

Francesca Thiébat, <https://orcid.org/0000-0003-4478-6693>

Fiamma Morselli, <https://orcid.org/0009-0002-3533-699X>

Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino, Italia

francesca.thiebat@polito.it

fiamma.morselli@polito.it

Abstract. Il contributo richiama la necessità di riflettere sul valore ambientale, culturale e sociale dei materiali da costruzione di origine biogenica e sul ruolo che rivestono all'interno della roadmap verso la neutralità climatica. Partendo da una mappatura di casi studio europei, il saggio si interroga sulla diffusione di tali materiali, chiedendosi se il loro uso sia limitato a casi sperimentali o se possa essere alla base di una strategia di decarbonizzazione. Dall'analisi emerge l'urgenza di adottare strategie che attivino la diffusione e la scalabilità d'uso dei materiali biogenici per rispondere alle normative energetico-ambientali e per contribuire in modo efficace ed economicamente sostenibile alla domanda di materiali net-positive, alternativi a quelli d'uso ordinario.

Parole chiave: Materiali biogenici; *Whole life carbon*; Neutralità climatica; Prefabbricazione; Architettura sostenibile.

Verso la decarbonizzazione dell'ambiente costruito

L'Unione Europea, in linea con gli impegni assunti nell'Accordo di Parigi, si è posta l'obiettivo di raggiungere la neutralità

climatica entro il 2050 attraverso la transizione verso un'economia a zero emissioni nette di gas serra. A tal fine, ha elaborato una "Visione strategica a lungo termine" e ha promosso una serie di iniziative strategiche nell'ambito del Green Deal.

Per allinearsi a questi obiettivi, diversi Stati membri hanno sviluppato roadmap e target specifici per la decarbonizzazione del proprio patrimonio edilizio. *Italy for Climate* ha pubblicato nel 2023 la "Roadmap per la neutralità climatica dell'Italia", delineando un percorso di decarbonizzazione per i settori industriale, edilizio, dei trasporti e agricolo. In sinergia con tale iniziativa, il Green Building Council ha pubblicato la "Roadmap Italiana per la decarbonizzazione degli edifici al 2050"¹, proponendo un approccio sistemico con 53 obiettivi distribuiti in tre aree pri-

Biogenic materials for the decarbonisation of the built environment

Abstract. This contribution highlights the need to reflect on the environmental, cultural, and social value of biogenic construction materials and their role in the roadmap towards climate neutrality. Based on a mapping of European case studies, the essay investigates the diffusion of biogenic materials in architecture, questioning whether their use is limited to experimental cases or if it can be at the base of a decarbonisation strategy. The analysis conducted reveals the urgency of adopting technologies and practices that promote the diffusion and scalability of biogenic materials to respond to energy and environmental regulations, as well as to contribute effectively and sustainably to the demand for net-positive materials, as alternatives to conventional ones.

Keywords: Biogenic materials; Whole life carbon; Climate neutrality; Prefabrication; Sustainable architecture.

oritarie: decarbonizzazione degli edifici, circolarità nel settore delle costruzioni e qualità e resilienza delle città.

L'obiettivo finale è quello di raggiungere il target degli edifici "Net-Zero Whole Life Carbon" entro il 2050 (IEA EBC). Questo approccio non si limita alle emissioni legate alla fase d'uso di un edificio (*Operational Carbon OC*), ossia quelle dovute al fabbisogno energetico per climatizzazione, illuminazione e produzione di acqua calda sanitaria. La *Whole Life Carbon* considera anche le emissioni di CO₂ equivalente² generate dai materiali durante le fasi di produzione, costruzione, utilizzo e dismissione dell'edificio (*Embodied Carbon EC*). Inoltre, per conseguire edifici a zero emissioni nette di carbonio (*net-zero* o *carbon neutral*³), tiene conto dei benefici e degli impatti che potrebbero emergere al di là del ciclo di vita dell'edificio, così come della quota per la compensazione delle emissioni complessive. Sebbene l'OC possa essere mitigato lungo tutto il ciclo di vita, l'EC è tipicamente caratterizzato da un picco iniziale, noto come "carbon spike" (Ruta *et al.*, 2024), difficile da ridurre nelle fasi successive. Diventa quindi cruciale ottimizzare la scelta dei materiali, le tecniche costruttive e la gestione del fine vita degli edifici.

Per avviare una transizione ad ampia scala e una conseguente riduzione significativa delle emissioni di carbonio secondo quanto indicato dall'IPCC, sembra quindi più appropriata una visione per la decarbonizzazione dell'ambiente costruito che riconosca il valore temporale delle emissioni di carbonio emesse nell'intero ciclo di vita dell'edificio, che includa strategie di compensazione nel bilancio complessivo, come suggerisce il World Green Building Council (WGBC), e che promuova

Towards decarbonisation of the built environment

The European Union, in line with the commitments undertaken in the Paris Agreement, has committed to achieving climate neutrality by 2050 through the transition to a net-zero greenhouse gas emissions economy. To this end, it has devised a "Long-term strategic vision" and promoted a series of strategic initiatives under the Green Deal.

To align with these objectives, several Member States have developed specific roadmaps and targets for decarbonisation of their building stock. Italy for Climate published in 2023 the "Roadmap for Climate Neutrality in Italy", outlining pathways for decarbonising the industrial, building, transport, and agricultural sectors. In line with this initiative, the Green Building Council has published the "Italian Roadmap for the Decarbonisation of Buildings

by 2050"¹, proposing a systemic approach with 53 objectives distributed into three priority areas, namely decarbonisation of buildings, circularity in the construction sector, and quality and resilience of cities.

The final goal is to achieve the "Net-Zero Whole Life Carbon" building target by 2050 (IEA EBC). This approach goes beyond the emissions associated with the use phase of a building (*Operational Carbon, OC*), i.e., those related to energy needs for heating, cooling, lighting, and domestic hot water production. *Whole Life Carbon* also considers the equivalent CO₂ emissions² generated by materials during the building's production, construction, use, and end-of-life phases (*Embodied Carbon - EC*). Furthermore, achieving net-zero carbon buildings (*Net Zero* or *Carbon Neutral*³) requires accounting for the benefits

la rigenerazione dell'ambiente e la biodiversità (Ichioka and Pawlyn, 2021).

Tra le azioni prioritarie proposte dalla Global Alliance for Building and Construction, principale riferimento europeo per lo sviluppo delle metodologie di riferimento insieme al WGBC, è infatti quella di promuovere l'uso di materiali *low carbon* per ridurre l'EC sull'intero ciclo di vita (Andreotti e Giordano, 2024). Tra i materiali *low carbon*, il saggio si focalizza su quelli di origine biogenica.

