fostering synergies among actors and instruments
[Objective 4] - [Trajectory 4.3]
Developing shared languages, tools and spaces for sustainability communication and awareness



VETTORE 3

[Objective 2] - [Trajectory 2.2]
Mapping and enabling institutional actors
[Objective 3] - [Trajectory 3.2]
Promoting collaboration and supporting the creation of innovative partnerships

SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS (SDGS)



[9] Industry, Innovation and Infrastructure
Build resilient infrastructure, promote inclusive and sustainable industrialization and foster innovation



[11] Sustainable Cities and Communities
Make cities and human settlements inclusive, safe, resilient and sustainable.



[12] Responsible Consumption and Production
Ensure sustainable consumption and production patterns.



[13] Climate Action
Take urgent action to combat climate change and its impacts.



[15] Life on Land
Protect, restore and promote sustainable use of terrestrial ecosystems.

STRATEGIC AREAS (5 PS) AND NATIONAL STRATEGIC OBJECTIVES OF THE NATIONAL SUSTAINABLE DEVELOPMENT STRATEGY (SNSVS)



PEOPLE
[NSO 3] - [NSO 3.1]
Promote health and well-being



PIANETA
[NSO 1] - [NSO 1.5]
Halt biodiversity loss
[NSO 2] - [NSO 2.2]
Ensure the conditions for the development of human potential
[NSO 3] - [NSO 3.1]
Promote health and well-being



PROSPERITÀ
[NSO 2] - [NSO 2.2]
Fund and promote sustainable research and innovation
[NSO 6] - [NSO 6.3]
Fund and promote sustainable research and innovation



PARTNERSHIP
Cooperation and co-design actions based on an approach aimed at recognizing and enhancing public-private interconnections and interdependencies

Fig. 1 | Reference framework linking the Sustainability Vectors of the SNSVS, the SDGs, and the Strategic Areas (5Ps) of the National Sustainable Development Strategy (credit: the Authors, 2026).

denziare tali asimmetrie, fornendo strumenti conoscitivi utili per orientare politiche di riequilibrio territoriale e strategie di rigenerazione ecologica. Questa alfabetizzazione può essere interpretata come dispositivo concettuale capace di connettere diverse dimensioni della sostenibilità territoriale, contribuendo a costruire approcci progettuali transcalari, nei quali le strategie locali di trasformazione territoriale si allineano con gli obiettivi globali dell'Agenda 2030 e con le logiche delle soluzioni basate sulla natura (Ingaramo et alii, 2023).

Contabilizzazione del carbonio, servizi ecosistemici e governance territoriale

Tradizionalmente i modelli di contabilizzazione del carbonio sono stati sviluppati principalmente nell'ambito delle politiche climatiche e della rendicontazione delle emissioni di gas serra. Le linee guida elaborate dall'IPCC (Domke et alii, 2019) rappresentano oggi il riferimento metodologico internazionale per la stima degli stock e dei flussi di carbonio associati agli usi del suolo, alla gestione forestale e alle attività agricole nell'ambito del settore AFOLU / LULUCF³. Tali metodologie sono utilizzate dagli Stati membri della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici per la redazione degli inventari nazionali delle emissioni e degli assorbimenti di carbonio.

Questa contabilizzazione ha tuttavia progressivamente ampliato il proprio campo di applicazione, estendendosi oltre la dimensione della rendicontazione climatica e assumendo un ruolo crescente nei processi di governance territoriale e nella definizione delle politiche ambientali. La possibilità di quantificare e rappresentare spazialmente lo stock di carbonio associato ai diversi ecosistemi consente di individuare aree strategiche per la conservazione, la rinaturalizzazione e la gestione sostenibile del territorio, trasformando il carbonio

in un indicatore territoriale utile a orientare le scelte di pianificazione.

In diversi contesti territoriali europei tali approcci sono stati utilizzati per interpretare le relazioni tra dinamiche di urbanizzazione, innovazione rurale e servizi ecosistemici, evidenziando il ruolo delle infrastrutture ecologiche nella definizione di nuove strategie territoriali integrate (Lombardini, Pilogallo and Tucci, 2023). La quantificazione dello stock di carbonio diventa quindi una modalità operativa per tradurre la capacità ecosistemica dei territori in indicatori biofisici utili per la pianificazione ambientale e territoriale; tale approccio consente di evidenziare le relazioni tra struttura ecosistemica, usi del suolo e dinamiche insediative.

In questa prospettiva vanno considerati anche nuovi strumenti per la valorizzazione economica dei servizi ecosistemici ma affinché questi meccanismi possano essere applicati in modo efficace e credibile è tuttavia necessario disporre di basi conoscitive, fondate su dati verificabili, replicabili e coerenti con gli standard internazionali di rendicontazione ambientale. In questa cornice rientrano dunque la standardizzazione delle metriche ambientali e la costruzione di sistemi informativi interoperabili, i quali rappresentano condizioni fondamentali per rendere confrontabili i dati territoriali e supportare processi decisionali basati su evidenze quantitative (Bologna, Ghersi and Melli, 2023). La quantificazione dello stock di carbonio e dei flussi di assorbimento rappresenta pertanto un passaggio cruciale per garantire la trasparenza e la credibilità di tali sistemi, evitando fenomeni di sovrastima o di doppia contabilizzazione dei benefici ecosistemici.

Un tema centrale è il principio di addizionalità, ovvero la capacità di dimostrare che i benefici ecosistemici generati da un determinato intervento non si sarebbero verificati in assenza di tale azione. Allo stesso tempo diventa necessario considerare il pro-

blema della permanenza degli assorbimenti di carbonio nel tempo e il rischio di spostamento delle pressioni ambientali verso altri territori.

Un ulteriore elemento di rilievo riguarda la relazione tra la contabilizzazione del carbonio e le disuguaglianze ambientali: la distribuzione dei servizi ecosistemici e delle infrastrutture ecologiche all'interno dei territori non è infatti uniforme, ma riflette spesso processi storici di sviluppo urbano e di organizzazione socioeconomica dello spazio. Alcune aree urbane o periurbane possono risultare significativamente carenti di spazi verdi e infrastrutture ecologiche, esponendo le popolazioni residenti a condizioni ambientali più critiche, come l'intensificazione delle isole di calore urbane o una maggiore vulnerabilità agli eventi climatici estremi.

Approccio metodologico e modello di valutazione del carbonio

Il metodo è stato sperimentato nel bacino della Fiumara Calopinace (Reggio Calabria) in un contesto mediterraneo caratterizzato da elevata fragilità ecosistemica e da forti pressioni antropiche. L'obiettivo era costruire un modello analitico capace di quantificare le prestazioni ecosistemiche del territorio in termini di capacità di sequestro del carbonio, traducendo l'informazione ecologica qualitativa derivante dai dataset ambientali in indicatori biofisici misurabili e confrontabili.

Dal punto di vista operativo il protocollo metodologico è stato articolato in sei fasi sequenziali e replicabili: 1) acquisizione e preparazione dei dati territoriali; 2) riclassificazione ecosistemica e costruzione della matrice di raccordo con le categorie IPCC; 3) attribuzione dei coefficienti medi di stock di carbonio; 4) modellazione geospaziale su griglia regolare; 5) simulazione temporale dell'accrescimento potenziale; 6) interpretazione dei risultati a supporto della pianificazione urbanistica. Tale articolazione consente la ripetizione dello studio in

contesti differenti, a condizione che siano disponibili dati territoriali minimi omogenei e georiferiti.

Il punto di partenza dell'analisi è la Carta Natura della Regione Calabria, un set di dati vettoriale che descrive la distribuzione degli ecosistemi attraverso una classificazione ecologica articolata. In particolare l'analisi è stata condotta utilizzando il livello poligonale (clip) relativo all'area oggetto della sperimentazione del progetto pilota all'interno del quale sono state identificate 40 categorie ecologiche locali. Tali categorie costituiscono un repertorio descrittivo estremamente dettagliato delle tipologie ecosistemiche presenti nel territorio e rappresentano la base conoscitiva su cui è stato costruito il modello di valutazione del carbonio (Fig. 2).

I dati minimi richiesti per la replicabilità del modello sono: a) cartografia ecosistemica o uso / copertura del suolo in formato vettoriale o raster ad adeguata risoluzione; b) perimetro dell'area di studio; c) sistema di riferimento metrico coerente; d) coefficienti di stock di carbonio ricavati da letteratura o inventari ufficiali; e) eventuali strumenti urbanistici vigenti per analisi comparative tra stato di fatto e scenari di Piano. L'elevato livello di dettaglio della legenda della Carta Natura rendeva difficile l'attribuzione diretta dei valori di stock alle singole categorie; al fine di superare tale criticità è stata applicata una riclassificazione funzionale, fondata sulla costruzione di una tabella di corrispondenza tra le categorie ecologiche locali e le classi di uso del suolo previste dalle linee guida dell'IPCC (Domke et alii, 2019) che rappresentano lo standard internazionale per la stima degli stock e dei flussi di carbonio negli ecosistemi terrestri e costituiscono il riferimento metodologico utilizzato dagli Stati per la redazione degli inventari nazionali delle emissioni e degli assorbimenti di carbonio.

Il processo di riclassificazione è stato condotto sulla base di tre criteri principali: 1) la struttura della vegetazione dominante; 2) la tipologia d'uso o di gestione del suolo; 3) il contenuto medio di biomassa e di carbonio organico del suolo associato

ai diversi ecosistemi. Attraverso questa procedura sono stati individuati 7 gruppi ecosistemici (Tab. 1) funzionali, che rappresentano un adattamento locale delle categorie IPCC e consentono di collegare la classificazione ecologica della Carta Natura ai modelli internazionali di contabilizzazione del carbonio. La procedura per la costruzione della matrice costituisce uno degli elementi centrali del metodo poiché consente di tradurre tassonomie ecologiche locali in classi comparabili a scala internazionale, preservando al contempo il dettaglio territoriale necessario alle applicazioni urbanistiche.

