

Mapping complexity and multidimensionality of Nature-Based Solutions in the urban context: a causal loop-based approach

Giulia Datola^{1,*}, Alessandra Oppio¹

¹ Department of Architecture and Urban Studies (DASU), Politecnico di Milano, Via Bonardi, 3, Milan 20133, Italy; giulia.datola@polimi.it; alessandra.oppio@polimi.it

* corresponding author

Keywords

Nature-Based Solution,
Ecosystem Services,
System thinking,
Complexity,
Multidimensionality,
Trade-off

Abstract

Nature-Based Solutions (NBS) are currently proposed and suggested as strategic solutions in urban areas to both promote actions to mitigate the effects of climate change and address environmental, social and economic challenges. Several studies have in-depth investigated the direct environmental impacts and benefits related by NBS implementation in urban environments. However, the existing literature reveals a proposal of systemic analysis of the complexity and multidimensionality of their effects, according to their multifunctional nature. In this context, this research proposes the use of the Causal Loop Diagram (CLD) as a tool to systematically represent the different dimensions and factors associated with the implementation of NBS in urban areas. As well, the cause-effect relationships between the variables involved will be mapped with a specific focus to direct and indirect benefits and potential trade-offs. The causal diagram also allows for the representation and analysis of overlooked aspects, such as avoided costs, supporting long-term assessments, consistent with the life cycle of the NBS intervention. The proposed application also highlights the central role of governance, particularly in managing possible trade-offs, for example in ensuring equitable access to the benefits provided by NBS. Therefore, the CLD represents a valuable tool to support the planning and management of this type of intervention, promoting a systemic and multi-perspective decision-making.

1. Introduction

Contemporary societies face multiple and complex challenges related to climate change, including extreme weather events, pressures on human health and well-being, food, water and energy security, and the depletion of natural capital (Faivre et al., 2017). These pressures are particularly relevant in urban areas, where a progressive worsening of climatic conditions has been observed in recent years. This scenario leads to increased socio-environmental vulnerability, underlying the necessity of adopting of effective solutions to mitigate climate change effects (Pellerey & Torabi Moghadam, 2025).

In this context, Nature-Based Solutions (NBS) are emerging as suitable and cost-effective

strategies at the European and international levels to support the transition towards more sustainable and resilient cities (Bayulken et al., 2021). The term NBS has been firstly introduced in 2008 by the World Bank (Leary et al., 2008) to promote sustainable development by addressing urban, social, economic and environmental challenges in an integrated manner (Castellar et al., 2021). This term is an umbrella concept, and both academia and public policy contexts have proposed different definitions. This research does not have the task of providing an exhaustive list of the proposed definitions over time. Therefore, this section reports the main definitions proposed by international and European reports, which have been selected according to their greater consensus achieved in literature and policy practice. The aim is to provide a general overview of the concept and highlight the complexity and multidimensionality that characterise NBS, which are fundamental elements for the analysis conducted in this research.

In 2015, the European Commission defined NBS as *“Solutions that are inspired and supported by nature, which are cost-effective, simultaneously provide environmental, social and economic benefits and help build resilience. Such solutions bring more, and more diverse, nature and natural features and processes into cities, landscapes and seascapes through locally adapted, resource-efficient and systemic interventions”* (European Commission, 2015). In 2016, the International Union for Conservation of Nature (IUCN) described NBS as *“Actions to protect, sustainably manage and restore natural or modified ecosystems that address societal challenges effectively and adaptively, simultaneously providing human well-being and biodiversity benefits”* (Emmanuelle Cohen-Shacham et al., 2016). Subsequently, IUCN introduced in 2020 the Global Standards to establish clearer criteria for defining NBS (International Union for Conservation of Nature, 2020).

In March 2022, the United Nations Environment Assembly (UNEA) of the United Nations Environment Programme (UNEP) proposed and adopted the first globally agreed definition of NBS, describing them as *“actions to protect, conserve, restore, and sustainably use ecosystems to address challenges while providing human well-being, resilience, and biodiversity benefits. These actions must provide simultaneous environmental, social, and economic benefits, and are adaptively managed while respecting social and environmental safeguards”* (United Nations Environment Programme, 2024).

These definitions consistently highlight the systemic and multidimensional approach of NBS to address social, economic and environmental challenges, with a perspective of sustainable and resilient development rooted in biodiversity. NBS are based on the implementation of natural processes to simultaneously tackle environmental, social and economic challenges, contributing to both climate change mitigation and adaptation, while generating multiple co-benefits (Dumitru et al., 2020; Goodwin et al., 2023).

The literature has widely discussed the potential of NBS to improve the quality of life, promote socio-spatial equity, and improve the sense of belonging to places for the community (Dumitru et al., 2020; Kabisch et al., 2016). In this regard, the IUCN defines that NBS can effectively contribute to face seven major global challenges (International Union for Conservation of Nature, 2020), such as:

1. climate change mitigation and adaptation;
2. disaster risk reduction;
3. economic and social development;
4. human health;
5. food security;
6. water security;
7. reversing environmental degradation and biodiversity loss.

Regarding the implementation of NBS in urban areas, these can be introduced at different scales (Bona et al., 2022): the macro-scale, relating to the entire municipal territory or supra-municipal areas; the meso-scale, referring to the neighborhood level; and the micro-scale, which affects individual buildings or lots.

Among the most common solutions in urban areas, it is possible to list green roofs, rain gardens, artificial urban wetlands and urban forestry, which can provide Ecosystem Services (ES) such as urban temperature regulation, stormwater management, air purification, improved physical and mental well-being, and social cohesion (Dumitru et al., 2020; Keesstra et al., 2018).

This research aims to analyse the complexity, multidimensionality and multifunctionality of NBS that can be implemented at the meso-scale in urban areas through a systemic approach. This specific category of NBS will be analysed through the Causal Loop Diagram (CLD) to graphically represent the system complexity and map the multidimensional causal dynamics that characterise interactions between natural, social and built capital, highlighting both synergies and possible trade-offs.

1.1 Motivations and objectives

Although the literature has widely recognised the complex and multidimensional nature of NBS, the representation of these characteristics and of the causal relationships between their different dimensions remains limited and fragmented, particularly in terms of systemic approaches (Dumitru et al., 2020; Fang et al., 2024; Sowińska-Świerkosz & García, 2022). In this regard, several frameworks highlight the importance and necessity of analysing the multiple impacts generated by the implementation of NBS (Kabisch et al., 2016; Nesshöver et al., 2017). However, the application of evaluation approaches and methods capable of systematically mapping interactions among environmental, social and economic dimensions, highlighting cause-effect relationships, synergies and trade-offs, remains very limited (Dumitru et al., 2020; Fang et al., 2024).

The study proposed by Dumitru and colleagues (2020) highlights how the limited conceptualisations of the relationships between NBS and their multiple types of impacts represent one of the main issues of the existing literature (Dumitru et al., 2020). Furthermore, the study proposed by Fang and colleagues (2024) emphasises that most research focuses on individual NBS and specific environmental challenges, without providing a systemic perspective on the relationships among different impacts or on the interconnections between the sustainability challenges that NBS intend to address (Fang et al., 2024). A further limitation concerns the systematic analysis of the benefits and disservices generated by NBS. Although the literature recognises the existence of synergies and trade-offs between different impact dimensions, for example between environmental and social impacts or between ecological benefits and economic costs, such relationships are rarely documented in the context of NBS implementation (Mexia et al., 2018). In most cases, benefits and trade-offs are analysed separately, without an integrated representation capable of capturing and explaining the interactions among the dimensions involved, while highlighting synergies and trade-offs (Kabisch et al., 2016). In this regard, Dumitru et al. (2020) state “*A clear delineation of impacts of nature-based solutions, of synergies and trade-offs between different types of impacts, and robust, flexible and cost-effective methods for their monitoring and evaluation are essential to building an evidence base for their performance in cities*” (Dumitru et al., 2020).

Based on this evidence and critical issues, the present research aims to propose a representation of the complexity and multidimensionality associated with the implementation of NBS in urban areas through a systemic approach. Therefore, it proposes the use of the CLD tool to comprehensively map: (1) the cause-effect relationships among the different dimensions involved, and (2) the synergies and trade-offs between environmental, social and economic impacts. This research further aims to propose a methodological framework (Fang et al., 2024) to support a systemic understanding of the NBS implementation in urban contexts at the meso-scale. This framework can serve as a valuable tool for the strategic design and planning of NBS interventions.

¹ Dumitru et al., 2020; p. 108.

2. Methodology

2.1 System Dynamics Model

Systems Thinking is a method for analysing the dynamic behaviour of complex systems using a systemic approach, representing the system as a whole rather than a sum of its parts (Bala et al., 2017). The System Dynamics Model (SDM) is a tool based on the System Dynamics (SD) approach, introduced by Forrester for improving the understanding of complex systems (Alfeld et al., 1976; J W Forrester, 1990; Jay W. Forrester, 1968). This approach is based on the concept of feedback, which enables the management of non-linear behaviours of complex systems. Specifically, SDM is both a theoretical and computer-aided tool. This tool is applied to analyse complex and dynamic systems by identifying the mutual interdependencies between variables (Rouwette & Vennix, 2006; Sterman, 2000). Furthermore, SDM is also applied to model and simulate the potential diachronic evolution of complex systems. Therefore, SDM is considered an effective tool for analysing the potential evolution of a system over time under specific conditions, supporting the definition of development strategies based on their short-, medium- and long-term effects (Guan et al., 2011; Tan et al., 2018).

The SDM methodology structures the representation, analysis and simulation of a system into six main phases:

1. definition of the problem and selection of relevant variables;
2. development of a dynamic hypothesis explaining the cause of the problem;
3. creation of the basic structure using a causal diagram;
4. argumentation of the causal diagram with additional information;
5. conversion of the detailed causal diagram into a flow diagram;
6. translation of the flow diagram into the SDM model.

2.1.3 Causal Loop Diagram (CLD)

As discussed in the previous sections, this research aims to develop a CLD for NBS to be implemented at the meso-scale in urban areas. Following the SD methodology, once the initial phase of problem definition and selection of relevant variables is completed, the next phase involves developing the cause-effect diagram. The CLD thus represents the structure of the analysed complex system, highlighting the cause-effect relationships among its different elements and enabling the identification of feedback loops (Bala et al., 2017).

Figure 1 illustrates a generic CLD structure, identifying the key elements of this type of representation. As shown in Figure 1, the relationships among the system elements can be either positive or negative. A positive relationship implies that the two variables will change in the same direction; for example, if A increases, B will also increase. Conversely, a negative relationship indicates an inverse change: if C increases, B will decrease. Another fundamental component of a CLD diagram is the loop, which represents a closed causal cycle in which a series of elements are linked by cause-effect relationships that influence each other, ultimately returning to the starting point. Loops are the distinctive feature of CLDs, which enables the visualisation of feedback mechanisms that determine the diachronic evolution of a system.

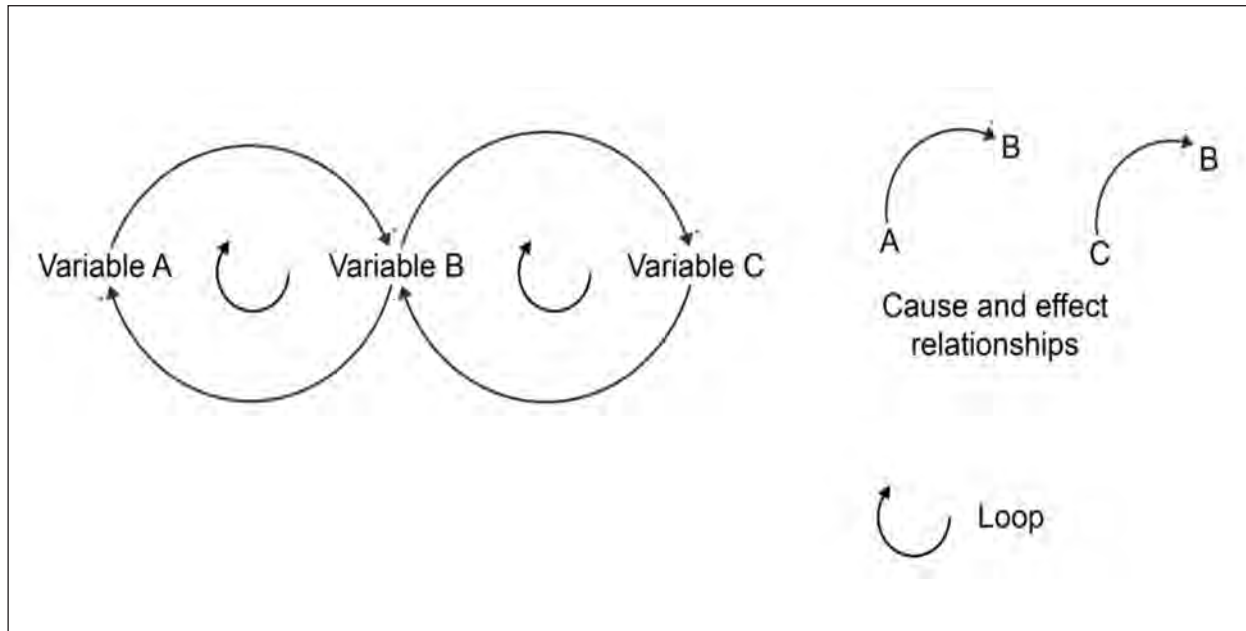


Figure 1. Basic structure of the causal loop diagram.