Il termine "biogenico" si riferisce a materia derivata da biomassa (European Committee for standardisation, 2014) vergine o riciclata, come ad esempio legno, canapa, paglia, micelio, lana di pecora, conchiglie, alghe e altri materiali che provengono da altri organismi viventi⁴. Il prodotto biogenico si definisce invece come "interamente o parzialmente derivato da biomassa". I materiali biogenici si possono distinguere in materiali derivati da risorse a crescita lenta, come il legno, o a crescita rapida, i "fast-growing materials" (Pomponi *et al.*, 2020; Pittau, 2018; Göswein *et al.*, 2022), come la paglia e la canapa. Questi ultimi possono favorire la decarbonizzazione in modo più efficiente grazie ai brevi periodi di rotazione delle colture (Göswein *et al.*, 2022).

In architettura, l'utilizzo di prodotti a base biogenica per interventi di recupero, ampliamento o nuova costruzione spesso riguarda elementi di involucro e partizioni interne (ad es. isolanti in fibre vegetali o rivestimenti in legno) e talvolta elementi strutturali (ad es. sistemi portanti in legno o in balle di paglia). Oltre a essere rinnovabili in natura, essi svolgono un ruolo cruciale nella cattura dell'anidride carbonica atmosferica durante il loro processo di crescita, in quanto la CO₂ sequestrata viene immagazzinata come CO₂ biogenica all'interno degli

and environmental impacts that may emerge beyond the building's life cycle and the quota for compensating for total emissions. Although emissions associated with OC can be mitigated throughout the life cycle, EC is typically characterised by an initial peak, known as a "carbon spike" (Ruta *et al.*, 2024), which is inherently difficult to reduce in subsequent phases. Hence, it becomes crucial to optimise the choice of materials, construction techniques, and the end-of-life management of buildings.

To initiate a large-scale transition and a consequent significant reduction in carbon emissions, as indicated by the IPCC, a vision for decarbonisation of the built environment that recognises the time value of carbon emissions emitted throughout the whole life cycle of the building seems more appropriate. It should include compensation

strategies in the overall balance (World Green Building Council), while promoting environmental regeneration and biodiversity protection (Ichioka and Pawlyn, 2021).

The Global Alliance for Building and Construction, a prominent European body for developing benchmarking methodologies alongside the WGBC, has prioritised the promotion of low carbon materials to mitigate embodied carbon (EC) throughout the entire building life cycle (Andreotti and Giordano, 2024). This essay will concentrate on biogenic materials within the spectrum of low carbon options. The term "biogenic" denotes matter derived from biomass (European Committee for Standardization, 2014), either virgin or recycled, encompassing materials such as wood, hemp, straw, mycelium, sheep's wool, shells, algae, and other substances originating

edifici (Pittau *et al.*, 2018) creando così un costruito *carbon sink*⁵ (Pomponi *et al.*, 2020; Churkina *et al.*, 2020). Le emissioni associate a questi materiali possono quindi essere compensate dalla piantumazione e ricrescita di biomasse da utilizzare come nuova materia prima che, assorbendo annualmente CO₂ dall'atmosfera, contribuiscono al sequestro complessivo del carbonio (Göswein *et al.*, 2022).

Tra le altre caratteristiche dei prodotti da costruzione biogenici vi sono la non tossicità, la traspirabilità, la biodegradabilità, buone proprietà termiche (Galimshina *et al.*, 2024), la possibilità di integrazione nei sistemi passivi (Ruta *et al.*, 2024), la capacità di attivare processi di recupero e riuso di scarti dal settore agro-alimentare (Galimshina *et al.*, 2024) e, infine, la capacità di incentivare la rigenerazione sociale ed economica di comunità locali (Brunner, 2011; Ruta, 2024; Ichioka and Pawlyn, 2021). Tuttavia, sebbene tali materiali offrano vantaggi significativi per la riduzione della EC, permangono alcuni limiti riguardo all'aspetto estetico, alla durabilità, alla resistenza al fuoco (Jones and Brischke, 2017; Ruta *et al.*, 2024), alla resistenza all'acqua, all'attacco di parassiti e alla disponibilità delle risorse (Göswein *et al.*, 2021; Pomponi *et al.*, 2020).

Materiali biogenici: una strada possibile

estetiche, tecnologiche, storico-culturali, funzionali ed etiche. Allo stesso modo è necessario tenere conto di vincoli normativi e tecnici, inclusa la reperibilità stessa delle materie prime.

Come sostengono diversi autori, la sostituzione di prodotti ad elevato impatto ambientale con prodotti a basso impatto, a base

In fase di progettazione, la scelta di materiali e componenti è fortemente legata a valutazioni

from living organisms⁴. A "biogenic product" is, instead, defined as one that is either wholly or partially derived from biomass. Biogenic materials can be categorised as those sourced from slow growing resources, such as wood, and "fast-growing materials" (Pomponi *et al.*, 2020; Pittau, 2018; Göswein *et al.*, 2022), such as straw and hemp. Given their shorter crop rotation periods, fast growing materials have greater potential to contribute to decarbonisation more effectively (Göswein *et al.*, 2022).

In the architectural context, the application of biogenic-based products for renovation, extension, or new construction frequently includes elements of the building envelope and internal partitions (e.g., plant-fibre insulation or timber cladding) and, in some cases, structural components (e.g., timber or straw bale structural systems).

Beyond their intrinsic renewability, biogenic materials play a crucial role in sequestering atmospheric carbon dioxide during their growth phase, as the captured CO₂ is stored as biogenic CO₂ within the built environment (Pittau *et al.*, 2018), thus transforming the built environment into a carbon sink⁵ (Pomponi *et al.*, 2020; Churkina *et al.*, 2020). The emissions associated with these materials can be mitigated through the cultivation and regeneration of biomass as a new raw material, which, by annually absorbing CO₂ from the atmosphere, contributes to the overall carbon sequestration process (Göswein *et al.*, 2022).

Further characteristics of biogenic building products include non-toxicity, breathability, biodegradability, good thermal properties (Galimshina *et al.*, 2024), the potential for integration into passive systems (Ruta *et al.*,

biogenica, non sempre soddisfa i vincoli di progetto e le prestazioni richieste. Si pensi ad esempio alle fondazioni che devono resistere a forti sollecitazioni e garantire la tenuta all'acqua. Oppure alla scarsa disponibilità di alcuni materiali ritenuti a basso impatto ambientale in aree geografiche specifiche il cui impatto aumenta a causa dei trasporti e la cui sostenibilità si abbassa se si supera la capacità di rigenerazione nel tempo (Göswein *et al.*, 2021, 2022; Pomponi *et al.*, 2020). È il caso del legno usato in località in cui non crescono foreste o con un tasso di utilizzo che eccede il tasso di crescita (Pomponi *et al.*, 2020).