Definita la struttura di riclassificazione è stato possibile procedere all'attribuzione dei valori medi di stock di carbonio agli ecosistemi attraverso una revisione sistematica della letteratura scientifica internazionale e nazionale relativa alla stima della biomassa e del carbonio organico negli ecosistemi terrestri. Le principali fonti utilizzate includono le citate linee guida dell'IPCC per i settori AFOLU e LULUCF, l'Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio⁴ (INFC) e diversi studi dedicati alla quantificazione del carbonio negli ecosistemi mediterranei. A partire da queste fonti sono stati individuati intervalli di riferimento dello stock di carbonio, espresso in tonnellate per ettaro (tC/ha), per ciascun gruppo ecosistemico; per ridurre la variabilità tra i diversi contesti di studio è stato adottato un valore medio rappresentativo per ogni categoria, calcolato come media degli intervalli riportati nella letteratura scientifica. L'approccio adottato è coerente con i livelli metodologici Tier 1 e Tier 2 previsti dalle linee guida IPCC e basati sull'utilizzo di coefficienti medi derivati dalla letteratura e dagli inventari forestali nazionali (Tab. 2). L'utilizzo di coefficienti medi rende il metodo immediatamente applicabile anche in assenza di campagne di misura dirette, configurandosi come soluzione appropriata per analisi preliminari, screening territoriali e valutazioni comparative tra scenari.

Una volta attribuiti i valori medi di stock di carbonio agli ecosistemi è stata avviata la fase di mo-

dellazione geospaziale per la costruzione di una superficie continua della densità⁵ (Fig. 3). Questa procedura ha consentito di costruire mappe continue della densità del carbonio, utili a rappresentare la distribuzione spaziale della capacità ecosistemica del territorio. Le elaborazioni sono state realizzate, considerati i relativi intervalli di riferimento (Tab. 3), attraverso l'integrazione tra QGIS e l'ambiente di calcolo RStudio, garantendo la tracciabilità delle operazioni e la replicabilità dell'intero flusso operativo analitico (Fig. 4). L'uso di una doppia risoluzione spaziale permette di confrontare scale differenti di lettura⁶: la griglia a 400 m risulta più adatta a interpretazioni strategiche di area vasta, mentre quella a 200 m consente letture più puntuali utili alla scala urbana e progettuale. Il modello consente di stimare lo stock futuro di carbonio a partire dallo stock iniziale e da un tasso medio annuo di accrescimento specifico per ciascun gruppo ecosistemico.

Successivamente sono stati considerati tre orizzonti temporali di simulazione – 10, 20 e 30 anni – per valutare l'evoluzione potenziale del sistema ecosistemico nel medio e nel lungo periodo. A ciascun gruppo è stato assegnato un valore medio rappresentativo dello stock (tC/ha), calcolato come media aritmetica dell'intervallo di riferimento, da cui è stato successivamente derivato un tasso annuo medio di accrescimento (r) utilizzato per stimare il potenziale di assorbimento (Fig. 5).

L'assorbimento potenziale è stato espresso secondo la relazione $A_i = S_i \times r_i$, dove 'A_i' rappresenta l'assorbimento medio per unità di superficie (tC/ha/anno), 'S_i' lo stock medio di riferimento e 'r_i' il tasso di accrescimento specifico per ecosistema (Zomer et alii, 2016). Questi valori derivano da un adattamento funzionale dei parametri proposti dall'IPCC (Domke et alii, 2019) e dai principali studi sulla produttività netta e sull'accumulo di carbonio in ecosistemi mediterranei (Marchetti et alii, 2012; Fernandes et alii, 2020; Funes et alii, 2022). Tale impostazione consente di collegare direttamente

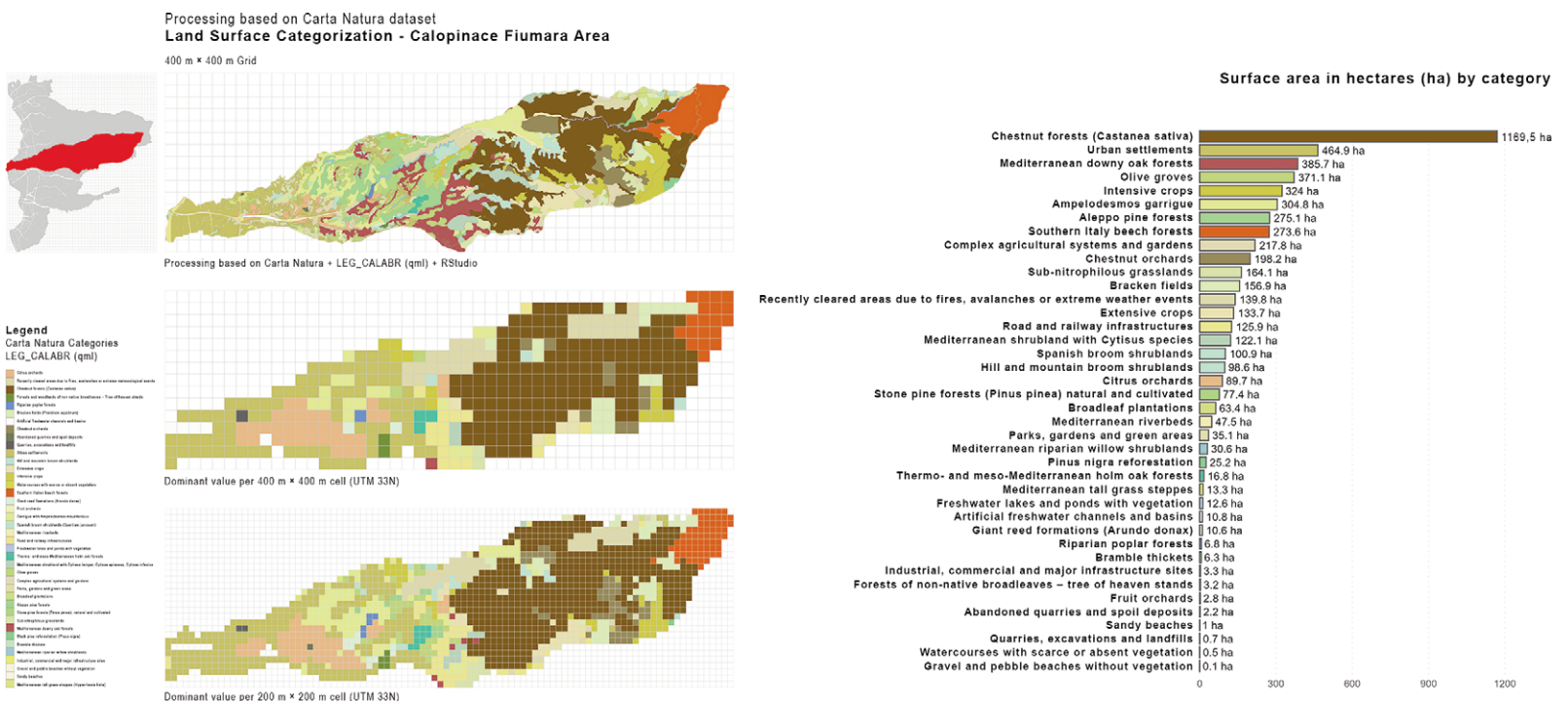


Fig. 2 | Ecosystem classification of the Calopinace Torrent area derived from Carta Natura and spatial discretisation through regular grids of 400 × 400 m and 200 × 200 m (credit: the Authors, 2026).

No.	Ecosystem group	Scientific description	Carbon stock range	IPCC category (2019)
1	Temperate and Mediterranean forests	Deciduous, evergreen or mixed forests, whether natural or reforested; includes chestnut, beech, oak, holm oak and Mediterranean pine forests	100-220 tC/ha	Forest Land
2	Mediterranean shrublands and maquis	Secondary formations dominated by shrubs, including maquis, garrigue, broom formations and scrublands	70-110 tC/ha	Grassland / shrubland
3	Mediterranean grasslands and steppes	Perennial or seasonal herbaceous systems, often located on arid or disturbed substrates	30-50 tC/ha	Grassland
4	Tree-based agroecosystems	Permanent tree crops, including olive groves, citrus orchards, fruit orchards and chestnut groves	35-90 tC/ha	Cropland (tree-based)
5	Herbaceous crops and agricultural mosaics	Arable land, market gardens and complex agricultural systems dominated by annual herbaceous species	20-40 tC/ha	Cropland (herbaceous)
6	Wetlands and riparian ecosystems	Hygrophilous and fluvial ecosystems with poplar, willow, reed beds and riparian vegetation	80-170 tC/ha	Wetlands / Forest Land (riparian)
7	Anthropised, extractive and coastal areas	Built-up areas, infrastructure, quarries, landfills, beaches and artificial surfaces	< 10 tC/ha	Settlements / Other Land

Tab. 1 | Reclassification scheme between local ecosystem categories and IPCC land-use classes (source: Domke et alii, 2019; adapted by the Authors, 2026).

la struttura ecosistemica alla dinamica dei flussi di carbonio, traducendo la tipologia vegetazionale in un parametro biofisico di assorbimento. Le simulazioni evidenziano come la capacità di sequestro del carbonio varia in modo significativo in funzione della struttura ecosistemica e degli usi del suolo.⁷

Il workflow è trasferibile in altri contesti mediterranei o europei qualora siano disponibili dati di uso / copertura del suolo confrontabili, una legenda riclassificabile in categorie IPCC e coefficienti coerenti con il contesto biogeografico locale. La natura a codice aperto degli strumenti impiegati riduce inoltre barriere economiche e favorisce trasparenza metodologica, riuso del codice e aggiornabilità periodica del modello. La mappatura consente di individuare infrastrutture ecologiche strategiche e di supportare modelli di gestione integrata delle risorse naturali nei sistemi urbani e periurbani (Valente et alii, 2024). In questa prospettiva il rafforzamento delle infrastrutture verdi e blu all'interno dei sistemi urbani può contribuire a ridefinire la struttura ecologica delle città e a migliorare le prestazioni ambientali dei tessuti urbani, come evidenziato anche dalle esperienze di riorganizzazione morfologica dello spazio urbano basate su modelli di prossimità e di riduzione della pressione (Rueda, 2019).

