



# POTENZIALE DEL **BAMBÙ** NELL'ARCHITETTURA CONTEMPORANEA IN CONTESTI VULNERABILI:

Un modello di scuola  
resiliente per il Nepal

*Elisa Falcioni*



## Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Architettura per la Sostenibilità.  
A.a. 2024/2025

Torino, Dicembre 2025

# Potenziale del bambù nell'architettura contemporanea in contesti vulnerabili:

un modello di scuola resiliente per il Nepal

Relatore:  
Thiebat Francesca

Candidato:  
Elisa Falcioni (s326068)

Correlatore:  
Fiamma Martina Morselli



“The work of an architect today is complex and diverse. It reflects a world that has changed, and it must address the challenges of that change.”

Zaha Hadid

# CONTENUTI

/ABSTRACT (ITA - ENG)	p.8
/INTRODUZIONE	
0.1. Contesto	p.11
0.2. Struttura della tesi e metodologia	p.12

## PRIMA PARTE: RICERCA TEORICA

<b>01</b> /Capitolo I: La “crisi” climatica	
1.1. “L’epoca dell’Antropocene”	p.15
1.2. Aree ad alta vulnerabilità ambientale e sociale	p.28
1.3. Strategie di mitigazione e adattamento nella transizione ecologica	p.33
1.4. Il caso del Nepal: contesto ambientale e socioculturale	p.42

<b>02</b> /Capitolo II: Architettura e sostenibilità nella transizione ecologica	
2.1. L’impatto ambientale del settore edilizio	p.65
2.2. Verso un approccio costruttivo sostenibile: i materiali bio-based	p.72
2.3. Il Bambù: “l’acciaio vegetale”	p.78
2.3.1. La pianta	78
2.3.2. La composizione chimica	81
2.3.3. Le caratteristiche fisiche	83
2.3.4. Le proprietà meccaniche e confronto con legno e acciaio	84
2.3.5. Il profilo ambientale	89
2.4. Potenzialità dell’uso del bambù in architettura	p.92
2.4.1. Processi lavorativi	p.94
2.4.2. Applicazioni ed usi	p.105
2.5. Materiali bio-based in Nepal: esempi di architettura vernacolare	p.109
2.6. Il bambù in Nepal: disponibilità e tecniche costruttive	p.117

<b>03</b> /Capitolo III: Il ruolo dell’architettura nella resilienza climatica e sociale	
--	--

3.1. L’architettura come rifugio climatico e sociale	p.127
3.2. Educare attraverso lo spazio: l’edificio come strumento pedagogico	p.131
3.3. Oltre l’uso educativo: spazi scolastici polifunzionali e resilienti	p.136

<b>04</b> /Capitolo IV: Casi studio: Nepal e contesti affini	
--	--

4.1. Scuole per territori vulnerabili	p.142
4.2. Scuole in bambù	p.148
4.3. Altri esempi di architetture in bambù	p.158

## SECONDA PARTE: APPLICAZIONE PROGETTUALE

<b>05</b> /Capitolo V: Il progetto	
------------------------------------	--

5.1. Il concorso “Nepal School Project”	p.165
5.2. Analisi metodologica: il Metaprogetto	p.169
5.3. Proposta progettuale e strategie di sostenibilità	p.178
5.4. Revisione critica del progetto	p.194
5.5. Rielaborazione progettuale	p.196

/CONCLUSIONI	
--------------	--

/BIBLIOGRAFIA - REFERENCES	
----------------------------	--

/RINGRAZIAMENTI	
-----------------	--

## /ABSTRACT (ITA)

La crisi climatica e l'intensificarsi degli eventi estremi caratterizzano l'attuale "epoca dell'Antropocene", rendendo necessaria una trasformazione profonda del settore delle costruzioni, oggi tra i principali responsabili delle emissioni globali di CO<sub>2</sub>.

In questo quadro, la decarbonizzazione dell'ambiente costruito orienta il dibattito contemporaneo verso strategie progettuali a basse emissioni, nelle quali la scelta dei materiali svolge un ruolo determinante. Tra le soluzioni emergenti, l'impiego di materiali bio-based rappresenta una delle soluzioni possibili per favorire la transizione ecologica. La presente ricerca approfondisce il potenziale del **bambù** come materiale costruttivo, valorizzandone le vantaggiose proprietà intrinseche, l'ampia disponibilità, la rapidità di crescita, il tasso di rigenerazione e il ridotto impatto ambientale, in particolare nei territori in cui cresce spontaneamente.

L'occasione per sperimentarne l'applicazione in un contesto reale, in cui il bambù costituisce una risorsa tradizionalmente diffusa e ampiamente disponibile, è stata individuata in Nepal, uno dei paesi maggiormente esposti agli effetti della crisi climatica, caratterizzato da elevata vulnerabilità, forte sismicità e frequenti eventi idrogeologici.

In questo contesto è stato elaborato il progetto "Bamboo School", una scuola primaria resiliente elaborata per il concorso internazionale *Nepal School Project* e concepita come modello replicabile, capace di adattarsi alle condizioni climatiche del territorio e di funzionare anche come rifugio sicuro durante situazioni di emergenza, garantendo continuità educativa e supporto alla comunità.

La tesi si articola in due fasi principali: una fase teorica, dedicata all'analisi del contesto nepalese, ai principi di sostenibilità applicati all'architettura e allo studio del bambù come materiale costruttivo; e una fase progettuale, in cui tali principi vengono tradotti in un'applicazione concreta attraverso la definizione dell'edificio scolastico. Il progetto presentato per il concorso è stato successivamente rielaborato approfondendo maggiormente gli aspetti legati alla resilienza, all'adattabilità e alla sostenibilità.

La tesi si conclude con una riflessione critica sui risultati ottenuti e sulle prospettive future, evidenziando la potenziale replicabilità del modello in altri contesti vulnerabili e la sua capacità di adattarsi a scenari climatici in continua evoluzione.

## /ABSTRACT (ENG)

The climate crisis and the increasing frequency of extreme events characterise the current "Anthropocene era," making a profound transformation of the construction sector necessary, as it remains one of the main contributors to global CO<sub>2</sub> emissions.

Within this framework, the decarbonisation of the built environment is guiding contemporary debate toward low-emission design strategies, in which material selection plays a decisive role. Among emerging approaches, the use of bio-based materials represents one possible strategy to support the ecological transition. This research investigates the potential of **bamboo** as a construction material, emphasising its advantageous intrinsic properties, wide availability, rapid growth rate, capacity for regeneration, and low environmental impact, particularly in regions where it grows naturally.

The opportunity to experiment with its application in a real context, where bamboo is a traditionally widespread and readily available resource, was identified in Nepal, one of the countries most exposed to the effects of climate change and characterised by high vulnerability, strong seismicity, and frequent hydrogeological events.

Within this context, the project "Bamboo School" was developed: a resilient primary school designed for the international *Nepal School Project* competition and conceived as a replicable model, capable of adapting to local climatic conditions and functioning as a safe refuge during emergencies, ensuring educational continuity and community support.

The thesis is structured into two main phases: a theoretical phase, dedicated to analysing the Nepalese context, the principles of sustainability applied to architecture, and the study of bamboo as a construction material; and a design phase, in which these principles are translated into a concrete application through the development of the school building. The project submitted to the competition was subsequently revised and further refined, with particular attention to aspects related to resilience, adaptability, and sustainability.

The thesis concludes with a critical reflection on the results and future perspectives, highlighting the potential replicability of the model in other vulnerable contexts and its capacity to adapt to evolving climatic conditions.

# /INTRODUZIONE

"Climate change is a threat to human well-being and planetary health. There is a rapidly closing window of opportunity to secure a liveable and sustainable future for all." (IPCC, 2023)



## 0.1. Contesto e motivazioni della ricerca

L'ambiente costruito è oggi responsabile di circa il **42% delle emissioni globali di CO<sub>2</sub>**. Di queste emissioni, circa il 27% deriva dalle attività edilizie (riscaldamento, raffrescamento, illuminazione, uso quotidiano), mentre circa il 15% è attribuibile al carbonio incorporato nei materiali da costruzione, come cemento, acciaio, ferro e alluminio. (Architecture 2030, *Why The Built Environment*, 2024).

È proprio in questa ottica che l'architettura contemporanea rivolge il proprio sguardo alla ricerca nel campo della progettazione sostenibile, concentrandosi fortemente sulla decarbonizzazione per raggiungere l'obiettivo delle zero emissioni nette per gli edifici nuovi ed esistenti entro il 2030 e il 2050. Nell'attuale dibattito, l'architetto assume un ruolo determinante nel guidare la transizione verso edifici a emissioni nette zero. La selezione dei materiali non è più una scelta meramente tecnica, ma un atto progettuale strategico capace di incidere sull'intero ciclo di vita dell'edificio. Le più recenti ricerche dimostrano come la decarbonizzazione del settore edilizio sia raggiungibile attraverso l'innovazione nei materiali convenzionali e, soprattutto, mediante un deciso orientamento verso biomateriali rigenerativi e circolari provenienti da sistemi forestali e agricoli. (UNEP, 2023). In questa prospettiva, l'uso di materiali biobased, ovvero materiali o prodotti derivanti interamente o parzialmente da biomassa (come piante e vegetali), diviene strumento essenziale per coniugare progettazione, responsabilità ambientale e rigenerazione degli ecosistemi. Tra questi, il bambù sta emergendo come una risorsa altamente promettente. Utilizzato da millenni in diverse aree del mondo, il bambù si distingue per la sua rapida crescita, la sua capacità rigenerativa e le sue prestazioni meccaniche, rendendolo sostenibile ed economicamente vantaggioso, soprattutto nelle regioni in cui cresce naturalmente e in abbondanza.

Questa ricerca esplora il **potenziale del bambù nell'architettura contemporanea** attraverso la progettazione di una scuola resiliente per il contesto vulnerabile nepalese. Il Nepal è uno dei paesi maggiormente esposti agli effetti del cambiamento climatico: la stagione monsonica del 2024 ha causato inondazioni e frane diffuse, con gravi danni alle infrastrutture e centinaia di vittime, tra cui la distruzione di oltre 150 scuole. A questo disastro ha fatto seguito il terremoto del Tibet del 7 gennaio 2025, che ha ulteriormente aggravato la fragilità del sistema educativo e delle comunità locali, evidenziando la necessità di soluzioni architettoniche immediate, adattabili e coerenti con le condizioni ambientali. In questo quadro, il concorso "Nepal School Project" ha offerto un'occasione concreta per sperimentare l'impiego del bambù in un progetto reale, coerente con le esigenze climatiche, sismiche e sociali del territorio. La scuola proposta mira a costituire un modello replicabile in diverse aree del Nepal e a rappresentare un esempio di architettura resiliente, capace di adattarsi a condizioni climatiche avverse, funzionare come rifugio di emergenza in caso di eventi ambientali critici e, al contempo, garantire la continuità educativa e il supporto alla resilienza della comunità.

## 0.2. Struttura della tesi e metodologia

La metodologia adottata in questa tesi si articola in due parti principali:

**La prima parte**, illustrata nei Capitoli 1, 2, 3 e 4, è dedicata alla ricerca teorica e si basa su un'analisi approfondita condotta mediante fonti bibliografiche e scientifiche. L'obiettivo di questa fase è stato quello di costruire un quadro teorico solido sui temi della sostenibilità ambientale, climatica e sociale, ritenuti fondamentali per lo sviluppo del progetto di tesi. In particolare, si è analizzato il contesto globale in cui operiamo, con un focus sul territorio nepalese, e si sono approfonditi temi legati all'architettura resiliente, all'uso di materiali biogenici, con un'attenzione specifica al bambù come risorsa costruttiva sostenibile.

**La seconda parte**, sviluppata nel Capitolo 5, affronta il tema della sostenibilità costruttiva, ponendo l'accento su come l'architettura possa rispondere concretamente ai principi della progettazione sostenibile. La partecipazione al concorso internazionale *Nepal School Project* ha permesso di tradurre in pratica i concetti elaborati nella fase teorica. In questo contesto è stato sviluppato il progetto "BAMBOO SCHOOL", elaborato in un arco di tempo molto limitato (circa un mese). Nonostante il risultato sia stato soddisfacente, le tempistiche ristrette non hanno consentito un approfondimento adeguato di alcuni aspetti cruciali, in particolare quelli relativi alle tecniche costruttive e a specifiche scelte progettuali che necessitavano di ulteriori sviluppi.

Da questa esigenza nasce una rielaborazione critica del progetto nella quale si affrontano le questioni irrisolte, sia a livello tecnico che architettonico, con l'intento di far evolvere il progetto verso una maggiore maturità progettuale e coerenza con gli obiettivi iniziali.

La tesi si conclude con una riflessione finale sui risultati ottenuti nelle diverse fasi, evidenziando l'evoluzione del progetto dal concorso al suo successivo sviluppo, nonché le sue potenzialità future, con particolare riferimento alla sua replicabilità in altri contesti vulnerabili e alla sua capacità di adattamento a scenari climatici in continua trasformazione.

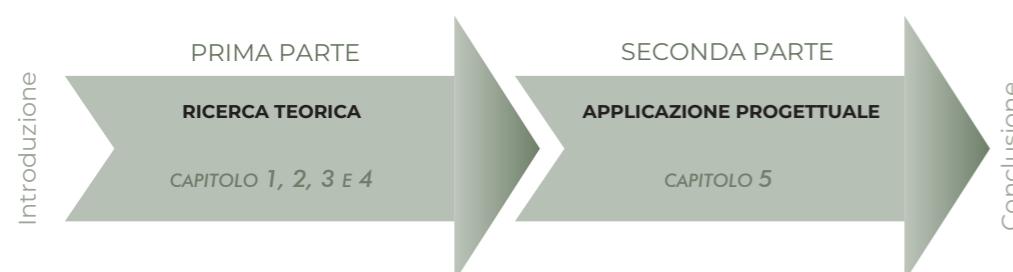


Figura 1. "Metodologia della tesi" dell'autore della tesi

# /CAPITOLO I: LA “CRISI” CLIMATICA



## 1.1.

### “L’epoca dell’Antropocene”

*“Climate crisis is the greatest ever threat to human rights. The economies of all nations, the institutional, political, social and cultural fabric of every state, and the rights of all your people, and future generations, will be impacted.”*  
Michelle Bachelet, United Nations High Commissioner for Human Rights, *The Guardian*, 9 Sep. 2019

Il concetto di “cambiamento climatico” definito dalla IPCC (2018) (Intergovernmental Panel on Climate Change) come trasformazione duratura dello stato del clima, rilevabile attraverso variazioni dei valori medi o della variabilità delle sue proprietà su intervalli temporali di decenni o più e causato sia da fattori naturali sia da attività antropiche, costituisce oggi un tema di dibattito e confronto costante.

È tuttavia necessario sottolineare la dimensione emergenziale con cui tale fenomeno deve essere compreso: eventi climatici estremi, sempre più frequenti e distruttivi, richiedono l’adozione di un linguaggio che ne evidenzi l’urgenza. Per questa ragione, nel presente elaborato si farà riferimento al cambiamento climatico con l’espressione “crisi climatica”, al fine di evidenziarne gli effetti già evidenti non solo sul piano ambientale, ma anche su quello sociale, rispetto al quale appare palpabile la necessità di un cambiamento radicale.

Come osserva Van Aken (2020), il concetto di crisi ha progressivamente perso il significato originario che possedeva nell’antichità, quando indicava una fase cruciale di svolta, di chiusura ma al contempo di apertura, un momento generativo di mutamento. Oggi, al contrario, la crisi viene interpretata prevalentemente in senso negativo, come una condizione permanente di precarietà che ne svuota il potenziale trasformativo e rigenerativo.

La presente tesi intende discostarsi da questa visione parlando di crisi climatica non soltanto per rimarcarne la gravità e l’urgenza, ma anche per restituire al termine “crisi” il suo valore di stimolo all’azione e al cambiamento. In questa prospettiva, la crisi diventa occasione per promuovere consapevolezza, educazione e scelte responsabili, in grado di orientare verso un futuro più sostenibile.

A partire dalla rivoluzione industriale, i processi legati allo sfruttamento intensivo delle risorse, alla deforestazione, alla perdita di biodiversità e alle emissioni di gas serra hanno segnato un punto di svolta nella storia della Terra, spingendola oltre i suoi limiti naturali. Di qui nasce la necessità di introdurre un nuovo termine coniato negli anni Ottanta da Eugene Stoermer e diffuso nel 2000 dal Nobel Paul Crutzen: “L’epoca dell’Antropocene”, che segna la fine dell’epoca dell’Olocene e designa l’era in cui l’azione umana è divenuta una forza geologica capace di alterare irreversibilmente gli equilibri del pianeta. Sebbene il termine non sia stato formalmente riconosciuto come nuova fase geologica, gli studi scientifici ne individuano evidenze chiare, come l’aumento esponenziale delle concentrazioni di gas climalteranti, l’accumulo di materiali sintetici e l’impronta ecologica globale.

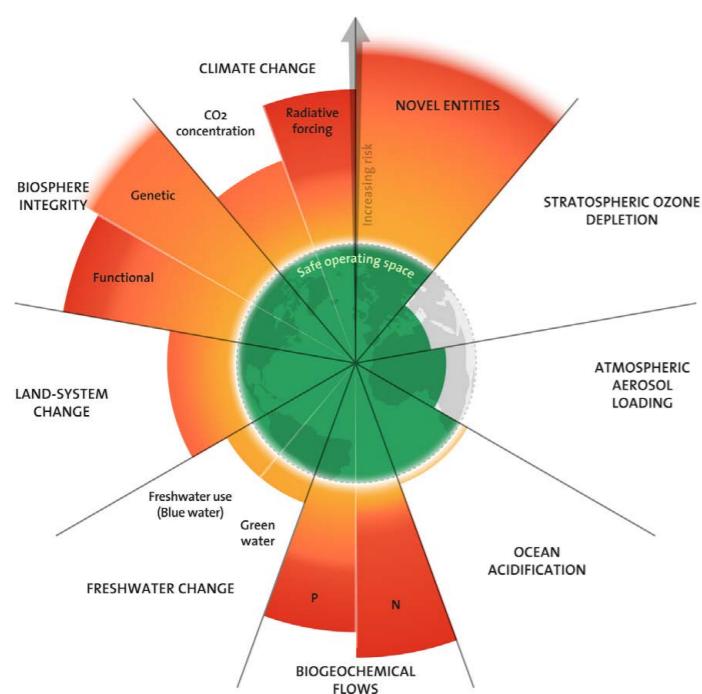
In questo senso, l'Antropocene rappresenta il quadro concettuale entro cui leggere la crisi climatica: non come un fenomeno isolato, ma come la manifestazione più evidente dell'impatto sistematico e permanente dell'uomo sulla Terra. Come messo in evidenza dal *Planetary Boundaries Science* (2025), questa fase storica coincide con quella che gli studiosi hanno denominato "Great Acceleration", ovvero un'accelerazione senza precedenti nell'uso di risorse, nella produzione industriale e nell'emissione di gas serra, iniziata intorno alla metà del XX secolo.

L'analisi condotta dal *Stockholm Resilience Centre* attraverso il modello dei "planetary boundaries", i limiti planetari che definiscono uno "spazio operativo sicuro" per l'umanità, permette di comprendere come la stabilità del sistema terrestre sia oggi gravemente compromessa.

Tali confini, introdotti nel 2009, sono i seguenti:

1. Cambiamento climatico
2. Integrità della biosfera (perdita di biodiversità)
3. Cambiamenti nell'uso del suolo
4. Cambiamenti nei cicli biogeochimici (azoto e fosforo)
5. Acidificazione degli oceani
6. Disponibilità di acqua dolce
7. Carico di aerosol atmosferici
8. Introduzione di nuove entità (sostanze chimiche, microplastiche, OGM...)
9. Assottigliamento dello strato di ozono stratosferico

Nel recente aggiornamento del 2025 (*The 2025 Update to the Planetary Boundaries*), è emerso che sette dei nove limiti planetari risultano già oltrepassati o prossimi alla soglia di rischio, confermando l'urgenza di una transizione verso modelli di sviluppo più sostenibili e resistenti. (*Stockholm Resilience Centre*, 2025). (Figura 2).



**FIGURA 2 :**

Il diagramma dei limiti planetari (PB) rappresenta visivamente lo stato attuale dei nove processi PB che regolano la salute del nostro pianeta. Ogni processo è quantificato da una o più variabili di controllo basate su dati osservativi, simulazioni di modelli e opinioni di esperti.

Figura 2. "The 2025 update to the Planetary boundaries." Credit: Azote for Stockholm Resilience Centre, based on analysis in Sakschewski and Caesar et al. 2025 . <https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html>

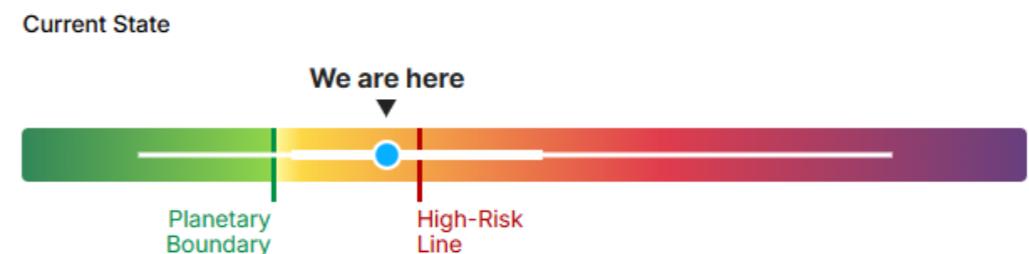


Figura 3. "Planetary Health Check 2025, current state".  
<https://www.planetaryhealthcheck.org/#reports-section>

La valutazione complessiva dello stato di salute del pianeta del 2025 colloca la Terra al margine superiore della zona di pericolo, prossima alla soglia di alto rischio (Figura 3). I dati indicano che stiamo progressivamente avvicinandoci a un punto in cui i processi globali potrebbero spostare il sistema Terra in una condizione di cambiamento su larga scala, con maggiore probabilità di soglie irreversibili. Restano tuttavia margini di recupero: la resilienza biologica, fisica e chimica del pianeta lascia ancora aperta la possibilità di rientrare in uno "spazio operativo sicuro", ma la finestra per farlo si sta rapidamente restringendo. (PBSscience, 2025).

Per comprendere in modo approfondito la condizione climatica attuale, è utile fare riferimento ai rapporti dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO), che dal 1993 pubblica annualmente aggiornamenti sullo stato del clima globale. Tali documenti rappresentano una fonte scientifica autorevole e costante per analizzare l'evoluzione dei fenomeni climatici e valutarne le implicazioni sul sistema terrestre. La WMO individua **sette indicatori** fondamentali per il monitoraggio dei cambiamenti climatici (Figura 4), relativi ad atmosfera, oceani, criosfera e superficie terrestre, che permettono di costruire un quadro complessivo delle alterazioni in atto e dell'impatto crescente delle attività antropiche sugli equilibri ambientali del pianeta.

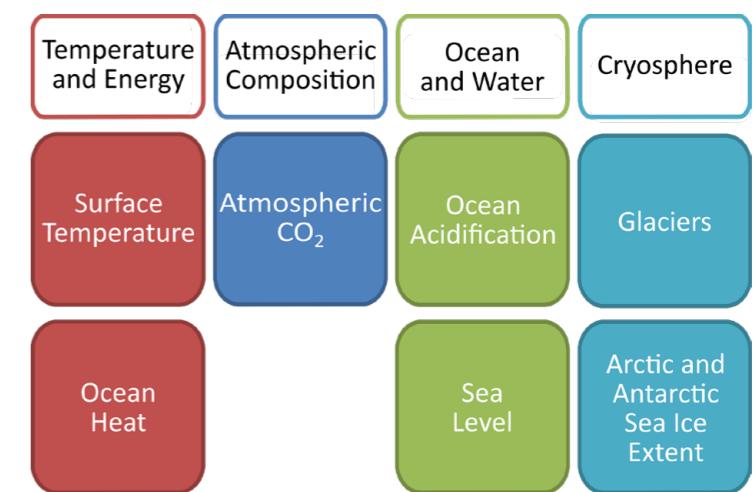


Figura 4. "Seven WMO State of the Climate Indicators"

L'analisi di questi indicatori, integrata con quella proposta dal quadro teorico dei "Planetary Boundaries" elaborato dallo Stockholm Resilience Centre, consente di comprendere in modo sistematico lo stato attuale della crisi climatica e ambientale.

Attraverso l'unione dei dati forniti dalla WMO e dal modello dei confini planetari, emerge un quadro allarmante ma essenziale per orientare una riflessione critica sulle cause della crisi climatica e sulle responsabilità dell'attività umana. Questo approccio multidimensionale permette di cogliere la complessità delle interazioni tra fenomeni climatici, processi ecologici e dinamiche socio-economiche, delineando la necessità di un cambiamento profondo nei modelli di sviluppo e nelle pratiche di trasformazione dell'ambiente costruito.

Il primo confine planetario, quello relativo al **cambiamento climatico**, (Figura 2) rappresenta oggi la soglia più ampiamente superata tra le nove definite dallo Stockholm Resilience Centre. L'aumento delle concentrazioni di gas serra e di aerosol nell'atmosfera terrestre altera il bilancio radiativo del pianeta, trattenendo una parte del calore che in condizioni naturali verrebbe disperso nello spazio. Il limite planetario del cambiamento climatico valuta la variazione del rapporto tra energia in entrata e in uscita dalla Terra. Una maggiore **anidride carbonica nell'atmosfera** e una maggiore radiazione intrappolata determinano un innalzamento delle temperature globali e alterano i regimi climatici, con conseguenze dirette sui sistemi ecologici e socio-economici.

L'aumento di **anidride carbonica**<sup>1</sup> ( $\text{CO}_2$ ), **metano**<sup>2</sup> ( $\text{CH}_4$ ) e **protossido di azoto**<sup>3</sup> ( $\text{N}_2\text{O}$ ) costituisce la principale causa del riscaldamento globale. Le emissioni di  $\text{CO}_2$  derivano prevalentemente dalla combustione di combustibili fossili e dalla deforestazione, mentre quelle di  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$  sono legate ai processi agricoli, zootecnici e industriali.

<sup>1</sup> L'anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ) è il gas serra più importante e si misura in parti per milione (ppm). Le emissioni antropogeniche di  $\text{CO}_2$  derivano principalmente dalla combustione di combustibili fossili per la produzione di energia, i trasporti o le attività industriali, e dalla deforestazione, che può anche portare a un rilascio diretto di carbonio nell'atmosfera. Esiste anche un significativo assorbimento e rilascio naturale di  $\text{CO}_2$  attraverso gli oceani e la biomassa terrestre.

<sup>2</sup> Il metano ( $\text{CH}_4$ ), misurato in parti per miliardo (ppb), oltre ad essere rilasciato naturalmente dai microbi nel suolo, dagli incendi boschivi, dalla decomposizione delle piante e dalla digestione animale, viene rilasciato anche da fonti e processi umani come discariche, risaie, allevamento di bestiame e produzione e combustione di combustibili fossili. Il principale meccanismo di rimozione del  $\text{CH}_4$  dall'atmosfera avviene attraverso reazioni chimiche con il radicale ossidrilico atmosferico ( $\text{OH}$ ). Negli ultimi 150 anni, le emissioni umane hanno costantemente aumentato i livelli atmosferici di  $\text{CH}_4$ , che ora sono più del doppio rispetto ai livelli pre-industriali in quanto l'attività umana rilascia  $\text{CH}_4$  più velocemente di quanto i "pozzi" riescano a rimuoverlo.

<sup>3</sup> Il protossido di azoto ( $\text{N}_2\text{O}$ ) è il terzo gas serra maggiormente responsabile del riscaldamento globale e viene misurato in parti per miliardo (ppb). Il flusso superficiale netto di protossido di azoto ( $\text{N}_2\text{O}$ ) è dovuto in gran parte alle emissioni derivanti dai processi microbici di nitrificazione e denitrificazione, che avvengono naturalmente nei suoli, nei sistemi di acqua dolce e nell'oceano. Tuttavia, le attività umane, come l'uso di fertilizzanti in agricoltura, hanno contribuito in modo sostanziale alle emissioni, quasi pari al totale delle fonti naturali. Il principale pozzo di assorbimento dell' $\text{N}_2\text{O}$  è la distruzione chimica nella stratosfera che porta alla formazione di azoto ( $\text{N}_2$ ) e ossidi di azoto ( $\text{NO}$ ).

Nel 2023, l'ultimo anno per il quale sono disponibili dati globali sono stati raggiunti valori record (Figura 5) secondo il report dell'IPCC, 2024:  
 Anidride carbonica:  $420,0 \text{ ppm} \pm 0,1 = 151\%$  dei livelli preindustriali.  
 Metano:  $1923 \pm 2 \text{ ppb} = 266\%$  dei livelli preindustriali.  
 Protossido di azoto:  $335,8 \pm 0,1 \text{ ppb} = 124\%$  dei livelli preindustriali.

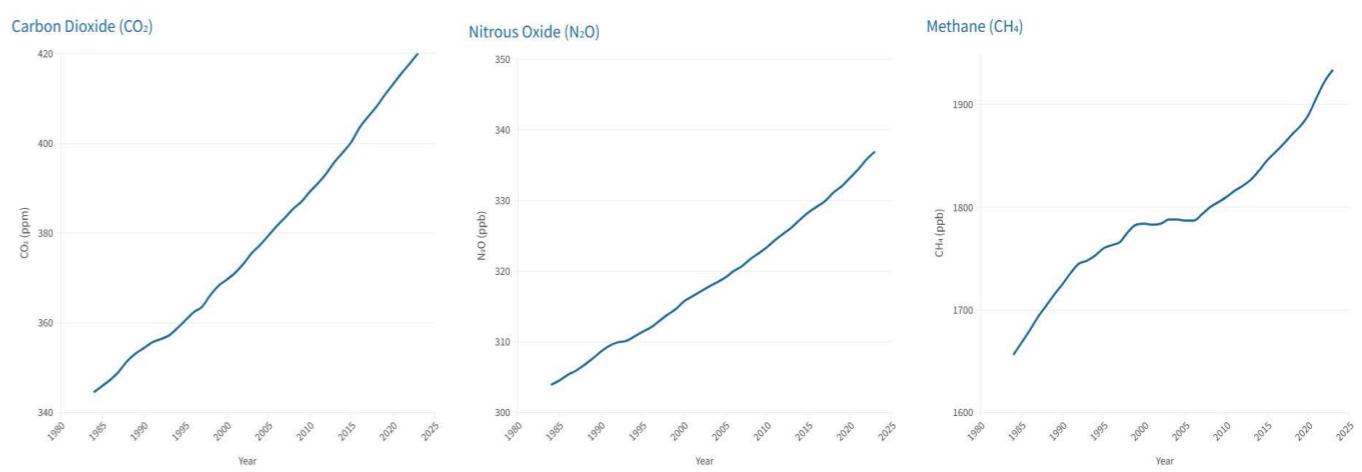


Figura 5. "Greenhouse Gas Concentrations". Fonte: IPCC

Questi valori esprimono con chiarezza la portata dell'impatto antropico sul sistema terrestre e la perdita di equilibrio nei cicli naturali di assorbimento e rilascio dei gas serra, un tempo regolati in modo efficiente dagli oceani e dalla biomassa terrestre.

Il metano, in particolare, rappresenta un elemento di forte criticità: pur avendo una vita atmosferica più breve rispetto alla  $\text{CO}_2$ , possiede un potenziale di riscaldamento globale molto più elevato nel breve periodo. Circa il 60% delle sue emissioni deriva da attività umane e la velocità con cui viene rilasciato supera di gran lunga la capacità dei "pozzi" naturali (come le reazioni chimiche nell'atmosfera o i microbi del suolo) di rimuoverlo. Anche il protossido di azoto ( $\text{N}_2\text{O}$ ) mostra un trend crescente, principalmente a causa dell'uso massiccio di fertilizzanti agricoli che incrementano i processi di nitrificazione e denitrificazione nei suoli.

L'effetto complessivo di queste emissioni si manifesta nell'aumento della temperatura media globale della superficie<sup>4</sup> (GMST).

Secondo i dati del Copernicus Climate Change Service<sup>5</sup> (C3S), il periodo 2020-2024 (Figura 6) risulta il più caldo mai registrato, con un'anomalia di circa  $+1,55 \pm 0,13^\circ\text{C}$  rispetto alla media preindustriale (1850-1900).

<sup>4</sup> La GMST viene misurata combinando la temperatura dell'aria sulla terraferma e la temperatura della superficie del mare nelle aree oceaniche, in genere espressa come differenza rispetto a un periodo di riferimento.

<sup>5</sup> Copernicus è il programma di osservazione della Terra dell'Unione Europea, che studia il nostro pianeta e il suo ambiente a beneficio di tutti i cittadini europei.

Il 2024, in particolare, segna un nuovo record, superando la soglia critica di 1,5 °C prevista dall'Accordo di Parigi<sup>6</sup>.

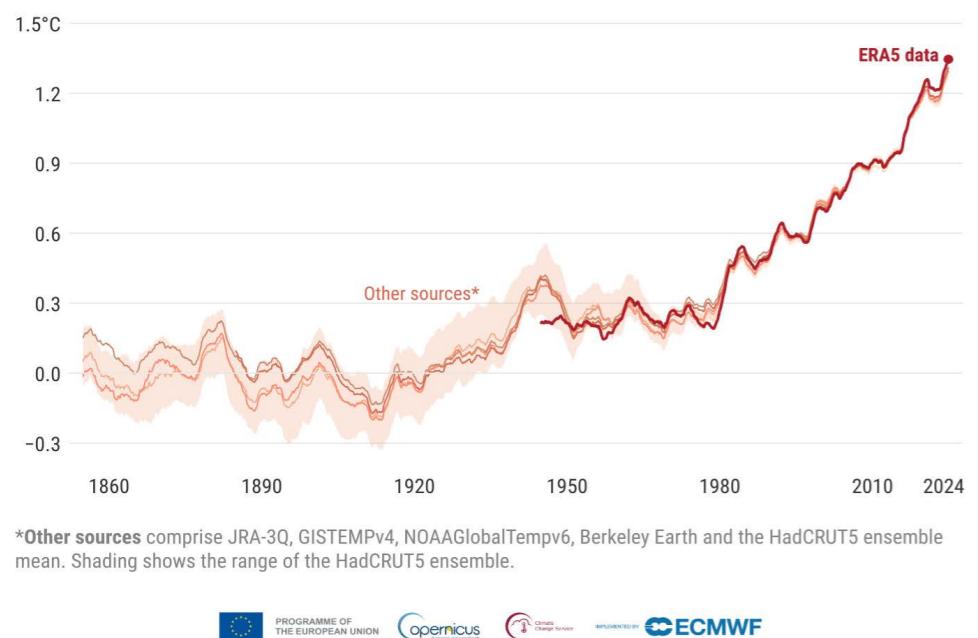


Figura 6. "Global surface temperature: increase above pre-industrial" Fonte: C3S/ECMWF. <https://climate.copernicus.eu/climate-indicators/temperature>

Tale valore rappresenta un segnale allarmante della perdita di equilibrio del sistema climatico-biosferico, con conseguenze evidenti sullo scioglimento dei ghiacci, sull'innalzamento del livello dei mari (circa 9,4 cm negli ultimi venticinque anni, WMO 2024) e sull'aumento della frequenza e dell'intensità degli eventi meteorologici estremi.