Carcassi *et al.* (2022) paragona la piramide alimentare con la "dieta dei materiali da costruzione". Sostiene che per raggiungere gli obiettivi di neutralità climatica occorra prima di tutto ridurre al minimo, quando non sia possibile la sostituzione, l'utilizzo di materiali con un alto tasso di *Embodied Energy*, definiti *high-carbon*, quali ad esempio acciaio, materiali polimerici e vetro; secondariamente favorire l'utilizzo di materiali caratterizzati da basse emissioni di CO₂, definiti *low-carbon*; e infine preferire il più possibile materiali da costruzione *climate-negative* per la capacità di assorbire e immagazzinare la CO₂. Inoltre, come per la dieta alimentare, suggerisce di diversificare i prodotti e ragionare sull'efficienza in base al tipo di progetto e alla localizzazione.

I materiali biogenici costituiscono quindi una possibile alternativa per favorire la transizione ecologica dell'ambiente costruito soprattutto se adottati su ampia scala. Come approfondito da Ruta *et al.* (2024), l'adozione in fase di progetto della "dieta dei materiali da costruzione" può consentire una riduzione del 50% delle emissioni lungo l'intero ciclo di vita rispetto a un edificio convenzionale. Inoltre, prendendo in considerazione l'utilizzo di

2024), the capacity to facilitate recovery and reuse processes for agrifood waste (Galimshina *et al.*, 2024) and, finally, their ability to support the social and economic regeneration of local communities (Brunner, 2011; Ruta, 2024; Ichioka and Pawlyn, 2021). Despite the significant advantages of bio-based building materials in reducing EC, challenges remain regarding aesthetics, durability, fire resistance (Jones and Brischke, 2017; Ruta *et al.*, 2024), water resistance, susceptibility to insect and pest infestation, and resource availability (Göswein *et al.*, 2021; Pomponi *et al.*, 2020).

Biogenic Materials: A possible path
The choice of building materials and components in the design phase is intrinsically linked to many considerations, ranging from aesthetic and technological factors to historical and

cultural relevance, functionality, and ethical considerations. Regulatory and technical constraints must also be taken into account, particularly those concerning the availability, durability, and sustainability of raw materials. Several authors argue that replacing high impact materials with low impact biogenic alternatives does not always meet project requirements or performance standards. For instance, foundations must withstand heavy loads and ensure watertightness, making substitution more challenging. Furthermore, other considerations should be made for the limited availability of some low impact materials in specific geographic areas, where their impact increases due to transportation, and their sustainability decreases if the regeneration capacity is exceeded over time (Göswein *et al.*, 2021, 2022; Pomponi *et al.*, 2020). This is the case

materiali biogenici, in particolare a crescita rapida, e il relativo contributo della CO₂ biogenica sequestrata, la riduzione di emissioni nel ciclo di vita può raggiungere il 70% (Ruta *et al.*, 2024). Sulla base di queste premesse, il saggio esplora alcuni casi studio di architetture contemporanee realizzate con materiali biogenici. I casi studio sono stati selezionati all'interno del contesto geografico europeo nell'arco temporale degli ultimi vent'anni. Tale scelta è legata alla volontà delle autrici di indagare opere recenti e di analizzare la messa in opera di prodotti, componenti o materiali biogenici in Europa.

Le tabelle 1, 2 e 3 riportano una mappatura⁶ di ventisette progetti suddivisi per tipo di materiale biogenico impiegato in forma innovativa o, in alcuni casi, predominante. Per ogni architettura i dati riportati mettono in evidenza il sito di progetto, l'anno di costruzione, gli elementi tecnici realizzati con materiale biogenico, il sistema costruttivo, la destinazione d'uso, se è un progetto di recupero/ampliamento o una nuova costruzione, se è pubblico o privato e infine se l'uso del materiale biogenico è sperimentale o meno. I limiti principali della selezione dei casi studio riguardano la reperibilità delle informazioni e dei dettagli tecnici (disegni o immagini di cantiere). Inoltre, per i materiali con un'ampia disponibilità di esempi, come nel caso del legno, è stato necessario selezionarne solo alcuni privilegiando quelli particolarmente significativi o pionieristici.

I casi studio sono stati esaminati al fine di identificare potenzialità e limiti nell'uso di materiali biogenici da replicare su larga scala per contribuire al raggiungimento della neutralità climatica.

Dall'analisi è emersa la necessità di evidenziare alcuni temi chiave. Innanzitutto, è possibile usare i materiali biogenici per tutti gli elementi tecnici? Dall'osservazione dei casi studio si




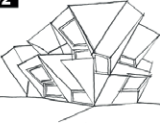

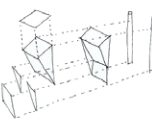



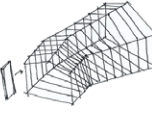
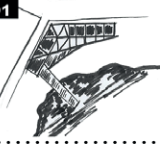

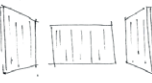











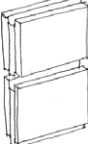







of wood used in locations where forests do not grow or where the use rate exceeds the growth rate (Pomponi *et al.*, 2020).

Carcassi *et al.* (2022) draw a comparison between the food pyramid and a "material diet". They argue that to achieve climate neutrality, we must first minimise, where substitution is not possible, the use of materials with a high embodied energy, known as high carbon materials, such as steel, polymers, and glass. Secondly, we must promote the use of materials with low CO₂ emissions, defined as low carbon; and, finally, prioritise the use of climate-negative construction materials whenever feasible, due to their ability to absorb and store CO₂. Moreover, as with a food diet, they suggest diversifying products and consider efficiency based on the type of project and location.

Biogenic materials are, therefore, a fundamental alternative to promote the ecological transition of the built environment. As detailed by Ruta *et al.* (2024), adopting a 'material diet' during the design phase can enable a 50% reduction in emissions over the entire life cycle, when compared to a conventional building. Moreover, the use of biogenic materials, particularly fast-growing ones, alongside their ability to sequester biogenic CO₂, can reduce life cycle emissions by 70% (Ruta *et al.*, 2024).

