

Metrics and tools for the integrated and multi-scale assessment of Ecosystem Services in urban areas

Piergiorgio Farfariello¹, Marta Carla Bottero¹, Caterina Caprioli^{1,*}

¹ Interuniversity Department of Territorial Sciences, Design and Policies (DIST), Politecnico di Torino, Viale Pier Andrea Mattioli 39, 10125 Turin, Italy; piergiorgio.farfariello@polito.it; marta.bottero@polito.it; caterina.caprioli@polito.it

* corresponding author

Keywords

land use consumption, human pressure, biodiversity, Ecosystem Services, economic and biophysical assessment, existing tools, optimization

Abstract

Current urban systems are stressed by various types of crises (demographic, socio-economic, ecological-environmental) and characterized by physical, social, and spatial fragilities. These fragilities are manifested in the precarious balance between the settlement and infrastructural component, or, more generally, between the anthropic system, and the natural and environmental component, and in their relationships and interactions. In particular, the implementation of many urban transformation plans and projects has, in practice, led to the progressive loss of natural land. Natural land is increasingly exposed to systemic pressures and vulnerabilities, as a direct effect of human intervention and the related climate change. To address these issues, the concept of ecosystem service remains highly relevant for the protection of ecosystems and biodiversity, which are fundamental, to human well-being and quality of life. At the same time, the valuation of Ecosystem Services (ESs) remains challenging due to its multiscale and multidimensional nature (ecological-biophysical, socio-cultural, and economic). In this context, this contribution tests the application of several ESs valuation tools, both national and international, in order to assess their capacity (or lack) to operate at different scales and to integrate these different value dimensions in the valuation of all ESs categories (supporting, regulating, provisioning, and cultural). The results obtained provide a critical basis for defining the most effective and efficient metrics for ESs valuation, as well as support for municipalities in the collection, updating, and mapping of relevant data.

1. Introduction

Since the second half of the last century, human beings have caused alterations to ecosystems on an unprecedented scale. The overexploitation of water resources (for example, freshwater extraction), the intensive use of land for agricultural purposes and the use of plant protection products, pollution and soil sealing, the resulting climate change are just some of the factors that have contributed to the reduction of biological diversity on Earth (Millennium Ecosystem Assessment, 2005; CCN, 2017; Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem services, 2018; Mapping and Assessment of Ecosystem Services; 2020), weakening ecosystems and consequently compromising the provision of Ecosystem Services (ESs) (Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, 2025).

The concept of Ecosystem Services (ESs), pioneeringly introduced into the public debate by Ehrlich and Ehrlich in the early 1980s, has gained significant importance following the dissemination of literature on the topic after the scientific dissemination efforts by Costanza et al. (1997) and Daily (1997), and later with the publication of the Millennium Ecosystem Assessment in 2005. Various interpretations were provided by Costanza, De Groot et al. (2002), The Economics of Ecosystems & Biodiversity (TEEB, 2010), and at the national level by the Italian Institute for Environmental Protection and Research (ISPRA, 2010) and the Committee for Natural Capital (CCN, 2017). The attempt to clarify the interdependent relationship between human well-being and health and nature itself, although with some slight differences. In brief, ESs can be defined as the benefits obtained by humans and provided by ecosystems, or as the direct and indirect contribution of Natural Capital to human well-being and their needs. Natural Capital, understood as the stock of natural resources, alongside human, social, manufactured, and financial capital, contributes to defining the wealth and development levels of a territory (CCN, 2017). Unlike the others, Natural Capital is characterized by generalized conditions of not replaceable and finitude (Costanza et al., 1997; CCN, 2017), since the elements that constitute and define it (air, water, soil, biodiversity, etc.) are unique and cannot be reproduced or substituted by human-made constructions or manipulations (Schirone, 2020). Even from these initial considerations, it is evident the strong relationship linking economic and human well-being to the state of natural resources and ecosystems at a given time and period (Oppio et al., 2023). In this context, the concept of ES is capable of describing the relationships between nature and the economy (TEEB, 2010), and emerges as an effective paradigm and a useful support for rethinking traditional urban and territorial planning. An valuation approach based on ESs can provide preventive estimates regarding environmental effects and biophysical changes (and their associated costs) arising from land use transformation processes. The values attributable to ESs belong to different thematic domains and involve ecological, economic, and socio-cultural sciences; this complexity, arising from the wide range of factors to be considered, implies a series of challenges in developing methodologies capable of capturing and measuring all the values previously defined (Caprioli et al., 2021). Despite the considerable instrumental and technical difficulties, calculation and quantification ecosystem assets is crucial for the development of increasingly resilient cities, capable of facing climate change, ensuring essential levels of biodiversity protection, and incorporating development perspectives within sustainable frameworks (Fagarazzi & Fanfani, 2012; Magnaghi & Sala, 2013; Poli, 2020).

The goal of this contribution is to present the results derived from testing and implementing tools capable of supporting urban planning practices. Specifically, the work starts with an analysis of the theoretical notions in the literature, to understand the existing tools for ESs assessment. Then, the work experiments with existing methods, at different levels and scales, both national and international, applying the tools Simulsoil and InVEST to a case study (Città Metropolitana di Torino, 2018; Natural Capital Project, 2025). The application of these tools has guided the development of simplified and complementary methodologies for assessing ES, which form the core of this study and represent the innovative contribution of the research.

Following this introduction, Chapter 2 presents a review of currently available tools for the biophysical and economic quantification of ES. Chapter 3 describes the methodological approach adopted for the assessment of specific ES, while Chapter 4 introduces an illustrative case study selected to concretely apply the proposed methodology. Chapter 5 is dedicated to the presentation of the practical application of the various tools, the results obtained, and the outcomes derived from these analyses. Finally, Chapter 6 offers concluding remarks and future research perspectives.

2. Assessment of ESs and existing tools

The valuation approach based on ESs is characterized by a high degree of complexity, stemming from the interrelation of multiple elements belonging to different thematic areas. The valuation discipline has the potential to provide a set of tools and methodologies that support a vision oriented towards “value pluralism” (Gómez-Baggethun & Barton, 2013; Caprioli et al., 2021). The development of useful models can tangibly contribute to making the decision-making process

regarding urban-territorial transformations more transparent and informed, and must ensure the identification and assessment of the various values of ESs (i.e. ecological and biophysical, economic, social, and cultural).

Currently, a series of open-source software tools have been developed to map and quantify biophysical assets and their corresponding economic value (Table 1). They generally provide spatial simulations that deliver data useful for assessing the feasibility (or not) of potential urban transformation interventions and their possible impacts on the ecosystem. The articles by Bagstad et al. (2013) and by Peh et al. (2021) by Bagstad et al. (2013) provide further functional categorizations and comparative summaries of some of these tools. This is primarily based on the number of existing and reviewed case studies, the degree of reliability and flexibility of the tool (related to the need to adapt to different geographic contexts), the time required to deliver results, and the economic sustainability of their application.

Table 1. Overview of tools capable of providing biophysical and economic quantifications of ES

<i>Tool</i>	<i>References</i>	<i>Organization or institution responsible for development</i>	<i>Description</i>
ARIES	Villa et al. (2009)	University of Vermont	The methodology, through ecological models, identifies the sources, users, and sinks of ESs flows, quantifying their actual provision. Additionally, it allows for scenario simulation and assessment of anthropogenic impacts on biodiversity
EcoPLAN-SE	Maebe et al. (2019)	University of Antwerp	This QGIS plugin allows for the comparison of land use and land management scenarios by simulating interactions among 18 ESs (4 provisioning, 8 regulating, 3 supporting, and 3 cultural), providing quantitative and spatial data in physical units
i-Tree ECO	Blair et al. (2017) Kim et al. (2018) Ozdemiroglu et al. (2013)	United States Department of Agriculture Forest Service	i-Tree ECO estimates forest structure, ESs and associated values for tree populations using sampling or inventory data. Among its advanced features, it offers projections on vegetation dynamics, considering coverage, biodiversity, and services provided by each species
LUCI	Robinson et al. (2013) Trodahl et al. (2017)	-	LUCI, a GIS extension of the Polyscape framework, is a flexible and efficient model that enables real-time simulations to support participatory decision-making. Applicable from local sites to entire watersheds, it analyses the impacts of land use changes on ES, integrating sub-models to evaluate interactions and trade-offs
MIMES	Boumans & Costanza (2007) Boumans et al. (2015)	Gund Institute for Ecological Economics University of Vermont	MIMES is an integrated and dynamic system of multi-scale models (global, regional, local) that quantifies reserves and flows of ESs through representations adaptable to specific contexts. It includes tools to estimate the real value of ESs and support sustainable development scenarios aimed at stakeholders
NVE	De Valck et al. (2018) Liekens et al. (2013)	Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO)	NVE is a web app, developed for the Flanders region (Belgium), supports Environmental Impact Assessment by quantifying the effects of urban projects on ES. It provides qualitative, biophysical, and monetary results, translating them into clear indicators useful for decision-making and public communication

Follow Table 1. Overview of tools capable of providing biophysical and economic quantifications of ES

<i>Tool</i>	<i>References</i>	Organization or institution responsible for development	Description
TESSA (versione 3.0)	Birch et al. (2014) Liu et al. (2017) Martino & Muenzel (2018)	Anglia Ruskin University BirdLife International Royal Society for the Protection of Birds (RSPB) Tropical Biology Association United Nations Environment Programme Conservation Monitoring Centre (UNEP WCMC) University of Cambridge University of Southampton	This tool is intended for non-specialist users and provides simple operational frameworks to guide the selection of suitable methods for the local context such as surveys, interviews and public data. It enables biophysical assessment without mapping and supports comparative economic estimation of terrestrial ecosystem services including carbon sequestration and storage, pollination, recreational and cultural values, agriculture, forest products, water and flood control.

Beyond the existing tools, it is important to emphasize that all categories of ESs contribute, with diverse inputs, to defining the well-being of human beings and are characterized by the attribution of heterogeneous values, as previously mentioned: biophysical, related to the ecological functions of ecosystems; cultural, encompassing all aspects pertaining to the psycho-physical and sensory sphere of humans (linked to affectivity, symbolism, and the aesthetics of places); and economic, often favoured for their communicative effectiveness, capable of making explicit the crucial role of nature as the foundation of social structures and production systems (Serra, 2025). Although ecological and economic aspects present simpler and more diversified valuation techniques, as also demonstrated by the widespread use of various tools, social or cultural attributes are marked by significant challenges in their determination, due to their strongly qualitative nature. This condition stems from the ease (or difficulty) and the possibility (or lack thereof) of exchanging these services within market logics through well-defined prices (CCN, 2017). Supporting this argument, it can be stated that cultural services are difficult to quantify because their social value cannot be adequately captured by onetary metrics (Caprioli et al., 2021). Consequently, in both public and private decision-making processes, these dimensions tend to be underestimated (CCN, 2017).

In this context, the main challenge for the valuation discipline lies in defining calculation methodologies capable of capturing the essence and adequately representing the various dimensions of the benefits provided by ecosystems. The development of simplified valuation models, framed within the broader analysis of ES, therefore represents a significant opportunity to produce reliable estimates and formulate critical assessments regarding the validity of different design options. The adoption of simplified approaches could offer local administrations, as well as public and private entities operating in the territory, the possibility to utilize accessible operational tools characterized by a reduced need for specialized technical expertise. However, it is necessary to maintain a solid theoretical understanding of the parameters and reference data, essential for the correct interpretation of results. At the same time, a significant reduction in execution times and associated costs would help promote the dissemination of best practices in the valuation of ES.

3. Methodology

This work involves a comparison between two existing tools, Simulsoil (Città Metropolitana di Torino, 2018) and InVEST (Natural Capital Project, 2025). Simulsoil is used at the national and, more specifically, local scale in the Piedmont Region, while InVEST operates at an international level.

Specifically, in Sections 3.1 and 3.2, the two existing tools are thoroughly presented from a theoretical-methodological perspective concerning the ESs analysed and compared. In the present work, the eight ESs provided by Simulsoil are examined through dedicated quantification processes. Building on this framework, the ES of Carbon Storage and Sequestration is analysed in greater detail

and comparatively assessed against the corresponding tool implemented in InVEST. Additionally, InVEST is used to experiment with the valuation process for the ES related to Urban Cooling, which is particularly significant in the urban context but absent from the national Simulsoil tool. In this way, the comparison between the two tools and the different ESs enabled reflection on the development of simplified and complementary valuation models, capable of combining the necessary reliability with an adequate level of simplification, thereby offering concrete support to urban and territorial planning processes.

3.1 Simulsoil

Simulsoil is a tool developed within the European project called “Soil Administration Models 4 Community Profit” – whose acronym is LIFE SAM4CP (Città metropolitana di Torino, 2018). Created with the aim of providing a useful contribution in terms of efficiency and usability, to the mapping and assessment of ESs (ISPRA, 2023), this Simulator “optimizes” complex calculation processes that would otherwise be available and offered separately by InVEST.

The reasons behind the development of this tool are related to the need to simplify verification procedures through comparative analyses between different and alternative scenarios, assessing the impacts deriving from possible land-use changes and the related effects on Natural Capital within a given portion of territory (whether it is an entire municipality or part of it) (Caprioli et al., 2021).

Simulsoil, as reported in Table 2, allows for the simultaneous valuation of eight types of ES, namely: Carbon Storage (CS), Habitat Quality (HQ), Water Yield (WY), Nutrient Retention (NR), Sediment Retention (SDR), Crop Pollination (CPO), Crop Production (CPR), and Timber Production (TP).

The only input data required by the software is the land use and land cover mapping.

The program provides outputs in explicitly spatial format, through specific maps for each type of ES, as well as summary tables including all quantitative data of biophysical and economic values for all the hypothetical scenarios considered and analysed.

It is useful to point out that the results produced by Simulsoil – unlike InVEST – are essentially based on spatial input datasets developed and refined within the SAM4CP research project, provided as attachments to the software. For this reason, the software includes a predefined dataset on land consumption, so that the data collection phase is limited to the import of user-defined shapefiles consistent with the thematic structure and legend of the Piedmont Land Cover (LCP). Once all land use and land cover data have been downloaded and acquired and the related vector file has been converted into raster format (a process automated by the software), it is possible to proceed, through standardized commands, with the calculation of the ES, for which all spatial representations are automatically provided.

In summary, the tool allows even users without specialized expertise to engage with ecosystem analyses and to carry out simulations that would otherwise require complex data processing and the use of GIS tools and procedures with a high technical content (Città Metropolitana di Torino, 2018).

Table 2. Functional diagram of the models included in Simulsoil

Denomination	u.m.	Biophysical value	Economic u.m.	Economic value
Carbon Storage	ton	The model quantifies the soil's capacity to store and retain carbon by considering four main natural reservoirs: aboveground biomass, belowground biomass, soil, and dead organic matter	€/t	Market price equivalent to the value of penalties to compensate CO ₂ emissions (Ref. Direttiva 2003/87/CE and subsequent amendments) or credits acquired for the reduction of such emissions
Crop Pollination	0-1	The model measures the surplus of the value related to agricultural productivity ensured by the presence of pollinator species	€/ha	Market price derived from the degree of dependence of crops on pollination (Gallai et al., 2009)
Habitat Quality	0-1	The model evaluates habitat quality levels in terms of species compatibility with each land use and land cover class	€/m ²	From the contingent valuation through a questionnaire aimed at identifying willingness to pay (WTP) for the conservation/enhancement of natural and semi-natural areas
Nutrient Retention	ton	The model defines the water purification capacity of the current or future land use configuration	€/kg	Replacement cost for the construction of forest buffer strips functional to nitrate retention
Sediment Retention	ton	The model estimates the capacity of different land uses to prevent surface erosion and sediment transport into watercourses	€/t	Avoided cost for the restoration of soil fertility functional to erosion protection
Water Yield	l	The model identifies and assigns higher values to more permeable soils that contribute to water retention and groundwater recharge	€/m ³	Replacement cost for the "artificial" removal of water: sum of costs for the construction of retention basins, overflow structures, and floodplain areas (Prezziario Piemonte, n.a.)
Crop Production	€	The model uses the spatialization of Average Agricultural Values (VAM) to evaluate the productivity and absolute profitability of cultivated hectares for each crop type	€/m ²	Market price of different agricultural crops derived from the Average Agricultural Value tables in Piedmont
Timber Production	€	The model uses the spatialization of Average Agricultural Values (VAM) to evaluate the productivity and absolute profitability of areas designated for forestry production purposes	€/m ²	Market price of different agricultural crops derived from the Average Agricultural Value tables in Piedmont

3.2 InVEST

InVEST is a software tool designed to guide and support actions and decisions related to the sustainable management of natural resources by analysing and exploring the potential correlations between internal variations within ecosystems and the resulting benefits to people. Developed by the Natural Capital Project at Stanford University, this open-source technology is continuously updated and comprises a broad range of independent models (currently 20¹), capable of providing

¹ Annual Water Yield, Coastal Blue Carbon, Coastal Vulnerability Model, Crop Production, Crop Pollination, Forest Carbon Edge Effect, Habitat Quality, Habitat Risk Assessment, NDR: Nutrient Delivery Ratio, Offshore Wind Energy Production, Scenic Quality, SDR: Sediment Delivery Ratio, Seasonal Water Yield, Urban Flood Risk Mitigation, Urban Nature Access, Urban Stormwater Retention, Visitation: Recreation and Tourism, Wave Energy Production (Natural Capital Project, 2025).

detailed and accurate biophysical and economic assessments of the benefits offered by terrestrial, coastal, and marine systems. For the InVEST tool, version 3.16.1, released on July 1, 2025, was used. As illustrated in Table 3, the analysis focuses on two specific ES: "Carbon Storage and Sequestration" and "Urban Cooling."

In addition to land use data, as required by the previously described tool (i.e. Simulsoil), InVEST requires a set of additional variables to be considered in the calculation process of each ES.

In particular, for the "Carbon Storage and Sequestration" ES, the tool requires a table providing quantitative data on the amount of carbon stored for each land use category defined by the LCP classification.

The InVEST "Urban Cooling" model requires a larger set of input data (approximately ten variables), including a summary table of biophysical parameters (such as crop coefficient, shade, albedo, and the presence of green and built-up areas) for each LCP category, the mapping of reference evapotranspiration values, the air temperature of a rural reference area without the urban heat island effect, and the magnitude of this effect, calculated as the difference between maximum urban and rural temperatures. To support the economic analysis of this ES, additional data are used, including the mapping of building footprints and information on energy consumption and related costs, scaled to building area and differentiated by building type.

Table 3. Diagram of the analyzed InVEST models

Denomination	u.m.	Biophysical value	Economic u.m.	Economic value
Carbon Storage and Sequestration	ton	The model quantifies the soil's capacity to store and retain carbon by considering four main natural reservoirs: aboveground biomass, belowground biomass, soil, and dead organic matter	€/t	Market price equivalent to the cost that companies must bear for each ton of carbon dioxide equivalent emitted (CO ₂ e) into the atmosphere
Urban Cooling	0-1	The model provides an index of urban heat mitigation based on microclimatic and environmental variables, considering the presence and distribution of urban green spaces	€/kWh	Cost avoided for cooling indoor environments (air conditioning)

3.3 Simplified and customized models

Based on the pros and cons of previous tools, a set of simplified and customized models were proposed. Developed respectively in the QGIS and Microsoft Excel environments, and based on models well-established in the literature, these (independent) calculation procedures constitute the core of the present research. The models proposed refers to the valuation of "Carbon Storage and Sequestration" and "Recreational value of natural and semi-natural areas".

The input data used for the customized "Carbon Storage and Sequestration" model correspond to those required by the InVEST model, namely the mapping of land cover and land use (Figure 2), and a table containing quantitative values of carbon stored for each class identified by the LCP classification.

For the calculation procedure aimed at quantifying the "Recreational value of natural and semi-natural areas", in addition to the land cover and land use mapping (Figure 2), it is necessary to have a three-dimensional model of the bare topographic surface, obtained by removing anthropogenic elements and vegetation cover in order to represent the soil morphology, as well as the mapping of the network of pedestrian, cycling, and forest pathways extended over the entire study area. These methodologies enable detailed and accurate biophysical and economic assessments, in accordance with the data presented in Table 4.

Table 4. Functional schematic of the developed models

Denomination	u.m.	Biophysical value	Economic u.m.	Economic value	Software used
Carbon Storage and Sequestration	ton	The model quantifies the soil's capacity to store and retain carbon by considering four main natural reservoirs: aboveground biomass, belowground biomass, soil, and dead organic matter	€/t	Market price equivalent to the cost that companies must bear for each ton of carbon dioxide equivalent emitted (CO ₂ e) into the atmosphere	<i>Excel</i>
Recreational value of natural and semi-natural areas	ha	The model estimates the recreational potential of green and natural spaces based on accessibility parameters, such as road network, terrain morphology, and reachable distances	€/ha/year	Parametric value, based on quotations found in the literature, capable of providing an approximation of the average annual value per recreational visit	QGIS <i>Excel</i>

4. Case study

The methodological approach presented was applied to the city of Cuneo, an exemplary case study of an urban centre in northern Italy (Figure 1). The area is located in southwestern Piedmont, in a central position within the extensive mountainous system between the Maritime Alps and the Cottian Alps. Cuneo, founded at the end of the 12th century (1192), takes its name from the distinctive shape of the elevated landform on which it stands. The main urban core develops across this area, bordered by the Stura di Demonte River and the Gesso stream, which converge and define the characteristic confluence of the site (Comune di Cuneo, 1946). The settlement structure of the city represents an exemplary case of a particularly distinctive urban configuration.

This case study was selected due to its extremely rich biophysical values, thanks to the widespread and structured presence of protected areas, ecological corridors, and the Gesso and Stura river park, a fundamental hub for the provision of ecosystem benefits. It is not densely populated (approximately 467 inhabitants/km²) but threatened by the constant increase in soil consumption levels (+7.36% from 2006 to 2023, according to data provided by ISPRA) and by anthropogenic pressures on natural reserves and agroecosystems.

Additionally, Cuneo, in relation to ongoing climatic changes, has, according to the analyses conducted within the framework of the Sustainable Energy and Climate Action Plan (PAESC), reached a significant increase in both average and maximum temperatures: over the past thirty years, the annual average temperature has risen by 1.5 °C (Comune di Cuneo, 2023). Thermal anomalies have been particularly significant since 1997, showing a consistent and widespread warming trend (Comune di Cuneo, 2023). These phenomena urgently raise the issue of climate adaptation.

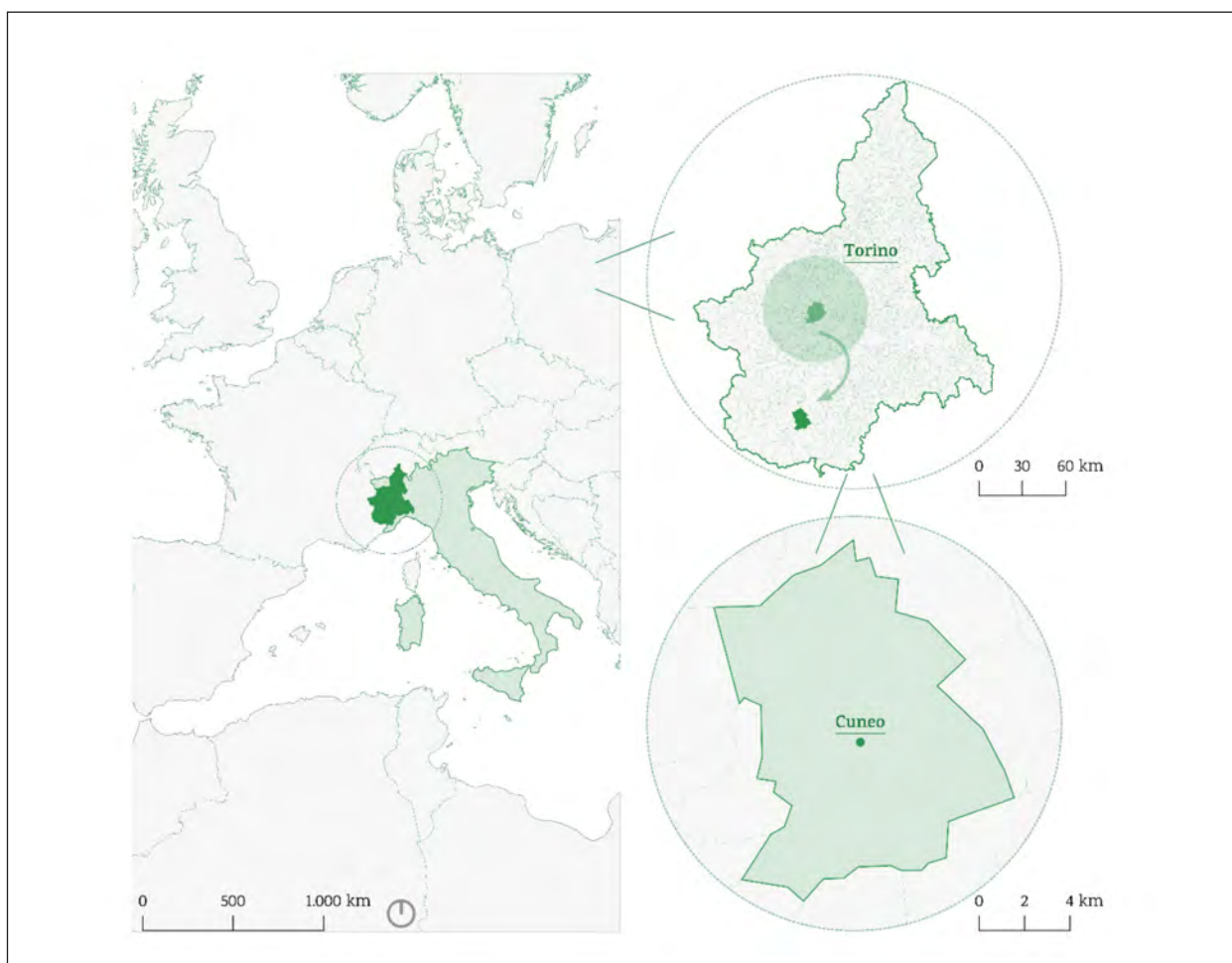


Figure 1. Territorial framework of the city of Cuneo.

5. Application

The objective of the present study is to identify the relationships between different systems and calculation methods, with particular attention to the development of a consistent database for the implementation of customized models. In order to achieve this objective, two software tools, i.e. Simulsoil and InVEST, were utilised. The application of these technologies enabled the development of biophysical and economic analyses (for further details, refer to Chapters 5.2 and 5.3) with a specific focus on the following ecosystem services: Carbon Storage and Sequestration, Habitat Quality, Water Yield, Nutrient Retention, Sediment Retention, Crop Pollination, Crop Production, Timber Production and Urban Cooling.

5.1 Materials used

5.1.1 Materials used - Simulsoil

As highlighted in Chapter 3.1, Simulsoil requires one input data, i. e. a detailed mapping of land cover and use, which is essential for the correct execution of the biophysical and economic assessments of the ES, as illustrated in Table 5. In this regard, Figure 2 presents the base maps relating to land cover and use for the case study of the city of Cuneo, highlighting the variations recorded between 2010 and 2023.

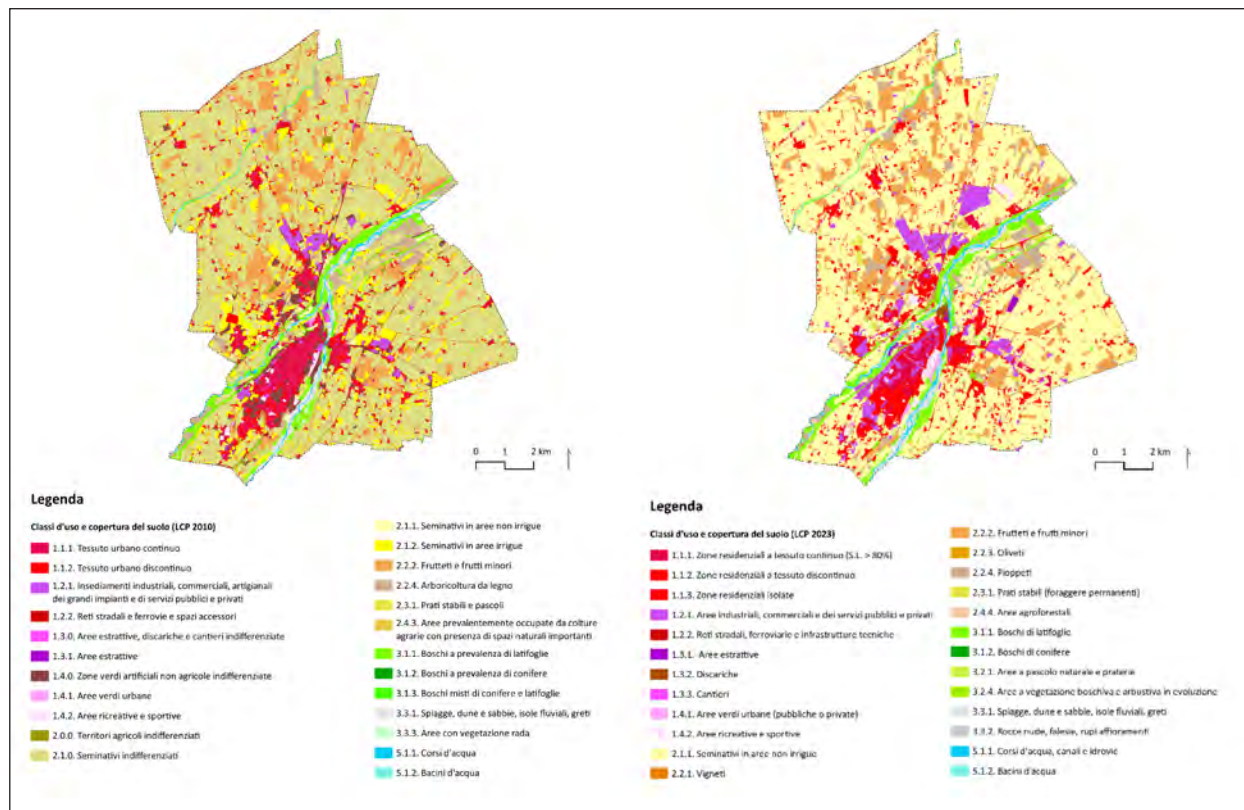


Figure 2. Representation of land use and cover classes in 2010 and 2023 for the city of Cuneo, according to the Piedmont Land Cover (LCP).