Questa tendenza, ormai consolidata, mostra come le strategie globali di mitigazione non siano ancora allineate agli obiettivi di neutralità climatica. Le traiettorie di emissione elaborate da Climate Action Tracker (Figura 7), corrispondono a un diverso scenario politico e di mitigazione. Dallo scenario peggiore "Policies & action" (in azzurro) che mostra un riscaldamento globale compreso tra +2,5 °C e +2,9 °C entro il 2100; fino ad un'ipotesi più ottimistica rappresentata dallo scenario "Optimistic scenario" (verde tenue), che, ipotizzando la piena ed efficace attuazione delle politiche climatiche globali, limiterebbe il riscaldamento a circa +1,9 °C. Infine, la traiettoria "1.5 °C compatible" (verde chiaro tratteggiato) rappresenta lo scenario compatibile con l'obiettivo più ambizioso dell'Accordo di Parigi, volto a mantenere l'aumento medio della temperatura globale entro +1,5 °C rispetto ai livelli preindustriali.

<sup>6</sup> In base all'Accordo di Parigi del 2015, ogni cinque anni i paesi esaminano i loro progressi nella limitazione delle emissioni di gas serra. L'obiettivo principale è frenare l'aumento della temperatura media globale in prossimità della superficie, mantenendola ben al di sotto di 2 °C rispetto ai livelli preindustriali, e proseguire gli sforzi per limitare l'aumento a 1,5 °C facendo riferimento a periodi prolungati.

Nel grafico sono inoltre evidenziati due scarti significativi: il "2030 target gap" (19-23 GtCO<sub>2</sub>e) e il "2030 implementation gap" (24-27 GtCO<sub>2</sub>e). Il primo indica la differenza tra gli obiettivi dichiarati e quelli effettivamente necessari per rispettare il limite di 1,5 °C, mentre il secondo rappresenta il divario tra gli impegni formali e le politiche concreteamente implementate.

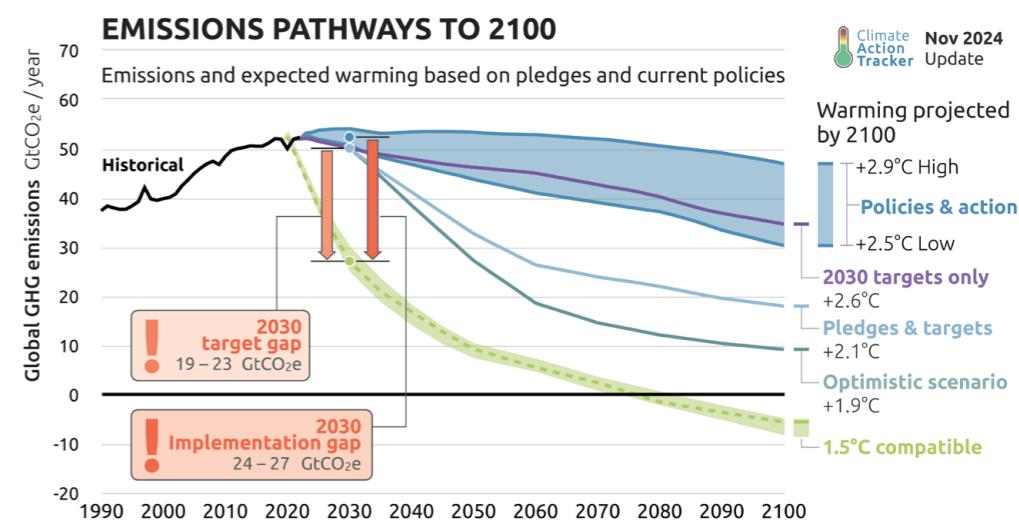


Figura 7. "Emissions pathways to 2100" Fonte: CAT <https://climateactiontracker.org/global/emissions-pathways/>

Questi scarti dimostrano come l'attuale risposta internazionale, pur in miglioramento rispetto al passato, rimanga ancora insufficiente a invertire la traiettoria emissiva globale e a garantire una transizione verso un futuro climaticamente sicuro.

In stretta connessione con il cambiamento climatico, anche il limite planetario relativo all'**acidificazione degli oceani** risulta oggi superato. L'assorbimento di circa un quarto delle emissioni antropiche di CO<sub>2</sub> da parte degli oceani, infatti, ha modificato in modo significativo la chimica dei carbonati, riducendo il pH medio superficiale dell'acqua e compromettendo la capacità del mare di agire come efficace serbatoio di carbonio. Sebbene l'oceano mantenga una lieve alcalinità (con un pH superiore a 7), la diminuzione osservata, pari a circa 0,1 unità dall'inizio dell'era industriale, rappresenta un aumento dell'acidità compreso tra il 30% e il 40%, una variazione estremamente rapida se confrontata con i tempi geologici e mai registrata negli ultimi 26.000 anni (IPCC, 2024) (Figura 8).

Questo processo di diminuzione del pH, definito acidificazione oceanica, è il risultato diretto dell'assorbimento della CO<sub>2</sub> atmosferica: quando il gas si dissolve nell'acqua, reagisce formando acido carbonico, che altera l'equilibrio dei carbonati. Le conseguenze sono molteplici e già osservabili. In primo luogo, si riduce la disponibilità di ioni carbonato, fondamentali per gli organismi marini che costruiscono gusci o scheletri calcarei, come coralli, molluschi e alcuni tipi di plancton.

Questo compromette la loro capacità di crescita e di sopravvivenza, con effetti a catena su interi ecosistemi e sulla rete trofica marina.

In secondo luogo, la diminuzione del pH riduce l'efficienza dell'oceano come pozzo di assorbimento del carbonio, creando un circolo vizioso che amplifica ulteriormente l'accumulo di CO<sub>2</sub> atmosferica e il riscaldamento globale.

Il *Planetary Health Check 2025* conferma che il limite dell'acidificazione oceanica è stato ufficialmente superato per la prima volta, indicando che gli ecosistemi marini stanno già oltrepassando le soglie di sicurezza. L'oceano, pur continuando ad assorbire circa il 25% delle emissioni annuali di CO<sub>2</sub> di origine antropica, paga un costo ecologico elevato. Questo assorbimento, che rappresenta un meccanismo naturale di mitigazione del cambiamento climatico, comporta però una progressiva perdita della capacità autogenerativa del sistema marino e un deterioramento dei servizi ecosistemici di cui le società umane dipendono direttamente, come la pesca e l'acquacoltura.

L'acidificazione non si manifesta in modo uniforme su scala globale. Le diminuzioni più marcate del pH si registrano in specifiche aree oceaniche (in particolare nell'Oceano Indiano, nell'Oceano Antartico, nel Pacifico equatoriale orientale, nel Pacifico tropicale settentrionale e in alcune regioni dell'Atlantico) che, complessivamente, rappresentano circa il 47% della superficie oceanica campionata (IPCC, 2024). In queste zone, la velocità di acidificazione risulta superiore alla media globale, con impatti locali più intensi sulla biodiversità e sugli equilibri biogeochimici.

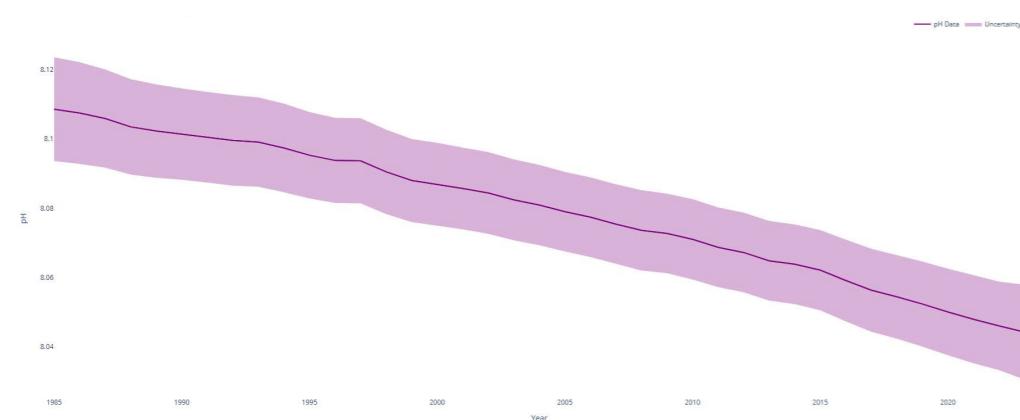
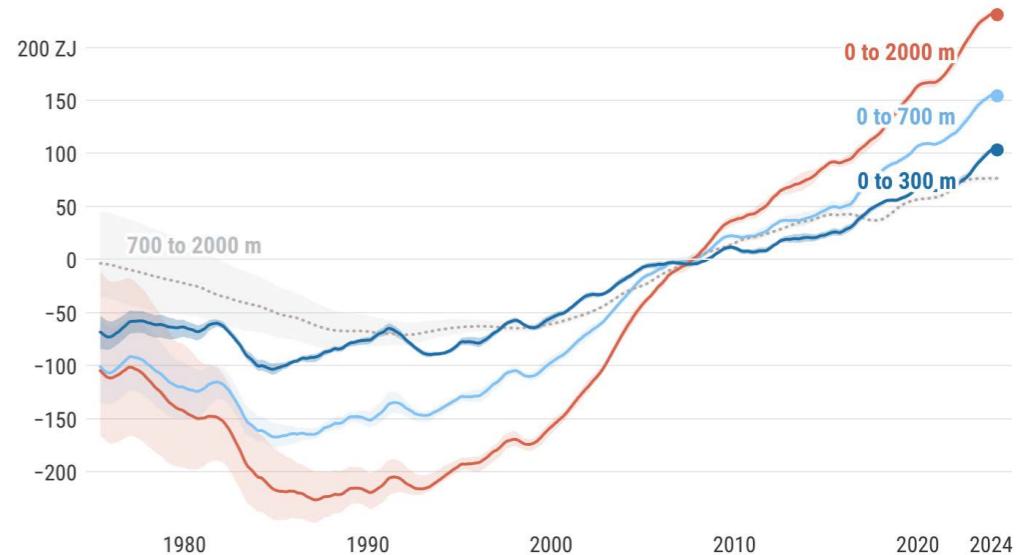


Figura 8. "Global mean ocean surface Ph (1985-2023)" Fonte: IPCC, 2024

Le proiezioni climatiche mostrano che l'acidificazione degli oceani continuerà ad aumentare nel XXI secolo, a un ritmo che dipenderà dalle emissioni future. Le variazioni del pH degli oceani profondi sono irreversibili su scale temporali che vanno da centenari a millenni.

Gli effetti dell'acidificazione degli oceani sull'area dell'habitat, sulla biodiversità, sulla funzione dell'ecosistema e sui servizi ecosistemici sono già stati osservati, e la produzione alimentare derivante dall'acquacoltura e dalla pesca dei molluschi è stata negativamente influenzata.

Gli oceani assorbono inoltre circa il 90% del calore in eccesso prodotto dall'effetto serra, rappresentando quindi il principale accumulatore dell'energia termica immessa nel sistema terrestre. Nel 2024, **il contenuto di calore oceanico** ha raggiunto un nuovo record, superando di  $16 \pm 8$  ZJ il massimo registrato nel 2023 (C3S). Le variazioni termiche penetrano fino a profondità di circa 2000 metri e risultano irreversibili su scale temporali da secolari a millenarie (Figura 9).



The unit used, zettajoules (ZJ), represents a factor of  $10^{21}$   
Data: ORAS5 • Reference period: 1993–2023 • Credit: C3S/ECMWF

PROGRAMME OF THE EUROPEAN UNION Copernicus Climate Change Service IMPLEMENTED BY ECMWF

Figura 9. "Anomalies in the heat content of the global ocean". Fonte: C3S/ECMWF. <https://climate.copernicus.eu/climate-indicators/ocean-heat-content>

Il riscaldamento degli oceani ha conseguenze di vasta portata, come il degrado degli ecosistemi marini, la perdita di biodiversità e la riduzione del pozzo di carbonio oceanico. Alimenta tempeste tropicali e subtropicali e aggrava la continua perdita di ghiaccio marino nelle regioni polari. Il riscaldamento degli oceani, insieme alla perdita di ghiaccio sulla terraferma, sta causando la crescita del livello medio del mare.

**L'innalzamento del livello marino** costituisce uno degli indicatori più tangibili del diseguilibrio climatico in corso. Le osservazioni satellitari mostrano che dal 1999 il livello medio globale è aumentato di circa  $3,7 \pm 0,25$  mm/anno (Figura 10), pari a un incremento complessivo di circa 9,38 cm negli ultimi venticinque anni (C3S/ECMWF).

Inoltre, la velocità di crescita si è progressivamente accelerata: il trend è passato da  $2,9 \pm 0,5$  mm/anno nel periodo 1999-2009 a  $4,3 \pm 0,5$  mm/anno tra il 2014 e il 2024, fino a più che raddoppiare rispetto alle prime misurazioni satellitari degli anni Novanta.

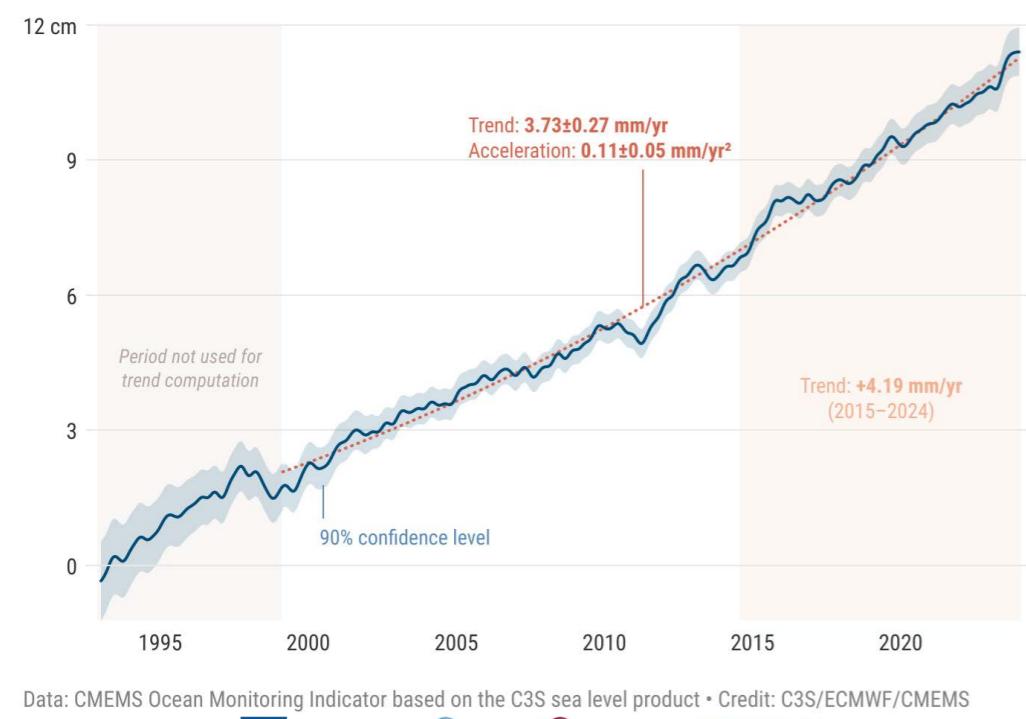


Figura 10. "Daily change in global mean sea level". Fonte: C3S/ECMWF.  
<https://climate.copernicus.eu/climate-indicators/sea-level>

Circa il 30% di questo aumento può essere attribuito all'espansione termica degli oceani, mentre il 60% è dovuto allo scioglimento dei ghiacciai terrestri e delle calotte glaciali antartiche e della Groenlandia. Il restante 10% è causato da cambiamenti nelle riserve idriche terrestri, come l'umidità del suolo, le acque superficiali e le falde acquifere. Le conseguenze sono particolarmente critiche per le aree costiere e le grandi città situate in prossimità del mare, dove anche variazioni di pochi millimetri possono amplificare il rischio di inondazioni, erosione costiera e intrusione salina nelle falde acquifere, generando impatti sociali, economici e culturali significativi.

La ciosfera fornisce ulteriori evidenze di questo mutamento sistemico.

**Nel 2024, l'estensione minima del ghiaccio marino artico<sup>7</sup> ha**

<sup>7</sup> Il ghiaccio marino è costituito da acqua salata congelata che galleggia sulla superficie degli oceani e la cui estensione varia stagionalmente nelle regioni polari. Durante l'autunno e l'inverno, il progressivo raffreddamento atmosferico e oceanico favorisce l'espansione della copertura ghiacciata, mentre nei mesi estivi gran parte di questo strato stagionale si scioglie, raggiungendo i minimi annuali a fine estate o inizio autunno (settembre nell'emisfero settentrionale, febbraio nell'emisfero meridionale). Le variazioni dell'estensione del ghiaccio marino hanno effetti rilevanti sulla circolazione oceanica, sulla

raggiunto 4,28 milioni di km<sup>2</sup> (11 settembre), il settimo valore più basso in 46 anni di osservazioni satellitari, con una perdita di 1,17 milioni di km<sup>2</sup> rispetto alla media 1991-2020 (C3S). Si registra inoltre una riduzione del ghiaccio pluriennale (Multi-Year Ice, MYI) a favore di quello di primo anno (First-Year Ice, FYI), più sottile e vulnerabile, segno di un progressivo indebolimento della copertura artica. Anche in Antartide si osservano oscillazioni e minimi record il 20 febbraio 2024 il ghiaccio marino antartico ha raggiunto un'estensione minima giornaliera di 1,99 milioni di km<sup>2</sup>, attestandosi al secondo minimo più basso mai registrato nell'era satellitare; ciò evidenzia una forte variabilità interannuale che non smentisce la tendenza complessiva alla perdita di massa glaciale.

I dati raccolti dal World Glacier Monitoring Service (WGMS) sul **bilancio di massa dei ghiacciai**<sup>8</sup> terrestri confermano questa dinamica: i circa 220.000 ghiacciai monitorati a livello globale (esclusi quelli di Groenlandia e Antartide) hanno perso tra il 1976 e il 2024 uno spessore medio equivalente a 13 metri d'acqua, contribuendo per oltre 25 mm all'innalzamento del livello del mare, di cui il 41% solo nell'ultimo decennio. Negli ultimi anni, il contributo medio annuo è di circa 1 mm/anno, con picchi record nel 2023 (1,5 mm) e valori ancora elevati nel 2024 (1,2 mm) (C3S/WGMS) (Figura 11).

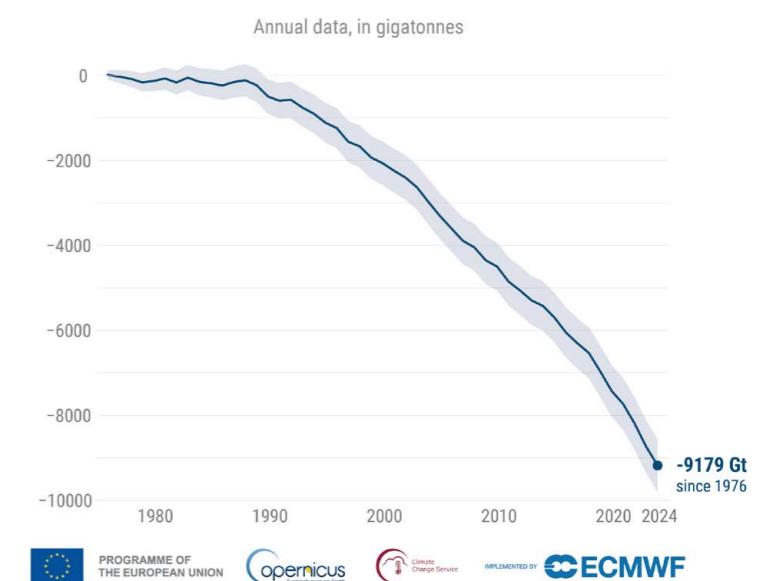


Figura 11. "Cumulative glacier mass change globally". Fonte: C3S/ECMWF.  
<https://climate.copernicus.eu/climate-indicators/glaciers>

dinamica atmosferica e sull'equilibrio energetico superficiale. L'estensione viene convenzionalmente definita come l'area marina con almeno il 15% di copertura ghiacciata. Si tratta di una grandezza dinamica, soggetta sia ai processi di congelamento e scioglimento sia ai movimenti della banchisa indotti da venti e correnti oceaniche. L'estensione del ghiaccio marino è un utile indicatore del cambiamento climatico, soprattutto se si considera la rapidità con cui si verificano i cambiamenti nell'Artico e la portata delle ripercussioni dei cambiamenti nella sua superficie.

<sup>8</sup> Il **bilancio di massa annuale** di un ghiacciaio è calcolato come la differenza tra l'accumulo di neve (aumento di massa) e lo scioglimento di ghiaccio e neve (perdita di massa) in un anno e riflette le condizioni atmosferiche prevalenti. Se misurati su un lungo periodo, gli andamenti del bilancio di massa sono un indicatore del cambiamento climatico. La perdita netta globale di massa glaciale contribuisce all'innalzamento del livello del mare, mentre lo scioglimento stagionale di ghiaccio e neve contribuisce al deflusso, anche negli anni con un bilancio di massa annuale positivo.

Le cause risultano strettamente legati alle variazioni di temperatura, precipitazioni, umidità e nuvolosità, ma anche a processi che modificano l'albedo della superficie glaciale, come la riduzione della copertura nevosa stagionale o i depositi di polveri, carbonio nero, residui di incendi e attività algali, che accelerano lo scioglimento. Secondo l'IPCC AR6, il ritiro sincronizzato dei ghiacciai su scala planetaria dagli anni Cinquanta, e in modo più marcato dagli anni Novanta, è attribuibile con elevata probabilità all'influenza delle attività antropiche, e non trova precedenti negli ultimi duemila anni.

L'attuale squilibrio di massa suggerisce che, anche in scenari climatici stabili, molte regioni glaciali continueranno a perdere ghiaccio in modo significativo, con conseguenze dirette sull'innalzamento del livello del mare e sugli equilibri idrologici globali.

Un ulteriore limite oltrepassato è quello legato ai **cambiamenti nei cicli biogeochimici**, in particolare ai cicli di azoto e fosforo. L'intensificazione dei processi industriali e agricoli ha alterato i naturali equilibri ecologici, incrementando l'eutrofizzazione delle acque e la perdita di fertilità dei suoli. Parallelamente, il **cambiamento nell'uso del suolo** dovuto alla deforestazione, all'urbanizzazione e all'agricoltura intensiva ha ridotto drasticamente la superficie forestale, soprattutto nelle regioni tropicali, compromettendo la capacità degli ecosistemi di sequestrare carbonio e di regolare l'umidità atmosferica.

Anche l'**alterazione dei cicli delle acque dolci**, inclusi i fiumi e l'umidità del suolo, ha superato la soglia di sicurezza. Le alterazioni antropiche dei cicli idrologici hanno un impatto su funzioni naturali come il sequestro del carbonio e la biodiversità con ripercussioni che possono portare a variazioni nei livelli delle precipitazioni.

Il confine legato all'**introduzione di nuove entità**, ovvero sostanze chimiche sintetiche, microplastiche e materiali artificiali, è stato classificato nella zona ad alto rischio. L'immissione incontrollata di questi composti nell'ambiente, spesso privi di adeguate valutazioni tossicologiche, sta alterando in modo irreversibile i processi biologici ed evolutivi del pianeta.

Infine, l'**integrità della biosfera** rappresenta uno dei limiti maggiormente compromessi. La perdita di biodiversità, accelerata dal cambiamento climatico e dalla trasformazione del suolo, riduce la capacità degli ecosistemi di mantenere le funzioni di regolazione del clima, dei cicli dei nutrienti e della qualità dell'acqua e dell'aria. La riduzione della diversità genetica e funzionale mina la stabilità complessiva del sistema terrestre, rendendo l'intero equilibrio ecologico più fragile e meno resiliente ai disturbi.

A differenza dei sette confini (sopra illustrati) già superati, solo due processi planetari rientrano attualmente all'interno dello "spazio operativo sicuro" e sono: l'**assottigliamento dello strato di ozono stratosferico** e il **carico di aerosol atmosferico**. Ciò è dovuto, nel primo caso, all'efficacia del

Protocollo di Montreal, che ha consentito la graduale eliminazione delle sostanze lesive dello strato di ozono, e nel secondo caso al fatto che la misurazione globale delle differenze interemisferiche nel carico di aerosol mostra valori ancora contenuti, pur registrando impatti regionali significativi. Nel complesso, il quadro delineato dai rapporti della WMO e dal *Planetary Boundaries Science* conferma una tendenza inequivocabile: il pianeta si trova in una fase di profonda instabilità ecologica, con pressioni crescenti che rischiano di spingere il sistema terrestre oltre le soglie di irreversibilità. L'intensificarsi di eventi meteorologici estremi, la perdita di habitat, l'acidificazione degli oceani e la riduzione delle risorse idriche rappresentano manifestazioni concrete di un disequilibrio sistematico che continuerà a provocare perdite umane e danni ambientali di portata inedita (cfr. capitolo 1.4).

L'immagine 12 di seguito riassume quanto descritto finora in un quadro complessivo:

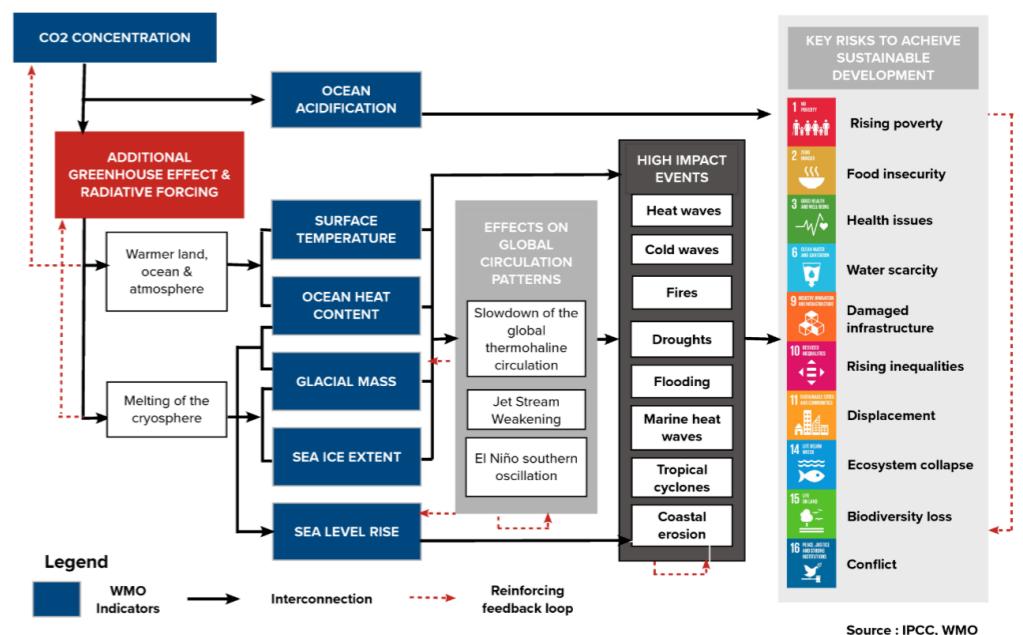


Figura 12. "Risks & Impacts" Fonte: IPCC, WMO

In questo scenario, risulta quindi imprescindibile affrontare congiuntamente l'instabilità del sistema planetario e i fattori di rischio sociale, per garantire la protezione delle comunità umane e degli ecosistemi e per preservare la resilienza complessiva del sistema Terra (PBScience, 2025).

## 1.2. Aree ad alta vulnerabilità ambientale e sociale

"Our house is on fire"

Greta Thunberg, World Economic Forum, 2019

Come analizzato precedentemente, i parametri che descrivono lo stato attuale del clima offrono un quadro oggettivo delle trasformazioni in atto e delle dinamiche che stanno alterando gli equilibri naturali del pianeta. Tali cambiamenti si traducono in conseguenze dirette e tangibili che interessano la vita quotidiana delle popolazioni e la stabilità degli ecosistemi. L'alterazione di questi indicatori produce un aumento della frequenza, dell'intensità e della durata degli eventi meteorologici e climatici estremi, che rappresentano oggi una delle manifestazioni più evidenti della crisi climatica.

Questi fenomeni, nel loro insieme, alimentano una catena di conseguenze che culminano con pesanti ricadute sugli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDGs), in particolare quelli legati alla sicurezza alimentare, alla salute, alla riduzione delle disuguaglianze e alla resilienza delle infrastrutture, mettendone a rischio il raggiungimento.

Per comprendere appieno il nesso tra cambiamento climatico ed eventi estremi è fondamentale chiarire tre concetti che l'IPCC (2018) definisce come:

**Rischio**: potenziale di conseguenze negative che si verificano quando un sistema di valore (vite umane, ecosistemi, risorse economiche e culturali, infrastrutture) è esposto a un pericolo climatico. Esso deriva dall'interazione di tre fattori: la pericolosità dell'evento, la vulnerabilità del sistema e la sua esposizione.

**Vulnerabilità**: propensione o predisposizione a subire danni, determinata dalla sensibilità al pericolo e dalla capacità, o incapacità, di reagire e adattarsi.

**Esposizione**: si riferisce alla presenza di persone, infrastrutture, attività economiche e risorse naturali in aree che possono essere colpite da eventi estremi.

Questi tre concetti, presi insieme, spiegano perché le conseguenze della crisi climatica non si distribuiscono in modo uniforme, ma colpiscono più duramente le regioni e le popolazioni già fragili sotto il profilo ambientale e sociale.

Negli ultimi decenni, gli eventi estremi si sono intensificati sia in frequenza che in magnitudo. Secondo l'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO, 2025), il numero di disastri legati al clima è aumentato di cinque volte negli ultimi cinquant'anni comportando vittime e danni economici ingenti. Nonostante il miglioramento dei sistemi di allerta abbia contribuito a ridurre

il numero di morti, gli impatti socio-economici restano in forte crescita. Secondo l'European Environment Agency (EEA, 2025) gli effetti di fenomeni meteorologici estremi, quali siccità, incendi boschivi, ondate di calore, tempeste e piogge torrenziali; stanno incidendo direttamente sulla salute umana, sulla disponibilità di acqua e cibo, sulla produttività agricola e sulla stabilità delle economie locali. L'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2022) attribuisce gran parte di tali fenomeni all'influenza antropica, evidenziando come le attività umane abbiano amplificato frequenza e intensità di questi eventi.

Uno strumento utile per valutare l'impatto differenziato degli eventi climatici è il *Climate Risk Index* (CRI) che analizza il grado di impatto degli eventi meteorologici estremi legati al clima sui paesi misurandone le conseguenze concreti dei rischi. Tra il 1993 e il 2022, il CRI ha registrato oltre 765.000 morti e perdite economiche pari a 4,2 trilioni di dollari causate da più di 9.400 eventi meteorologici estremi. Questo indice classifica i paesi in base al costo umano ed economico subito, evidenziando come le nazioni con minore capacità di adattamento siano quelle maggiormente colpite.

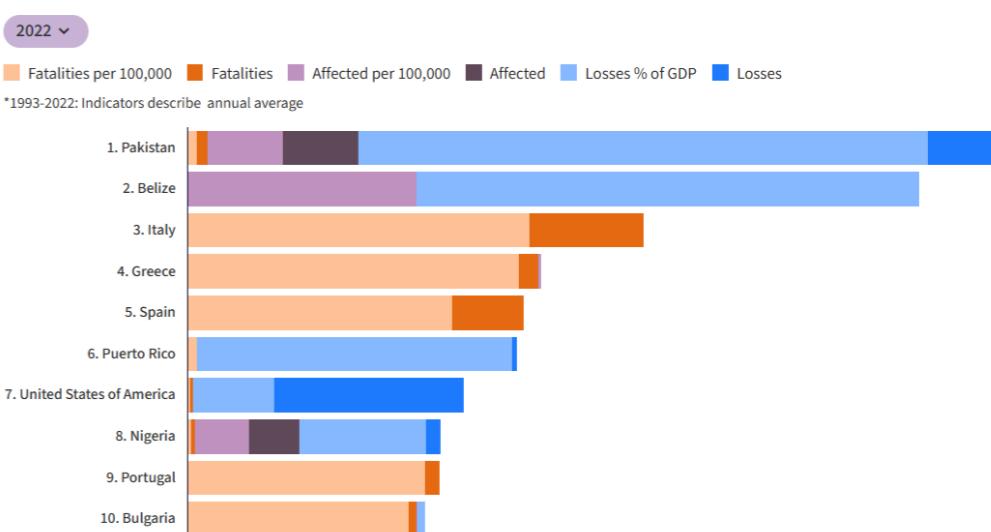


Figura 13. "Climate Risk Index: top 10 most affected countries". Fonte: Germanwatch 2022 <https://www.germanwatch.org/en/cri>

Il grafico (Figura 13) evidenzia come paesi quali Pakistan e Belize risultino particolarmente vulnerabili, registrando gravi perdite economiche e sociali. Anche nazioni europee come Italia, Grecia, Spagna e Portogallo figurano tra le più colpite, a dimostrazione che gli impatti della crisi climatica sono globali e non limitati alle aree tradizionalmente fragili. Negli Stati Uniti emergono invece perdite economiche assolute di grande entità. Sebbene i dati si riferiscano al 2022, essi risultano tuttora attuali, poiché confermano tendenze ormai consolidate di frequenza e intensità degli eventi estremi.

Le analisi di Carbon Brief (2024) (Figura 14) rafforzano questi dati: il 74% degli eventi estremi studiati è stato reso più probabile o più grave a causa del cambiamento climatico antropogenico. Particolaramente emblematiche sono le cosiddette "onde di calore impossibili", eventi che in condizioni climatiche naturali avrebbero avuto probabilità prossime allo zero.

Tali fenomeni hanno colpito Nord America, Europa e Asia, causando vittime e danni economici ingenti.