Building on these principles, this paper examines contemporary architectural case studies showcasing the use of biogenic materials. The case studies have been selected within the European geographic context over the last twenty years. This choice is linked to the desire to investigate recently completed projects, and to analyse the

Tab.01 | Casi studio selezionati per tipo di materiale biogenico. Fonte: autori dell'articolo
 Case studies divided by type of biogenic material. Source: article authors







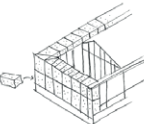














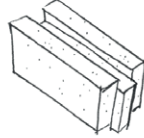









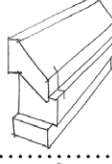




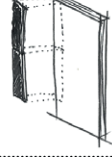
Biogenic Material	Project Designers Reference	Location	Year	Biogenic technical elements	Detail	Construction technique	Intended use	Renovation	New construction	Private	Public	Experimental	Non experimental
								■	◆	■	◆	■	◆
WOOD FRAME	Tamedia office WD 01 Shigeru Ban shigerubanarchitects.com 	Zurich CH	2013			Prefabricated Glulam timber elements joined together using traditional Japanese carpentry techniques	Office	◆	■	■	■	■	■
	Endesa Pavillion WD 02 IAAC: Arch. Rodrigo Rubio, Miguel Guerrero IAAC - Institute for Advanced Architecture of Catalonia https://iaac.net/ 	Barcelona ES	2011			Modular Components wood frame structure	Educational Prototype	◆	◆	■	■	■	■
	Lou Estela WD 03 Arch. Davide Castellino https://www.dariocastellino.it/progetto/abitazione-42-2/ 	Moiola IT	2021	 		Prefabricated wood structure - trusses with different sizes to give shape to the ridge line of the roof	Residential	◆	■	■	■	■	■
MASS TIMBER	CENF - Formentera Water Sports Center MT 01 Arch. Marià Castelló Martínez https://m-ar.net/formentera-water-sports-center/ 	La Savina ES	2019			CLT structure	Sport centre	◆	◆	■	■	■	■
	Mjostarnet MT 02 Arch. Voll Arkit https://vollark.no/portfolio_page/mjostarnet/ 	Brumunddal NO	2019			Glulam structure trusses made from light-coloured spruce wood, CLT structure columns.	Mixed use, Offices, hotel, public spaces	◆	◆	■	■	■	■
	Delhaize Quai de Rome MT 03 MDW Architecture + H+G Architects MDW Architecture mdw-architecture.com 	Liège BE	2015	 		Wood is used throughout the project, from CLT structure to cedar façade cladding	Commercial - Retail Supermarket	◆	■	■	■	■	■
	House Kõris MT 04 Arch. Zeller & Moyer Lewis, P., Tsurumaki, M., & Lewis, D. J. (2022). Manual of Biogenic House sections. Oro Editions. 	Gross Kõris DE	2020	  		Prefabricated load bearing hollow block and CLT for horizontal structure	Residential	◆	■	■	■	■	■
STRAW	Casa Stella Mar SW 01 Atelier Werner Schmidt Atelier Werner Schmidt Haus P&W, CH-Susch (atelierschmidt.ch) 	Susch CH	2014			Straw bale external thermal envelope - insulation	Residential	■	■	■	◆	■	■
	Gartist GmbH House SW 02 Atelier Werner Schmidt Atelier Werner Schmidt Gartist GmbH, CH-Bubikon (atelierschmidt.ch) 	Bubikon CH	2017	 		Structural jumbo straw bale for both the walls and the roof	Office and showroom	◆	■	■	■	■	■

Tab.01

Icon legend  Structure  Cladding  Insulation  Partition

Tab. 02 | Casi studio selezionati per tipo di materiale biogenico. Fonte: autori dell'articolo
Case studies divided by type of biogenic material. Source: article authors

Tab. 02 |

Biogenic Material	Project Designers Reference	Location	Year	Biogenic technical elements	Detail	Construction technique	Intended use	Renovation	New construction	Private	Public	Experimental	Non experimental
								■	■	■	■	■	■
STRAW	Bauge Lequertier and Martin Stern, E., Walther, R., & Rager, M. (2020). <i>Le tour de France des maisons écologiques. Alternatives.</i> 	Taillebois Orne FR	2018			Self-construction Rammed earth pillars and straw bale infill walls	Residential	■	■	■	■	■	■
	Maison Mor Atelier Desmichelle Stern, E., Walther, R., & Rager, M. (2020). <i>Le tour de France des maisons écologiques. Alternatives.</i> 	Saint-Nom-La-Bretèche, Yvelines, FR	2015	 		Structural straw bale and wood frame	Residential	■	■	■	■	■	■
HEMP	Flat house Practice Architecture Lewis, P., Tsurumaki, M., & Lewis, D. J. (2022). <i>Manual of Biogenic House sections. Oro Editions.</i> 	Cambridgeshire UK	2019			Modular units built onsite / Prefabricated I-joist wood framed cassettes filled with hemp and lime	Residential	■	■	■	■	■	■
	Polyvalent Studio Practice Architecture + Unit 7, London Metropolitan University https://practicearchitecture.co.uk/project/cass-studio/ 	Pidley UK	2019	 		Prefabricated modules with wood structure, hempcrete walls, wood fibre insulation, hemp fibre bio-resin cladding (Margent Farm)	Atelier	■	■	■	■	■	■
	Beton de chanvre Daniel Bayol Stern, E., Walther, R., & Rager, M. (2020). <i>Le tour de France des maisons écologiques. Alternatives.</i> 	Vidauban, Var FR	2015			Wood (douglas fir) structure, insulated hempcrete insulation, earth bricks wall partitions	Residential	■	■	■	■	■	■
	Sports hall Lemoal Lemoal Architectes Pierre Chevet Sports Hall in Croissy-Beaubourg (theplan.it) 	Croissy-Beaubourg, FR	2021	  		Wooden half-vaulted porticoes that lean against a structural wall of hempcrete blocks	Sport centre	■	■	■	■	■	■
	The voice of urban nature Overtreders W Architectural design Overtreders W I (overtreders-w.nl) 	Floriade, Almere NL	2022	  		Wooden building modules filled with lime hemp and robust constructive columns	Educational Prototype	■	■	■	■	■	■
CORK	Cork house Matthew Barnett Howland, Dido Milne, Oliver Wilton https://www.matthewbarnet-howland.com/cork-house 	Eton UK	2011	  		Prefabricated modules of structural cork blocks	Residential	■	■	■	■	■	■
	Two cork houses Emiliano López Mónica Rivera Arquitectos Lewis, P., Tsurumaki, M., & Lewis, D. J. (2022). <i>Manual of Biogenic House sections. Oro Editions.</i> 	Palafrugell ES	2016	  		Structure in CLT panels with cork insulation external skin	Residential	■	■	■	■	■	■

Icon legend  Structure  Cladding  Insulation  Partition

Tab.03 | Casi studio selezionati per tipo di materiale biogenico. Fonte: autori dell'articolo
 Case studies divided by type of biogenic material. Source: article authors