Discussione, limiti, SDG e conclusioni | La ricerca ha proposto un metodo per quantificare e rappresentare spazialmente lo stock di carbonio e il potenziale di assorbimento degli ecosistemi terrestri, con l'obiettivo di integrare la dimensione climatica nei processi di pianificazione urbanistica. Da questa prospettiva il modello potrebbe essere utilizzato per confrontare differenti condizioni territoriali: a) lo stato ecosistemico attuale, derivato dalla classificazione ambientale; b) il quadro delle destinazioni d'uso previsto dallo strumento urbanistico vigente; c) gli scenari di trasformazione associati alle previsioni di Piano o ai progetti di rigenerazione urbana (Corradi et alii, 2024). L'interazione tra questi tre livelli consente di interpretare la distribuzione dello stock di carbonio non come una semplice fotografia dello stato ambientale del territorio bensì

come indicatore utile a supportare la definizione delle scelte urbanistiche e la valutazione delle loro implicazioni ecologiche.

Rispetto a molte stime ecologiche tradizionali, spesso limitate alla dimensione descrittiva o conservazionistica, il modello qui proposto è esplicitamente orientato all'uso decisionale. Parallelamente, rispetto a numerosi strumenti urbanistici che includono obiettivi climatici in forma qualitativa, il contributo introduce metriche spazialmente verificabili e confrontabili. In questo senso il paper si colloca in uno spazio intermedio ancora poco esplorato tra ecologia applicata, analisi urbana e pianificazione climatica. L'utilizzo di coefficienti medi di stock di carbonio derivati dalla letteratura scientifica introduce inevitabilmente margini di variabilità legati alle condizioni ecologiche locali. Per questo motivo il modello può essere interpretato come una prima base di valutazione territoriale, coerente con gli approcci Tier 1 e Tier 2 delle linee guida IPCC (Gasparini et alii, 2022).

L'integrazione con dati di campo, inventari forestali o dati di telerilevamento potrebbe contribuire a migliorare la precisione delle stime. Ulteriori condizioni di validità riguardano la qualità e l'aggiornamento dei dataset territoriali di partenza, la coerenza della scala cartografica utilizzata e la correttezza del processo di riclassificazione tra categorie ecosistemiche locali e classi IPCC. In assenza di tali condizioni il modello può mantenere valore comparativo relativo ma ridurre l'affidabilità assoluta delle stime; inoltre tra le principali barriere all'adozione si segnalano: 1) la frammentazione amministrativa delle basi dati; 2) la limitata disponibilità di competenze geospaziali avanzate nelle amministrazioni locali; 3) la difficoltà di integrare metriche innovative nei dispositivi urbanistici tradizionali; 4) la frequente assenza di procedure standard per il monitoraggio post-attuativo dei Piani. Nel complesso la ricerca evidenzia come la quantificazione e la rappresentazione spaziale del carbonio possano diventare strumenti operativi per rafforzare il rapporto tra conoscenza ecologica e pianificazione urbanistica. Il contributo diretto appare particolarmente rilevante rispetto a quattro Obiettivi di Sviluppo Sosteni-

bile: in relazione all'SDG 9 il metodo introduce innovazione procedurale, interoperabilità informativa e supporto decisionale basato sulle evidenze; con riferimento all'SDG 11 il modello offre strumenti utili alla pianificazione urbana resiliente, alla localizzazione di infrastrutture verdi e alla rigenerazione ecologica dei tessuti costruiti; rispetto all'SDG 13 consente di integrare metriche climatiche nei processi di Piano e di valutare scenari di mitigazione e adattamento; in relazione all'SDG 15 contribuisce alla tutela e valorizzazione funzionale degli ecosistemi terrestri e periurbani. Sono inoltre presenti sinergie indirette con l'SDG 10 laddove la distribuzione territoriale delle prestazioni ecosistemiche venga utilizzata per leggere asimmetrie socio-spaziali e con l'SDG 12 qualora il modello orienti a usi del suolo più efficienti e meno dissipativi.

Non mancano tuttavia possibili compromessi: interventi di densificazione urbana non accompagnati da compensazioni ecologiche possono ridurre la capacità di assorbimento; processi di rinaturalizzazione non coordinati possono entrare in tensione con fabbisogni insediativi o infrastrutturali; meccanismi di valorizzazione economica del carbonio possono produrre effetti distortivi se privi di adeguati controlli pubblici.

Il principale avanzamento del contributo consiste tuttavia nell'aver trasformato una base dati ecosistemica locale in un sistema interpretativo capace di dialogare con standard climatici internazionali e con processi ordinari del governo del territorio. Il metodo potrebbe essere integrato nei procedimenti di Valutazione Ambientale Strategica, nei quadri conoscitivi dei Piani urbanistici comunali, nei programmi di rigenerazione urbana e nei sistemi di monitoraggio delle trasformazioni territoriali. Ulteriori sviluppi possono riguardare l'integrazione con dati LiDAR, telerilevamento multispettrale, rilievi di campo e modelli di gemelli digitali territoriali.

La trasferibilità del workflow in altri contesti mediterranei suggerisce la possibilità di costruire una nuova generazione di strumenti urbanistici responsivi al clima, nei quali la misurabilità delle prestazioni ecosistemiche accompagna le scelte insediative, infrastrutturali e paesaggistiche. In tal senso il con-

Next page

Tab. 2 | Crosswalk between Carta Natura ecosystem classes (LEG_CALABR), functional ecosystem groups, and IPCC land-use classes used to estimate carbon stock in the Calopine basin (source: Domke et alii, 2019; adapted by the Authors, 2026).

LEG_CALABR	Calopinace ecosystem group (1-7)	Dominant vegetation structure	Land use / management	IPCC category (2019)
Beech forests of Southern Italy	1. Temperate and Mediterranean forests	Trees	Natural	Forest Land
Castanea sativa woodlands	1. Temperate and Mediterranean forests	Trees	Natural / traditionally managed	Forest Land
Mediterranean downy oak woodlands	1. Temperate and Mediterranean forests	Trees	Natural	Forest Land
Thermo- and meso-Mediterranean holm oak forests	1. Temperate and Mediterranean forests	Trees	Natural	Forest Land
Pinus nigra reforested stands	1. Temperate and Mediterranean forests	Trees	Managed forestry	Forest Land
Aleppo pine forests	1. Temperate and Mediterranean forests	Trees	Natural	Forest Land
Stone pine forests (Pinus pinea)	1. Temperate and Mediterranean forests	Trees	Managed	Forest Land
Riparian poplar forests	6. Wetlands and riparian ecosystems	Trees	Natural	Forest Land
Woodlands and thickets of non-native broadleaved species	1. Temperate and Mediterranean forests	Trees / shrubs	Secondary naturalised	Forest Land
Recently deforested areas (fires and avalanches)	1. Temperate and Mediterranean forests	Trees (residual)	Natural / disturbed	Forest Land (disturbed)
Cytisus scrublands	2. Mediterranean shrublands and maquis	Shrubs	Natural	Grassland (shrubland)
Garrigue with Ampelodesmos mauritanicus	2. Mediterranean shrublands and maquis	Shrubs / herbs	Natural	Grassland
Spartium junceum broomlands	2. Mediterranean shrublands and maquis	Shrubs	Natural	Grassland
Hill and mountain broom shrublands	2. Mediterranean shrublands and maquis	Shrubs	Natural	Grassland
Riparian willow shrublands	6. Wetlands and riparian ecosystems	Shrubs	Natural	Grassland (shrubland)
Arundo donax formations	6. Wetlands and riparian ecosystems	Tall herbaceous vegetation	Managed / anthropogenic	Grassland (riparian)
Bramble thickets	2. Mediterranean shrublands and maquis	Shrubs	Secondary naturalised	Grassland
Mediterranean tall-grass steppes (Hyparrhenia)	3. Mediterranean grasslands and steppes	Herbaceous vegetation	Natural	Grassland
Subnitrophilous grasslands	3. Mediterranean grasslands and steppes	Herbaceous vegetation	Natural / disturbed	Grassland
Pteridium aquilinum stands	3. Mediterranean grasslands and steppes	Herbaceous vegetation	Secondary naturalised	Grassland
Olive groves	4. Tree-based agroecosystems	Trees	Managed	Cropland
Citrus orchards	4. Tree-based agroecosystems	Trees	Managed	Cropland
Productive chestnut groves	4. Tree-based agroecosystems	Trees	Managed	Cropland
Fruit orchards	4. Tree-based agroecosystems	Trees	Managed	Cropland
Broadleaved plantations	4. Tree-based agroecosystems	Trees	Managed	Cropland
Extensive arable crops	5. Herbaceous crops and agricultural mosaics	Herbaceous vegetation	Managed	Cropland
Intensive arable crops	5. Herbaceous crops and agricultural mosaics	Herbaceous vegetation	Managed	Cropland
Gardens and complex agricultural systems	5. Herbaceous crops and agricultural mosaics	Herbaceous vegetation / low shrubs	Managed	Cropland
Mediterranean riverbeds	7. Anthropised, extractive and coastal areas	Non-vegetated	Natural / extractive	Other Land
Watercourses with sparse or absent vegetation	7. Anthropised, extractive and coastal areas	Non-vegetated	Natural	Other Land
Artificial canals and freshwater reservoirs	6. Wetlands and riparian ecosystems	Non-vegetated	Managed / anthropogenic	Wetlands
Vegetated freshwater lakes and ponds	6. Wetlands and riparian ecosystems	Aquatic herbaceous vegetation	Natural	Wetlands
Quarries, excavations and landfills	7. Anthropised, extractive and coastal areas	Non-vegetated	Extractive	Other Land
Abandoned quarries and debris deposits	7. Anthropised, extractive and coastal areas	Pioneer herbs / shrubs	Extractive / renaturalised	Other Land
Sandy beaches	7. Anthropised, extractive and coastal areas	Non-vegetated	Natural / coastal	Other Land
Non-vegetated pebble and gravel beaches	7. Anthropised, extractive and coastal areas	Non-vegetated	Natural / coastal	Other Land
Urban settlements	7. Anthropised, extractive and coastal areas	Absent or ornamental vegetation	Urban	Settlements
Parks, gardens and green areas	7. Anthropised, extractive and coastal areas	Trees / shrubs	Urban	Settlements
Road and railway infrastructure	7. Anthropised, extractive and coastal areas	Non-vegetated	Urban / industrial	Settlements
Industrial, commercial and major infrastructure sites	7. Anthropised, extractive and coastal areas	Non-vegetated	Urban / industrial	Settlements