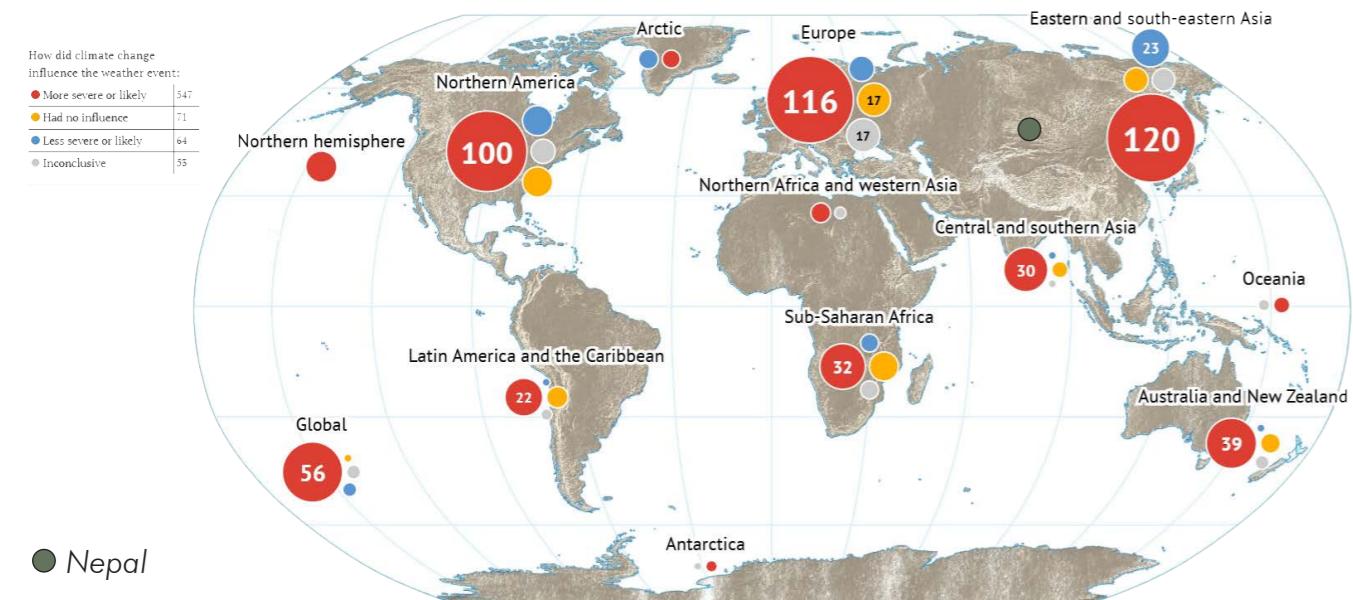


Figura 14. "Impact of climate change on extreme weather". Fonte: Carbon Brief 2025  
<https://interactive.carbonbrief.org/attribution-studies/index.html#the-studies>

Le proiezioni future elaborate dal progetto europeo HELIX e dal MetOffice delineano scenari critici in caso di riscaldamento globale di 4 °C rispetto ai livelli preindustriali. In queste condizioni, vaste aree del pianeta potrebbero subire simultaneamente cinque tipi di impatti: **stress termico estremo, siccità idrologiche, inondazioni fluviali, incendi boschivi ed insicurezza alimentare**, con effetti devastanti sulla salute pubblica. La mappa di seguito (Figura 15) nata da questi studi mostra chiaramente le regioni più a rischio, evidenziando come molte comunità vulnerabili non dispongano delle risorse necessarie per fronteggiare simili scenari:

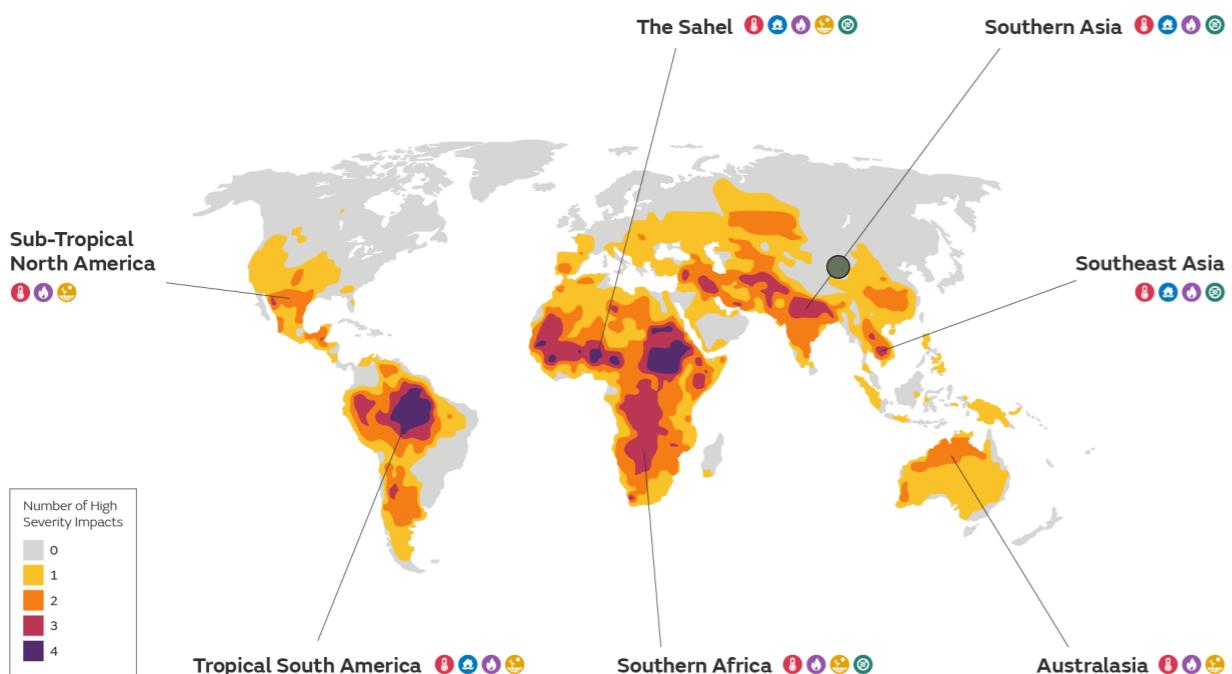


Figura 15. "Multiple severe impacts". Fonte: Met Office

Analizzando i diversi layer che compongono la mappa viene riportata di seguito una panoramica più specifica:



Figura 16. "Heat stress".



Figura 17. "Flooding".

### Figura 16. Rischio di stress termico estremo

Il rischio di stress termico per l'uomo dipende sia dalla temperatura che dall'umidità ed è indicato dalla temperatura di bulbo umido (WBGT). Una WBGT superiore a 32 °C è definita "rischio estremo". A questo livello, i membri vulnerabili della popolazione e coloro che svolgono lavori fisici all'aperto sono maggiormente a rischio di effetti negativi sulla salute.

### Figura 17. Inondazioni del fiume

Piogge intense e/o prolungate possono aumentare la probabilità di inondazioni fluviali, insieme ad altri fattori umani come le attività di utilizzo del territorio. La mappa mostra alcuni importanti bacini fluviali con oltre 1 milione di persone all'anno che si prevede saranno colpiti da inondazioni fluviali con un riscaldamento globale di 4 °C.

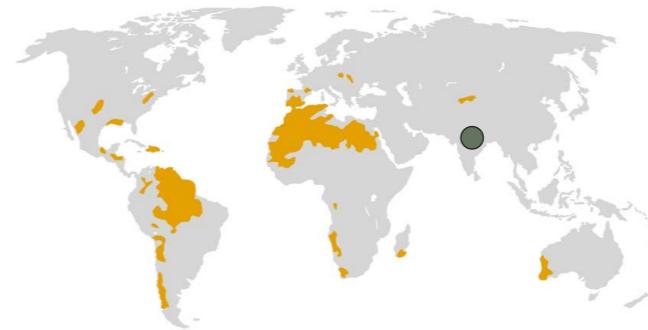


Figura 18. "Drought".

### Figura 18. Siccità

La siccità idrologica è la riduzione relativa della disponibilità d'acqua nei fiumi e può essere definita utilizzando l'Indice di Deflusso Standardizzato (SRI). Qui, la siccità grave ed estrema è definita come il periodo di 24 giorni più secco dell'anno nel clima attuale. La mappa mostra le aree con un aumento di oltre il 25% del tempo sottoposto a siccità grave ed estrema con un riscaldamento globale di 4 °C.

### Figura 19. Rischio di incendi

Il rischio di incendi boschivi aumenta in condizioni di caldo, siccità e vento, e può essere quantificato con l'indice di pericolo di incendi boschivi McArthur (FFDI).

La mappa mostra le aree in cui si prevede che il pericolo di incendi sia "molto alto" o superiore (FFDI > 25) per più di 10 giorni all'anno con un riscaldamento globale di 4 °C.

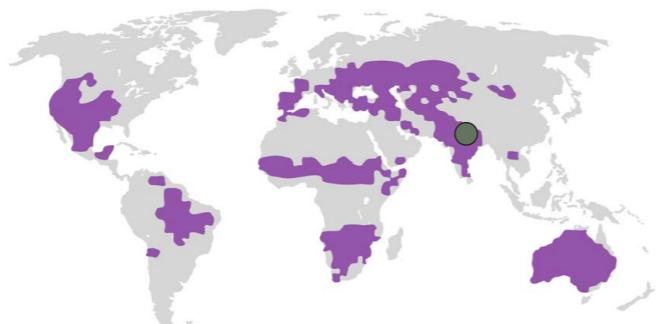


Figura 19. "Fire"

### Figura 20. Insicurezza alimentare

La mappa mostra i paesi in cui oltre il 30% della popolazione attuale è esposta a insicurezza alimentare moderata o grave, come definito dalla Food Insecurity Experience Scale dove:

-L'insicurezza alimentare moderata è associata all'incapacità di seguire regolarmente diete sane e nutrienti.

-L'insicurezza alimentare grave è strettamente correlata a una quantità insufficiente di cibo e quindi a denutrizione o fame.



Figura 20. "Food insecurity"

Figure 16-17-18-19-20. "Specific severe impacts" Fonte: Met Office

[https://www.metoffice.gov.uk/research/climate/climate-impacts/global-impacts-of-climate-change---projections#Food\\_insecurity](https://www.metoffice.gov.uk/research/climate/climate-impacts/global-impacts-of-climate-change---projections#Food_insecurity)

Nel panorama politico attuale, strumenti di monitoraggio come il *Climate Change Performance Index* (CCPI), valutando le quattro dimensioni principali: emissioni, energie rinnovabili, uso dell'energia e politiche climatiche, consente di confrontare le performance climatiche di 63 Paesi e dell'Unione Europea, responsabili complessivamente di oltre il 90% delle emissioni globali di gas serra. Questi strumenti hanno valore tecnico in quanto mostrano i progressi frammentari dei paesi, che registrano ritardi preoccupanti, ma assumono un significato politico e sociale creando trasparenza sulle responsabilità attraverso confronti internazionali volti a identificare le aree dove è più urgente intervenire per garantire un futuro sostenibile.

In conclusione, l'intensificazione degli eventi estremi rappresenta la traduzione concreta delle trasformazioni climatiche descritte nei sette indicatori globali. L'impatto non si limita alla sfera ambientale, ma si estende profondamente a quella sociale ed economica, minacciando la stabilità dei sistemi umani e naturali. Le aree ad alta vulnerabilità ambientale e sociale sono quelle maggiormente esposte, prive di capacità adattive sufficienti e già oggi costrette a fronteggiare conseguenze devastanti.

### 1.3. Strategie di mitigazione e adattamento nella transizione ecologica

"We are the first generation to feel the effect of climate change and the **last generation** who can do something about it."

Barack Obama, Former US President, 2014

La pressione esercitata dalla crisi climatica ha spinto governi, istituzioni e comunità scientifiche a individuare strategie globali per ridurre gli impatti della crisi e perseguire gli obiettivi stabiliti dall'Agenda 2030 e dall'Accordo di Parigi. In risposta a questa sfida, si articolano due strategie fondamentali: la mitigazione e l'adattamento che sono imprescindibili per un futuro equo e sostenibile.

L'IPCC (2018) definisce la **mitigazione** come "un intervento umano volto a ridurre le emissioni o ad aumentare i pozzi di assorbimento dei gas serra", mentre l'**adattamento** è "il processo di adattamento al clima reale o previsto e ai suoi effetti, al fine di mitigare i danni o sfruttare opportunità benefiche".

Prima di analizzarle nel dettaglio, di seguito (Figura 21) si propone un quadro completo che racchiude quanto discusso finora mettendo in relazione i principali fattori trainanti della crisi climatica, i relativi effetti sul sistema Terra e le due direttive fondamentali di risposta: mitigazione e adattamento.

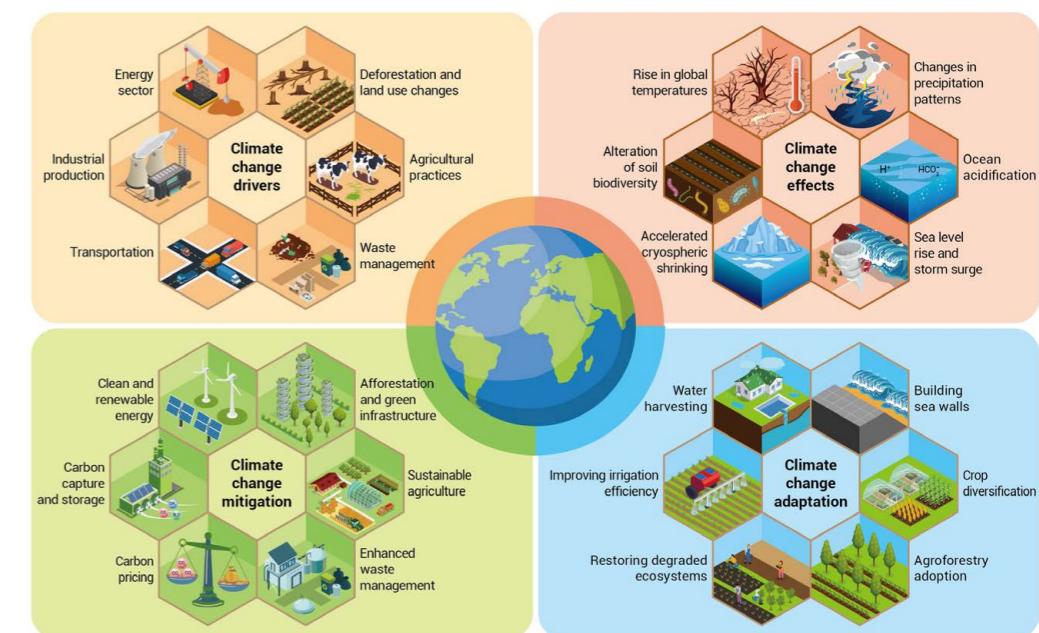


Figura 21. "GRAPHICAL ABSTRACT".

Fonte: Climate change: Strategies for mitigation and adaptation. The Innovation Geoscience. <https://doi.org/10.59717/j.xinn-geo.2023.100015>

## MITIGAZIONE

Le strategie di mitigazione affrontano la crisi climatica intervenendo sulle sue cause: ridurre i flussi di gas serra nell'atmosfera implica una trasformazione sistematica dei modelli energetici, produttivi, di consumo e dell'organizzazione dello spazio costruito.

-In **campo energetico** la priorità è la transizione da fonti fossili a sistemi a basse emissioni (solare, eolico, idroelettrico, risorse geotermiche e biomasse sostenibili) Si prevede che, entro il 2027, le fonti rinnovabili rimodelleranno il mix energetico globale e diventeranno la principale fonte di elettricità. (Wang et al., 2023). L'energia idroelettrica detiene attualmente oltre il 90 % della capacità di generazione su scala di rete, ma il suo ulteriore sviluppo è vincolato dalla disponibilità di siti idonei e dagli elevati costi di investimento iniziali. Sul fronte delle nuove installazioni, fotovoltaico ed eolico hanno dominato il 2022, rappresentando quasi il 90 % delle aggiunte annuali di energia rinnovabile; per il solare fotovoltaico è previsto un rapido aumento della capacità installata, con la possibilità di superare quella del carbone entro il 2027 e diventare così la tecnologia più diffusa a livello mondiale (Gibb et al., 2022).

-Nel **settore delle costruzioni e dell'industria** occorre aumentare l'efficienza energetica, ridurre l'energia incorporata nei materiali e favorire l'uso di soluzioni costruttive e materiali biobased a basso impatto.

-Nella **mobilità**, le politiche più efficaci combinano potenziamento del trasporto pubblico, elettrificazione dei veicoli e misure di pianificazione urbana che riducono la domanda di spostamento privato.

-La **gestione delle risorse naturali** con pratiche di protezione delle foreste, pratiche agricole sostenibili e ripristino degli ecosistemi, rimane centrale perché questi sistemi agiscono come serbatoi naturali di carbonio (Wang et al., 2023; UNEP, 2023).

A livello geopolitico, l'Unione Europea ha già ridotto le proprie emissioni del 37% rispetto al 1990 (EEA, 2025) e ha fissato obiettivi più ambiziosi: -55% al 2030 e neutralità climatica entro il 2050. Tuttavia, a livello globale, secondo l'IPCC (2022), le attuali politiche (NDCs) non sono sufficienti a mantenere l'aumento delle temperature sotto 1,5 °C.

Fra le misure di mitigazione, le soluzioni basate sulla natura (**Nature-based Solutions**, NBS) richiedono particolare attenzione poiché coniugano sequestro di carbonio ed attenzione al ripristino degli ecosistemi. La protezione e il ripristino di foreste, zone umide e praterie limitano il rilascio di CO<sub>2</sub> e aumentano la capacità di stoccaggio del paesaggio: difendere i pozzi di carbonio esistenti evita emissioni aggiuntive dovute a deforestazione o conversione d'uso del suolo, mentre interventi mirati di ripristino possono sequestrare quantità significative di CO<sub>2</sub> se pianificati e gestiti in modo

ecologicamente e socialmente sensibile. Gli ecosistemi terrestri hanno rimosso circa il 30% delle emissioni di carbonio umane ogni anno, e le foreste rappresentano la maggior parte di questo assorbimento (Wang et al., 2023). L'imboscamento e la riforestazione restano fra le NBS più praticabili, studi recenti suggeriscono un potenziale di mitigazione rilevante entro il 2030 (Anderegg, 202), ma al tempo stesso ne sottolineano limiti e rischi legati al clima dovuti a percezioni errate quando le campagne di imboschimento su larga scala non riescono a riconoscere le complessità sociali ed ecologiche dei paesaggi che mirano a trasformare (Strassburg et al.; Fleischman et al., citati in Wang et al., 2023). Per questo motivo, il ripristino deve essere integrato in strategie e politiche a lungo termine, dotato di criteri di selezione delle aree, di monitoraggio, di protocolli standardizzati e di governance partecipata che evitino esiti indesiderati e ingiustizie sociali.

La produzione agricola è una delle principali fonti di emissioni di CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> in agricoltura; tuttavia, i terreni possono diventare pozzi di carbonio attraverso l'accumulo di carbonio nel suolo se gestiti in modo mirato e appropriato.

Nei **sistemi agricoli** il potenziale di mitigazione può essere ottenuto sia dall'aumento del sequestro del carbonio nel suolo sia dalla riduzione delle emissioni di CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O. Tra le pratiche per migliorare la resilienza, la qualità del suolo e la resa delle colture aumentando il carbonio organico (SOC) nel suolo vi sono: l'incremento della sostanza organica (SO), l'integrazione di biochar (valida strategia alternativa grazie alla sua resistenza alla degradazione microbica), la riduzione della lavorazione del suolo (la lavorazione ridotta o la non lavorazione possono aumentare il sequestro di SOC negli strati superiori del suolo dai 0-15 o 0-20 cm) e rotazioni culturali adeguate (quelle con maggiore intensità e maggiore biomassa fuori terra tendono ad aumentare le scorte di SOC e a ridurre le emissioni di gas serra senza sacrificare le rese); tuttavia, l'efficacia di tali interventi è fortemente condizionata dal contesto pedoclimatico e dalle dinamiche locali della mineralizzazione organica (Wang et al., 2023). La riduzione delle emissioni di N<sub>2</sub>O richiede tecniche di gestione dei fertilizzanti (rateo, tempistica, forme chimiche, inibitori della nitrificazione) e strumenti di supporto decisionale che permettano di conciliare produttività e minori perdite gassose; analogamente, le risaie possono diminuire le emissioni di CH<sub>4</sub> con pratiche irrigue mirate (irrigazione intermittente e il drenaggio a metà stagione), varietà a minor emissione e uso di ammendanti come il biochar.

L'agricoltura biologica e sistemi agroecologici possono contribuire a fornire una risposta positiva alla crisi a ridurre l'intensità emissiva del settore, migliorando contemporaneamente la biodiversità e la capacità di sequestro del suolo, ma le evidenze mostrano risultati variabili: la mitigazione dipende dalla combinazione di pratiche adottate e dal contesto territoriale; perciò, sono necessari ulteriori studi e sperimentazioni su larga scala (Wang et al., 2023).

Parallelamente alle politiche di natura e agricoltura, **le tecnologie per la decarbonizzazione dell'industria e dell'energia** giocano un ruolo imprescindibile. L'espansione delle rinnovabili è ormai rapida: fotovoltaico ed eolico rappresentano la maggior parte delle nuove installazioni, e la loro crescita richiede investimenti in infrastrutture di rete e sistemi di accumulo. Secondo l'IPCC (2022) in alcuni settori la cattura, l'utilizzo e lo stoccaggio del carbonio (CCUS) può contribuire a ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> di 3,0-6,8 miliardi di tonnellate all'anno nel 2050 e, nello scenario di sviluppo sostenibile dell'Agenzia internazionale per l'energia (IEA), la CCUS può contribuire al 15% della riduzione accumulata delle emissioni di CO<sub>2</sub> per realizzare emissioni nette pari a zero nel 2070; se combinata con bioenergia (BECCS) o cattura diretta dall'aria (DAC), la CCUS apre la possibilità di emissioni nette negative. Tuttavia, queste tecnologie sollevano questioni economiche, logistiche e ambientali: la scala richiesta per BECCS può entrare in competizione con l'uso del suolo, minacciare la biodiversità e richiedere grandi quantità di input; la CCUS ha costi elevati e richiede infrastrutture fossili per trasporto e stoccaggio sicuro (Wang et al., 2023).

La mitigazione efficace implica anche scelte di **politica urbana e territoriale**: contenere il consumo di suolo, ridurre la dispersione urbana, preservare suoli fertili, investire nella riqualificazione energetica dell'edilizia esistente e favorire materiali locali e riciclabili riducono sia le emissioni incorporate sia la vulnerabilità delle comunità (Baiani & Valitutti, 2013). Nella pianificazione delle città, inoltre, le soluzioni basate sulla natura (NBS) possono contribuire al sequestro del carbonio, alla mitigazione degli estremi termici e alla gestione delle acque piovane.

La mitigazione richiede un insieme di azioni complementari, perciò, solo attraverso un approccio multidimensionale sarà possibile conciliare l'obiettivo di mitigazione con la tutela degli ecosistemi e la giustizia socio-spatiale.

## ADATTAMENTO

L'adattamento al cambiamento climatico si pone dall'altro capo della stessa problematica affrontata dalla mitigazione: laddove la mitigazione interviene sulle cause riducendo i flussi di gas serra, l'adattamento agisce sugli effetti già in atto e su quelli attesi, riducendo la vulnerabilità e aumentando la capacità di resilienza di persone, infrastrutture, comunità ed ecosistemi. Nel contesto urbano e territoriale implica scelte progettuali, politiche e organizzative diverse, che tuttavia devono dialogare fra loro per evitare scelte contraddittorie. Le strategie di adattamento possono essere classificate in più ambiti operativi che, nelle pratiche attuali, si sovrappongono e si integrano quali:

### - Infrastrutture resilienti e sistemi di allerta.

Interventi fisici come argini, bacini di laminazione, sistemi di drenaggio urbano adeguati, e l'adeguamento degli edifici per resistere a ondate di calore, inondazioni o eventi estremi restano misure fondamentali. Tuttavia, la loro efficacia dipende da scenari climatici aggiornati, manutenzione costante e governance plurale: infrastrutture costruite secondo standard obsoleti rischiano di risultare insufficienti già nel medio termine. Parallelamente, i sistemi di allerta precoce si rivelano strumenti essenziali per ridurre perdite di vite e danni materiali, ma secondo la WMO tali sistemi mancano ancora per circa un terzo della popolazione mondiale (WMO, 2024). Questo deficit di capacità tecnica e organizzativa sottolinea come l'adattamento non sia solo tecnologia, ma anche distribuzione di competenze e investimenti rendendo necessaria una maggiore educazione per sensibilizzare l'opinione pubblica sulle condizioni meteorologiche estreme e sui rischi naturali correlati (Wang et al., 2023). L'efficacia delle misure di adattamento si dipana anche attraverso capacità di risposta, perciò la dimensione sociale è cruciale: la stessa esposizione a rischio è mediata da disuguaglianze economiche e politiche; le comunità più fragili hanno meno risorse per adattarsi e pagano il prezzo maggiore degli impatti climatici. È quindi necessario finanziare e progettare interventi con un esplicito criterio di equità.

### - Gestione integrata delle risorse idriche e protezione delle coste.

La variabilità idrologica richiede una gestione che integri infrastrutture e soluzioni naturali. L'innalzamento del livello del mare può avere gravi impatti come inondazioni, erosione, intrusione di acqua salata, perdita di habitat, danni alle infrastrutture, spostamenti e maggiore vulnerabilità alle tempeste, perciò, si rendono necessarie soluzioni in grado di adattarsi alle condizioni mutevoli. Nei contesti costieri, l'innalzamento del livello marino impone scelte tra l'ingegneria "rigida" (argini, barriere, dighe in cemento...) o l'ingegneria "morbida" (soluzioni basate sulla natura, litorali viventi e ripascimento delle spiagge) (Wang et al., 2023). Studi mostrano che soluzioni basate sulla natura possono raggiungere livelli di protezione comparabili alle strutture rigide, offrendo al contempo benefici collaterali (habitat, sequestro di carbonio, funzione ricreativa). Tuttavia, tali interventi richiedono finanziamenti, tempi

di implementazione e governance locale adeguata; la loro efficacia è inoltre condizionata da pressioni antropiche e da limiti fisici locali (salinità, disponibilità di sedimenti). Sono, inoltre, necessarie pratiche per fronteggiare siccità e scarsità idrica.

#### **-Gestione basata sugli ecosistemi (EbM) e soluzioni naturali.**

L'EbM propone di sfruttare e gestire funzioni ecosistemiche per ridurre i rischi climatici. Ciò include la conservazione e il ripristino forestale, la gestione sostenibile delle acque dolci, la riduzione dei nutrienti verso i bacini lacustri, e le pratiche che aumentano la resilienza degli habitat. Queste misure generano co-benefici evidenti (biodiversità, servizi ecosistemici, sequestro del carbonio), ma presentano limiti. Inoltre, alcune aree potrebbero aver già superato soglie di resilienza tali da rendere inefficace l'EbM se non affiancata da interventi più radicali o da misure di sicurezza sociale. Per questo l'EbM va intesa come parte di un insieme integrato, non come soluzione esclusiva.

#### **-Agricoltura "climate-smart", sequestro del carbonio nel suolo e pratiche rigenerative.**

Nel settore agricolo l'adattamento è indissolubilmente connesso alla mitigazione: pratiche che aumentano il contenuto di carbonio nel suolo (biochar, colture di copertura, non lavorazione) migliorano la ritenzione idrica e la resilienza delle colture, contribuendo al contempo al sequestro di CO<sub>2</sub>. Allo stesso tempo, tecniche per ridurre le emissioni di N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> (ottimizzazione dei fertilizzanti, gestione delle risaie, miglioramento zootecnico) devono essere adottate in modo contestualizzato, perché i risultati dipendono fortemente dalle condizioni pedoclimatiche e dalle capacità locali. Importante è riconoscere i vincoli socioeconomici: accesso a tecnologie, formazione, incentivi economici e mercati per pratiche a basso impatto determinano l'adozione su larga scala. L'educazione ambientale e al carbonio, così come gli incentivi pubblici e privati, sono modi per sensibilizzare produttori e consumatori inconsapevoli ed incentivare gli agricoltori a adottare pratiche climate-smart volte ad accumulare carbonio nel suolo.

#### **-Pianificazione urbana e gestione del suolo.**

Le città devono ripensare forma e funzione per ridurre vulnerabilità: aumento delle superfici permeabili, infrastrutture verdi, reti di ventilazione naturale, frazionamento delle reti idriche e piani di riqualificazione energetica degli edifici sono misure che contribuiscono tanto all'adattamento quanto alla mitigazione. Il suolo urbano, spesso trascurato, è una risorsa strategica: alimenta infrastrutture verdi, supporta agricoltura urbana e attenua gli impatti di precipitazioni intense.

L'adozione di pratiche di agricoltura conservativa e di sistemi di irrigazione a goccia rappresenta una strategia efficace per migliorare la qualità del suolo e ottimizzare la gestione delle risorse idriche. L'agricoltura conservativa si basa su principi come la minima lavorazione del terreno, la rotazione delle colture e l'impiego di colture di copertura, elementi che favoriscono la

rigenerazione del suolo, ne riducono l'erosione e ne aumentano la capacità di trattenere acqua. Tali pratiche contribuiscono anche a mitigare gli effetti di eventi meteorologici estremi, come precipitazioni intense o periodi di siccità prolungata. Parallelamente, l'irrigazione a goccia consente un utilizzo più efficiente dell'acqua, poiché la distribuisce direttamente alle radici delle piante in modo graduale e controllato, limitando le perdite per evaporazione e deflusso. Questo approccio garantisce un apporto idrico più preciso e regolare, migliorando le rese produttive e riducendo il rischio di stress idrico durante le fasi critiche di crescita.

#### **-Finanziamento e scala d'azione.**

Come sottolinea l'IPCC (2022), gli effetti del cambiamento climatico colpiscono in modo diseguale i diversi territori, aggravando disuguaglianze sociali e rendendo più vulnerabili le comunità già fragili. Da qui emerge la necessità di un forte sostegno finanziario internazionale: i flussi medi per il clima hanno raggiunto 1,3 trilioni di dollari nel 2021/22, ma secondo la WMO (2024) dovrebbero crescere di oltre sei volte entro il 2030 per risultare adeguati.

L'immagine di seguito (Figura 22) riassume alcune delle strategie di adattamento sopra introdotte:



Figura 22. "Adaptation Strategies" Fonte: EA Corporate Headquarters <https://eaest.com/insight/climate-change-adaptation-vs-mitigation/>

In questa prospettiva è evidente come la transizione ecologica non sia soltanto un obiettivo politico globale, ma anche una sfida progettuale e sociale che richiede un cambiamento sistematico pronto a coinvolgere governance, economia e società. Proprio in questo contesto, la progettazione architettonica assume un ruolo centrale nella strategia di adattamento. La sfida per gli architetti di oggi e del domani consiste nel concepire un'**architettura resiliente**, capace di rispondere e adattarsi agli effetti del cambiamento climatico, proteggendo le comunità e preservando le funzioni essenziali degli edifici e degli spazi urbani.

L'IPCC (2018) definisce la resilienza come "la capacità dei sistemi sociali, economici e ambientali di far fronte a eventi, tendenze o disturbi pericolosi, rispondendo o riorganizzandosi in modi che mantengano la loro funzione, identità e struttura essenziali, preservando al contempo la capacità di adattamento, apprendimento e trasformazione".

IPCC, 2018: Annex I: Glossary [Matthews, J.B.R. (ed.)]. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 541-562, doi:10.1017/9781009157940.008 (consultato il 20/08/2025)

Un'architettura resiliente assume quindi un ruolo centrale nel ridurre la vulnerabilità dei sistemi insediativi e nel garantire condizioni di sicurezza e benessere per le comunità (cfr. capitolo 3.1). In questa prospettiva, quattro azioni ad alto potenziale per la costruzione di una resilienza sistematica possono essere individuate come linee strategiche di intervento: (Figura 23)

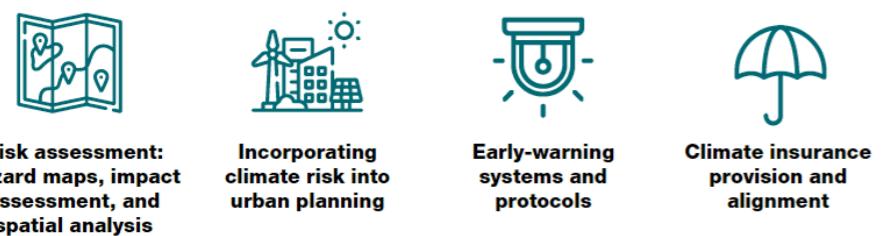


Figura 23. "Four high-potential systemic-resilience actions". Fonte: C40 Cities [https://www.c40knowledgehub.org/s/article/Focused-Adaptation-A-strategic-approach-to-climate-adaptation-in-cities?language=en\\_US](https://www.c40knowledgehub.org/s/article/Focused-Adaptation-A-strategic-approach-to-climate-adaptation-in-cities?language=en_US)

Nello specifico, alcune azioni di adattamento possono essere circoscritte sul contesto territoriale nepalese, tenendo conto dei rischi climatici ed ambientali estremi che caratterizzano il paese (cfr. 1.4). Tali azioni mirano a ridurre i danni derivanti da specifici pericoli naturali e, al contempo, a rafforzare la capacità delle comunità e delle città di ricostruirsi e adattarsi dopo un evento disastroso. Si tratta di interventi ad alto potenziale, capaci di generare benefici sia immediati sia di lungo periodo (Figura 24).

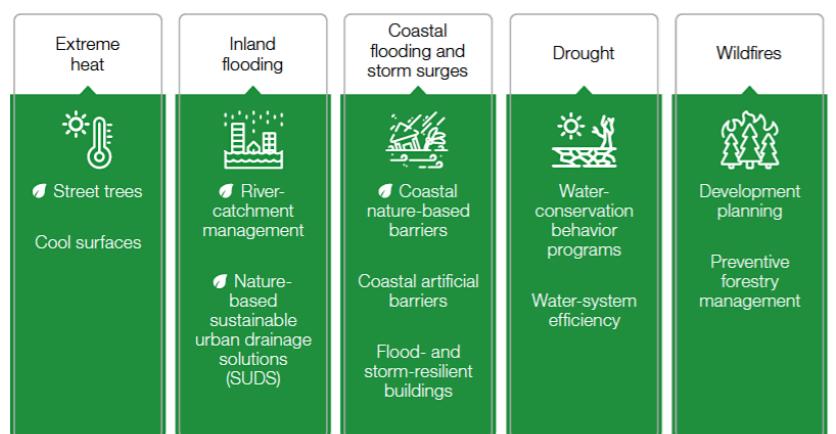


Figura 24. "High-potential actions for each of five hazard types". Fonte: C40 Cities [https://www.c40knowledgehub.org/s/article/Focused-Adaptation-A-strategic-approach-to-climate-adaptation-in-cities?language=en\\_US](https://www.c40knowledgehub.org/s/article/Focused-Adaptation-A-strategic-approach-to-climate-adaptation-in-cities?language=en_US)

Per quanto riguarda la riduzione del calore estremo, una delle strategie più efficaci consiste nella piantumazione di alberi e specie vegetali autoctone lungo le strade. La presenza di alberature urbane contribuisce ad abbassare la temperatura dell'aria e delle superfici grazie all'ombreggiamento e all'evapotraspirazione. Rispetto ai grandi parchi gli alberi stradali rappresentano una soluzione più accessibile e scalabile, particolarmente adatta ai contesti urbani densi e con limitata disponibilità di suolo.

Un'ulteriore misura di mitigazione riguarda l'applicazione di trattamenti superficiali rinfrescanti. I cosiddetti "cool roofs" (tetti freschi) riducono la conduzione del calore all'interno degli edifici e limitano la quantità di calore rilasciato nell'atmosfera. Analogamente, l'uso di pavimentazioni riflettenti o vernici chiare su superfici esterne come tetti, muri e strade, attenua l'effetto "isola di calore urbana" migliorando il comfort termico.

Altre azioni prioritarie sono invece orientate alla riduzione del rischio e della gravità degli incendi boschivi, un fenomeno che in Nepal tende a intensificarsi durante i periodi di siccità prolungata. In questo ambito, la pianificazione dello sviluppo urbano riveste un ruolo centrale: limitare la costruzione di insediamenti in aree ad alto rischio di incendio e introdurre normative edilizie che prevedano l'uso di materiali resistenti al fuoco contribuisce a ridurre significativamente l'esposizione al rischio.