Biogenic Material	Project Designers Reference	Location	Year	Biogenic technical elements	Detail	Construction technique	Intended use	Renovation	New construction	Private	Public	Experimental	Non experimental
								■	◆	■	◆	■	◆
CORK	Casa Quattro CK 03 LCA Architetti LCA Architetti (Luca Compri Architetti - Varese) - BENVENUTI (lcaarchitetti.com)	Magnago, Milan IT	2016			Wood structure, rice straw infill walls, cork external insulating panels	Residential	◆	■	◆			
	The day After House CK 04 Takk the day after house - takk's archive (cargo.site)	Madrid ES	2021			Wood structure and cork panels for insulation and interior clad	Residential	■	■	■			
MYCELIUM	Growing pavillion MM 01 New Heroes Company https://thegrowingpavillion.com	Eindhoven NL	2019			Wood structure, mycelium cladding external panels, Bio-textile cotton roof, reed floor	Educational Prototype	◆	◆	■			
	MY-CO Space MM 02 MY-CO X Collective https://www.tu.berlin/en/ub/about-us/contact/public-relations/my-co-space/	Berlin DE	2021			Wood structure, mycelium cladding external panels	Educational Prototype	◆	◆	■			
HUSK	GAIA, Rice house HK 01 Rice house Gaia (ricehouse.it)	Massa IT	2018			3D printed walls of earth, straw and ground sand, with rice husk infill	Residential	◆	■	■			
REED	Roseaux RD 01 Atelier CAZ'éco Stern, E., Walther, R., & Rager, M. (2020). Le tour de France des maisons écologiques. <i>Alternatives</i> .	Savenay, Loire-Atlantique FR	2018			Prefabricated modus with wood frame and reed fibre insulation, reed thatching external cladding	Residential	◆	■	◆	■		
	Dune House RD 02 Archispektras Lewis, P., Tsurumaki, M., & Lewis, D. J. (2022). Manual of Biogenic House sections. <i>Oro Editions</i> .	Pape LV	2016			Modular component wood frame structure	Residential	◆	■	◆			
	SkinOver Reed RD 03 IBBTE University of Stuttgart IBBTE Universität Stuttgart (uni-stuttgart.de)	Brand Bei Bludenz AT	2019			Wood structure (portals) and external insulating and cladding thatched reed	Accomodation	◆	■	■			
	Seaweed House SD 01 Vandkunsten Architects Lewis, P., Tsurumaki, M., & Lewis, D. J. (2022). Manual of Biogenic House sections. <i>Oro Editions</i> .	Laesø Island DK	2013			Concrete pier foundations, wood structure, seagrass external cladding and insulation	Residential	◆	■	■			

Icon legend Structure Cladding Insulation Partition

Tab.03

nota chiaramente che solo alcuni materiali possono essere utilizzati per la struttura portante, in particolare legno e paglia, e, se si esclude il legno, spesso manca la normativa di riferimento e sta al singolo progettista riuscire a certificare il progetto. Tuttavia, due casi studio mostrano la possibilità di utilizzare per le strutture portanti anche materiali alternativi come il sughero (CK01) o la calce-canapa (HP04).

Un secondo tema riguarda il processo costruttivo. Nonostante l'uso di materiali biogenici sia spesso associato a tecniche di auto-costruzione, soprattutto al di fuori dell'Europa, molti progetti prevedono la realizzazione di alcune parti del manufatto in officina, sia interi componenti prefabbricati (WD02), sia elementi tecnici realizzati *ad hoc* da assemblare in cantiere (WD01).

Occorre poi mettere in evidenza che la maggior parte dei progetti analizzati sono edifici in prevalenza privati con destinazione d'uso residenziale (15 su 27). Ciò può essere dovuto a diversi fattori, tra cui il fatto che i prodotti a base biogenica spesso sono poco presenti in ambito normativo, sono ancora sperimentali o presentano una limitata diffusione sul mercato e per questo vengono impiegati per edifici di dimensioni ridotte, ad uno o due piani fuori terra, talvolta di proprietà dei progettisti stessi. La mappatura in alcuni casi mostra una discrepanza tra la localizzazione geografica del cantiere e la provenienza delle materie prime, come nel caso del sughero impiegato in edifici nel nord Europa (CK01). In altri casi invece, l'uso di prodotti biogenici già presenti sul mercato locale, innesca processi di crescita delle filiere esistenti attraverso il trasferimento tecnologico tra settori economici diversi (ad es. agricolo / edilizio) e strategie di riuso secondo i principi dell'economia circolare. Un esempio è la paglia impiegata in alcuni casi studio in Francia (SW01, SW02) e

in Svizzera (SW03, SW04), materiale già ampiamente presente sul mercato agricolo e zootecnico.

Si può notare inoltre un aumento negli ultimi anni nell'uso di materiali biogenici. Meno del 20% dei progetti analizzati è stato costruito tra il 2000 e il 2015, mentre più del 50% è stato realizzato negli ultimi sei anni. Tale incremento può essere considerato un risultato positivo attribuibile alle strategie per la decarbonizzazione messe in atto nell'ultima decade a livello internazionale e in particolare dall'UE anche attraverso iniziative con ricadute dirette sui cittadini come il New European Bauhaus.

È infine importante evidenziare il carattere sperimentale nell'uso dei materiali biogenici in quasi il 75% dei progetti analizzati. Tema che emerge anche dalla mancanza quasi totale di informazioni sui costi di fornitura e posa. In particolare, alcuni progetti riguardano edifici dimostratori su cui vengono testati i materiali, come nel caso dei padiglioni in micelio (MM01, MM02); altri invece riprendono usi tradizionali in chiave contemporanea con sistemi ingegnerizzati e certificabili, come la fibra di canna palustre utilizzata in pannelli (RD01); mentre altri ancora sperimentano nuove forme o tecniche di lavorazione, come ad esempio blocchi assemblabili (MT04) o biocompositi nella manifattura additiva (HK01).

Mentre la valutazione della fattibilità tecnica e della scalabilità è fondamentale per ogni sistema innovativo, per i materiali biogenici è importante assicurare la replicabilità delle soluzioni progettuali e costruttive, al fine di evitarne l'isolamento a singoli casi studio. Nel caso di materiali biogenici, replicabilità vuol dire anche reperibilità della materia prima. Per quanto sia auspicabile un aumento della domanda e dell'offerta di nuove filiere di prodotti biogenici non si può prescindere dal considerare, da

implementation of biogenic products, components, or materials in Europe.

Tables 1, 2, and 3 present a mapping⁶ of twenty-seven case studies categorised by the type of biogenic material used in an innovative or, in some cases, predominant way. For each architecture, the data presented highlight the project site, construction year, biogenic elements used, construction system description, intended use, whether it is a renovation/extension project or new construction, whether it is public or private and, finally, whether the use of the biogenic material is experimental or non-experimental. The main limitations of the case study selection concern the availability of information and technical details (drawings or construction site images). Furthermore, it was necessary to select only a few case studies for materials with a wide availability of examples, such as wood, pri-

oritising those that were particularly significant or pioneering.

The case studies were examined to identify the potential and limitations of using biogenic materials at a wide scale to contribute to achieving climate neutrality. The analysis highlighted the need to emphasise some key issues. Firstly, can biogenic materials be used for all technical elements of a building? Case studies reveal that only certain materials, particularly wood and straw, can be used for load-bearing structures. Moreover, when wood is excluded, there is often a lack of regulations, and it is up to the individual designer to certify the project. However, two case studies show the possibility of using alternative materials for structural elements, such as cork (CK01) or lime-hemp load-bearing bricks (HP04).