Table 5. Parameters used for the proper functioning of Simulsoil

Input data	Description	Source
Land cover and land use data layers	Raster (LCP) for the area of interest, relating to 2010 and 2023	Piedmont Region, 2024
Area of interest	Administrative boundary map used for aggregating and summarizing the results	Regional Geotopographic Database, BDTRE 2024

5.1.2 Materials used - InVEST

The proper functioning of the InVEST “Carbon Storage and Sequestration” model requires the use of both a detailed mapping of land cover and use (Figure 2), as Simulsoil, and a table containing quantitative data on stored carbon, differentiated for each land use category according to the LCP classification. Specifically, Table 6 lists all the input files used for the development of the present model. It should also be noted that the carbon storage values were associated with the different land use classes (“carbon reserves”) and were derived and redefined based on information provided by various sources, such as the INFC (2022), the SIAS project (2010), and, with regard to natural areas and agricultural surfaces, the estimates proposed by Sallustio et al. (2015). Finally, the reclassification of the LCP land use categories was carried out according to the definitions reported by Marchetti et al. (2012) and based on the categories defined by the IUTI (2011).

Table 6. Parameters and data used for the InVEST model "Carbon Storage and Sequestration"

Input data	Description	Source
Land cover and land use data layers	Raster (LCP) for the area of interest, relating to 2010 and 2023	Piedmont Region, 2024
Area of interest	Administrative boundary map used for aggregating and summarizing the results	Regional Geotopographic Database, BDTRE 2024
Carbon pools	Values that associate the amount of stored carbon with each land use category defined by the LCP	Sallustio et al., 2015

The InVEST model "Urban Cooling" requires, as initial data, the detailed mapping of land cover and land use (Figure 2) and a summary table of biophysical parameters for each LCP land use category. This table contains information related to evapotranspiration data, air temperature in a rural area free from the heat island effect and its magnitude, as well as mapping of building footprints and energy and cost data, differentiated by building type. This information is used to support the biophysical and economic analysis of ES. The evapotranspiration data, reported in Table 7, are based on historical series and elaborations from the BIGBANG model for the national hydrological balance, developed by the Italian Institute for Environmental Protection and Research (ISPRA, 2024) and accessible via the SINANET portal. Regarding the parameter "reference temperature" and the indicator "UHI Effect", the main reference is the Regional Agency for Environmental Protection (ARPA Piedmont, 2025). Average temperatures of rural areas were

determined through analysis of historical series from two meteorological stations, i.e. "Camera di Commercio" and "Dronero" (ARPA Piedmont, 2025). Finally, all data relevant to the assessment of energy consumption pertain to the project, carried out by the two companies SSEAcoop and Etifor Srl (2020).

Table 7. Parameters and data used for the InVEST model "Urban Cooling"

Input data	Description	Source
Land cover and land use data layers	Raster (LCP) for the area of interest, relating to 2010 and 2023	Piedmont Region, 2024
Area of interest	Administrative boundary map used for aggregating and summarizing the results	Regional Geotopographic Database, BDTRE 2024
Biophysical table	Biophysical values associated with each land use category of the LCP, concerning: crop coefficients, shade, albedo, and differentiation between green areas and urbanized areas	Hagemann et al., 2002; InVEST, 2025
Reference evapotranspiration (mm)	Mapping of reference evapotranspiration values	ISPRA, 2024
Maximum cooling distance (m)	Distance within which green areas larger than 2 hectares have a cooling effect	InVEST, 2025
Reference air temperature (°C)	Air temperature in a reference rural area where the urban heat island effect is not observed	ARPA, 2025
UHI Effect (°C)	Magnitude of the urban heat island effect (difference between the reference temperature of the rural area and the maximum temperature observed in the city)	ARPA, 2025
Air mixing distance (m)	Radius within which air mixing is considered to estimate the effective temperature in an urban area (simulates the effect of atmospheric turbulence and heat dispersion)	InVEST, 2025
Building footprints	Mapping of constructed building footprints	Regional Geotopographic Database, BDTRE 2024

Fallow Table 7. Parameters and data used for the InVEST model "Urban Cooling"

Input data	Description	Source
Energy consumption	Energy consumption data by building footprint area and related costs, broken down by building type	Etifor e SEAcop, 2020

5.1.3 Materials used – simplified model and complementary model

The input data used for the simplified model "Carbon Storage and Sequestration" coincide with those provided by the InVEST model, to which reference is made in Table 6.

The "Recreational value of natural and semi-natural areas" requires, in addition to the land cover and land use mapping (Figure 2), a three-dimensional model of the uncovered topographic surface, obtained by removing the anthropic component and vegetation to represent the natural morphology of the soil, as includes a complete mapping of the network of pedestrian, cycling, and forest paths extended to the entire study area, and a definition of areas accessible from the urban centre, classified based on access times. In this simplified model for the estimation of the "Recreational value of natural and semi-natural areas", developed in a GIS environment, the data related to the road network (Table 8) was structured through the cartographic reconstruction of the main existing infrastructures, including current and planned forest roads. The last variable used in the analysis is terrain morphology, defined through a classification of terrain based on slope classes.

For this purpose, a systematic analysis of the topographic slope of the municipal territory of Cuneo was conducted, based on the use of the Digital Terrain Model (DTM) of Piedmont, which provides a high-resolution altimetric representation (5 meters), ensuring high precision in the depiction of the altitude distribution. The processing, elaboration, or modelling of the DTM raster led to the functional subdivision and definition of three slope classes, each representing of the different morphological characteristics of the terrain:

- Class I (0% ÷ 25%): flat or gently sloping lands, easily accessible;
- Class II (26% ÷ 50%): moderately sloping lands, with moderate accessibility;
- Class III (51% ÷ 75%): steeply sloping lands, difficult to reach.

Table 8. Parameters and data used for the output of the customized GIS-based model for the estimation of recreational value

Input data	Description	Source
Land cover and land use data layers	Raster (LCP) for the area of interest, relating to 2010 and 2023	Piedmont Region, 2024
Area of interest	Administrative boundary map used for aggregating and summarizing the results	Regional Geotopographic Database, BDTRE 2024
Digital Terrain Model (DTM)	Three-dimensional graphical representation of the Earth's surface, cleared of any anthropogenic elements and vegetation cover	Piedmont Region, 2011
Transportation infrastructure network	Representation of road paths (pedestrian, cycling, and forest trails) covering the entire study area	Regional Geotopographic Database, BDTRE 2024
Buffer zone	Graphical representation and quantification of areas accessible from the urban centre	Regional Geotopographic Database, BDTRE 2024

Regarding the estimation of "Recreational value of natural and semi-natural areas", it is also proposed the development of a simplified model. It is based on a single input data, in addition to the land cover and land use mapping (Figure 2), related to the areas accessible from the urban centre, classified based on travel times (Table 9).

Table 9. Parameters and data used for the output of the simplified model for the estimation of recreational value

Input data	Description	Source
Land cover and land use data layers	Raster (LCP) for the area of interest, relating to 2010 and 2023	Piedmont Region, 2024
Area of interest	Administrative boundary map used for aggregating and summarizing the results	Regional Geotopographic Database, BDTRE 2024
Buffer zone	Graphical representation and quantification of areas accessible from the urban centre	Regional Geotopographic Database, BDTRE 2024

5.2 Simulsoil

Through a single input data related to land use (Figure 2), Simulsoil provided significant support to the assessment of 8 different ES, namely Carbon Storage (CS), Habitat Quality (HQ), Water Yield (WY), Nutrient Retention (NR), Sediment Retention (SDR), Crop Pollination (CPO), Crop Production (CPR), and Timber Production (TP).

Two specific years were compared, that also correspond to the reference dates of land use and land cover (LCP) maps for 2010 and 2023 (hereafter referred to as scenarios T0 and T1, respectively). These two years highlight changes occurred over a decade and their related impacts on soil, ecosystem functions, and Natural Capital stock.

The outputs of Simulsoil show both spatially and numerically (Table 10) the tangible differences regarding the increase or loss of ES, marking the evolution of transformation processes in land cover and use occurred in about 13 years. The results achieved through the Simulsoil platform highlighted, from a biophysical perspective, a critical situation concerning 6 ESs out of 8 (Table 10). The analyses in fact show a clear decline in the values of CS, CPO, HQ, SDR, WY, and TP in scenario T1 (2023) compared to T0 (2010). Considerable losses range between -1.64% and -42.13%. Conversely, the remaining analysed ES, namely NR and CPR, experienced a positive increase, respectively of +56.11% and +5.74%. From the comparison with data provided by the National Institute of Statistics (ISTAT), within the Agricultural Census, and the Agricultural Registry of Piedmont, the increase in the value of CPR is clearly and strictly correlated with the increase, between 2010 and 2024, within a range between +0.40% and +6.00%, of SAU (Utilized Agricultural Area), which represents the surface area of farms occupied by arable land, urban gardens, orchards and permanent crops, meadows, and pastures.

The increase of consumed soil (+129.65 ha), that has consistently characterized the area of the municipality of Cuneo between 2006 and 2023, surely represents a significant aspect, which could also explain the evolution of the negative trend in terms of the biophysical values of the different ES. This increase has inevitably contributed to the loss of fundamental environmental resources and goods and services provided by ecosystems (ISPRA, 2014).

Table 10. Summary output of the ESs assessment through Simulsoil

Code	Denomination	u.m.	T ₀	T ₁	Percentage change
CS	Carbon Storage	ton	↑	↓	-8.39%
CPO	Crop Pollination	0-1	↑	↓	-26.09%
HQ	Habitat Quality	0-1	↑	↓	-1.64%
NR	Nutrient Retention	ton	↓	↑	+56.11%
SDR	Sediment Retention	ton	↑	↓	-7.97%
WY	Water Yield	0-1	↑	↓	-6.13%
CPR	Crop Production	€	↓	↑	+5.74%
TP	Timber Production	€	↑	↓	-42.13%

5.3 InVEST

5.3.1 InVEST – Carbon Storage and Sequestration

Starting from the land use cover (Figure 2) and the integration of four variables associated with different land use destinations (Table 11), InVEST was able to estimate the total amount of carbon stored by terrestrial ecosystems or in general by a soil parcel over time. These variables (introduced in Table 6), defined as carbon pools, represent the various types of reserves, natural or artificial, capable of storing carbon and essentially reflect the soil characteristics related to their composition and shrub and vegetation cover. They are divided as follows: aboveground and belowground biomass, soil, and organic matter. Not all ecosystems are capable of retaining carbon and the values attributable to such reserves. As highlighted in Table 11, forests present a carbon storage capacity significantly higher than urban contexts where the high degree of soil sealing² strongly compromises this ecosystem function. Consequently, the values of the carbon pools highlight these differences, mainly related to the physical and morphological characteristics of the soils, their level of degradation, and the different environmental contexts.

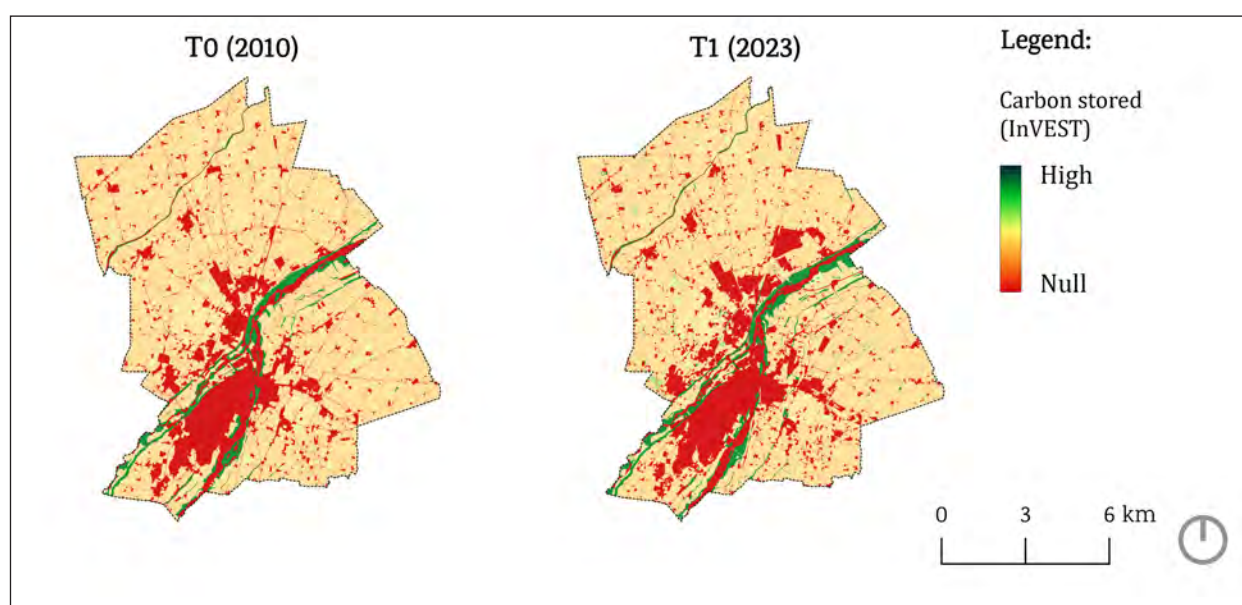
The model essentially assigns to each pixel, based on the LCP class, the total value, aggregated or split into classes, of stored carbon expressed in megagrams per pixel. This value is the sum of the values attributable to the different available pools, which are the reservoirs or reserves.

² Adopting a conservative approach, it is assumed that urbanization completely eliminates the existing carbon reserves (Sallustio et al., 2015).

Table 11. Definition of carbon storage values associated with different land use classes (Sallustio et al., 2015)

IUTI class	Aboveground	Belowground	Dead organic matter	Soil organic
Forestland	50.5	11.525	5.295	76.1
Arable land	5	/	/	53.1
Orchards, vineyards and nurseries	10	/	/	52.1
Forest plantations	28.55	5.25	1.75	63.9
Natural grassland and pastures	/	/	/	78.9
Other wooded land	3.05	/	/	66.9
Settlements	0	0	0	0

The results of the simulations are shown graphically in Figure 3, where, through a traffic light scale, the areas most capable of sequestering carbon (in green) and those less capable (in red) are highlighted.

**Figure 3.** Spatialization of the results of the InVEST model “Carbon Storage and Sequestration.”

The estimation of the economic-monetary value associated with the carbon storage service was carried out directly by the software through the multiplication of the total amount of carbon stored by terrestrial ecosystems by a parametric coefficient (€/ton). The software also allows the association of an annual market discount rate and an indicative annual price variation, in both cases with values ranging between 0 and 1. The latter variable considers the evolution, over time, of the impact of emissions on the expected damages related to climate change. For simplification and in order to follow to the same calculation procedure used in Simulsoil, in the present case these latter two parameters were not taken into consideration.

From the analysis of Table 12, it emerges that the InVEST model “Carbon Storage and Sequestration” returned the same negative trend already highlighted by the Simulsoil analyses, with a loss of value attributable to the ES of -1.08% (which, in economic terms, translates to -

€446,511). Despite this, the data processed by the different software and their respective results show small differences in values between -3,81% and +3,86% (an interval still considered acceptable for the purposes of the research).

Table 12. Biophysical valuation results for 2010 and 2023, with percentage differences between the applied tools

Software	Biophysical value (ton) in 2010	Biophysical value (ton) in 2023	Difference between the two years
Simulsoil	629,816.02	576,977.00	-8.38%
InVEST	605,793.60	599,225.30	-1,08%
Comparison between Simulsoil and InVEST	-3.81%	+3.86%	

This difference is easily explained by two main aspects that differentiate the tools: (a) the limited selection of possible land use classifications that, at the national level, characterizes Simulsoil, and (b) the level of approximation that characterizes the resolution of Simulsoil (20 meters) of the thematic maps (i.e. Corine Land Cover and National Land Cover Map) and the LCP used by InVEST (5 meters resolution).

5.3.2 InVEST – Urban Cooling

The InVEST “Urban Cooling” model uses the mapping of land use and land cover (Figure 2) and integrates some significant variables from a microclimatic and environmental perspective, namely shading provided by tree cover, vegetation evapotranspiration (Figure 4), albedo, and distance from cooling islands. Based on these elements, the software is able to calculate and return an Urban Heat Mitigation Index, whose value is influenced by the average cooling capacity (or simply, the reduction) of air temperature attributable to the presence and distribution of urban green. Compared to previous analyses, the “Urban Cooling” model requires the analysis of two specific months; the analysis focuses on April and August of the same year (2023), as shown in Table 13, due to the limited availability of historical data. The corresponding results are presented in Figure 5.

Table 13. Historical data series provided by ARPA and used in the “Urban Cooling” model

Meteorological station	Reference air temperature		Maximum temperature recorded in the city		UHI Effect
	April	August	April	August	
Camera di Commercio	-	-	13.0 °C	23.8 °C	1.5 °C
Dronero	11.5 °C	22.3 °C	-	-	

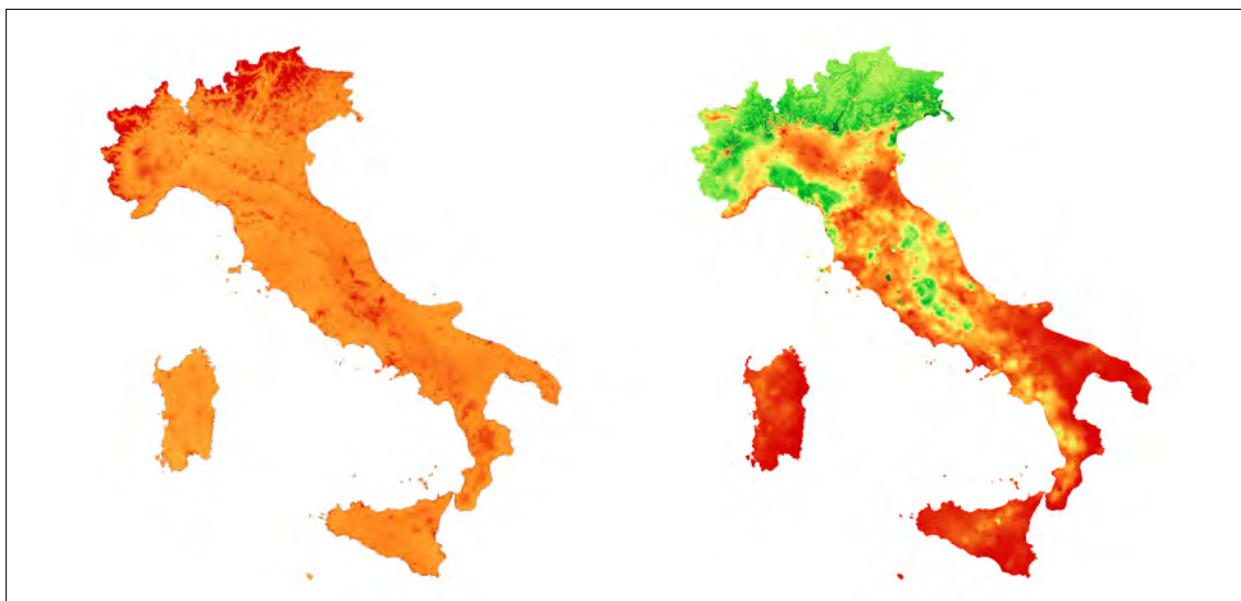


Figure 4. In order, representation (out of scale) of the reference actual evapotranspiration of the months of April and August 2023. Elaborated based on data provided by ISPRA.

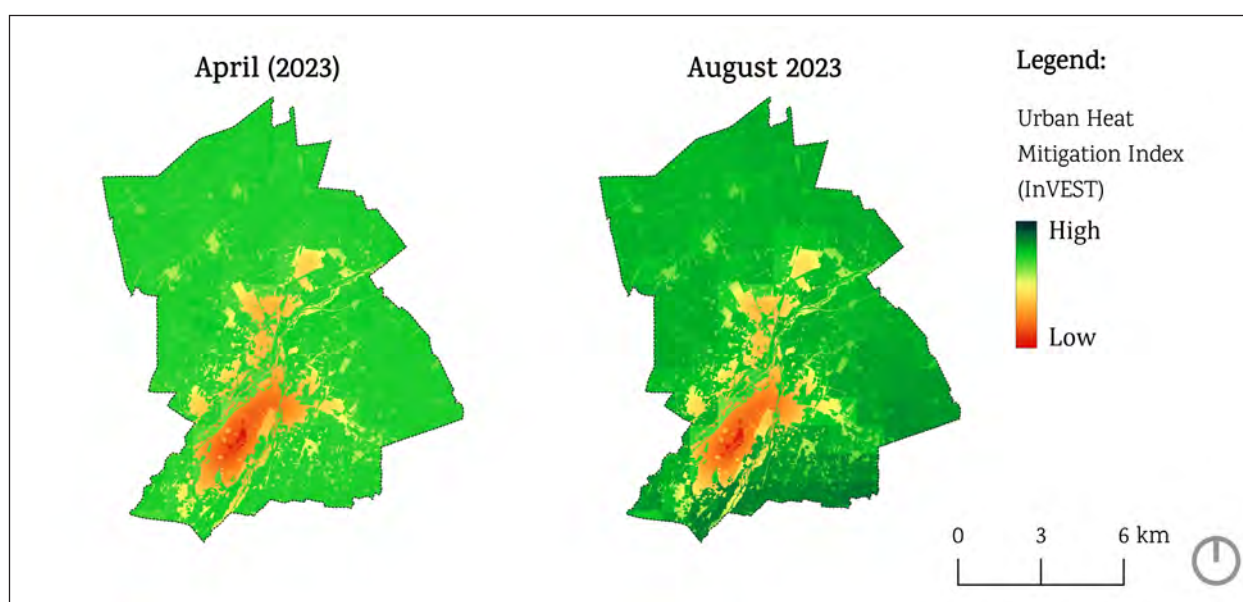


Figure 5. Spatialization of the results of the Urban Heat Mitigation Index (InVEST model "Urban Cooling").

The estimation of the economic value associated with the heat mitigation service was finally carried out by calculating the energy savings related to the reduction in electricity consumption of air conditioning.

The outputs returned by the present model therefore reflect the positive impact of green areas on the reduction of perceived temperatures and the economic benefit derived from lower consumption for cooling the indoor spaces of each individual building.

The results derived from the application of the model (Figure 6), considering the natural monthly variability of some relevant indicators such as the crop coefficient and the value of evapotranspiration, highlight an average economic savings per building significantly higher in August compared to April, with values equal to €50.66 and €44.43 per month, respectively, corresponding to €1.63 and €1.48 per day.

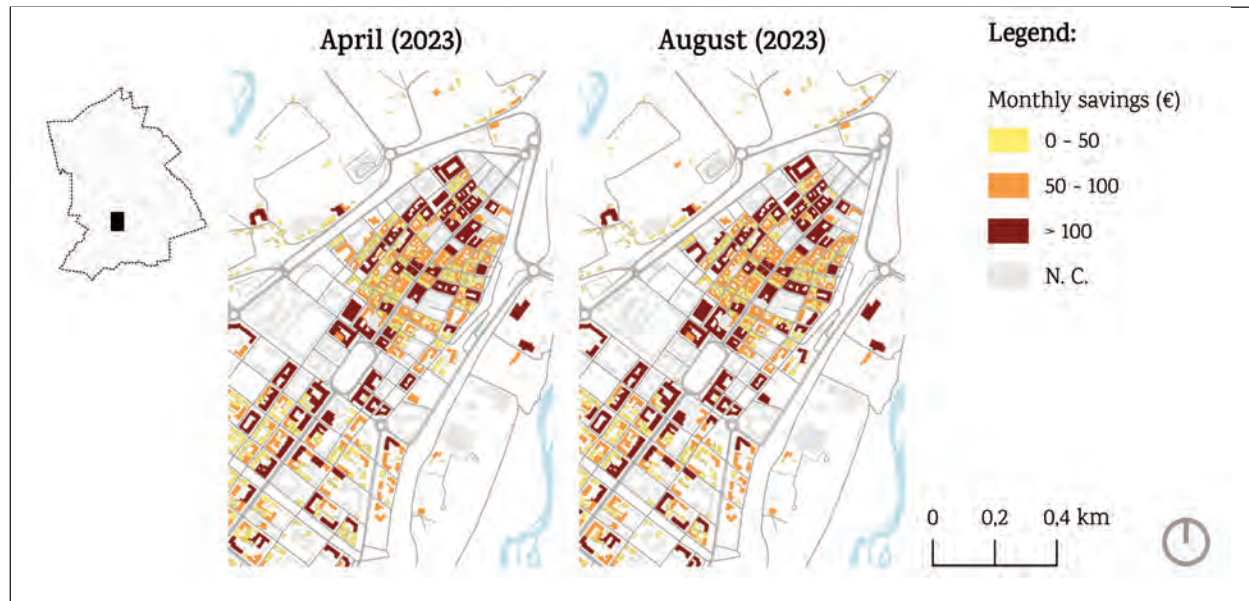


Figure 6. Economic value associated with energy savings due to the reduction in electricity consumption of air conditioning (InVEST model “Urban Cooling”).

5.4 Differences between Simulsoil and InVEST: towards simplified and complementary models

Simulsoil and InVEST are two software characterized by a series of structural differences. As mentioned in previous sections, Simulsoil is distinguished by being a calculation model that automates the complex calculation processes of InVEST. The main differences emerging from the development of the two tools can be summarized in six points.

Firstly, in terms of reliability, all valuations provided by Simulsoil currently rely on calculation algorithms from an outdated version of InVEST, version 3.2.0; this condition indicates that using the same tool offered by InVEST, which is constantly updated, could yield more reliable and valid values. Nevertheless, it is useful to mention that the degree of reliability of InVEST simulations essentially depends on the correct use of bibliographic sources on the subject by the user.

Secondly, regarding the accuracy of information, the outputs related to all eight ecosystem services considered in Simulsoil have a resolution, except for the Metropolitan City of Turin, in terms of raster pixels equal to 20 by 20 meters. Conversely, in InVEST, the level of detail is directly defined by the user, allowing greater accuracy. In our case, all outputs have a resolution of 5 by 5 meters in the elaboration of the results.

Thirdly, considering the management of the required data, Simulsoil and InVEST use opposite approaches. Simulsoil does not require specific skills for its use, except basic knowledge for processing files on QGIS. It is therefore considered more accessible and easier to use. In contrast, InVEST requires specific and technical skills for each model and also on supporting software such as QGIS. This difference arises from the fact that the creation of the InVEST database, on which each single model of the tool is based, is entirely up to the user.

Fourthly, examining the results, Simulsoil provides 8 ESs in extremely short times. The execution times of a single model in InVEST are variable and generally depend on the level and degree of accuracy desired. Higher resolution requires longer simulation time.

Fifthly, regarding the estimation of changes in the biophysical value of ecosystem services, within Simulsoil, historical series such as those reported in the present contribution from 2010 to 2023 may be subject to approximations and generalizations linked to variables attributable to land use cover at the national level. In contrast, InVEST, depending on the user's knowledge and skills, could have more complete, updated, and detailed databases, able to account for all variables related to land use changes.

As for the economic valuation, both software have modifiable unit parametric values and are therefore able to consider price variability and fluctuations.

In conclusion, a structural criticality is detected in Simulsoil when working in urban contexts, attributable to the limited attention given to ESs in urban areas compared to those analysed on a broader territorial scale. Although the boundary between urban and non-urban, and consequently between ecosystem services and urban ecosystem services, is often blurred and difficult to delineate. Gaps are evident in the analysis of ESs relevant to urban contexts, such as urban cooling, noise reduction, stormwater drainage, and wastewater treatment (Bolund and Hunhammar, 1999).