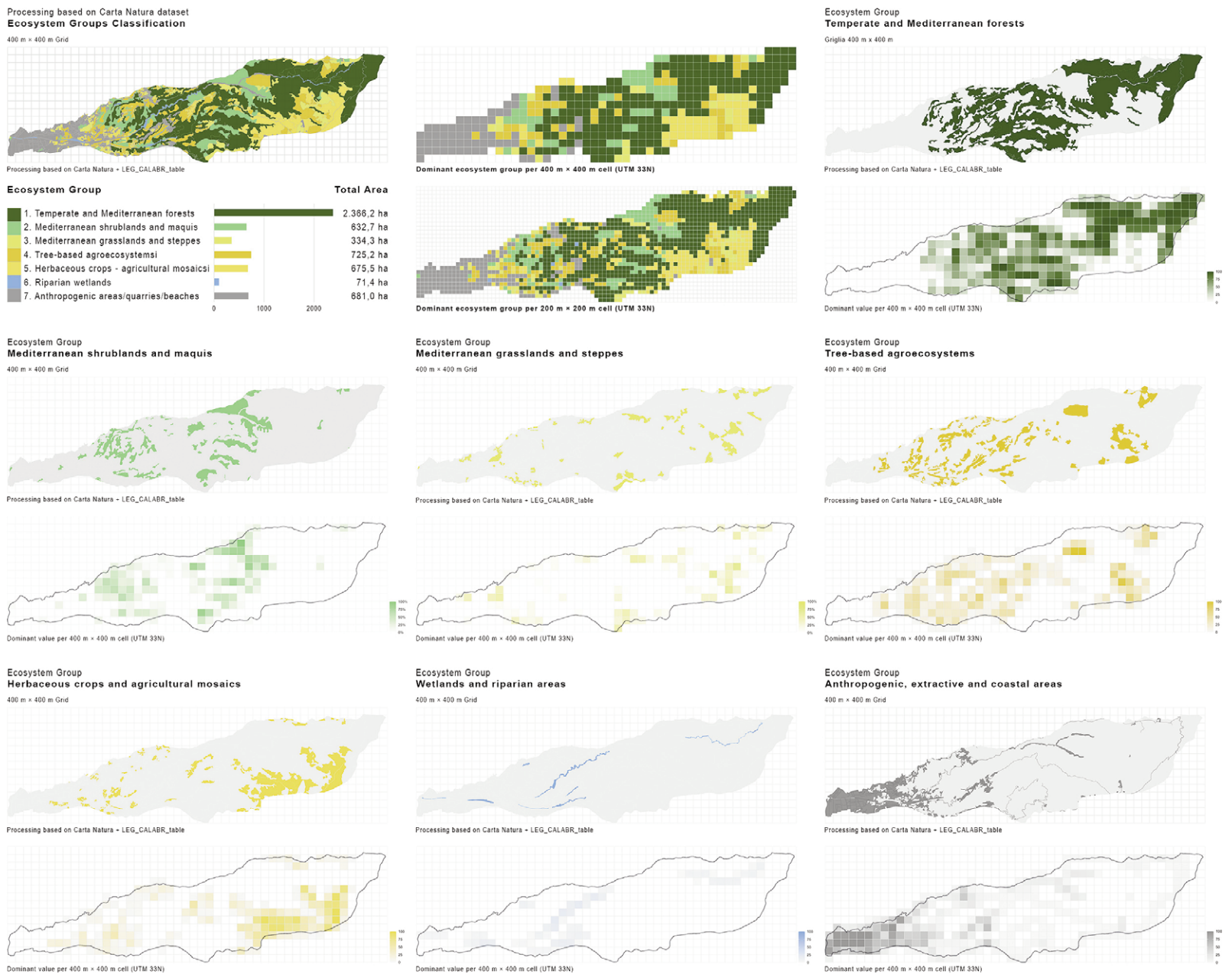


Fig. 3 | Distribution of the 7 functional ecosystem groups derived from Carta Natura in the Calopinace Torrent basin and identification of the dominant group per cell through regular grids of 400 × 400 m and 200 × 200 m used for carbon-stock modelling (credit: the Authors, 2026).

tributo intende rafforzare il dibattito disciplinare sul ruolo della pianificazione urbanistica nella transizione ecologica contemporanea.

The acceleration of climate change, the progressive degradation of ecosystems, and the intensification of socio-economic inequalities have called into question the capacity of design and planning disciplines to interpret and govern processes of territorial and urban transformation. Within this framework, the Sustainable Development Goals (SDGs) promoted by the United Nations (UN, 2015) have progressively become a strategic reference for steering development trajectories towards models capable of combining environmental sustainability, technological innovation, and social equity (Ricci, Poli and Marino, 2025). Several studies have shown that these goals do not operate independently, but are characterised by complex relations of synergy and trade-off that require integrated approaches

capable of assessing the systemic effects of territorial policies (Randers et alii, 2019). Among these goals, SDG 9 (Industry, Innovation, and Infrastructure) and SDG 11 (Sustainable Cities and Communities) are particularly relevant to the contemporary debate on the future of the built environment: on the one hand, infrastructures, technologies, and production systems constitute the material backbone through which economic development and territorial transformations are organised; on the other, the spatial distribution of environmental resources, ecosystem services, and exposure to climate risks often reflects – and at times amplifies – existing socio-territorial inequalities (Barbier and Burgess, 2019; Pham-Truffert et alii, 2020).

Cities emerge as privileged contexts in which environmental, technological, and social transitions become especially evident. Urban environments concentrate most of the world’s population and economic activities, while at the same time representing the main generators of ecological pressures, including land take, the intensive use of reso-

urces, and climate-altering emissions (UN-Habitat, 2022). At the same time, the spatial configuration of urban systems often determines an unequal distribution of environmental benefits and climate risks, contributing to the formation of genuine forms of environmental inequality.

Addressing these challenges requires the development of new interpretative and operational frameworks capable of integrating ecosystem knowledge, spatial modelling, and design practices. In this sense, the growing availability of data, computational environments, and geospatial modelling tools is encouraging the consolidation of data-informed approaches to urban planning, in which environmental processes can be quantified, simulated, and integrated into decision-making processes. This perspective is part of an interpretation of territories as multilevel dynamic systems, in which relations between ecological, infrastructural, and socio-territorial components form complex networks of interdependence (Gausa, 2024). The Tech4You Research and Innovation Pro-

gramme¹, funded under the National Recovery and Resilience Plan, is situated within this context and aims to build an innovation ecosystem oriented towards the development of models, technologies, and tools for climate-change adaptation in the regions of Southern Italy. Within this framework, Pilot Project 4.6.1² (Fig. 1) develops integrated approaches for reducing climate vulnerability through the construction of data-informed planning models capable of integrating ecosystem analyses, climate simulations, and digital (and physical) decision-support systems.

In this scenario, ecosystem services and carbon accounting models assume a significant role as operational metrics capable of translating ecological processes into measurable and comparable indicators. In particular, carbon is configured as a strategic parameter in the interpretation and management of territories, capable of relating ecological dynamics, land-use transformations, and climate-change mitigation policies (Domke et alii, 2019).

However, despite the growing scientific production in this field, a significant gap remains between ecological knowledge and its effective integration into planning processes. Many studies provide detailed ecological assessments that are difficult to translate into operational tools, while traditional planning instruments often lack robust ecosystem indicators capable of supporting ex ante and ex post assessments of transformations.

A twofold critical issue also persists: on the one hand, numerous studies on carbon accounting have been developed in forestry, agricultural, or environmental fields without any real translation into urban-planning processes; on the other, many climate-planning practices still operate without standardised and comparable biophysical metrics. This is compounded by the limited availability of open and replicable workflows designed to compare the existing condition, the current regulatory framework, and urban transformation scenarios.

Starting from this theoretical premise, the paper proposes an integrated, open-source, and replicable GIS-R operational workflow (Longo et alii, 2024) aimed at estimating carbon stock and sequestration potential from the ecosystem classification derived from Carta Natura (Paone et alii, 2023), which describes the current biophysical condition of the territory. However, this representation does not necessarily coincide with the land-use designations established by the planning instruments in force, which constitute the regulatory framework within which territorial transformations take place. The aim of the paper is therefore to

verify whether, and to what extent, an integrated GIS-R geospatial procedure based on the local adaptation between ecosystem classifications and the categories developed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) can constitute an operational tool for climate-responsive urban planning. The research question concerns the possibility of transforming territorial ecological data into comparable indicators useful for the ex ante and ex post assessment of planning scenarios.