A second theme relates to the construction process. Although the use of

biogenic materials is often associated with self-build techniques, especially outside Europe, many projects involve the off-site production of certain building components, either as fully prefabricated modules (WD02) or as custom-made technical systems to be assembled on site (WD01). It should also be noted that most of the projects analysed are predominantly private buildings for residential use (15 out of 27). This may be due to several factors, including the fact that biogenic products are often inadequately represented in regulations, are still experimental or have limited presence on the market, and are, therefore, used for small buildings, one or two stories above ground, sometimes owned by the designers themselves. In some cases, the mapping reveals a discrepancy between the geographic location of the construction site and the origin of raw

materials, as in the case of cork used in buildings in northern Europe (CK01). In other instances, however, the utilisation of biogenic products already available in the local market initiates processes that reinforce existing supply chains by facilitating the transfer of technology across various economic sectors (e.g. agriculture and construction), and promoting reuse strategies aligned with circular economy principles. For example, straw, a material readily accessible in agricultural and livestock markets, is employed in case studies from France (SW01, SW02) and Switzerland (SW03, SW04).

A significant increase in the use of biogenic materials can be observed when examining the construction year of the projects. Less than 20% of the analysed projects were constructed between 2000 and 2015, while more than 50% were built in the last six

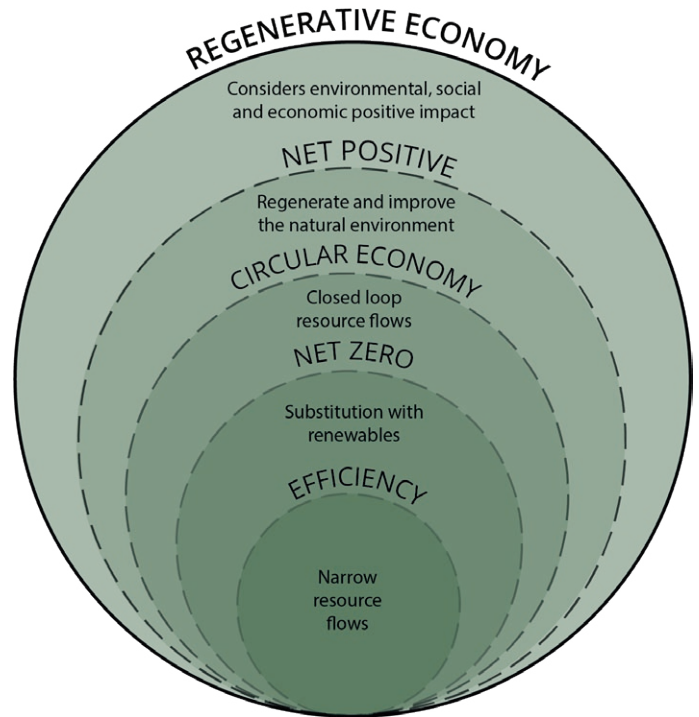
una parte, gli ecosistemi e gli equilibri socio-economici esistenti (Ichioka and Pawlyn, 2021) e, dall'altra, il tasso di utilizzo delle materie prime che non deve superare il tasso di rigenerazione. Ulteriori indagini sulla diffusione dei materiali biogenici potrebbero essere condotte a partire dalla percezione degli utenti che spesso associano a tali materiali un valore negativo. A volte, infatti, sono percepiti come materiali poveri, poco duraturi e poco conosciuti, nonostante l'architettura spontanea e gli edifici vernacolari costituiscano un 'prototipo storico' ancora molto presente in Europa. Anche il valore economico influisce sulla percezione dei consumatori. In genere, ad un costo della materia prima relativamente basso, corrisponde un prezzo di mercato più alto rispetto a prodotti convenzionali a causa della mancanza di un mercato specifico di prodotti biogenici. Difficilmente poi rientrano in meccanismi di incentivazione, soprattutto per mancanza di *know-how*, basso scale-up industriale, oltre ai motivi di reperibilità già evidenziati. Come dimostrano alcuni dei casi studio analizzati, la prefabbricazione di prodotti biogenici potrebbe migliorare l'efficienza nella produzione e nei tempi di costruzione, riducendo gli sprechi e ottimizzando l'uso delle risorse. Questo consentirebbe un maggiore controllo della qualità, garantendo omogeneità nelle prestazioni e favorendo la certificazione e la diffusione sul mercato dei prodotti (Sutkowska *et al.*, 2024).

Quali prospettive per un'architettura sostenibile?

L'analisi di casi studio europei ha sottolineato il crescente interesse per l'utilizzo di materiali da costruzione di origine biogenica. Materiali che, oltre a offrire significativi vantaggi ambientali, possono contribuire in modo

years. This trend likely reflects the success of decarbonisation strategies implemented at the international level, particularly by the EU in the last decade, and through initiatives directly impacting citizens, such as the New European Bauhaus. Finally, it is important to highlight the experimental nature of the use of biogenic materials in almost 75% of the analysed projects. This theme is further evident in the absence of information regarding supply and installation costs. Specifically, some projects involve educational prototypes used to test materials, as seen in the case of mycelium pavilions (MM01, MM02), while others take up traditional applications updated with engineered and certifiable systems, such as reed fibre used in prefabricated panels (RD01); yet others experiment with new forms or processing techniques, such as blocks that can be as-

sembled (MT04) or biocomposites in additive manufacturing (HK01). While assessing technical feasibility and scalability is essential for any innovative system, concerning biogenic materials, it is essential to ensure the replicability of design and construction solutions to avoid isolating them as an individual case study. Replicability also means the availability of raw materials. While an increase in the demand and development of new biogenic product supply chains is desirable, it is essential to consider the existing ecosystems and socio-economic realities (Ichioka and Pawlyn, 2021), as well as the utilisation rate of raw materials, which must not exceed the regeneration rate. The adoption of biogenic materials could be further explored by examining user perceptions, as these materials are often associated with negative con-



significativo alla decarbonizzazione dell'ambiente costruito. Una strada possibile, che sta prendendo forma. Talvolta però la loro applicazione è limitata a progetti pilota difficili da scalare e replicare per la mancanza di normative specifiche, la scarsa disponibilità di materiali certificati e la necessità di competenze tecniche.

In tale ottica, la prefabbricazione può essere una strategia per favorire la diffusione di materiali biogenici come prassi piuttosto che come *unicum*?