5.4.1 Simplified model “Carbon Storage and Sequestration”

Following the application of the existing tools (Simulsoil and InVEST) and in light of their strengths and weaknesses, further advancement are proposed in order to simplify and ensure the reliability of the biophysical and economic assessments of ES. The main objective of the work therefore became the preparation and testing of simplified models. The work started, in particular, with the experimentation of a simplified model for calculating the total amount of carbon stored by ecosystems.

The simplified model was developed using Microsoft Excel software, basing the methodology on the input data required by InVEST, namely the raster file of the LCP (Figure 2), referring to 2010 and 2023 for the area of interest, the map of administrative boundaries on which to aggregate and summarize the final results, and, finally, the table with the values related to the carbon stored for each land use category. The Excel workbook consists of three worksheets. The first sheet (Figure 7) contains the definition of land use and land cover classes, as illustrated within the “Inventory of Land Use in Italy” (IUTI), with the related description provided by Marchetti et al. (2012). The second contains pivot tables that allow the calculation of the biophysical and economic value of the ecosystem service for each category (Figure 8) or for all those under analysis (Figure 9). Finally, the third worksheet (and any subsequent ones) is dedicated to the different development scenarios subject to comparison (for example, as in the previously illustrated cases, between 2010 and 2023).

IUTI Class	IUTI Category Level II	IUTI Category Level III	IUTI Code	Description (Marchetti et al., 2012)
Forest Land	Woodland	/	1	Land with a minimum area of 5,000 m ² , characterised by tree cover exceeding 10%, with trees capable of reaching a minimum height of five metres (5 m) at maturity in situ, and not classifiable as agricultural land (such as timber plantations, orchards, or agroforestry cropland) or as urban green space (such as urban parks and gardens). Areas characterised by young natural stands, as well as all plantations that have not yet reached a canopy cover of 10%, are nevertheless considered forest. These are treated as an integral part of the forest area, which, due to human intervention (e.g., harvesting) or natural disturbances (such as fires or severe meteorological events), is temporarily without tree cover but is expected to return to a forested condition.
	Wooded land temporarily unstocked	/		
Cropland	Arable land	/	2.1	Cropland refers to land with a minimum area of 5,000 m ² , occupied by agricultural surfaces such as arable land - both rainfed and irrigated permanent polyphitic crops, non-forest nurseries, horticultural crops grown in open fields, greenhouses or plastic tunnels, as well as plantations of fruit-bearing tree and shrub species (including regularly managed hazelnut groves) and timber plantations. Natural land, similarly to forest formations, are considered a distinct subcategory only if they cover an area larger than 5,000 m ² , have a potential tree canopy cover exceeding 10%, and are capable of reaching a height greater than 5 m in situ.
	Permanent crops	Orchards, vineyards and nurseries	2.2.1	
		Forest plantations	2.2.2	
Grassland	Natural grassland	/	3.1	Grassland areas include: the subcategory “other wooded land” (land with a minimum area of 5,000 m ² characterised by tree cover of 5-10% with trees capable of reaching a minimum height of 5 m at maturity in situ, or a cover exceeding 10% composed of trees that do not reach 5 m at maturity in situ, as well as shrubland and huchland); and the subcategory “pastures and grasslands” (land with a minimum area of 5,000 m ² occupied by natural pastures, high-altitude grasslands, pasture-meadow systems, areas resulting from the abandonment of agricultural practices, and all vegetation types dominated by spontaneous herbaceous cover exceeding 40%, primarily composed of herbaceous species).
	Other wooded land	/	3.2	

Figure 7. First worksheet of the customized model containing the definition of land use and land cover classes with the related description provided by Marchetti et al. (2012).

CODE	Description	Surface area (ha)	Carbon storage potential (Mg/ha)	Biophysical value (tot.) (Mg)	Economic coefficient (€/Mg)	Economic value (tot.) (€)
1	Forest	440	143	63105	68	4289845
Totale						4289845

CODE
1
2.1
2.2.1
2.2.2
3.1
3.2

Figure 8. Worksheet of the customized model containing the estimation of the biophysical and economic value of the ecosystem service related to Carbon Storage and Sequestration for each category.

CODE	Description	Surface area (ha)	Carbon storage potential (Mg/ha)	Biophysical value (tot.) (Mg)	Economic coefficient (€/Mg)	Economic value (tot.) (€)
1	Forest	440	143	63105	68	4289845
2.1	Arable land	7959	58	462436	68	31436433
2.2.1	Orchards, vineyards and nurseries	1036	62	64333	68	4373365
2.2.2	Forest plantations	0	99	0	68	0
3.1	Natural grassland	201	79	15892	68	1080241
3.2	Other wooded land	14	70	964	68	65527
Totale						41245510

CODE
1
2.1
2.2.1
2.2.2
3.1
3.2

Figure 9. Worksheet of the customized model containing the estimation of the biophysical and economic value of the ecosystem service related to Carbon Storage and Sequestration in aggregated form.

For the calculation of the biophysical and economic values contained in Figures 8 and 9, the simplified model requires the user to select the land uses under analysis through a drop-down menu and to input the quantification (in hectares) of the aforementioned areas. This latter operation can be carried out through areal calculations in QGIS or simply by knowing the reference surface areas relative to the territorial extension for each class. Once the different land uses are set, the model assigns a multiplicative factor to each class; this factor is defined by the sum of the values attributable to the four components previously defined as carbon pools according to the different land uses. The user has the option to modify these parameters by acting directly on the dedicated selected cell (following the instructions detailed and shown in Figures 10 and 11), depending on the reference context or updates from scientific literature. Once these parameters are inserted, the model allows obtaining the biophysical value related to the carbon stored for the entire study area (Figures 10 and 11), employing the following formula (1):

$$CS = V * \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 q_{ij} * S_i \quad (1)$$

Where V represents the cost that companies must bear for each ton of carbon dioxide equivalent (CO_2e) emitted into the atmosphere²; i assumes the value of the land use class; j

² <https://tradingeconomics.com/commodity/carbon> (in this case, with specific reference to the costs incurred on 1 April 2025).

corresponds to the amount of carbon stored in the different natural carbon pools qc ; S represents the territorial area of the reference land use class i .

CODE	Description	Surface area (ha)	Carbon storage potential (Mg/ha)	Biophysical value (tot.) (Mg of C)
1	Forest	470	143	=D4*E4
2.1	Arable land	7422	58	431197
2.2.1	Orchards, vineyards and nurseries	1204	62	74742
2.2.2	Forest plantations	26	99	2580
3.1	Natural grassland	249	79	19648
3.2	Other wooded land	56	70	3921

Figure 10. Quantification of the biophysical value using the simplified Excel model “Carbon Storage and Sequestration.”

CODE	Description	Surface area (ha)	Carbon storage potential (Mg/ha)	Biophysical value (tot.) (Mg of C)	Economic coefficient (€/Mg)	Economic value (tot.) (€)
1	Forest	470	143	67425	68	=F4*G5
2.1	Arable land	7422	58	431197		29312748
2.2.1	Orchards, vineyards and nurseries	1204	62	74742		5080987
2.2.2	Forest plantations	26	99	2580		175357
3.1	Natural grassland	249	79	19648		1335676
3.2	Other wooded land	56	70	3921		266520

Figure 11. Quantification of the economic value using the simplified Excel model “Carbon Storage and Sequestration.”

In the present case, the data obtained from the InVEST tool for the municipality of Cuneo, referring to 2023, were used to perform a comparative analysis aimed at verifying the transparency and reliability of the proposed method (Table 14).

This preliminary experimentation produced satisfactory results, as can be seen in Table 14, with values different from those obtained using InVEST by 0.05% (a threshold considered widely acceptable).

Table 14. Biophysical valuations related to 2023 and the differences, in percentage terms, between the different calculation methods

Software	Biophysical value (ton)	Percentage change	
Simulsoil	576,977.00		
InVEST	599,225.30	+3.86%	Difference relative to Simulsoil
Simplified model(Excel)	599,511.94	+0.05%	Difference relative to InVEST

5.4.2 Proposal for the calculation of recreational potential: complementary and simplified model

In addition to the experimentation of the simplified model, the work aimed to develop a further methodological approach for assessing the “Recreational potential associated with the set of green and natural spaces”, based on parameters related to accessibility, such as the road network, territorial morphology (slope classes), and reachable useful distances. The existence of urban green spaces is constantly threatened by the intensification of urbanization processes in contemporary cities, while the level of accessibility related to them contributes to generating significant disparities in the quality of life and well-being of citizens. This experimentation aims to define a functional representation of the existing relationship between urban accessibility, understood as infrastructure capable of modulating citizen behaviour and mobility flows, and the level of usability of natural and semi-natural spaces.

The development of this approach responds to the need to overcome the main limitations identified in the practical use of existing tools. In particular, the “Urban Nature Access” and “Visitation: Recreation and Tourism” models included in the InVEST tool show limited applicability, mainly due to the limited availability of required input data and the high complexity of their calculation procedures. The “Urban Nature Access” model, for example, is based on the integration of different types of variables, requiring the combination of information on population distribution, the spatial configuration of accessible green areas, and the transport network needed to estimate travel times or distances. This approach involves combining datasets with different characteristics and spatial scales, which increases procedural complexity. The definition of accessibility thresholds further adds to the methodological structure, influencing how results are represented and interpreted. Similarly, the “Visitation: Recreation and Tourism” model relies on indirect information, including proxies derived from geotagged photos and social media content, as well as several GIS layers describing environmental and infrastructural features. The availability and quality of these inputs can vary, affecting the reliability and consistency of the results.

Moreover, in both cases, it is absent the economic valuation of the indicator. This aspect could compromise their use in decision-making contexts oriented towards cost-benefit analysis.

With reference to the alternative model proposed, the quantification of recreational potential was carried out following a complex procedural workflow schematized in Figure 12 which took into account the following relevant parameters: recreational land use destinations, road infrastructure system, and terrain slope.

In an initial phase, areas with higher recreational value were defined starting from the land use categories provided by the LCP, divided as follows: forests, wetlands, rivers, and urban green spaces. Subsequently, the road infrastructure system of the municipality of Cuneo was identified, redefined, and reclassified according to the slope classes characterizing the territorial morphology. These steps led to the identification and delimitation of accessible recreational areas through the existing road infrastructure system, as well as their greater or lesser accessibility. The following operational phase involved the functional reorganization of accessible recreational areas according to the slope classes in which they fall, and the identification and selection of the main centralities considered as crucial starting points. For the city of Cuneo, the main railway station is considered as the main urban centrality based on its functional and strategic characteristics.

Consequently, areas with recreational value easily reachable from the urban centre within time classes of less than one hour were defined (Figure 13). Finally, the overlay of the recreational areas easily reachable from the urban centre with the respective slope classes characterizing the territory allowed for the representation of the degree of accessibility of each area with recreational value.

The results of the operation led to the assignment of numerical coefficients for each analysed recreational area. These numerical coefficients are fundamental for the success of the model, as they allow the attribution of adjustment rates (ranging between -30% and +30%) useful for determining the economic value of each area. This latter procedure was carried out by assigning a parametric value, based on quotations found in the literature, capable of providing an approximation of the average value per recreational visit (95 €/ha/year) (Quintano & Barredo, 2015; Schägner et al., 2016).

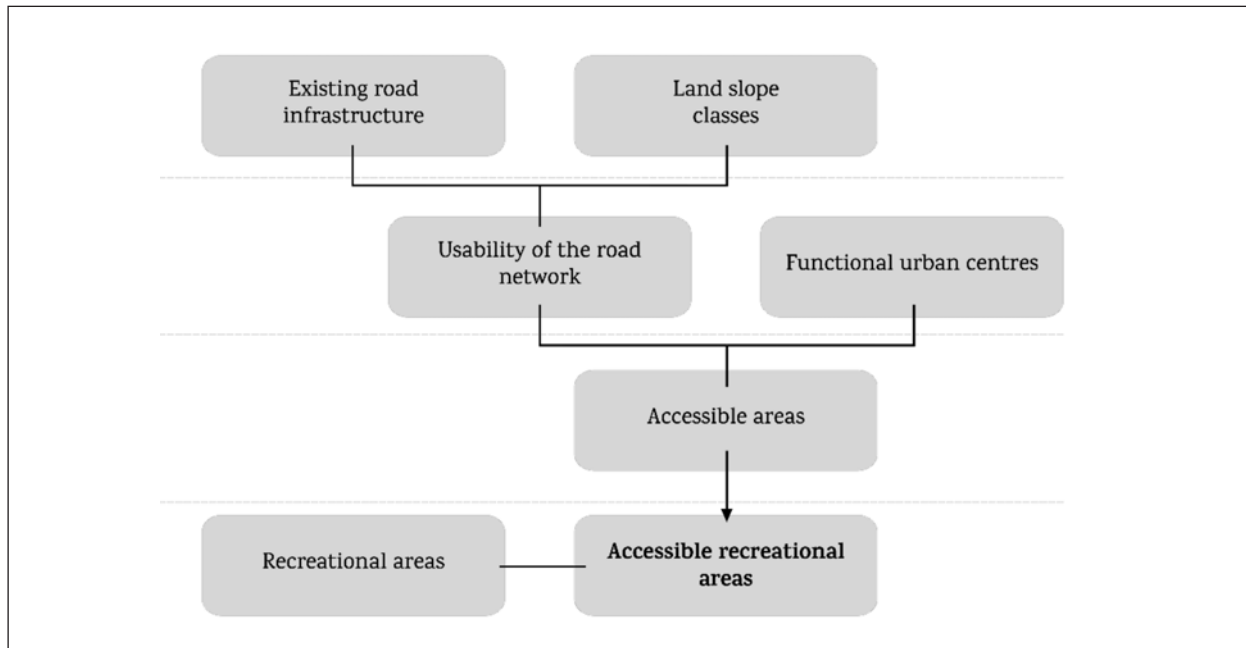


Figure 12. Schematic summary of the procedural phases of the developed methodology.

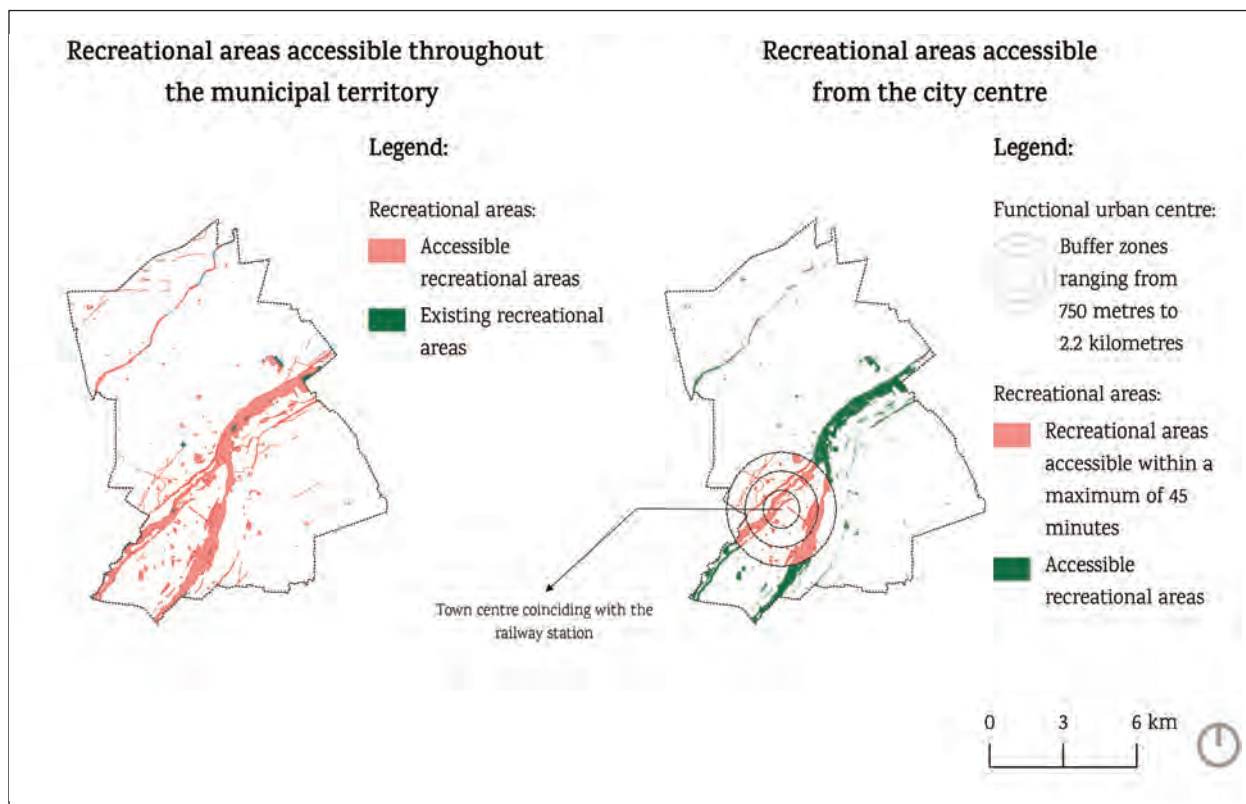


Figure 13. Definition of existing recreational areas, accessible and accessible within a maximum of 45 minutes from the urban centre (customized model).

The proposed calculation procedure concerning accessibility to urban and natural green areas allowed the identification, in the territory of Cuneo, of approximately 934 ha of areas characterized by high recreational value (Figure 13). Only 44.53% (415.88 ha) of these areas are accessible within a time range of 45 minutes from the city centre and, among these, those categorized as “maximum recreation” represent only 9.10% of the total.

The full development of the model led to the definition of a total annual economic value (Figure 14), related to the degree of accessibility to urban nature, equal to €41,204.21.

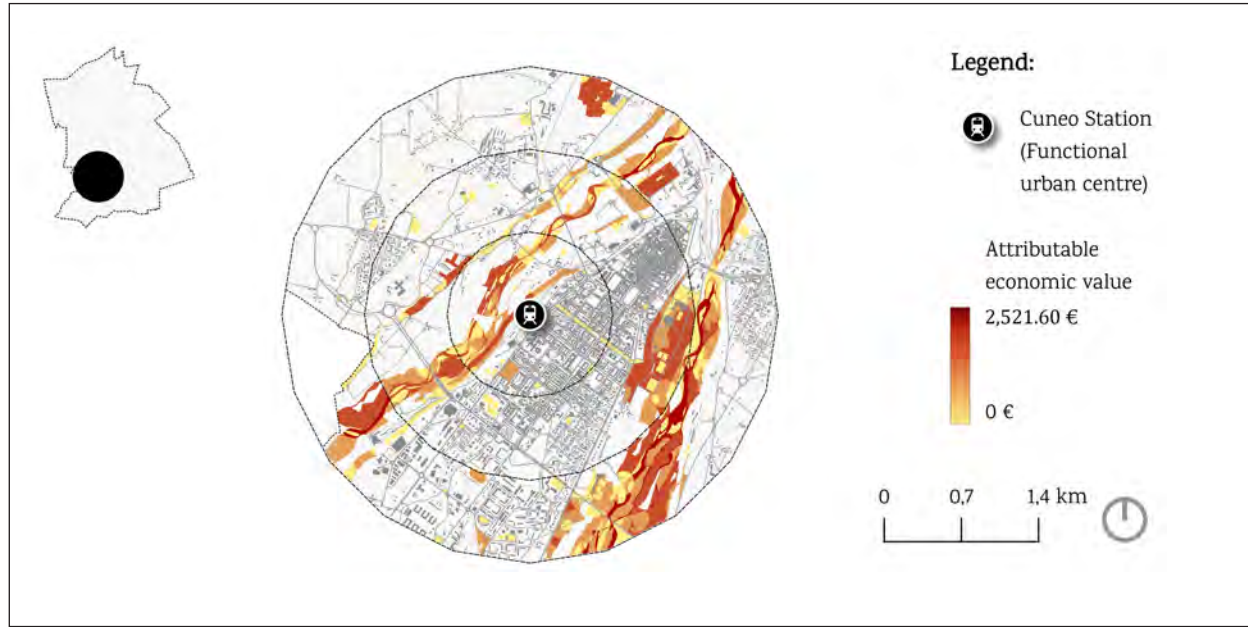


Figure 14. Economic value related to the degree of accessibility to urban nature.

Also in this case, a further simplified calculation procedure was proposed, based on Excel spreadsheets. The necessary simplification inevitably implies a reduction in the number of variables considered for redefining the actual recreational value. The only parameter used is the distance from the urban centre, at the expense of terrain slope classes and existing road infrastructure. However, through this approach, once the recreational value areas accessible within time classes of less than 45 minutes from the urban centre are identified and quantified, it is possible to obtain a monetary estimate by multiplying the territorial surface (ha) by the previously established parametric economic value (€/ha), applying a revaluation coefficient (ranging between -30% and +30%) essentially based on the travel times defined earlier. These results were achieved using the following formula (2):

$$VR = V * \sum_{i=1}^n S_i * (1 - c) \quad (2)$$

Where i assumes the value of the land use class; S represents the territorial surface of the land use class of reference i ; c expresses the percentage revaluation coefficient determined based on the distance from the urban centre; finally, V corresponds to the parametric economic value.

This simplified calculation model, essentially based on a single parameter (distance from the centre), has produced and returned lower economic values, which amounts to €32,511.47 per year (Figure 15).

Category	Surface area (ha)	Revaluation coefficient (percentage increase)	Economic coefficient (€/ha/year)	Economic value (€/year)
Areas accessible within 15 minutes	40	30%	95	=C3*(1+D3)*\$E\$3
Areas accessible within 16 + 30 minutes	96	15%		10525
Areas accessible within 31 + 45 minutes	180	0%		17102

Figura 15. Economic value related to the degree of accessibility to urban nature through simplified calculation.

6. Discussion and conclusions

This contribution has illustrated the application of several existing tools for the biophysical and economic assessment of ESs. This comparative analysis has allowed, on one hand, the proposal of simplified models derived from the rationalization of existing procedures, which are often complex and difficult to access. These models open new perspectives for the adoption of shared and updatable standards over time, improving accessibility without compromising analytical robustness. On the other hand, the research developed a complementary procedure that translates complex values into a market perspective, providing a practical tool with significant decision-making potential.

Methodological reflections, together with the applied results obtained, made it possible to outline a comprehensive set of operational recommendations potentially addressable to local administrations in view of a more conscious and integrated management of the territory. A first field of intervention concerns the establishment of a structured system for the collection and updating of territorial data, considered a preliminary condition to ensure effective monitoring of the evolution of ESs and to guide urban strategies based on empirically founded logics. In this perspective, the preparation of shared databases, structured on GIS platforms and enriched with regularly updated indicators, can ensure a true knowledge infrastructure supporting local governance. A second strategic area could be traced back to the systematic inclusion of ESs valuation in territorial planning and urban design processes. The use of outputs generated by evaluative models such as Simulsoil, InVEST, or our simplified and GIS-integrable models would make it possible to critically analyse alternative land transformation scenarios, highlighting the environmental, ecological, and economic implications related to each intervention hypothesis. Once integrated into decision-making processes, these tools would assume a crucial role in technically supporting the justification of locational choices, steering them towards solutions capable of maximizing the production of ecosystem benefits while containing the negative externalities from anthropic pressure. At the same time, it would be appropriate to define a structured framework of target indicators designed to guide urban policies and evaluate their effectiveness in the medium-long term. Such indicators would concern, for example, the minimum provision of accessible green spaces within certain time thresholds, the carbon sequestration capacity per capita, or the progressive reduction of impermeable surface areas. Their anchoring to economic metrics would allow for a tangible valuation, translatable in terms of energy savings, promotion of public health, and strengthening urban attractiveness and competitiveness. Additionally, they could be integrated into an active participation and public communication, fundamental aspects in the construction of transparent and inclusive decision-making processes. The structured inclusion of local stakeholders and citizens, through formalized deliberative pathways and the adoption of cartographic and visual representation tools, would make the benefits deriving from the presence and enhancement of ESs more immediately understandable. These participatory practices would significantly contribute to strengthening the democratic legitimacy of urban planning choices and promoting a broader social sharing of the strategic objectives connected to urban transformation.

Based on the evidence discussed above, and considering the results emerging from the previous phases of the work, it is appropriate to identify some strategic orientations for the continuation of

activities of the present work. Surely the application of the proposed methodology to other urban contexts is vital to verify its appropriateness and replicability: ESs assessments are based on territorial data whose quality and coherence substantially influence the accuracy and replicability of the models. In this context, land use and land cover mapping constitute an essential element in modelling, but they present significant methodological limitations. Among these, heterogeneity in land classification systems represents a major obstacle, as it compromises consistency in land use class attribution and hinders data integration across different territorial scales. This heterogeneity reduces comparability between datasets from different sources, undermining the overall reliability of analyses. This fragmentation of classification adds to further critical issues such as often inadequate spatial resolution and non-systematic update frequency, with negative effects on the models' ability to capture temporal dynamics of land cover and consequently on the accuracy of ecosystem valuations. As already highlighted, the project is configured as a experimental initiative, requiring further thematic investigations and integration of more specific data capable of adequately reflecting the peculiarities of different urban contexts. Such knowledge developments are essential to consolidate the results achieved so far, while strengthening methodological coherence and the overall reliability of the analysis. At the same time, future efforts must be oriented toward defining simplified calculation methodologies applicable to a larger number of ESs.

Acknowledgements

The article is the result of research conducted during the curricular internship period at the Interdepartmental Department of Sciences, Design and Territorial Policies (DIST) of the Politecnico di Torino, under the supervision of Professor Bottero and Dr. Caprioli.

Authors' contributions

The work was equally contributed by all authors.