The original contribution of the work lies in three aspects: the construction of an operational crosswalk matrix between Carta Natura and international carbon-accounting classes; the definition of a replicable open-source workflow; and the explicit orientation of the model towards supporting urban-planning decisions and evaluating transformation scenarios. The proposed model aims to contribute to the scientific debate on the relationship between methodological innovation, urban planning, and climate adaptation, offering a procedure that can also be applied in other Mediterranean contexts characterised by ecosystem fragility, settlement pressure, and the need for evidence-based decision-making tools.

Carbon literacy for design: carbon as a cognitive infrastructure for climate-responsive planning

| Carbon has predominantly been used as an indicator for quantifying emissions and monitoring climate-mitigation targets established by international agreements, particularly within the framework of the United Nations Framework Convention on Climate Change (UN, 1992) and national emission inventories (Domke et alii, 2019). In recent years, however, the scientific literature has progressively broadened this perspective, showing how carbon can be interpreted not only as a climate variable but also as a territorial parameter capable of providing information on ecological structure, land-use dynamics, and ecosystem functioning (Pan et alii, 2011; Keith et alii, 2024).

In parallel, growing interest in ecosystem services has helped to strengthen this interpretation: the capacity of terrestrial ecosystems to sequester and store carbon represents one of the main regulating services recognised by the literature and by the principal international classifications (Millennium Ecosystem Assessment, 2005; Potschin et alii, 2016). Quantifying carbon stocks and flows therefore makes it possible to translate ecosystem functioning into measurable biophysical metrics useful for supporting sustainability-oriented territorial planning processes. Despite these ad-

vances, however, the integration of carbon metrics into planning processes remains limited. In many cases, analyses are developed within separate disciplinary fields and do not enter the operational devices of urban planning. In this context, the concept of ‘carbon literacy’, originally developed in the field of climate policy, can be reinterpreted as ‘carbon literacy for design’, that is, as a set of competences, tools, and methods capable of integrating carbon metrics into processes of territorial analysis, assessment, and decision-making.

Interpreted from this perspective, ‘carbon literacy’ is not limited to knowledge of climate processes, but configures carbon as an operational parameter capable of orienting urban-regeneration strategies, the design of green infrastructures, and the sustainable management of territory. This perspective is particularly relevant within European and international policies oriented towards ecological transition. The growing attention paid, for example, to carbon-accounting tools, environmental certification systems, and market mechanisms linked to ecosystem services highlights the need for reliable and comparable territorial data capable of making the environmental benefits generated by ecosystems measurable (Zhao and Shaw, 2025). Numerous studies have shown that the distribution of ecosystem services across urban and peri-urban territories is not homogeneous, but often reflects socio-spatial dynamics that influence access to environmental benefits and ecological infrastructures. In this sense, a territorial reading of ecosystem performance can help to reveal relationships between environmental quality, urban models, and spatial justice (Fiorini et alii, 2025).

Mapping carbon stock and the ecosystem capacity of territories can therefore help to make such asymmetries visible, providing knowledge tools for orienting territorial rebalancing policies and ecological-regeneration strategies. This literacy can be interpreted as a conceptual device capable of connecting different dimensions of territorial sustainability and contributing to the construction of transcalar design approaches, in which local territorial transformation strategies align with the global objectives of the 2030 Agenda and with the logics of nature-based solutions (Ingaramo et alii, 2023).

Carbon accounting, ecosystem services, and territorial governance

| Traditionally, carbon accounting models have been developed mainly within climate policies and greenhouse-gas emission reporting. The guidelines developed by the IPCC (Domke et alii, 2019) are now the international

Tab. 3 | Carbon-stock intervals (tC/ha) associated with ecosystem groups and the main bibliographic references used for carbon-stock modelling (credit: the Authors, 2026).

No.	Ecosystem group	Carbon stock range	Main references
1	Temperate and Mediterranean forests	100-220 tC/ha	Domke et alii (2019); Gasparini (2022); Marchetti et alii (2012)
2	Mediterranean shrublands and maquis	70-110 tC/ha	Fernandes et alii (2020)
3	Mediterranean grasslands and steppes	30-50 tC/ha	Zomer et alii (2016)
4	Tree-based agroecosystems	35-90 tC/ha	Funes et alii (2022)
5	Herbaceous crops and agrarian mosaics	20-40 tC/ha	Zomer et alii (2016)
6	Wetlands and riparian ecosystems	80-170 tC/ha	Fernandes et alii (2020)
7	Anthropized, extractive and coastal areas	< 10 tC/ha	Domke et alii (2019); Munafò (ed.) (2023)

methodological reference for estimating carbon stocks and flows associated with land uses, forest management, and agricultural activities within the AFOLU / LULUCF³ sector. These methodologies are used by the Member States of the United Nations Framework Convention on Climate Change for compiling national inventories of carbon emissions and removals.

This accounting has, however, progressively broadened its field of application, extending beyond climate reporting and assuming a growing role in territorial-governance processes and in the definition of environmental policies. The possibility of quantifying and spatially representing the carbon stock associated with different ecosystems makes it possible to identify strategic areas for conservation, renaturation, and sustainable land management, transforming carbon into a territorial indicator useful for orienting planning choices.

In several European territorial contexts, these approaches have been used to interpret the relationships between urbanisation dynamics, rural innovation, and ecosystem services, highlighting the role of ecological infrastructures in the definition of new integrated territorial strategies (Lombardini, Pilogallo and Tucci, 2023). The quantification of carbon stock thus becomes an operational way of translating the ecosystem capacity of territories into biophysical indicators useful for environmental and territorial planning; this approach makes it possible to reveal relationships between ecosystem structure, land uses, and settlement dynamics.

From this perspective, new tools for the economic valorisation of ecosystem services must also be considered. For these mechanisms to be applied effectively and credibly, however, knowl-

edge bases founded on data that are verifiable, replicable, and consistent with international standards for environmental reporting are required. This framework therefore includes the standardisation of environmental metrics and the construction of interoperable information systems, which are fundamental conditions for making territorial data comparable and for supporting decision-making processes based on quantitative evidence (Bologna, Ghersi and Melli, 2023). The quantification of carbon stock and sequestration flows therefore represents a crucial step in ensuring the transparency and credibility of such systems, avoiding overestimation or the double counting of ecosystem benefits.

A central issue is the principle of additionality, namely the capacity to demonstrate that the ecosystem benefits generated by a given intervention would not have occurred in the absence of that action. At the same time, it becomes necessary to consider the problem of the permanence of carbon removals over time and the risk of shifting environmental pressures towards other territories.

A further significant element concerns the relationship between carbon accounting and environmental inequalities: the distribution of ecosystem services and ecological infrastructures within territories is not uniform, but often reflects historical processes of urban development and the socio-economic organisation of space. Some urban or peri-urban areas may be significantly deficient in green spaces and ecological infrastructures, exposing resident populations to more critical environmental conditions, such as the intensification of urban heat islands or greater vulnerability to extreme climate events.

Methodological approach and carbon-assessment model

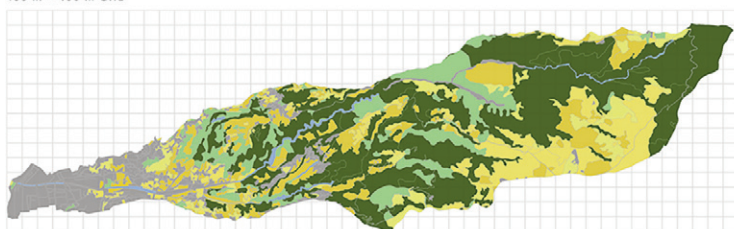
The method was tested in the Fiumara Calopinace basin (Reggio Calabria), in a Mediterranean context characterised by high ecosystem fragility and strong anthropogenic pressures. The objective was to construct an analytical model capable of quantifying the ecosystem performance of the territory in terms of carbon-sequestration capacity, translating qualitative ecological information from environmental datasets into measurable and comparable biophysical indicators.

Operationally, the methodological protocol was articulated into six sequential and replicable phases: 1) acquisition and preparation of territorial data; 2) ecosystem reclassification and construction of the crosswalk matrix with IPCC categories; 3) attribution of mean carbon-stock coefficients; 4) geospatial modelling on a regular grid; 5) temporal simulation of potential growth; and 6) interpretation of results in support of urban planning. This articulation allows the study to be repeated in different contexts, provided that minimum homogeneous and georeferenced territorial data are available.