Parallelamente, la gestione forestale preventiva si configura come una misura di adattamento indispensabile. Interventi come la creazione di barriere antincendio, aree disboscate strategicamente o infrastrutture lineari come strade forestali, possono contenere la propagazione delle fiamme. In aggiunta, l'uso di incendi controllati effettuati in modo pianificato e sicuro, consente di eliminare parte del materiale organico accumulato (foglie secche, rami, sottobosco), riducendo così la quantità di combustibile disponibile per eventuali incendi incontrollati. (C40 Cities, 2021)

#### 1.4. Il caso del Nepal: contesto ambientale e socioculturale

Uno dei paesi che più sta riscontrando in modo diretto e diffuso gli effetti della crisi climatica è il Nepal, proprio a causa della sua topografia e delle sue condizioni climatiche.



Figura 25. "Inquadramento territoriale". Dell'autore della tesi

Situato tra l'India e la Cina (Tibet), questo paese privo di sbocco al mare si estende su un territorio caratterizzato da una straordinaria varietà geografica: dalle pianure subtropicali del Terai fino alle catene himalayane con cime oltre gli 8.000 metri.

Tale configurazione morfologica genera una forte diversità climatica, fortemente influenzata dal regime monsonico estivo, e rende il Nepal estremamente vulnerabile a eventi meteorologici e geofisici estremi.

Figura 26. "Nepal, confini e suddivisione in province". Dell'autore della tesi

A seguito della riforma costituzionale del 2015, il Nepal è stato riorganizzato in **sette province federali**, ciascuna con un proprio capoluogo e un sistema amministrativo locale che comprende distretti, municipalità e municipalità rurali (NTB, 2025). Le provincie sono numerate da 1 a 7 (Figura 26):

**1) La Provincia di Koshi** occupa l'estremità orientale del paese e comprende distretti come Morang, Sunsari e Dhankuta. È attraversata dal fiume Koshi, uno dei principali bacini idrografici del Nepal, che ha un ruolo fondamentale sia dal punto di vista ecologico che economico.

**2) La Provincia del Madhesh**, situata nelle pianure meridionali del Terai (Figura 27), si distingue per la sua alta produttività agricola grazie ai terreni alluvionali estremamente fertili. Comprende distretti come, Rautahat, Sarlahi e Malangwa, ed è riconosciuta per l'antica cultura Mithila, che testimonia un patrimonio artistico e linguistico profondamente radicato nella storia del Nepal meridionale.

**3) La Provincia di Bagmati**, collocata nel Nepal centrale, include la Valle di Kathmandu, cuore politico, economico e culturale del Paese. La capitale **Kathmandu**, situata all'interno di questa provincia, rappresenta il centro amministrativo nazionale e rappresenta un nodo strategico per la pianificazione urbana e la gestione sostenibile delle risorse, considerando la forte pressione demografica e i rischi sismici e ambientali a cui è esposta.

**4) La Provincia di Gandaki** prende il nome dal fiume Gandaki e si caratterizza per la sua ricchezza paesaggistica e naturale. Comprende aree di grande valore ambientale come Pokhara, Mustang e Manang, nonché alcune delle catene montuose più importanti dell'Himalaya, tra cui Annapurna e Dhaulagiri.

**5) La Provincia di Lumbini**, situata nel Nepal centro-meridionale, è celebre per essere il luogo di nascita del Buddha e riveste quindi un'importanza religiosa e storica di rilievo mondiale. Comprende distretti come Rupandehi, Kapilvastu e Nawalparasi, Siddharthanagar e rappresenta un punto di incontro tra spiritualità, cultura e sviluppo economico legato al turismo.

**6) La Provincia di Karnali** si estende in una vasta area montuosa e remota, includendo distretti come Jumla, Humla, Birendranagara e Dolpa. È la provincia meno densamente popolata del paese, caratterizzata da un territorio accidentato e da una limitata accessibilità, elementi che ne influenzano fortemente le condizioni socio-economiche.

**7) La Provincia di Sudurpashchim**, situata nell'estremo ovest del Nepal, comprende distretti come Kailali, Kanchanpur, Dhangarhi e Bajhang. Regione culturalmente eterogenea, abitata da gruppi etnici con tradizioni e pratiche agricole diversificate. La sua posizione geografica e la relativa marginalità rispetto ai centri urbani principali la rendono una delle aree più vulnerabili.

Il Nepal presenta una notevole varietà di condizioni climatiche, risultato diretto della complessa morfologia del territorio e delle forti escursioni altimetriche che si estendono dai 60 m s.l.m. della pianura del Terai fino agli 8.848 m del Monte Everest. Questa configurazione orografica determina una netta suddivisione in tre principali fasce climatiche e geografiche (Figura 27): I Terai (pianura subtropicale), la regione collinare e la regione montana e himalayana, all'interno delle quali si sviluppano microclimi locali fortemente influenzati dal regime monsonico (World Bank, 2023; USAID, 2017).

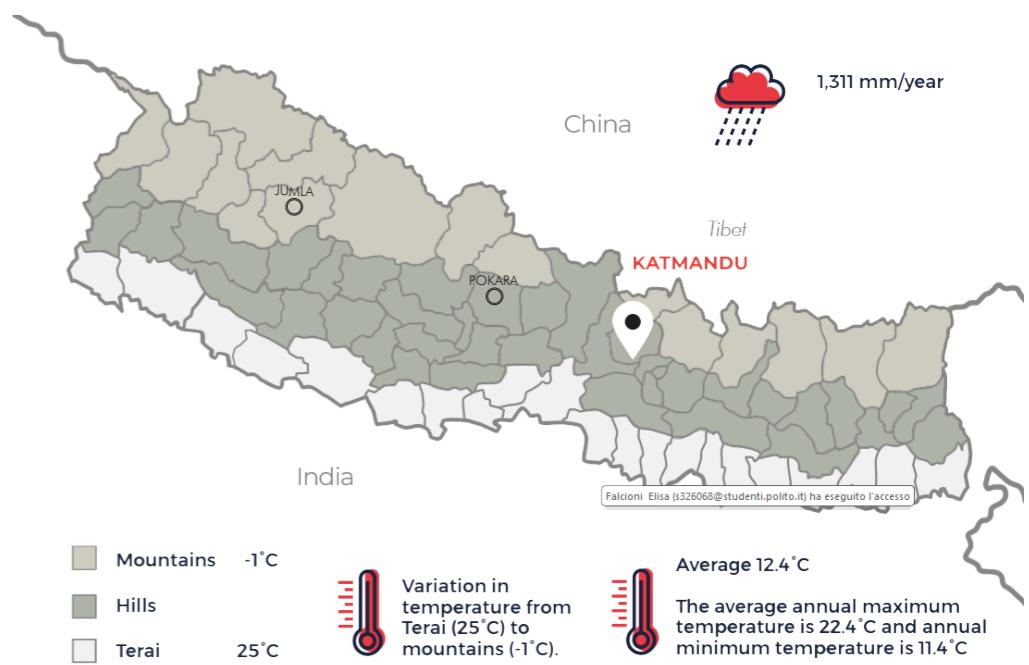


Figura 27. "Map of Nepal's morphology". Fonte: Climate Centre [https://www.climatecentre.org/wp-content/uploads/Climate-change-impacts-on-health-and-livelihoods-NEPAL-assessment\\_April-2021.pdf](https://www.climatecentre.org/wp-content/uploads/Climate-change-impacts-on-health-and-livelihoods-NEPAL-assessment_April-2021.pdf)

Nello specifico:

#### **Regione del Terai (fino a ~300 m s.l.m.)**

Il Terai costituisce la fascia meridionale pianeggiante del Nepal e presenta un clima tropicale-subtropicale con estati molto calde e inverni miti. Le temperature massime nei mesi di aprile e maggio possono superare i 40 °C, mentre in inverno si attestano mediamente tra 15 °C e 23 °C (World Bank, 2023; Nepal Tourism Board, 2023).

Le precipitazioni annuali variano tra 1.200 e 2.500 mm, concentrate per oltre l'80% nel periodo monsonico (giugno-settembre), con picchi mensili che raggiungono i 450 mm (USAID, 2017).

L'umidità relativa durante la stagione estiva può superare l'80%, generando condizioni di disagio termoigometrico e criticità ambientali, come inondazioni e ristagni idrici (MoFE, 2019).

#### **Regione collinare e montana intermedia (1.000–2.500 m s.l.m.)**

Questa fascia, che include la valle di Kathmandu (Figura 27) e gran parte delle zone abitate centrali, presenta un clima temperato con estati miti e inverni freddi.

Le temperature estive oscillano tra 20 °C e 30 °C, mentre nei mesi invernali possono scendere fino a 2 °C o meno (Nepal Tourism Board, 2023; DHM, 2024). Le precipitazioni annue si attestano tra 1.000 e 2.500 mm, influenzate dall'esposizione orografica e dalla direzione dei venti monsonici (JICA, 2019).

### Regione alpina e himalayana (> 2.500 m s.l.m.)

Le aree settentrionali, prossime alla catena himalayana, sono caratterizzate da un clima alpino e di tundra, con estati fresche e inverni molto rigidi.

Le temperature medie estive variano tra 5 °C e 15 °C, mentre in inverno scendono ben al di sotto dello zero, con estese gelate e forti escursioni termiche diurne (World Bank, 2023).

Le precipitazioni annue si riducono drasticamente, specialmente nei distretti in ombra pluviometrica come il Mustang, dove i valori medi annui non superano i 300 mm, configurando un clima semi-arido (MoFE, 2019).

Il ciclo annuale si articola in quattro stagioni principali (Climate Centre, 2021) (Figura 28):



Figura 28. "Seasonal calendar".

Fonte: ClimateCentre, rielaborazione dell'autore della tesi.

[https://www.climatecentre.org/wp-content/uploads/Climate-change-impacts-on-health-and-livelihoods-NEPAL-assessment\\_April-2021.pdf](https://www.climatecentre.org/wp-content/uploads/Climate-change-impacts-on-health-and-livelihoods-NEPAL-assessment_April-2021.pdf)

Di seguito viene riportata la classificazione climatica di **Köppen-Geiger**<sup>9</sup> elaborata dal World Bank Group (Climate Knowledge Portal, 2023), che consente di comprendere la distribuzione dei diversi tipi di clima sul territorio nepalese.

Questa classificazione (Figura 29) evidenzia come, nonostante le dimensioni relativamente ridotte del Paese, il Nepal presenti una notevole varietà di condizioni climatiche, direttamente influenzate dall'altitudine e dalla conformazione orografica.

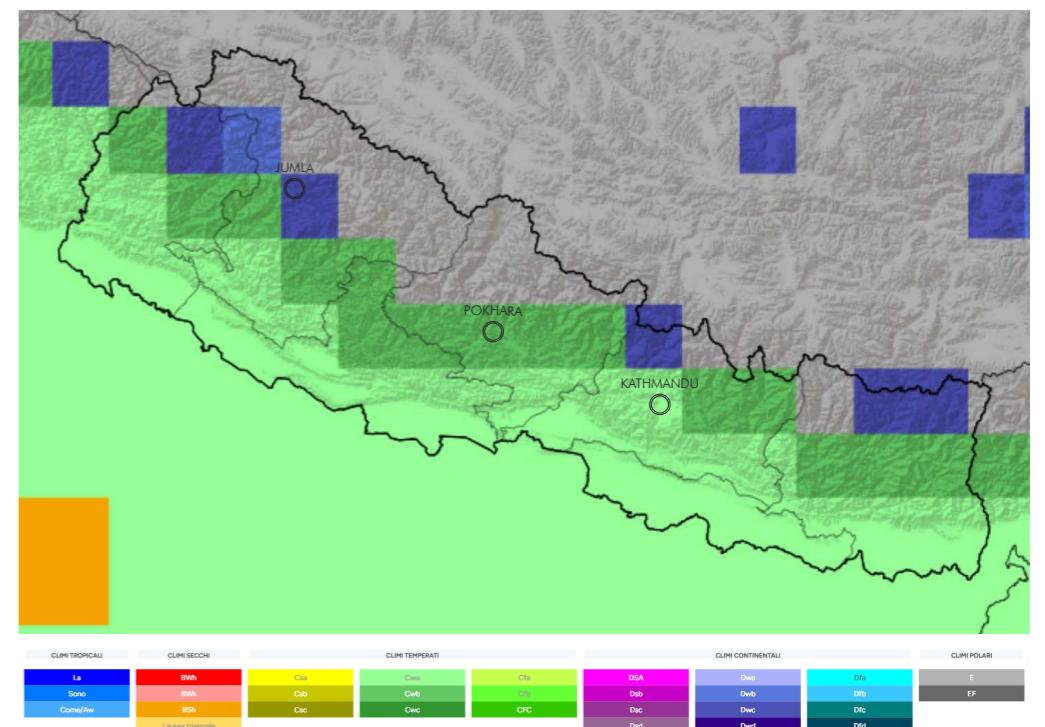


Figura 29. "Classificazione climatica di Köppen-Geiger". Fonte: World Bank Group <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/nepal>

Per approfondire la comprensione di questa diversificazione climatica, sono state analizzate nel dettaglio tre città rappresentative delle principali fasce altimetriche e dei relativi tipi climatici del Nepal, utilizzando i dati forniti dal portale "CBE Climate Tool"<sup>10</sup> dell'Università di Berkeley.

Le città selezionate (Figura 29) riflettono in modo significativo la relazione tra morfologia del territorio e condizioni climatiche: Kathmandu è stata considerata come riferimento per il clima Cwa (subtropicale umido con inverni secchi), Pokhara per il clima Cwb (temperato umido con estati moderate), e Jumla per il clima Dwc (continentale freddo con inverni secchi).

<sup>9</sup> Il sistema di classificazione climatica di Köppen-Geiger è ampiamente utilizzato come metodo semplice ma efficace per classificare i climi del mondo in base alle condizioni di temperatura e precipitazioni.

<sup>10</sup> CBE Climate Tool è un'applicazione web progettata per supportare l'analisi climatica, specificamente progettata per rispondere alle esigenze di architetti e ingegneri interessati alla progettazione adattata al clima. Consente agli utenti di analizzare i dati climatici di oltre 27.500 località in tutto il mondo, sia da **Energy Plus** che da **Climate.One.Building.org**

## POKHARA

Longitudine: 83.981

Latitudine: 28.201

Altitudine sul livello del mare: 826,6 m

Zona climatica di Köppen-Geiger: **Cwb**.

**Clima tropicale temperato** di montagna con inverni secchi.

Temperatura media annua: 17,0 °C

Temperatura annuale più calda (99%): 26,9 °C

Temperatura annuale più fredda (1%): 2,0 °C

Radiazione solare orizzontale cumulativa annua: 1633,03 kWh/m<sup>2</sup>

Percentuale di radiazione solare orizzontale diffusa: 32,8%

POKHARA	MESE	MEDIA (°C)	TEMPERATURA STANDARD (°C)	MINIMO (°C)	1% (°C)	99% (°C)	MASSIMA (°C)
	Jan	8.87	3.76	-0.6	0.94	16.2	17.2
Feb	10.63	4.76	-0.9	-0.6	18.32	19.3	
Mar	14.02	5.18	2.2	3.23	23.16	27.1	
Apr	17.73	5.21	6.4	7.3	26.48	27	
May	19.77	3.69	9.1	11.59	26.41	27.6	
Jun	22.1	2.26	14.2	16.46	26.48	27	
Jul	22.65	1.9	18.4	19.74	27.9	30.2	
Aug	22.59	2.34	17	18.64	29.1	<b>30.5</b>	
Sep	21.84	2.3	14.4	16.5	27.28	29.3	
Oct	18.4	3.38	7.4	9.64	24.56	25.5	
Nov	14.41	3.64	5.2	5.84	20.74	21.5	
Dec	10.27	4.23	<b>-1.2</b>	0.44	18.4	19.8	

Figura 30. "Classificazione climatica di Köppen-Geiger"

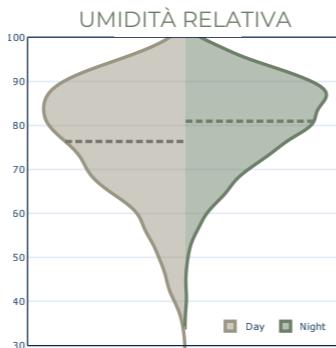


Figura 31. "Profilo climatico: Umidità relativa"

**Figura 30-31**, Fonte: Betti, G., Tartarini, F., Nguyen, C., Schiavon, S. CBE Clima Tool: A free and open-source web application for climate analysis tailored to sustainable building design. Build. Simul. (2023). <https://doi.org/10.1007/s12273-023-1090-5>, Rielaborazione dell'autore della tesi.

## JUMLA

Longitudine: 82.167

Latitudine: 29.283

Altitudine sul livello del mare: 2300,0 m

Zona climatica Köppen-Geiger: **Dwc**.

**Subartico**, inverno secco, estate fresca.

Temperatura media annua: 5,0 °C

Temperatura annuale più calda (99%): 17,5 °C

Temperatura annuale più fredda (1%): -15,2 °C

Radiazione solare orizzontale cumulativa annua: 1867,62 kWh/m<sup>2</sup>

Percentuale di radiazione solare orizzontale diffusa: 31,6 %

JUMLA	MESE	MEDIA (°C)	TEMPERATURA STANDARD (°C)	MINIMO (°C)	1% (°C)	99% (°C)	MASSIMA (°C)
	Jan	-5.75	6.13	<b>-22.3</b>	-21.36	5.71	7.4
Feb	-3.87	4.9	-16.2	-15.9	4.43	5	
Mar	-0.21	5.6	-13.4	-11.56	11.66	14.1	
Apr	3.75	4.91	-10	-7.26	14.46	15.9	
May	8.19	4.48	-4.3	-2.06	16.37	18.9	
Jun	11.37	3.22	0.7	3.21	17	18.3	
Jul	13.39	2.38	9	9.4	19.6	<b>22.6</b>	
Aug	13.33	2.27	8.3	9.53	18.16	19.2	
Sep	11.64	3.14	3.2	5.7	18.1	19	
Oct	6.62	4.15	-2.4	-1.9	15.86	16.9	
Nov	2.39	4.98	-8.5	-6.9	11.68	13.4	
Dec	-1.65	6.33	-16.3	-15.26	14.63	16.6	

Figura 32. "Classificazione climatica di Köppen-Geiger"

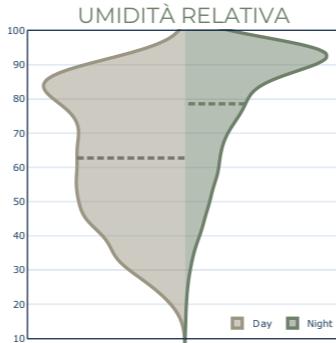


Figura 33. "Profilo climatico: Umidità relativa"

**Figura 32-33**, Fonte: Betti, G., Tartarini, F., Nguyen, C., Schiavon, S. CBE Clima Tool: A free and open-source web application for climate analysis tailored to sustainable building design. Build. Simul. (2023). <https://doi.org/10.1007/s12273-023-1090-5>, Rielaborazione dell'autore della tesi.

## KATHMANDU

Longitudine: 85.359

Latitudine: 27.697

Altitudine sul livello del mare: 1338,1 m

Zona climatica di Köppen-Geiger: **Cwa**.

**Subtropicale umido**, inverno secco.

Temperatura media annua: 17,8 °C

Temperatura annuale più calda (99%): 29,2 °C

Temperatura annuale più fredda (1%): 4,0 °C

Radiazione solare orizzontale cumulativa annua: 1674,9 kWh/m<sup>2</sup>

Percentuale di radiazione solare orizzontale diffusa: 33,0 %

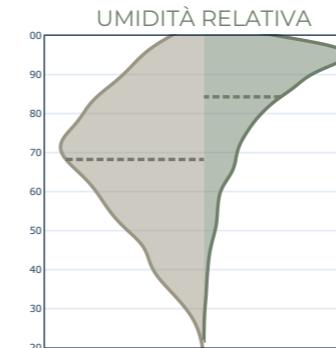


Figura 35. "Profilo climatico: Umidità relativa"

KATHMANDU	MESE	MEDIA (°C)	TEMPERATURA STANDARD (°C)	MINIMO (°C)	1% (°C)	99% (°C)	MASSIMA (°C)
	Jan	9.52	4.04	<b>1.4</b>	2.59	18.6	19.8
Feb	11.97	4.45	2.4	3.71	21.36	23	
Mar	16.18	5.25	5	5.9	26	27	
Apr	19.34	5.83	7.6	9.02	31.16	32	
May	21.23	4.06	11.6	13.19	28.4	30.4	
Jun	22.94	3.41	12.8	15.04	30	<b>32.2</b>	
Jul	22.99	2.37	19.1	19.5	29.06	30	
Aug	22.92	2.47	18.5	19.3	28.6	30.4	
Sep	22.02	2.7	15.6	17.26	28.1	29	
Oct	18.59	3.95	9.2	10.29	26.7	28.1	
Nov	14.44	4.41	6.6	6.92	24.87	27	
Dec	10.77	4.37	2	3	20.29	22	

Figura 34. "Classificazione climatica di Köppen-Geiger"

"Disaster is matter of 'when' rather than 'if' in Nepal"

UNICEFF, <https://www.unicef.org/nepal/emergency>

Il Nepal è esposto a una molteplicità di **rischi naturali**: terremoti, frane, alluvioni, incendi, fulmini sono le principali cause di eventi calamitosi che in passato hanno causato ingenti danni, indebolendo il fragile ecosistema del paese. Proiezioni recenti stimano un aumento termico compreso tra 1,2 °C e 4,2 °C entro il 2080 nello scenario ad alte emissioni, con un'intensificazione delle precipitazioni monsoniche fino a tre volte superiori ai livelli attuali. (Banca Mondiale 2020).

Analizzando i principali disastri naturali vi sono:

### Rischio Frane:

Il rischio di frana rappresenta una delle principali minacce naturali nelle regioni collinari del Nepal, con effetti significativi su popolazione, infrastrutture e ambiente costruito. Si tratta di movimenti di masse di terra, rocce o detriti lungo i pendii, innescati dalla gravità e spesso accentuati da condizioni meteorologiche estreme o attività sismiche. In molti casi assumono la forma di colate detritiche, miscele fluide di terreno e materiale roccioso, che si muovono rapidamente lungo i versanti.

Le cause principali sono di natura sia naturale sia antropica. Oltre alle intense precipitazioni monsoniche e ai terremoti, concorrono fattori come la deforestazione, l'urbanizzazione non pianificata, l'uso improprio del suolo e la costruzione di infrastrutture prive di adeguati sistemi di drenaggio e

contenimento. Questi interventi alterano l'equilibrio idrogeologico, rendendo i pendii più instabili e vulnerabili ai fenomeni erosivi.

Le colline centrali (Middle Hills) sono le aree maggiormente interessate, a causa di pendenze accentuate, geologia fragile e forte pressione antropica. La combinazione di precipitazioni intense, suoli instabili e attività umane accentua la frequenza e la gravità degli eventi, richiedendo strategie di mitigazione basate su una gestione integrata del territorio, in grado di coniugare conoscenze scientifiche e pianificazione sostenibile (Gestione del rischio di catastrofi: Politiche e pratiche in Nepal).

Il Nepal è considerato uno dei paesi più esposti al rischio di frane a livello globale (Dilley et al., 2005; Petley et al., 2007). Secondo Froude e Petley (2018), oltre il 10% delle frane mortali dovute alle piogge nel mondo si verifica nel paese, che ospita meno dello 0,4% della popolazione globale. La frequenza degli eventi segue un andamento stagionale legato al monsone (giugno-settembre), quando l'accumulo di acqua nei suoli riduce la loro stabilità (Petley, 2012).

La suscettibilità territoriale è fortemente variabile. Kincey et al. (2024) evidenziano una maggiore probabilità di frane nelle aree montane oltre i 3.000 m di quota, mentre nelle pianure del Terai, caratterizzate da pendenze ridotte, il rischio risulta trascurabile. Le Colline Medie, che occupano gran parte del Paese, presentano invece valori medio-alti di suscettibilità, dovuti alla combinazione di rilievi instabili e alta densità abitativa (Figura 36).

Secondo i dati del portale BIPAD, tra il 2011 e il 2020 sono state registrate 2.120 frane, l'81% delle quali dopo il terremoto di Gorkha del 2015. Gli eventi hanno provocato 1.205 vittime, 996 feriti, la perdita di circa 3.000 capi di bestiame e la distruzione di oltre 2.700 edifici, per un danno economico complessivo stimato in circa 14,3 milioni di dollari. Le frane si concentrano soprattutto nelle regioni collinari centrali, con alcuni "cluster" nelle aree montane centro-settentrionali e nord-orientali.

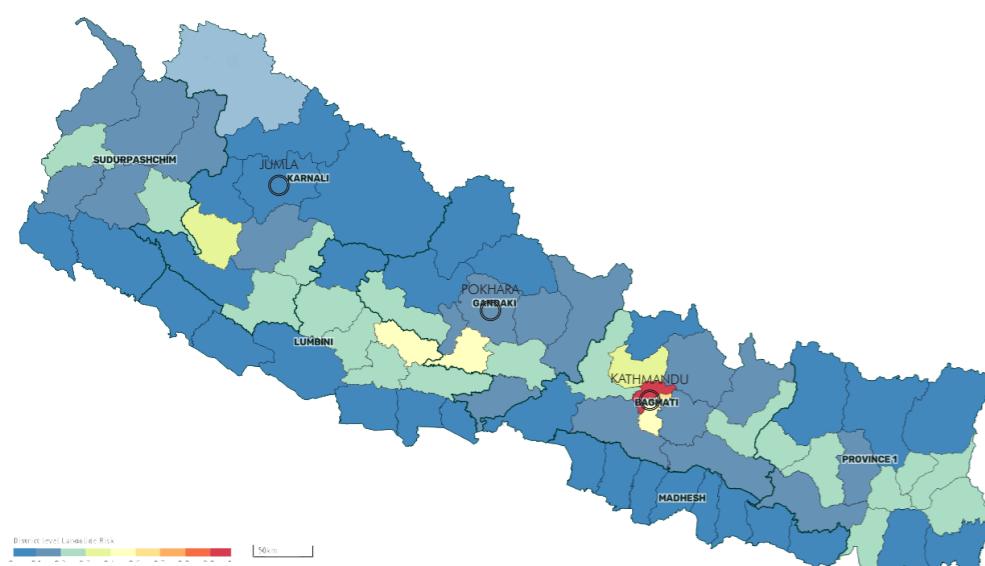


Figura 36. "District Landslide Risk". Fonte: Bipad Portal Nepal  
<https://bipadportal.gov.np/risk-info/#/risk>

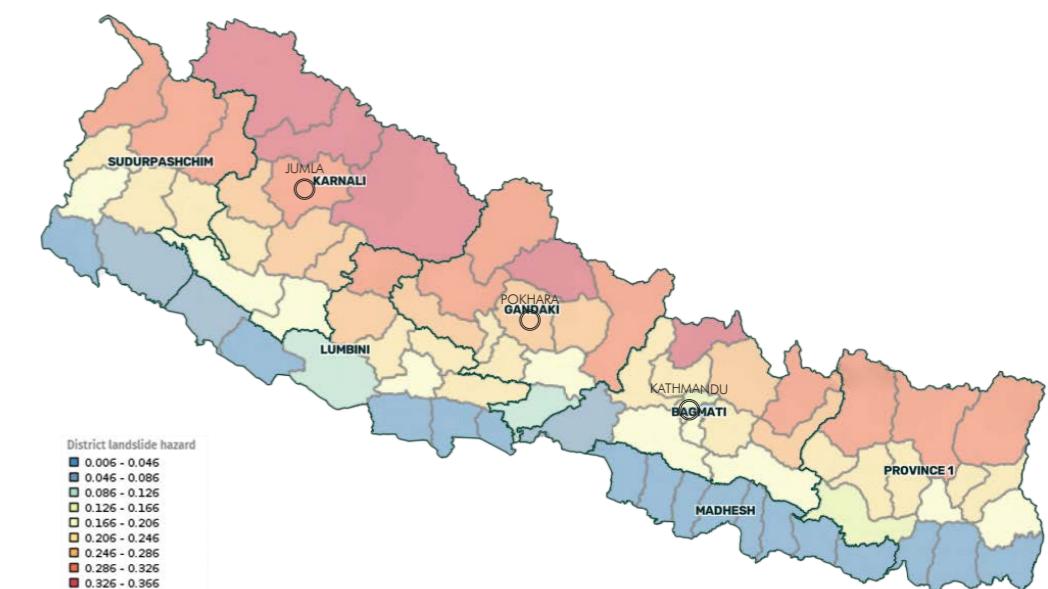


Figura 37. "District Landslide Hazard". Fonte: Bipad Portal Nepal  
<https://bipadportal.gov.np/risk-info/#/risk>

Solo una piccola parte dei distretti registra un numero elevato di eventi (oltre 20), ma questi comprendono aree ad alta estensione territoriale e vulnerabilità.

Tale distribuzione conferma il ruolo determinante della morfologia e dell'uso del suolo nella definizione del rischio locale (Kincey et al., 2024).

Le mappe di "District Landslide Risk" (Figura 36) e "Landslide Hazard" (Figura 37) tratte dal portale BIPAD rispondono a due livelli di analisi differenti ma complementari.

La mappa di hazard descrive la pericolosità, ovvero il potenziale verificarsi di un evento fisico, naturale o indotto dall'uomo, che può causare danni a persone, infrastrutture, mezzi di sussistenza ed ecosistemi. In questo caso vengono individuate le aree con maggiore probabilità di frana sulla base delle condizioni geomorfologiche e climatiche.

La mappa di risk, invece, approfondisce il rischio, cioè il potenziale impatto negativo che si genera quando un sistema di valore (popolazione, edifici, reti, risorse economiche e ambientali) è esposto a un pericolo (cfr. capitolo 1.2).

Il rischio emerge dall'interazione tra tre elementi: pericolosità, vulnerabilità ed esposizione. Tale distinzione è cruciale in quanto consente di individuare non solo dove è probabile che avvenga una frana, ma anche dove i suoi effetti potrebbero risultare più devastanti per le comunità locali.

### Rischio Inondazioni:

Il rischio di inondazioni in Nepal rappresenta una delle minacce ambientali più significative per la sicurezza delle comunità e per lo sviluppo sostenibile del paese (Figura 38). Gli eventi alluvionali si verificano con regolarità, soprattutto durante la stagione monsonica (giugno-settembre), quando le intense piogge determinano l'ingrossamento dei principali corsi d'acqua.

Il Nepal è infatti attraversato da una fitta rete idrografica composta da numerosi fiumi e ruscelli, molti dei quali perenni e alimentati dallo

scioglimento dei ghiacciai himalayani. Questa conformazione morfologica rende il territorio particolarmente vulnerabile: durante i monsoni, l'aumento della portata fluviale causa frequentemente esondazioni che danneggiano infrastrutture, terreni agricoli e insediamenti umani, con gravi ripercussioni socioeconomiche (Ministry of Home Affairs, 2024).

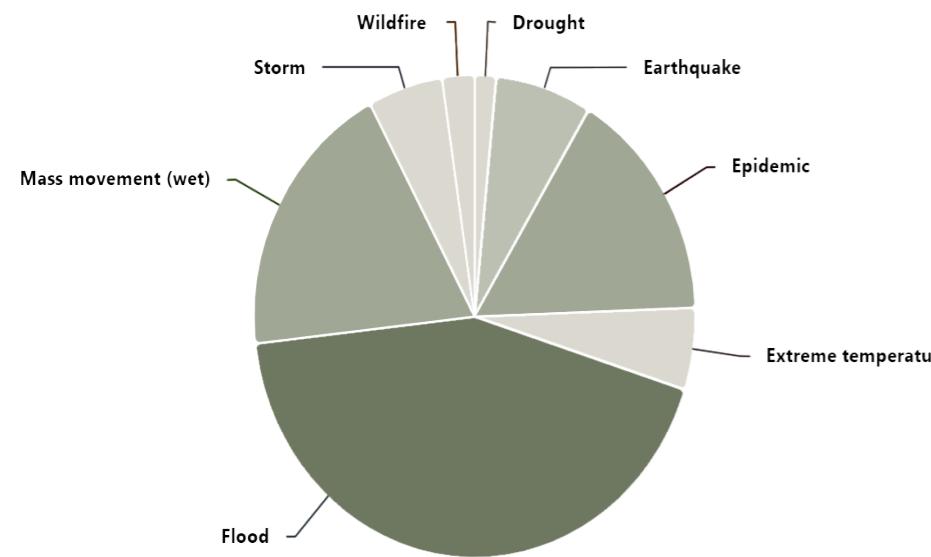


Figura 38. "Total Natural Disasters in Nepal 1980-2024".

Fonte: The International Disaster Database (EM-DAT data).

A livello territoriale, la presenza di una grande varietà di bacini fluviali, visibile nella mappa idrografica nazionale (Figura 39), contribuisce a spiegare l'estensione e la distribuzione del rischio di inondazione. I principali fiumi (come il Koshi, il Gandaki e il Karnali) attraversano trasversalmente il paese, collegando le regioni montane con la pianura del Tarai, dove il deflusso delle acque tende a rallentare, aumentando la probabilità di allagamenti. Le aree più esposte si trovano proprio lungo questi corridoi fluviali, dove lo sviluppo urbano e agricolo ha spesso occupato le pianure alluvionali naturali, riducendo la capacità del suolo di drenare l'acqua e amplificando gli impatti delle piene stagionali.

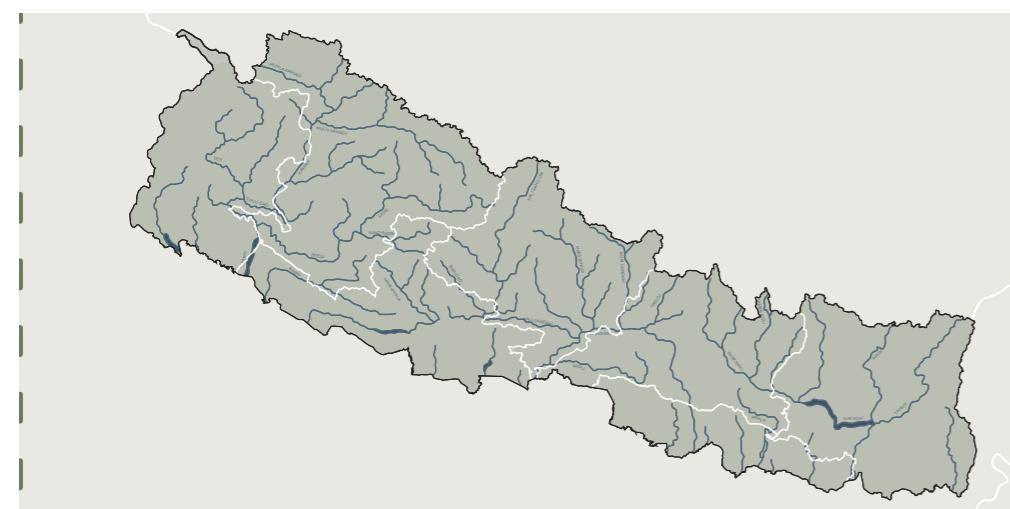


Figura 39. "Mappa dei fiumi principali in Nepal".