Bibliography

- Agenzia Europea dell'Ambiente. (2023, 16 novembre). Le ondate di calore e altri fenomeni estremi legati al clima minacciano la salute, soprattutto delle persone più vulnerabili. Retrieved August 23, 2025, from <https://www.eea.europa.eu/it/segnali/segnali-2023/articoli/le-ondate-di-calore-e>
- Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale. (2025). *Banca dati storica*. https://www.arpa.piemonte.it/rischi_naturali/snippets_arpa_graphs/map_meteoweb/?rete=stazione_meteorologica
- Alongi F. (2020). *I Servizi Ecosistemici come fattori strutturanti per la città contemporanea* [Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino]. <https://webthesis.biblio.polito.it/13562/>
- Assennato F. (2018). *Il suolo conteso: potenzialità e limiti della valutazione dei servizi ecosistemici nella pianificazione locale* [Tesi di Dottorato, Università di Roma La Sapienza]. <https://tesidottorato.depositolegale.it/handle/20.500.14242/98186>
- Assumma V. & De Luca C. (2024). Valutazione del valore dei paesaggi culturali attraverso l'integrazione di valutazione biofisica-economica, valutazione del rischio e analisi costi-benefici. In O. Gervasi B. Murgante C. Garau D. Taniar A. M. A. C. Rocha & M. N. Faginas Lago (Eds.), *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2024 Workshops* (Lecture Notes in Computer Science, vol. 14822, pp. 78–93). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-65318-6_6
- Bagstad K.J., Semmens D.J., Waage S. & Winthrop R. (2013). A comparative assessment of decision-support tools for ecosystem services quantification and valuation. *Ecosystem Services*, 5. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.07.004>
- Birch J.C., Thapa I., Balmford A., Bradbury R.B., Brown C., Butchart S.H.M., Gurung H., Hughes F.M.R., Mulligan M., Pandeya B., Peh K.S.-H., Stattersfield A.J., Walpole M. & Thomas D.H.L. (2014). What benefits do community forests provide, and to whom? A rapid assessment of ecosystem services from a Himalayan forest, Nepal. *Ecosystem Services*, 8, 118–127. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.03.005>

- BirdLife International (n.a.). *Assessing ecosystem services – TESSA*. Retrieved August 23, 2025, from <https://birdlife-hatch.org/topics/30877/page/assessing-ecosystem-services-tessa>
- Blair J., Roldan C., Ghosh S. & Yung S.-H. (2017). Greening rail infrastructure for carbon benefits. *Procedia Engineering*, 80, 1716-1724. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.334>
- Boumans R., Roman J., Altman I. & Kaufman L. (2015). The Multiscale Integrated Model of Ecosystem Services (MIMES): Simulating the interactions of coupled human and natural systems. *Ecosystem Services*, 12, 30-41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.01.004>
- Cafagno M. & Cavalieri G. (Cur.). (2025). *Servizi ecosistemici e tutela giuridica dell'ambiente*. MIMESIS edizioni.
- Caprioli C., Bottero M., Zanetta E. & Mondini G. (2021). Ecosystem services in land-use planning: An application for assessing transformation scenarios at the local scale. In C. Bevilacqua F. Calabrò & L. Della Spina (Eds.), *New Metropolitan Perspectives. NMP 2020. Smart Innovation, Systems and Technologies* (Vol. 178, pp. 1332-1341). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48279-4_124
- Caprioli C., Dell'Anna F. & Fiermonte F. (2023). Renewable energy sources and ecosystem services: Measuring the impacts of ground-mounted photovoltaic panels. In O. Gervasi B., Murgante C., Garau D., Taniar A.M., A.C. Rocha & M.N. Faginas Lago (Eds.), *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2023 Workshops* (Lecture Notes in Computer Science, vol. 14108, pp. 393-406). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37117-2_29
- Castro A., García-Llorente M., Martín-López B., Palomo I. & Iniesta-Arandia I. Multidimensional approaches in ecosystem service assessment. In D. Alcaraz-Segura C. D. Di Biella & J. V. Straschnoy (Eds.), *Earth Observation of Ecosystem Services* (pp. 427-454). CRC Press.
- Christie M., Fazey I., Cooper R., Hyde T. & Kenter J.O. (2012). An evaluation of monetary and non-monetary techniques for assessing the importance of biodiversity and ecosystem services to people in countries with developing economies. *Ecological Economics*, 83, 67-78. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.08.012>
- Chung J., Kim J. & Sung K. (2024). Analysis of Heat Mitigation Capacity in a Coastal City using InVEST Urban Cooling Model. *Sustainable Cities and Society*, 113. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105669>
- Città di Cuneo. (2023). *Piano di azione per l'energia sostenibile e il clima (PAESC)*. http://www.cclimatt.eu/fileadmin/cclimatt/contents/file/PAESC_COMPLETO.pdf
- Città Metropolitana di Torino. (2018). *Simulsoil: Guida pratica* [Manuale tecnico]. Progetto LIFE SAM4CP. <http://www.cittametropolitana.torino.it/cms/fauna-flora-parchi/parchi-aree-protette/progetti-ed-interventi/life-sam4cp>
- Comitato per il Capitale Naturale. (2017). *Primo rapporto sullo stato del capitale naturale in Italia*. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare. Retrieved August 23, 2025, from <https://www.mase.gov.it/pagina/primo-rapporto-sullo-stato-del-capitale-naturale-italia-2017>
- Comune di Cuneo. (1946). *Piano regolatore generale comunale e di ampliamento – Relazione illustrativa (Allegato A)*. Comune di Cuneo.
- Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria. (2020). *Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio – Metodi e risultati della terza indagine (INFC 2015)*. <https://www.inventarioforestale.org>
- Costanza R. & Folke C. (1997). Valuing ecosystem services with efficiency, fairness, and sustainability as goals. In G. C. Daily (Ed.), *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems* (pp. 49-64). Island Press.
- Costanza R., D'Arge R. de Groot R.S., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V., 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, 253-260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Daily G.C. (Ed.) (1997). *Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems*. Island Press.
- De Groot R.S., Wilson M.A. & Boumans R.M.J. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41(3), 393-408. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00089-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00089-7)
- Delpy F., Pedersen Zari M., Jackson B., Benavidez R. & Westend (2021). Ecosystem Services Assessment Tools for Regenerative Urban Design in Oceania. *Sustainability*, 13. <https://doi.org/10.3390/su13052825>

- De Valck J., Beames A., Liekens I., Bettens M., Seuntjens P. & Broekx (2019). Valuing urban ecosystem services in sustainable brownfield redevelopment. *Ecosystem Services*, 35, 139-149. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.12.006>
- Di Cosmo L., Gasparini P. & Tabacchi G. (2016). A national-scale, stand-level model to predict total above-ground tree biomass from growing stock volume. *Forest Ecology Management*, 361, 269-276. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2015.11.008>
- Ding H. & Shi W. (2013). Land-use/land-cover change and its influence on surface temperature: a case study in Beijing City. *International Journal of Remote Sensing*, 34, 5503-5517. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2013.792966>
- Engel S., Pagiola S. & Wunder S. (2008). Designing payments for environmental services in theory and practice: An overview of the issues. *Ecological Economics*, 65, 663-674. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.03.011>
- European Commission Joint Research Centre. (2020). *Mapping and assessment of ecosystems and their services: An EU ecosystem assessment*. Publications Office of the European Union.
- Floris M. (2020). *I servizi ecosistemici nella pianificazione spaziale come strumenti interpretativi per la definizione di tassonomie territoriali innovative* [Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Cagliari]. <https://iris.unica.it/handle/11584/290552>
- Gasparini P., Di Cosmo L., Floris A. & De Laurentis (Eds.) (2022). *Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio – Metodi e Risultati della Terza Indagine*. Springer.
- Gómez-Baggethun E., de Groot R., Lomas P.L. & Montes C. (2009). The history of ecosystem services in economic theory and practice: From early notions to markets and payment schemes. *Ecological Economics*.
- Gómez-Baggethun E., Martín-López B., García-Llorente M. & Montes C. (2009). *Hidden values in ecosystem services. A comparative analysis of preferences outcomes obtained with monetary and non-monetary valuation methods* [Relazione a convegno]. DIVERSITAS Open Science Conference 2: Biodiversity and Society – Understanding Connections, Adapting to Change, Cape Town, South Africa.
- Gómez-Baggethun E. & Barton D.N. (2013). Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecological Economics*, 86, 235-245. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.08.019>
- Hagemann S. (2002). *An improved land surface parameter dataset for global and regional climate models* [Dataset]. Max Planck Institute for Meteorology. <https://doi.org/10.17617/2.2344576>
- Hamel P., Bosch M., Tardieu L., Lemonsu A., de Munck C., Nootenboom C., Viguié E., Lonsdorf E. Douglass J.A. & Sharp R.S. (2023). Calibrating and validating the InVEST urban cooling model: Case studies in France and the United States. *EGUsphere* [Preprint]. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-928>
- Iovino G. (2015) L'Italia consumata. Configurazioni e tendenze del land take. *Bollettino della Società Geografica Italiana*, 4, 491-514.
- Istituto Nazionale di Statistica. (2025). *Popolazione residente al 1° gennaio – Anno 2025*. Retrieved August 23, 2025, from <https://www.istat.it/>
- Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. (2024). *BIGBANG 8.0: Bilancio idrologico nazionale* [Dataset]. ISPRA. https://www.isprambiente.gov.it/pre_meteo/idro/BIGBANG_ISPRA.html
- Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. (2024). *Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici*. <https://www.snpambiente.it/temi/soilo/consumo-di-suolo-dinamiche-territoriali-e-servizi-ecosistemici-edizione-2024/>
- Kim G., Miller P.A. & Nowak D.J. (2018). Urban vacant land typology: A tool for managing urban vacant land. *Sustainable Cities and Society*, 36, 144-156. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2017.09.014>
- Lasserre B., Tognetti R. & Marchetti M. (2006). Problematiche di inventariazione del carbonio nella biomassa forestale ipogea. *Forest*, 3 (4), 542-554. <https://doi.org/10.3832/efor0415-0030542>
- Liekens I., Broekx S., Smeets N., Van der Biest K., Schaafsma M., De Nocker L., Meire P. & Cerulus T. (2013). The Ecosystem Services Valuation Tool and its Future Developments. In J. Sander N. Dendoncker & Keune H. (Eds.), *Ecosystem Services: Global Issues Practices* (pp. 249-262). Elsevier.
- Maebe L., Claessens H. & Dufrêne (2019). The critical role of abiotic factors and human activities in

- the supply of ecosystem services in the ES matrix. *One Ecosystem* 4:e34769. <https://doi.org/10.3897/oneeco.4.e34769>
- Marchetti M., Bertani R., Corona P. & Valentini R. (2012). Cambiamenti di copertura forestale e dell'uso del suolo nell'inventario dell'uso delle terre in Italia. *Forest*, 9 (1), 170-184. <https://doi.org/10.3832/efor0696-009>
- Marino D. (2020). Commodification o giustizia ambientale? I PES come strumento di governance del valore della natura. In D. Poli (Ed.), *I servizi ecosistemici nella pianificazione bioregionale* (pp. 87-96). Firenze University Press.
- Marion B. (2021). Measured and satellite-derived albedo data for estimating bifacial photovoltaic system performance. *Solar Energy*, 215, 321-327. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.12.050>
- Martino S. & Muenzel, D (2018). The economic value of high nature value farming and the importance of the Common Agricultural Policy in sustaining income: The case study of the Natura 2000 Zarandul de Est (Romania). *Journal of Rural Studies*, 60, 176-187. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2018.04.002>
- Masiero M., Amato G., Laghetto G., Murgese D., Perino M., Allocco M. & Cimini M. (2020). *Servizio di valutazione dei servizi ecosistemici nel territorio di Torino* [Rapporto Tecnico]. Etifor Srl & SEAcop. Comune di Torino. https://servizi.comune.torino.it/consiglio/prg/documenti1/atti/allegati/202002957_1_3.pdf
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: biodiversity synthesis*. World Resources Institute.
- Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. (2025, 5 maggio). *Capitale naturale e servizi ecosistemici*. Retrieved August 23, 2025, from <https://www.mase.gov.it/pagina/capitale-naturale-e-servizi-ecosistemici>
- Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. (2011). *IUTI – Inventario dell'uso delle terre d'Italia* [Dataset]. Geoportale nazionale. https://www.pcn.minambiente.it/geoportal/catalog/search/resource/details.page?uuid=m_amte%3A299FN3%3A0f4393f6-d2d7-484c-9290-32058182bf1a
- Muradian R., Corbera E., Pascual U., Kosoy N. & May P.H. (2010). Reconciling theory and practice: An alternative conceptual framework for understanding payments for environmental services. *Ecological Economics*, 69, pp. 1202-1208. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.11.006>
- Natural Capital Project. (2025). *INVEST user guide* (versione 3.16.1) [Manuale online]. Stanford University, University of Minnesota, Chinese Academy of Sciences, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund, Stockholm Resilience Centre & Royal Swedish Academy of Sciences. <https://storage.googleapis.com/releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/en/index.html>
- Natural England (2013). *Green Infrastructure – Valuation Tools Assessment (NECR126, ed. 1)*. Natural England.
- Oppio A., Caprioli C., Dell'Ovo M. & Bottero M. (2024). Assessing ecosystem services through a multimethodological approach based on multicriteria analysis and cost-benefits analysis: A case study in Turin (Italy). *Journal of Cleaner Production*, 472. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143472>
- Oppio A., Datola G., Oksuz T., Ozgur D. & Sdino L. (2024). Innovating urban systems through nature-based solutions for a circular economy enhancement: A general framework. In O. Gervasi B. Murgante C. Garau D. Taniar A. M. A. C. Rocha & M. N. Faginas Lago (Eds.), *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2024 Workshops* (Lecture Notes in Computer Science, vol. 14822, pp. 176-188). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-65308-7_13
- Oppio A., Dell'Ovo M., Caprioli C., Bottero M. & Datola G. (2023). Valutare i benefici dei servizi ecosistemici urbani: una proposta metodologica. *Laborest*, 26, 66-71. <https://doi.org/10.19254/LaborEst.26.10>
- Pagiola S. (2008). Payments for environmental services in Costa Rica. *Ecological Economics*, 65, 712-724. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.07.033>
- Pandit R. & Laband D.N. (2010). Energy savings from tree shade. *Ecological Economics*, 69, 1324-1329. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.01.009>
- Peh K.S.-H., Balmford A., Bradbury R.B., Brown C., Butchart S.H.M., Hughes, Stattersfield A., Thomas

- D. H. L., Walpole M., Bayless J., Gowing D., Jones J. P. G., Lewis S. L., Mulligan M., Pandeya B., Stratford C., Thompson J.R., Turner K., Willcock S. & Birch J.C. (2013). TESSA: a toolkit for rapid assessment of ecosystem services at sites of biodiversity conservation importance. *Ecosystem Services*, 5, 51-57. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.06.003>
- Pillari G. (2018). *La valutazione dei Servizi Ecosistemici forestali. Metodo e orientamenti per la pianificazione territoriale attraverso il caso studio della Valle Tanaro* [Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino]. <https://webthesis.biblio.polito.it/7817/>
- Poli D. (Ed.). (2020). *I servizi ecosistemici nella pianificazione bioregionale*. Firenze University Press.
- Qiao Z., Tian G. & Xiao L. (2013). Diurnal and seasonal impacts of urbanization on the urban thermal environment: A case study of Beijing using MODIS data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 85, 93-101. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.08.010>
- Rees W.E. (2018). Planning in the anthropocene. In M. Gunder A. Madanipour & V. Watson (Eds.), *The Routledge Handbook of Planning Theory* (pp. 53-66). Routledge.
- Rischia I., Di Leginio M., Fumanti F., Giandon P., Obber S. & Vinci I. (2010). Environmental indicators for Italian soils (SIAS project): Development of a new approach from regional to harmonised national data. *Italian Journal of Agronomy*, 5(s3), 103-110. <https://doi.org/10.4081/ija.2010.s3.103>
- Ronchi S., Salata S. & Arcidiacono A. (2020). Which urban design parameters provide climate-proof cities? An application of the Urban Cooling InVEST Model in the city of Milan comparing historical planning morphologies. *Sustainable Cities and Society*, 63. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102459>
- Quintano P.N. & Barredo J.I. (2015). *A database of the recreational value of European forests*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2788/142071>
- Sallustio L. (2014). *Monitoraggio dei cambiamenti d'uso del suolo e degli effetti sugli ecosistemi e sul paesaggio italiano* [Tesi di Dottorato, Università degli Studi del Molise].
- Sallustio L., Quatrini V., Geneletti D., Corona P. & Marchetti M. (2015). Assessing land take by urban development and its impact on carbon storage: Findings from two case studies in Italy. *Environmental Impact Assessment Review*, 54, 80-90. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.05.006>
- Santamouris M. (2014). Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 103, 682-703. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>
- Schägnier J.P., Brander L., Maes J., Paracchini M.L., Hartje V. (2016). Mapping recreational visits and values of European national parks by combining statistical modelling and unit value transfer. *Journal for Nature Conservation*, 31, 71-84.
- Schirone M. (2020). Ecosistemi, boschi e servizi ecosistemici. In D. Poli (Ed.), *I servizi ecosistemici nella pianificazione bioregionale* (pp. 65-85). Firenze University Press.
- Serra C. (2025). PES e accordi amministrativi. In M. Cafagno & G. Cavaliere (Cur.), *Servizi Ecosistemici e tutela giuridica dell'ambiente* (pp. 93-123). Mimesis Edizioni.
- Sherrouse B.C., Clement J.M. & Semmens D.J. (2011). A GIS application for assessing, mapping, and quantifying the social values of ecosystem services. *Applied Geography*, 31, 748-760. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.08.002>
- Terrado M., Sabater S., Chaplin-Kramer B., Mandle L., Ziv G. & Acuña V. (2016). Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning. *Science of the Total Environment*, 540, 63-70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.064>
- The Economics of Ecosystems and Biodiversity. (2010). *Mainstreaming the economics of nature: A synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB*. <https://www.teebweb.org/publication/mainstreaming-the-economics-of-nature/>
- Van Oijstaeijen W., Van Passel S. & Cools J. (2020). Urban green infrastructure: A review on valuation toolkits from an urban planning perspective. *Journal of Environmental Management*, 267. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110603>
- Vatn A. (2010). An institutional analysis of payments for environmental services. *Ecological Economics*, 69, 1245-1252. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.11.018>
- Vesely F.M. (2016). *Analisi e mappatura dei Servizi Ecosistemici a scala locale: applicazione dei Modelli InVEST nel Parco Oglio Sud* [Tesi di Laurea Magistrale, Università degli Studi di Padova].

- <https://thesis.unipd.it/handle/20.500.12608/26231>
- Villa F., Ceroni M., Bagstad K., Johnson G. & Krivov S. (2009). ARIES (ARTificial Intelligence for Ecosystem Services): a new tool for ecosystem services assessment, planning, and valuation. *BioEcon*.
- Zawadzka J.E., Harris J.A. & Corstanje R. (2021). Assessment of heat mitigation capacity of urban greenspaces with the use of InVEST urban cooling model, verified with day-time land surface temperature data. *Landscape and Urban Planning*, 214. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104163>
- Zen M. (2022, 5 settembre). *Valutazione e mappatura dei servizi ecocistemici*. *Equilibri Magazine* Retrieved August 23, 2025, from <https://equilibrimagazine.it/scienza/2022/09/05/valutazione-e-mappatura-dei-servizi-ecosistemici/>



Bernardo Simonetti

DOWNLOAD
Normativa e
Fogli di calcolo

Acustica ambientale ed edilizia

Il Manuale del Tecnico Competente



Seconda Edizione

Aggiornata con

- UNI/TS 11844:2022
- DM Transizione ecologica
22 giugno 2022

- ✓ Requisiti del Tecnico
Competente in Acustica
(TCA)
- ✓ Acustica architettonica
- ✓ Acustica nei luoghi di
lavoro
- ✓ Acustica forense

dei
TIPOGRAFIA DEL GENIO CIVILE

www.build.it

dei
TIPOGRAFIA DEL GENIO CIVILE

Metriche e strumenti per la valutazione integrata e multiscala dei Servizi Ecosistemici in ambito urbano

Piergiorgio Farfariello¹, Marta Carla Bottero¹, Caterina Caprioli^{1,*}

¹ Dipartimento Interateneo di Scienze, Progetto e Politiche del Territorio (DIST), Politecnico di Torino, Viale Pier Andrea Mattioli 39, 10125 Torino, Italia; piergiorgio.farfariello@polito.it; marta.bottero@polito.it; caterina.caprioli@polito.it

* autore corrispondente

Parole chiave

consumo di suolo,
pressione antropica,
biodiversità, Servizi
Ecosistemici,
valutazione economica e
biofisica,
tool esistenti,
ottimizzazione

Abstract

Gli attuali sistemi urbani, sollecitati da crisi di svariato tipo (demografiche, socio-economiche, ecologico-ambientali), sono caratterizzati da una fragilità che potremmo definire di tipo: fisico, sociale e spaziale. Questa fragilità si manifesta nella precarietà tra la componente insediativa infrastrutturale, o, più genericamente, il sistema antropico e la componente naturale-ambientale, e conseguentemente nelle relazioni e interazioni che, tra di esse, intercorrono. In particolare, la realizzazione di molti piani e progetti di trasformazione urbana ha, nei fatti, comportato la progressiva perdita di suolo naturale. Quest'ultimo, a sua volta, si trova sempre più esposto a pressioni e vulnerabilità sistemiche, quali effetto diretto dell'intervento dell'uomo e del cambiamento climatico ad esso connesso. Per rispondere a queste problematiche, il concetto di "servizio ecosistemico" continua ad essere estremamente attuale, per la tutela degli ecosistemi e della biodiversità, fondamentali, tra gli altri, per il benessere e la qualità della vita dell'uomo. Al contempo, la valutazione dei Servizi Ecosistemici (SE) risulta ancora sfidante nella sua dimensione multiscalar e multidimensionale (ecologico-biofisica, sociale-culturale ed economica). In questo contesto, il contributo sperimenta l'applicazione di diversi tool di valutazione dei Servizi Ecosistemici, sia nazionali sia internazionali, al fine di testare la loro capacità (o meno) di agire alle diverse scale e di combinare queste diverse dimensioni del valore per la valutazione di tutte le categorie di SE (supporto, regolazione, approvvigionamento e culturali). I risultati ottenuti rappresentano una base critica per definire le metriche più efficaci ed efficienti nella valutazione dei SE, nonché un supporto alle municipalità nella raccolta, aggiornamento e mappatura dei dati rilevanti.

1. Introduzione

A partire dalla seconda metà del secolo precedente, l'essere umano ha apportato alterazioni agli ecosistemi con un'entità mai vista prima. Lo sfruttamento eccessivo delle risorse idriche (ad esempio, per il prelievo di acqua dolce), l'uso intensivo del suolo a fini agricoli e l'impiego di prodotti fitosanitari, l'inquinamento e l'impermeabilizzazione, il conseguente cambiamento climatico sono solo alcuni dei fattori che hanno contribuito a ridurre la diversità biologica sulla Terra (Millennium Ecosystem Assessment, 2005; CCN, 2017; Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem services, 2018; Mapping and Assessment of Ecosystem Services; 2020),

indebolendo gli ecosistemi e compromettendo, di conseguenza, la fornitura dei Servizi Ecosistemici (SE) (Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, 2025).

L'espressione di SE, introdotta in modo pionieristico da Ehrlich e Ehrlich agli inizi degli anni '80, ha acquisito un'importanza rilevante nel dibattito pubblico a seguito del proliferare della bibliografia sul tema a valle dei lavori di diffusione scientifica ad opera di Costanza et al. (1997) e Daily (1997), prima, e alla pubblicazione, nel 2005, del *Millennium Ecosystem Assessment*, poi. Tutte le interpretazioni fornite dallo stesso Costanza, da De Groot et al. (2002), dal *The Economics of Ecosystems & Biodiversity* (2010), e a livello nazionale, dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA, 2010) e dal Comitato per il Capitale Naturale (CCN, 2017), seppur con qualche lieve differenza, tentano di chiarire il legame di interdipendenza che intercorre tra il benessere e la salute degli esseri umani e la natura stessa. È possibile definire i SE, in estrema sintesi, come i benefici ottenuti dagli esseri umani ed erogati dagli ecosistemi o, ancora, come il contributo diretto e indiretto del Capitale Naturale al benessere e alle necessità umane. Il Capitale Naturale, quale *stock* di risorse naturali, al pari del capitale umano, sociale, manifatturiero e finanziario, concorre a definire il grado di ricchezza ed i livelli di sviluppo di una Nazione (CCN, 2017). A differenza degli altri, il Capitale Naturale è caratterizzato da condizioni generalizzate di insostituibilità e finitezza (Costanza et al., 1997; CCN, 2017), poiché gli elementi che concorrono alla sua costituzione e definizione (aria, acqua, suolo, biodiversità, ecc.) sono unici, non riproducibili o surrogabili da costruzioni o manipolazioni di matrice antropica (Schirone, 2020). È possibile individuare, già da queste prime considerazioni, la forte relazione che lega benessere economico ed umano alle condizioni in cui versano, in un dato momento e periodo, risorse naturali ed ecosistemi (Oppio et al., 2023). In tale contesto, il concetto di SE, in quanto capace di descrivere le relazioni tra natura ed economia (TEEB, 2010), si configura come paradigma interpretativo efficace e supporto utile al ripensamento del tradizionale progetto urbanistico e territoriale. Un approccio valutativo basato sui SE è in grado di restituire, in via preventiva, stime inerenti agli effetti ambientali ed alle variazioni biofisiche (ed ai relativi costi associati) derivanti dai processi di trasformazione d'uso dei suoli. I valori attribuibili ai SE appartengono a diversi domini tematici e interessano le scienze ecologiche, economiche e socio-culturali; tale complessità, derivante dall'ampio novero di elementi di cui tener conto, denota una serie di complicazioni nella predisposizione di metodologie in grado di catturare e misurare tutti i valori prima definiti (Caprioli et al., 2021). L'esercizio volto al calcolo e alla quantificazione delle dotazioni ecosistemiche, seppur connotato da notevoli difficoltà strumentali e tecniche, è cruciale per lo sviluppo di città sempre più resilienti, in grado di far fronte ai cambiamenti climatici, di garantire i livelli essenziali di tutela della biodiversità e di introiettare le prospettive di sviluppo entro canoni sostenibili (Fagarazzi & Fanfani, 2012; Magnaghi & Sala, 2013; Poli, 2020).

Il fine ultimo del presente contributo è quello di restituire gli esiti derivanti dalle sperimentazioni e dalle implementazioni degli strumenti in grado di supportare le pratiche di pianificazione urbana. In particolare, il lavoro parte da un'analisi delle nozioni teoriche presenti in letteratura e sperimenta metodi consolidati, a diversi livelli e scale, sia nazionali sia internazionali, in particolare applicando ad un caso studio i *tool* Simulsoil e InVEST, secondo le indicazioni previste dai manuali d'uso dei due diversi programmi (Città Metropolitana di Torino, 2018; Natural Capital Project, 2025). L'applicazione di questi *tool* ha orientato la definizione di metodologie di calcolo semplificate e complementari per la valutazione dei SE, che costituiscono il nucleo centrale del presente elaborato e l'aspetto innovativo della ricerca.

Dopo questa introduzione, il Capitolo 2 presenta una rassegna di *tool* attualmente disponibili per la quantificazione biofisica ed economica dei Servizi Ecosistemici (SE). Nel Capitolo 3 viene descritto l'approccio metodologico adottato per la valutazione di specifici SE, mentre il Capitolo 4 introduce un caso studio esemplificativo selezionato al fine di applicare concretamente la metodologia proposta. Il Capitolo 5 è dedicato all'illustrazione dell'applicazione operativa dei diversi strumenti, ai risultati ottenuti e agli esiti derivanti da tali analisi. Infine, il Capitolo 6 riporta alcune considerazioni conclusive e future prospettive di ricerca (Capitolo 6).

2. Valutazione dei SE e i tool esistenti

L'approccio valutativo basato sui SE è caratterizzato da un elevato grado di complessità; quest'ultimo è definito dalla correlazione di più elementi afferenti ad aree tematiche differenti. La disciplina valutativa ha la possibilità di fornire un insieme di strumenti e metodologie atte a sostenere una visione orientata al "pluralismo di valori" (Gómez-Baggethun & Barton, 2013; Caprioli et al., 2021). La predisposizione di modelli utili, il cui impatto possa contribuire in maniera tangibile a rendere maggiormente trasparente e consapevole il processo decisionale attinente alle trasformazioni urbanistico-territoriali, deve garantire il rilevamento e la valutazione dei diversi valori (ecologici e biofisici, economici, sociali e culturali) dei SE.

Attualmente, sono stati sviluppati una serie di *software open source* (Tabella 1) in grado di mappare e quantificare le dotazioni biofisiche ed il relativo valore economico, restituendo simulazioni spaziali capaci di riportare dati utili a definire la convenienza (o no) dei possibili interventi di trasformazione urbana e delle loro eventuali ricadute sull'ecosistema. Gli articoli di Bagstad et al. (2013) e di Peh et al. (2013) forniscono ulteriori categorizzazioni funzionali e sintesi comparative di alcuni di questi *tool*, basate essenzialmente sul numero di casi studio esistenti ed esaminati, sul grado di affidabilità e di flessibilità dello strumento (legata alla necessità di adattarsi a diversi contesti geografici), sui tempi di restituzione dei risultati e sulla sostenibilità economica dell'applicazione.

Tabella 1. Schematizzazione dei *tool* in grado di restituire quantificazioni biofisiche ed economiche dei SE

<i>Tool</i>	Riferimenti bibliografici	Ente o istituzione responsabile dello sviluppo	Descrizione
ARIES	Villa et al. (2009)	University of Vermont	La metodologia, tramite modelli ecologici, individua origine (" <i>source</i> "), fruitori (" <i>users</i> ") e ostacoli (" <i>sink</i> ") al flusso dei SE, quantificandone l'effettiva erogazione. Inoltre, permette di simulare scenari e valutare gli impatti antropici sulla biodiversità
EcoPLAN-SE	Maebe et al. (2019)	University of Antwerp	Questo <i>plug-in</i> per QGIS consente di confrontare scenari di uso del suolo e gestione del territorio, simulando le interazioni tra 18 SE (4 di produzione, 8 di regolazione, 3 di supporto e 3 culturali) e fornendo dati quantitativi e spaziali in unità fisiche
i-Tree ECO	Blair et al. (2017) Kim et al. (2018) Ozdemiroglu et al. (2013)	United States Department of Agriculture Forest Service	i-Tree ECO stima la struttura forestale, i SE ed i valori associati a popolazioni arboree, utilizzando dati di campionamento o inventariali. Tra le funzioni avanzate, offre proiezioni sull'evoluzione della vegetazione, considerando copertura, biodiversità e servizi forniti da ciascuna specie
LUCI	Robinson et al. (2013) Trodahl et al. (2017)	-	LUCI, estensione GIS del <i>framework Polyscape</i> , è un modello flessibile ed efficiente che consente di sviluppare simulazioni in tempo reale per supportare decisioni partecipative. Applicabile dal sito locale al bacino idrografico, analizza gli impatti dei cambiamenti d'uso del suolo sui SE, integrando sotto-modelli per valutarne interazioni e <i>trade-off</i>
MIMES	Boumans & Costanza (2007) Boumans et al. (2015)	Gund Institute for Ecological Economics University of Vermont	MIMES è un sistema integrato e dinamico di modelli multi-scala (globale, regionale, locale) che quantifica riserve e flussi di SE attraverso rappresentazioni adattabili ai contesti specifici. Include strumenti per stimare il valore reale dei SE e supportare scenari di sviluppo sostenibile rivolti agli <i>stakeholder</i>

Segue Tabella 1. Schematizzazione dei *tool* in grado di restituire quantificazioni biofisiche ed economiche dei SE

<i>Tool</i>	Riferimenti bibliografici	Ente o istituzione responsabile dello sviluppo	Descrizione
NVE	De Valck et al. (2018) Liekens et al. (2013)	Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO)	Questa <i>web app</i> , sviluppata per la regione delle Fiandre (Belgio), supporta la Valutazione di Impatto Ambientale quantificando l'effetto di progetti urbani sui SE. Fornisce risultati qualitativi, biofisici e monetari, traducendoli in indicatori chiari e utili per decisioni e comunicazione pubblica
TESSA (versione 3.0)	Birch et al. (2014) Liu et al. (2017) Martino & Muenzel (2018)	Anglia Ruskin University BirdLife International Royal Society for the Protection of Birds (RSPB) Tropical Biology AssociationUnited Nations Environment Programme – World Conservation Monitoring Centre (UNEP-WCMC) University of Cambridge University of Southampton	Questo strumento è destinato a utenti non specialisti e fornisce semplici quadri operativi per guidare la selezione dei metodi più adatti al contesto locale, quali indagini, interviste e dati pubblici. Consente una valutazione biofisica senza ricorrere alla mappatura e supporta la stima economica comparativa dei SE terrestri, tra cui Sequestro e Stoccaggio di carbonio, Impollinazione, Valori Ricreativi e Culturali, Agricoltura, Prodotti Forestali, Acqua e Controllo delle Inondazioni

Al di là dei *tool* esistenti, è importante sottolineare come tutte le categorie di SE concorrono, con apporti diversificati, alla definizione dello stato di benessere degli esseri umani e si caratterizzano per l'attribuzione, come già menzionato, di valori eterogenei: biofisici, attinenti alle funzioni ecologiche degli ecosistemi; culturali, comprendenti tutti gli aspetti propri della sfera psico-fisica e sensoriale dell'uomo (riconducibili all'affettività, alla simbolicità ed all'estetica dei luoghi); ed economici, spesso convenienti per la loro efficacia comunicativa, capaci di rendere esplicito il ruolo cruciale della natura come fondamento delle strutture sociali e dei sistemi produttivi (Serra, 2025). Sebbene gli aspetti ecologici ed economici presentino tecniche valutative più semplici e diversificate, come anche dimostrato dalla diffusione di molteplici *tool*, gli attributi sociali o culturali sono caratterizzati da notevoli difficoltà circa la loro determinazione, poiché di matrice fortemente qualitativa. Tale condizione è determinata dalla facilità (o difficoltà) e dalla possibilità (o meno) di scambiare, all'interno delle logiche di mercato, tali servizi mediante prezzi ben definiti (CCN, 2017). A ulteriore conferma dell'argomentazione, è possibile asserire che i servizi culturali sono difficilmente quantificabili poiché non possono essere adeguatamente catturati da metriche monetarie (Caprioli et al., 2021) indicative del loro valore sociale. Ne consegue che, sia nelle decisioni pubbliche sia private, queste dimensioni tendono ad essere sottostimate (CCN, 2017).