The starting point of the analysis is Carta Natura for the Calabria Region, a vector dataset that describes the distribution of ecosystems through an articulated ecological classification. In particular, the analysis was conducted using the polygon layer (clip) relating to the experimental area of the pilot project, within which 40 local ecological categories were identified. These categories constitute an extremely detailed descriptive repertoire of the ecosystem types present in the territory and represent the knowledge base on which the carbon-assessment model was constructed (Fig. 2). The minimum data required for the replicability of

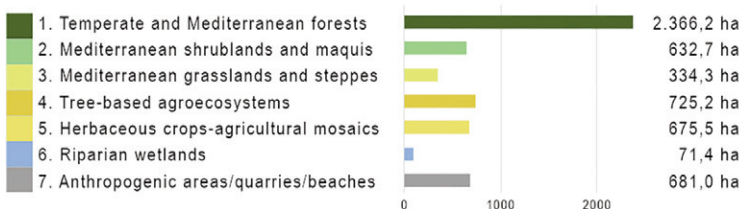
**Processing based on Carta Natura dataset
Ecosystem Groups Classification**

400 m x 400 m Grid



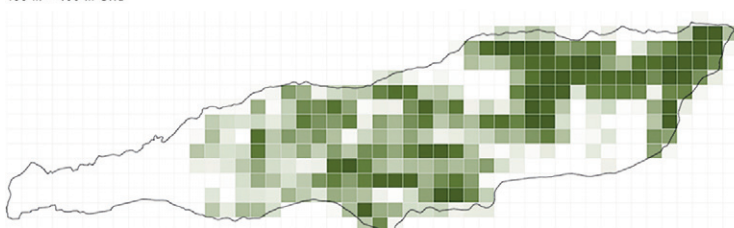
Processing based on Carta Natura - LEG_CALABR_table

Ecosystem Group



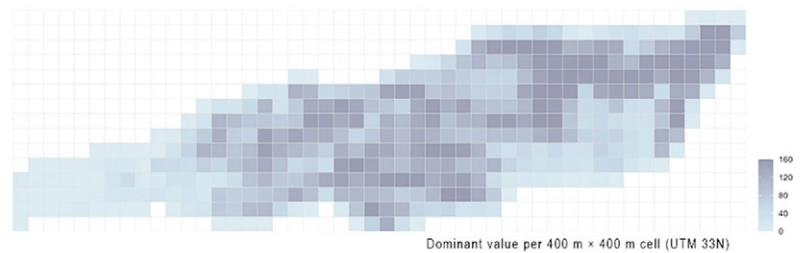
**Ecosystem Group
Temperate and Mediterranean forests**

400 m x 400 m Grid

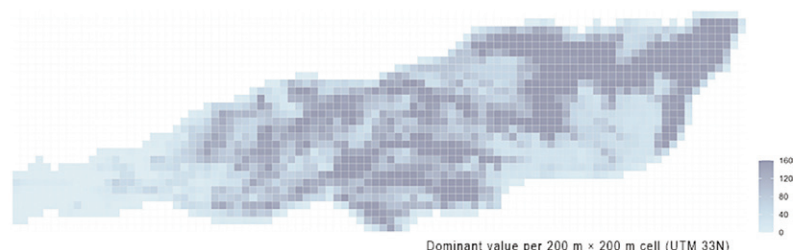


Dominant value per 400 m x 400 m cell (UTM 33N)

**Values by Ecosystem Groups
Average Carbon Stock
(tC/ha)**

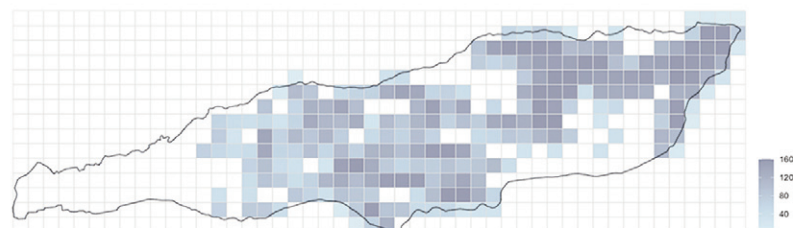


Dominant value per 400 m x 400 m cell (UTM 33N)



Dominant value per 200 m x 200 m cell (UTM 33N)

**Values for the Ecosystem Group: Temperate and Mediterranean Forests
Average Carbon Stock
(tC/ha)**



Dominant value per 400 m x 400 m cell (UTM 33N)

Previous page

Fig. 4 | Distribution of ecosystem groups and attribution of mean carbon-stock values (tC/ha) in the Calopinace Torrent basin through spatial discretisation on regular grids of 400 × 400 m and 200 × 200 m (credit: the Authors, 2026).

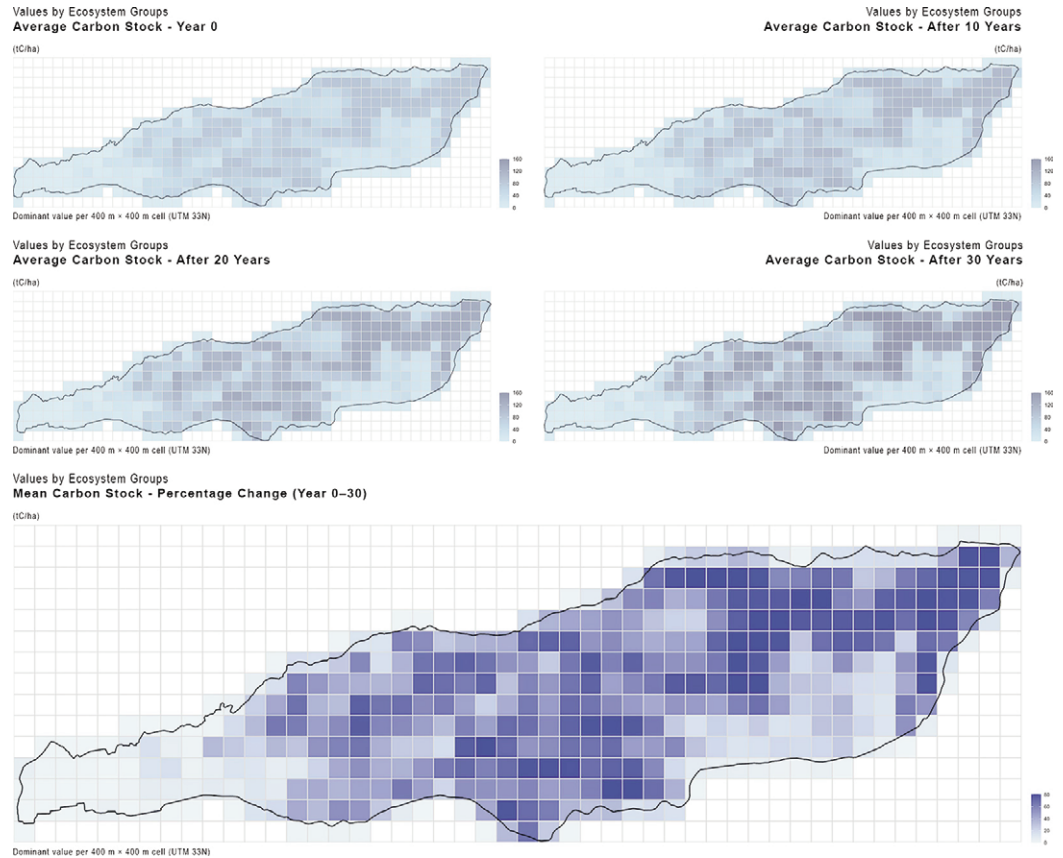


Fig. 5 | Mean annual growth rates (*r*) assigned to ecosystem groups and used in the compound-growth model to estimate the evolution of carbon stock and sequestration potential over time (credit: the Authors, 2026).

the model are: a) ecosystem cartography or land use / land cover in vector or raster format at adequate resolution; b) boundary of the study area; c) coherent metric reference system; d) carbon-stock coefficients derived from the literature or from official inventories; and e) any planning instruments in force for comparative analyses between the existing condition and planning scenarios.

The high level of detail in the Carta Natura legend made it difficult to assign stock values directly to individual categories. To overcome this limitation, a functional reclassification was applied, based on the construction of a correspondence table between local ecological categories and the land-use classes established by the IPCC guidelines (Domke et alii, 2019), which represent the international standard for estimating carbon stocks and flows in terrestrial ecosystems and constitute the methodological reference used by States for compiling national inventories of carbon emissions and removals.

The reclassification process was conducted on the basis of three main criteria: 1) the structure of the dominant vegetation; 2) the type of land use or management; and 3) the average biomass and soil organic-carbon content associated with the different ecosystems. Through this procedure, 7 functional ecosystem groups were identified (Tab. 1), representing a local adaptation of the IPCC categories and making it possible to connect the ecological classification of Carta Natura to international carbon-accounting models. The procedure for constructing the matrix is one of the central elements of the method, since it enables local ecological taxonomies to be translated into internationally comparable classes while preserving the territorial detail required for urban-planning applications. Once the reclassification structure had been defined, it was possible to attribute mean carbon-

stock values to ecosystems through a systematic review of the international and national scientific literature on the estimation of biomass and organic carbon in terrestrial ecosystems. The main sources used include the IPCC guidelines for the AFOLU and LULUCF sectors, the Italian National Forest Inventory and Forest Carbon Pools⁴ (INFC), and several studies devoted to the quantification of carbon in Mediterranean ecosystems.

Starting from these sources, reference intervals for carbon stock, expressed in tonnes per hectare (tC/ha), were identified for each ecosystem group; to reduce variability between different study contexts, a representative mean value was adopted for each category, calculated as the average of the intervals reported in the scientific literature. The approach adopted is consistent with the Tier 1 and Tier 2 methodological levels established by the IPCC guidelines and based on the use of mean coefficients derived from the literature and from national forest inventories (Tab. 2). The use of mean coefficients makes the method immediately applicable even in the absence of direct measurement campaigns, configuring it as an appropriate solution for preliminary analyses, territorial screenings, and comparative assessments between scenarios.

Once the mean carbon-stock values had been attributed to ecosystems, the geospatial-modelling phase was initiated to construct a continuous density surface⁵ (Fig. 3). This procedure made it possible to produce continuous maps of carbon density, useful for representing the spatial distribution of the territory's ecosystem capacity. The processing was carried out, taking account of the relevant reference intervals (Tab. 3), through the integration of QGIS and the RStudio computational environment, ensuring the traceability of operations and the replicability of the entire analytical operational workflow (Fig. 4). The use of a dual spatial resolu-

tion makes it possible to compare different scales of interpretation⁶: the 400 m grid is more suitable for strategic interpretations at broad-area scale, while the 200 m grid allows more detailed readings useful at urban and design scale. The model makes it possible to estimate future carbon stock from the initial stock and from a mean annual growth rate specific to each ecosystem group.