Two types of loops can be identified (Meadows & Wright, 2008; Sterman, 2000):

- Reinforcing loop (R): positive cycle in which a change in a variable tends to amplify over time;
- Balancing loop (B): negative cycle that tends to stabilise the system, contrasting the change.

The construction of a CLD typically involves the following steps:

1. define the problem and objectives;
2. identify the most important elements of the system (primary variables);
3. identify the secondary elements of the system;
4. identify the tertiary elements of the system;
5. define the cause-effect relationships.

3. Application

3.1 Definition of the dimensions and variables involved in the implementation of NBS in urban areas

As illustrated in the previous sections, this research focuses on the analysis of NBS that can be implemented at the meso-scale in urban areas. For this purpose, a review of scientific and grey literature was conducted to identify the main dimensions and key factors involved in NBS implementation processes (Bozovic et al., 2017; Emmanuelle Cohen-Shacham et al., 2016; Coletta et al., 2021; Dumitru et al., 2020; European Commission, 2020, 2021; Faivre et al., 2017; Fonseca et al., 2022; Gholipour et al., 2023; R Giordano et al., 2020; Raffaele Giordano et al., 2025; Gómez Martín et al., 2020; Goodwin et al., 2024; Kabisch et al., 2016; Raymond et al., 2017). In accordance with the SDM methodology, this review enables the definition of the system boundaries concerning the topic under analysis, as well as the identification of the main urban challenges addressed by NBS. The obtained results represent the conceptual basis for modelling the process of NBS implementation at the meso-scale in urban areas through the CLD.

Figure 2 illustrates the methodological framework adopted to develop the CLD in this study.

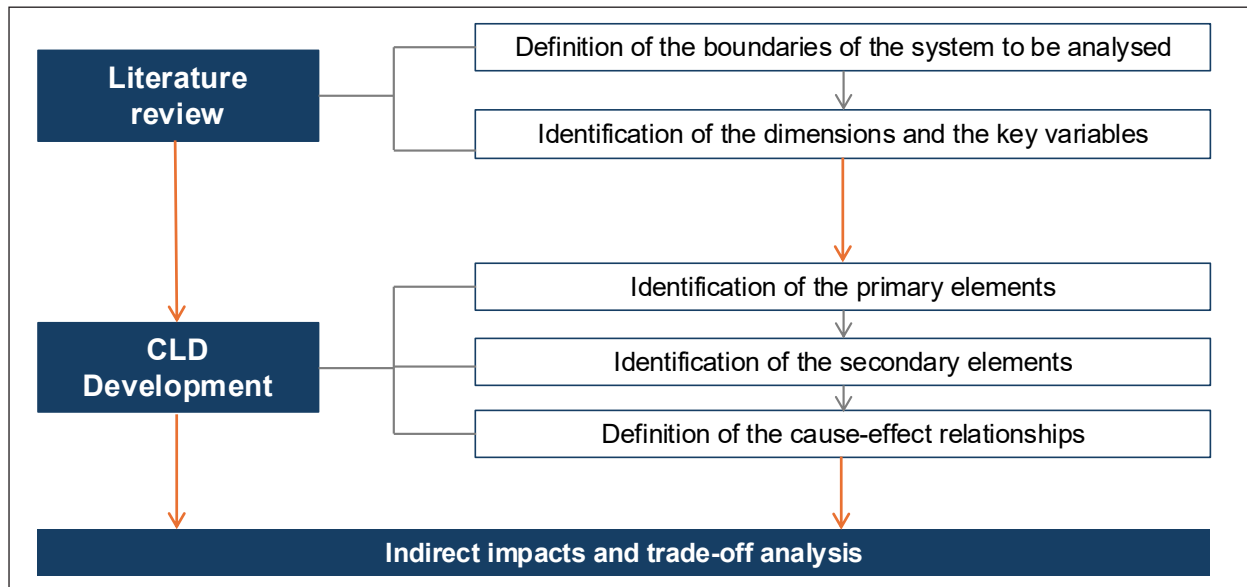


Figure 2. Methodological framework.

Table 1 lists the main dimensions and related key elements concerning the process of NBS implementation at the meso-scale in the urban context.

Table 1. Dimensions and key factors for NBS implementation in the urban context. Elaboration from: European Commission (2015); Cohen & Shacham (2017); Raymond et al. (2017); Kabisch et al. (2016)

Dimensions	Key elements
Environment	Climate change mitigation Disaster risk reduction Urban Ecosystem Services and biodiversity Water management and water security Green areas management Air quality Urban regeneration Flood risk Water scarcity and water security
Economy	Implementation cost Cost of ordinary and extraordinary maintenance New green job Incentives for green interventions (green bond) Economic efficiency
Society	Participative process Social learning Social justice

² Since this research focuses on the analysis of NBS in urban areas at meso-scale, the category of “Urban Ecosystem Services”, i.e. the set of services provided by ecosystems in urban areas that contribute to improving the quality of life in cities has been selected as the main focus (Gómez-Baggethun et al., 2013). These ES can be classified into the following categories: (1) provisioning services, which include products obtained from ecosystems, such as food and water resources; (2) regulating services, which include all the benefits obtained from the regulation of ecosystem processes, such as climate regulation, water runoff control and air quality improvement; (3) cultural services, which consist of the intangible benefits provided by ecosystems that people obtain through cognitive development, psychological well-being, and social cohesion, in addition to their aesthetic and identity value; (4) support or habitat services, which are necessary for the maintenance of ecological functions and therefore for the production of all other ecosystem services.

The results obtained from the analysis (Table 1) underline an asymmetry among the different identified dimensions. The environmental dimension can be recognised as the most analysed and represented dimension, also due to the large availability of shared and robust indicators, as well as specific assessment tools to address the environmental impacts of NBS (Dumitru et al., 2020).

Although the economic and social dimensions are widely acknowledged as fundamental aspects in the implementation of NBS in urban contexts, they remain relatively underexplored. The economic dimension plays a crucial role in decision-making processes, especially concerning key aspects such as implementation and maintenance costs, the potential for job creation, and the capacity of NBS to attract green investment (Bouchmel et al., 2024).

However, these elements are rarely integrated into multidimensional assessment frameworks (Sowińska-Świerkosz & García, 2022). Moreover, the social dimension is often reduced to a limited number of variables, such as participation or social justice, despite the growing recognition of the potential of NBS to promote cohesion and inclusion (Kabisch et al., 2016; Raymond et al., 2009).

As outlined above, the dimensions and key elements listed in Table 1 were used as the conceptual foundation for the construction of the CLD (Figure 3). This approach enables the analysis of the complex systemic interactions among environmental, economic and social variables, providing a holistic and systemic representation of the benefits and potential trade-offs associated with the implementation of meso-scale NBS in urban regeneration processes.

Figure 3 represents the first outcome of the mapping process through the CLD, which permits the representation and analysis of the causal relationships and main trade-offs that emerged from the analysis of meso-scale NBS in urban areas. This CLD represents a preliminary tool that can be further refined and adapted to specific application contexts.

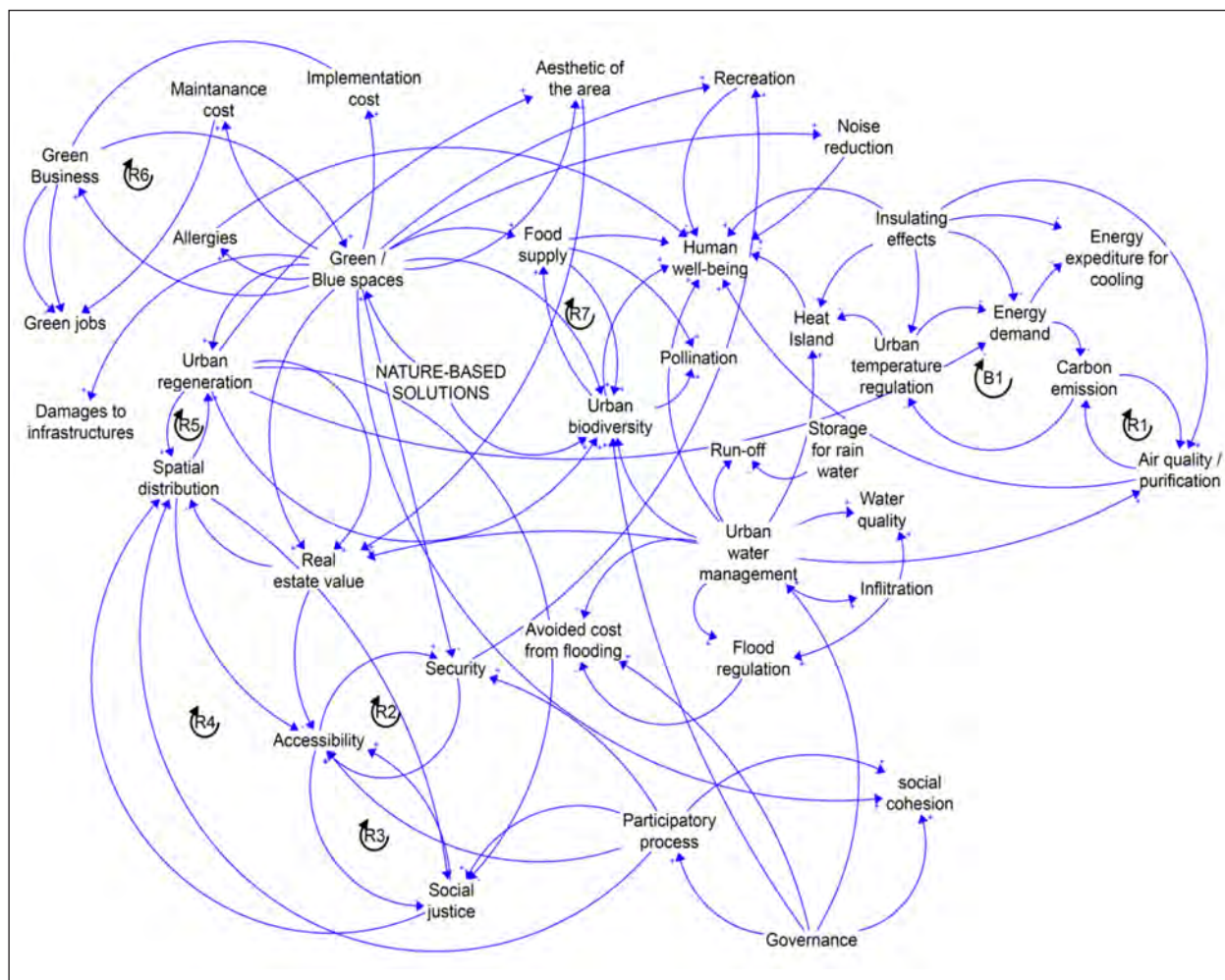


Figure 3. Causal loop diagram concerning NBS implementation at the meso-scale in the urban context.

Specifically, in this mapping, particular attention was given to the role of urban ES (Caprioli et al., 2020; Gómez-Baggethun & Barton, 2013), which represents a central component of the benefits provided by NBS. Indeed, the literature review underlines that the natural elements in urban areas, which constitute a multifunctional green infrastructure closely linked to human well-being and urban resilience (Gómez-Baggethun & Barton, 2013), such as trees and sustainable urban drainage systems, provide a range of ES. These include regulatory services (e.g., climate regulation, water runoff management), cultural services (e.g., recreation, identity), and support services (e.g., pollination and nutrient cycling). Therefore, variables related to urban ES are fundamental for explaining and understanding the relationships among natural, social and built capital in urban areas.

3.2 Causal Loop Diagram

Cities are complex, dynamic and adaptive systems (Douglas, 1981). Therefore, their multidimensional components mutually interact, determining their evolution over time. Similarly, NBS are complex, multidimensional and multifunctional solutions. Figure 3 represents the CLD developed to analyse and map the complexity, multidimensionality and causality among dimensions and key factors that characterise the NBS implementation process in urban areas. This representation permits the analysis of the cause-effect relationships between the different variables, as well as the identification of some indirect impacts. In general, the emerged patterns from the developed CLD (Figure 3) are aligned with the findings reported in the literature (Dumitru et al., 2020; Faivre et al., 2017; Raymond et al., 2017).

4. Results

The CLD shown in Figure 3 enables the analysis of the causal relationships among variables across environmental, economic, and social dimensions, as well as identifying the systemic interactions that can be activated by the implementation of NBS at the meso-scale in urban contexts. The CLD permits to underline several direct environmental benefits concerning the implementation of NBS in urban environments. In addition to enhancing biodiversity, the introduction of NBS contributes to the regulation of urban temperature and the consequent reduction of the Urban Heat Island (UHI) effect, the improvement of air quality, and the management of urban water, with related benefits for water purification, runoff regulation, and infiltration. Within these environmental effects, two loops can be identified: a reinforcing loop and a balancing loop. In particular, loop B1 represents a balancing mechanism that connects urban temperature regulation, energy demand for cooling, and carbon emissions. This cycle can be described as follows: the implementation of NBS enhances urban temperature regulation, thereby mitigating the UHI effect. This effect leads to a decrease in energy demand for building cooling, resulting in a reduction in carbon emissions. However, this dynamic can activate a self-regulation mechanism: reducing emissions further contributes to climate change mitigation, stabilising the system over time. Furthermore, the analysis of loop B1 clearly highlights the mutual interconnections among the different dimensions that characterise the implementation of NBS (environment, society, and economy). Specifically, the reduction in energy demand resulting from improved urban thermal regulation not only brings environmental benefits in terms of lower carbon emissions, but also promotes a better management of energy expenditure for building cooling. Therefore, this aspect introduces an indirect economic benefit, which can be particularly relevant for building users (businesses, families, public administrations). Thus, this systemic representation permits the analysis of the integrated and added value of NBS within urban adaptation and regeneration processes. On the other hand, Loop R1 refers to a reinforcing mechanism that connects carbon emissions and air quality, highlighting an important environmental synergy that can be activated by NBS and, more widely, by the natural capital.