La prefabbricazione di sistemi che prevedono l'uso di materiali a crescita rapida e circolari rappresenta un'alternativa alla costruzione convenzionale per un ambiente costruito *climate-neutral*. In linea con il concetto di "dieta dei materiali da costruzione",

notations. They are often conceived as poor, non-durable, and unfamiliar materials, though spontaneous architecture and vernacular buildings constitute 'historical prototypes', which are still extensively present in Europe. Economic value also influences consumer perception. Generally, a relatively low raw material cost translates to a higher market price in comparison to conventional products due to the lack of a market for biogenic products in the construction industry. Furthermore, they are rarely included in incentives and tax bonus mechanisms, mainly due to a lack of know-how, low industrial scale-up, and the previously mentioned availability issues. As demonstrated by some of the case studies analysed, the prefabrication of biogenic products could enhance production efficiency and construction time, reduce waste, and optimise

resource utilisation. This approach enhances quality control, streamlines certification processes, and accelerates the market integration of biogenic products (Sutkowska *et al.*, 2024).

What are the future outlooks for sustainable architecture?

The analysis of European case studies has emphasised a growing interest in utilising biogenic construction materials. Such materials offer substantial environmental benefits, and can significantly contribute to decarbonisation of the built environment. This is a promising pathway that is becoming more tangible. Nonetheless, their application is often restricted to pilot projects that prove challenging to scale-up and replicate due to the absence of specific regulations, limited availability of certified materials, and the need for technical expertise. With-

diventa urgente sviluppare e divulgare il *know-how* con ‘ricette’ composte da ‘ingredienti’ locali intercambiabili, ossia risorse e materie prime disponibili sul territorio. Tale approccio permetterebbe di sviluppare ‘sistemi aperti’ adattabili e scalabili per promuovere la diversificazione delle risorse e mantenere un legame stretto con i sistemi ecologici locali.

L’obiettivo *carbon neutral* rappresenta un primo passo verso la sostenibilità, ma non è sufficiente.

Per raggiungere risultati più ambiziosi, è necessario progredire verso un modello *net-positive* che vada oltre la semplice riduzione delle emissioni. L’approccio *net-zero* o *carbon neutral* o, come definito da Eisenstein (2016) “CO₂ reductionism”⁷, si focalizza sulla riduzione delle emissioni, ma spesso trascura i sistemi sociali, economici ed ecologici più ampi. L’approccio *net-positive*, in aggiunta, mira a creare un valore ecologico e sociale netto positivo, ripristinando e migliorando l’ambiente. Il passo successivo è la transizione verso un’economia rigenerativa, come definita da Jain (2022), costituita da strutture che promuovono la resilienza, la diversità e l’interconnessione dei sistemi.

Questo richiede alle imprese, ai governi e ai politici l’adozione di pratiche che promuovano la rigenerazione e costruzione di una rete di sistemi interconnessi (Fullerton, 2015). In ambito architettonico, la transizione verso un modello rigenerativo implica andare oltre la mera minimizzazione dell’*Operational* e *Embodied Carbon* (Ichioka and Pawlyn, 2021), per promuovere un pensiero co-evolutivo⁸ (Wahl, 2016; Mang e Haggard, 2016), immaginando una metamorfosi continua dell’architettura rispetto al proprio contesto ambientale (Angelucci e Di Sivo, 2019) con edifici che contribuiscano positivamente ai sistemi ecologici attraverso l’uso di materiali, processi e sistemi inte-

in this context, could prefabrication be a strategic approach to facilitate the widespread adoption of biogenic materials as standard practice rather than an isolated instance?

The prefabrication of systems that use fast-growing renewable and circular materials presents an alternative paradigm to conventional construction within a climate-neutral built environment. Aligned with the concept of a ‘material diet’, there is a pressing need to develop and disseminate knowledge-based ‘recipes’ composed of interchangeable local resources and raw materials. Such an approach would facilitate the development of ‘open systems’ that are both adaptable and scalable, thereby promoting resource diversification and fostering a close connection with local ecological systems.

The carbon neutral or net-zero objec-

tive is an initial step towards sustainability but is insufficient to achieve more ambitious goals. Progression towards a ‘net-positive’ model, which extends beyond a mere reduction of emissions, is necessary. The carbon-neutral approach, or as Eisenstein (2016) terms it, “CO₂ reductionism”⁷, is primarily concerned with mitigating emissions, yet it frequently overlooks the broader socio-economic and ecological systems. The net-positive approach also seeks to establish net-positive ecological and social value by restoring the environment. The next phase involves transitioning to a regenerative economy, as Jain (2022) defines, characterised by structures that foster resilience, diversity, and interconnectedness of all systems.

This requires businesses, governments, and policymakers to adopt practices that foster regeneration and

grati nei cicli naturali, sociali e culturali. Ichioka and Pawlyn (2021) sottolineano come l’approccio rigenerativo nell’architettura debba mirare a una diffusione globale del sapere, incentivando al contempo la produzione locale. Questo concetto riprende i principi dell’Agenda 21, che invitano a “pensare globalmente, agire localmente”.

NOTE

¹ <https://gbcitalia.org/area-download/roadmap/> (accessed 10 September 2024)

² Il CO₂ equivalente è una misura che esprime l’impatto dei gas serra in termini di quantità di anidride carbonica.

³ [foundations-for-net-zero-full-paper.pdf](https://sciencebasedtargets.org/foundations-for-net-zero-full-paper.pdf) (sciencebasedtargets.org) (accessed 10 September 2024)

⁴ Terra, metalli, minerali e altri materiali naturali inerti non sono inclusi nei materiali biogenici poiché non derivano da organismi viventi

⁵ In architettura, *carbon sink* si riferisce a un sistema edilizio caratterizzato da materiali in grado di immagazzinare anidride CO₂.

⁶ La selezione dei casi studio (da 1 a 5 per ciascun materiale) seppur soggettiva e non esaustiva può costituire un primo tentativo di mappatura dello stato attuale.

⁷ <https://charleseisenstein.org/essay/grief-and-carbon-reductionism/> (accessed 10 September 2024)

⁸ Il pensiero co-evolutivo si riferisce all’evoluzione congiunta delle specie che interagiscono tra loro.

ATTRIBUZIONE, RICONOSCIMENTI, DIRITTI D’AUTORE

Entrambi gli autori hanno contribuito in modo paritario alla concettualizzazione e alla scrittura di questo articolo.

Questa pubblicazione è realizzata nell’ambito del progetto PNRR-NGEU finanziato dal MUR tramite DM 118/2023.

the configuration of a network of interconnected systems (Fullerton, 2015). Within the architectural context, the transition towards a regenerative model entails transcending mere minimisation of operational and embodied carbon (Ichioka and Pawlyn, 2021) to promote co-evolutionary thinking⁸ (Wahl, 2016; Mang and Haggard, 2016), envisioning a continuous metamorphosis of architecture in relation to its environmental context (Angelucci and Di Sivo, 2019). Buildings will be designed to contribute positively to ecological systems through the utilisation of materials, processes, and systems integrated into natural, social, and cultural cycles. Ichioka and Pawlyn (2011) underline that the regenerative approach in architecture should aspire to global dissemination of knowledge, concurrently incentivising local production. This concept res-

onates with the principles of Agenda 21, which advocate for ‘thinking globally and acting locally’.