In questo contesto, la principale sfida per la disciplina valutativa risiede nella definizione di metodologie di calcolo capaci di cogliere l'essenza e rappresentare in modo adeguato le diverse dimensioni dei benefici offerti dagli ecosistemi. L'elaborazione di modelli di valutazione semplificati, inserita nel più ampio ambito dell'analisi dei SE, rappresenta, quindi, un'opportunità significativa per sviluppare stime affidabili e formulare valutazioni critiche sulla validità delle diverse opzioni progettuali. L'adozione di approcci semplificati potrebbe offrire alle amministrazioni locali, così come agli enti pubblici e privati attivi sul territorio, la possibilità di avvalersi di strumenti operativi accessibili, caratterizzati da un ridotto fabbisogno di competenze tecniche specialistiche. Ciò non esclude, tuttavia, la necessità di una solida comprensione teorica dei parametri e dei dati di riferimento, indispensabile per una corretta interpretazione dei risultati. Al contempo, una significativa riduzione dei tempi di esecuzione e dei costi associati contribuirebbe a incentivare la diffusione di buone pratiche nella valutazione biofisica ed economica dei SE.

3. Metodologia

Il presente lavoro prevede un confronto tra due *tool* esistenti, Simulsoil (Città Metropolitana di Torino, 2018) ed InVEST (Natural Capital Project, 2025). Il primo utilizzato a scala nazionale, ed, in particolare locale, in Regione Piemonte, mentre il secondo a livello internazionale.

In particolare, nella Sezione 3.1 e 3.2, i due *tool* esistenti vengono illustrati dettagliatamente da un punto di vista teorico-metodologico rispetto ai SE analizzati e confrontati. Nello specifico, viene descritto il processo di quantificazione biofisica ed economica degli 8 SE, così come previsto dal *tool* Simulsoil. Uno di questi SE, ovvero lo Stoccaggio e Sequestro di Carbonio, è oggetto di analisi e confronto con il *tool* presente su InVEST. Mediante InVEST viene anche sperimentato il processo di valutazione per il SE relativo al Raffrescamento Urbano, particolarmente significativo nel contesto urbano, ma mancante nel *tool* nazionale Simulsoil. In questo modo, il confronto tra i due *tool* e i diversi SE ha consentito di riflettere sull'elaborazione di modelli valutativi semplificati e complementari, in grado di coniugare l'affidabilità necessaria con un adeguato livello di semplificazione, così da offrire un supporto concreto ai processi di pianificazione urbana e territoriale.

3.1 Simulsoil

Simulsoil è un *tool* sviluppato all'interno del progetto europeo denominato “*Soil Administration Models 4 Community Profit*” – il cui acronimo è LIFE SAM4CP (Città metropolitana di Torino, 2018). Nato con l'intento di offrire un contributo utile, in termini di efficienza e adoperabilità, alla mappatura e valutazione dei SE (ISPRA, 2023), suddetto Simulatore “ottimizza” processi complessi di calcolo altrimenti disponibili ed offerti, in maniera distinta e separata, da InVEST.

Le ragioni alla base dello sviluppo di tale *tool* fanno riferimento alla necessità di snellire e facilitare le procedure di verifica, mediante analisi comparative tra scenari differenti e alternativi, degli impatti derivanti da possibili cambiamenti d'uso del suolo e delle eventuali ricadute sul Capitale Naturale, in una determinata porzione di territorio (sia essa un comune o parte di esso) (Caprioli et al., 2021).

Simulsoil, come riportato in Tabella 2, permette di valutare contemporaneamente otto tipologie di SE, ovvero: Stoccaggio di Carbonio (CS), Qualità degli Habitat (HQ), Disponibilità Idrica (WY), Trattenimento dei Nutrienti (NR), Trattenimento dei Sedimenti (SDR), Impollinazione delle colture (CPO), Produzione Agricola (CPR) e Produzione Legnosa (TP).

L'unico dato di *input* richiesto dal *software* consiste nella mappatura della copertura e dell'uso del suolo.

Il programma fornisce *output* in formato esplicitamente spaziale, mediante specifiche mappature per ogni tipologia di SE, e tabelle di sintesi comprendenti tutti i dati quantitativi dei valori biofisici ed economici di tutti gli scenari ipotetici considerati ed analizzati.

Risulta utile asserire, in tale contesto, che le elaborazioni prodotte da Simulsoil – a differenza di InVEST – si basano essenzialmente su *dataset* spaziali di *input*, elaborati e perfezionati nell'ambito del progetto di ricerca SAM4CP, forniti in allegato al *software*. Per tale motivo, suddetto *software* include al proprio interno un pacchetto predefinito di dati inerenti al consumo di suolo e la fase di ricerca di elementi informativi è limitata all'importazione di *dataset* personalizzati, in formato *shapefile*, conformi alla struttura tematica e alla legenda della *Land Cover* Piemonte (LCP). Una volta scaricati ed acquisiti tutti i dati inerenti alla copertura d'uso del suolo e convertito il relativo *file* vettoriale in *raster* (processo automatizzato dal *software*) è possibile procedere, attraverso comandi standardizzati, al calcolo dei SE, di cui vengono automaticamente fornite tutte le rappresentazioni spaziali. In estrema sintesi, lo strumento consente anche ad utenti privi di competenze specialistiche di interfacciarsi con analisi ecosistemiche e di realizzare simulazione che altrimenti implicherebbero una complessa elaborazione dei dati e l'impiego di strumenti e procedure GIS ad alto contenuto tecnico (Città Metropolitana di Torino, 2018.).

Tabella 2. Schematizzazione funzionale dei modelli presenti su Simulsoil.

Denominazione	u.m.	Valore biofisico	u.m. economica	Valore economico
Sequestro di Carbonio	ton	Il modello quantifica la capacità del suolo di immagazzinare e trattenere carbonio considerando quattro principali serbatoi naturali: biomassa epigea e ipogea, suolo e sostanza organica morta	€/t	Prezzo di mercato equivalente al valore delle sanzioni per compensare le emissioni di CO ₂ (Rif. Direttiva 2003/87/CE e s.m.i.) o dei crediti acquisiti per la riduzione delle emissioni stesse
Impollinazione	0-1	Il modello misura il <i>surplus</i> del valore legato alla produttività agricola garantito dalla presenza di specie impollinatrici	€/ha	Prezzo di mercato derivato dal grado di dipendenza delle coltivazioni dall'impollinazione (Gallai et al., 2009)
Qualità degli habitat	0-1	Il modello valuta i livelli di qualità degli <i>habitat</i> in termini di compatibilità delle specie con ciascuna classe di uso e copertura del suolo	€/m ²	Preferenza dichiarata dalla valutazione di contingenza tramite questionario finalizzata ad individuare le disponibilità a pagare (DAP) per la conservazione/valorizzazione delle aree naturali e seminaturali
Trattenimento dei nutrienti	ton	Il modello definisce la capacità di purificazione dell'acqua da parte dell'attuale, o futura, configurazione d'uso del suolo	€/kg	Costo di sostituzione per la costruzione di fasce tampone boscate funzionali al trattenimento dei nitrati
Trattenimento dei sedimenti	ton	Il modello stima la capacità dei diversi usi del suolo di prevenire l'erosione superficiale ed il trasporto di sedimenti nei corsi d'acqua	€/t	Costo evitato per il ripristino delle fertilità dei suoli funzionali alla protezione dell'erosione
Disponibilità idrica	l	Il modello individua e assegna valori più alti ai suoli maggiormente permeabili che contribuiscono a trattenere l'acqua e favorire la ricarica della falda	€/m ³	Costo di sostituzione per la rimozione "artificiale" dell'acqua: sommatoria dei costi per la costruzione di bacini idrografici di laminazione, scolmatori e fasce di espansione (Prezziario Piemonte N.d.)
Produzione agricola	€	Il modello utilizza la spazializzazione dei Valori Agricoli Medi (VAM) per valutare la produttività e la redditività assoluta degli ettari coltivati per ciascuna tipologia colturale	€/m ²	Prezzo di mercato delle differenti culture agricole derivato dalle tabelle del Valore Agricolo Medio in Piemonte
Produzione legnosa	€	Il modello utilizza la spazializzazione dei Valori Agricoli Medi (VAM) per valutare la produttività e la redditività assoluta delle aree destinate a fini produttivi forestali	€/m ²	Prezzo di mercato delle differenti culture agricole derivato dalle tabelle del Valore Agricolo Medio in Piemonte

3.2 InVEST

InVEST è un *software* volto ad indirizzare e veicolare le azioni e le decisioni sulla gestione sostenibile delle risorse naturali, analizzando ed approfondendo le possibili correlazioni che sussistono tra le variazioni interne agli ecosistemi stessi ed i benefici alle persone che ne derivano. Sviluppato dal *Natural Capital Project* della *Stanford University*, tale tecnologia *open source*, in costante ag-

giornamento, è costituita da un ampio ventaglio di modelli (attualmente 20¹) indipendenti e in grado di riportare attente e precise valutazioni biofisiche ed economiche relative ai benefici offerti dai sistemi terrestri, costieri e marini. Per il *tool* InVEST si è utilizzata la versione 3.16.1, rilasciata il 1° luglio 2025 e, come illustrato nella Tabella 3, l'analisi si concentra su due specifici SE: "Stoccaggio e Sequestro di Carbonio" e "Raffrescamento Urbano".

Oltre agli usi del suolo, come richiesto dal *tool* precedentemente illustrato (Simulsoil), InVEST richiede una serie di ulteriori variabili da considerare nella procedura di calcolo del SE relativo.

In particolare, per il SE "Stoccaggio e Sequestro di Carbonio", il *tool* prevede l'immissione di una tabella in grado di fornire i dati quantitativi sul carbonio stoccato per ciascuna categoria d'uso del suolo definita dalla classificazione LCP.

Il modello InVEST "Raffrescamento urbano" richiede, invece, un più ampio novero di dati di *input* (all'incirca 10 variabili da considerare), tra cui una tabella sintetica dei parametri biofisici (coltura, ombra, albedo, aree verdi e urbanizzate) per ciascuna destinazione LCP, la mappatura dei valori di evapotraspirazione di riferimento, la temperatura dell'aria in un'area rurale di riferimento priva dell'effetto isola di calore urbana e l'entità di tale effetto, calcolata come la differenza tra la temperatura urbana massima e quella rurale. A supporto dell'analisi economica di tale SE, inoltre, vengono utilizzati la mappatura delle impronte a terra dei fabbricati costruiti e i dati relativi ai consumi energetici ed ai costi ad essi associati, rapportati all'area di ingombro e differenziati per tipologia edilizia.

Tabella 3. Schematizzazione funzionale dei modelli di InVEST analizzati

Denominazione	u.m.	Valore biofisico	u.m. economica	Valore economico
Sequestro di Carbonio	ton	Il modello quantifica la capacità del suolo di immagazzinare e trattenere carbonio considerando quattro principali serbatoi naturali: biomassa epigea e ipogea, suolo e sostanza organica morta	€/t	Prezzo di mercato equivalente al costo che le imprese devono sostenere per ogni tonnellata di anidride carbonica equivalente emessa (CO ₂ e) nell'atmosfera
Raffrescamento Urbano	0-1	Il modello fornisce un indice di mitigazione del calore urbano basato su variabili microclimatiche e ambientali, considerando la presenza e la distribuzione del verde urbano	€/kWh	Costo evitato per il raffrescamento degli ambienti interni (aria condizionata)

3.3 Modelli semplificati e personalizzati

Sviluppate rispettivamente in ambiente QGIS e *Microsoft Excel*, e basate su modelli consolidati in letteratura, tali procedure di calcolo (tra loro indipendenti) costituiscono il nucleo centrale della presente ricerca. I dati di *input* utilizzati per il modello personalizzato "Stoccaggio e Sequestro di Carbonio" coincidono con quelli previsti dal modello InVEST, ovvero la mappatura della copertura e dell'uso del suolo (Figura 2), integrata da una tabella contenente i valori quantitativi di carbonio stoccato per ciascuna classe identificata dalla classificazione LCP.

¹ Accesso alla Natura in ambiente Urbano, Apporto di Nutrienti, Carbonio Blu Costiero, Effetto dei Margini Forestali sul Sequestro di Carbonio, Mitigazione del Rischio di Inondazioni Urbane, Modello di Vulnerabilità Costiera, Produzione Agricola, Produzione di Energia dalle Onde, Produzione di Energia Eolica *Offshore*, Qualità degli *Habitat*, Qualità Paesaggistica, Rendimento Idrico Stagionale, Ritenzione delle Acque Meteoriche Urbane, Stoccaggio e Sequestro di Carbonio, Raffrescamento Urbano, Rendimento Idrico Annuale, Trasporto dei Sedimenti, Valutazione del Rischio per gli *Habitat*, Visite: Ricreazione e Turismo (Natural Capital Project, 2025).

Per la procedura di calcolo finalizzata alla quantificazione del valore ricreativo delle aree naturali e seminaturali, oltre alla mappatura della copertura e dell'uso del suolo (Figura 2), si rendono necessari il modello tridimensionale della superficie topografica nuda, ottenuto attraverso la rimozione di elementi antropici e della copertura vegetale, al fine di restituire la morfologia del suolo, e la mappatura della rete dei percorsi stradali pedonali, ciclabili e forestali, estesa all'intera area oggetto di studio. Tali metodologie consentono di ottenere valutazioni biofisiche ed economiche dettagliate e accurate, in conformità con quanto riportato nella Tabella 4.

Tabella 4. Schematizzazione funzionale dei modelli sviluppati

Denominazione	u.m.	Valore biofisico	u.m.economica	Valore economico	Software adoperato
Stoccaggio e Sequestro di Carbonio	ton	Il modello quantifica la capacità del suolo di immagazzinare e trattenere carbonio considerando quattro principali serbatoi naturali: biomassa epigea e ipogea, suolo e sostanza organica morta	€/t	Prezzo di mercato equivalente al costo che le imprese devono sostenere per ogni tonnellata di anidride carbonica equivalente emessa (CO ₂ e) nell'atmosfera	Excel
Valore ricreativo delle aree naturali e seminaturali	ha	Il modello stima il potenziale ricreativo degli spazi verdi e naturali sulla base di parametri di accessibilità, quali rete stradale, morfologia del territorio e distanze raggiungibili	€/ha/anno	Valore parametrico, basato su quotazioni presenti in letteratura, capace di restituire un'approssimazione del valore medio annuale per visita ricreativa	QGis Excel

4. Caso studio

L'approccio metodologico presentato è stato applicato alla città di Cuneo, caso di studio esemplificativo, centro urbano situato nell'Italia settentrionale (Figura 1). L'area si colloca nel Piemonte sud-occidentale, in una posizione centrale rispetto al vasto sistema montuoso compreso tra le Alpi Marittime e le Alpi Cozie.

Fondata alla fine del XII secolo (1192), Cuneo deve il proprio nome alla caratteristica forma del rilievo su cui sorge. Il nucleo urbano principale si sviluppa su tale area ed è delimitato dai fiumi Stura di Demonte e Gesso, che convergono dando origine alla confluenza che caratterizza il sito (Comune di Cuneo, 1946). La struttura insediativa della città rappresenta un caso esemplare di configurazione urbana, particolarmente distintiva.

Le ragioni che hanno condotto alla selezione del presente ambito territoriale risiedono principalmente nella possibilità di sperimentare tecniche di implementazione della valutazione economica dei SE in un contesto caratterizzato da peculiarità che lo rendono particolarmente idoneo a tali finalità. Il territorio si distingue, infatti, per l'elevato valore biofisico, riconducibile alla presenza diffusa e strutturata di aree protette, corridoi ecologici e del Parco fluviale Gesso e Stura, che assume un ruolo di rilievo quale nodo per la fornitura dei benefici ecosistemici. Al contempo, presenta una densità abitativa contenuta (circa 467 abitanti/km²), ma è interessato da un progressivo incremento del consumo di suolo (+7,36% nel periodo 2006–2023, secondo dati ISPRA) e da significative pressioni antropiche sulle riserve naturali e sugli agroecosistemi.

In relazione alle trasformazioni climatiche in atto, le analisi condotte nell'ambito del Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile e il Clima (PAESC) hanno evidenziato un significativo aumento delle temperature medie e massime: negli ultimi trent'anni, la temperatura media annuale ha subito un incremento uguale a 1,5 °C (Città di Cuneo, 2023). Le anomalie termiche risultano particolarmente significative a partire dal 1997, con una tendenza al riscaldamento costante e generalizzata (Città di Cuneo, 2023). Questi fenomeni pongono in essere, con drammatica urgenza, la questione di prioritaria importanza dell'adattamento climatico.

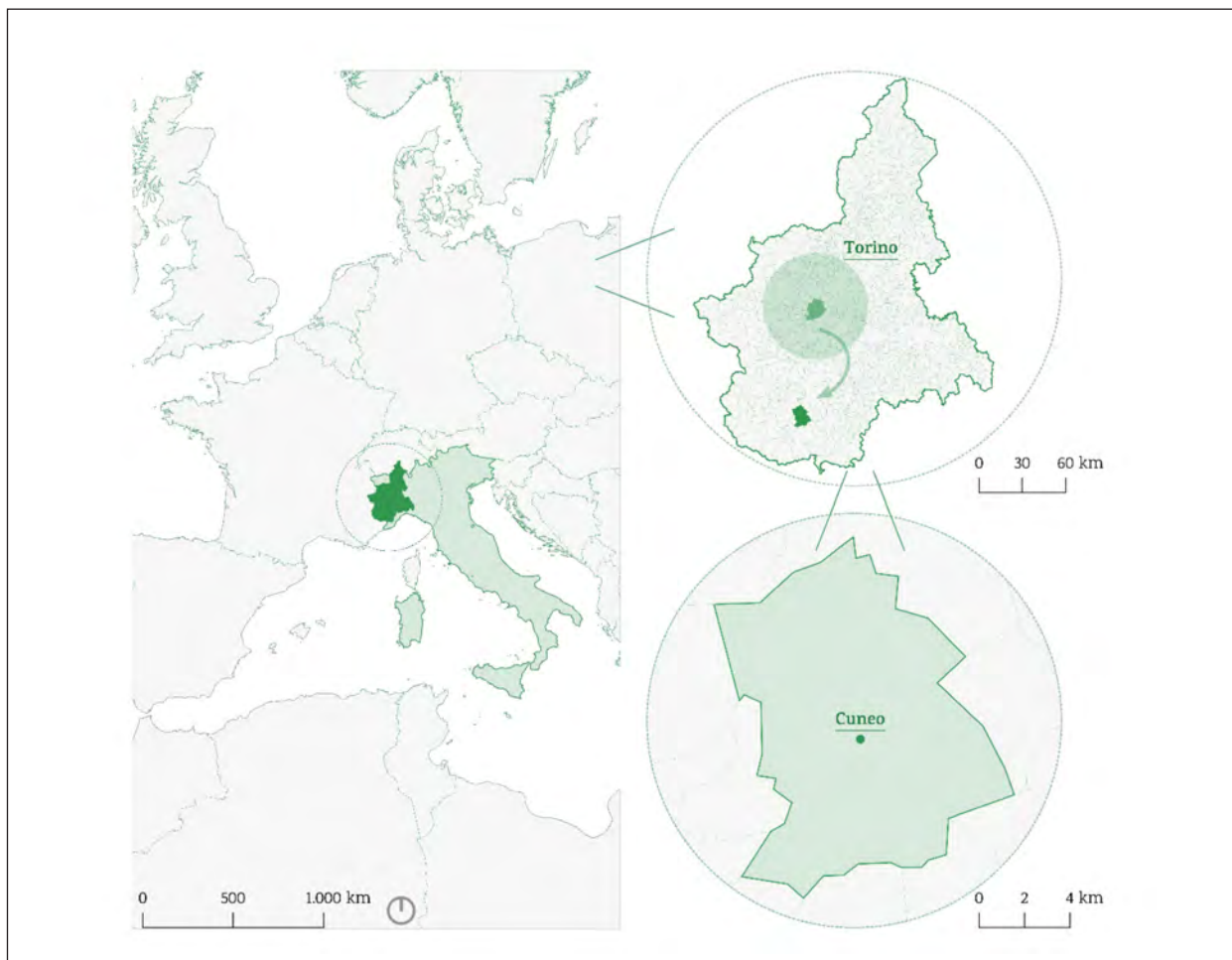


Figura 1. Inquadramento territoriale della città di Cuneo.

5. Applicazione

Al fine di individuare una correlazione tra differenti sistemi e metodi di calcolo e con l'intento di predisporre una base dati congrua all'implementazione delle valutazioni stesse, sono state condotte analisi sui due *software* Simulsoil ed InVEST. L'applicazione di *tool* differenti ha condotto, nel complesso, all'elaborazione di analisi biofisiche ed economiche (per il cui approfondimento si consiglia di consultare i Capitoli 5.2 e 5.3) riguardanti i seguenti SE: Stoccaggio e Sequestro di Carbonio, Qualità degli Habitat, Disponibilità Idrica, Trattenimento dei Nutrienti, Trattenimento dei Sedimenti, Impollinazione delle colture, Produzione Agricola, Produzione Legnosa, Raffrescamento Urbano e Valore Ricreativo.

5.1 Materiali adoperati

5.1.1 Materiali adoperati - Simulsoil

Come già evidenziato nel Capitolo 3.1, Simulsoil richiede come unico dato di *input* la mappatura dettagliata della copertura e dell'uso del suolo, fondamentale per il corretto svolgimento delle valutazioni biofisiche ed economiche dei SE, come illustrato in Tabella 5. A tal riguardo, la Figura 2 presenta le mappe di base relative alla copertura e all'uso del suolo per il caso di studio della città di Cuneo, evidenziando le variazioni registrate tra il 2010 e il 2023.

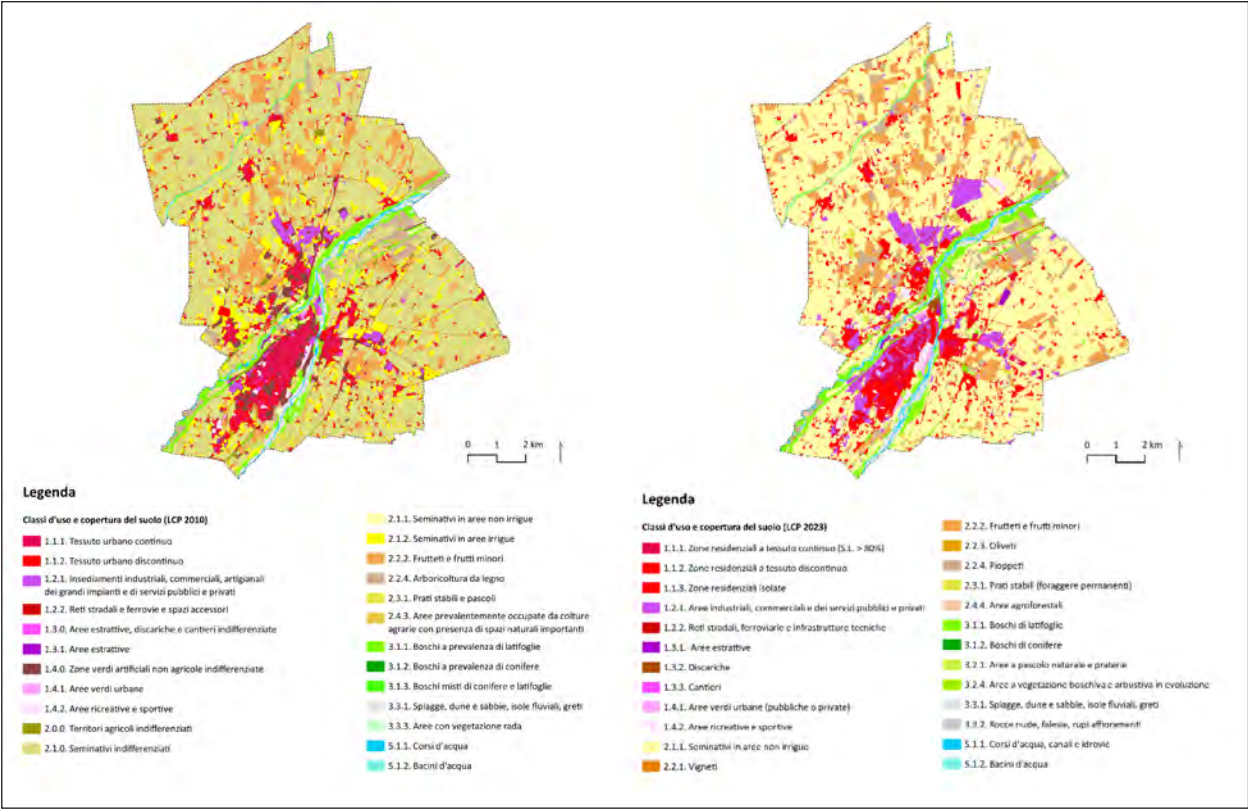


Figura 2. In ordine, rappresentazione, secondo la Land Cover Piemonte (LCP), delle classi d'uso e copertura del suolo al 2010 e al 2023 per la città di Cuneo.

Tabella 5. Parametri adoperati per il corretto funzionamento di Simulsoil

Dati di input	Descrizione	Fonte
Copertura ed uso del suolo	Raster (LCP), relativo al 2010 ed al 2023, dell'area di interesse	Regione Piemonte, 2024
Area di interesse	Mappa dei confini amministrativi su cui aggregare e riassumere i risultati finali	Database GeoTopografico regionale, BDTRE 2024

5.1.2 Materiali adoperati - InVEST

Il corretto funzionamento del modello “Stoccaggio e Sequestro di Carbonio” di InVEST prevede l'impiego sia della mappatura dettagliata della copertura e dell'uso del suolo (Figura 2), come Simulsoil, sia di una tabella contenente dati quantitativi sul carbonio stoccato, differenziati per ciascuna categoria di uso del suolo secondo la classificazione LCP. In particolare, la Tabella 6 riporta tutti i file di input adoperati per lo sviluppo del presente modello. Occorre asserire, inoltre, che i valori di stoccaggio di carbonio sono stati associati alle differenti classi d'uso del suolo (“riserve di carbonio”) e ricavati e ridefiniti a partire dagli spunti offerti da differenti fonti quali l'INFC (2022), il progetto SIAS (2010) ed infine, per quanto concerne le aree naturali e per le superfici agricole, dalle stime proposte da Sallustio et. al (2015). In conclusione, la ridefinizione delle destinazioni d'uso della Land Cover Piemonte (LCP) è avvenuta secondo le definizioni riportate da Marchetti et al (2012) e sulla base delle categorie definite da Marchetti et al (2012) e sulla base delle categorie definite da Marchetti et al (2012) e sulla base delle categorie definite da Marchetti et al (2012).