However, the implementation of NBS in urban contexts can also generate ecosystem disservices, defined as “*ecosystem functions perceived as negative for human well-being*” (von Döhren & Haase,

2015). These disservices represent crucial environmental trade-offs that must be analysed and evaluated during the design phase of NBS interventions. For example, a relevant trade-off relates to public health. Indeed, some plant species can produce allergens that exacerbate the symptoms of asthma and other respiratory diseases (D'amato, 2000), while the presence of poorly lit or inadequately designed green areas can contribute to feelings of insecurity (Jorgensen & Anthopoulou, 2007). Furthermore, the implementation of natural elements in urban environments can cause direct or indirect damage to infrastructure. For example, root systems may deteriorate sidewalks and building foundations, resulting in not only structural but also economic damages. Overall, the CLD clearly illustrates that NBS, beyond generating environmental benefits, can also activate economic dynamics, highlighting the interdependence between ecological and socio-economic dimensions. Indeed, it is possible to underline how the increase in green and blue spaces can contribute to improving urban aesthetics and environmental quality, with a consequent increase in real estate values. Similarly, these interventions could stimulate the creation of green jobs and the development of green businesses, providing positive impacts on the local economy. However, the economic dimension is closely interconnected with the social dimension. Indeed, an increase in real estate values may have negative effects on spatial equity, contributing to the phenomenon of green gentrification (Dell'Ovo et al., 2026).

Regarding the social dimension, the diagram (Fig. 3) highlights a network of relationships linking NBS to variables related to social cohesion, social justice, accessibility, safety, participation, and well-being. Loop R3 shows how the creation of accessible and well-designed green spaces promotes spatial justice, particularly when embedded with participatory decision processes. Similarly, loop R2 demonstrates that the implementation of accessible spaces reinforces the perception of safety. However, it is important to consider that the implementation of NBS may generate varying levels of inequality, which can be mitigated and addressed during the design phase through the application of appropriate governance strategies and structures, as highlighted by the CLD itself (Fig. 3).

5. Discussion

The analysis conducted through the CLD permits the identification of the multiple dimensions of NBS impacts at the meso-scale in urban contexts. Firstly, it is necessary to underline that scientific literature has mainly focused attention on direct environmental impacts, such as climate change mitigation and microclimatic regulation (Emmanuelle Cohen-Shacham et al., 2016; Raymond et al., 2017). In this context, the study conducted by Dumitru and colleagues (2020) highlights that approximately 60% of publications relating to the impacts of NBS focus on the environmental dimension, while comprehensive and systemic analysis for investigating the interconnections among the environmental, economic and social dimensions are still less explored (Dumitru et al., 2020). Therefore, the CLD represents a valuable tool for representing and analysing indirect benefits and trade-offs, which are often addressed separately, within an integrated and systemic approach (Raymond et al., 2017). The CLD (Fig. 3) underlines the potential of NBS to activate virtuous dynamics, leading to environmental co-benefits, indirect economic improvements, and positive social impacts, while also identifying critical issues related to trade-offs and potential negative effects. This representation (Fig. 3) permits the synergic visualisation of synergies and conflicts generated by NBS, promoting a systemic understanding that can support public and private decision-makers in anticipating the medium- and long-term implications of such interventions.

Furthermore, the identification of indirect impacts represents one of the most interesting and promising aspects of the proposed approach. In the CLD shown in Figure 3, one of the main relevant indirect impacts concerning the decisions of NBS implementation relates to the avoided costs, an aspect still less explored in the literature related to the economic dimension of NBS. Although several studies highlight the cost-effectiveness of NBS (Seddon et al., 2020), adequate tools to quantify their long-term benefits, particularly those related to the prevention of natural disasters, energy savings, and public health protection, are still limited. In this context, the application of the CLD, by integrating variables related to avoided flood damages and reduced energy costs, offers a valuable

and operative approach for estimating these benefits and comparing them with costs throughout the entire life cycle of the interventions (Assumma, V., Casagrande, D., Cosmi, V., Stanghellini, 2025; Datola et al., 2025). Another critical element highlighted by the CLD (Fig. 3) relates to governance, often overlooked in evaluation frameworks but crucial for managing trade-offs and ensuring spatial justice and social cohesion (Martin et al., 2025). Recent literature emphasises the need for participatory and transdisciplinary approaches to avoid NBS benefits concentrated in specific areas or among certain social groups (Wilhelm Stanis et al., 2025). This critical issue can be linked to emerging evidence in the literature, particularly from an OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) study (Tönurist & Orlik, 2025), which highlights the limited systematic use of anticipatory governance in the development of transformation and innovation policies (Guillemard, 2025). Anticipatory governance is a decision-making strategy that uses forecasts and trend analysis to proactively prepare for challenges and opportunities, rather than simply reacting. Forecasts are developed to analyse potential future scenarios and make decisions to improve long-term outcomes. In this sense, anticipatory governance is essential to address the complexity and uncertainty of socio-environmental transformations while maintaining a long-term perspective (Muiderman et al., 2022).

From this perspective, the CLD emerges as a valuable tool to support the anticipative governance for the strategic planning and management of NBS for a resilient and sustainable transition of urban contexts, as it provides a systemic and comprehensive representation of the cause-effect relationships among the context, the type of intervention, and the generated impacts. Furthermore, the flexibility of this tool permits the adaptation the proposed CLD to different spatial and temporal scales, providing a view of short-, medium-, and long-term impacts.

Furthermore, the CLD strengthens the socio-ecological system approach (Costanza, 2014), enabling the analysis of the complex dynamics among actors, policy instruments, and direct and indirect impacts that influence the effectiveness of NBS. This perspective is coherent and aligned with the integration of natural, social, and built capital (Douglas, 1981). Therefore, the CLD tool permits not only to guarantee a deeper understanding of the relationships related to the functioning of NBS, but also to inform the strategic planning and management of these solutions (Stanganelli et al., 2021), supporting thus an informed decision process.

6. Conclusions

This research proposes a first application of CLD as a tool for analysing and mapping the complexity, multidimensionality, and multifunctionality of NBS at the meso-scale in urban settings. Systems Thinking provides a useful framework for understanding the complex interactions among the built environment, natural capital, and social capital, ensuring that all relevant factors are comprehensively addressed (Meadows & Wright, 2008). The proposed application highlighted how CLD is a valuable operational and functional tool, able to provide a systemic and integrated understanding of NBS in urban contexts, linking environmental, economic, and social impacts. Indeed, the CLD enables a synergistic and comprehensive understanding by illustrating cause-effect relationships, synergies, trade-offs, and direct and indirect impacts.

From the obtained results, it is possible to highlight some advantages of applying systems thinking for NBS analysis. Firstly, the CLD permits the explicit and systemic representation of trade-offs, such as those related to public health, ecosystem disservices, safety, and gentrification, which are often considered separately from benefits (Casprini et al., 2023). Secondly, the CLD facilitates the identification of indirect benefits, including avoided costs (energy savings and climate damage costs), which are often factors often overlooked but crucial in the life cycle assessment of such solutions.

Furthermore, by analysing the causal relationships and synergies, it has been possible to highlight the central role of governance and anticipative governance in managing specific trade-offs, such as spatial justice, equitable accessibility, and participatory management of solutions (Dell'Ovo & Oppio, 2019; Martin et al., 2025). Based on the potential emerged by this initial application, it is possible to outline some future directions of the present research, aimed at improving its robustness and operational relevance. The first implementation consists of the development of an

SDM simulation model, built on the proposed CLD (Fig. 3), to evaluate alternative NBS scenarios based on their multidimensional effects over the medium and long term (Guan et al., 2011; Tan et al., 2018). The second implementation focuses on the in-depth analysis of indirect impacts, intending to integrate them into the economic and financial analysis of NBS, taking into account their entire life cycle of the NBS (Datola et al., 2025).

Authorship contribution

Conceptualisation: G.D, A.O; Methodology: G.D; Data collection: G.D; Formal analysis: G.D; Original draft: G.D; Revision and editing: G.D, A.O; Supervision: A.O.

Bibliography

- Alfeld L.E., Graham A.K. & K.G.A. (1976). *Introduction to Urban Dynamics*. Wright-Allen Press. <https://books.google.it/books?id=cIywAAAAIAAJ>
- Assumma V., Casagrande D., Cosmi V., Stanghellini S. (2025). Valutazione del costo medio ponderato delle dotazioni ecologico-ambientali nei processi di trasformazione urbana. *Valori e Valutazioni*.
- Bala B.K., Arshad F.M. & Noh K.M. (2017). Systems Thinking: System Dynamics. In *System Dynamics: Modelling and Simulation* (pp. 15–35). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2045-2_2
- Bayulken B., Huisingh D. & Fisher P.M.J. (2021). How are nature based solutions helping in the greening of cities in the context of crises such as climate change and pandemics? A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125569. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125569>
- Bona S., Silva-Afonso A., Gomes R., Matos R. & Rodrigues F. (2022). Nature-Based Solutions in Urban Areas: A European Analysis. *Applied Sciences*, 13(1), 168. <https://doi.org/10.3390/app13010168>
- Bouchmel I., Ftiti Z., Louhich W. & Omri A. (2024). Financing sources, green investment, and environmental performance: Cross-country evidence. *Journal of Environmental Management*, 353(January), 120230. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120230>
- Bozovic R., Maksimovic C., Mijic A., Suter I. & Reeuwijk M. Van. (2017). Blue Green Solutions. *A Systems Approach to Sustainable, Resilient and Cost-Efficient Urban Development*, Imperial College London. <https://www.climate-kic.org/success-stories/blue-green-solutions-bgs/>
- Caprioli C., Bottero M. & Mondini G. (2020). Urban Ecosystem Services: A Review of Definitions and Classifications for the Identification of Future Research Perspectives. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics): Vol. 12253 LNCS* (pp. 332–344). https://doi.org/10.1007/978-3-030-58814-4_23
- Casprini D., Oppio A., Rossi G. & Bengo I. (2023). Managing Urban Green Areas: The Benefits of Collaborative Governance for Green Spaces. *Land*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/land12101872>
- Castellar J.A.C., Popartan L.A., Pueyo-Ros J., Atanasova N., Langergraber G., Säumel I., Corominas L., Comas J. & Acuña V. (2021). Nature-based solutions in the urban context: terminology, classification and scoring for urban challenges and ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 779, 146237. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146237>
- Cohen-Shacham E., Walters G., Maginnis S. & Janzen C. (2016). *Nature-based solutions to address global societal challenges* (E. Cohen-Shacham G. Walters C. Janzen & S. Maginnis (eds.)). IUCN International Union for Conservation of Nature. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.13.en>
- Coletta V.R., Pagano A., Pluchinotta I., Fratino U., Scricciu A., Nanu F. & Giordano R. (2021). Causal Loop Diagrams for supporting Nature Based Solutions participatory design and performance assessment. *Journal of Environmental Management*, 280, 111668. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111668>
- Costanza R. (2014). A theory of socio-ecological system change. *Journal of Bioeconomics*, 16(1), 39–44. <https://doi.org/10.1007/s10818-013-9165-5>
- D'amato (2000). Urban air pollution and plant-derived respiratory allergy. *Clinical & Experimental Allergy*, 30(5), 628–636. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2222.2000.00798.x>