NOTES

¹ <https://gbcitalia.org/area-download/roadmap/> (accessed 10 September 2024)

² Equivalent CO₂ is a measure that expresses the impact of greenhouse gases in terms of the amount of carbon dioxide (CO₂) that would have the same global warming potential over a given period of time. Hence, it allows the comparison of emissions of different greenhouse gases by converting their emissions into an equivalent amount of CO₂.

³ [Foundations-for-net-zero-full-paper.pdf](https://sciencebasedtargets.org/foundations-for-net-zero-full-paper.pdf) (sciencebasedtargets.org) (accessed 10 September 2024)

⁴ Earth, metals, minerals, and other inert natural materials are excluded from

REFERENCES

Andreotti, J. and Giordano, R. (2024) *Strumenti per la decarbonizzazione: Valutazione della Whole Life Carbon (WLC) e della Circular Economy (EC) di un manufatto edilizio*. GBC Italia. Available at: https://gbcitalia.org/wp-content/uploads/2024/11/Strumenti-per-la-decarbonizzazione_Valutazione-della-Whole-Life-Carbon-WLC-e-della-Circular-Economy-CE-di-un-manufatto-edilizio.pdf.

Angelucci, F. and Di Sivo, M. (2019) “Designing for co-evolution”, *TECHNE – Journal of Technology for Architecture and Environment*, pp. 120–127. Available at: <https://doi.org/10.13128/TECHNE-7518>.

Brunner, P.H. (2011) “Urban mining: A contribution to reindustrializing the city”, *Journal of Industrial Ecology*, 15, pp. 339–341. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00345.x>.

Carcassi, O.B., Habert, G., Malighetti, L.E. and Pittau, F. (2022) “Material diets for climate-neutral construction”, *Environmental Science & Technology*, 56(8), pp. 5213–5223. Available at: <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c05895>.

Carcassi, O.B., Paoletti, I. and Malighetti, L.E. (2021) “Reasoned catalogue of biogenic products in Europe: An anticipatory vision between technical potentials and availability”, *TECHNE – Journal of Technology for Architecture and Environment*, pp. 63–70. Available at: <https://doi.org/10.36253/techne-10578>.

Churkina, G., Organschi, A., Reyer, C.P.O., Ruff, A., Vinke, K., Liu, Z., Reck, B.K., Graedel, T.E. and Schellnhuber, H.J. (2020) “Buildings as a global carbon sink”, *Nature Sustainability*, 3(4), pp. 269–276. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0462-4>.

Eisenstein, C. (2016) “Grief and carbon reductionism”. Essay. Available at: <https://charleseisenstein.org/essay/grief-and-carbon-reductionism/>.

European Committee for Standardisation (2016) *EN 16575: Bio-based products – Vocabulary*.

Fullerton, J. (2015) *Regenerative capitalism: How universal principles and patterns will shape our new economy*. Capital Institute. Available at: <http://capitalinstitute.org/wp-content/uploads/2015/04/2015-Regenerative-Capitalism-4-20-15-final.pdf>.

the classification of biogenic materials as they do not originate from living organisms.

⁵ In the architectural context, a carbon sink denotes a building system comprising materials capable of absorbing and storing atmospheric carbon dioxide.

⁶ The selection of case studies (from 1 to 5 for each material), although subjective and not exhaustive, can constitute a first attempt at mapping the current state.

⁷ <https://charleseisenstein.org/essay/grief-and-carbon-reductionism/> (accessed 10 September 2024)

⁸ Co-evolutionary thinking pertains to the concurrent evolution of interacting species.

CONTRIBUTION, ACKNOWLEDGMENTS, COPYRIGHT

Both authors contributed equally to the conceptualisation and writing of this paper.

This publication is part of project PN-RR-NGEU, which has received funding from the MUR – DM 118/2023.

Galimshina, A., Moustapha, M., Hollberg, A., Lasvaux, S., Sudret, B. and Habert, G. (2024) “Strategies for robust renovation of residential buildings in Switzerland”, *Nature Communications*, 15(1). Available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46305-9>.

Göswein, V., Arehart, J., Phan-huy, C., Pomponi, F. and Habert, G. (2022) “Barriers and opportunities of fast-growing biobased material use in buildings”, *Buildings and Cities*, 3(1), pp. 745–755. Available at: <https://doi.org/10.5334/bc.254>.

Göswein, V., Reichmann, J., Habert, G. and Pittau, F. (2021) “Land availability in Europe for a radical shift toward bio-based construction”, *Sustainable Cities and Society*, 70, 102929. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102929>.

Ichioka, S. and Pawlyn, M. (2021) *Flourish: Design paradigms for our planetary emergency*. Triarchy Press.

IEA EBC (n.d.) *Annex 89 – Ways to implement net-zero whole life carbon buildings*.

Jain, Y. (2021) “Regenerative economies: A new approach towards sustainability”, in W. Leal Filho, A.M. Azul, L. Brandli, A.L. Salvia, P.G. Özyayar and T. Wall (eds.) *No poverty*. Springer International Publishing, pp. 1–11. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-69625-6_80-1.

Jones, D. and Brischke, C. (2017) *Performance of bio-based building materials*. Woodhead Publishing.

Lewis, P., Tsurumaki, M. and Lewis, D.J. (2022) *Manual of biogenic house sections*. Oro Editions – Publishers of Architecture, Art, and Design.

Mang, P. (2016) *Regenerative development and design: A framework for evolving sustainability*.

Pittau, F., Krause, F., Lumia, G. and Habert, G. (2018) “Fast-growing biobased materials as an opportunity for storing carbon in exterior walls”, *Building and Environment*, 129, pp. 117–129. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.006>.

Pomponi, F., Hart, J., Arehart, J.H. and D’Amico, B. (2020) “Buildings as a global carbon sink? A reality check on feasibility limits”, *One Earth*, 3(2), pp. 157–161. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.07.018>.

Ruta, M.F., Pittau, F. and Masera, G. (2024) “Towards zero-carbon buildings: Challenges and opportunities from reversing the material pyramid”, *Sustainability*, 16(11), 4454. Available at: <https://doi.org/10.3390/su16114454>.

Stern, E., Walther, R. and Rager, M. (2020) *Le tour de France des maisons écologiques*. Alternatives – Grand format – Librairie Gallimard PARIS.

Sutkowska, M., Stefańska, A., Vaverkova, M.D., Dixit, S. and Thakur, A. (2024) “Recent advances in prefabrication techniques for biobased materials towards a low-carbon future: From modules to sustainability”, *Journal of Building Engineering*, 91, art. no. 109558. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109558>.

Wahl, D.C. (2016) *Designing regenerative cultures*. Triarchy Press.