Tabella 6. Parametri e dati adoperati per il modello presente su InVEST “Stoccaggio e Sequestro di Carbonio”

Dati di input	Descrizione	Fonte
Copertura ed uso del suolo	Raster (LCP), relativo al 2010 ed al 2023, dell'area di interesse	Regione Piemonte, 2024
Area di interesse	Mappa dei confini amministrativi su cui aggregare e riassumere i risultati finali	Database GeoTopografico regionale, BDTRE 2024
Riserve di carbonio	Valori che associano la quantità di carbonio stoccato a ciascuna destinazione d'uso del suolo definita dalla LCP	Sallustio et al., 2015

L'efficace esecuzione del modello InVEST “Raffrescamento urbano” necessita di dati iniziali quali la mappatura dettagliata della copertura e dell'uso del suolo (Figura 2), una tabella sintetica dei parametri biofisici per ciascuna destinazione LCP, i dati di evapotraspirazione di riferimento, la temperatura dell'aria in un'area rurale priva dell'effetto isola di calore e la relativa entità, oltre alla mappatura delle impronte a terra dei fabbricati e ai dati energetici e di costo, differenziati per tipologia edilizia, a supporto dell'analisi economica e biofisica del SE I dati relativi all'evapotraspirazione effettiva di riferimento, riportati in Tabella 7, si basano sulle serie storiche e sulle elaborazioni del modello BIGBANG per il bilancio idrologico nazionale, sviluppato dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA, 2024) e accessibile tramite il portale SINANET. Per quanto riguarda il parametro “Temperatura di riferimento” e l'indicatore “Effetto UHI”, il principale riferimento è costituito dall'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale (ARPA Piemonte, 2025). Le temperature medie delle aree rurali sono state determinate mediante l'analisi delle serie storiche di due stazioni meteorologiche, “Camera di Commercio” e “Dronero”, selezionate appositamente per questo scopo. Infine, tutti i dati pertinenti alla valutazione dei consumi energetici attengono al progetto opera delle due società SEAcop ed Etifor Srl. (2020).

Tabella 7. Parametri e dati adoperati per lo sviluppo del modello InVEST “Raffrescamento Urbano”

Dati di input	Descrizione	Fonte
Copertura ed uso del suolo	Raster (LCP), relativo al 2010 ed al 2023, dell'area di interesse	Regione Piemonte, 2024
Area di interesse	Mappa dei confini amministrativi su cui aggregare e riassumere i risultati finali	Database GeoTopografico regionale, BDTRE 2024
Tabella biofisica	Valori biofisici associabili ad ogni destinazione d'uso della LCP, riguardanti: coefficienti di coltura, ombra, albedo e distinzione delle aree verdi da quelle urbanizzate	Hagemann et al., 2002; InVEST, 2025
Evapotraspirazione di riferimento (mm)	Mappatura dei valori di evapotraspirazione di riferimento	ISPRA, 2024
Distanza massima di raffrescamento (m)	Distanza entro la quale le aree verdi, più grandi di 2 ha, hanno un effetto di raffrescamento	InVEST, 2025
Temperatura dell'aria di riferimento (°C)	Temperatura dell'aria in un'area rurale di riferimento in cui non si osserva l'effetto isola urbana di calore	ARPA, 2025
Effetto UHI (°C)	Entità dell'effetto isola urbana di calore (differenza tra la temperatura di riferimento dell'area rurale e la temperatura massima osservata in città)	ARPA, 2025
Distanza di miscelazione dell'aria (m)	Raggio entro cui si considera la miscelazione dell'aria per stimare la temperatura effettiva in un'area urbana (simula l'effetto della turbolenza atmosferica e la dispersione del calore)	InVEST, 2025

Segue Tabella 7. Parametri e dati adoperati per lo sviluppo del modello InVEST “Raffrescamento Urbano”

Dati di input	Descrizione	Fonte
Impronte degli edifici	Mappatura delle impronte dei fabbricati costruiti	Database GeoTopografico regionale, BDTRE 2024
Consumi energetici	Dati sui consumi energetici per area di ingombro ed il costo relativo, suddivisi per ogni tipologia di edifici	Etifor e SEAcop, 2020

5.1.3 Materiali adoperati – modello semplificato e modello complementare

I dati di *input* utilizzati per il modello semplificato “Stoccaggio e Sequestro di Carbonio” coincidono con quelli previsti dal modello InVEST, di cui si rimanda alla Tabella 6.

Ai fini della procedura di calcolo personalizzata per la stima del valore ricreativo delle aree naturali e seminaturali, oltre alla mappatura della copertura e dell'uso del suolo (Figura 2), è necessario disporre di un modello tridimensionale della superficie topografica nuda, ottenuto rimuovendo la componente antropica e la vegetazione per rappresentare la morfologia naturale del suolo, di una mappatura completa della rete dei percorsi pedonali, ciclabili e forestali estesa all'intero ambito di studio e di una definizione delle aree accessibili dal centro urbano, classificate in base ai tempi di raggiungimento. In quest'ultimo modello, sviluppato in ambiente GIS, il dato relativo all'assetto viabilistico (Tabella 8) è stato strutturato mediante la ricostruzione cartografica delle principali infrastrutture esistenti, comprensive anche della viabilità forestale, attuale e pianificata, funzionale all'individuazione dei tracciati utilizzati o potenzialmente utilizzabili nell'ambito della gestione sostenibile delle risorse naturali e forestali. L'altra variabile determinante è rappresentata dalla morfologia del terreno, espressa attraverso una classificazione per classi di pendenza. A tal fine, è stata condotta un'analisi sistematica della pendenza topografica del territorio comunale di Cuneo, basata sull'impiego del Modello Digitale del Terreno (DTM) del Piemonte, che fornisce una restituzione altimetrica ad alta risoluzione (5 metri), garantendo un'elevata precisione nella rappresentazione della distribuzione delle quote altimetriche. Il processamento, l'elaborazione o la modellazione, del *raster* del DTM ha condotto alla suddivisione funzionale ed alla definizione di tre classi di pendenza, ognuna indicativa delle differenti caratteristiche morfologiche del terreno:

- Classe I (0% ÷ 25%). Terreni pianeggianti o leggermente inclinati, facilmente accessibili;
- Classe II (26% ÷ 50%). Terreni moderatamente inclinati, di fruibilità discreta;
- Classe III (51% ÷ 75%). Terreni fortemente pendenti, difficilmente raggiungibili.

Tabella 8. Parametri e dati adoperati per la restituzione del modello personalizzato *GIS-based* per la stima del valore ricreativo

Dati di input	Descrizione	Fonte
Copertura ed uso del suolo	Raster (LCP), relativo al 2010 ed al 2023, dell'area di interesse	Regione Piemonte, 2024
Area di interesse	Mappa dei confini amministrativi su cui aggregare e riassumere i risultati finali	Database GeoTopografico regionale, BDTRE 2024
Modello Digitale del Terreno(DTM)	Restituzione grafica, tridimensionale, della superficie terrestre, depurata da qualsiasi elemento antropico e dalla copertura vegetale	Regione Piemonte, 2011
Rete infrastrutturale viaria	Rappresentazione dei percorsi stradali (pedonali, ciclabili e forestali) che coprono l'intero contesto in esame	Database GeoTopografico regionale, BDTRE 2024
Buffer zone	Restituzione grafica e quantificazione delle aree accessibili dal centro urbano	Database GeoTopografico regionale, BDTRE 2024

Relativamente alla stima del valore ricreativo, lo sviluppo dell'ulteriore modello semplificato utilizza un unico dato di input, oltre alla mappatura della copertura e dell'uso del suolo (Figura 2), ossia le aree accessibili dal centro urbano, classificate in base ai tempi di percorrenza (Tabella 9).

Tabella 9. Parametri e dati adoperati per la restituzione del modello semplificato per la stima del valore ricreativo

Dati di input	Descrizione	Fonte
Copertura ed uso del suolo	Raster (LCP), relativo al 2010 ed al 2023, dell'area di interesse	Regione Piemonte, 2024
Area di interesse	Mappa dei confini amministrativi su cui aggregare e riassumere i risultati finali	Database GeoTopografico regionale, BDTRE 2024
Buffer zone	Restituzione grafica e quantificazione delle aree accessibili dal centro urbano	Database GeoTopografico regionale, BDTRE 2024

5.2 Simulsoil

Simulsoil ha fornito, attraverso un unico dato di *input* relativo agli usi del suolo (Figura 2), un significativo supporto alla valutazione di 8 diversi SE quali Stoccaggio di Carbonio (CS), Qualità degli Habitat (HQ), Disponibilità Idrica (WY), Trattenimento dei Nutrienti (NR), Trattenimento dei Sedimenti (SDR), Impollinazione delle colture (CPO), Produzione Agricola (CPR) e Produzione Legnosa (TP).

Due annualità specifiche sono state messe a confronto, coincidenti con le date di riferimento delle carte tematiche relative alla copertura e all'uso del suolo (LCP – acronimo di *Land Cover* Piemonte), riferite al 2010 e al 2023 (di seguito chiamate rispettivamente scenario T_0 e T_1). Queste due annualità consentono di evidenziare i mutamenti avvenuti nel corso di un decennio e delle relative ripercussioni sul suolo, sulle funzioni ecosistemiche e sullo *stock* del Capitale Naturale.

Gli *output* restituiti dal *software* Simulsoil riportano, in forma spazialmente esplicita e attraverso tabelle di calcolo *Excel* (Tabella 10), le differenze tangibili circa l'incremento o la perdita di SE allo stato di fatto attuale, marcando l'evoluzione dei processi di trasformazione nella copertura d'uso del suolo avvenuti in circa 13 anni. Gli esiti raggiunti mediante la piattaforma Simulsoil hanno evidenziato, dal punto di vista biofisico, una situazione critica riguardo 6 SE su 8 (Tabella 10). Dalle analisi, infatti, si denota un netto calo dei valori di CS, CPO, HQ, SDR, WY e TP nello scenario T_1 (2023) rispetto a T_0 (2010). Le perdite considerevoli si attestano su dati percentuali contenuti in un intervallo compreso tra -1,64% e -42,13%. Al contrario, i restanti SE analizzati, quali NR e CPR hanno subito un incremento positivo, rispettivamente di +56,11% e +5,74%. Un aspetto significativo, che, in parte, potrebbe essere utile a spiegare l'evoluzione del *trend* negativo, concerne la valutazione biofisica dei diversi SE è attribuibile all'incremento del suolo consumato (+129,65 ha) che ha caratterizzato, in maniera costante, l'area del comune di Cuneo tra il 2006 ed il 2023. Tale incremento, inevitabilmente, ha contribuito alla perdita di risorse ambientali fondamentali, ossia beni e servizi erogati dagli ecosistemi (ISPRA, 2014). Dal riscontro con i dati forniti dall'Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT), all'interno del Censimento dell'Agricoltura, e dall'Anagrafe agricola dal Piemonte, l'incremento del valore di CPR è chiaramente e strettamente correlato all'aumento, tra il 2010 ed il 2024, in un *range* compreso tra +0,40% e +6,00%, della SAU (Superficie Agricola Utilizzata), la quale rappresenta la superficie delle aziende agricole occupata da seminativi, orti urbani, arboreti e colture permanenti, prati e pascoli.

Tabella 10. Restituzione sintetica della valutazione dei SE tramite Simulsoil

Codice	Denominazione	u.m.	T ₀	T ₁	Variazione percentuale
CS	Sequestro di carbonio	ton	↑	↓	-8,39%
CPO	Impollinazione	0-1	↑	↓	-26,09%
HQ	Qualità degli habitat	0-1	↑	↓	-1,64%
NR	Trattenimento dei nutrienti	ton	↓	↑	+56,11%
SDR	Trattenimento dei sedimenti	ton	↑	↓	-7,97%
WY	Disponibilità d'acqua	0-1	↑	↓	-6,13%
CPR	Produzione agricola	€	↓	↑	+5,74%
TP	Produzione legnosa	€	↑	↓	-42,13%

5.3 InVEST

5.3.1 InVEST – Stoccaggio e Sequestro di Carbonio

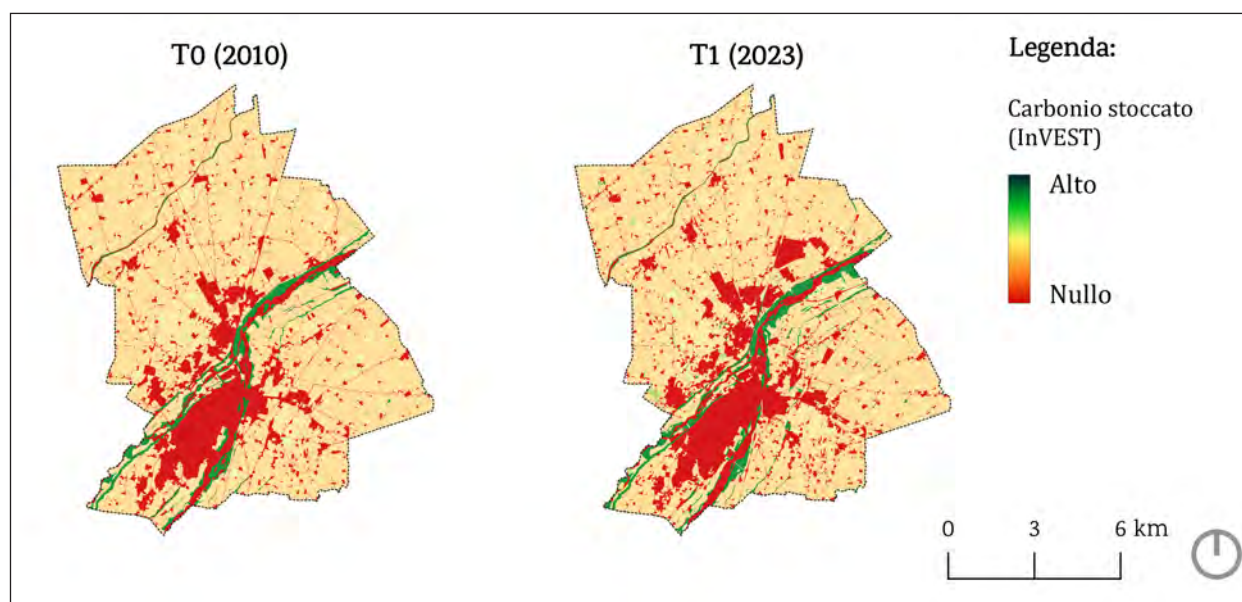
A partire dalla copertura d'uso del suolo (Figura 2) e dall'integrazione di quattro variabili associate alle differenti destinazioni d'uso, InVEST è stato in grado di stimare la quantità totale di carbonio stoccata dagli ecosistemi terrestri, o – in generale – da una particella di terreno, nel corso del tempo. Suddette variabili (anticipate in Tabella 6), definite come *carbon pools*, rappresentano i vari tipi di riserve, naturali o artificiali, in grado di immagazzinare carbonio e riflettono essenzialmente le caratteristiche dei suoli legate alla loro composizione e alla loro copertura arbustiva e vegetale e sono così suddivise: biomassa epigea ed ipogea, suolo e materia organica. Non tutti gli ecosistemi sono in grado di trattenere carbonio ed i valori attribuibili a tali riserve ne riflettono la capacità. Come evidenziato dalla Tabella 11, i boschi presentano una capacità di stoccaggio del carbonio significativamente superiore rispetto ai contesti urbani, nei quali l'elevato grado di impermeabilizzazione¹ del suolo compromette fortemente tale funzione ecosistemica. Di conseguenza, i valori dei *carbon pools* evidenzieranno queste differenze, legate principalmente alle caratteristiche fisiche e morfologiche proprie dei suoli, del loro livello di compromissione, e dei diversi contesti ambientali. Il modello si limita essenzialmente ad assegnare, a ciascun *pixel*, in base alla classe della LCP in cui esso ricade, il valore totale (aggregato o scisso in classi) di carbonio stoccato, espresso in megagrammi per *pixel*, il quale è frutto della sommatoria dei valori attribuibili ai diversi *pools* (serbatoi o riserve) disponibili.

Gli esiti delle simulazioni sono riportati graficamente nella Figura 3, dove, attraverso una scala semaforica, si evidenziano le aree maggiormente capaci di sequestrare carbonio (in verde) e quelle meno (in rosso).

² Adottando un approccio conservativo, si considera che l'urbanizzazione azzeri integralmente le riserve di carbonio presenti (Sallustio et al., 2015).

Tabella 11. Definizione dei valori di stoccaggio di carbonio associabili alle differenti classi d'uso del suolo (Sallustio et al., 2015).

IUTI class	Biomassa epigea	Biomassa ipogea	Sostanza organica morta	Suolo
Bosco	50,5	11,525	5,295	76,1
Seminativi e altre colture agrarie	5	/	/	53,1
Arboricoltura da frutto	10	/	/	52,1
Arboricoltura da legno	28,55	5,25	1,75	63,9
Praterie, pascoli ed incolti erbacei	/	/	/	78,9
Altre terre boscate	3,05	/	/	66,9
Aree urbanizzate	0	0	0	0

**Figura 3.** Spazializzazione dei risultati del modello InVEST "Stoccaggio e Sequestro di Carbonio".

La stima del valore economico-monetario associato al servizio di stoccaggio del carbonio, infine, è avvenuta direttamente da parte del *software* mediante la moltiplicazione della quantità totale di carbonio immagazzinata dagli ecosistemi terrestri per un coefficiente parametrico (€/ton). Il *software* consente, inoltre, di associare un tasso di sconto annuo di mercato ed una variazione indicativa annuale del prezzo, in entrambi i casi con valori compresi in un intervallo tra 0 e 1. Quest'ultima variabile considera l'evolversi, nel tempo, dell'impatto delle emissioni sui danni attesi legati al cambiamento climatico. Per semplificazione e per omologarsi alla stessa procedura di calcolo presente in Simulsoil, nel presente caso, questi due parametri non sono stati presi in considerazione.

Dall'analisi della Tabella 12, si evince che modello di InVEST "Stoccaggio e Sequestro di Carbonio" ha restituito il medesimo *trend* negativo già sottolineato dalle analisi di Simulsoil, con una perdita del valore attribuibile al SE del -1,08% (che, in termini economici, si traduce in -€446.511). Nonostante questo, i dati elaborati dai diversi *software*, ed i relativi esiti, restituiscono valori differenti nell'ordine di percentuali comprese tra -3,81% e +3,86% (intervallo considerato comunque accettabile ai fini della ricerca).

Tabella 12. Risultati delle valutazioni biofisiche riferite agli anni 2010 e 2023, con evidenza delle differenze percentuali tra gli strumenti applicati

<i>Software</i>	Valore biofisico (ton) al 2010	Valore biofisico (ton) al 2023	Differenza tra le due annualità
Simulsoil	629.816,02	576.977,00	-8,38%
InVEST	605.793,60	599.225,30	-1,08%
Confronto tra Simulsoil e InVEST	-3,81%	+3,86%	

Tale differenza è facilmente spiegabile attraverso due aspetti principali che differenziano i *tool*: la limitata selezione delle possibili classificazioni d'uso dei suoli che, a livello nazionale, caratterizza Simulsoil ed il livello di approssimazione che caratterizza la risoluzione (20 metri) delle carte tematiche (*Corine Land Cover* e Carta Nazionale di Copertura del Suolo) utilizzate da quest'ultimo, a scapito della *Land Cover* Piemonte (LCP) utilizzata come riferimento da InVEST, la cui risoluzione si attesta sui 5 metri.

5.3.2 InVEST – Raffrescamento Urbano

Il modello di InVEST “Raffrescamento Urbano”, come per il precedente, parte dalla mappatura dell'uso e della copertura del suolo (Figura 2). A questa integra alcune significative variabili, dal punto di vista microclimatico e ambientale, ossia l'ombreggiamento fornito dalla copertura arborea, l'evapotraspirazione della vegetazione (Figura 4), l'albedo e la distanza dalle isole di raffrescamento. Sulla base di questi elementi, il *software* è in grado di calcolare e restituire un indice di mitigazione del calore urbano (*Urban Heat Mitigation Index*), il cui valore risulta essere influenzato dalla capacità di raffrescamento media (o semplicemente, la riduzione) della temperatura dell'aria attribuibile alla presenza, ed alla distribuzione, del verde urbano. Tuttavia, a differenza delle simulazioni con il *tool* Simulsoil e quella del Sequestro di Carbonio con InVEST, sono state esaminate due specifiche mensilità (aprile e agosto) del medesimo anno (2023), come possibile osservare in Tabella 13, considerata la limitatezza della serie storica disponibile, per la simulazione del modello e dei relativi esiti, come riportato in Figura 5.

Tabella 13. Schematizzazione dei dati, relativi alle serie storiche, forniti dall'ARPA e adoperati per il modello “Raffrescamento Urbano”

Stazione meteorologica	Temperatura dell'aria di riferimento		Temperatura massima registrata in città		Effetto UHI
	Aprile	Agosto	Aprile	Agosto	
Camera di Commercio	-	-	13,0 °C	23,8 °C	1,5 °C
Dronero	11,5 °C	22,3 °C	-	-	

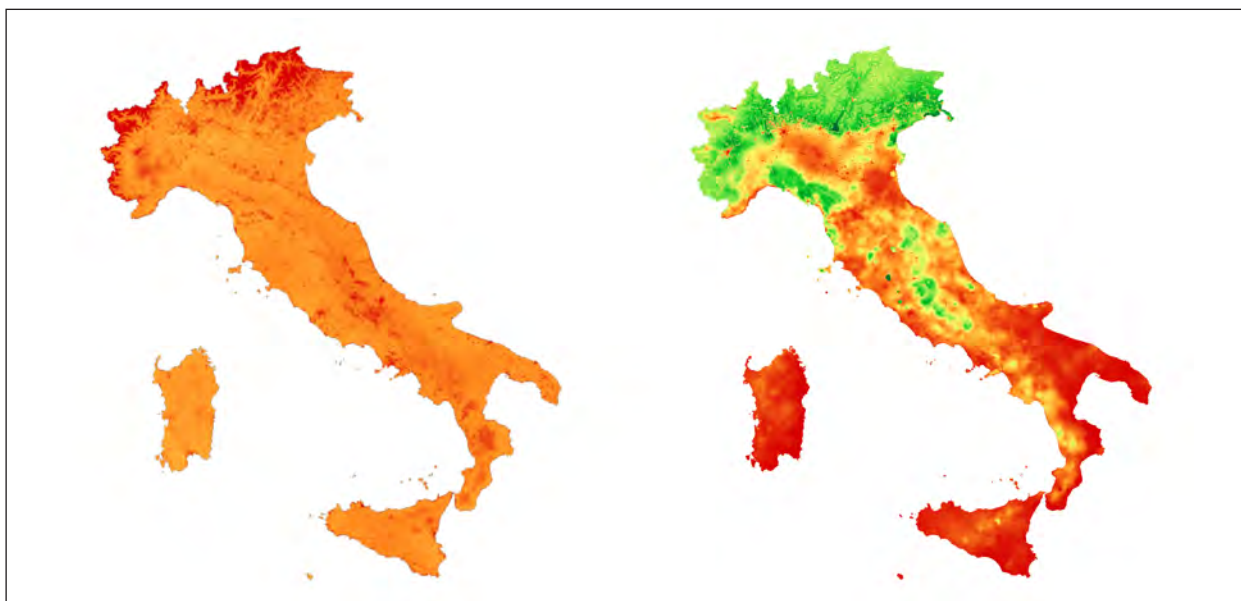


Figura 4. In ordine, rappresentazione dell'evapotraspirazione effettiva di riferimento del mese di aprile e agosto del 2023. Elaborazione basata sui dati forniti da ISPRA.

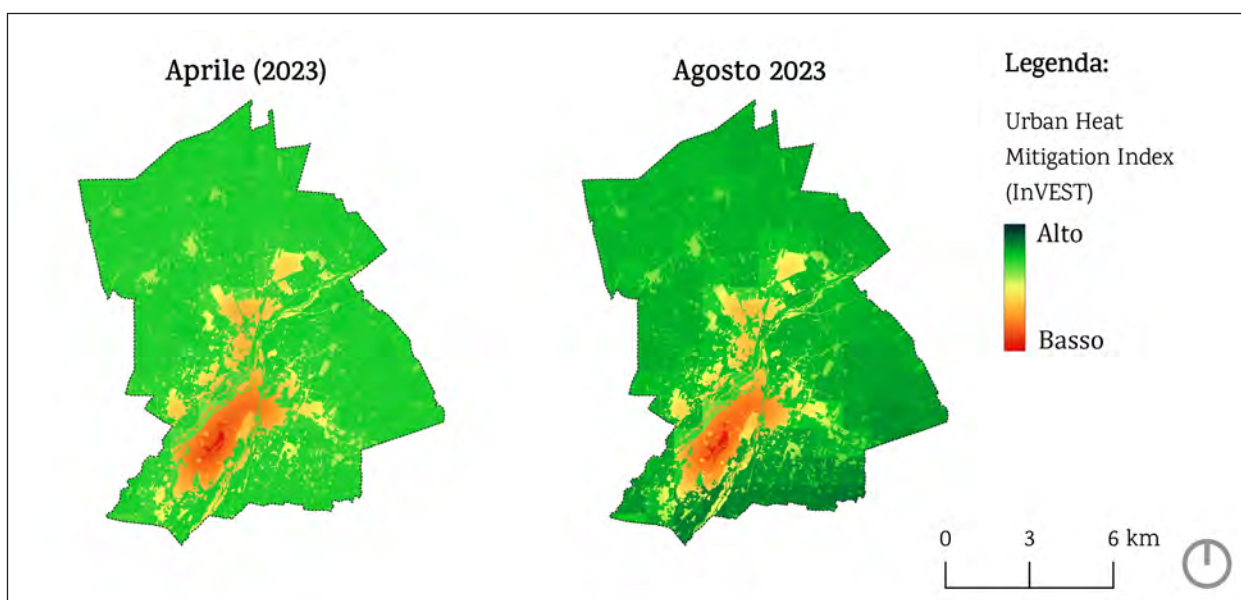


Figura 5. Spazializzazione dei risultati dell'Indice di Mitigazione del Calore Urbano (modello InVEST "Raffrescamento Urbano").

La stima del valore economico-monetario associato al servizio di mitigazione del calore, infine, è avvenuta calcolando il risparmio energetico relativo alla riduzione del consumo di elettricità dell'aria condizionata, al fine di restituire valori più facilmente confrontabili ed attuali.

Gli *output* restituiti dal presente modello riflettono quindi l'impatto positivo delle aree verdi sull'abbassamento delle temperature percepite ed il beneficio economico derivato da consumi minori per il raffrescamento delle stanze interne di ogni singolo edificio.

I risultati derivanti dall'applicazione del modello (Figura 6), considerando la naturale variabilità mensile di alcuni indicatori rilevanti quali il coefficiente di coltura e il valore dell'evapotraspirazione, evidenziano un risparmio economico medio per edificio significativamente più elevato nel mese di agosto rispetto ad aprile, con valori pari rispettivamente a €50,66 e €44,43 euro su base mensile, corrispondenti a €1,63 e €1,48 su base giornaliera.

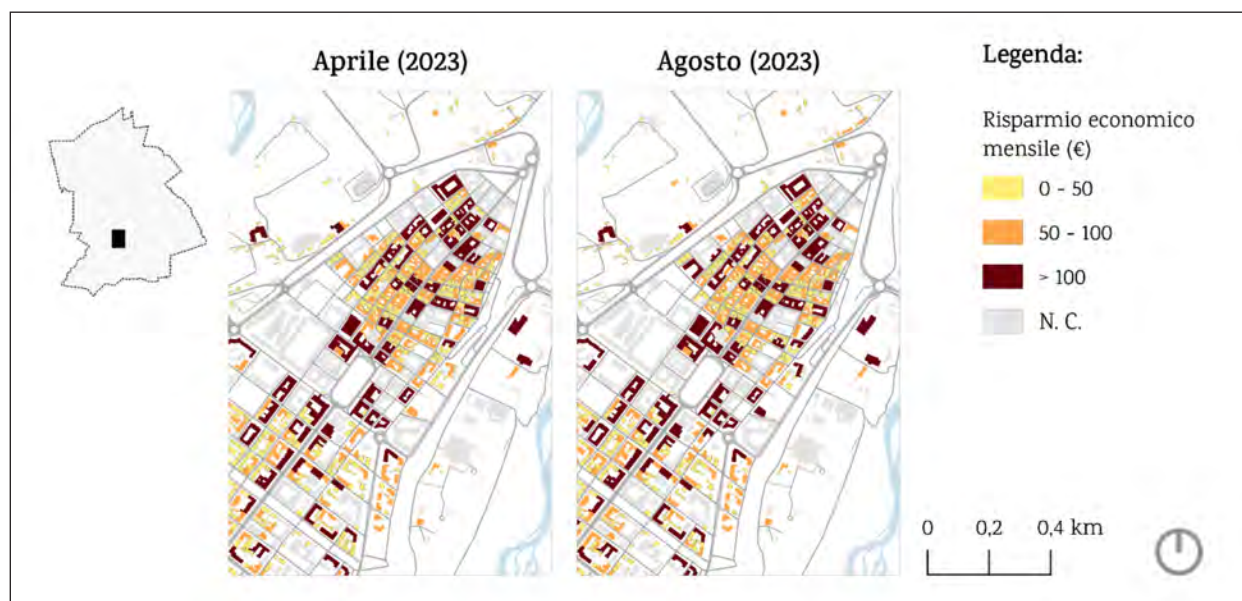


Figura 6. Valore economico associabile al risparmio energetico dovuto alla riduzione del consumo di elettricità dell'aria condizionata (Modello di InVEST "Raffrescamento Urbano").