- Datola G., Ghisoni A., Dell'Ovo M. & Oppio A. (2025). The feasibility of Nature-Based Solution (NBS) interventions: estimating the cost using the Work Breakdown Structure (WBS). *Valori e Valutazioni*, 37(37), 183–208. <https://doi.org/10.48264/VVSIEV-20253711>
- Dell'Ovo M., Datola G., Maiullari D., Oppio A. & Schretzenmayr M. (2026). Green Gentrification: A Literature Review of Trends, Challenges, and Research Opportunities. *Lecture Notes in Computer Science*, 15893 LNCS, 222 – 233. https://doi.org/10.1007/978-3-031-97645-2_15
- Dell'Ovo M. & Oppio A. (2019). Bringing the value-focused thinking approach to urban development and design processes: The case of foz do tua area in portugal; [L'approccio value-focused thinking a supporto dei processi progettuali: Il caso della rigenerazione dell'area di foz do tua i. *Valori e Valutazioni*, 2019(23), 91 – 106. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85077091237&partnerID=40&md5=76fa178036febf8c560aa23a>
- Douglas I. (1981). The city as an ecosystem. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 5(3), 315–367. <https://doi.org/10.1177/030913338100500301>
- Dumitru A., Frantzeskaki N. & Collier M. (2020). Identifying principles for the design of robust impact evaluation frameworks for nature-based solutions in cities. *Environmental Science and Policy*, 112(June), 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.05.024>
- European Commission. (2015). *Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities: Final report of the horizon 2020 expert group on nature-based solutions and re-naturing cities*. <https://doi.org/10.2777/479582>
- European Commission. (2020). *Nature-based solutions: state of the art in EU-funded projects (Independent Expert Report)*. <https://doi.org/10.2777/236007>
- European Commission. (2021). *Evaluating the impact of Nature-Based Solutions. A handbook for Practitioners*. <https://doi.org/10.2777/244577>
- Faivre N., Fritz M., Freitas T., de Boissezon B. & Vandewoestijne S. (2017). Nature-Based Solutions in the EU: Innovating with nature to address social, economic and environmental challenges. *Environmental Research*, 159(December 2016), 509–518. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.08.032>
- Fang X., Li J., Ma Q., Zhou R. & Du S. (2024). A quantitative review of nature-based solutions for urban sustainability (2016–2022): From science to implementation. *Science of The Total Environment*, 927(April), 172219. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172219>
- Fonseca K., Espitia E., Breuer L. & Correa A. (2022). Using fuzzy cognitive maps to promote nature-based solutions for water quality improvement in developing-country communities. *Journal of Cleaner Production*, 377(July), 134246. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134246>
- Forrester, J.W. (1990). *Principles of systems*. Productivity Press. <https://books.google.it/books?id=oMASAQAAMAAJ>
- Forrester Jay W. (1968). Industrial Dynamics—After the First Decade. *Management Science*. <https://doi.org/10.1287/mnsc.14.7.398>
- Gholipour A., Fragoso R., Galvão A. & Finger D.C. (2023). Mapping the causality of interacting perceptions for nature-based solution and sludge treatment reed bed: A causal loop diagram in Iceland. *Nature-Based Solutions*, 3(December 2022). <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2023.100049>
- Giordano R., Pluchinotta I., Pagano A., Scricciu A. & Nanu F. (2020). Enhancing nature-based solutions acceptance through stakeholders' engagement in co-benefits identification and trade-offs analysis. *Science of The Total Environment*, 713, 136552. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136552>
- Giordano R., Osann A., Henao E., López M.L., Piqueras J.G., Nikolaidis N.P., Lilli M., Coletta V.R. & Pagano A. (2025). Causal Loop Diagrams for bridging the gap between Water-Energy-Food-Ecosystem Nexus thinking and Nexus doing: Evidence from two case studies. *Journal of Hydrology*, 650(December 2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132571>
- 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>
- Gómez-Baggethun E., Gren Å., Barton D.N., Langemeyer J., McPhearson T., O'Farrell P., Andersson E., Hamstead Z. & Kremer P. (2013). Urban Ecosystem Services. In T. Elmqvist M. Fragkias J. Goodness B. Güneralp P.J. Marcotullio R.I. McDonald S. Parnell M. Schewenius M. Sendstad K.C. Seto & C. Wilkinson (Eds.), *Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and*

- Opportunities* (pp. 175–251). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7088-1_11
- Gómez Martín E., Giordano R., Pagano A., van der Keur P. & Máñez Costa M. (2020). Using a system thinking approach to assess the contribution of nature based solutions to sustainable development goals. *Science of the Total Environment*, 738, 139693. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139693>
- Goodwin S., Olazabal M., Castro A.J. & Pascual U. (2023). Global mapping of urban nature-based solutions for climate change adaptation. *Nature Sustainability*, 6(4), 458–469. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-01036-x>
- Goodwin S., Olazabal M., Castro A.J. & Pascual U. (2024). Measuring the contribution of nature-based solutions beyond climate adaptation in cities. *Global Environmental Change*, 89(August 2023), 102939. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2024.102939>
- Guan D., Gao W., Su W., Li H. & Hokao K. (2011). Modeling and dynamic assessment of urban economy-resource-environment system with a coupled system dynamics - Geographic information system model. *Ecological Indicators*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.02.007>
- International Union for Conservation of Nature. (2020). IUCN Global Standard for Nature-based Solutions: a user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NbS: first edition (Arabic version). In *Global Standard for Nature-based Solutions: a user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NbS*: IUCN, International Union for Conservation of Nature. <https://doi.org/10.2305/VCDL1542>
- Jorgensen A. & Anthopoulou A. (2007). Enjoyment and fear in urban woodlands – Does age make a difference? *Urban Forestry & Urban Greening*, 6(4), 267–278. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ufug.2007.05.004>
- Kabisch N., Frantzeskaki N., Pauleit S., Naumann S., Davis M., Artmann M., Haase D., Knapp S., Korn H., Stadler J., Zaunberger K. & Bonn A. (2016). Nature-based solutions to climate change mitigation and adaptation in urban areas: perspectives on indicators, knowledge gaps, barriers, and opportunities for action. *Ecology and Society*, 21(2), art39. <https://doi.org/10.5751/ES-08373-210239>
- Keesstra S., Nunes J., Novara A., Finger D., Avelar D., Kalantari Z. & Cerdà A. (2018). The superior effect of nature based solutions in land management for enhancing ecosystem services. *Science of The Total Environment*, 610–611, 997–1009. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.077>
- Leary M.R., Tipsord J.M. & Tate E. B. (2008). Allo-inclusive identity: Incorporating the social and natural worlds into one's sense of self. In *Transcending self-interest: Psychological explorations of the quiet ego*. (pp. 137–147). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/11771-013>
- Martin J.G.C., Scolobig A., Linnerooth-Bayer J., Irshaid J., Aguilera Rodriguez J.J., Fresolone-Caparrós A. & Oen A. (2025). The nature-based solution implementation gap: A review of nature-based solution governance barriers and enablers. *Journal of Environmental Management*, 388(January), 126007. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126007>
- Meadows D. & Wright D. (2008). *Thinking in Systems: International Bestseller*. Chelsea Green Publishing. <https://books.google.de/books?id=JSgOSP1qklUC>
- Mexia T., Vieira J., Príncipe A., Anjos A., Silva P., Lopes N., Freitas C., Santos-Reis M., Correia O., Branquinho C. & Pinho P. (2018). Ecosystem services: Urban parks under a magnifying glass. *Environmental Research*, 160, 469–478. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.10.023>
- Nesshöver C., Assmuth T., Irvine K.N., Rusch G M., Waylen K.A., Delbaere B., Haase D., Jones-Walters L., Keune H., Kovacs E., Krauze K., Külvik M., Rey F., van Dijk J., Vistad O.I., Wilkinson M.E. & Wittmer H. (2017). The science, policy and practice of nature-based solutions: An interdisciplinary perspective. *Science of The Total Environment*, 579, 1215–1227. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.106>
- Pellerey V. & Torabi Moghadam S. (2025). A place-based framework for assessing the effectiveness of inclusive climate actions for nature-based solutions in cities. *Journal of Cleaner Production*, 486(January 2024), 144566. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144566>
- Raymond C.M., Bryan B.A., MacDonald D.H., Cast A., Strathearn S., Grandgirard A. & Kalivas T. (2009). Mapping community values for natural capital and ecosystem services. *Ecological Economics*, 68(5), 1301–1315. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.12.006>

- Raymond C.M., Frantzeskaki N., Kabisch N., Berry P., Breil M., Nita M.R., Geneletti D. & Calfapietra C. (2017). A framework for assessing and implementing the co-benefits of nature-based solutions in urban areas. *Environmental Science and Policy*, 77(July), 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.07.008>
- Rouwette E. & Vennix J. (2006). System Dynamics and Organizational Interventions. *Systems Research and Behavioral Science*, 23, 451–466. <https://doi.org/10.1002/sres.772>
- Seddon N., Chausson A., Berry P., Girardin C.A.J., Smith A. & Turner B. (2020). Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 375(1794), 20190120. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0120>
- Sowińska-Świerkosz B. & García J. (2022). What are Nature-based solutions (NBS)? Setting core ideas for concept clarification. *Nature-Based Solutions*, 2(January), 100009. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2022.100009>
- Stanganelli M., Torrieri F., Gerundo C. & Rossitti M. (2021). A Strategic Performance-Based Planning Methodology to Promote the Regeneration of Fragile Territories. In *Lecture Notes in Civil Engineering* (Vol. 146, pp. 149–157). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68824-0_16
- Sterman J.D. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World* (Irwin/McGraw-Hill (ed.)). Irwin/McGraw-Hill. <https://books.google.it/books?id=CCKCQgAACAAJ>
- Tan Y., Jiao L., Shuai C. & Shen L. (2018). A system dynamics model for simulating urban sustainability performance: A China case study. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.154>
- United Nations Environment Programme. (2024). *Information on the implementation of resolution 5/5 on nature-based solutions for supporting sustainable development: Note by secretariat* (Issue October 2022). <https://documents.un.org/doc/undoc/gen/k24/000/78/pdf/k2400078.pdf>
- von Döhren P. & Haase D. (2015). Ecosystem disservices research: A review of the state of the art with a focus on cities. *Ecological Indicators*, 52, 490–497. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.12.027>
- Wilhelm Stanis S.A., Piontek E. & Xu S. (2025). Perceptions of ecosystem services and disservices in urban greenspaces: Insights from a shrinking city. *Urban Forestry & Urban Greening*, 104, 128675. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2025.128675>

Mappare la complessità e multidimensionalità delle *Nature-Based Solution* in ambito urbano: un approccio basato sul *Causal Loop Diagram*

Giulia Datola^{1,*}, Alessandra Oppio¹

¹ Dipartimento di Architettura e Studi Urbani (DAStU), Politecnico di Milano, Via Bonardi 3, 20133 Milano, Italia; giulia.datola@polimi.it; alessandra.oppio@polimi.it

* autore corrispondente

Parole chiave

Nature-Based Solution,
Servizi Ecosistemici,
System thinking,
Complessità,
Multidimensionalità,
Trade-off

Abstract

Le *Nature-Based Solutions* (NBS) sono attualmente proposte come soluzioni strategiche in ambito urbano per promuovere azioni di mitigazione degli effetti del cambiamento climatico e, al contempo, affrontare sfide ambientali, sociali ed economiche. Numerose ricerche hanno indagato in modo approfondito gli impatti e benefici ambientali diretti derivanti dall'implementazione delle NBS negli ambienti urbani. Tuttavia, dalla letteratura esistente emerge una ancora limitata capacità di sviluppare una lettura sistemica della complessità e multidimensionalità dei loro effetti, considerato il loro carattere multifunzionale. In questo contesto, la presente ricerca propone l'utilizzo del *Causal Loop Diagram* (CLD) come strumento per rappresentare in modo sistemico le diverse dimensioni e i diversi fattori associati all'implementazione delle NBS in ambito urbano, nonché le relazioni di causa-effetto tra le variabili coinvolte, con particolare attenzione ai benefici diretti, indiretti e ai potenziali *trade-off*. Il diagramma causale consente, inoltre, di rappresentare e analizzare aspetti spesso trascurati, come i costi evitati, e di supportare valutazioni a lungo termine, in coerenza con il ciclo di vita dell'intervento. L'applicazione proposta mette anche in evidenza il ruolo centrale della *governance*, in particolare nella gestione di eventuali *trade-off*, ad esempio nel garantire equità nell'accesso ai benefici forniti dalle NBS. Il CLD si configura, quindi, come uno strumento utile a supporto della pianificazione e della gestione di questa tipologia di interventi, promuovendo una visione sistemica e multi-prospettica, orientata al processo decisionale.

1. Introduzione

Le società contemporanee affrontano molteplici e complesse sfide legate al cambiamento climatico, tra cui eventi meteorologici estremi, pressioni sulla salute e sul benessere umano, sicurezza alimentare, idrica ed energetica, e l'esaurimento delle risorse naturali (Faivre et al., 2017). Tali pressioni risultano particolarmente intense nelle aree urbane, dove negli ultimi anni si è verificato un progressivo peggioramento delle condizioni climatiche, con un conseguente aumento della vulnerabilità socio-ambientale e della necessità di adottare soluzioni efficaci per mitigare gli effetti del

cambiamento climatico (Pellerey & Torabi Moghadam, 2025).

In questo contesto, le *Nature-Based Solutions* (NBS), o soluzioni basate sulla natura, emergono a livello europeo e internazionale come strategie efficaci ed economicamente vantaggiose per sostenere la transizione verso città più sostenibili e resilienti (Bayulken et al., 2021). Il termine NBS, è stato introdotto per la prima volta nel 2008 dalla *World Bank* (Leary et al., 2008) per promuovere lo sviluppo sostenibile, affrontando in modo integrato le sfide urbane di natura sociale, economica e ambientale (Castellar et al., 2021). Esso rappresenta un concetto ombrello, oggetto di numerose definizioni, elaborate sia in ambito accademico, sia nel contesto delle politiche pubbliche. La presente ricerca non si pone l'obiettivo di fornire un elenco esaustivo delle definizioni proposte nel tempo. Pertanto, si riportano le definizioni proposte da report internazionali ed europei, che hanno ottenuto un maggior consenso nella letteratura e nelle pratiche politiche. L'obiettivo è fornire una panoramica complessiva del concetto delle NBS, evidenziando le caratteristiche di complessità e multidimensionalità che le contraddistinguono e che rappresentano gli elementi centrali per l'analisi condotta in questo studio.

Nel 2015, la Commissione Europea ha definito le NBS come *“soluzioni ispirate e supportate dalla natura, che sono convenienti, forniscono simultaneamente benefici ambientali, sociali ed economici e aiutano a creare resilienza. Tali soluzioni portano la natura e caratteristiche e processi naturali sempre più diversificati in città, paesaggi e paesaggi marini attraverso interventi adattati localmente, efficienti in termini di risorse e sistemici”* (European Commission, 2015). Nel 2016, l'*International Union for Conservation of Nature* (IUCN) ha definito le NBS come *“azioni volte a proteggere, gestire in modo sostenibile e ripristinare ecosistemi naturali o modificati, che affrontano in modo efficace e adattivo le sfide della società, fornendo contemporaneamente benefici per il benessere umano e per la biodiversità”* (Emmanuelle Cohen-Shacham et al., 2016). Successivamente, nel 2020, l'IUCN ha introdotto *gli Standard Globali* per stabilire criteri più chiari per la definizione delle NBS (International Union for Conservation of Nature, 2020).