Fonte: Nepal Geographic Map, rielaborazione dell'autore della tesi

Le precipitazioni giocano un ruolo chiave in questo quadro. Negli ultimi decenni, la variabilità e l'intensità delle piogge sono aumentate in modo significativo, con eventi estremi sempre più frequenti e concentrati in brevi periodi. Secondo il *Climate Risk Country Profile*: Nepal (World Bank, 2021), le proiezioni climatiche per il medio termine (2016–2045) mostrano un incremento delle precipitazioni fino al +9% nello scenario ad alte emissioni (RCP 8.5) e fino al +5% nello scenario mitigato (RCP 4.5). Queste tendenze suggeriscono un futuro caratterizzato da monsoni più intensi e da un maggior rischio di esondazioni fluviali, soprattutto nelle regioni centrali e occidentali del paese. Il *Nepal Disaster Report* (Ministry of Home Affairs, 2024) conferma che tra il 2018 e il 2024 si sono registrati 927 episodi di inondazione, con oltre 260 vittime, principalmente nelle province di Gandaki, Koshi e Madhesh.

Gli RCP (Representative Concentration Pathways) rappresentano differenti traiettorie di concentrazione dei gas serra nell'atmosfera e vengono utilizzati per simulare i possibili scenari climatici futuri.

Nelle due mappe del portale BIPAD (Disaster Risk Reduction Portal of Nepal), si osservano:

Nel **RCP 4.5**<sup>11</sup>, (Figura 40) variazioni di precipitazione più contenute e localizzate, con valori compresi tra circa -0,3% e +5,6%. Le province centrali e sud-orientali (Bagmati, Madhesh e parte di Province 1) mostrano un leggero aumento, mentre le regioni occidentali (Sudurpashchim e Karnali) evidenziano tendenze neutre o lievi cali.

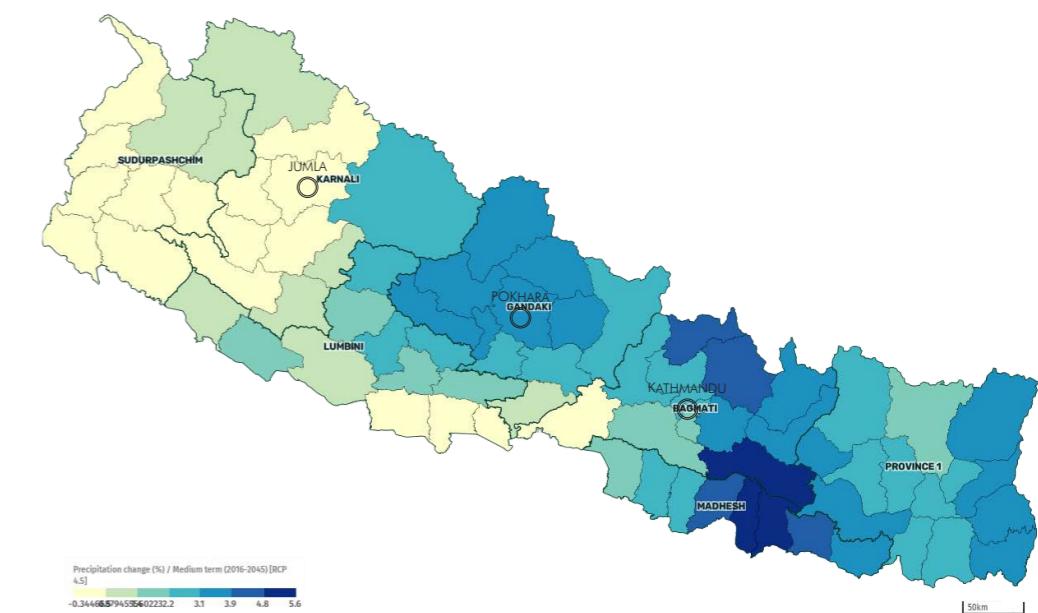


Figura 40. "Climate change / precipitation RCP 4.5, Medium term 2016-2045".

Fonte: Bipad Portal Nepal <https://bipadportal.gov.np/risk-info/#/climate-change>

<sup>11</sup> RCP 4.5 è uno scenario intermedio-mitigato, che presuppone l'adozione di politiche climatiche e tecnologie a basse emissioni. Entro il 2100, il forzante radiativo (ovvero l'aumento dell'energia intrappolata nell'atmosfera) raggiunge 4.5 W/m<sup>2</sup>.

Nel **RCP 8.5**<sup>12</sup>, (Figura 41) si registra un incremento generalizzato e più marcato delle precipitazioni, che varia in media tra +5% e +9%, con le province centrali e occidentali (in particolare Karnali, Gandaki e Lumbini) più esposte a un incremento significativo delle piogge monsoniche.

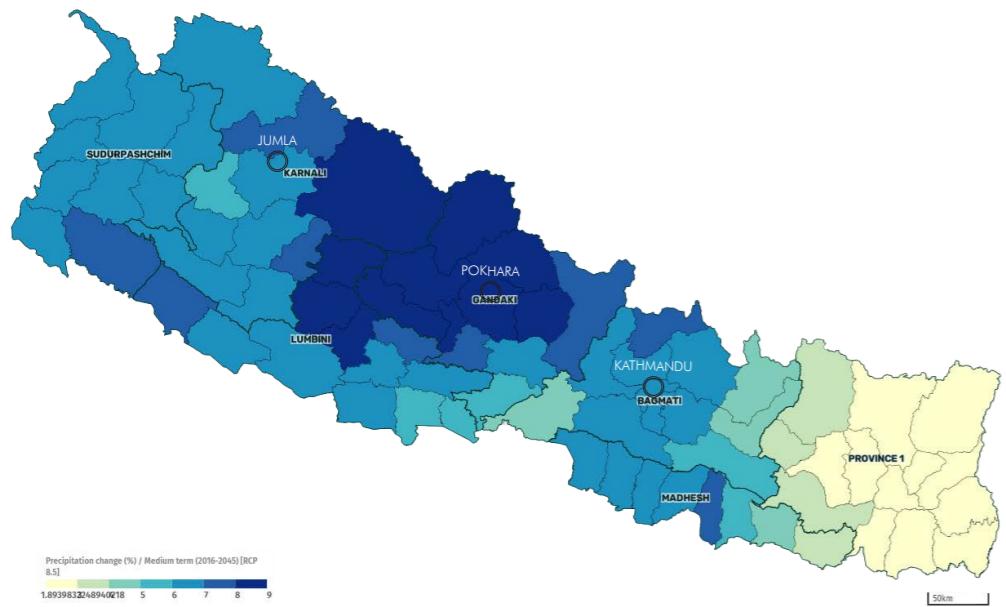


Figura 41. "Climate change / precipitation RCP 8.5, Medium term 2016-2045".

Fonte: Bipad Portal Nepal <https://bipadportal.gov.np/risk-info/#/climate-change>

Le cause delle inondazioni in Nepal sono molteplici e interconnesse. Tra i fattori naturali si annoverano le piogge torrenziali, lo scioglimento accelerato dei ghiacci e la conformazione montuosa del territorio, che favorisce fenomeni di ruscellamento e frane. A questi si aggiungono le attività antropiche: la deforestazione nelle aree a monte, l'urbanizzazione non pianificata, l'occupazione delle pianure alluvionali e la mancanza di sistemi di drenaggio efficienti (Tingsanchali, 2012). Come sottolineano Lamichhane et al. (2025), nella valle di Kathmandu la rapida crescita urbana ha alterato il bilancio idrico, aumentando il deflusso superficiale e riducendo la capacità di ricarica delle falde acquifere. Nel corso degli anni, la valle del Kathmandu ha subito diverse inondazioni significative e devastanti ma le precipitazioni senza precedenti che hanno colpito il Nepal centrale dal 26 al 28 settembre 2024 hanno registrato un record di precipitazioni totali nelle 24 ore in 25 stazioni meteorologiche in tutto il paese ( DHM, 2024 ): oltre 60 ore di piogge intense hanno colpito la valle e le aree circostanti, colpendo 2,59 milioni di persone e provocando danni economici pari a circa l'1% del PIL nazionale (NDDRMA, 2024).

Questi eventi estremi sono strettamente legati alla dinamica monsonica dell'Asia meridionale. Durante la stagione estiva, una fascia di bassa pressione si forma sulle pianure settentrionali dell'India e può spingersi fino alle pendici dell'Himalaya, creando condizioni di forte instabilità atmosferica.

<sup>12</sup> RCP 8.5, invece, rappresenta uno scenario ad alte emissioni, spesso definito "business-as-usual", in cui non vengono adottate misure significative di riduzione delle emissioni. Il forzante radiativo raggiunge 8.5 W/m<sup>2</sup> entro il 2100, con un incremento molto più marcato della temperatura media globale (oltre +4 °C rispetto ai livelli preindustriali).

Nel bacino del Bagmati, ad esempio, la piovosità media annua varia da 1500 mm nella pianura del Tarai a 2500 mm ai piedi del Mahabharat e del Siwalik, con un picco nel mese di luglio, quando il rischio di esondazioni e frane raggiunge il suo massimo.

Le proiezioni future delineano uno scenario preoccupante. Secondo l'AQUEDUCT Global Flood Analyzer del World Resources Institute, nel 2010 si stimava che circa 157.000 persone fossero colpite ogni anno dalle inondazioni fluviali in Nepal, con perdite economiche pari a 218 milioni di dollari. Nello scenario RCP 8.5, entro il 2030, la popolazione esposta annualmente potrebbe crescere fino a 199.000 persone e le perdite economiche a oltre 574 milioni di dollari, più che raddoppiando rispetto al valore di riferimento (World Bank, 2021). Studi successivi (Paltan et al., 2018; Willner et al., 2018) confermano questa tendenza, stimando che eventi un tempo rari, con una frequenza di ritorno di 100 anni, potrebbero verificarsi ogni 25-50 anni, rendendo il rischio idrogeologico una minaccia sempre più concreta.

### Rischio Incendi:

Gli incendi boschivi rappresentano una delle principali cause di disastri naturali in Nepal, verificandosi prevalentemente durante la stagione secca, soprattutto nelle zone di media collina e nella regione del Terai. In quest'ultima, oltre agli incendi di origine naturale, si registrano frequentemente roghi legati ad attività antropiche, come la combustione dei residui agricoli.

Si tratta di un fenomeno di crescente rilevanza a livello globale: la loro frequenza e intensità stanno aumentando a causa dei cambiamenti climatici e delle attività umane, con impatti significativi di tipo ecologico, sociale ed economico (Jones et al., 2024; Luo et al., 2024; Ortiz et al., 2024).

In Nepal gli incendi boschivi assumono una particolare complessità, poiché le differenti regioni fisiografiche, precedentemente illustrate, reagiscono in modo diverso alle variazioni climatiche e alle pressioni antropiche (Chaudhary et al., 2023).

Gli incendi si concentrano principalmente nel periodo pre-monsoonico, da marzo a maggio, quando si combinano alte temperature, bassa umidità e abbondante vegetazione secca (Matin et al., 2017). In questa fase si verifica circa l'89% degli incendi totali del Paese (Bhujel et al., 2022). L'arrivo del monsone estivo, solitamente a giugno, segna la conclusione naturale della stagione degli incendi (Hamal et al., 2022).

Le conseguenze ambientali e sociali sono gravi: gli incendi boschivi compromettono la biodiversità, degradano gli ecosistemi, rilasciano ingenti quantità di emissioni di gas serra e mettono a rischio la salute e i mezzi di sussistenza delle popolazioni locali (Kuikel et al., 2024; Mishra et al., 2023; Pandey et al., 2022). Le cause sono spesso legate a pratiche tradizionali, come il pascolo, la raccolta di legna e la bruciatura dei residui culturali, che, sebbene radicate in contesti socioeconomici di sussistenza, contribuiscono all'aumento del rischio (Kunwar & Khaling, 2006; Matin et al., 2017; Mishra et al., 2023).

Nel contesto del cambiamento climatico, il progressivo aumento delle

temperature e la maggiore frequenza di periodi di siccità rendono prevedibile un ulteriore incremento del rischio di incendi nei prossimi anni (Pokharel et al., 2023). Tuttavia, le politiche di gestione risultano ancora arretrate: la strategia nazionale per la gestione degli incendi boschivi è stata aggiornata l'ultima volta nel 2010, e non risponde adeguatamente alle attuali condizioni ambientali e socioeconomiche (Pandey et al., 2022; Parajuli et al., 2023). La distribuzione del rischio varia notevolmente in base a fattori climatici, vegetazionali e morfologici (Matin et al., 2017; Parajuli et al., 2023). Le regioni del Terai e del Chure, caratterizzate da estese foreste e intensa attività umana, risultano le più vulnerabili (Figura 42), mentre le aree montane pongono sfide logistiche per le operazioni di controllo (Joshi et al., 2023, 2024). Una recente analisi di Joshi et al. (2025) ha evidenziato che le province di Madhesh e Lumbini presentano la maggiore concentrazione di aree a rischio molto elevato, con oltre il 20% del territorio classificato come altamente vulnerabile. Inoltre, la regione fisiografica del Chure risulta la più esposta, con il 38,97% della superficie a rischio molto elevato, rispetto al 13,20% del Terai e al 10,47% dei Monti Medi (Sapkota et al., 2025). L'impiego di strumenti di telerilevamento e analisi spaziale si sta rivelando fondamentale per comprendere e gestire dinamiche degli incendi boschivi (Khagendra et al., 2025). L'integrazione di dati climatici, topografici e vegetazionali con modelli statistici, come i "Modelli Lineari Generalizzati" (GLM), consente di individuare i fattori determinanti e le aree maggiormente a rischio (Ahn et al., 2024; Janizadeh et al., 2023). Parallelamente, il coinvolgimento delle comunità locali emerge come elemento centrale nelle strategie di prevenzione e gestione. I Community Forest User Groups (CFUG), diffusi in gran parte del territorio nepalese, rappresentano spesso il primo livello di intervento in caso di incendio, anche se la loro efficacia varia sensibilmente tra le diverse regioni (Parajuli et al., 2022; Dhungana et al., 2024).

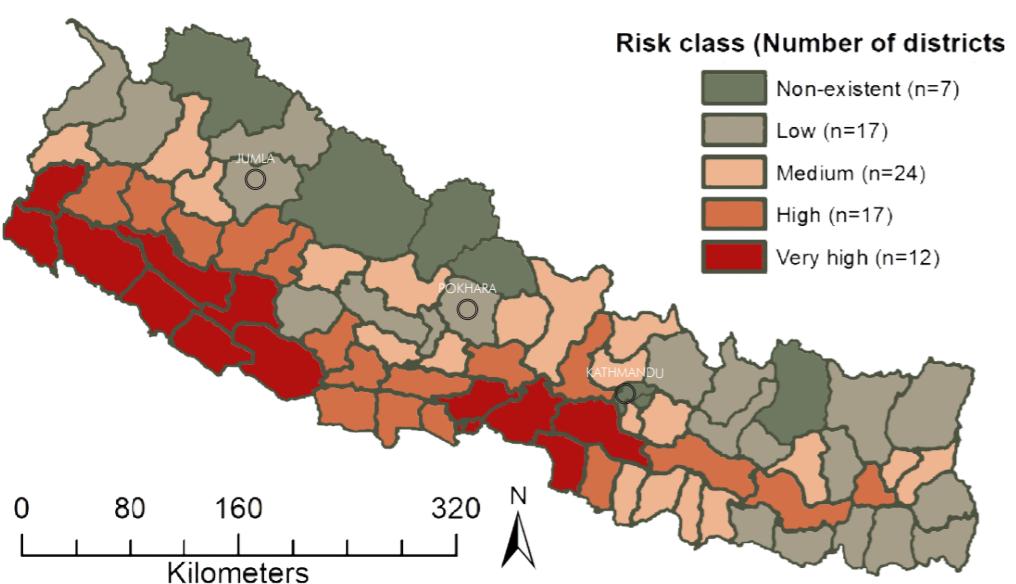


Figura 42. "Overall reclassified wildfire risk map of Nepal". Fonte: Sapkota et al., 2025  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2515-7620/add2db/meta>

### Rischio Siccità:

La siccità rappresenta una delle minacce ambientali più ricorrenti nella pianura del Terai, nelle regioni collinari centrali e nelle aree trans-himalayane. Questo fenomeno è strettamente legato all'irregolarità e alla riduzione delle piogge monsoniche, che costituiscono la principale fonte di approvvigionamento idrico del paese. La scarsità di infrastrutture per l'irrigazione aggrava ulteriormente la situazione, determinando una significativa perdita di produzione agricola e, di conseguenza, un peggioramento delle condizioni di sicurezza alimentare (*Disaster Risk Management: Policies and Practices in Nepal*).

Due principali tipologie di siccità possono colpire il Nepal: quella **meteorologica**, associata a un deficit di precipitazioni, e quella **idrologica**, legata a una riduzione dei flussi delle acque superficiali e sotterranee. In base all'indice standardizzato di precipitazione ed evaporazione (SPEI), il Nepal registra attualmente una probabilità media annua di siccità meteorologica severa pari al 2% secondo il *World Bank Group*, 2021. Si evidenzia, inoltre, un aumento della frequenza di tali eventi tra il 1981 e il 2012, e i modelli climatici prevedono una crescita ulteriore nel corso del XXI secolo, con una probabilità annuale di siccità superiore al 10% entro il 2100, indipendentemente dallo scenario emissivo considerato (*World Bank Group*, 2021). Si annoverano episodi di siccità particolarmente gravi, come quelli del 1972, del 1979 e del 1994, che colpirono duramente il settore agricolo e la sussistenza delle popolazioni rurali, causando perdite estese di raccolti e bestiame, soprattutto nelle regioni collinari occidentali e nel Terai (*Disaster Risk Profile of Nepal*).

Negli ultimi anni, il fenomeno ha assunto caratteristiche ancora più preoccupanti. Nel luglio 2025, il governo del Nepal ha dichiarato ufficialmente lo stato di emergenza nella provincia del Madhesh, un'area tradizionalmente conosciuta come il "paniere del grano" del paese. Nonostante la stagione monsonica fosse in corso, la regione ha registrato precipitazioni persistentemente inferiori alla media, compromettendo il calendario agricolo in particolare del trapianto del riso, coltura chiave dell'economia nepalese.

Alla fine di luglio 2025, solo il 51,82% dei terreni destinati al riso risultava trapiantato, a fronte del 92% registrato nello stesso periodo del 2024 (*ICIMOD*, 2025).

L'*International Centre for Integrated Mountain Development* (ICIMOD) ha condotto un'analisi satellitare che ha evidenziato una netta riduzione della copertura vegetale rispetto all'anno precedente, confermando l'impatto diretto della siccità sulla produttività agricola. Poiché la provincia del Madhesh contribuisce a circa il 27% della superficie risicola nazionale e produce oltre 1,28 milioni di tonnellate di riso all'anno, una perdita di tale portata non si traduce solo in un problema locale, ma rappresenta una minaccia per la sicurezza alimentare e potrebbe avere conseguenze dirette sull'inflazione alimentare, aumentando la dipendenza dalle importazioni e incidendo negativamente sulla bilancia commerciale e sui redditi rurali (*ICIMOD*, 2025).

Secondo il Dipartimento di Idrologia e Meteorologia (DHM), a seguito del monsone del 2025, le amministrazioni locali, con il supporto della Croce Rossa Nepalese e della Federazione Internazionale della Croce Rossa (IFRC), hanno avviato interventi di emergenza per la distribuzione di acqua, l'installazione di pozzi e la promozione di pratiche igieniche e sanitarie. Tuttavia, tali misure si sono rivelate insufficienti a soddisfare il fabbisogno crescente delle comunità, mettendo in luce la vulnerabilità strutturale del sistema idrico e agricolo nazionale di fronte agli eventi climatici estremi.

#### **Rischio Valanghe:**

Le valanghe rappresentano uno dei fenomeni naturali più distruttivi che interessano le aree montane del Nepal, in particolare le regioni di alta quota dell'Himalaya. Si tratta di movimenti rapidi di masse di neve, ghiaccio e detriti che si staccano dai versanti montuosi e precipitano verso valle, spesso con conseguenze devastanti per le comunità locali, le infrastrutture e gli ecosistemi. Le cause scatenanti possono essere sia naturali, come l'eccessivo accumulo di neve, le variazioni termiche o la morfologia dei pendii, sia antropiche, dovute ad attività umane che destabilizzano il terreno o alterano la copertura nevosa (Nepal Disaster Risk Reduction Portal).

Le valanghe si verificano principalmente nelle zone al di sopra del limite della neve, dove le condizioni climatiche e topografiche favoriscono l'instabilità dei versanti. In queste aree, gli eventi valanghivi possono manifestarsi durante tutto l'anno, ma risultano più frequenti nel periodo del monsone estivo, quando l'aumento delle temperature e l'intensificazione delle precipitazioni favoriscono lo scivolamento delle masse nevose (Zimmermann et al., 1986). Al di sotto di tale limite, invece, gli episodi sono rari e si manifestano prevalentemente come valanghe di roccia (Deline et al., 2015).

Il Nepal è considerato uno dei paesi più vulnerabili ai rischi climatici a livello globale. Secondo il *Global Climate Risk Index* (Eckstein et al., 2019), il paese rientra tra i primi venti al mondo per esposizione a eventi meteorologici estremi ed il riscaldamento globale sta inoltre influenzando la dinamica dei ghiacciai e dei laghi glaciali, considerati indicatori sensibili dei cambiamenti climatici. Negli ultimi quarant'anni, sia il numero che la superficie di questi laghi sono aumentati costantemente, registrando un'espansione complessiva di circa il 25% negli ultimi tre decenni (Khadka et al., 2018). Tale crescita incrementa il **rischio di Gacial Lake Outburst (GLOF)**: i laghi glaciali si trovano nelle zone di alta quota, in particolare ai piedi della montagna e si sono formati a causa dello sbarramento da parte delle morene (accumuli di detriti rocciosi trasportati e depositati da un ghiacciaio durante il suo avanzamento o ritiro). Questi bacini possono contenere grandi volumi d'acqua, e il continuo scioglimento glaciale ne accresce la pressione interna. In tali condizioni, il cedimento improvviso delle morene può provocare un *Glacial Lake Outburst Flood (GLOF)*, ossia un'inondazione improvvisa con un elevato potenziale distruttivo per le comunità e le infrastrutture situate a valle.

Questi eventi possono avere conseguenze devastanti per le comunità a valle, incidendo pesantemente sui sistemi socio-ecologici e sulle infrastrutture (Salerno et al., 2016).

#### **Rischio Terremoto:**

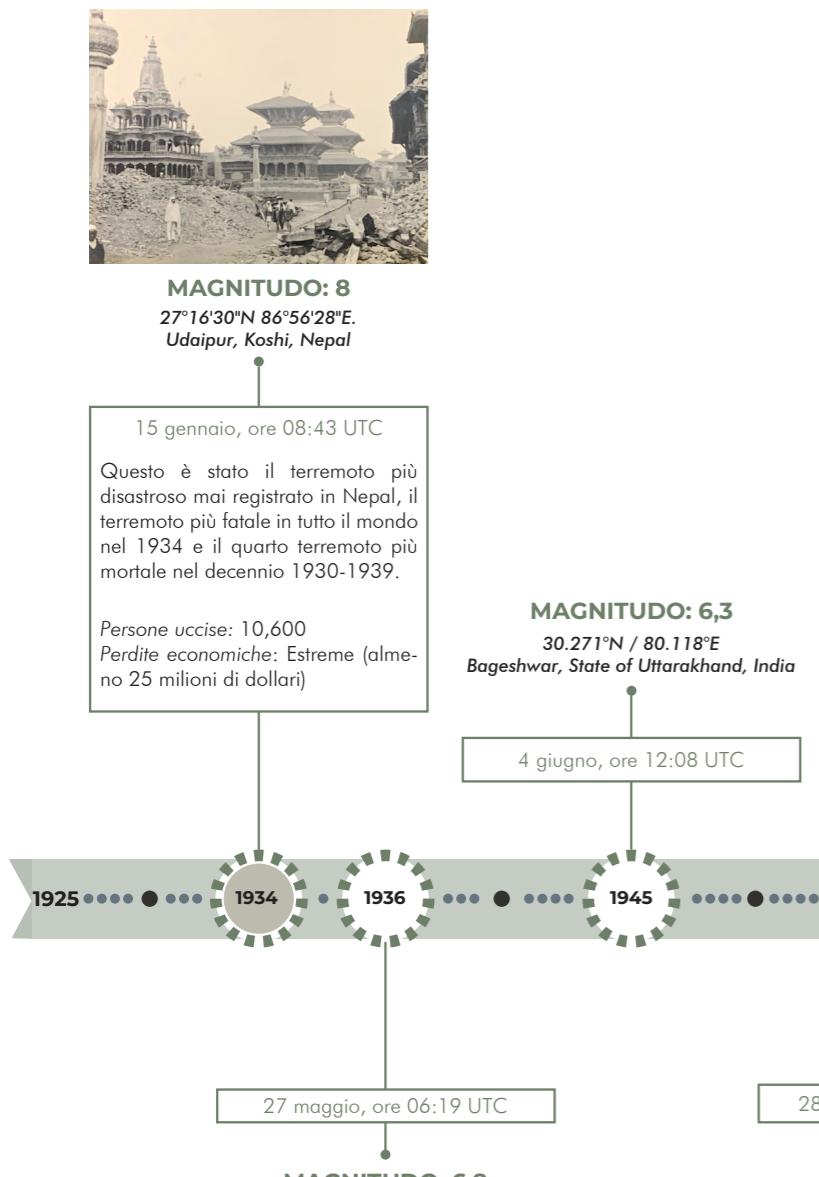
Il Nepal rappresenta una delle aree più vulnerabili al rischio sismico a livello globale, classificato nella **zona sismica attiva V e all'11° posto mondiale** per pericolosità sismica. La sua posizione geografica, al confine tra la placca tettonica indiana e quella eurasiana, è il principale fattore che determina l'elevata attività sismica del territorio. La continua spinta della placca indiana verso nord genera una collisione con la placca eurasiana, responsabile della formazione della catena montuosa dell'Himalaya e della continua attività geologica che modella il paesaggio. Questa dinamica rende l'intero territorio nepalese altamente instabile e soggetto a frequenti movimenti tellurici. (Lamichhane, 2025)

Dal punto di vista geografico, gli eventi sismici vengono generalmente suddivisi in tre macroaree: Nepal occidentale, centrale ed orientale. Le zone maggiormente esposte sono l'Himalaya minore e la parte frontale dell'Himalaya superiore, dove la combinazione tra altitudine, pendenze e natura geologica del suolo amplifica gli effetti delle scosse. I terremoti storici che hanno colpito il Paese testimoniano questa fragilità: tra i più significativi vi è il terremoto di Udaipur del 1934, quello di Gorkha del 2015 ed infine quello del Tibet del 2025 che ha causato ingenti danni a infrastrutture, abitazioni e siti storici, oltre a migliaia di vittime.

Accanto alla complessità sismica, il Nepal possiede anche un importante patrimonio di risorse minerarie, tra cui calcare, magnesite, rame, ferro e mica. Tuttavia, la conformazione montuosa e la scarsità di infrastrutture adeguate ne limitano fortemente lo sfruttamento, mantenendo il settore minerario in uno stato di sviluppo parziale e localizzato (Nepalog, Geography of Nepal). L'elevata sismicità si inserisce in un contesto più ampio di vulnerabilità ambientale e climatica. Secondo l'*INFORM Report 2023*, il Nepal si colloca al 23° posto mondiale per rischio naturale complessivo, al 30° per vulnerabilità alle inondazioni e all'11° per rischio sismico. Anche il rapporto 2022 della Banca Mondiale sullo sviluppo e il clima conferma questa tendenza, classificando il paese come l'undicesimo più vulnerabile ai cambiamenti climatici a livello globale. Le inondazioni e le frane monsoniche, che si verificano con crescente frequenza, causano ogni anno gravi perdite umane, danni economici e interruzioni nei servizi essenziali, in particolare nel settore educativo (UNICEF, 2023).

Di seguito verranno illustrati i principali eventi sismici che hanno colpito il paese negli ultimi cento anni, con una magnitudo superiore a 6, includendo alcuni casi di intensità minore ma di particolare rilevanza per i danni prodotti e l'impatto sulle comunità locali.

Figura 43. "Devastation in Nepal caused by the 1934 Bihar-Nepal Earthquake"  
Fonte: Ghimire, 2024



La ricostruzione cronologica degli eventi sismici che hanno interessato il Nepal è stata elaborata a partire dall'incrocio e dalla rielaborazione critica di diverse fonti di natura sia divulgativa sia accademica. In particolare, sono stati utilizzati i dati provenienti dal sito *Anautho Satya* ("All Powerful Earthquake History in Nepal") e dal portale "Earthquake List" e "Volcano Discovery", integrati con le informazioni scientifiche contenute nello studio "Simulation of the 1934 Nepal-Bihar Earthquake in Kathmandu" pubblicato su ResearchGate.

**MAGNITUDO: 6,9**

26.755°N / 86.616°E  
Udaipur, Koshi, Nepal

20 agosto, ore 23:09 UTC

Questo è stato il 3° peggior terremoto in Nepal durante la storia registrata, il 2° terremoto più fatale nel 1988 e il 12° terremoto più mortale nel decennio 1980-1989.

Persone uccise: 998  
Feriti: 6553  
Perdite economiche: 131.5 milioni di dollari USA  
Danni: 64.174 edifici privati, 468 edifici pubblici, 790 edifici governativi

**MAGNITUDO: 6,9**

27°43'48"N 88°9'18"E.  
Gangtok, Sikkim, India

18 settembre, ore 12:40 UTC

Questo è stato il 6° peggior terremoto in Nepal durante la storia registrata e il 4° terremoto più fatale nel 2011. Oltre 12.301 persone sono state sfollate a causa di questo terremoto in Nepal. Molte altre perdite in termini di proprietà e vite umane si sono verificate in India.

Persone uccise: 127  
Feriti: 441  
Perdite economiche: 2.1 miliardi di dollari USA

**MAGNITUDO: 6,8**

30°46'48"N 78°46'26"E  
32 km (20 mi) east of Uttarkashi, Uttarakhand, India

19 ottobre, ore 21:23 UTC

Categoria di scossa: VIII (Distruttivo)

**MAGNITUDO: 6,5**

29.598°N / 81.092°E

Pithauragad, India (Western Nepal Border)

29 luglio, ore 14:58 UTC

Questo è stato il quarto peggior terremoto in Nepal durante la storia registrata e il quarto terremoto più fatale nel 1980. i danni agli edifici e alle infrastrutture sono stati ingenti nelle zone vicine all'epicentro.

Persone uccise: 200  
Feriti: 248  
Perdite economiche: 245 milioni di dollari USA

**MAGNITUDO: 6,7**

28°13'50"N 84°43'53"E  
Gorkha, Gandaki Pradesh, Nepal

26 aprile, ore 09:09 UTC

Categoria di scossa: VII (Molto Forte)



Figura 44. "Devastation in Nepal caused by the 2015 Earthquake"  
Fonte: European Parliament 2015

**MAGNITUDO: 7,8**

28°13'50"N 84°43'53"E  
Gorkha, Gandaki Pradesh, Nepal

25 aprile, ore 06:11 UTC

Categoria di scossa: IX (Violento)

Questo è stato il 2° peggior terremoto in Nepal durante la storia registrata, il terremoto più fatale in tutto il mondo nel 2015, il 3° terremoto più mortale nel decennio 2010-2019 e il 9° terremoto più disteso del 21° secolo.

Persone uccise: 8,957  
Feriti: 24,000  
Perdite economiche: 6 miliardi di dollari USA  
Edifici distrutti: 498,852

**MAGNITUDO: 6,1**

27,6285 °N / 85,5398 °E  
Kavrepalanchok, Madhesh, Nepal

25 aprile, ore 06:15 UTC

Categoria di scossa: VI (Forte)

**MAGNITUDO: 6,1**

28,29 °N / 84,9 °E  
Gorkha, Gandaki Pradesh, Nepal

25 aprile, ore 06:45 UTC

Categoria di scossa: VII (Molto Forte)

**MAGNITUDO: 6,0**

27.574°N / 86.143°E  
Dolakha, Madhesh, Nepal

12 maggio, ore 07:05 UTC

Categoria di scossa: VII (Molto Forte)

12 maggio, ore 07:36 UTC

Categoria di scossa: VI (Forte)

**MAGNITUDO: 7,3**

27.762°N / 86.124°E  
Dolakha, Madhesh, Nepal

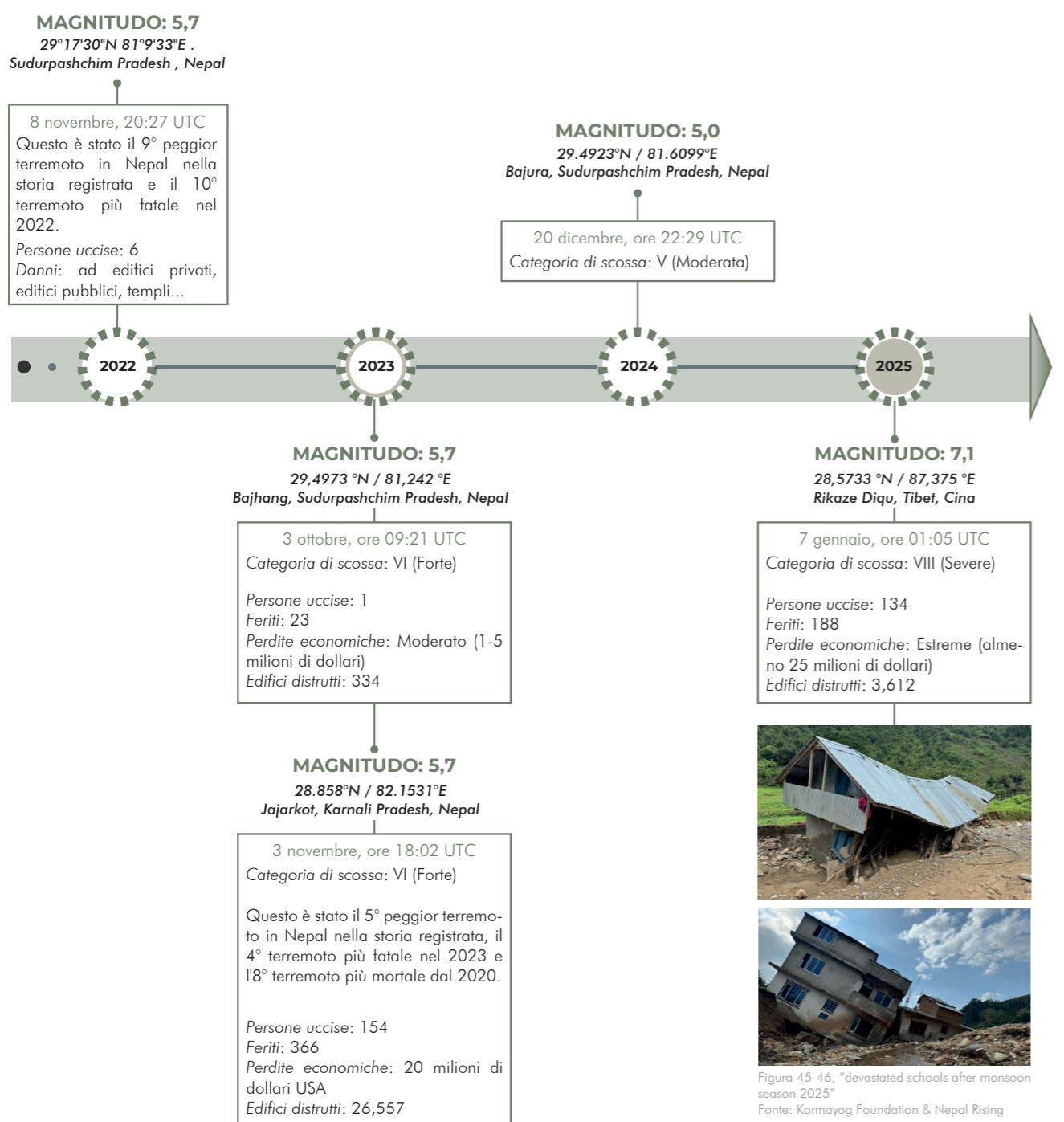
12 maggio, ore 07:05 UTC

Categoria di scossa: VII (Molto Forte)

Questo è stato il 7° peggior terremoto in Nepal nella storia registrata e il 3° terremoto più fatale nel 2015.