Subsequently, three simulation time horizons – 10, 20, and 30 years – were considered in order to assess the potential evolution of the ecosystem system in the medium and long term. Each group was assigned a representative mean stock value (tC/ha), calculated as the arithmetic mean of the reference interval, from which a mean annual growth rate (*r*) was then derived and used to estimate sequestration potential (Fig. 5). Potential sequestration was expressed according to the relation $A_i = S_i \times r_i$, where 'A_i' represents average sequestration per unit area (tC/ha/ year), 'S_i' the mean reference stock, and 'r_i' the ecosystem-specific growth rate (Zomer et alii, 2016). These values derive from a functional adaptation of the parameters proposed by the IPCC (Domke et alii, 2019) and from the main studies on net productivity and carbon accumulation in Mediterranean ecosystems (Marchetti et alii, 2012; Fernandes et alii, 2020; Funes et alii, 2022). This framing makes it possible to connect ecosystem structure directly to the dynamics of carbon flows, translating vegetation type into a biophysical sequestration parameter. The simulations show that carbon-sequestration capacity varies significantly according to ecosystem structure and land uses.⁷

The workflow is transferable to other Mediterranean or European contexts where comparable land-use / land-cover data, a legend that can be reclassified into IPCC categories, and coefficients consistent with the local biogeographical context

are available. The open-source nature of the tools used also reduces economic barriers and promotes methodological transparency, code reuse, and the periodic updatability of the model. The mapping makes it possible to identify strategic ecological infrastructures and support integrated natural-resource management models in urban and peri-urban systems (Valente et alii, 2024). From this perspective, strengthening green and blue infrastructures within urban systems can help to re-define the ecological structure of cities and improve the environmental performance of urban fabrics, as also shown by experiences of the morphological reorganisation of urban space based on models of proximity and pressure reduction (Rueda, 2019).

Discussion, limits, SDGs, and conclusions | The research proposed a method for quantifying and spatially representing the carbon stock and sequestration potential of terrestrial ecosystems, with the aim of integrating the climate dimension into urban-planning processes. From this perspective, the model could be used to compare different territorial conditions: a) the current ecosystem condition, derived from environmental classification; b) the framework of land-use designations established by the planning instrument in force; and c) transformation scenarios associated with planning provisions or urban-regeneration projects (Corradi et alii, 2024). The interaction between these three levels makes it possible to interpret the distribution of carbon stock not as a simple snapshot of the territory's environmental condition, but as an indicator useful for supporting the definition of urban-planning choices and the assessment of their ecological implications.

Compared with many traditional ecological estimates, often limited to the descriptive or conservation dimension, the model proposed here is explicitly oriented towards decision-making use. At the same time, compared with many planning instruments that include climate objectives in qualitative form, the contribution introduces spatially

verifiable and comparable metrics. In this sense, the paper occupies an intermediate space, still insufficiently explored between applied ecology, urban analysis, and climate planning.

The use of mean carbon-stock coefficients derived from the scientific literature inevitably introduces margins of variability linked to local ecological conditions. For this reason, the model can be interpreted as a first basis for territorial assessment, consistent with the Tier 1 and Tier 2 approaches of the IPCC guidelines (Gasparini et alii, 2022). Integration with field data, forest inventories, or remote-sensing data could help to improve the precision of the estimates. Further validity conditions concern the quality and updating of the initial territorial datasets, the coherence of the cartographic scale used, and the correctness of the reclassification process between local ecosystem categories and IPCC classes. In the absence of these conditions, the model may retain relative comparative value, while reducing the absolute reliability of the estimates; moreover, the main barriers to adoption include: 1) the administrative fragmentation of data sources; 2) the limited availability of advanced geospatial skills within local administrations; 3) the difficulty of integrating innovative metrics into traditional planning instruments; and 4) the frequent absence of standard procedures for post-implementation monitoring of Plans.

Overall, the research shows how the quantification and spatial representation of carbon can become operational tools for strengthening the relationship between ecological knowledge and urban planning. The direct contribution is particularly relevant to four Sustainable Development Goals: in relation to SDG 9, the method introduces procedural innovation, information interoperability, and evidence-based decision support; with reference to SDG 11, the model offers tools useful for resilient urban planning, the location of green infrastructures, and the ecological regeneration of built fabrics; with respect to SDG 13, it allows climate metrics to be integrated into planning processes and

mitigation and adaptation scenarios to be assessed; and in relation to SDG 15, it contributes to the protection and functional valorisation of terrestrial and peri-urban ecosystems. There are also indirect synergies with SDG 10 where the territorial distribution of ecosystem performance is used to read socio-spatial asymmetries, and with SDG 12 where the model orients land uses towards greater efficiency and lower dissipation.

Possible trade-offs nevertheless remain: urban densification interventions not accompanied by ecological compensation may reduce sequestration capacity; uncoordinated renaturation processes may come into tension with settlement or infrastructural needs; and mechanisms for the economic valorisation of carbon may produce distorting effects if they lack adequate public oversight.

The main advancement of the contribution, however, consists in having transformed a local ecosystem dataset into an interpretative system capable of engaging with international climate standards and ordinary processes of territorial governance. The method could be integrated into Strategic Environmental Assessment procedures, the knowledge frameworks of municipal urban plans, urban-regeneration programmes, and systems for monitoring territorial transformations. Further developments may concern integration with LiDAR data, multispectral remote sensing, field surveys, and territorial digital-twin models.

The transferability of the workflow to other Mediterranean contexts suggests the possibility of constructing a new generation of climate-responsive planning instruments, in which the measurability of ecosystem performance accompanies settlement, infrastructural, and landscape choices. In this sense, the contribution aims to strengthen the disciplinary debate on the role of urban planning in the contemporary ecological transition.

Acknowledgements

This research is the result of the activities carried out within the following concluded PNRR research project, funded by the European Union – NextGenerationEU: ‘Pilot Project 4.6.1 – Climate-adaptation plans for reducing the ecological footprint and ecological debt, aimed at improving conservation and transformation responses in terms of resilience and quality of life in the Calabrian and Lucanian urban and territorial system’ (Goal 4.6 – Climate-change planning for promoting cultural and natural heritage: demand-driven ecosystem services based on ICT and AI enabling technologies – Tech4You Innovation Ecosystem), funded by the European Union – NextGenerationEU, Mission 4 – Component 2, CUP C33C22000290006 (ECS_000 00009).

The paper is the result of a shared reflection by the Authors. Nevertheless, the introductory paragraph is attributed to F. Moraci; ‘Carbon literacy for design: carbon as a cognitive infrastructure for climate-responsive planning’ to A. Barresi; ‘Carbon accounting, ecosystem services, and territorial governance’ to P. Bova; ‘Methodological approach and carbon-assessment model’ to F. Trimboli; and the paragraph ‘Discussion, limits, SDGs, and conclusions’ was written jointly by all the Authors.

Notes

1) The Tech4You project, entitled ‘Technologies for Climate Change Adaptation and Quality of Life Improvement’, is funded by the PNRR (approximately 122 million euros) under Mission 4 ‘Education and Research’, Component 2 ‘From Research to Business’, Investment 1.5 ‘Creation and strengthening of innovation ecosystems for sustainability’. The Tech4You research lines focus on valorising the innovation potential of two of Italy’s ‘Less developed regions’, Basilicata and Calabria, now classified as ‘Transition regions’, promoting an ecosystem in which scientific research, conducted by Universities and Research Centres, engages with the needs of citizens and Public Administrations, and is transferred into technological and applied solutions developed by local enterprises with the support of actors specialised in industrial innovation.

2) Pilot Project 4.6.1 – ‘Climate-adaptation plans for reducing the ecological footprint and ecological debt, aimed at improving conservation and transformation responses in terms of resilience and quality of life in the Calabrian and Lucanian urban and territorial system’ (Goal 4.6 – ‘Climate-change planning for promoting cultural and natural heritage: demand-driven ecosystem services based on ICT and AI enabling technologies’) is one of the projects funded with 2.3

million euros within the Tech4You innovation ecosystem, for which Prof. Francesca Moraci (UniRC) is Scientific Coordinator. The project is articulated into six actions and involves two Departments, three Research Laboratories, eighteen professors / researchers, and nine research fellows; the research funds also enabled the creation of a new interdepartmental instrumental laboratory.

3) The AFOLU sector (Agriculture, Forestry, and Other Land Use) and its specific component LULUCF (Land Use, Land-Use Change, and Forestry) are fundamental in the global strategy for climate change mitigation, acting both as sources of emissions and as carbon sinks.

4) The ‘inventarioforestale.org’ portal provides access to the results and products of the Italian National Forest Inventory and Forest Carbon Pools (INFC); in addition, statistics, raw data, and project documentation can be accessed, which are essential for the correct interpretation of the information.

5) For this purpose, the territory was discretised by means of a regular grid with cells of 400 × 400 metres and 200 × 200 metres, representing uniform and comparable spatial units of analysis. Within each cell, the weighted mean carbon stock was calculated from the combination of the mean value associated with the ecosystem type and the surface area actually occupied by each ecosystem within the cell.

6) The simulation is not intended to represent a deterministic forecast, but rather a parametric evolutionary scenario useful for comparing alternative trajectories of conservation, renaturation, or urban transformation.

7) Forest and riparian ecosystems constitute the main carbon reservoirs, while agricultural and anthropised surfaces present significantly lower stocks and growth rates. These differences reflect the morphological and ecological structure of the territory and make it possible to identify areas of high ecosystem efficiency, areas with recovery potential, and zones characterised by structural criticalities.