Nel marzo 2022, invece, l'Assemblea delle Nazioni Unite per l'Ambiente (UNEA) del Programma delle Nazioni Unite per l'Ambiente (UNEP) ha adottato la prima definizione di NBS concordata a livello globale, descrivendo tali soluzioni come *“azioni per proteggere, conservare, ripristinare, utilizzare e gestire in modo sostenibile gli ecosistemi terrestri, d'acqua dolce, costieri e marini, naturali o modificati, che affrontano le sfide sociali, economiche e ambientali in modo efficace e adattivo, fornendo al contempo benefici per il benessere umano, servizi ecosistemici, resilienza e biodiversità”* (United Nations Environment Programme, 2024).

Le definizioni riportate evidenziano in modo coerente l'approccio sistemico e multidimensionale delle NBS nell'affrontare le sfide sociali, economiche e ambientali, con una prospettiva di sviluppo sostenibile e resiliente e con una particolare un'attenzione alla biodiversità. Le NBS si basano sull'impiego di processi naturali per affrontare simultaneamente sfide ambientali, sociali ed economiche, contribuendo sia alla mitigazione sia all'adattamento ai cambiamenti climatici, e generando al contempo molteplici benefici (Dumitru et al., 2020; Goodwin et al., 2023).

In quest'ottica, la letteratura ha ampiamente discusso il potenziale delle NBS nel migliorare la qualità della vita, promuovere l'equità socio-spaziale, favorire l'interazione tra cittadini e il senso di appartenenza ai luoghi (Dumitru et al., 2020; Kabisch et al., 2016). A tal proposito, l'*International Union for Conservation of Nature* (IUCN) definisce che le NBS possono contribuire efficacemente ad affrontare sette grandi sfide globali (International Union for Conservation of Nature, 2020), quali:

1. Mitigazione e adattamento al cambiamento climatico;
2. Riduzione del rischio di disastri;
3. Sviluppo economico e sociale;
4. Salute umana;
5. Sicurezza alimentare;
6. Sicurezza idrica;
7. Inversione del degrado ambientale e perdita di biodiversità.

Focalizzandosi sull'implementazione delle NBS in ambito urbano, queste possono essere implementate a diverse scale (Bona et al., 2022): la macro-scala, relativa all'intero territorio municipale o aree sovracomunali; la meso-scala, riferita al livello di quartiere; e la micro-scala, che interessa i singoli edifici o lotti.

Tra le soluzioni più comuni in ambito urbano si possono citare tetti verdi, giardini pluviali, zone umide urbane artificiali e interventi di forestazione urbana, in grado di fornire servizi ecosistemici quali la regolazione delle temperature urbane, la gestione delle acque meteoriche, la purificazione dell'aria, il miglioramento del benessere fisico e mentale e il rafforzamento della coesione sociale (Dumitru et al., 2020; Keesstra et al., 2018).

La presente ricerca si pone l'obiettivo di analizzare la complessità, multidimensionalità e multifunzionalità attraverso un approccio sistemico. Nello specifico, la categoria delle NBS implementabili alla meso-scala in ambito urbano verrà analizzata mediante lo strumento del *Causal Loop Diagram* (CLD) al fine di rappresentare graficamente la complessità, mappare le dinamiche multidimensionali e causali che caratterizzano l'interazione tra capitale naturale, sociale e costruito, evidenziando le sinergie ed eventuali *trade-off*.

1.1 Motivazioni e obiettivi

Nonostante la letteratura abbia ampiamente riconosciuto la natura complessa e multidimensionale delle NBS, la rappresentazione di tali caratteristiche e delle relazioni causali che intercorrono tra le diverse dimensioni, mediante un approccio sistemico, rimane ancora molto limitata e frammentata (Dumitru et al., 2020; Fang et al., 2024; Sowińska-Świerkosz & García, 2022). A tal proposito, diversi *framework* sottolineano l'importanza e la necessità di analizzare la molteplicità degli impatti prodotti dall'implementazione delle NBS (Kabisch et al., 2016; Nesshöver et al., 2017). Tuttavia, l'applicazione di approcci e metodi capaci di mappare le interazioni tra le dimensioni ambientali, sociali ed economiche, evidenziando relazioni di causa-effetto, sinergie e *trade-off*, rimane ancora molto limitata (Dumitru et al., 2020; Fang et al., 2024).

Lo studio proposto da Dumitru e colleghi (2020) evidenzia, infatti, come le “*vaghe concettualizzazioni delle relazioni tra le NBS e i loro molteplici tipi di impatti*” rappresentino uno dei principali limiti della letteratura esistente (Dumitru et al., 2020). Invece, lo studio proposto da Fang e colleghi (2024) sottolinea che la maggior parte delle ricerche proposte si concentra su singole NBS e specifiche sfide ambientali, senza fornire una visione sistemica delle relazioni tra i diversi impatti o tra le sfide di sostenibilità che le NBS intendono affrontare (Fang et al., 2024). Un'ulteriore limitazione riguarda l'analisi sistematica dei benefici e dei disservizi prodotti dalle NBS. Sebbene la letteratura riconosca l'esistenza di sinergie e *trade-off* tra le diverse dimensioni di impatto, ad esempio tra impatti ambientali e sociali oppure tra benefici ecologici e costi economici, tali relazioni sono raramente documentate (Mexia et al., 2018) nell'ambito dell'implementazione delle NBS. Nella maggior parte dei casi, benefici e *trade-off* sono analizzati separatamente, senza una rappresentazione integrata capace di esplicitare le interazioni tra le dimensioni coinvolte, evidenziando al contempo sinergie e *trade-off* (Kabisch et al., 2016). A tal proposito, lo studio proposto da Dumitru et al. (2020) cita che “*una chiara definizione degli impatti delle NBS, delle sinergie e dei trade-off tra le diverse tipologie di impatto, e metodi di valutazione solidi, flessibili ed economicamente sostenibili sono essenziali per costruire una base di evidenza sulla loro efficacia in ambito urbano*”¹ (Dumitru et al., 2020).

Sulla base di queste evidenze e criticità, la presente ricerca si pone l'obiettivo di proporre una rappresentazione della complessità e multidimensionalità associate all'implementazione delle NBS in ambito urbano secondo un approccio sistemico. Per tanto, propone l'utilizzo dello strumento del CLD al fine di mappare in modo comprensivo: (1) le relazioni di causa-effetto che intercorrono tra le diverse dimensioni coinvolte, e (2) le sinergie e i *trade-off* tra impatti ambientali, sociali ed economici. La presente ricerca si pone l'obiettivo di proporre un *framework* metodologico (Fang et al., 2024) per supportare la comprensione sistemica dell'implementazione delle NBS nei contesti urbani, alla meso-scala. Tale *framework* si configura come uno strumento utile per una progettazione strategica delle NBS.

¹ Dumitru et al., 2020; p. 108

2. Metodologia

2.1 System Dynamics Model

Il *System Thinking* è un metodo per analizzare il comportamento dinamico di sistemi complessi secondo un approccio sistemico, rappresentando gli stessi nella loro totalità e non come sommatoria di diversi elementi (Bala et al., 2017). Lo strumento del System Dynamics Model (SDM) si basa sulla dinamica dei sistemi (System Dynamics (SD)), introdotto da Forrester con l'obiettivo di migliorare la comprensione dei sistemi complessi (Alfeld et al., 1976; J W Forrester, 1990; Jay W. Forrester, 1968). Nello specifico, tale approccio si basa sul concetto di *feedback*, che consente di gestire la non linearità dei sistemi complessi. In dettaglio, il SDM è un *tool* sia teorico, sia *computer-aided*. Tale strumento viene applicato per esaminare sistemi complessi e dinamici attraverso l'identificazione delle interdipendenze reciproche tra le variabili (Rouwette & Vennix, 2006; Sterman, 2000). Inoltre, i SDM vengono anche applicati per modellare e simulare la possibile evoluzione diacronica dei sistemi complessi. Pertanto, i SDM sono considerati degli strumenti efficaci per analizzare la possibile evoluzione nel tempo di un sistema secondo determinate condizioni, supportando la definizione di strategie di sviluppo in base ai loro effetti nel breve, medio e lungo periodo (Guan et al., 2011; Tan et al., 2018). La metodologia dei SDM articola la rappresentazione, l'analisi e la simulazione del sistema in sei fasi principali:

1. Definizione del problema e selezione delle variabili rilevanti;
2. Sviluppo di un'ipotesi dinamica, che spieghi la causa del problema;
3. Creazione della struttura di base attraverso un diagramma causale;
4. Argomentazione del diagramma causale con ulteriori informazioni;
5. Conversione del diagramma causale dettagliato in un diagramma di flusso;
6. Traduzione del diagramma di flusso nel modello SDM.

2.1.3 Causal Loop Diagram (CLD)

Come esplicitato nelle sezioni precedenti, la presente ricerca si pone l'obiettivo di sviluppare un CLD riferito alle NBS implementabili alla meso-scala in ambito urbano. Secondo la metodologia SD, una volta finalizzata la prima fase relativa alla definizione del problema e selezione delle variabili rilevanti, la fase successiva consiste nell'elaborazione del diagramma di causa-effetto. Il CLD permette, quindi, di rappresentare la struttura del sistema complesso analizzato, evidenziando le relazioni di causa-effetto tra i diversi elementi che lo costituiscono e consentendo di sviluppare cicli di *feedback* (Bala et al., 2017).

La Figura 1 rappresenta una generica struttura di un CLD, identificando gli elementi alla base di questa tipologia di rappresentazione. Come mostrato dalla Figura 1, le relazioni che intercorrono tra gli elementi costituenti il sistema possono essere sia positive che negative. Una relazione positiva implica che le due variabili cambieranno in modo direttamente proporzionale: ad esempio, se A aumenta, anche B aumenterà. Al contrario, una relazione negativa indica un cambiamento inversamente proporzionale: se C aumenta, B diminuirà. Il terzo elemento caratterizzante il diagramma CLD è il *loop*, che rappresenta un ciclo causale chiuso in cui una serie di elementi è collegata da relazioni di causa-effetto che si influenzano reciprocamente, formando una catena che riconduce al punto di partenza. I *loop* costituiscono l'elemento distintivo dei CLD e consentono di visualizzare i meccanismi di *feedback* che determinano l'evoluzione diacronica di un sistema.

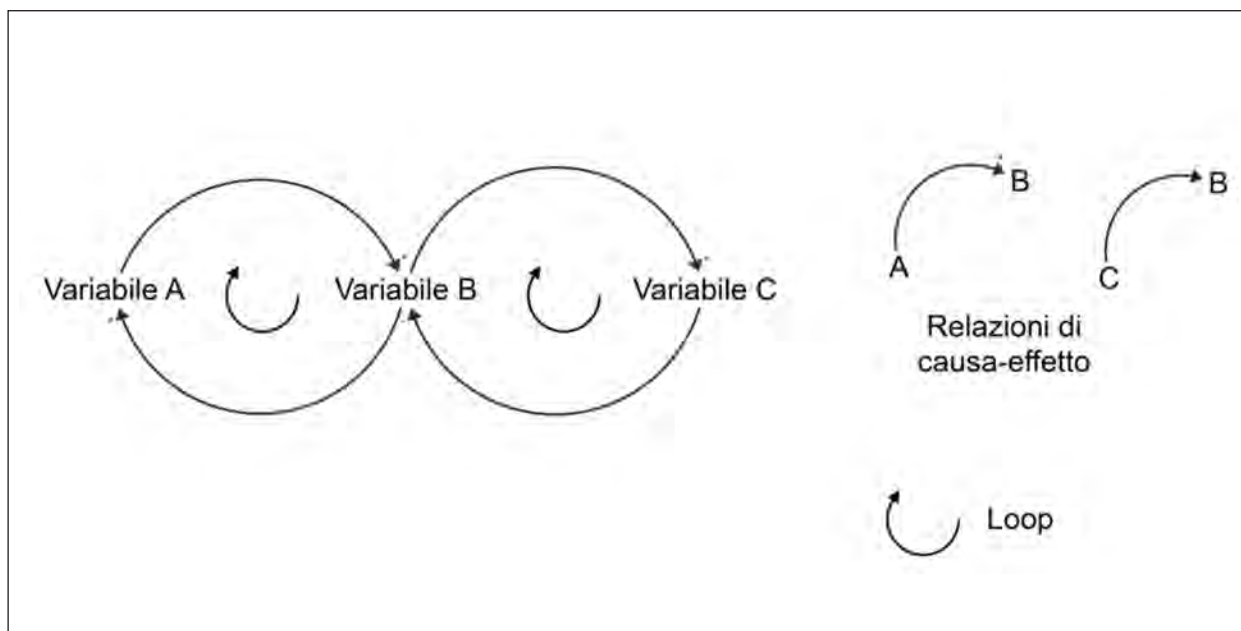


Figura 1. Struttura di base del *causal loop diagram*.

Esistono due tipologie di loop (Meadows & Wright, 2008; Sterman, 2000):

- Loop rinforzante (R): è un ciclo positivo in cui un cambiamento in una variabile tende ad amplificarsi nel tempo;
- Loop bilanciante (B): è un ciclo negativo che tende a stabilizzare il sistema, contrastando il cambiamento.