5.4 Differenze tra Simulsoil ed InVEST: verso modelli semplificati e complementari

Simulsoil ed InVEST sono due *software* connotati da una serie di differenze strutturali. D'altronde, come citavamo nelle sezioni precedenti, Simulsoil è caratterizzato dall'essere un modello di calcolo che automatizza i processi complessi di calcolo di InVEST. È possibile sintetizzare in 6 punti le principali differenze emerse dallo sviluppo dei due *tool*.

In primo luogo, in termini di affidabilità, tutte le valutazioni fornite da Simulsoil, attualmente, si basano algoritmi di calcolo di una versione datata di InVEST (la 3.2.0); questa condizione denota come l'utilizzo dello stesso strumento offerto da InVEST, in quanto costantemente aggiornato, potrebbe restituire valori maggiormente attendibili e validi. Nonostante questo, risulta utile asserire che il grado di affidabilità delle simulazioni di InVEST dipende essenzialmente dal corretto utilizzo delle fonti bibliografiche sul tema da parte dell'utilizzatore.

In secondo luogo, rispetto all'accuratezza delle informazioni, gli *output* relativi a tutti gli 8 SE considerati in Simulsoil hanno una risoluzione (eccezion fatta per la Città metropolitana di Torino), in termini di *pixel raster*, pari a 20*20 metri. Contrariamente, in InVEST, la scala di dettaglio viene definita direttamente dall'utente, consentendo una maggiore accuratezza (nel nostro caso, tutti gli *output* hanno una risoluzione pari a 5*5 metri) nell'elaborazione dei risultati.

In terzo luogo, considerando la gestione dei dati richiesti, Simulsoil ed InVEST utilizzano approcci diametralmente opposti. Simulsoil non richiede competenze specifiche per il suo utilizzo, se non quelle di base per l'elaborazione di *file* su QGIS, ed è quindi considerato maggiormente e facilmente accessibile. InVEST, a differenza del precedente, richiede competenze specifiche e tecniche per ciascun modello ed anche su *software* di supporto come QGIS. Tale differenza è data dal fatto che la creazione della base dati di InVEST, su cui si basa ogni singolo modello del *tool*, è completamente a discapito dell'utente.

In quarto luogo, esaminando i risultati ottenibili, Simulsoil tende a riportarli tutti in tempi estremamente ridotti. Le tempistiche legate all'esecuzione di un modello in InVEST sono variabili e, tendenzialmente, dipendono dal livello e dal grado di accuratezza che si vuole raggiungere. Maggior risoluzione, maggior tempo richiesto dalla simulazione, con intervalli che superano le 20 ore.

In quinto luogo, per quanto concerne la stima delle variazioni del valore biofisico dei SE, all'interno di Simulsoil, le serie storiche come quelle riportate nel presente contributo (2010-2023) potrebbe essere soggette ad approssimazioni e generalizzazioni legate alle variabili attribuibili

alle coperture d'uso dei suoli di livello nazionale. InVEST invece, a seconda delle conoscenze e competenze dell'utente, potrebbe avere *database* maggiormente completi, aggiornati e dettagliati, in grado di tener conto di tutte le variabili legate ai cambiamenti d'uso del suolo.

Per quanto concerne la valutazione economica, entrambi i *software* possiedono valori parametrici unitari modificabili e quindi in grado di tener conto della variabilità e dell'oscillazione dei prezzi.

In conclusione, si rileva una criticità strutturale in Simulsoil quando si lavora in contesti urbani, riconducibile alla scarsa attenzione rivolta ai SE in ambito urbano rispetto a quelli analizzati su scala territoriale più ampia. Sebbene il limite tra urbano e non urbano – e, di conseguenza, tra SE e SE urbani – sia spesso sfumato e non facilmente delineabile, si evidenziano lacune nell'analisi di SE particolarmente rilevanti per i contesti urbani, quali, a titolo di esempio, il raffrescamento urbano, la riduzione del rumore, il drenaggio dell'acqua piovana ed il trattamento delle acque reflue (Bolund & Hunhammar, 1999).

5.4.1 Modello semplificato "Stoccaggio e Sequestro di Carbonio"

A seguito dell'applicazione dei modelli esistenti (Simulsoil e InVEST) e alla luce dei loro punti di forza e debolezza, è emersa la necessità di compiere un ulteriore avanzamento, proprio nell'ottica di semplificazione, ma allo stesso tempo affidabilità degli esiti delle valutazioni biofisiche ed economiche dei SE. L'obiettivo principale del lavoro è, quindi, divenuto quello di predisporre e sperimentare modelli semplificati. Il lavoro è partito, in particolare, dalla sperimentazione di un modello semplificato per il calcolo della quantità totale di carbonio stoccato dagli ecosistemi.

Il modello semplificato è stato predisposto sul *software Microsoft Excel*, basando la metodologia sui dati di *input* richiesti da InVEST, ossia il *file raster* della LCP (Figura 2), relativo al 2010 ed al 2023, dell'area di interesse, la mappa dei confini amministrativi su cui aggregare e riassumere i risultati finali ed, infine, la tabella con i valori relativi al carbonio stoccato per ciascuna destinazione d'uso. La cartella di lavoro *Excel* è composta da 3 fogli di calcolo. All'interno del primo (Figura 7), è presente la definizione delle classi d'uso e di copertura del suolo, così come illustrata all'interno dell'"*Inventario dell'Uso delle Terre d'Italia*" (IUTI), con la relativa descrizione fornita da Marchetti et al. (2012). Nel secondo sono presenti delle tabelle *pivot* che consentono il calcolo del valore biofisico ed economico del SE per singola categoria (Figura 8) o per tutte quelle oggetto di analisi (Figura 9). Infine, nel terzo foglio di calcolo (ed eventuali successivi) sono dedicati ai diversi scenari di sviluppo oggetto di comparazione (per esempio, come nei casi precedentemente illustrati, tra 2010 e 2023).

Classe IUTI	Categorizzazione IUTI di II Livello	Categorizzazione IUTI di III Livello	Codice IUTI	Descrizione (Marchetti et al., 2012)
Superficie forestale	Bosco	/	1	Terreno con una superficie minima di 5.000 m ² , caratterizzato da una copertura arborea superiore al 10%, costituita da alberi in grado di raggiungere un'altezza minima di cinque metri (5 m) a maturità in situ, e non classificabile come superficie agricola (quali impianti di arboricoltura da legno, frutteti o colture agroforestali) né come verde urbano (quali parchi e giardini urbani). Le aree caratterizzate da soprassuoli naturali giovani, così come tutte le piantagioni che non hanno ancora raggiunto una copertura della chioma pari al 10%, sono comunque considerate foresta. Esse sono pertanto incluse nella superficie forestale, anche quando, a seguito di interventi antropici (ad esempio utilizzazione) o di eventi naturali (quali incendi o fenomeni meteorologici intensi), risultano temporaneamente prive di copertura arborea, ma si prevede che possano ritornare a una condizione boscata.
	Terreno boschivo temporaneamente privo di copertura arborea	/		
Superficie agricola	Terreno coltivabile	/	2.1	Per superficie agricola si intende un terreno di area minima di 5000 m ² occupato da superfici agricole quali seminativi - asciutti e irrigati -, parti polifite permanenti, vivai non forestali, colture orticole in pieno campo, in serra o tunnel di plastica, impianti di specie arborea o arbustive in frutto (compresi i nocciuoli regolarmente coltivati) e impianti di arboricoltura da legno. Questi ultimi, al pari delle formazioni forestali, per avere dignità di classificazione autonoma come sottocategoria, devono occupare una superficie maggiore di 5000 m ² , esercitare una copertura potenziale delle chiome arboree superiore al 10% e poter raggiungere un'altezza in situ maggiore di 5 m.
	Colture permanenti	Frutteti, vigneti, vivai	2.2.1	
		Piantagioni forestali	2.2.2	
Superficie pascoliva	Praterie naturali	/	3.1	Nelle superfici pascolive (grassland) sono incluse: la sottocategoria "altre terre boscate" (terreno di area minima di 5000 m ² occupato da una copertura arborea del 5-10% di alberi in grado di raggiungere un'altezza minima di 5 m a maturità in situ, oppure una copertura maggiore del 10% costituita da alberi che non raggiungono un'altezza di 5 m a maturità in situ, oltre ad arbusti e cespugli); la sottocategoria "pascolo e praterie" (terreno di area minima di 5000 m ² occupato da pascolo naturale, praterie di alta quota, prati-pascoli, aree che derivano dall'abbandono delle pratiche agricole e comunque tutte le formazioni vegetali occupate da vegetazione erbacea spontanea con copertura superiore al 40%, principalmente dominata da specie erbacee).
	Altri terreni boschivi	/	3.2	

Figura 7. Primo foglio di calcolo del modello personalizzato contenente la definizione delle classi d'uso e di copertura del suolo con la relativa descrizione fornita da Marchetti et al. (2012).

Codice	Descrizione	Estensione territoriale associata (ha)	Quantità stoccabile (carbon pools) (Mg/ha)	Valore biofisico (tot.) (Mg)	Parametro economico (€/Mg)	Valore economico (tot.) (€)
1	Superficie forestale	440	143	63105	68	4289845
Totale						4289845

Codice

1

2.1

2.2.1

2.2.2

3.1

3.2

Figura 8. Foglio di calcolo del modello personalizzato contenente la stima del valore biofisico ed economico del SE relativo allo Stoccaggio e al Sequestro di Carbonio per singola categoria.

Codice	Descrizione	Estensione territoriale associata (ha)	Quantità stoccabile (carbon pools) (Mg/ha)	Valore biofisico (tot.) (Mg)	Parametro economico (€/Mg)	Valore economico (tot.) (€)
1	Superficie forestale	440	143	63105	68	4289845
2.1	Terreno coltivabile	7959	58	462436	68	31436433
2.2.1	Frutteti, vigneti, vivai	1086	62	67335	68	4573365
2.2.2	Piantagioni forestali	0	99	0	68	0
3.1	Praterie naturali	201	79	15892	68	1080341
3.2	Altri terreni boschivi	14	70	964	68	65527
Totale						41245510

Codice

1

2.1

2.2.1

2.2.2

3.1

3.2

Figura 9. Foglio di calcolo del modello personalizzato contenente la stima del valore biofisico ed economico del SE relativo allo Stoccaggio e al Sequestro di Carbonio in forma aggregata.

Per il calcolo dei valori biofisici ed economici contenuti in Figura 8 e 9, il modello semplificato richiede all'utente di selezionare gli usi del suolo oggetto di analisi attraverso un menù a tendina e riportare la quantificazione (in ha) delle suddette aree. Quest'ultima operazione può essere attuata per mezzo di calcoli areali su QGis o semplicemente conoscendo le superfici di riferimento relative all'estensione territoriale per ogni classe. Una volta impostati i diversi usi del suolo, il modello associa ad ogni classe un fattore moltiplicativo; quest'ultimo è definito tramite la sommatoria dei valori attribuibili alle quattro componenti definite precedentemente come *carbon pools* in funzione delle differenti destinazioni d'uso. L'utente ha la facoltà di modificare tali parametri, agendo direttamente sulla casella dedicata selezionata (seguendo le indicazioni esplicitate e riportate nelle Figure 10 e 11), in funzione del contesto di riferimento o degli aggiornamenti provenienti dalla letteratura scientifica. Una volta inseriti questi parametri, il modello permette di ottenere il valore biofisico relativo al carbonio stoccato per l'intera area oggetto di studio (Figure 10 e 11), impiegando la seguente formula (1):

$$CS = V * \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 qC_j * S_i \quad (1)$$

Dove V equivale al costo che le imprese devono sostenere per ogni tonnellata di anidride carbonica equivalente emessa (CO_2e) nell'atmosfera³; i assume il valore della classe d'uso del suolo; j equivale alla quantità stoccabile dalle diverse riserve naturali qc ; S rappresenta la superficie territoriale della classe d'uso del suolo di riferimento i .

Codice	Descrizione	Estensione territoriale (ha)	Quantità stoccabile (<i>carbon pools</i>) (Mg/ha)	Valore biofisico (tot.) (Mg of C)
1	Superficie forestale	470	143	=D4*E4
2.1	Terreno coltivabile	7422	58	431197
2.2.1	Frutteti, vigneti, vivai	1204	62	74742
2.2.2	Piantagioni forestali	26	99	2580
3.1	Praterie naturali	249	79	19648
3.2	Altri terreni boschivi	56	70	3921

Figura 10. Quantificazione del valore biofisico mediante il modello semplificato *Excel* “Stoccaggio e Sequestro di Carbonio”. Elaborazione propria degli autori.

Codice	Descrizione	Estensione territoriale (ha)	Quantità stoccabile (<i>carbon pools</i>) (Mg/ha)	Valore biofisico (tot.) (Mg of C)	Valore economico parametrico (€/Mg)	Valore economico (tot.) (€)
1	Superficie forestale	470	143	67425	68	=F4*G\$4
2.1	Terreno coltivabile	7422	58	431197		29312748
2.2.1	Frutteti, vigneti, vivai	1204	62	74742		5080987
2.2.2	Piantagioni forestali	26	99	2580		175357
3.1	Praterie naturali	249	79	19648		1335676
3.2	Altri terreni boschivi	56	70	3921		266520

Figura 11. Quantificazione del valore economico mediante il modello semplificato *Excel* “Stoccaggio e Sequestro di Carbonio”. Elaborazione propria degli autori.

Nel presente caso, abbiamo utilizzato i dati ottenuti, con riferimento a quelli del 2023, dal *tool* di InVEST per il comune di Cuneo per effettuare un confronto utile a verificare la trasparenza e l'attendibilità degli esiti del presente metodo (Tabella 14).

Tale sperimentazione embrionale ha condotto a risultati soddisfacenti, come è possibile osservare in Tabella 14, con valori che si discostano da quelli raggiunti mediante InVEST dello 0,05% (soglia considerata ampiamente accettabile).

Tabella 14. Restituzione valutazioni biofisiche relative al 2023 e delle differenze, in termini percentuali, tra i diversi metodi di calcolo.

Software	Valore biofisico (ton)	Differenza percentuale	
Simulsoil	576.977,00		
InVEST	599.225,30	+3,86%	Rispetto a Simulsoil
Modello semplificato (<i>Excel</i>)	599.511,94	+0,05%	Rispetto ad InVEST

³ <https://tradingeconomics.com/commodity/carbon> (nel presente caso, con particolare riferimento ai costi del giorno 01/04/2025).

5.4.2 Proposta di calcolo del potenziale ricreativo: modello complementare e semplificato

Oltre alla sperimentazione del modello semplificato, il lavoro mirava a predisporre un ulteriore approccio metodologico per la valutazione del potenziale ricreativo associabile all'insieme degli spazi verdi e naturali, in funzione dei parametri inerenti all'accessibilità, quali rete stradale, morfologia territoriale (classi di pendenza) e distanze utili raggiungibili. L'esistenza stessa degli spazi verdi urbani è costantemente minacciata dall'intensificarsi dei processi di urbanizzazione della città contemporanea, mentre il livello di accessibilità ad essi correlato contribuisce a generare significative disparità nella qualità della vita e nel benessere dei cittadini. La presente sperimentazione si propone di definire una rappresentazione funzionale della relazione esistente tra l'accessibilità urbana, intesa come infrastruttura capace di modulare i comportamenti ed i flussi di mobilità dei cittadini, ed il livello di fruibilità degli spazi naturali e seminaturali.

Lo sviluppo del presente approccio risponde alla necessità di superare le principali criticità riscontrate nell'uso operativo degli strumenti attualmente disponibili. In particolare, i modelli "Accesso alla Natura in Ambiente Urbano" e "Visite: Ricreazione e Turismo", integrati nel tool InVEST, presentano una limitata applicabilità, dovuta principalmente alla limitata disponibilità dei dati di input richiesti e all'elevato grado di complessità delle procedure di calcolo. Il modello "Accesso alla Natura in Ambiente Urbano", ad esempio, si fonda su un'articolata integrazione di variabili eterogenee, che richiedono la combinazione di informazioni relative alla distribuzione della popolazione, alla configurazione delle aree verdi accessibili e alla struttura della rete di mobilità, necessaria per la stima dei tempi o delle distanze di percorrenza. Tale impostazione implica l'elaborazione congiunta di dataset con diversa natura e scala spaziale, la cui integrazione introduce una significativa complessità procedurale. La definizione delle soglie di accessibilità contribuisce inoltre ad ampliare il livello di articolazione metodologica, incidendo sulle modalità di rappresentazione e interpretazione dei risultati. Analogamente, il modello "Visite: Ricreazione e Turismo" si fonda su informazioni indirette, tra cui proxy derivati da fotografie georeferenziate e contenuti provenienti dai social media, oltre che su diversi layer GIS relativi alle caratteristiche ambientali e infrastrutturali. La disponibilità e la qualità di tali dati risultano variabili, incidendo sull'affidabilità e sulla coerenza dei risultati.

Inoltre, entrambi i modelli sono privi di un modulo integrato per la valutazione economica, elemento che ne limita significativamente l'impiego nei processi decisionali, in particolare nell'ambito delle analisi costi-benefici.

Con riferimento al modello alternativo sviluppato nell'ambito della presente ricerca, la quantificazione del potenziale ricreativo è avvenuta seguendo un complesso *iter* procedurale schematizzato di seguito (Figura 12), il quale teneva conto dei seguenti parametri rilevanti: destinazioni d'uso a valore ricreativo, sistema infrastrutturale viario, pendenza del terreno.

In una prima fase, sono state definite, a partire dalle destinazioni d'uso fornite della LCP, le aree con maggiore valore ricreativo, suddivise nel seguente modo: boschi, zone umide, fiumi e verde urbano. Successivamente, è stato identificato il sistema infrastrutturale viario del comune di Cuneo, ridefinito e riclassificato in funzione delle classi di pendenza che caratterizzano la morfologia territoriale. Questi passaggi hanno condotto all'individuazione e alla delimitazione delle aree con valore ricreativo accessibili, attraverso il sistema infrastrutturale viario esistente, e alla loro maggiore o minore fruibilità. La fase operativa seguente ha condotto alla riorganizzazione funzionale delle aree con valore ricreativo accessibili, secondo il criterio rappresentato dalle classi di pendenza in cui esse ricadono. Contemporaneamente, è avvenuto il rilevamento, l'individuazione e la selezione delle principali centralità considerate come punto nevralgico di partenza; tale analisi ha condotto alla definizione della stazione di Cuneo quale principale centralità urbana, in base alle proprie caratteristiche funzionali e strategiche.

Di conseguenza, sono state definite e perimetrate le aree con valore ricreativo facilmente raggiungibili dal centro urbano entro classi temporali di ordine inferiore all'ora (Figura 13). In ultima fase, la sovrapposizione delle aree con valore ricreativo facilmente raggiungibili dal centro urbano con le relative classi di inclinazione (o pendenza) che caratterizzano il territorio ha permesso di rappresentare il grado di fruibilità di ogni area avente valore ricreativo.

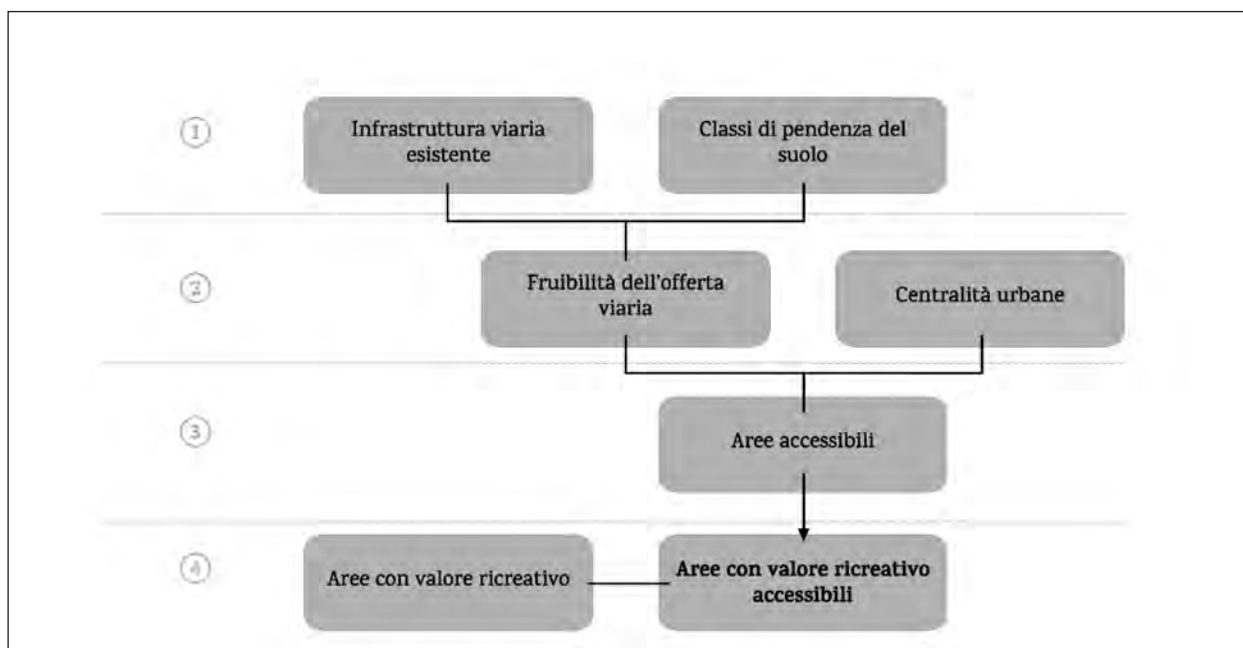


Figura 12. Sintetizzazione schematica delle fasi procedurali della metodologia sviluppata.

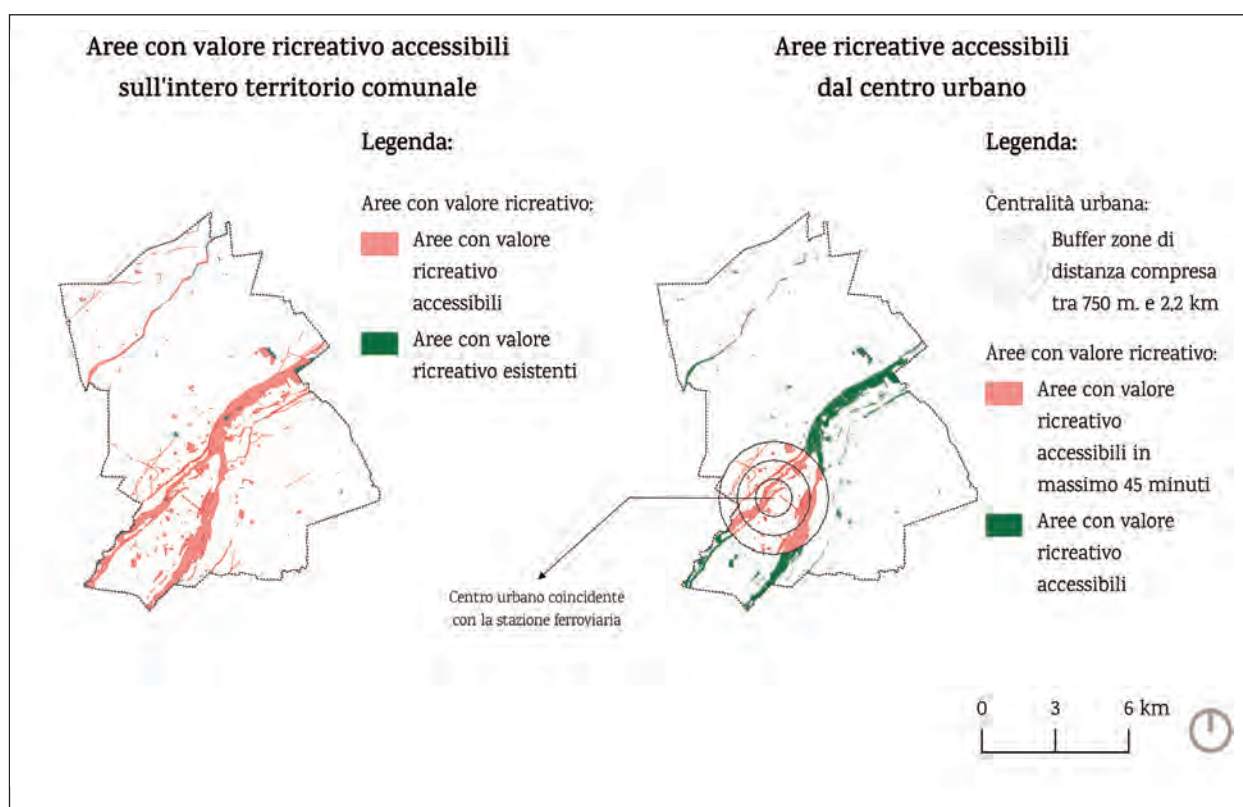


Figura 13. Definizione delle aree con valore ricreativo esistenti, accessibili ed accessibili in massimo 45 minuti dal centro urbano (modello personalizzato).

Gli esiti dell'operazione hanno condotto all'attribuzione di coefficienti numerici per ogni area con valore ricreativo analizzata. Tali coefficienti numerici risultano essere fondamentali per la riuscita del modello poiché consentono di attribuire tassi di rivalutazione (compresi in un intervallo che oscilla tra il -30% ed il +30%) utili alla determinazione del valore economico di ogni area. Que-

st'ultimo procedimento è avvenuto attraverso l'attribuzione di un valore parametrico, basato su quotazioni presenti in letteratura, capace di restituire un'approssimazione del valore medio per visita ricreativa (95 €/ha/anno), generalizzato (Quintano & Barredo, 2015; Schägner et al., 2016).

La procedura di calcolo personalizzata inerente all'accessibilità alle aree verdi urbane e naturali ha permesso di identificare, sul territorio di Cuneo, circa 934 ha di aree caratterizzate da elevato valore ricreativo (Figura 13). Soltanto il 44,53% (415,88 ha) di queste aree risulta essere accessibile in un *range* temporale di 45 minuti dal centro cittadino e, tra queste, quelle che rientrano nella categoria "massima ricreazione" rappresentano soltanto il 9,10% del totale. Lo sviluppo completo del modello ha condotto alla definizione di un valore economico totale su base annua (Figura 14), legato al grado di accessibilità alla natura urbana, pari a €41.204,21.

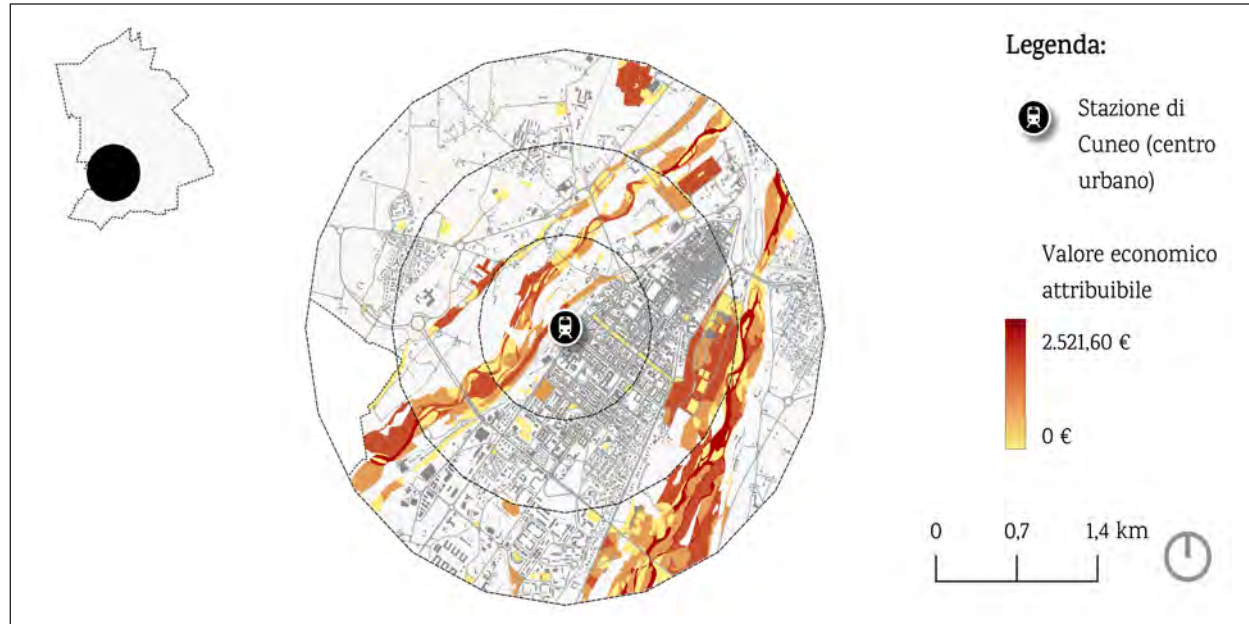


Figura 14. Valore economico legato al grado di accessibilità alla natura urbana.