Persone uccise: 117  
Feriti: 2,800  
Perdite economiche: Moderato (1-5 milioni di dollari)

Le analisi sopra illustrate mostrano un quadro in costante peggioramento, aggravato dagli effetti combinati dei cambiamenti climatici e della fragilità socioeconomica del Nepal. La riduzione del rischio di catastrofi (Disaster Risk Reduction, DRR) e l'adattamento ai cambiamenti climatici (CCA) sono oggi riconosciuti come priorità nazionali e sono stati istituzionalizzati per sostenere un percorso di sviluppo sostenibile. Tuttavia, nonostante l'esistenza di politiche e strumenti normativi avanzati, i dati più recenti indicano una tendenza preoccupante all'aumento sia della frequenza sia dell'intensità dei disastri naturali e antropici.



Tra il 2018 e il 2024 sono stati registrati 32.375 eventi catastrofici di diversa entità, tra cui incendi, terremoti, frane, fulmini, inondazioni, piogge intense e tempeste di vento. Gli incendi (19.534 casi) e le frane (2.881 casi) rappresentano gli eventi più ricorrenti, mentre quelli che hanno causato il maggior numero di vittime sono le frane (878 morti), seguite da incendi (619), fulmini (477), annegamenti (346), inondazioni (260) e incidenti con animali (246). In termini economici, i danni più ingenti derivano dagli incendi, seguiti da terremoti, alluvioni e frane.

Questi dati evidenziano come i disastri naturali in Nepal stiano diventando più intensi e frequenti, in gran parte a causa dell'alterazione dei modelli meteorologici e dell'instabilità climatica che caratterizza il territorio. Sebbene il *Disaster Risk Reduction and Management Act (DRRM)* e la Costituzione forniscano una base istituzionale solida per la gestione dei rischi, l'aumento delle perdite umane ed economiche dimostra la necessità di rafforzare le strategie di prevenzione, migliorando la pianificazione territoriale, la formazione delle comunità locali e la resilienza delle infrastrutture. La governance del rischio deve tradursi in azioni concrete, integrate e multilivello, capaci di adattarsi alle specificità geografiche, culturali e sociali del paese (Rapporto sul disastro del Nepal: Concentrarsi sulla ricostruzione e sulla resilienza).

In questo contesto si inserisce il *Nepal School Project*, un concorso che nasce come risposta architettonica e comunitaria all'emergenza climatica e umanitaria che ha colpito il Paese tra il 2024 e il 2025. L'obiettivo del progetto è proporre un modello di scuola resiliente, modulare e sostenibile, capace di adattarsi alle condizioni ambientali estreme e di diventare, al tempo stesso, punto di riferimento per la comunità in situazioni di crisi (cfr. capitolo 6.1). L'architettura, in questo senso, assume un ruolo centrale non solo come risposta fisica ai disastri, ma come strumento di rigenerazione sociale e ambientale, capace di promuovere educazione, sicurezza e senso di appartenenza in un contesto vulnerabile ma profondamente radicato nel proprio territorio.

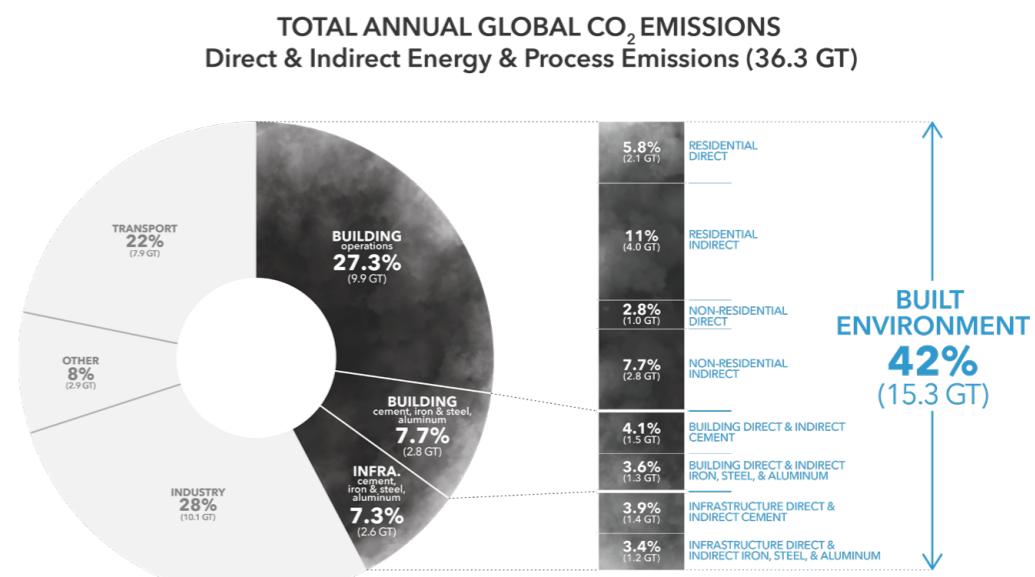
# /CAPITOLO II: ARCHITETTURA E SOSTENIBILITÀ NELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA



## 2.1. L'impatto ambientale del settore edilizio

Comprendere la crisi climatica significa non solo analizzarne le cause principali, come discusso nel sottocapitolo 1.1, ma anche interrogarsi sul ruolo che ciascun settore riveste in questa dinamica. In questo senso, come architetti, non possiamo sottrarci a una responsabilità diretta: l'ambito in cui operiamo, quello edilizio, è infatti tra i maggiori contributori alle emissioni di gas climalteranti e agli impatti ambientali globali.

Secondo il rapporto "Why The Built Environment" di Architecture 2030 (2024), l'ambiente costruito è oggi responsabile di circa il **42% delle emissioni globali di CO<sub>2</sub>** (Figura 47). Di queste emissioni, circa il 27% deriva dalle attività edilizie (riscaldamento, raffrescamento, illuminazione, uso quotidiano), mentre circa il 15% è attribuibile al carbonio incorporato nei materiali da costruzione, come cemento, acciaio, ferro e alluminio.



© Architecture 2030. All Rights Reserved.  
Analysis & Aggregation by Architecture 2030 using data sources from IEA & Statista.

Figura 47."Emissioni globali totali annue di CO<sub>2</sub>". Fonte: Architecture 2030  
<https://www.architecture2030.org/why-the-built-environment/>

Nel 2023, le emissioni operative hanno raggiunto il record di 9,8 GtCO<sub>2</sub>, mentre le emissioni incorporate (embodied carbon), principalmente dovute a materiali ad alta intensità di carbonio come cemento e acciaio, sono state stimate in circa 2,9 GtCO<sub>2</sub> (IEA, 2024a; UNEP & GlobalABC, 2025).

Un aspetto cruciale riguarda il crescente divario tra la traiettoria attuale e gli obiettivi di decarbonizzazione prefissati: il "Global Buildings Climate Tracker" evidenzia che, per allinearsi alla traiettoria del 2030, sarebbe necessario un incremento medio annuo di dieci punti percentuali di decarbonizzazione, quasi il doppio rispetto ai sei punti previsti negli anni precedenti (UNEP/ GlobalABC, 2024). Nonostante dei miglioramenti siano avvenuti dalla crescita del settore edilizio e dalla domanda di materiali, il tracker mostra quanta strada ci sia ancora da fare in quanto gli sforzi rimangono insufficienti:

sarebbe necessaria una riduzione di CO<sub>2</sub> del 28% entro il 2030 per rispettare gli obiettivi dell'Accordo di Parigi.

Finora, la maggior parte dei progressi nel settore sono stati realizzati nella riduzione del "carbonio operativo" di un edificio, ovvero le emissioni generate dal riscaldamento, dal raffreddamento e dall'illuminazione, che si prevede diminuiranno dal 75% al 50% del settore nei prossimi decenni. Tuttavia, diventa sempre più urgente intervenire per ridurre le emissioni di "carbonio incorporato", ovvero quelle prodotte durante l'intero ciclo di vita dei materiali da costruzione.

Studi recenti (Zhang et al., 2024) dimostrano che, negli edifici ad alta efficienza, le emissioni incorporate possono arrivare a costituire il 40–60% del loro impatto complessivo, sottolineando l'urgenza di agire sull'intera filiera dei materiali. La produzione di cemento, acciaio e alluminio da sola rappresenta circa il 18% delle emissioni globali di CO<sub>2</sub> legate all'edilizia (UNEP & Yale Center for Ecosystems + Architecture, 2023).

Parallelamente, il settore genera ogni anno circa 2 miliardi di tonnellate di rifiuti da costruzione e demolizione (CDW), pari a un terzo del totale mondiale, la maggior parte dei quali non viene né riciclata né riutilizzata, ma avviata a discarica o incenerimento. Questo approccio lineare oltre ad accelerare l'esaurimento delle risorse naturali contribuisce ulteriormente alle emissioni di gas serra (UNEP & GlobalABC, 2025).

Nonostante questo quadro critico, alcuni progressi sono stati registrati: nel 2023, nei Paesi OCSE (membri dell'Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico) il 20% dei nuovi edifici commerciali ha ottenuto una certificazione ambientale, rispetto al 15% ottenuto nel 2020.

Parallelamente, i principi dell'economia circolare (EC) hanno guadagnato terreno come strategia per ridurre gli impatti ambientali puntando sull'efficienza delle risorse, sulla riduzione dei rifiuti e il riutilizzo dei materiali. L'EC (Figura 48) mira, di fatto, a mantenere il valore dei materiali attraverso il riuso, la ristrutturazione e il riciclaggio, riducendo la dipendenza dalle risorse vergini e minimizzando le emissioni lungo il ciclo di vita dei prodotti. Così facendo, i modelli circolari contribuiscono nel prolungare la vita utile dei prodotti e trasformandoli in nuove risorse aiutano nella riduzione dei rifiuti da costruzione e demolizione prima citati (CDW).

Nonostante il forte potenziale trasformativo, la traduzione operativa dei principi dell'economia circolare rimane spesso incompleta. Molti quadri normativi, come lo stesso "Piano d'azione per l'economia circolare della Commissione Europea", pur offrendo un orientamento generale, tendono a trascurare le contraddizioni e i compromessi ambientali che emergono nella pratica. Ciò rischia di limitarne l'efficacia reale e di ridurre la capacità di sostenere pienamente gli obiettivi di decarbonizzazione e di costruzione a zero emissioni nette.

In questo scenario, emerge chiaramente come l'architettura e l'edilizia non siano soltanto parte del problema, ma possano costituire una leva cruciale per la soluzione.

Ogni scelta progettuale rappresenta un'opportunità per ridurre l'impronta carbonica del settore e contribuire al raggiungimento degli obiettivi climatici globali.

**The circular economy model:**  
less raw material, less waste, fewer emissions



Source: European Parliament Research Service

Figura 48. "Modello esplicativo dell'economia circolare". Fonte: European Parliament of Research Service. <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20151201ST05603/circular-economy-definition-importance-and-benefits>

Rispetto al quadro globale delle emissioni la situazione del Nepal presenta caratteristiche profondamente diverse. La complessità del suo territorio, la povertà diffusa e la dipendenza dalle risorse naturali rendono il paese un esempio significativo per osservare gli impatti del cambiamento climatico e le modalità con cui uno stato fragile cerca di rispondere alla crisi attraverso politiche di adattamento e mitigazione integrate con lo sviluppo socioeconomico (Figura 49).

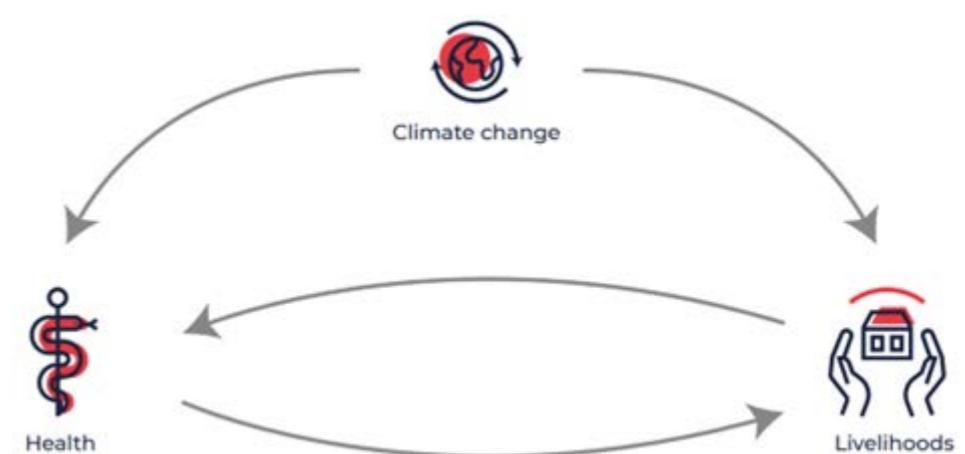


Figura 49. "Cooperation". Fonte: Climate Centre  
[https://www.climatecentre.org/wp-content/uploads/Climate-change-impacts-on-health-and-livelihoods-NEPAL-assessment\\_April-2021.pdf](https://www.climatecentre.org/wp-content/uploads/Climate-change-impacts-on-health-and-livelihoods-NEPAL-assessment_April-2021.pdf)

In un paese ancora classificato come in via di sviluppo, (passerà ufficialmente dallo status di "Least Developed Country" (LDC) a quello di **"Developing Country"**<sup>13</sup> nel 2026) la struttura economica, le risorse disponibili e le priorità politiche delineano un profilo emissivo fortemente legato alla dipendenza dalle risorse naturali. (UNDP, 2024)

Il Nepal rappresenta, infatti, un contesto in cui la vulnerabilità socioeconomica si intreccia con la fragilità ambientale. Il territorio, prevalentemente montano e soggetto a intensi fenomeni climatici, ospita una popolazione di circa 30 milioni di abitanti, di cui un terzo vive in condizioni di povertà multidimensionale (World Population Review 2021), ed il 70% dipende ancora dall'agricoltura di sussistenza, fortemente condizionata dalle piogge monsoniche. La rapida urbanizzazione, spesso non pianificata, la carenza di infrastrutture resilienti e la limitata capacità istituzionale di risposta ai disastri amplificano i rischi. Gli effetti si riflettono sulla sicurezza alimentare e idrica, ma anche sulla salute pubblica, con la diffusione di malattie trasmesse dall'acqua in aree montane prima immuni. In questo contesto, donne e gruppi socialmente marginalizzati risultano particolarmente vulnerabili, sia per ragioni economiche che per barriere sociali e culturali. (NEPAL assessment, 2021). La riduzione della povertà avvenuta negli ultimi trent'anni, seppur straordinaria in quanto il tasso di povertà di 2,15 dollari è sceso da oltre il 55% nel 1995 allo 0,37% nel 2022, non si è tradotta in una crescita strutturale, ma è dipesa, in larga parte, dalle rimesse provenienti dall'estero che costituiscono quasi un quarto del PIL nazionale (World Bank, 2025).

Sul piano politico-istituzionale, il Nepal si è impegnato negli ultimi anni per cercare di far fronte alla crisi climatica. Con la *National Climate Change Policy* del 2019 e i successivi aggiornamenti delle *Nationally Determined Contributions* (NDC) assieme alla *Long-Term Strategy for Net-Zero Emissions*, il paese ha fissato obiettivi ambiziosi, tra cui il raggiungimento della neutralità carbonica entro il 2045. La strategia si fonda in particolare sull'espansione dell'energia idroelettrica e delle fonti rinnovabili, già oggi prevalenti nel mix energetico nazionale, e sull'introduzione di politiche per la mobilità sostenibile, con l'obiettivo di eliminare gradualmente i veicoli a combustibili fossili entro il 2031. Tuttavia, la valutazione internazionale classifica tali impegni come "quasi sufficienti" (Figura 52), sottolineando come la piena realizzazione delle strategie nepalesi dipenda dal sostegno finanziario e tecnico della comunità internazionale. (Climate Action Tracker, 2023).

Per comprendere la distribuzione settoriale delle emissioni, è necessario fare riferimento ai dati più recenti forniti da *Climate Watch* (2025), che escludono le emissioni derivanti dal cambiamento di uso del suolo e dalla silvicultura (LULUCF).

<sup>13</sup> La Commissione Nazionale di Pianificazione del Nepal ha elaborato la "Strategia di Transizione Graduale per il Passaggio dai Paesi Meno Sviluppati" (LDC), con l'obiettivo di garantire una transizione ordinata, sostenibile e di qualità verso lo status di Paese in via di sviluppo. Il documento, in linea con la visione nazionale di buon governo, giustizia sociale e prosperità condivisa, si articola in sei pilastri strategici: stabilità macroeconomica, commercio e investimenti, trasformazione economica, rafforzamento delle capacità produttive, gestione dei rischi legati ai cambiamenti climatici e alle catastrofi naturali, e promozione dell'inclusione sociale.

Questo approccio permette di leggere con maggiore chiarezza i progressi effettivi dell'economia nazionale nella riduzione delle emissioni derivanti dalle attività produttive.

Secondo tali dati, le emissioni totali del Nepal (escluse LULUCF) ammontavano nel 2022 a circa **53 MtCO<sub>2</sub>** e, distribuite principalmente tra i seguenti settori (Figura 50):

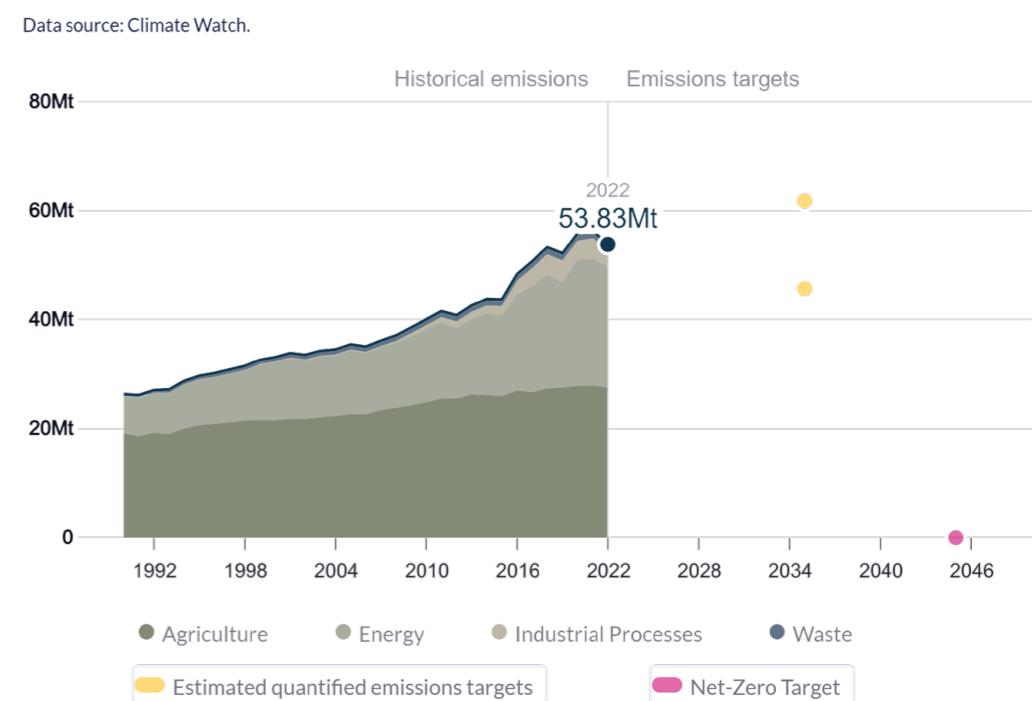


Figura 50. "GHG Emissions and Emissions Targets in Nepal". Fonte: Climate Watch [https://www.climatewatchdata.org/countries/NPL?end\\_year=2022&filter=2855%2C2856%2C2857%2C2858&source=Climate%20Watch&start\\_year=1990#ghg-emissions](https://www.climatewatchdata.org/countries/NPL?end_year=2022&filter=2855%2C2856%2C2857%2C2858&source=Climate%20Watch&start_year=1990#ghg-emissions)

**-Agricoltura** (~54%): rappresenta la principale fonte emissiva di metano del paese, con contributi significativi derivanti dalla fermentazione enterica del bestiame, dalla gestione dei suoli coltivati e dall'uso di fertilizzanti organici. La prevalenza di pratiche agricole tradizionali, scarsamente meccanizzate e dipendenti dalle piogge monsoniche, evidenzia la difficoltà di introdurre tecniche di mitigazione efficienti in un contesto dominato dall'autosussistenza.

**-Energia** (~28%): in crescita costante negli ultimi due decenni, trainata dall'aumento della domanda urbana e dal settore dei trasporti. Sebbene la generazione elettrica provenga interamente da fonti rinnovabili, l'uso diffuso di biomassa per la cottura e il riscaldamento domestico costituisce una delle principali fonti di inquinamento e di emissioni di CO<sub>2</sub> e black carbon. Le emissioni legate all'energia prodotte dal settore dei trasporti sono quelle che contribuiscono maggiormente con il 50%, seguite dai settori industriale ed edilizio con rispettivamente il 27% e il 15% (Figura 51).

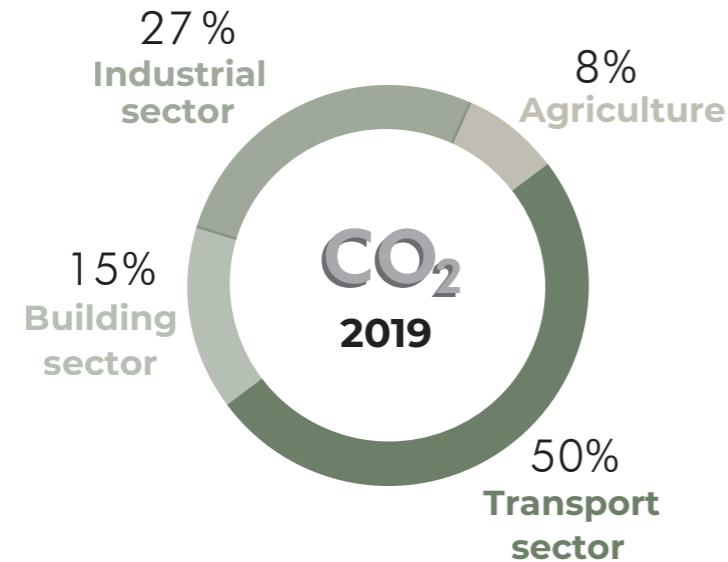


Figura 51. "Energy-related CO2 emissions by sector". Fonte: Enerdata, 2020  
<https://www.enerdata.net/research/energy-market-data-co2-emissions-database.html>

**-Processi industriali e uso dei prodotti** (~10%): le emissioni derivano in larga parte dalla produzione di cemento e materiali da costruzione, settore in crescita per effetto dell'urbanizzazione e della ricostruzione post-sismica. Tuttavia, l'incidenza complessiva rimane modesta rispetto ai paesi industrializzati.

**-Rifiuti** (~8%): la gestione inefficiente dei rifiuti solidi urbani, con prevalenza di discariche a cielo aperto e assenza di impianti di trattamento del biogas, contribuisce in modo crescente alle emissioni di metano ( $\text{CH}_4$ ).

Includendo il settore **LULUCF**<sup>14</sup>, la dinamica delle emissioni nepalese mostra un andamento ancora più complesso. Le foreste del paese hanno agito, in tempi diversi, sia come fonte che, come pozzo di carbonio (pallini verdi figura 52: emissioni legate alla silvicoltura). Tra il 1997 e il 2015, il bilancio è stato negativo, con un assorbimento netto di  $\text{CO}_2$ ; dal 2016 al 2021, invece, il settore è tornato a essere una fonte emissiva, principalmente a causa della deforestazione e della pressione antropica legata all'espansione agricola (CAT, 2023). Tuttavia, il Nepal mira a mantenere una copertura forestale del 45% (inclusi altri terreni boschivi limitati a meno del 4%) entro il 2030, valore già quasi raggiunto (44,7% nel 2020), considerato fondamentale per il raggiungimento della neutralità climatica.

**FIGURA 52:**  
Il grafico è suddiviso in due sezioni principali: La prima, "Based on modelled domestic pathways", rappresenta l'andamento delle emissioni in funzione dei modelli economici e tecnologici interni, mentre la seconda, "Based on fair share", valuta gli impegni del Nepal in termini di equità, tenendo conto delle sue responsabilità storiche e della capacità economica nazionale.

-La linea nera indica i dati storici, che mostrano una crescita costante delle emissioni fino al 2020.

-La linea blu (Policies & action) rappresenta le politiche attualmente in atto nel paese;

-La linea rossa (Conditional NDC target) indica l'obiettivo nazionale di riduzione delle emissioni, subordinato però al supporto finanziario e tecnologico internazionale;

-Le aree colorate definiscono i diversi gradi di compatibilità con gli scenari di riscaldamento globale: dal grigio (Critically insufficient, circa 4 °C) al verde (1.5 °C compatible).

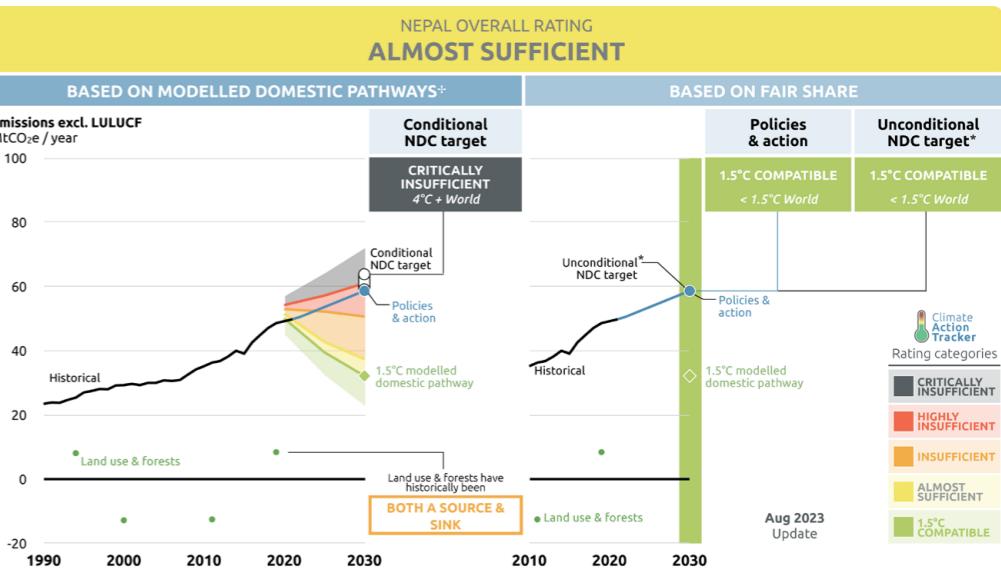


Figura 52. "CAT 2023- Nepal Summary". Fonte: Climate Action Tracker  
<https://climateactiontracker.org/climate-target-update-tracker-2035/>

Nel complesso, la distribuzione settoriale delle emissioni in Nepal riflette il suo percorso di sviluppo e le tensioni tra crescita economica, sicurezza energetica e sostenibilità ambientale. Mentre il settore agricolo continua a essere il principale responsabile delle emissioni, il peso crescente dei trasporti e dell'urbanizzazione evidenzia la necessità di politiche integrate per la gestione delle risorse, l'efficienza energetica e la pianificazione territoriale.

<sup>14</sup> Le emissioni forestali, o meglio le emissioni LULUCF (uso del suolo, cambiamenti di uso del suolo e silvicoltura), vengono calcolate diversamente. I dati possono essere negativi ("assorbimento netto") o positivi ("emissioni nette") a seconda che un paese stia aumentando o diminuendo le proprie riserve di carbonio basate sul suolo. Le variazioni da un anno all'altro possono spesso essere significative e non correlate a cambiamenti nelle politiche.

## 2.2. Verso un approccio costruttivo sostenibile: i materiali bio-based

*“Orientare gli edifici del futuro all’utilizzo di un’ampia gamma di materiali biobased a rapida crescita è una scelta veramente sostenibile, che offre benefici climatici, finanziari e sociali in tutto il mondo”*

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), p. 745–755. <https://doi.org/10.5334/bc.254>

Come emerso nei capitoli precedenti, gran parte delle emissioni climateranti deriva da un settore a noi molto vicino e di cui siamo inevitabilmente responsabili: quello edilizio. Se da un lato questo quadro appare critico, dall’altro è altrettanto grande la possibilità di risposta che il settore stesso può fornire, risiede di fatto proprio qui la “sfida” verso il miglioramento. Negli ultimi anni si parla sempre più di progettazione “green”, orientata alla sostenibilità, e numerosi progressi sono stati compiuti soprattutto per ridurre il cosiddetto “operational carbon”, ovvero le emissioni legate all’uso e al funzionamento degli edifici. Tuttavia, la vera sfida che oggi si pone riguarda “l’embodied carbon” (già definito nel paragrafo 2.1), cioè l’insieme delle emissioni incorporate nei materiali da costruzione lungo il loro intero ciclo di vita, dall’estrazione alla produzione, fino al trasporto e allo smaltimento (Legambiente & Kyoto Club, 2021).

In questa prospettiva, l’attenzione si sposta inevitabilmente sui **materiali**: scegliere cosa impiegare nella costruzione significa determinare l’impronta ecologica di un edificio molto prima che esso venga abitato. Non a caso, numerose strategie di ecodesign si concentrano su questo aspetto: dal “Design for Disassembly” al “Design for Longevity”, dal “Design for Modularity” al “Design for Reusability”, tutte accomunate dall’idea di ridurre sprechi e favorire la circolarità dei flussi materici (Disruptive Design, 2021). La logica di fondo si inserisce nei principi dell’economia circolare, che punta a limitare l’uso di materie prime, riutilizzare i prodotti, trasformare i rifiuti in risorsa e mantenere i materiali in un ciclo continuo, in contrapposizione al modello lineare “produzione-uso-smaltimento” (Thomas et al., 2023).

Nell’ambito della transizione verso un’edilizia a basse emissioni, i materiali di origine biologica, grazie alla loro capacità intrinseca di stoccare anidride carbonica all’interno della biomassa, stanno assumendo un ruolo centrale perché offrono una via concreta per ridurre le emissioni incorporate degli edifici e per attivare filiere locali più circolari (John (2022); Carcassi et al., 2021). Prima di approfondire le singole tipologie, è utile chiarire due termini che spesso vengono usati in modo intercambiabile ma che hanno significati distinti: “biogenico” e “bio-based”.

Per **biogenico** si intende la materia derivata dalla biomassa, sia essa vergine o riciclata; un “prodotto biogenico” è quindi «interamente o parzialmente

derivato da biomassa» (European Committee for Standardisation, 2014-2015). I **materiali bio-based** sono invece prodotti che incorporano biomassa vegetale, animale o microbica nella loro composizione, indipendentemente dalle modalità produttive (Polymers special issue; Bourbia et al., 2023). I materiali di origine biologica si distinguono principalmente per la loro origine rinnovabile, che li differenzia dalle risorse fossili finite (Carcassi, 2021). Per valutare in modo accurato la sostenibilità ambientale di un materiale, è fondamentale quantificare la quota di biomassa e il contenuto di carbonio biogenico, parametri che incidono sia sul calcolo del carbon stock sia sulla gestione del fine vita (European Committee for Standardisation, 2015).

Secondo UNEP (2023) i materiali bio-based, ovvero materiali o prodotti che siano interamente o parzialmente derivati da biomassa, rappresentano una delle più promettenti vie per una decarbonizzazione radicale del settore edilizio, potenzialmente in grado di ridurre fino al 40% delle emissioni entro il 2060, se adottati su larga scala e gestiti responsabilmente.

Tra i principali materiali bio-based si annoverano: legno e derivati, fibre biologiche (paglia, canapa, lino), micelio, alghe, biocompositi e bioplastiche di nuova generazione (Sustainability Directory, 2023). Questi materiali si distinguono inoltre in due macro-categorie: le risorse a “crescita lenta” (es. legno proveniente da foreste gestite) e i *fast-growing materials* (es. canapa, paglia, bambù). Questi ultimi, grazie ai cicli di crescita rapidi, permettono un ritorno del carbonio sequestrato in tempi brevi, generando un effetto di raffreddamento netto più immediato rispetto ai materiali a lunga rotazione (Pomponi et al.; Pittau et al., 2018).

Le **potenzialità** ambientali dei materiali biogenici sono molteplici. In primo luogo, essi riducono l’intensità di carbonio incorporato rispetto a materiali “convenzionali” ad alta energia incorporata come cemento e acciaio, poiché la biomassa sostituisce le materie prime fossili e, durante la crescita, immagazzina CO<sub>2</sub>. In secondo luogo, favoriscono l’adozione di strategie di economia circolare, grazie alla possibilità di riuso, riciclo biologico o reinserimento nei cicli agricoli, contribuendo a una gestione del fine vita più sostenibile (John & Thomas, 2022; Wagermaier et al., 2025).

Infine, la produzione localizzata dei materiali bio-based consente di ridurre le emissioni legate ai trasporti e di generare opportunità economiche locali, rafforzando la resilienza socio-economica e le capacità produttive dei territori (Göswein et al., 2022; Zea Escamilla et al., 2016).

I **limiti** principali nell’adozione di tali materiali sono di natura tecnica, ambientale e gestionale (Göswein et al., 2022). Sul versante tecnico, molti materiali biogenici presentano criticità in termini di durabilità, resistenza all’umidità, vulnerabilità agli attacchi biologici e prestazioni al fuoco non sempre adeguate richiedendo pertanto trattamenti specifici o processi di ingegnerizzazione (Jones & Brischke; Ruta et al., 2024). Dal punto di vista ambientale, la produzione intensiva di biomassa può determinare impatti

collaterali significativi, come la competizione per l'uso del suolo, il consumo eccessivo di acqua, l'uso di fertilizzanti sintetici e il rischio di eutrofizzazione, se non accompagnata da pratiche agricole sostenibili (Weiss et al., 2012; Göswein et al., 2021). Gli effetti ambientali dei materiali bio-based vengono generalmente valutati tramite la **Life Cycle Assessment (LCA)**, metodologia standardizzata a livello internazionale (ISO 2006a, 2006b), che consente di confrontarne le prestazioni rispetto ai materiali convenzionali (Weiss et al., 2012).

Una delle questioni più rilevanti riguarda la competizione nell'uso del suolo. L'espansione delle colture destinate alla produzione di materiali bio-based può entrare in conflitto con la produzione alimentare, generando effetti negativi sulla sicurezza alimentare e sui prezzi agricoli, soprattutto nei paesi con limitate risorse arabili. In questi contesti, la gestione sostenibile del territorio, l'impiego di terreni marginali e l'ottimizzazione delle rese agricole diventano elementi chiave per garantire l'equilibrio tra obiettivi ambientali e bisogni sociali (Göswein et al., 2022).

Inoltre, l'uso intensivo di acqua e fertilizzanti nella coltivazione della biomassa può compromettere la sostenibilità complessiva del processo. È quindi necessario promuovere metodi di agricoltura a basso impatto, come l'irrigazione efficiente, la riduzione delle lavorazioni e le pratiche biologiche, in modo da minimizzare gli impatti sul suolo e sulle risorse idriche.