Nel dettaglio, per costruire un diagramma CLD è necessario seguire alcuni passaggi, quali:

1. Definire il problema e gli obiettivi;
2. Identificare gli elementi più importanti del sistema (variabili primarie);
3. Identificare gli elementi secondari del sistema;
4. Identificare gli elementi terziari del sistema;
5. Definire le relazioni di causa-effetto.

3. Applicazione

3.1 Definizione delle dimensioni e delle variabili coinvolte nell'implementazione delle NBS in ambito urbano

Come illustrato nelle sezioni precedenti, la presente ricerca si concentra sull'analisi delle NBS implementabili alla meso-scala in ambito urbano. A tal proposito, è stata condotta un'analisi della letteratura scientifica e grigia finalizzata all'identificazione delle principali dimensioni e dei relativi fattori chiave coinvolti nei processi di implementazione delle NBS (Bozovic et al., 2017; Emmanuelle Cohen-Shacham et al., 2016; Coletta et al., 2021; Dumitru et al., 2020; European Commission, 2020, 2021; Faivre et al., 2017; Fonseca et al., 2022; Gholipour et al., 2023; R Giordano et al., 2020; Raffaele Giordano et al., 2025; Gómez Martín et al., 2020; Goodwin et al., 2024; Kabisch et al., 2016; Raymond et al., 2017). Tale analisi ha permesso, in coerenza con la metodologia SDM, di definire i confini del sistema esaminato in relazione al tema trattato, nonché di individuare le principali sfide urbane affrontate dalle NBS. Per tanto, i risultati ottenuti da questa analisi sono stati utilizzati come base concettuale per la modellazione del tema dell'implementazione delle NBS alla meso-scala in ambito urbano, attraverso il CLD.

La Figura 2 illustra lo schema metodologico seguito per lo sviluppo del CLD nell’ambito di questa ricerca.

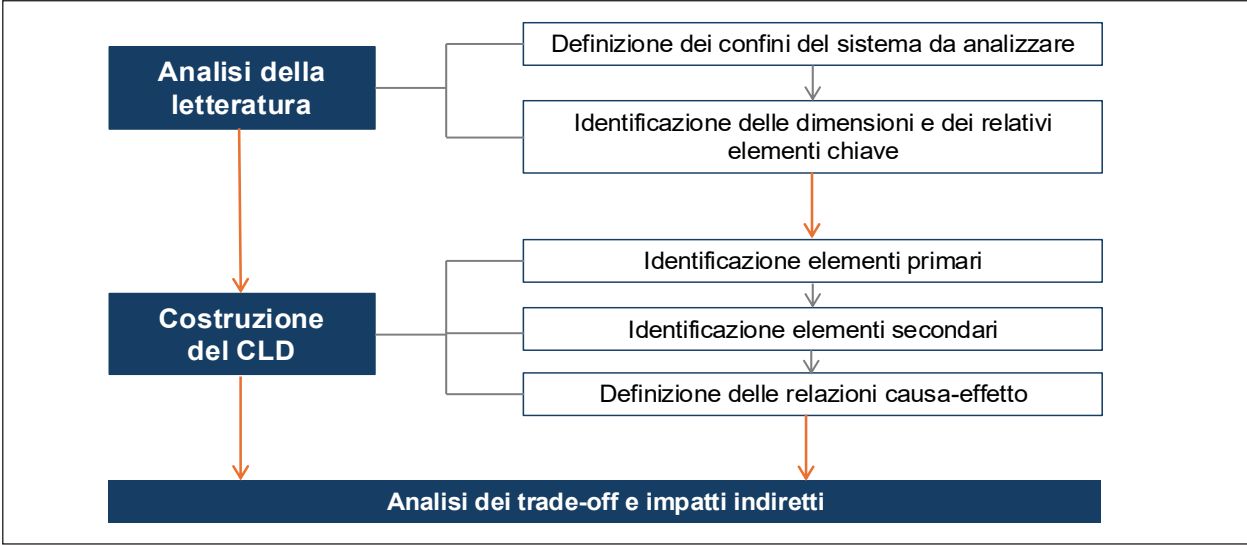


Figura 2. Schema metodologico.

La Tabella 1 elenca le principali dimensioni e i relativi fattori chiave associati ai processi di implementazione delle NBS alla meso-scala nei contesti urbani.

Tabella 1. Dimensioni e fattori chiave dei processi di implementazione delle NBS in ambito urbano. Elaborazione da: European Commission (2015); Cohen & Shacham (2017); Raymond et al. (2017); Kabisch et al. (2016)

Dimensioni	Elementi chiave
Ambiente	Climate change mitigation
	Disaster risk reduction
	Servizi Ecosistemici Urbani ² e biodiversità
	Water management and water security
	Gestione degli spazi verdi
	Qualità dell'aria
	Rigenerazione urbana
	Rischio alluvioni
	Scarsità idrica e sicurezza idrica
Economia	Costo di implementazione
	Costo di manutenzione ordinaria e straordinaria
	Nuovi posti di lavoro (<i>green job</i>)
	Incentivi per interventi (<i>green bond</i>)
	Efficienza economica
Società	Processi partecipativi
	<i>Social learning</i>
	<i>Social justice</i>

² In questo contesto, poiché si tratta di un’analisi di NBS in ambito urbano, si è scelto di considerare la categoria di “Servizi Ecosistemici Urbani”, ovvero l’insieme dei servizi forniti dagli ecosistemi presenti nelle aree urbane e che contribuiscono al miglioramento della qualità della vita nelle città (Gómez-Baggethun et al., 2013). Tali servizi possono essere classificati nelle seguenti categorie: (1) servizi di approvvigionamento, che includono i prodotti ottenuti dagli ecosistemi, tra cui risorse come cibo e acqua; (2) servizi di regolazione, che comprendono tutti i benefici ottenuti dalla regolazione dei processi ecosistemici, tra cui la regolazione del clima, il controllo del deflusso idrico e il miglioramento della qualità dell’aria; (3) servizi culturali, che consistono nei benefici intangibili forniti dagli ecosistemi e che le persone ottengono attraverso lo sviluppo cognitivo, il benessere psicologico, e la coesione sociale, oltre al loro valore estetico e identitario; (4) servizi di supporto o di habitat, necessari per il mantenimento delle funzioni ecologiche e quindi per la produzione di tutti gli altri servizi ecosistemici.

Dall'analisi condotta e dai risultati illustrati dalla Tabella 1 è possibile osservare un'asimmetria tra le diverse dimensioni individuate. La dimensione ambientale risulta essere la più articolata dal punto di vista degli elementi chiave e si configura come quella maggiormente rappresentata nella letteratura, grazie anche alla disponibilità di indicatori consolidati e strumenti valutativi specifici (Dumitru et al., 2020). Le dimensioni economiche e sociali, sebbene riconosciute come aspetti fondamentali nell'implementazione delle NBS in ambito urbano, appaiono ancora relativamente poco analizzate. La dimensione economica riveste un ruolo centrale e cruciale nel processo decisionale, in particolare rispetto a aspetti quali costi di realizzazione e gestione, il potenziale di creazione occupazionale e la capacità di attrarre investimenti verdi (Bouchmel et al., 2024). Tuttavia, tali elementi sono raramente integrati nei quadri di valutazione multidimensionale (Sowińska-Świerkosz & García, 2022). La dimensione sociale, infine, risulta essere spesso trascurata o ridotta a un numero limitato di variabili, come la partecipazione o la giustizia sociale, nonostante la crescente attenzione al potenziale delle NBS nel promuovere coesione e inclusione (Kabisch et al., 2016; Raymond et al., 2009). Le dimensioni e gli elementi chiave elencati nella Tabella 1 sono stati utilizzati come base concettuale per la costruzione del CLD (Figura 3), permettendo di esplorare la complessità delle interazioni sistemiche tra componenti ambientali, economiche e sociali, offrendo una rappresentazione sistemica dei benefici e dei potenziali *trade-off* associati all'implementazione delle NBS alla meso-scala nei processi di rigenerazione urbana.

La Figura 3 rappresenta un primo risultato di mappatura, attraverso il CLD, delle relazioni causali e dei principali *trade-off* emersi dall'analisi delle NBS alla meso-scala in ambito urbano. Questo CLD si configura come uno strumento di base che può essere successivamente raffinato e adattato in funzione di specifici contesti applicativi.

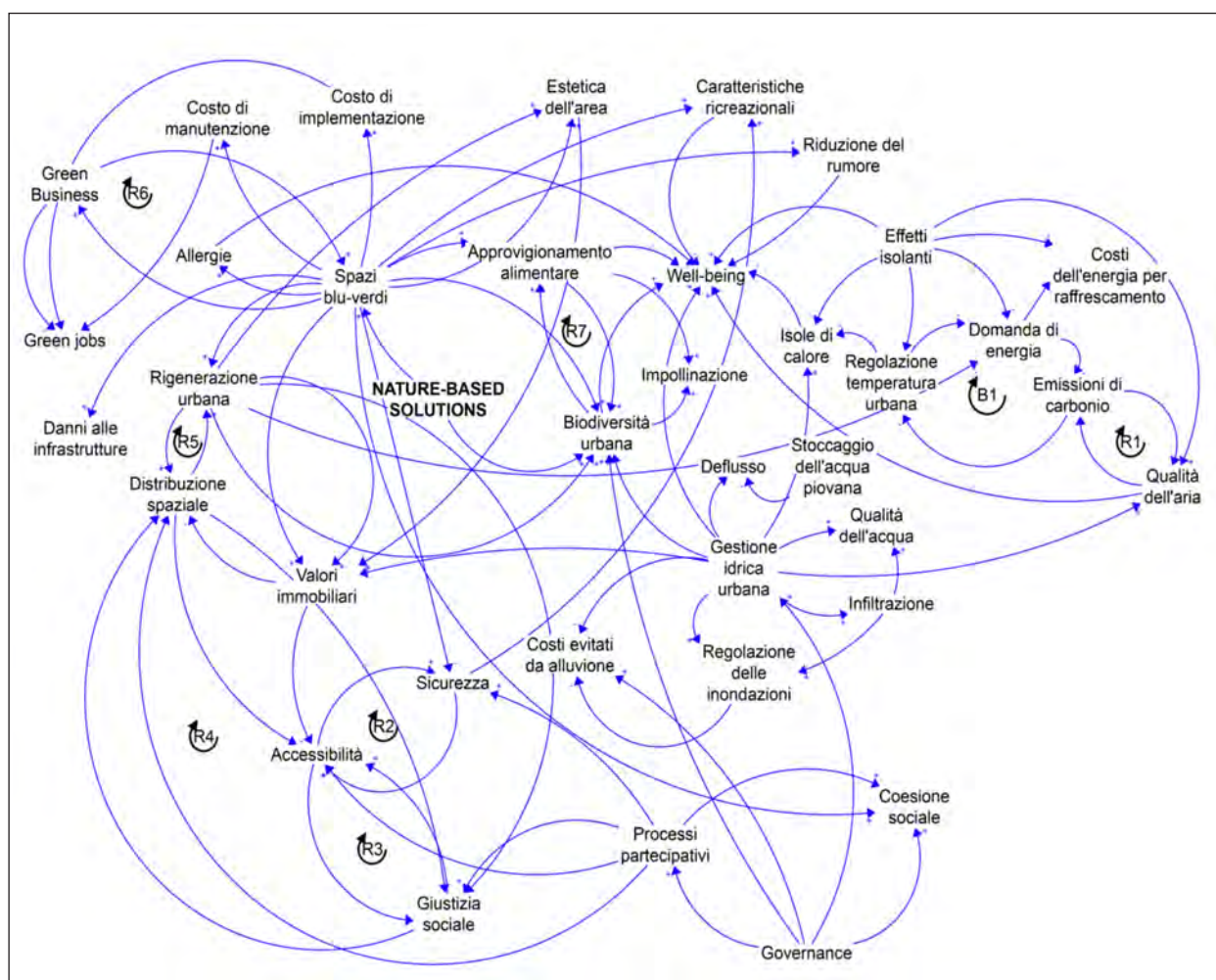


Figura 3. *Causal loop diagram* relativo all'implementazione delle NBS alla meso-scala in ambito urbano.

Nello specifico, in questa mappatura, particolare attenzione è stata dedicata al ruolo dei servizi ecosistemici urbani (Caprioli et al., 2020; Gómez-Baggethun & Barton, 2013), rappresentanti uno degli elementi centrali relativi ai benefici forniti dalle NBS.

Infatti, secondo la letteratura, gli elementi naturali presenti in ambito urbano, che costituiscono un'infrastruttura verde multifunzionale strettamente connessa al benessere umano e alla resilienza urbana (Gómez-Baggethun & Barton, 2013), come alberature e sistemi di drenaggio urbano sostenibile, sono in grado di fornire servizi regolativi (regolazione climatica, gestione del deflusso idrico), culturali (ricreazione, identità), e di supporto (impollinazione e ciclo dei nutrienti). Le variabili relative ai servizi ecosistemici urbani sono fondamentali per esplicitare le relazioni tra capitale naturale, sociale e costruito in ambito urbano.