References

- Barbier, E. B. and Burgess, J. C. (2019), “Sustainable development goal indicators – Analyzing trade-offs and complementarities”, in *World Development*, vol. 122, pp. 295-305. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.05.026 [Accessed 28 March 2026].
- Bologna, A., Ghersi, A. and Melli, S. (2023), “Lecture integrate per il verde pensile urbano – Codici espressivi e forme di natura | Integrated readings for the urban green roof – Expressive codes and forms of nature”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 11, pp. 114-123. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/11102022 [Accessed 28 March 2026].
- Corradi, M., Stevens, T., Macaione, L., Raffa, A. and Andaloro, B. (2024), “Rigenerazione climatica green degli streetscapes – L’esperienza di De Urbanisten ad Anversa | Green climate-adaptive streetscapes regeneration – The De Urbanisten Experience in Antwerp”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 60-73. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1652024 [Accessed 20 April 2026].
- Domke, G., Brandon, A., Diaz-Lasco, R., Federici, S., Garcia-Apaza, E., Grassi, G., Gschwantner, T., Herold, M., Hirata, Y., Kasimir, Á., James Kinyanjui, M., Krisnawati, H., Lehtonen, A., Malimbwi, R. E., Niinistö, S., Ogle, S. M., Paul, T., Ravindranath, N. H., Rock, J., Sanquetta, C. R., Sanchez, M. J. S., Vitullo, M., Wakelin, S. J. and Zhu, J. (2019), “Chapter 4 – Forest Land”, in Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngari, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Sherman, P. and Federici, S. (eds), *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Vol. 4 – Agriculture, Forestry and Other Land Use*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva. [Online] Available at: ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/ [Accessed 28 March 2026].
- Fernandes, M. R., Aguiar, F. C., Martins, M. J., Rico, N., Ferreira, M. T. and Correia, A. C. (2020), “Carbon Stock Estimations in a Mediterranean Riparian Forest – A Case Study Combining Field Data and UAV Imagery”, in *Forests*, vol. 11, issue 4, article 376, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.3390/f11040376 [Accessed 28 March 2026].
- Fiorini, L., Saganeiti, L., Perazzini, M., Bontempo, D., Bucci, M., Giancola, M. and Perilli, E. (2025), “L’impatto dei modelli urbani sul supporto sociale – Tra giustizia spaziale e sviluppo sostenibile | The impact of urban models on social support – Between spatial justice and sustainable development”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 196-207. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17132025 [Accessed 28 March 2026].
- Funes, I., Molowny-Horas, R., Savé, R., De Herralde, F., Aranda, X. and Vayreda, J. (2022), “Carbon stocks and changes in biomass of Mediterranean woody crops over a six-year period in NE Spain”, in *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 42, article 98, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s13593-022-00827-y [Accessed 28 March 2026].
- Gasparini, P., Di Cosmo, L., Floris, A. and De Laurentis, D. (eds) (2022), *Italian National Forest Inventory – Methods and Results of the Third Survey | Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio – Metodi e Risultati della Terza Indagine*, Springer, Cham. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-030-98678-0 [Accessed 28 March 2026].
- Gausa, M. (2024), “Complessità, n-città e sistemi dinamici multilivello – Verso una (geo)urbanità in rete e in reti | Complexity, n-city, and multilevel dynamic systems – Towards a networked (geo)urbanity and networks”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 16-29. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1612024 [Accessed 28 March 2026].
- Ingaramo, R., Negrello, M., Khachatourian Saradehi, I. and Khachatourian Saradhi, A. (2023), “Il progetto transcalare delle nature-based solutions per l’Agenda 2030 – Innovazioni e interconnessioni | Transcalar project of nature-based solutions for the 2030 Agenda – Innovations and interconnections”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 97-108. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1382023 [Accessed 28 March 2026].
- Keith, H., Kun, Z., Hugh, S., Svoboda, M., Mikoláš, M., Adam, D., Bernatski, D., Blujdea, V., Bohn, F., Camarero, J. J., Demeter, L., Di Filippo, A., Dutcã, I., Garbarino, M., Horváth, F., Ivkovich, V., Jansons, Ā., Kępcina, L., Kral, K., Martin-Benito, D., Molina-Valero, J. A., Motta, R., Nagel, T. A., Panayotov, M., Pérez-Cruzado, C., Piovesan, G., Roibu, C.-C., Šamonil, P., Vostarek, O., Yermokhin, M., Zlatanov, T. and Mackey, B. (2024), “Carbon carrying capacity in primary forests shows potential for mitigation achieving the European Green Deal 2030 target”, in *Communications | Earth & Environment*, vol. 5, article 256, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s43247-024-01416-5 [Accessed 28 March 2026].
- Lombardini, G., Pilogallo, A. and Tucci, T. (2023), “Innovazione rurale, servizi eco-sistemici e processi di urbanizzazione in Liguria, tra costa ed entroterra | Rural innovation, ecosystem services and urbanisation processes in Liguria, between coastal and inner areas”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 205-216. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13172023 [Accessed 28 March 2026].
- Longo, D., Turillazzi, B., Roversi, R., Lilla, L., Nucci, C. A., Piccinini, A. and Costa, A. (2024), “Gemello digitale urbano e modellazione energetica – Esperienze e analisi di casi d’uso | Urban Digital Twin and Energy Modeling – Experiences and case study analyses”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 160-169. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15122024 [Accessed 20 April 2026].
- Marchetti, M., Sallustio, L., Ottaviano, M., Barbati, A., Corona, P., Tognetti, R., Zavattero, L. and Capotorti, G. (2012), “Carbon sequestration by forests in the National Parks of Italy”, in *Plant Biosystems | An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, vol. 146, issue 4, pp. 1001-1011. [Online] Available at: doi.org/10.1080/11263504.2012.738715 [Accessed 28 March 2026].
- Millennium Ecosystem Assessment (2005), *Ecosystems and human well-being – Wetlands and water – Synthesis*, World Resources Institute, Washington (DC). [Online] Available at: millenniumassessment.org/documents/document.358.aspx.pdf [Accessed 28 March 2026].
- Munafò, M. (ed.) (2023), *Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici*, Report SNPA 37/23. [Online] Available at: snpambiente.it/wp-content/uploads/2023/10/Rapporto_consumo_di_suolo_2023.pdf [Accessed 20 April 2026].
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., Phillips, O. L., Shvidenko, A., Lewis, S. L., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Pacala, S. W., McGuire, A. D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S. and Hayes, D. (2011), “A Large and Persistent Carbon Sink in the World’s”, in *Science*, vol. 333, issue 6045, pp. 988-993. [Online] Available at: doi.org/10.1126/science.1201609 [Accessed 28 March 2026].
- Pham-Truffert, M., Metz, F., Fischer, M., Rueff, H. and Messerli, P. (2020), “Interactions among Sustainable Development Goals – Knowledge for identifying multipliers and virtuous cycles”, in *Sustainable Development*, vol. 28, issue 5, pp. 1236-1250. [Online] Available at: doi.org/10.1002/sd.2073 [Accessed 28 March 2026].
- Paone, R., Caridi, M., Caruso, P., Augello, R. and Capogrossi, R. (2023), *Carta della Natura della Regione Calabria – Carta degli habitat alla scala 1:25.000*, Regione Calabria, ISPRA. [Online] Available at: isprambiente.gov.it/servizi/sistema-carta-della-natura/cartografia/carta-della-natura-alla-scala-1-50.000/calabria [Accessed 20 April 2026].
- Potschin, M., Haines-Young, R., Fish, R. and Turner, R. K. (eds) (2016), *Routledge Handbook of Ecosystem Services*, Routledge, London. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9781315775302 [Accessed 28 March 2026].
- Randers, J., Rockström, J., Stoknes, P. E., Goluke, U., Collste, D., Cornell, S. E. and Donges, J. (2019), “Achieving the 17 Sustainable Development Goals within 9 planetary boundaries”, in *Global Sustainability*, vol. 2, article e24, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1017/sus.2019.22 [Accessed 28 March 2026].
- Ricci, L., Poli, I. and Marino, M. (2025), “Welfare urbano e rigenerazione – Sostenibilità e inclusione sociale per il raggiungimento degli SDG | Urban welfare and regeneration – Sustainability and social inclusion for achieving the SDGs”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 94-107. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1752025 [Accessed 20 April 2026].
- Rueda, S. (2019), “Superblocks for the Design of New Cities and Renovation of Existing Ones – Barcelona’s Case”, in Nieuwenhuijsen, M. and Khreis, H. (eds), *Integrating Human Health into Urban and Transport Planning – A Framework*, Springer, Cham. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-319-74983-9_8 [Accessed 28 March 2026].
- UN – United Nations (2015), *Transforming our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*, document A/RES/70/1. [Online] Available at: sustainabledevelopment.un.org/index.php?page=viewandtype=111andnr=8496andmenu=35 [Accessed 28 March 2026].
- UN – United Nations (1992), United Nations Framework Convention on Climate Change. [Online] Available at: unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf [Accessed 28 March 2026].
- UN-Habitat – United Nations Human Settlements Programme (2022), *Envisaging the Future of Cities – World Cities Report 2022*. [Online] Available at: unhabitat.org/sites/default/files/2022/06/wcr_2022.pdf [Accessed 28 March 2026].
- Valente, R., Mazingo, L. A., Bosco, R. and Giacobbe, S. (2024), “Gestione integrata delle risorse naturali in contesti urbani sostenibili | Integrated natural resource management in sustainable urban context”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 180-189. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15142024 [Accessed 28 March 2026].
- Zhao, Z. and Shaw, R. (2025), “Nature-based ESG solutions – An analytical overview”, in *Peace and Sustainability*, vol. 1, issue 2, article 100015, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.nerpsj.2025.100015 [Accessed 28 March 2026].
- Zomer, R. J., Neufeldt, H., Xu, J., Ahrends, A., Bossio, D., Trabucco, A., van Noordwijk, M. and Wang, M. (2016), “Global tree cover and biomass carbon on agricultural land – The contribution of agroforestry to global and national carbon budgets”, in *Scientific Reports*, vol. 6, article 29987, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1038/srep29987 [Accessed 28 March 2026].