Infine, la variabilità qualitativa delle materie prime e l'assenza in molti contesti di standard normativi e competenze tecniche rappresentano barriere operative significative.

Per queste ragioni, la letteratura recente propone approcci complementari e integrati. La cosiddetta "dieta dei materiali da costruzione" (Carcassi et al.) (Figura 53) suggerisce una gerarchia d'intervento: ridurre l'uso di materiali ad alto *embodied energy*<sup>15</sup> (come acciaio, materiali polimerici e vetro), favorire i materiali *low-carbon*<sup>16</sup> (come calcestruzzo, legno, bambù) e infine privilegiare, ove possibile, i materiali *climate-negativi*<sup>17</sup> e (come paglia e canapa) (Figura 54).

L'applicazione di questo approccio progettuale può consentire una riduzione fino al 50% delle emissioni lungo il ciclo di vita rispetto a un edificio convenzionale. (Thiébat, Morselli, 2024; cit. in Ruta et al., 2024).

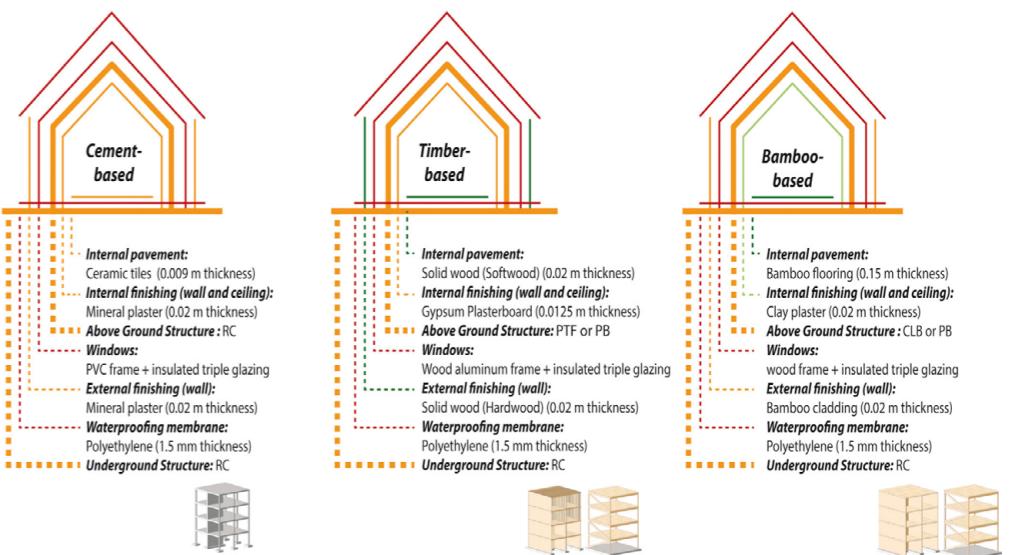


Figura 53. "Diete dei materiali a base di cemento, legno e bambù".  
Fonte: Carcassi et al., 2022. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c05895>

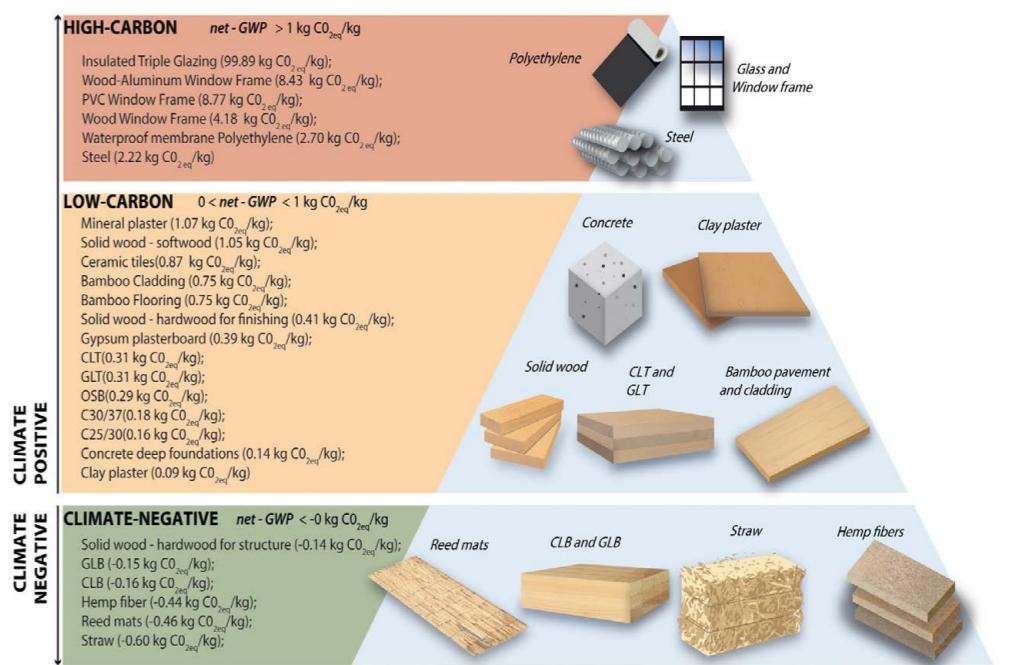


Figura 54. "Classificazione dei materiali in base al valore GWP netto".  
Fonte: Carcassi et al., 2022. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c05895>

In parallelo, modelli come il *Design for Disassembly*, la modularità costruttiva e la produzione locale favoriscono la circolarità dei materiali e riducono il rischio che l'impiego di soluzioni bio-based generi problemi di fine vita o impatti non previsti lungo la filiera (Ruta et al., 2024; Pittau et al., 2018).

Il settore edilizio sta dunque esplorando con crescente interesse i materiali di origine biologica, e tra questi il legno continua a rappresentare una risorsa chiave, soprattutto attraverso soluzioni ingegnerizzate come il *Cross Laminated Timber (CLT)*, che combina proprietà strutturali, isolamento

<sup>15</sup> L'Embodied Energy (EE) o energia incorporata è un indicatore che contabilizza le risorse energetiche primarie (rinnovabili e non rinnovabili) impiegate in una o più fasi del ciclo di vita di un determinato bene, sia esso un prodotto o un manufatto edilizio, e normalizzate rispetto a un'unità di misura (detta anche funzionale) appropriata.

<sup>16</sup> I materiali a basse emissioni di carbonio sono sostanze prodotte con emissioni di gas serra significativamente inferiori rispetto alle opzioni convenzionali, riducendo l'impatto climatico dell'ambiente costruito.

<sup>17</sup> Si tratta di un termine utilizzato in riferimento a un prodotto o un processo che oltre a compensare tutte le emissioni di gas serra (GHG) che genera, rimuove anche dall'atmosfera più carbonio di quanto ne emetta.

termico e capacità di sequestro del carbonio. Tuttavia, la sostenibilità del legno dipende fortemente da una gestione forestale responsabile, capace di garantire la rigenerazione delle risorse e di prevenire la deforestazione (Sustainability Directory, 2023).

Se il legno venisse adottato come unica alternativa bio-based su scala globale, la pressione sulle risorse forestali supererebbe rapidamente la capacità di rigenerazione degli ecosistemi, con impatti potenzialmente irreversibili sulla biodiversità, sulla stabilità idrogeologica e sulla capacità stessa delle foreste di svolgere un ruolo di mitigazione climatica. Questo scenario mette in evidenza come la transizione verso materiali a basse emissioni non possa dipendere da un'unica filiera, ma richieda invece la diversificazione delle risorse bio-based, includendo materiali rapidamente rinnovabili quali bambù, paglia, canapa e altre biomasse locali, in grado di distribuire la domanda, ridurre la pressione sulle foreste e rendere più resiliente l'intero sistema costruttivo (Legambiente, 2023).

I materiali bio-based offrono opportunità concrete per la decarbonizzazione dell'ambiente costruito, ma il loro potenziale si realizza pienamente solo se il contesto territoriale, le tecniche costruttive e la governance locale ne garantiscono sostenibilità e replicabilità.

La presente tesi concentra la propria analisi sul **bambù** tra i materiali biogenici, poiché il contesto approfondito, quello nepalese, offre un terreno ideale per indagare la relazione tra risorse locali e materiali a base biologica. Grazie alla sua crescita rapida, all'elevata resa per ettaro e alle notevoli potenzialità di ingegnerizzazione, il bambù si configura come un materiale particolarmente promettente per lo sviluppo di soluzioni costruttive a basso impatto ambientale, sostenibili e replicabili su scala territoriale (cfr. capitolo 2.3).

A differenza del legno, che richiede tempi di crescita più lunghi e gestioni forestali complesse, il bambù è una risorsa rinnovabile a crescita rapida: può raggiungere la maturità in soli cinque anni e, poiché la sua raccolta non comporta il taglio completo della pianta, mantiene inalterato lo stock di carbonio del suolo, continuando a sequestrare CO<sub>2</sub> anche dopo la raccolta (Zea Escamilla et al., 2016).

Questa caratteristica lo rende particolarmente interessante in un'ottica di transizione verso un'edilizia a emissioni zero o addirittura negative, poiché la biomassa raccolta può essere rapidamente rigenerata, compensando le emissioni legate alla produzione dei materiali da costruzione (Göswein et al., 2022). Inoltre, rispetto ad altri materiali biobased, il bambù presenta una resa per ettaro molto elevata, con alcune specie come la *Guadua angustifolia* Kunth in grado di produrre fino a 60 m<sup>3</sup> di bambù ingegnerizzato per ettaro ogni anno (Vogtländer et al., 2014).

L'introduzione di tecnologie di ingegnerizzazione come il bambù lamellare incollato (glulam) ha ulteriormente ampliato le sue potenzialità, permettendo livelli più elevati di standardizzazione e affidabilità strutturale. I prodotti ingegnerizzati a base di bambù, come pannelli e travi lamellari, mostrano una capacità di sequestro del carbonio notevole: fino a 12,85 kg di CO<sub>2</sub>

per kg di prodotto; e una stabilità meccanica paragonabile, in alcuni casi, a quella del legno strutturale (Göswein et al., 2022). Ciò rende il bambù competitivo anche per l'edilizia multipiano, superando il limite tradizionale del materiale naturale destinato a costruzioni di piccola scala.

Dal punto di vista ambientale, l'impiego del bambù nei sistemi costruttivi contribuisce a un doppio effetto di mitigazione: da un lato, riduce le emissioni sostituendo materiali ad alta intensità di carbonio; dall'altro, funziona come pozzo di carbonio durante il suo ciclo di vita e nel periodo di permanenza all'interno dell'edificio (Zea Escamilla et al., 2018). Questo significa che ogni costruzione in bambù non solo evita emissioni climateranti, ma contribuisce attivamente alla loro rimozione dall'atmosfera.

Questo vale, poiché la trasformazione del bambù può essere realizzata in officine locali, generando occupazione e nuove filiere economiche nei contesti rurali. In Nepal, dove il bambù cresce spontaneamente e fa parte della tradizione costruttiva vernacolare, il suo impiego può favorire una sinergia tra innovazione e saperi locali, migliorando la qualità edilizia e allo stesso tempo promuovendo lo sviluppo socio-economico (Zea Escamilla et al., 2016).

A livello globale, le stime mostrano che la disponibilità di bambù è ampiamente superiore alla domanda prevista per le costruzioni, anche considerando un uso sostenibile e una gestione multifunzionale delle foreste (Xu et al., 2019; FAO, 2007). Questo dato evidenzia come il bambù possa costituire una risorsa strategica, potenzialmente più accessibile e scalabile rispetto al legno, la cui disponibilità potrebbe invece risultare insufficiente a soddisfare la crescente domanda di edilizia sostenibile (Pomponi et al., 2020).

Infine, la rapidità del ciclo di crescita del bambù consente di ottenere impatti di raffreddamento netto molto più tempestivi rispetto alle specie legnose tradizionali: le emissioni prodotte nella fase di trasformazione vengono infatti bilanciate in tempi brevi dalla ricrescita della pianta, con un beneficio climatico quasi immediato (Arehart et al., 2021).

## 2.3. Il Bambù: “l'acciaio vegetale”

Negli ultimi anni, la crescente attenzione verso materiali sostenibili e a basso impatto ambientale ha riportato il bambù al centro dell'interesse scientifico e progettuale. Si tratta, in realtà, di una riscoperta più che di una novità: il bambù, infatti, è da secoli impiegato nei contesti in cui cresce spontaneamente, assumendo un ruolo rilevante sia nella costruzione di edifici che nella produzione di oggetti di uso quotidiano. Le sue applicazioni sono estremamente diversificate, dall'utilizzo strutturale nell'edilizia tradizionale alla realizzazione di elementi d'arredo, tessuti, strumenti artigianali e persino prodotti alimentari, grazie alla commestibilità dei germogli, rendendolo una risorsa di cui viene impiegata integralmente ogni parte (cfr capitolo 5.1).

Nonostante la sua lunga tradizione d'uso, nei contesti occidentali il bambù è ancora raramente considerato un materiale strutturale “affidabile”. Questa tendenza è legata a una conoscenza frammentaria e spesso parziale delle sue proprietà tecniche; perciò, la ricerca contemporanea sta contribuendo a colmare queste lacune, evidenziando le potenzialità del bambù come materiale costruttivo ad alte prestazioni, sostenibile e competitivo rispetto alle alternative convenzionali.

In questa prospettiva, il presente lavoro intende analizzare criticamente le principali questioni legate all'impiego del bambù in architettura, ricostruendo il dibattito scientifico e tecnico attorno alle sue caratteristiche, ai processi di lavorazione e ai metodi di progettazione. L'obiettivo è fornire una visione aggiornata e fondata su evidenze, mostrando come, attraverso una corretta selezione delle specie, un'adeguata progettazione e un trattamento appropriato, il bambù possa costituire una risorsa efficace per l'edilizia sostenibile e per la rigenerazione territoriale.

### 2.3.1. La pianta

Dal punto di vista botanico, il termine bambù deriva dal malese “mambu” e fu introdotto in ambito scientifico nel XVIII secolo: Carl von Linné, nel 1753, lo incluse nel suo sistema di classificazione utilizzando la denominazione “Bambusa”, derivata dall'uso indiano del termine “Mambu” o “Bambu”. Appartenente alla famiglia delle graminacee (Poaceae), il bambù è una pianta erbacea perenne e sempreverde, caratterizzata da fusti articolati detti culmi, prevalentemente cavi, che possono raggiungere altezze considerevoli a seconda della specie (IFAR/INBAR, 1991; Tewari, 1992).

Tra le sue peculiarità biologiche, spicca la rapidità di crescita: il bambù è in grado di raggiungere la maturità in un periodo compreso tra i 4 e i 6 anni, dopo i quali può essere raccolto ciclicamente senza compromettere la vitalità del ceppo originario. Questo ciclo di rigenerazione continua lo rende una risorsa forestale rinnovabile con un elevato potenziale in termini

di sostenibilità ambientale e gestione del territorio (Xu et al., 2025). A livello globale, si contano oltre **1.200 specie di bambù**, distribuite principalmente tra Asia (circa 750 specie) e Americhe (circa 450 specie), con una forte concentrazione in Brasile. Le foreste di bambù occupano complessivamente 37 milioni di ettari, di cui circa 6 milioni in Cina, 9 milioni in India e 10 milioni distribuiti in dieci paesi dell'America Latina (Lobovikov et al., 2007).

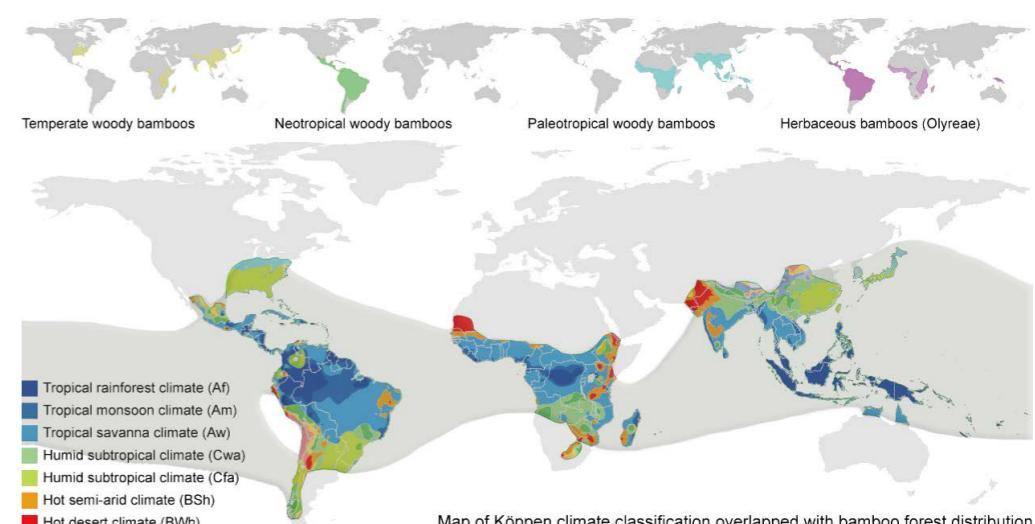


Figura 55. “Bamboo forest distribution and the overlapping with the climate zones”.

Fonte: Huang et al., 2017 10.1088/1757-899X/264/1/012007

Dal punto di vista geografico, circa l'80% delle risorse mondiali di bambù è concentrato nella regione Asia-Pacifico, con la Cina che rappresenta il principale centro di diffusione e utilizzo, tanto da essere considerata la “culla della civiltà del bambù” (Figura 55). Tuttavia, la presenza di questa pianta non è limitata alle aree tropicali: il bambù cresce spontaneamente in un ampio intervallo latitudinale, compreso tra i 46°N e i 47°S, e si adatta a quote che variano dal livello del mare fino a oltre 4.000 metri di altitudine. Tale distribuzione dimostra una notevole capacità di adattamento ecologico e fisiologico a condizioni ambientali molto differenti.

Le diverse specie di bambù mostrano una significativa varietà nelle esigenze climatiche: alcune, come la *Guadua angustifolia* diffusa in Colombia, prosperano in ambienti tropicali umidi e nelle foreste pluviali, mentre altre specie presenti in Cina e Giappone sono in grado di resistere a climi temperati e persino a temperature inferiori allo zero (Minke, 2016). Questa ampia adattabilità ecologica consente al bambù di occupare nicchie ambientali differenti, rendendolo una risorsa vegetale potenzialmente utilizzabile in contesti geografici molto eterogenei.

La distribuzione del bambù è strettamente correlata a fattori climatici quali temperatura, precipitazioni e umidità del suolo, elementi che lo rendono un indicatore ecologico sensibile ai cambiamenti ambientali in atto.

In un contesto di crisi climatica globale, le foreste di bambù si trovano oggi a fronteggiare sia opportunità che rischi. Da un lato, l'aumento medio delle temperature potrebbe favorirne l'espansione verso nuove latitudini: alcune proiezioni stimano, ad esempio, un incremento fino al 20% della copertura forestale di bambù in Cina in caso di aumento della temperatura globale di 2 °C. Dall'altro lato, l'intensificarsi di eventi meteorologici estremi, come siccità prolungate o precipitazioni torrenziali, rappresenta una minaccia per la stabilità e la resilienza di tali ecosistemi (INBAR, 2019).

Per garantire la sostenibilità delle foreste di bambù e la loro capacità di adattamento ai mutamenti climatici, sono state proposte strategie di gestione integrata. Tra queste, lo sviluppo di piantagioni miste ad esempio, l'associazione del bambù Moso (*Phyllostachys edulis*) con specie azotofissatrici può contribuire al miglioramento della fertilità del suolo e alla riduzione dell'impatto ambientale delle coltivazioni.

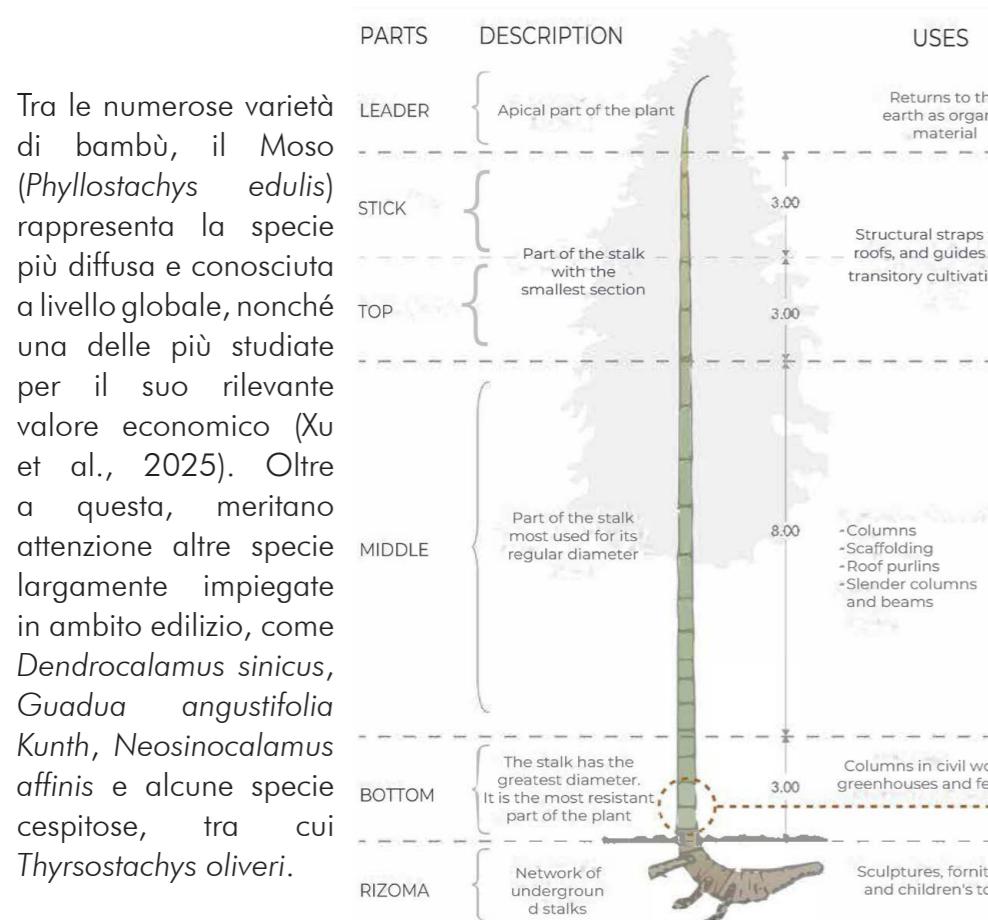


Figura 56. "Parts and uses of bamboo".

Fonte: [Minke, 2016](#) rielaborazione di Lucila Aguilar

Il bambù è una pianta appartenente alla famiglia delle graminacee che presenta un'elevata variabilità morfologica e comportamentale a seconda della specie. Dal punto di vista della propagazione, si distinguono due principali tipologie: le specie **monopodiali**, caratterizzate da rizomi orizzontali lunghi e ramificati che generano nuovi germogli a distanza dalla

pianta madre, e le specie **simpodiali**, che crescono in forma di cespo, con rizomi corti e compatti.

Le specie monopodiali, come *Phyllostachys edulis* (Moso) e *Phyllostachys bambusoides* (Madake), possono espandersi rapidamente se non gestite, poiché i rizomi sotterranei si sviluppano lateralmente su ampie distanze. Al contrario, le specie simpodiali, come *Dendrocalamus asper* (Petung) e *Gigantochloa apus* (Tali), presentano una crescita localizzata e controllabile, che le rende particolarmente adatte per la coltivazione e l'utilizzo in ambito edilizio, soprattutto nei contesti in cui la gestione del suolo rappresenta un aspetto critico (Lugt, 2017).

La distinzione tra questi due gruppi è fondamentale per comprendere il comportamento ecologico del bambù e definire pratiche di gestione e controllo adeguate. In contesti di pianificazione sostenibile, la selezione di specie simpodiali consente di ridurre i rischi di espansione incontrollata e di favorire un uso razionale delle risorse territoriali.

Il bambù si distingue per le proprietà meccaniche derivanti dalla sua particolare struttura anatomica e composizione chimica (Liese & Tang, 2015). Dal punto di vista anatomico, il culmo del bambù è caratterizzato da una distribuzione eterogenea dei fasci fibrovascolari, la cui densità aumenta progressivamente dalla parte interna verso la parete esterna dove la concentrazione di fibre lignificate è maggiore (Janssen, 2000). Questa configurazione conferisce al materiale un'elevata resistenza a trazione e flessione, concentrando la rigidezza meccanica proprio nelle zone più sollecitate. (Janssen, 2000). I fasci fibrovascolari sono composti da vasi xilematici, cellule di parenchima e fibre sclerenchimatiche, queste ultime responsabili della maggiore resistenza del materiale.

### 2.3.2. La composizione chimica

La composizione chimica del bambù è comparabile a quella del legno, ma con differenze significative nelle percentuali relative dei principali componenti. A differenza del legno, il bambù non presenta un vero e proprio accrescimento secondario né un cambio vascolare; la sua struttura è invece costituita da tessuti fibrosi longitudinali immersi in una matrice parenchimatica, organizzati all'interno di un culmo cavo e segmentato da nodi. In media, il bambù è costituito da circa **40–50% di cellulosa, 20–30% di emicellulosa, 20–25% di lignina, e piccole quantità di cere, grassi, proteine e silice**

(Liese, 1987; Scurlock et al., 2000). Studi hanno dimostrato che il contenuto di lignina e silice tende ad aumentare con la maturazione, migliorando la durabilità ma riducendo la lavorabilità del materiale (Liese, 1998).

La cellulosa è la componente strutturale principale, formata da catene lineari di glucosio che si aggregano in microfibrille, responsabili dell'elevata resistenza a trazione del materiale. Le emicellulose, costituite da polisaccaridi ramificati, agiscono come legante tra le microfibrille di cellulosa, contribuendo all'elasticità e alla capacità di deformazione del culmo. La lignina, una macromolecola fenolica tridimensionale, garantisce rigidità e resistenza alla

compressione, oltre a proteggere la parete cellulare dall'attacco biologico e dall'umidità.

La presenza di silice ( $\text{SiO}_2$ ), accumulata prevalentemente negli strati superficiali, è concentrata nella parete esterna del culmo, in quantità variabili tra l'1 e il 5% del peso secco. Ciò conferisce maggiore protezione meccanica e biologica incrementando la resistenza all'abrasione, agli attacchi fungini e all'azione degli insetti xilofagi, ma al contempo riduce parzialmente la flessibilità e la lavorabilità del materiale (Liese & Köhl, 2015).

A livello macroscopico, il bambù può essere considerato un materiale composito naturale: le fibre di cellulosa concentrate nella parte esterna, fungono da "rinforzo" /da armatura, mentre la matrice parenchimatica agisce da legante, in modo analogo al calcestruzzo armato. Questa organizzazione gerarchica dei tessuti, dal livello macroscopico (culmo) fino a quello microscopico (microfibrille di cellulosa), rappresenta un esempio di "ingegneria naturale", che ottimizza l'uso della materia riducendo il peso e massimizzando la resistenza, rendendo il materiale adatto ad applicazioni strutturali anche in contesti sismici e climaticamente variabili.

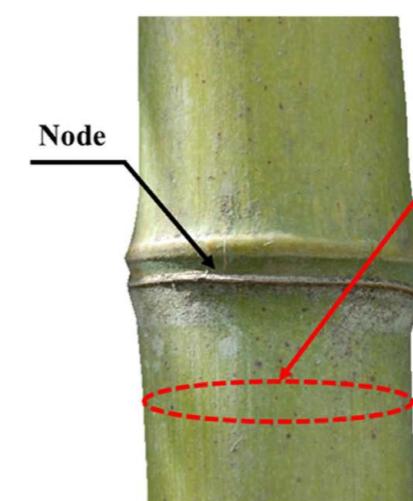
Un culmo di bambù è composto, a livello microscopico, per il **40% da fibre, per il 10% da vasi**, responsabili del trasporto dei liquidi durante la vita della pianta, e per il **50% da parenchima**, che funge da matrice di supporto all'interno della quale le fibre sono incorporate. A differenza del legno, il bambù non presenta i "raggi midollari"<sup>18</sup>, ovvero quelle strutture radiali che nel legno collegano la parte interna a quella esterna del tronco. L'assenza di tali raggi conferisce al bambù una maggiore resistenza al taglio e una superiore coesione longitudinale (Janssen, 2000).

La distribuzione non omogenea delle fibre lungo la parete del culmo, più concentrate nella zona esterna e più rade verso l'interno, genera un aumento della rigidità flessionale di circa il 10% rispetto a un materiale con una distribuzione uniforme (Figura 57, punto a).

La parte esterna della parete, visibilmente più scura per la maggiore densità delle fibre, ha uno spessore ridotto, di circa un quarto di millimetro, ma svolge un ruolo strutturale fondamentale, poiché concentra la maggior parte della resistenza meccanica.

Le macchie scure osservabili nella sezione trasversale (Figura 57, punto b) corrispondono infatti ai fasci fibrovascolari, composti da fibre di cellulosa e dai vasi conduttori, la cui distribuzione decrescente verso l'interno del culmo determina il caratteristico gradiente di colore e di densità del materiale.

a) Bamboo culm structure



Internode

Node

Fibre bundles

Parenchyma cells (matrix)

Conductive tissues (voids)

b) Vascular bundles and parenchyma matrix

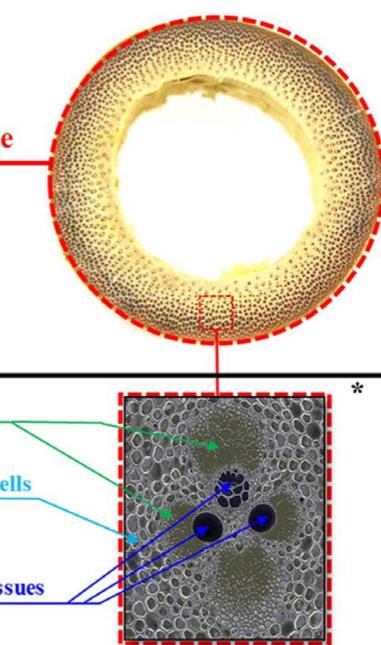


Figura 57. "Struttura caratteristica del bambù con a) sezione del culmo e b) fasci vascolari e matrice parenchimatica". Fonte: Layth 2021; Dixon 2014  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125036>

### 2.3.3. Le caratteristiche fisiche

Le caratteristiche fisiche del bambù dipendono da numerosi fattori ambientali e biologici tra cui: clima, altitudine, topografia, taglio, età del culmo, tipo di terreno e grado di umidità (Minke, 2016).

La sua struttura anisotropa<sup>19</sup> comporta proprietà meccaniche fortemente direzionali: la resistenza è massima lungo l'asse longitudinale, dove le fibre di cellulosa si dispongono parallelamente, mentre risulta più ridotta in direzione trasversale. Tale caratteristica lo avvicina più al legno mentre differisce con l'acciaio, in quanto materiale isotropo.

Il **modulo di elasticità** della cellulosa è pari a circa  $70.000 \text{ N/mm}^2$ , mentre la fibra, composta per circa il 50% da cellulosa, presenta un modulo di elasticità medio di  $35.000 \text{ N/mm}^2$ . Una regola empirica proposta da Janssen nell'INBAR Technical Report No. 20 (2000), indica che il modulo elastico del bambù ( $E$ ) può essere stimato come pari al 350% della percentuale di fibre presenti nella sezione. Poiché la concentrazione delle fibre varia dal 60% nella parte esterna al 10% in quella interna, il modulo elastico risulta variabile: può raggiungere valori di circa  $21.000 \text{ N/mm}^2$ , mentre nella parte interna si riduce a circa  $3.500 \text{ N/mm}^2$ , con una media di **10.000-21.000 N/mm<sup>2</sup>** per l'intero culmo (Janssen, 2000). Tale differenza è dovuta alla concentrazione crescente di fibre verso la superficie, che determina un momento flettente maggiore di circa il 10% rispetto a un materiale con distribuzione omogenea.

<sup>18</sup> I raggi sono i luoghi in cui avviene il trasporto e lo stoccaggio del nutrimento, principalmente zucchero, ma indeboliscono il materiale (Janssen, 2000)

<sup>19</sup> L'anisotropia è la proprietà per cui il valore di una grandezza fisica (durezza, resistenza alla rottura, velocità, indice di rifrazione, ecc.), in una sostanza o nello spazio, non è uguale in tutte le direzioni.

### 2.3.4. Le proprietà meccaniche e confronto con legno e acciaio

Il bambù viene spesso definito “acciaio vegetale” una definizione efficace per comprendere il potenziale del materiale ma che va interpretata in chiave critica (Borowski, 2022). Se da un lato il paragone con l'acciaio evidenzia le sue straordinarie capacità di resistenza meccanica e il rapporto forza/peso, dall'altro l'aggettivo “vegetale” ne sottolinea la natura organica, la leggerezza e la rinnovabilità, qualità che lo distinguono dal metallo e lo avvicinano al legno, pur superandolo in molte proprietà meccaniche. A differenza del legno, che richiede decenni per raggiungere la maturità, il bambù raggiunge le massime prestazioni meccaniche in soli 4-5 anni, configurandosi come una risorsa rinnovabile ad alta efficienza.

#### Resistenza a trazione

La resistenza a trazione delle fibre di bambù può variare tra **160-400 N/mm<sup>2</sup>** con un valore medio di circa 250 N/mm<sup>2</sup> per molte specie utilizzate in edilizia, valori paragonabili o superiori a quelli dell'acciaio dolce che presenta una resistenza a trazione di circa 250-350 N/mm<sup>2</sup> e della maggior parte dei tipi di legno da costruzione utilizzati nell'industria che si attestano intorno a 80-100 N/mm<sup>2</sup> (Borowski et al., 2022; Minke, 2016).

Una canna di bambù ha un'elevata resistenza alla trazione, soprattutto nel suo strato esterno. Questo strato sopporta fino a 400 N/mm<sup>2</sup> raggiungendo la resistenza dell'acciaio. Se si riferisce all'area totale della sezione di bambù, compresi tutti gli strati, la resistenza alla trazione è, ovviamente, inferiore (Minke 2016).

Tuttavia, la densità del bambù (500-800 kg/m<sup>3</sup>) è circa un sesto di quella dell'acciaio (7.850 kg/m<sup>3</sup>), il che implica un rapporto resistenza/peso notevolmente più elevato, giustificando l'analogia con l'acciaio in termini di efficienza strutturale. (Janssen, 2000).

Dal punto di vista della **resistenza specifica** (cioè rapportata al peso), il bambù presenta valori maggiori rispetto al legno tradizionale e, in alcuni casi, paragonabili o superiori all'acciaio (Ghavami, 2005; Amada, 1997). Ad esempio, il legno presenta un modulo di rottura di circa 84 MPa con un fattore di duttilità di 2,1, mentre il bambù Moso, a parità di densità, raggiunge valori fino a 1,7 volte superiori con una duttilità tripla. Tuttavia, la sua anisotropia comporta alcune criticità come l'elevata resistenza lungo la direzione delle fibre, ma una resistenza al taglio trasversale più debole (8,6-18 MPa, circa il 9% della resistenza a trazione). Ciononostante, se confrontato con diversi legni da costruzione il bambù mostra comunque valori superiori in termini di resistenza al taglio. (Xu et al., 2025).