3.2 Causal Loop diagram

Le città sono sistemi complessi, dinamici e adattivi (Douglas, 1981). Pertanto, le componenti multidimensionali che le costituiscono si influenzano reciprocamente, determinandone l'evoluzione nel tempo. Allo stesso modo, le NBS sono soluzioni complesse, multidimensionali e multifunzionali. La Figura 3 rappresenta il CLD sviluppato per analizzare e mappare la complessità, la multidimensionalità e la causalità che intercorrono tra le diverse dimensioni e fattori chiave che caratterizzano il processo di implementazione delle NBS in ambito urbano. Mediante questa rappresentazione, è possibile analizzare le relazioni causa-effetto che intercorrono tra le diverse variabili ed evidenziare anche alcuni impatti indiretti. In generale, quello che emerge dal CLD rappresentato in Figura 3 è in linea con quanto definito dalla letteratura (Dumitru et al., 2020; Faivre et al., 2017; Raymond et al., 2017). Le NBS sono soluzioni utili per la transizione sostenibile e resiliente degli ambienti urbani e hanno una significativa componente culturale e sociale. Inoltre, tali soluzioni risultano fondamentali per la biodiversità urbana in quanto forniscono le risorse necessarie (Raymond et al., 2017) e migliorano la connettività funzionale e strutturale a livello urbano.

4. Risultati

Dal CLD rappresentato in Figura 3 è possibile analizzare le relazioni causali che intercorrono tra le variabili delle dimensioni ambiente, economia e società, identificando le interazioni sistemiche che possono essere attivate dall'implementazione delle NBS alla meso-scala negli ambienti urbani. Il CLD permette di mappare i numerosi benefici ambientali che possono derivare dalle realizzazioni delle NBS in ambito urbano. Oltre all'aumento della biodiversità, è possibile evidenziare la regolazione della temperatura urbana e la conseguente riduzione dell'effetto isola di calore, il miglioramento della qualità dell'aria, la gestione delle acque urbane con i relativi effetti rispetto alla purificazione dell'acqua, alla regolazione del deflusso e dell'infiltrazione. Nell'ambito degli effetti sulla dimensione ambientale, è possibile individuare due *loop* distinti: uno rinforzante e uno di bilanciamento. In particolare, il *loop* B1 rappresenta un meccanismo di bilanciamento che connette la regolazione della temperatura urbana, la domanda di energia per il raffrescamento e le emissioni di carbonio. Questo *loop* può essere descritto come segue: l'implementazione delle NBS contribuisce ad un aumento della regolazione della temperatura urbana, riducendo l'effetto dell'isola di calore. Tale effetto comporta una diminuzione della domanda energetica per il raffrescamento degli edifici, con conseguente riduzione delle emissioni di carbonio. Tuttavia, questa dinamica può attivare un meccanismo di autoregolazione: la riduzione delle emissioni contribuisce ulteriormente alla mitigazione dei cambiamenti climatici, stabilizzando nel tempo il sistema. Inoltre, l'analisi del *loop* B1 permette di evidenziare in modo chiaro l'interconnessione tra le diverse dimensioni che caratterizzano l'implementazione delle NBS (ambiente, società, ed economia). In particolare, la riduzione della domanda energetica derivata dall'aumento della regolazione termica urbana non comporta solo benefici ambientali in termini di minori emissioni di carbonio, ma implica anche una diminuzione della spesa energetica per il raffrescamento degli edifici. Questo aspetto introduce, quindi, un beneficio economico indiretto, potenzialmente significativo per i fruitori degli edifici (imprese, famiglie, amministrazioni pubbliche). Questa rappresentazione sistemica, quindi, permette di ana-

lizzare il valore integrato e aggiunto delle NBS nell'ambito dei processi di adattamento urbano e rigenerazione. Il *loop* R1 riguarda, invece, un meccanismo rinforzante che collega le emissioni di carbonio con la qualità dell'aria mettendo in evidenza un'importante sinergia ambientale che può essere attivata dalle NBS e dal capitale naturale, in generale.

Tuttavia, la realizzazione di interventi NBS può generare anche dei disservizi ecosistemici, definiti come "*funzioni degli ecosistemi percepite come negative per il benessere umano*" (von Döhren & Haase, 2015). Questi disservizi rappresentano importanti *trade-off* ambientali che devono essere analizzati e valutati nella fase di progettazione degli interventi NBS. Ad esempio, un *trade-off* rilevante riguarda la salute pubblica. Infatti, alcune piante possono produrre allergeni che possono intensificare i sintomi di asma e altre patologie respiratorie (D'amato, 2000), mentre la presenza di aree verdi scarsamente illuminate o mal progettate può generare percezioni di insicurezza (Jorgensen & Anthopoulou, 2007). Inoltre, l'implementazione di elementi naturali in ambienti urbani potrebbe provocare danni diretti o indiretti alle infrastrutture: ad esempio, gli apparati radicali possono rompere marciapiedi e fondazioni, recando un danno non solo infrastrutturale ma anche economico. Inoltre, il CLD mostra con chiarezza che le NBS, oltre a generare benefici ambientali, possono attivare delle dinamiche economiche. Infatti, è possibile evidenziare come l'aumento degli spazi verdi e blu possa contribuire al miglioramento dell'estetica urbana e la qualità dell'ambiente, con una conseguente crescita del valore immobiliare. Allo stesso modo, tale implementazione potrebbe favorire la nascita di *green jobs* e lo sviluppo di *green business*, con ricadute positive sull'economia locale. D'altra parte, però, è evidente come la parte economica sia interconnessa con la parte sociale; infatti, un aumento del valore immobiliare potrebbe avere degli effetti negativi sulla giustizia spaziale e dare origine al fenomeno della *green gentrification* (Dell'Ovo et al., 2026).

Per quanto riguarda la dimensione sociale, il diagramma evidenzia una rete di relazioni che lega le NBS alle variabili relative alla coesione sociale, giustizia sociale, accessibilità, sicurezza, partecipazione e *well-being*. Il *loop* R3 mostra come la realizzazione di spazi verdi accessibili e ben progettati favorisca la giustizia spaziale, soprattutto nei contesti di processi partecipati. Allo stesso modo, il *loop* R2 evidenzia che l'implementazione di spazi accessibili favorisce la percezione di sicurezza degli stessi. Tuttavia, è importante considerare che la realizzazione di NBS possono causare diversi livelli di disuguaglianza, che possono però essere limitati e considerati dalla fase di progettazione, grazie all'applicazione della giusta *governance*, come evidenziato dallo stesso CLD.

5. Discussione

L'analisi condotta attraverso il CLD ha permesso di evidenziare in modo sistemico le molteplici dimensioni di impatto delle NBS alla meso-scala in ambito urbano. In primo luogo è necessario sottolineare che la letteratura scientifica ha posto, finora, una maggiore attenzione all'analisi degli impatti ambientali diretti, come la mitigazione degli effetti del cambiamento climatico e la regolazione microclimatica (Emmanuelle Cohen-Shacham et al., 2016; Raymond et al., 2017). In questo contesto, lo studio condotto da Dumitru e colleghi (2020) evidenzia che circa il 60% delle pubblicazioni relative agli impatti delle NBS si concentra sulla dimensione ambientale, mentre risultano ancora poco esplorate analisi di tipo sistemico in grado di indagare le interconnessioni tra le dimensioni ambientale, economica e sociale (Dumitru et al., 2020). Il CLD rappresenta, quindi, uno strumento utile per rappresentare e analizzare in modo integrato e sistemico i benefici e i *trade-off*, i quali risultano spesso trattati separatamente nei modelli di valutazione proposti (Raymond et al., 2017). Il CLD (Fig.3) consente di evidenziare il potenziale delle NBS nell'attivazione di dinamiche virtuose, che si traducono in co-benefici ambientali, miglioramenti economici indiretti e impatti sociali positivi, mettendo al contempo in luce le criticità legate ai *trade-off* e ai disservizi potenziali. Tale rappresentazione permette di visualizzare simultaneamente sinergie e conflitti generati dalle NBS, favorendo una lettura sistemica utile a supportare i decisori pubblici e privati nella comprensione delle implicazioni a medio e lungo termine di tali interventi.

Inoltre, l'identificazione degli impatti indiretti si configura come uno degli aspetti più interessanti e promettenti. Nel CLD riportato in Figura 3, uno degli impatti indiretti di maggiore rilevanza per le decisioni relative all'implementazione delle NBS è rappresentato dai costi evitati, un aspetto

che risulta ancora poco approfondito nella letteratura dedicata alla valutazione economica delle NBS. Sebbene numerosi studi evidenzino la caratteristica relativa al costo-efficacia delle NBS (Seddon et al., 2020), mancano ancora strumenti adeguati per quantificarne i benefici nel lungo periodo, in particolare quelli legati alla prevenzione dei disastri naturali, al risparmio energetico e alla tutela della salute pubblica. L'impiego del CLD, attraverso l'integrazione di variabili quali i danni evitati da eventi alluvionali o la riduzione delle spese energetiche, offre una prospettiva utile per stimare tali benefici e confrontarli con i costi lungo l'intero ciclo di vita degli interventi (Assumma et al., 2025; Datola et al., 2025).

Un ulteriore elemento critico evidenziato dal CLD (Fig. 3) riguarda la *governance*, spesso poco trattata nei *framework* di valutazione, ma fondamentale per la gestione dei *trade-off* e per assicurare giustizia spaziale e coesione sociale (Martin et al., 2025). La letteratura recente, infatti, richiama l'attenzione sulla necessità di approcci partecipativi e transdisciplinari per evitare che i benefici delle NBS siano concentrati solo in alcune aree o gruppi sociali (Wilhelm Stanis et al., 2025).

Con questa prospettiva, il CLD si configura come uno strumento utile per supportare la pianificazione strategica e la gestione delle NBS, poiché consente di rappresentare in modo sistemico e sinergico l'insieme delle relazioni causa-effetto che intercorrono tra contesto, tipologia di intervento e impatti generati. Inoltre, la struttura flessibile del diagramma permette di adattare l'analisi a diverse scale spaziali e temporali, dando una visione degli impatti a breve, medio e lungo termine.

Infine, il CLD valorizza l'approccio del sistema socio-ecologico (Costanza, 2014), coerente con l'integrazione tra capitale naturale, sociale e costruito, permettendo l'analisi delle dinamiche complesse tra attori, strumenti di policy e impatti diretti e indiretti che influenzano l'efficacia delle NBS (Douglas, 1981). Attraverso questo strumento, è possibile non solo approfondire la comprensione delle relazioni che regolano il funzionamento delle NBS, ma anche orientare la pianificazione strategica di queste soluzioni (Stanganelli et al., 2021).

6. Conclusioni

La presente ricerca propone una prima applicazione del CLD come strumento per l'analisi e la mappatura della complessità, multidimensionalità e multifunzionalità delle NBS in ambito urbano. Il *system thinking* fornisce un utile *framework* per comprendere le complesse interazioni tra ambiente costruito, capitale naturale e sociale, assicurando che tutti i fattori rilevanti siano considerati in modo comprensivo (Meadows & Wright, 2008). L'applicazione proposta ha evidenziato come il CLD si configuri come uno strumento operativo e funzionale, capace di fornire una lettura sistemica e integrata delle NBS in ambito urbano, mettendo in relazione impatti ambientali, economici e sociali. Infatti, il CLD ha permesso di leggere in modo sinergico, quindi, di esplicitare le relazioni di causa-effetto, le sinergie, i *trade-off*, gli impatti diretti e indiretti.

Dal risultato ottenuto è possibile identificare alcuni vantaggi dell'applicazione del *system thinking*. In primo luogo, il CLD permette di rappresentare in modo esplicito e sistemico i *trade-off*, come quelli legati alla salute pubblica, alla gentrificazione, alla sicurezza e ai disservizi ecosistemici, che spesso sono trattati separatamente dai benefici (Casprini et al., 2023). In secondo luogo, il CLD ha permesso di evidenziare e quindi ragionare sui benefici indiretti, tra cui i costi evitati (risparmi energetici e costi da danni climatici), fattori spesso trascurati, ma cruciali nella valutazione del ciclo di vita di tali soluzioni.

Inoltre, dall'analisi delle diverse relazioni causali e sinergie, è stato possibile mettere in evidenza il ruolo centrale della *governance* per la gestione di alcuni *trade-off*, quali giustizia spaziale, accessibilità equa e gestione partecipativa delle soluzioni (Dell'ovo & Oppio, 2019; Martin et al., 2025). Sulla base delle potenzialità emerse da questa prima applicazione, è possibile delineare alcuni sviluppi futuri della presente ricerca, al fine di migliorarne la robustezza e rilevanza operativa. La prima implementazione consiste nello sviluppo di un modello di simulazione SDM, costruito a partire dal CLD presentato (Fig. 3) per valutare scenari alternativi di NBS in funzione dei loro effetti multidimensionali nel medio e lungo periodo (Guan et al., 2011; Tan et al., 2018). La seconda implementazione riguarda l'approfondimento degli impatti indiretti, al fine di integrarli nell'analisi economico-finanziaria delle soluzioni, considerando l'intero ciclo di vita delle NBS (Datola et al., 2025).

Contributo degli autori

Concettualizzazione: G.D A.O; Metodologia: G.D; Raccolta dati: G.D; Analisi formale: G.D; Redazione originale: G.D; Revisione ed editing: G.D A.O; Supervisione: A.O.