Anche in questo caso, è stata prefigurata un'ulteriore procedura di calcolo semplificata per lo stesso SE, basata su tabelle di calcolo *Excel*, utile a restituire esiti immediati circa la valutazione economica del valore ricreativo associabile alle aree naturali ed urbane. La necessaria semplificazione richiesta implica, inevitabilmente, anche una riduzione del numero di variabili da considerare per la ridefinizione del valore effettivo ricreativo. L'unico parametro utilizzato è rappresentato dalla distanza del centro urbano, a scapito delle classi di pendenza del territorio e della viabilità esistente. Mediante questo approccio, tuttavia, una volta individuate e quantificate le aree con valore ricreativo accessibili in classi temporali inferiori a 45 minuti dal centro urbano, è possibile ottenere una stima monetaria moltiplicando la superficie territoriale (ha) per il valore economico parametrico (€/ha) stabilito in precedenza, applicando un coefficiente rivalutativo (compresi in un intervallo tra il -30% ed il +30%) basato essenzialmente sulle tempistiche di percorrenza prima definite. Tali esiti sono stati raggiunti mediante la seguente formula (2):

$$VR = V * \sum_{i=1}^n S_i * (1 - c) \quad (2)$$

In cui i assume il valore della classe d'uso del suolo; S rappresenta la superficie territoriale della classe d'uso del suolo di riferimento i ; c esprime il coefficiente di rivalutazione percentuale determinato in base alla distanza dal centro urbano; infine V corrisponde al valore parametrico economico.

Il presente modello di calcolo semplificato, basato essenzialmente su un unico parametro (distanza dal centro), ha riportato e restituito valori economici annui minori, i quali si attestano su €32.511,47 (Figura 15).

Categoria	Estensione territoriale (ha)	Coefficiente di rivalutazione (incremento %)	Valore economico parametrico (€/ha/anno)	Valore economico (€/anno)
Aree accessibili in massimo 15 minuti	40	30%	95	$=C3*(1+D3)*\$E\3
Aree accessibili in 16 ÷ 30 minuti	96	15%		10525
Aree accessibili in 31 ÷ 45 minuti	180	0%		17102

Figura 15. Valore economico legato al grado di accessibilità alla natura urbana mediante calcolo semplificato.

6. Discussione e conclusioni

Il presente contributo ha illustrato l'applicazione, ad un caso specifico, di diversi *tool* esistenti per la valutazione biofisica ed economica dei SE. Quest'analisi comparativa ha permesso, da una parte, di proporre modelli semplificati derivanti dalla razionalizzazione delle procedure esistenti, spesso complesse e di difficile accesso. Questi modelli aprono a nuove prospettive per l'adozione di *standard* condivisi e aggiornabili nel tempo, migliorandone l'accessibilità senza compromettere la robustezza analitica. Dall'altra, la ricerca ha prodotto una procedura di calcolo complementare, in grado di integrare e tradurre, in una prospettiva di mercato, valori complessi e fino ad ora poco interpretabili, fornendo così uno strumento operativo di elevata rilevanza applicativa e potenziale impatto decisionale.

Le riflessioni di carattere metodologico, unitamente agli esiti applicativi emersi, hanno consentito di delineare un insieme articolato di raccomandazioni operative, potenzialmente indirizzabili alle amministrazioni locali nell'ottica di una gestione più consapevole e integrata del territorio. Un primo ambito d'intervento afferisce all'istituzione di un sistema organico e continuativo per la raccolta e l'aggiornamento dei dati territoriali, considerato quale condizione preliminare e imprescindibile per garantire un monitoraggio efficace dell'evoluzione dei SE e per orientare le strategie urbane secondo logiche fondate su evidenze empiriche. In tale prospettiva, la predisposizione di *database* condivisi, strutturati su piattaforme GIS e arricchiti da indicatori aggiornati con cadenza regolare, si configurerebbe come una vera e propria infrastruttura conoscitiva a supporto della *governance* locale. Un secondo ambito di rilevanza strategica potrebbe essere riconducibile all'inclusione sistematica della valutazione dei SE nei processi di pianificazione territoriale e progettazione urbanistica. L'impiego degli *output* generati da modelli valutativi (quali Simulsoil, InVEST o loro declinazioni semplificate e integrabili in ambiente GIS) renderebbe possibile l'analisi critica di scenari alternativi di trasformazione del suolo, mettendo in evidenza le implicazioni ambientali, ecologiche ed economiche connesse a ciascuna ipotesi di intervento. Tali strumenti, una volta integrati nei processi decisionali, assumerebbero un ruolo determinante nel supportare, su base tecnica, la giustificazione delle scelte localizzative, orientandole verso soluzioni capaci di massimizzare la produzione di benefici ecosistemici e di contenere, al contempo, le esternalità negative derivanti dalla pressione antropica. Parallelamente, si rivelerebbe opportuno definire un quadro strutturato di indicatori-obiettivo, concepito al fine di guidare le politiche urbane e valutarne l'efficacia nel medio-lungo periodo. Tali indicatori riguarderebbero, a titolo esemplificativo, la dotazione minima di spazi verdi accessibili entro determinate soglie temporali, la capacità di sequestro del carbonio su base pro-capite, o ancora la progressiva riduzione dell'estensione delle superfici impermeabili. Il loro ancoraggio a metriche economiche ne consentirebbe una valutazione tangibile, traducibile in termini di risparmio energetico, promozione della salute pubblica e rafforzamento dell'attrattività e competitività urbana. Non di minore rilevanza sarebbe la dimensione della partecipazione attiva e della

comunicazione pubblica, aspetti fondamentali nella costruzione di processi decisionali trasparenti e inclusivi. L'inclusione strutturata degli *stakeholder* locali e della cittadinanza, mediante percorsi deliberativi formalizzati e l'adozione di strumenti di rappresentazione cartografica e visuale, consentirebbe di rendere più immediatamente intellegibili i benefici derivanti dalla presenza e valorizzazione dei SE, come la mitigazione delle isole di calore, la riduzione dei consumi energetici e la maggiore fruibilità degli spazi aperti. Tali pratiche partecipative contribuirebbero in misura significativa a rafforzare la legittimazione democratica delle scelte urbanistiche e a promuovere una più ampia condivisione sociale degli obiettivi strategici connessi alla trasformazione urbana.

A partire dalle evidenze discusse in precedenza, considerando quanto emerso nelle fasi precedenti del lavoro, risulta opportuno identificare alcuni orientamenti strategici per il proseguimento delle attività volte ad un eventuale sviluppo del presente lavoro o, più in generale, all'applicazione della proposta metodologica ad altri contesti urbani per verificarne l'appropriatezza e la replicabilità. Le valutazioni dei SE si fondano su dati territoriali la cui qualità e coerenza influenzano in modo sostanziale la precisione e la replicabilità dei modelli. In tale contesto, le mappature d'uso e copertura del suolo costituiscono un elemento imprescindibile nella modellizzazione, ma presentano limiti metodologici rilevanti. Tra questi, la disomogeneità nei sistemi di classificazione del suolo rappresenta un ostacolo significativo, poiché compromette la coerenza nell'attribuzione delle classi d'uso e ostacola l'integrabilità dei dati su scale territoriali differenti. Tale eterogeneità riduce la comparabilità tra *dataset* provenienti da fonti diverse, minando l'affidabilità complessiva delle analisi. Questa frammentazione classificatoria si somma a ulteriori criticità, quali la risoluzione spaziale spesso inadeguata e la frequenza non sistematica degli aggiornamenti, con effetti negativi sulla capacità dei modelli di cogliere le dinamiche temporali della copertura del suolo e, conseguentemente, sull'accuratezza delle valutazioni ecosistemiche. Come già evidenziato, il progetto si configura come un'iniziativa a carattere sperimentale, che richiede ulteriori approfondimenti tematici e un'integrazione di dati più specifici, in grado di riflettere adeguatamente le peculiarità dei diversi contesti urbani. Tali sviluppi conoscitivi risultano essenziali per consolidare i risultati finora conseguiti, rafforzando al contempo la coerenza metodologica e l'affidabilità complessiva dell'analisi. Parallelamente, sarà fondamentale orientare gli sforzi futuri verso la definizione di metodologie di calcolo semplificate, applicabili a un numero più ampio di SE.

Riconoscimenti

L'articolo è il risultato di un'attività di ricerca condotta durante il periodo di tirocinio curriculare presso il Dipartimento di Interateneo di Scienze, Progetto e Politiche del Territorio (DIST) del Politecnico di Torino.

Contributo degli autori

Il lavoro va attribuito in parti uguali agli autori.

Bibliografia

- Agenzia Europea dell'Ambiente. (2023, 16 novembre). Le ondate di calore e altri fenomeni estremi legati al clima minacciano la salute, soprattutto delle persone più vulnerabili. Retrieved August 23, 2025, from <https://www.eea.europa.eu/it/segnali/segnali-2023/articoli/le-ondate-di-calore-e>
- Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale. (2025). *Banca dati storica*. https://www.arpa.piemonte.it/rischi_naturali/snippets_arpa_graphs/map_meteoweb/?rete=stazione_meteorologica
- Alongi F. (2020). *I Servizi Ecosistemici come fattori strutturanti per la città contemporanea* [Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino]. <https://webthesis.biblio.polito.it/13562/>
- Assennato F. (2018). *Il suolo conteso: potenzialità e limiti della valutazione dei servizi ecosistemici nella pianificazione locale* [Tesi di Dottorato, Università di Roma La Sapienza]. <https://tesidottorato.depositolegale.it/handle/20.500.14242/98186>

- Assumma V. & De Luca C. (2024). Valutazione del valore dei paesaggi culturali attraverso l'integrazione di valutazione biofisica-economica, valutazione del rischio e analisi costi-benefici. In O. Gervasi B. Murgante C. Garau D. Taniar A. M. A. C. Rocha & M. N. Faginas Lago (Eds.), *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2024 Workshops* (Lecture Notes in Computer Science, vol. 14822, pp. 78–93). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-65318-6_6
- Bagstad K.J., Semmens D.J., Waage S. & Winthrop R. (2013). A comparative assessment of decision-support tools for ecosystem services quantification and valuation. *Ecosystem Services*, 5. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.07.004>
- Birch J.C., Thapa I., Balmford A., Bradbury R.B., Brown C., Butchart S.H.M., Gurung H., Hughes F.M.R., Mulligan M., Pandeya B., Peh K.S.-H., Stattersfield A.J., Walpole M. & Thomas D.H.L. (2014). What benefits do community forests provide, and to whom? A rapid assessment of ecosystem services from a Himalayan forest, Nepal. *Ecosystem Services*, 8, 118–127. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.03.005>
- BirdLife International (n.d.). *Assessing ecosystem services – TESSA*. Retrieved August 23, 2025, from <https://birdlife-hatch.org/topics/30877/page/assessing-ecosystem-services-tessa>
- Blair J., Roldan C., Ghosh S. & Yung S.-H. (2017). Greening rail infrastructure for carbon benefits. *Procedia Engineering*, 80, 1716–1724. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.334>
- Boumans R., Roman J., Altman I. & Kaufman L. (2015). The Multiscale Integrated Model of Ecosystem Services (MIMES): Simulating the interactions of coupled human and natural systems. *Ecosystem Services*, 12, 30–41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.01.004>
- Cafagno M. & Cavalieri G. (Cur.). (2025). *Servizi ecosistemici e tutela giuridica dell'ambiente*. MIMESIS edizioni.
- Caprioli C., Bottero M., Zanetta E. & Mondini G. (2021). Ecosystem services in land-use planning: An application for assessing transformation scenarios at the local scale. In C. Bevilacqua F. Calabrò & L. Della Spina (Eds.), *New Metropolitan Perspectives. NMP 2020. Smart Innovation, Systems and Technologies* (Vol. 178, pp. 1332–1341). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48279-4_124
- Caprioli C., Dell'Anna F. & Fiermonte F. (2023). Renewable energy sources and ecosystem services: Measuring the impacts of ground-mounted photovoltaic panels. In O. Gervasi B., Murgante C., Garau D., Taniar A.M., A.C. Rocha & M.N. Faginas Lago (Eds.), *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2023 Workshops* (Lecture Notes in Computer Science, vol. 14108, pp. 393–406). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37117-2_29
- Castro A., García-Llorente M., Martín-López B., Palomo I. & Iniesta-Arandia I. Multidimensional approaches in ecosystem service assessment. In D. Alcaraz-Segura C. D. Di Biella & J. V. Straschnoy (Eds.), *Earth Observation of Ecosystem Services* (pp. 427–454). CRC Press.
- Christie M., Fazey I., Cooper R., Hyde T. & Kenter J.O. (2012). An evaluation of monetary and non-monetary techniques for assessing the importance of biodiversity and ecosystem services to people in countries with developing economies. *Ecological Economics*, 83, 67–78. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.08.012>
- Chung J., Kim J. & Sung K. (2024). Analysis of Heat Mitigation Capacity in a Coastal City using InVEST Urban Cooling Model. *Sustainable Cities and Society*, 113. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105669>
- Città di Cuneo. (2023). *Piano di azione per l'energia sostenibile e il clima (PAESC)*. http://www.cclimatt.eu/fileadmin/cclimatt/contents/file/PAESC_COMPLETO.pdf
- Città Metropolitana di Torino. (2018). *Simulsoil: Guida pratica* [Manuale tecnico]. Progetto LIFE SAM4CP. <http://www.cittametropolitana.torino.it/cms/fauna-flora-parchi/parchi-aree-protette/progetti-ed-interventi/life-sam4cp>
- Comitato per il Capitale Naturale. (2017). *Primo rapporto sullo stato del capitale naturale in Italia*. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare. Retrieved August 23, 2025, from <https://www.mase.gov.it/pagina/primo-rapporto-sullo-stato-del-capitale-naturale-italia-2017>
- Comune di Cuneo. (1946). *Piano regolatore generale comunale e di ampliamento – Relazione illustrativa (Allegato A)*. Comune di Cuneo.
- Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria. (2020). *Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio – Metodi e risultati della terza indagine (INFC 2015)*. <https://www.inventarioforestale.org>

- Costanza R. & Folke C. (1997). Valuing ecosystem services with efficiency, fairness, and sustainability as goals. In G. C. Daily (Ed.), *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems* (pp. 49-64). Island Press.
- Costanza R., D'Arge R. de Groot R.S., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V., 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, 253–260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Daily G.C. (Ed.) (1997). *Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems*. Island Press.
- De Groot R.S., Wilson M.A. & Boumans R.M.J. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41(3), 393–408. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00089-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00089-7)
- Delpy F., Pedersen Zari M., Jackson B., Benavidez R. & Westend (2021). Ecosystem Services Assessment Tools for Regenerative Urban Design in Oceania. *Sustainability*, 13. <https://doi.org/10.3390/su13052825>
- De Valck J., Beames A., Liekens I., Bettens M., Seuntjens P. & Broekx (2019). Valuing urban ecosystem services in sustainable brownfield redevelopment. *Ecosystem Services*, 35, 139-149. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.12.006>
- Di Cosmo L., Gasparini P. & Tabacchi G. (2016). A national-scale, stand-level model to predict total above-ground tree biomass from growing stock volume. *Forest Ecology Management*, 361, 269–276. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2015.11.008>
- Ding H. & Shi W. (2013). Land-use/land-cover change and its influence on surface temperature: a case study in Beijing City. *International Journal of Remote Sensing*, 34, 5503-5517. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2013.792966>
- Engel S., Pagiola S. & Wunder S. (2008). Designing payments for environmental services in theory and practice: An overview of the issues. *Ecological Economics*, 65, 663-674. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.03.011>
- European Commission Joint Research Centre. (2020). *Mapping and assessment of ecosystems and their services: An EU ecosystem assessment*. Publications Office of the European Union.
- Floris M. (2020). *I servizi ecosistemici nella pianificazione spaziale come strumenti interpretativi per la definizione di tassonomie territoriali innovative* [Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Cagliari]. <https://iris.unica.it/handle/11584/290552>
- Gasparini P., Di Cosmo L., Floris A. & De Laurentis (Eds.) (2022). *Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio – Metodi e Risultati della Terza Indagine*. Springer.
- Gómez-Baggethun E., de Groot R., Lomas P.L. & Montes C. (2009). The history of ecosystem services in economic theory and practice: From early notions to markets and payment schemes. *Ecological Economics*.
- Gómez-Baggethun E., Martín-López B., García-Llorente M. & Montes C. (2009). *Hidden values in ecosystem services. A comparative analysis of preferences outcomes obtained with monetary and non-monetary valuation methods* [Relazione a convegno]. DIVERSITAS Open Science Conference 2: Biodiversity and Society – Understanding Connections, Adapting to Change, Cape Town, South Africa.
- Gómez-Baggethun E. & Barton D.N. (2013). Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecological Economics*, 86, 235-245. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.08.019>
- Hagemann S. (2002). *An improved land surface parameter dataset for global and regional climate models* [Dataset]. Max Planck Institute for Meteorology. <https://doi.org/10.17617/2.2344576>
- Hamel P., Bosch M., Tardieu L., Lemonsu A., de Munck C., Nootenboom C., Viguié E., Lonsdorf E. Douglass J.A. & Sharp R.S. (2023). Calibrating and validating the InVEST urban cooling model: Case studies in France and the United States. *EGUsphere* [Preprint]. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-928>
- Iovino G. (2015) L'Italia consumata. Configurazioni e tendenze del land take. *Bollettino della Società Geografica Italiana*, 4, 491-514.
- Istituto Nazionale di Statistica. (2025). *Popolazione residente al 1° gennaio – Anno 2025*. Retrieved August 23, 2025, from <https://www.istat.it/>
- Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. (2024). *BIGBANG 8.0: Bilancio idrologico*

- nazionale [Dataset]. ISPRA. https://www.isprambiente.gov.it/pre_meteo/idro/BIGBANG_ISPRA.html
- Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. (2024). *Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici*. <https://www.snpambiente.it/temi/soilo/consumo-di-suolo-dinamiche-territoriali-e-servizi-ecosistemici-edizione-2024/>
- Kim G., Miller P.A. & Nowak D.J. (2018). Urban vacant land typology: A tool for managing urban vacant land. *Sustainable Cities and Society*, 36, 144-156. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2017.09.014>
- Lasserre B., Tognetti R. & Marchetti M. (2006). Problematiche di inventariazione del carbonio nella biomassa forestale ipogea. *Forest*, 3 (4), 542-554. <https://doi.org/10.3832/efor0415-0030542>
- Liekens I., Broekx S., Smeets N., Van der Biest K., Schaafsma M., De Nocker L., Meire P. & Cerulus T. (2013). The Ecosystem Services Valuation Tool and its Future Developments. In J. Sander N. Dendoncker & Keune H. (Eds.), *Ecosystem Services: Global Issues Practices* (pp. 249-262). Elsevier.
- Maebe L., Claessens H. & Dufrêne (2019). The critical role of abiotic factors and human activities in the supply of ecosystem services in the ES matrix. *One Ecosystem* 4:e34769. <https://doi.org/10.3897/oneeco.4.e34769>
- Marchetti M., Bertani R., Corona P. & Valentini R. (2012). Cambiamenti di copertura forestale e dell'uso del suolo nell'inventario dell'uso delle terre in Italia. *Forest*, 9 (1), 170-184. <https://doi.org/10.3832/efor0696-009>
- Marino D. (2020). Commodification o giustizia ambientale? I PES come strumento di governance del valore della natura. In D. Poli (Ed.), *I servizi ecosistemici nella pianificazione bioregionale* (pp. 87-96). Firenze University Press.
- Marion B. (2021). Measured and satellite-derived albedo data for estimating bifacial photovoltaic system performance. *Solar Energy*, 215, 321-327. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.12.050>
- Martino S. & Muenzel, D (2018). The economic value of high nature value farming and the importance of the Common Agricultural Policy in sustaining income: The case study of the Natura 2000 Zarandul de Est (Romania). *Journal of Rural Studies*, 60, 176-187. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2018.04.002>
- Masiero M., Amato G., Laghetto G., Murgese D., Perino M., Allocco M. & Cimini M. (2020). *Servizio di valutazione dei servizi ecosistemici nel territorio di Torino* [Rapporto Tecnico]. Etifor Srl & SEAcop. Comune di Torino. https://servizi.comune.torino.it/consiglio/prg/documenti1/atti/allegati/202002957_1_3.pdf
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: biodiversity synthesis*. World Resources Institute.
- Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. (2025, 5 maggio). *Capitale naturale e servizi ecosistemici*. Retrieved August 23, 2025, from <https://www.mase.gov.it/pagina/capitale-naturale-e-servizi-ecosistemici>
- Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. (2011). *IUTI - Inventario dell'uso delle terre d'Italia* [Dataset]. Geoportale nazionale. https://www.pcn.minambiente.it/geoportal/catalog/search/resource/details.page?uuid=m_amte%3A299FN3%3A0f4393f6-d2d7-484c-9290-32058182bf1a
- Muradian R., Corbera E., Pascual U., Kosoy N. & May P.H. (2010). Reconciling theory and practice: An alternative conceptual framework for understanding payments for environmental services. *Ecological Economics*, 69, pp. 1202-1208. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.11.006>
- Natural Capital Project. (2025). *INVEST user guide* (versione 3.16.1) [Manuale online]. Stanford University, University of Minnesota, Chinese Academy of Sciences, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund, Stockholm Resilience Centre & Royal Swedish Academy of Sciences. <https://storage.googleapis.com/releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/en/index.html>
- Natural England (2013). *Green Infrastructure - Valuation Tools Assessment (NECR126, ed. 1)*. Natural England.
- Oppio A., Caprioli C., Dell'Ovo M. & Bottero M. (2024). Assessing ecosystem services through a multimethodological approach based on multicriteria analysis and cost-benefits analysis: A case study in Turin (Italy). *Journal of Cleaner Production*, 472. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143472>

- Oppio A., Datola G., Oksuz T., Ozgur D. & Sdino L. (2024). Innovating urban systems through nature-based solutions for a circular economy enhancement: A general framework. In O. Gervasi B. Murgante C. Garau D. Taniar A. M. A. C. Rocha & M. N. Faginas Lago (Eds.), *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2024 Workshops* (Lecture Notes in Computer Science, vol. 14822, pp. 176–188). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-65308-7_13
- Oppio A., Dell'Ovo M., Caprioli C., Bottero M. & Datola G. (2023). Valutare i benefici dei servizi ecosistemici urbani: una proposta metodologica. *Laborest*, 26, 66–71. <https://doi.org/10.19254/LaborEst.26.10>
- Pagiola S. (2008). Payments for environmental services in Costa Rica. *Ecological Economics*, 65, 712–724. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.07.033>
- Pandit R. & Laband D.N. (2010). Energy savings from tree shade. *Ecological Economics*, 69, 1324–1329. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.01.009>
- Peh K.S.-H., Balmford A., Bradbury R.B., Brown C., Butchart S.H.M., Hughes, Stattersfield A., Thomas D. H. L., Walpole M., Bayless J., Gowing D., Jones J. P. G., Lewis S. L., Mulligan M., Pandeya B., Stratford C., Thompson J.R., Turner K., Willcock S. & Birch J.C. (2013). TESSA: a toolkit for rapid assessment of ecosystem services at sites of biodiversity conservation importance. *Ecosystem Services*, 5, 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.06.003>
- Pillari G. (2018). *La valutazione dei Servizi Ecosistemici forestali. Metodo e orientamenti per la pianificazione territoriale attraverso il caso studio della Valle Tanaro* [Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino]. <https://webthesis.biblio.polito.it/7817/>
- Poli D. (Ed.). (2020). *I servizi ecosistemici nella pianificazione bioregionale*. Firenze University Press.
- Qiao Z., Tian G. & Xiao L. (2013). Diurnal and seasonal impacts of urbanization on the urban thermal environment: A case study of Beijing using MODIS data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 85, 93–101. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.08.010>
- Rees W.E. (2018). Planning in the anthropocene. In M. Gunder A. Madanipour & V. Watson (Eds.), *The Routledge Handbook of Planning Theory* (pp. 53–66). Routledge.
- Rischia I., Di Leginio M., Fumanti F., Giandon P., Obber S. & Vinci I. (2010). Environmental indicators for Italian soils (SIAS project): Development of a new approach from regional to harmonised national data. *Italian Journal of Agronomy*, 5(s3), 103–110. <https://doi.org/10.4081/ija.2010.s3.103>
- Ronchi S., Salata S. & Arcidiacono A. (2020). Which urban design parameters provide climate-proof cities? An application of the Urban Cooling InVEST Model in the city of Milan comparing historical planning morphologies. *Sustainable Cities and Society*, 63. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102459>
- Quintano P.N. & Barredo J.I. (2015). *A database of the recreational value of European forests*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2788/142071>
- Sallustio L. (2014). *Monitoraggio dei cambiamenti d'uso del suolo e degli effetti sugli ecosistemi e sul paesaggio italiano* [Tesi di Dottorato, Università degli Studi del Molise].
- Sallustio L., Quatrini V., Geneletti D., Corona P. & Marchetti M. (2015). Assessing land take by urban development and its impact on carbon storage: Findings from two case studies in Italy. *Environmental Impact Assessment Review*, 54, 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.05.006>
- Santamouris M. (2014). Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 103, 682–703. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>
- Schägnier J.P., Brander L., Maes J., Paracchini M.L., Hartje V. (2016). Mapping recreational visits and values of European national parks by combining statistical modelling and unit value transfer. *Journal for Nature Conservation*, 31, 71–84.
- Schirone M. (2020). Ecosistemi, boschi e servizi ecosistemici. In D. Poli (Ed.), *I servizi ecosistemici nella pianificazione bioregionale* (pp. 65–85). Firenze University Press.
- Serra C. (2025). PES e accordi amministrativi. In M. Cafagno & G. Cavalieri (Cur.), *Servizi Ecosistemici e tutela giuridica dell'ambiente* (pp. 93–123). Mimesis Edizioni.
- Sherrouse B.C., Clement J.M. & Semmens D.J. (2011). A GIS application for assessing, mapping, and quantifying the social values of ecosystem services. *Applied Geography*, 31, 748–760. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.08.002>

- Terrado M., Sabater S., Chaplin-Kramer B., Mandle L., Ziv G. & Acuña V. (2016). Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning. *Science of the Total Environment*, 540, 63-70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.064>
- The Economics of Ecosystems and Biodiversity. (2010). *Mainstreaming the economics of nature: A synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB*. <https://www.teebweb.org/publication/mainstreaming-the-economics-of-nature/>
- Van Oijstaeijen W., Van Passel S. & Cools J. (2020). Urban green infrastructure: A review on valuation toolkits from an urban planning perspective. *Journal of Environmental Management*, 267. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110603>
- Vatn A. (2010). An institutional analysis of payments for environmental services. *Ecological Economics*, 69, 1245-1252. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.11.018>
- Vesely F.M. (2016). *Analisi e mappatura dei Servizi Ecosistemici a scala locale: applicazione dei Modelli InVEST nel Parco Oglio Sud* [Tesi di Laurea Magistrale, Università degli Studi di Padova]. <https://thesis.unipd.it/handle/20.500.12608/26231>
- Villa F., Ceroni M., Bagstad K., Johnson G. & Krivov S. (2009). ARIES (ARtificial Intelligence for Ecosystem Services): a new tool for ecosystem services assessment, planning, and valuation. *BioEcon*.
- Zawadzka J.E., Harris J.A. & Corstanje R. (2021). Assessment of heat mitigation capacity of urban greenspaces with the use of InVEST urban cooling model, verified with day-time land surface temperature data. *Landscape and Urban Planning*, 214. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104163>
- Zen M. (2022, 5 settembre). *Valutazione e mappatura dei servizi ecosistemici*. *Equilibri Magazine*. Retrieved August 23, 2025, from <https://equilibrimagazine.it/scienza/2022/09/05/valutazione-e-mappatura-dei-servizi-ecosistemici/>



Bernardo Simonetti

DOWNLOAD
Normativa e
Fogli di calcolo

Acustica ambientale ed edilizia

Il Manuale del Tecnico Competente



Seconda Edizione

Aggiornata con

- UNI/TS 11844:2022
- DM Transizione ecologica
22 giugno 2022

- ✓ Requisiti del Tecnico Competente in Acustica (TCA)
- ✓ Acustica architettonica
- ✓ Acustica nei luoghi di lavoro
- ✓ Acustica forense

dei
TIPOGRAFIA DEL GENIO CIVILE

www.build.it

dei
TIPOGRAFIA DEL GENIO CIVILE