Bibliografia

- Alfeld L.E., Graham A.K. & K.G.A. (1976). *Introduction to Urban Dynamics*. Wright-Allen Press. <https://books.google.it/books?id=cIywAAAAIAAJ>
- Assumma V., Casagrande D., Cosmi V., Stanghellini S. (2025). Valutazione del costo medio ponderato delle dotazioni ecologico-ambientali nei processi di trasformazione urbana. *Valori e Valutazioni*.
- Bala B.K., Arshad F.M. & Noh K.M. (2017). Systems Thinking: System Dynamics. In *System Dynamics: Modelling and Simulation* (pp. 15–35). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2045-2_2
- Bayulken B., Huisingh D. & Fisher P.M.J. (2021). How are nature based solutions helping in the greening of cities in the context of crises such as climate change and pandemics? A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125569. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125569>
- Bona S., Silva-Afonso A., Gomes R., Matos R. & Rodrigues F. (2022). Nature-Based Solutions in Urban Areas: A European Analysis. *Applied Sciences*, 13(1), 168. <https://doi.org/10.3390/app13010168>
- Bouchmel I., Ftiti Z., Louhich W. & Omri A. (2024). Financing sources, green investment, and environmental performance: Cross-country evidence. *Journal of Environmental Management*, 353(January), 120230. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120230>
- Bozovic R., Maksimovic C., Mijic A., Suter I. & Reeuwijk M. Van. (2017). Blue Green Solutions. *A Systems Approach to Sustainable, Resilient and Cost-Efficient Urban Development*, Imperial College London. <https://www.climate-kic.org/success-stories/blue-green-solutions-bgs/>
- Caprioli C., Bottero M. & Mondini G. (2020). Urban Ecosystem Services: A Review of Definitions and Classifications for the Identification of Future Research Perspectives. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics): Vol. 12253 LNCS* (pp. 332–344). https://doi.org/10.1007/978-3-030-58814-4_23
- Casprini D., Oppio A., Rossi G. & Bengo I. (2023). Managing Urban Green Areas: The Benefits of Collaborative Governance for Green Spaces. *Land*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/land12101872>
- Castellar J.A.C., Popartan L.A., Pueyo-Ros J., Atanasova N., Langergraber G., Säumel I., Corominas L., Comas J. & Acuña V. (2021). Nature-based solutions in the urban context: terminology, classification and scoring for urban challenges and ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 779, 146237. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146237>
- Cohen-Shacham E., Walters G., Maginnis S. & Janzen C. (2016). *Nature-based solutions to address global societal challenges* (E. Cohen-Shacham G. Walters C. Janzen & S. Maginnis (eds.)). IUCN International Union for Conservation of Nature. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.13.en>
- Coletta V.R., Pagano A., Pluchinotta I., Fratino U., Scieciu A., Nanu F. & Giordano R. (2021). Causal Loop Diagrams for supporting Nature Based Solutions participatory design and performance assessment. *Journal of Environmental Management*, 280, 111668. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111668>
- Costanza R. (2014). A theory of socio-ecological system change. *Journal of Bioeconomics*, 16(1), 39–44. <https://doi.org/10.1007/s10818-013-9165-5>
- D'amato (2000). Urban air pollution and plant-derived respiratory allergy. *Clinical & Experimental Allergy*, 30(5), 628–636. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2222.2000.00798.x>
- Datola G., Ghisoni A., Dell'Ovo M. & Oppio A. (2025). The feasibility of Nature-Based Solution (NBS) interventions: estimating the cost using the Work Breakdown Structure (WBS). *Valori e Valutazioni*, 37(37), 183–208. <https://doi.org/10.48264/VVSIEV-20253711>
- Dell'Ovo M., Datola G., Maiullari D., Oppio A. & Schretzenmayr M. (2026). Green Gentrification: A Literature Review of Trends, Challenges, and Research Opportunities. *Lecture Notes in Computer Science*, 15893 LNCS, 222 – 233. https://doi.org/10.1007/978-3-031-97645-2_15
- Dell'Ovo M. & Oppio A. (2019). Bringing the value-focused thinking approach to urban development

- and design processes: The case of foz do tua area in portugal; [L'approccio value-focused thinking a supporto dei processi progettuali: Il caso della rigenerazione dell'area di foz do tua i. *Valori e Valutazioni*, 2019(23), 91 – 106. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85077091237&partnerID=40&md5=76fa178036febf28464ff8c560aa23a>
- Douglas I. (1981). The city as an ecosystem. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 5(3), 315–367. <https://doi.org/10.1177/030913338100500301>
- Dumitru A., Frantzeskaki N. & Collier M. (2020). Identifying principles for the design of robust impact evaluation frameworks for nature-based solutions in cities. *Environmental Science and Policy*, 112(June), 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.05.024>
- European Commission. (2015). *Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities: Final report of the horizon 2020 expert group on 'nature-based solutions and re-naturing cities'*. <https://doi.org/10.2777/479582>
- European Commission. (2020). *Nature-based solutions: state of the art in EU-funded projects (Independent Expert Report)*. <https://doi.org/10.2777/236007>
- European Commission. (2021). *Evaluating the impact of Nature-Based Solutions. A handbook for Practitioners*. <https://doi.org/10.2777/244577>
- Faivre N., Fritz M., Freitas T., de Boissezon B. & Vandewoestijne S. (2017). Nature-Based Solutions in the EU: Innovating with nature to address social, economic and environmental challenges. *Environmental Research*, 159(December 2016), 509–518. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.08.032>
- Fang X., Li J., Ma Q., Zhou R. & Du S. (2024). A quantitative review of nature-based solutions for urban sustainability (2016–2022): From science to implementation. *Science of The Total Environment*, 927(April), 172219. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172219>
- Fonseca K., Espitia E., Breuer L. & Correa A. (2022). Using fuzzy cognitive maps to promote nature-based solutions for water quality improvement in developing-country communities. *Journal of Cleaner Production*, 377(July), 134246. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134246>
- Forrester, J.W. (1990). *Principles of systems*. Productivity Press. <https://books.google.it/books?id=oMASAQAAIAAJ>
- Forrester Jay W. (1968). Industrial Dynamics—After the First Decade. *Management Science*. <https://doi.org/10.1287/mnsc.14.7.398>
- Gholipour A., Fragoso R., Galvão A. & Finger D.C. (2023). Mapping the causality of interacting perceptions for nature-based solution and sludge treatment reed bed: A causal loop diagram in Iceland. *Nature-Based Solutions*, 3(December 2022). <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2023.100049>
- Giordano R., Pluchinotta I., Pagano A., Scricciu A. & Nanu F. (2020). Enhancing nature-based solutions acceptance through stakeholders' engagement in co-benefits identification and trade-offs analysis. *Science of The Total Environment*, 713, 136552. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136552>
- Giordano R., Osann A., Henao E., López M.L., Piqueras J.G., Nikolaidis N.P., Lilli M., Coletta V.R. & Pagano A. (2025). Causal Loop Diagrams for bridging the gap between Water-Energy-Food-Ecosystem Nexus thinking and Nexus doing: Evidence from two case studies. *Journal of Hydrology*, 650(December 2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132571>
- 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>
- Gómez-Baggethun E., Gren Å., Barton D.N., Langemeyer J., McPhearson T., O'Farrell P., Andersson E., Hamstead Z. & Kremer P. (2013). Urban Ecosystem Services. In T. Elmqvist M. Fragkias J. Goodness B. Güneralp P.J. Marcotullio R.I. McDonald S. Parnell M. Schewenius M. Sendstad K.C. Seto & C. Wilkinson (Eds.), *Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities* (pp. 175–251). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7088-1_11
- Gómez Martín E., Giordano R., Pagano A., van der Keur P. & Máñez Costa M. (2020). Using a system thinking approach to assess the contribution of nature based solutions to sustainable development goals. *Science of the Total Environment*, 738, 139693. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139693>
- Goodwin S., Olazabal M., Castro A.J. & Pascual U. (2023). Global mapping of urban nature-based solutions for climate change adaptation. *Nature Sustainability*, 6(4), 458–469. <https://doi.org/>

10.1038/s41893-022-01036-x

- Goodwin S., Olazabal M., Castro A.J. & Pascual U. (2024). Measuring the contribution of nature-based solutions beyond climate adaptation in cities. *Global Environmental Change*, 89(August 2023), 102939. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2024.102939>
- Guan D., Gao W., Su W., Li H. & Hokao K. (2011). Modeling and dynamic assessment of urban economy-resource-environment system with a coupled system dynamics - Geographic information system model. *Ecological Indicators*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.02.007>
- International Union for Conservation of Nature. (2020). IUCN Global Standard for Nature-based Solutions: a user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NbS: first edition (Arabic version). In *Global Standard for Nature-based Solutions: a user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NbS*: IUCN, International Union for Conservation of Nature. <https://doi.org/10.2305/VCDL1542>
- Jorgensen A. & Anthopoulou A. (2007). Enjoyment and fear in urban woodlands – Does age make a difference? *Urban Forestry & Urban Greening*, 6(4), 267–278. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ufug.2007.05.004>
- Kabisch N., Frantzeskaki N., Pauleit S., Naumann S., Davis M., Artmann M., Haase D., Knapp S., Korn H., Stadler J., Zaunberger K. & Bonn A. (2016). Nature-based solutions to climate change mitigation and adaptation in urban areas: perspectives on indicators, knowledge gaps, barriers, and opportunities for action. *Ecology and Society*, 21(2), art39. <https://doi.org/10.5751/ES-08373-210239>
- Keesstra S., Nunes J., Novara A., Finger D., Avelar D., Kalantari Z. & Cerdà A. (2018). The superior effect of nature based solutions in land management for enhancing ecosystem services. *Science of The Total Environment*, 610–611, 997–1009. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.077>
- Leary M.R., Tipsord J.M. & Tate E. B. (2008). Allo-inclusive identity: Incorporating the social and natural worlds into one's sense of self. In *Transcending self-interest: Psychological explorations of the quiet ego*. (pp. 137–147). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/11771-013>
- Martin J.G.C., Scolobig A., Linnerooth-Bayer J., Irshaid J., Aguilera Rodriguez J.J., Fresolone-Caparrós A. & Oen A. (2025). The nature-based solution implementation gap: A review of nature-based solution governance barriers and enablers. *Journal of Environmental Management*, 388(January), 126007. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126007>
- Meadows D. & Wright D. (2008). *Thinking in Systems: International Bestseller*. Chelsea Green Publishing. <https://books.google.de/books?id=JSgOSP1qklUC>
- Mexia T., Vieira J., Príncipe A., Anjos A., Silva P., Lopes N., Freitas C., Santos-Reis M., Correia O., Branquinho C. & Pinho P. (2018). Ecosystem services: Urban parks under a magnifying glass. *Environmental Research*, 160, 469–478. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.10.023>
- Nesshöver C., Assmuth T., Irvine K.N., Rusch G M., Waylen K.A., Delbaere B., Haase D., Jones-Walters L., Keune H., Kovacs E., Krauze K., Külvik M., Rey F., van Dijk J., Vistad O.I., Wilkinson M.E. & Wittmer H. (2017). The science, policy and practice of nature-based solutions: An interdisciplinary perspective. *Science of The Total Environment*, 579, 1215–1227. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.106>
- Pellerey V. & Torabi Moghadam S. (2025). A place-based framework for assessing the effectiveness of inclusive climate actions for nature-based solutions in cities. *Journal of Cleaner Production*, 486(January 2024), 144566. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144566>
- Raymond C.M., Bryan B.A., MacDonald D.H., Cast A., Strathearn S., Grandgirard A. & Kalivas T. (2009). Mapping community values for natural capital and ecosystem services. *Ecological Economics*, 68(5), 1301–1315. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.12.006>
- Raymond C.M., Frantzeskaki N., Kabisch N., Berry P., Breil M., Nita M.R., Geneletti D. & Calfapietra C. (2017). A framework for assessing and implementing the co-benefits of nature-based solutions in urban areas. *Environmental Science and Policy*, 77(July), 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.07.008>
- Rouwette E. & Vennix J. (2006). System Dynamics and Organizational Interventions. *Systems Research and Behavioral Science*, 23, 451–466. <https://doi.org/10.1002/sres.772>
- Seddon N., Chausson A., Berry P., Girardin C.A.J., Smith A. & Turner B. (2020). Understanding the

- value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 375(1794), 20190120. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0120>
- Sowińska-Świerkosz B. & García J. (2022). What are Nature-based solutions (NBS)? Setting core ideas for concept clarification. *Nature-Based Solutions*, 2(January), 100009. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2022.100009>
- Stanganelli M., Torrieri F., Gerundo C. & Rossitti M. (2021). A Strategic Performance-Based Planning Methodology to Promote the Regeneration of Fragile Territories. In *Lecture Notes in Civil Engineering* (Vol. 146, pp. 149–157). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68824-0_16
- Sterman J.D. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World* (Irwin/McGraw-Hill (ed.)). Irwin/McGraw-Hill. <https://books.google.it/books?id=CCKCQgAACAAJ>
- Tan Y., Jiao L., Shuai C. & Shen L. (2018). A system dynamics model for simulating urban sustainability performance: A China case study. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.154>
- United Nations Environment Programme. (2024). *Information on the implementation of resolution 5/5 on nature-based solutions for supporting sustainable development: Note by secretariat* (Issue October 2022). <https://documents.un.org/doc/undoc/gen/k24/000/78/pdf/k2400078.pdf>
- von Döhren P. & Haase D. (2015). Ecosystem disservices research: A review of the state of the art with a focus on cities. *Ecological Indicators*, 52, 490–497. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.12.027>
- Wilhelm Stanis S.A., Piontek E. & Xu S. (2025). Perceptions of ecosystem services and disservices in urban greenspaces: Insights from a shrinking city. *Urban Forestry & Urban Greening*, 104, 128675. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2025.128675>