In termini di resistenza e rigidità (capacità di un materiale di opporsi alla deformazione sotto carico) il confronto tra i principali materiali da costruzione mostra differenze significative (Figura 58).

Il calcestruzzo risulta il meno performante, seguito dal legno, mentre l'acciaio e il bambù occupano rispettivamente il primo e il secondo posto per prestazioni complessive. Considerando nello specifico la rigidità, il

calcestruzzo si colloca al quarto posto, il legno al terzo, l'acciaio al secondo e il bambù al primo, confermando la sua straordinaria efficienza strutturale rispetto al peso (Janssen, 2000).

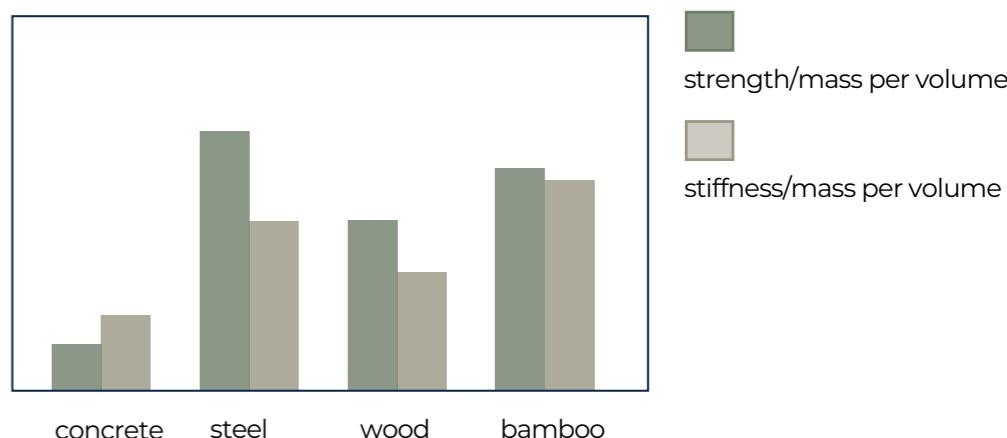


Figura 58. “Confronto tra resistenza e rigidità”. Fonte: INBAR Technical Report No. 20

#### Resistenza a compressione

La resistenza a compressione, compresa tra **40 e 80 N/mm<sup>2</sup>**, risulta superiore rispetto alla maggior parte dei legni (20-40 N/mm<sup>2</sup>) e, in alcuni casi, comparabile a quella del calcestruzzo strutturale. Tale resistenza è influenzata principalmente dal rapporto di snellezza del culmo, poiché la distribuzione del materiale, posto a maggiore distanza dal centro rispetto al legno, conferisce al bambù una migliore capacità di sopportare carichi compressivi (Minke, 2016).

Durante le prove di compressione, il bambù tende a deformarsi lateralmente per effetto di Poisson, assumendo una forma simile a un “barile”, poiché l'acorciamiento longitudinale causa un rigonfiamento nella parte centrale del culmo. Tuttavia, l'attrito generato dalle piastre di acciaio poste alle estremità del campione può limitare questa deformazione, producendo una sovrastima della resistenza effettiva. Dunque, per ottenere risultati più realistici, le prove dovrebbero essere condotte utilizzando piastre di acciaio con superficie priva di attrito, ad esempio rivestite in teflon o cera, che consentono di riprodurre in modo più accurato il comportamento del materiale in condizioni strutturali reali (INBAR Technical Report No. 20).

#### Resistenza a flessione

La resistenza a flessione del bambù, variabile tra **50 e 150 N/mm<sup>2</sup>**, è circa il doppio rispetto a quella del legno strutturale convenzionale, questa capacità è legata alla particolare struttura interna, del bambù (costituita da fibre longitudinali ad alta resistenza immerse in tessuti parenchimatici più morbidi) che conferisce al materiale un'elevata resistenza alla flessione e una notevole capacità di deformarsi prima di arrivare a rottura (Borowski et al., 2022). Questa proprietà permette al bambù di flettersi in modo significativo e recuperare la forma originaria una volta rimosso il carico, rendendolo particolarmente adatto all'impiego in contesti soggetti ad azioni sismiche e dinamiche (Janssen, 2000; Minke, 2016).

A differenza del legno, nel quale la frattura per flessione è netta e fragile, nel bambù la rottura non è mai completa: durante le prove sperimentali, le fibre longitudinali rimangono intatte, mentre si rompe solo il legame trasversale tra le fibre, costituito dalla lignina, che è più debole nel sopportare deformazioni perpendicolari. Ne consegue che, pur perdendo momentaneamente coerenza nella sezione trasversale e riducendo il proprio modulo flessionale  $EI$ , il materiale è in grado di ritornare alla configurazione iniziale una volta eliminato il carico.

Durante le prove di flessione, la parte superiore della trave di bambù è soggetta a compressione parallela alle fibre il che non rappresenta un problema per il materiale, mentre la deformazione critica si manifesta nella lignina, tra le fibre, dove si genera una compressione perpendicolare. Assumendo un modulo elastico medio  $E: 17\,000\text{ N/mm}^2$ , la sollecitazione di flessione limite risultante è  $62\text{ N/mm}^2$ , valore coerente con i test sperimentali (Janssen, 2000).

Sebbene il bambù presenti un modulo elastico relativamente basso e una composizione molecolare che lo rende suscettibile a fenomeni di "creep" (deformazione progressiva sotto carico costante), le ricerche più recenti indicano che, entro il 40% del carico ultimo, il materiale mantiene prestazioni meccaniche stabili, con deformazioni residue contenute (Xu et al., 2025).

La Figura 59 mostra il confronto tra le proprietà di resistenza del legno di abete rosso, dell'acciaio e del bambù evidenziando come il bambù mostri buone prestazioni in termini di resistenza rispetto agli altri materiali tanto da possedere una resistenza alla compressione e alla trazione superiore rispetto al legno di abete rosso, ma inferiore rispetto all'acciaio.

Materials	Compressive Strength or Yield Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Elastic Modulus (N/mm <sup>2</sup> )
Spruce Wood	43	89	11000
Steel	250	410	21000
Treated Bamboo ( <i>Bambusa Vulgaris</i> )	78	233	20000

Figura 59. "Comparison of strength properties of bamboo with other materials".

Fonte: Awalluddin, 2017. 10.1051/matecconf/201713801024

Quando si valuta un materiale per uso strutturale, la prima considerazione riguarda proprio la sicurezza; perciò, attraverso le analisi estratte dall'INBAR Technical Report No. 20, nell'immagine seguente viene illustrato il comportamento meccanico comparato di calcestruzzo, legno/bambù e acciaio in termini di sicurezza strutturale e comportamento sotto sforzo.

Nella Figura 60, gli sforzi sono indicati con il simbolo  $\sigma$  ("sigma") e riportati sull'asse orizzontale. Per rendere comparabili i materiali, il valore dello sforzo corrispondente alle condizioni d'uso normali è assunto come unità di riferimento ( $\sigma_{use}$ , o sollecitazione ammissibile): circa  $140\text{ N/mm}^2$  per l'acciaio e  $10\text{ N/mm}^2$  per il legno/bambù.

Ciascun diagramma mostra una curva a forma di "collina", che rappresenta la distribuzione delle sollecitazioni di rottura ottenute durante le prove. Il valore medio di rottura è indicato come  $\sigma_{mean}$ , mentre "s" rappresenta la deviazione standard, ossia la dispersione dei risultati sperimentali. Si assume come limite di sicurezza il valore di sollecitazione corrispondente al 5% o al 2,5% dei campioni che si rompono ( $\sigma_{5\%}$  o  $\sigma_{2,5\%}$ ), stabilendo la "sollecitazione ammissibile" a una distanza di sicurezza inferiore a tale soglia. Sull'asse verticale è riportata la probabilità (p) di rottura: una curva ampia e piatta indica una probabilità di cedimento più bassa, mentre una curva stretta e ripida ne segnala una più elevata.

Nel primo grafico, relativo al calcestruzzo, la curva appare larga e bassa, mostrando un comportamento fragile: il materiale raggiunge rapidamente il carico massimo e collassa improvvisamente, con scarsa capacità di deformazione e quindi bassa duttilità.

Nel secondo grafico, che rappresenta legno e bambù, la curva risulta più estesa e regolare, indicando una maggiore capacità di deformazione prima della rottura. In particolare, il bambù mostra un comportamento semi-duttile, in grado di assorbire energia e di recuperare parte della forma originaria dopo il rilascio del carico, qualità che lo rendono adatto per strutture soggette ad azioni sismiche o dinamiche (come già affrontato precedentemente).

Il terzo grafico, riferito all'acciaio, presenta una curva molto ripida e stretta, con un lungo tratto plastico: l'acciaio mantiene la capacità portante anche dopo la deformazione, rivelando una duttilità elevata e un'eccellente resilienza strutturale.

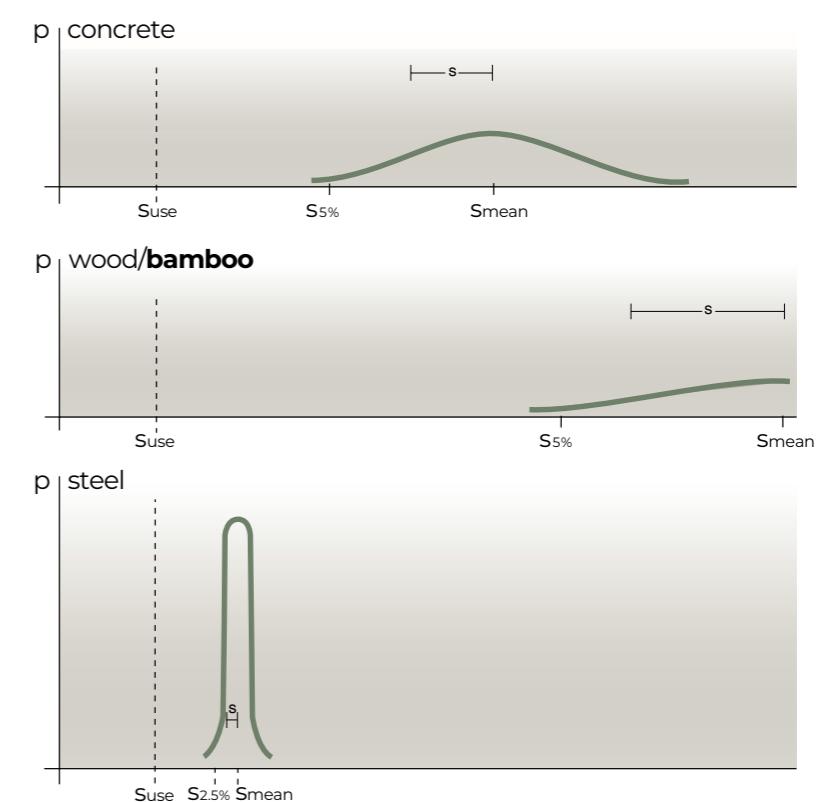


Figura 60. "Confronto tra la sicurezza del bambù e quella di altri materiali".

Fonte: INBAR Technical Report No. 20

Nonostante le notevoli prestazioni meccaniche il bambù presenta alcune criticità legate alla sua natura organica e alla variabilità biologica (Minke, 2016) è, pertanto, sensibile all'umidità, al degrado biologico e, in misura rilevante, al fuoco. Essendo un materiale vegetale, risulta naturalmente combustibile e tende a propagare rapidamente la fiamma, anche a causa della sua struttura cava. L'esposizione a temperature elevate provoca la pirolisi della lignina e dell'emicellulosa, con conseguente perdita di massa, fessurazioni e riduzione delle prestazioni meccaniche (Xu et al., 2025). Tuttavia, la formazione di uno strato carbonizzato superficiale rallenta la propagazione del fuoco, comportandosi in modo analogo al legno (Sharma et al., 2015).

La presenza di acido silicico nelle pareti del culmo conferisce al bambù una resistenza naturale alla combustione, ma non sufficiente a garantirne la sicurezza in applicazioni strutturali non trattate (Minke, 2016). Necessita trattamenti ignifugi a base di sali minerali, acido borico, composti organici o resine naturali, al fine di migliore le prestazioni di sicurezza (Xu et al., 2025). Parallelamente, l'ingegnerizzazione del materiale consente di ridurre le vulnerabilità legate all'umidità, al degrado e alla combustione.

Un ulteriore aspetto riguarda la salubrità del materiale. Il bambù naturale è intrinsecamente sicuro e non tossico, impiegato da secoli nella produzione di oggetti d'uso quotidiano, tessuti e perfino come alimento (Liese & Köhl, 2015). Le criticità ambientali emergono piuttosto nei prodotti ingegnerizzati, dove l'impiego di resine sintetiche o additivi chimici può generare emissioni di VOC (Complessi Organici Volatili) o odori sgradevoli. Tuttavia, studi recenti mostrano che i materiali a base di bambù emettono quantità inferiori di sostanze nocive rispetto alle alternative convenzionali, e in alcuni casi assorbono formaldeide indoor, contribuendo al benessere e alla qualità dell'aria (Lugt, 2017).

Dal punto di vista costruttivo e sismico, la progettazione di edifici in bambù segue principi analoghi a quelli delle strutture in altri materiali, ma richiede alcune accortezze specifiche per garantirne la stabilità e la sicurezza (Minke, 2016) (cfr capitolo 6.3).

### 2.3.5. Il profilo ambientale

Il soprannome "acciaio vegetale" attribuito al bambù non deriva unicamente dalle sue prestazioni meccaniche, ma anche dal suo profilo ambientale, fortemente legato ai principi della sostenibilità.

Come evidenziato da Lugt (2017), l'analisi della sostenibilità del bambù può essere interpretata attraverso due prospettive complementari: il "lato del debito ambientale" e il "lato del credito ambientale", che insieme definiscono un bilancio ambientale complessivo del materiale. Questi due approcci rappresentano rispettivamente "dove siamo ora" e "dove vogliamo arrivare" nel percorso verso una transizione energetica.

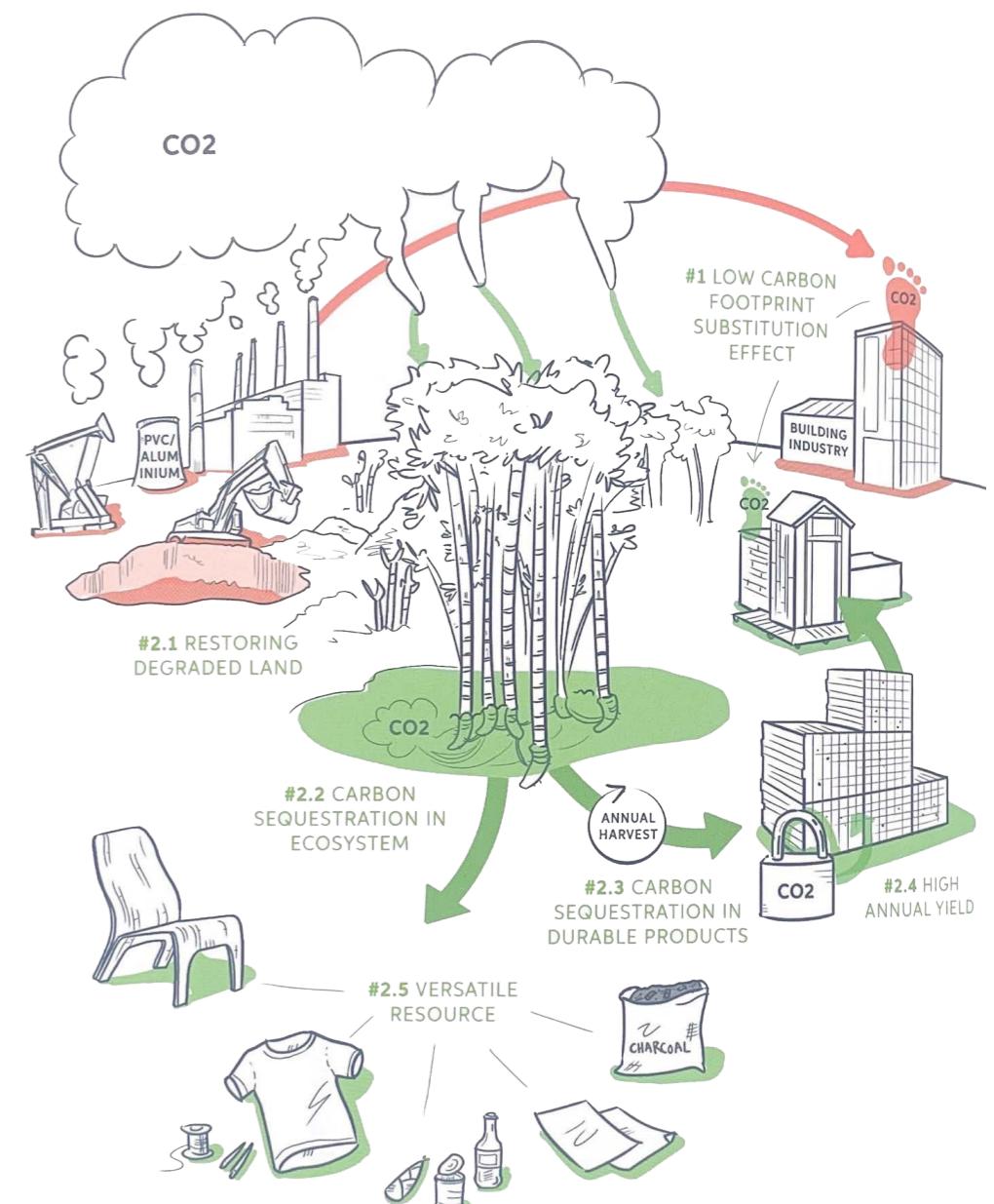


Figura 61. "Overview of bamboo's sustainability benefits". Fonte: Lugt, 2017

### **Debito ambientale:** impatto ambientale

Il lato di debito si concentra sulla valutazione dei danni ambientali associati alla produzione e all'uso del materiale, attraverso strumenti di analisi consolidati come la "Life Cycle Assessment" (LCA) e il calcolo dell'impronta di carbonio. L'obiettivo è incrementare l'eco-efficienza, ovvero ridurre al minimo l'onere ambientale associato a ogni fase del ciclo di vita del prodotto.

Da questo punto di vista, il bambù si distingue per la bassissima impronta di carbonio. Tale caratteristica deriva sia dalla sua crescita rapida e dall'elevata capacità di sequestro di CO<sub>2</sub>, sia dal potenziale effetto di sostituzione rispetto a materiali ad alta intensità di emissioni con conseguente riduzione significativa delle emissioni nel settore edilizio. Se questo effetto venisse formalmente incluso negli accordi climatici, rappresenterebbe un incentivo decisivo all'adozione del bambù e di altri materiali bio-based nelle costruzioni. Durante la crescita, la CO<sub>2</sub> viene stoccati nella biomassa epigea (culmi e foglie), nelle radici e nel suolo. Dopo la raccolta, questa CO<sub>2</sub> resta intrappolata nei prodotti derivati, fino al momento dello smaltimento o della combustione. In scenari di fine vita come l'incenerimento in centrali elettriche, il bambù rilascia il carbonio stoccati generando elettricità o calore che possono sostituire energia da fonti fossili, fornendo così un credito di carbonio e contribuendo a un'impronta complessivamente negativa. (beneficio #1 in figura 61).

Un ulteriore contributo positivo deriva dalla capacità del bambù di rigenerare terreni degradati o pendii erosi, aumentando la capacità di sequestro di carbonio e migliorando la qualità del suolo. Nonostante ciò, poiché il bambù è botanicamente classificato come erba, esso viene spesso escluso dalle valutazioni forestali e marginalizzato nei dibattiti sul cambiamento climatico.

Numerosi studi (Lugt, 2017; INBAR, 2019) hanno tuttavia dimostrato che, a livello ecosistemico, le foreste di bambù possiedono riserve di carbonio paragonabili a quelle delle specie arboree nelle stesse condizioni climatiche. Un aspetto importante riguarda la gestione delle foreste di bambù. In foreste non gestite, i culmi maturi invecchiano e decadono, impedendo la crescita di nuovi germogli. Questo porta rapidamente a un equilibrio che riduce drasticamente la capacità di accumulo di carbonio. Una gestione sostenibile delle piantagioni, con raccolte periodiche e impiego dei culmi in prodotti durevoli, è quindi essenziale per massimizzare i benefici climatici e mantenere nel tempo l'assorbimento netto di CO<sub>2</sub> (Lugt, 2017).

### **Credito ambientale:** contributo alla bioeconomia e alla rigenerazione ambientale

Il lato di credito riguarda i benefici rigenerativi generati dal bambù, interpretandolo come risorsa attiva per l'economia circolare (già introdotta nel capitolo 2.1) e la filosofia Cradle to Cradle (C2C).

Grazie alla sua rapida crescita e all'elevata resa, il bambù può incrementare la superficie produttiva mondiale riportando in vita terreni degradati o

marginali, spesso non adatti ad altre colture. (beneficio #2.1 in figura 61). L'esteso apparato radicale del bambù stabilizza i suoli, riduce l'erosione e migliora la capacità di ritenzione idrica, favorendo il ripristino degli ecosistemi e la ricarica delle falde freatiche.

Lugt (20147) sottolinea l'importanza di adottare tali pratiche esclusivamente su terreni degradati e mai a scapito delle foreste naturali (Janssen, 2000).

Come mostrato in Figura 61, questi effetti si riflettono in diversi benefici ambientali, economici e sociali.

Essendo una pianta erbacea perenne, il bambù può essere raccolto annualmente senza danneggiare la pianta madre, garantendo una produzione continua. Secondo INBAR (2019), piantagioni ben gestite operano come veri e propri serbatoi di carbonio con benefici che operano a due scale: a livello locale, contribuendo al recupero di terreni erosi e impoveriti; a livello globale, supportando gli impegni internazionali per il clima, come la Bonn Challenge (che punta a restaurare 350 milioni di ettari di paesaggi degradati entro il 2030) e l'Accordo di Parigi (INBAR, 2019; Lugt, 2017).

Oltre al sequestro di CO<sub>2</sub> antropogenica (beneficio dell'ecosistema #2.2 in figura 60) così come nei prodotti durevoli realizzati con materiali raccolti annualmente in modo sostenibile (beneficio #2.3 in figura 61), il bambù offre vantaggi in termini di produttività (beneficio #2.4 in figura 61). La sua crescita rapida permette rese elevate in tempi brevi, rendendolo una coltura altamente efficiente. La fibra ottenuta è estremamente versatile e trova applicazione in numerosi settori industriali cruciali per l'umanità: edilizia, tessile, produzione della carta, fino all'energia (beneficio #2.5 in figura 61). Queste caratteristiche ne fanno una materia prima rinnovabile capace di sostituire risorse ad alta intensità di carbonio, riducendo al contempo la pressione sugli ecosistemi forestali.

La coltivazione e la trasformazione del bambù generano importanti ricadute socio-economiche nei paesi produttori, spesso caratterizzati da elevati livelli di povertà. L'espansione di filiere legate al bambù può dunque contribuire non solo alla sostenibilità ambientale, ma anche allo sviluppo inclusivo delle comunità locali (Lugt, 2017).

Un ulteriore aspetto di rilievo è la biomassa del bambù, che varia in funzione della specie, del clima e della qualità del suolo. Secondo Liese (1985) e Janssen (2000), la biomassa totale può raggiungere valori compresi tra 50 e 100 tonnellate per ettaro, con una distribuzione media del 60-70% nei culmi, 10-15% nei rami e 15-20% nelle foglie.

Per la specie *Gigantochloa scorchedii* in Malesia, Abd. Razak (1992) riporta una densità della materia secca pari a 0,54 kg/m<sup>3</sup>, confermando la notevole efficienza produttiva del materiale anche in contesti naturali non intensivi.

Questi dati dimostrano come il bambù non sia soltanto una risorsa vegetale a basso impatto, ma anche un materiale strategico per il futuro delle costruzioni sostenibili, capace di coniugare prestazioni strutturali, benefici ambientali e potenzialità economiche.

## 2.4. Potenzialità dell'uso del bambù in architettura

*“Dal cucchiaio alla città”*

è un'espressione coniata nel 1952 da Ernesto Nathan Rogers nella “Carta di Atene”, con la quale l'architetto milanese sintetizzava l'approccio progettuale integrato e trasversale dell'architettura moderna: la capacità di un progettista di confrontarsi con la scala minuta di un cucchiaio e con quella complessa di un grattacielo.

Questo principio fu successivamente ripreso e approfondito da Walter Gropius nel 1919, in Germania, all'interno del Bauhaus, scuola destinata a ridefinire il rapporto tra arte, artigianato e industria. Lo slogan “dal cucchiaio alla città” divenne così emblema di un metodo progettuale unitario, in cui il medesimo pensiero guida la concezione di un oggetto d'uso quotidiano come quella di un'intera struttura urbana.

In modo analogo, il bambù incarna oggi questa visione di continuità tra le diverse scale del progetto. Grazie alla sua versatilità, alla facilità di lavorazione e alla capacità di adattarsi a contesti climatici e culturali differenti, esso si configura come un materiale interscalabile, capace di attraversare il campo dell'arredo, dell'edilizia e delle infrastrutture leggere. Dalla produzione di piccoli oggetti e componenti d'arredo fino alla costruzione di edifici complessi e opere comunitarie, il bambù dimostra come un materiale naturale possa essere protagonista di un linguaggio architettonico coerente e sostenibile.

In ciascuno dei casi studio precedentemente analizzati è emerso come l'impiego del bambù, soprattutto in quei contesti in cui esso cresce spontaneamente, rappresenti una risorsa capace di rispondere in modo efficace alle sfide poste dalla crisi climatica. I pali di bambù, in particolare, figurano tra i materiali da costruzione più sostenibili disponibili, con un'impronta di carbonio dalla culla al cancello pari a soli 0,20 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg se impiegati localmente (van der Lugt e Vogtländer 2015). Inoltre, qualora non trattati con conservanti o rivestimenti sintetici, essi risultano completamente biodegradabili.

Tra le potenzialità ambientali del bambù vi è l'elevata capacità di sequestro di carbonio, l'incremento della sostanza organica del suolo ed il controllo dell'erosione grazie a rizomi fittamente ramificati che contribuiscono ad un miglioramento della qualità idrologica attraverso l'intercettazione delle precipitazioni e il controllo del deflusso. Piantagioni ben gestite hanno mostrato incrementi significativi nel miglioramento della fertilità in terreni degradati; in alcuni casi la biomassa e l'accumulo di carbonio delle piantagioni di bambù risultano notevoli e confrontabili a molte foreste arboree (INBAR, 2014). Queste potenzialità rendono il bambù uno strumento utile per interventi di bioingegneria del suolo e dell'acqua, in particolare in aree montane e ripariali soggette a erosione e frane (Panmei et al., 2025).

Altri vantaggi sono di aspetto operativo e socio-economico: il bambù

è facilmente reperibile in molte regioni tropicali e subtropicali e la filiera (coltivazione, raccolta, trasformazione) genera opportunità di lavoro locali che contribuiscono a ridurre i costi di trasporto e di materia prima rispetto a materiali industriali importati. I casi studio presentati in questo lavoro dimostrano come lavorazioni semplici e tecniche di prefabbricazione consentono soluzioni a basso impatto energetico ed efficaci (Hunnarshala Foundation, 2013; INBAR; Gernot, 2016).

Fino a tempi relativamente recenti, l'assenza di una normativa uniforme ha rappresentato un limite concreto alla diffusione di applicazioni strutturali standardizzate; tuttavia, negli ultimi anni sono stati sviluppati standard internazionali, quali la **ISO 22157** per la determinazione delle proprietà fisiche e meccaniche e la **ISO 22156** per la progettazione strutturale, affiancati da norme nazionali emergenti, ad esempio la **UNI 11842**. In questo contesto, riveste un ruolo strategico l'*International Bamboo and Rattan Organisation* (INBAR), associazione intergovernativa indipendente fondata nel 1997 con l'obiettivo di promuovere lo sviluppo sostenibile e ridurre la povertà mediante l'uso innovativo di bambù e rattan. Attualmente, INBAR comprende 47 Stati membri, distribuiti principalmente in Asia, Africa e America Latina, e rappresenta un punto di riferimento essenziale per la diffusione di pratiche progettuali sostenibili e basate su materiali rinnovabili.

## 2.4.1. Processi lavorativi

La sequenza del ciclo di vita del bambù mostrato in Figura 62 illustra la potenzialità del materiale in un modello di economia circolare, in cui il riuso e la valorizzazione dei sottoprodotto riducono l'impatto ambientale complessivo e aumentano la sostenibilità dei sistemi costruttivi.

A seguito delle fasi di lavorazione e produzione, che verranno approfondite successivamente, si colloca la fase di costruzione, durante la quale il bambù può fungere da elemento strutturale principale oppure essere impiegato in superfici e sistemi secondari. Nel corso della fase d'uso, se adeguatamente trattato e mantenuto, il bambù può raggiungere una durabilità dell'ordine di diversi decenni, risultando comparabile ad alcune tipologie di strutture lignee.

Al termine del ciclo di vita, il disassemblaggio consente un efficace recupero dei componenti. I culmi possono essere riutilizzati in nuove applicazioni edilizie oppure trasformati in prodotti secondari.

Il materiale residuale può inoltre essere destinato alla pacciamatura, contribuendo al miglioramento del suolo, oppure impiegato come biocombustibile, chiudendo così il ciclo in un'ottica pienamente circolare e minimizzando la produzione di rifiuti.

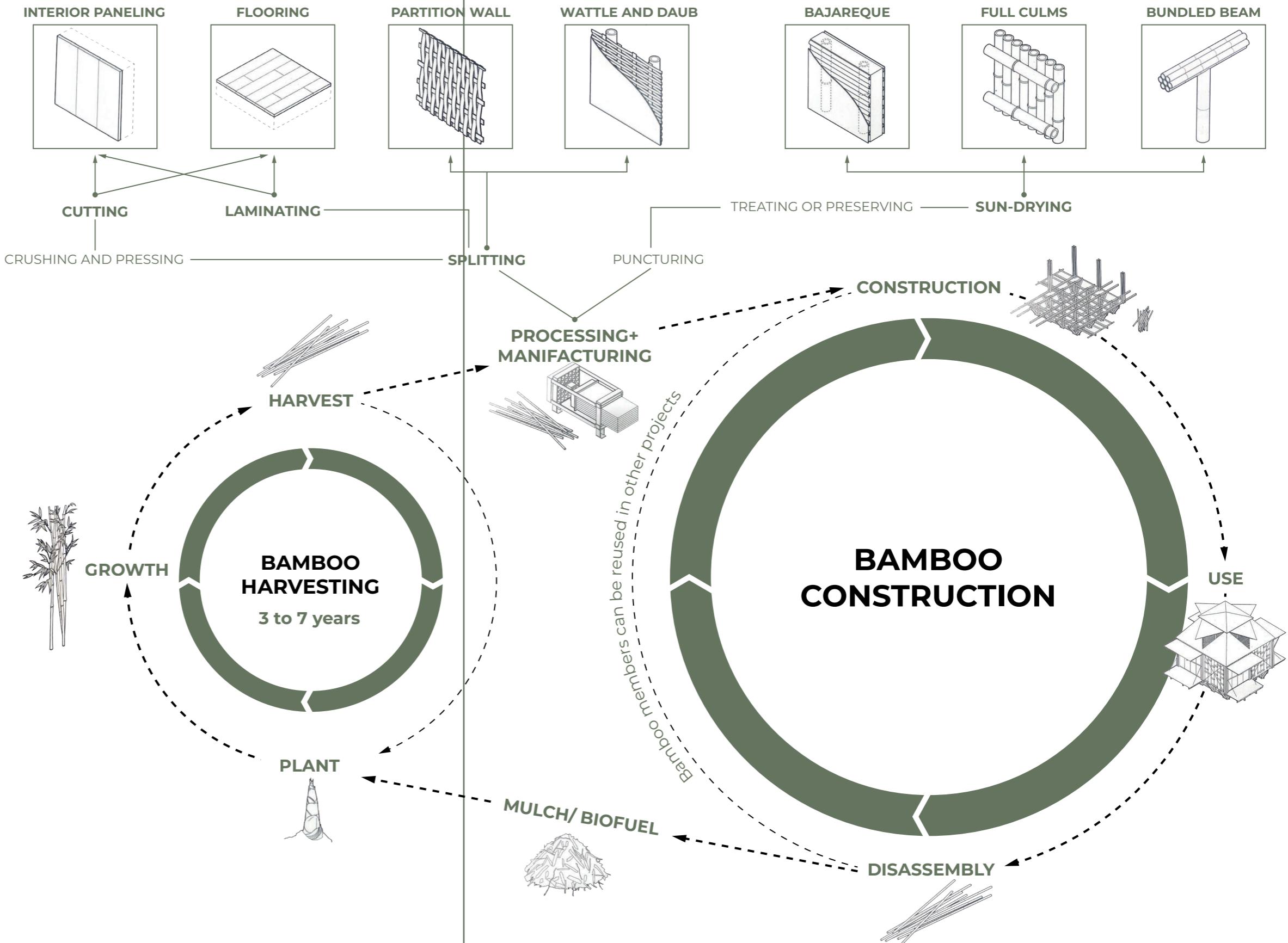


Figura 62. "Ciclo di vita del bambù".

Fonte: "Manual of Biogenetic House Section" (Lewis, 2022), in parte rielaborato dall'autore della tesi

Di seguito verrà proposta un'analisi più approfondita dei processi di lavorazione, con l'obiettivo di delineare un quadro complessivo più dettagliato. A tal fine, sono stati assunti come riferimenti principali tre testi fondamentali: Minke (2016), Hidalgo (1981) e Lewis (2022).

## /Processi lavorativi del bambù e trattamenti di conservazione

Il bambù rappresenta uno dei materiali bio-based più interessanti in ottica sostenibile, grazie alla sua crescita estremamente rapida e alla capacità di raggiungere dimensioni utilizzabili in pochi anni, in netto contrasto con i tempi molto più lunghi del legname tradizionale. La letteratura evidenzia come il bambù possa sequestrare quantità significative di carbonio proprio in virtù del suo tasso di accrescimento, superiore a quello degli alberi (Tsurumaki & Lewis, 2022) ("growth" in Figura 62). Tradizionalmente impiegato in forma di culmo intero, il materiale può essere utilizzato come elemento strutturale, trasformato in superfici e pannelli, oppure processato in strisce, lamelle e prodotti laminati o intrecciati, ampliandone notevolmente le possibilità applicative.

### Fasi di raccolta e preparazione dei culmi

La fase di "harvest" (Figura 62) avviene una volta raggiunta la maturità fisiologica, generalmente tra i tre e i sette anni, e senza l'uso di macchinari pesanti, permettendo la rigenerazione spontanea del bambuseto (Lewis et al., 2022). Una volta selezionati e raccolti dalla foresta i culmi di diametro adeguato, inizia il **processo di lavorazione/produzione** volto a garantire maggiore longevità al materiale. In questa fase si distinguono differenti opzioni: la perforazione, trattamento o conservazione ed essiccazione.



Figura 63. "Puncturing holes in all the nodes of the bamboo".  
Photo by: Stéphane Schröder © www.guaduabamboo.com

La **perforazione** dei setti interni viene effettuata attraverso delle aste metalliche per rompere le pareti interne e consentire al liquido conservante di diffondersi in modo omogeneo.

Successivamente avviene il **trattamento** conservativo tramite immersione dei culmi in soluzioni a base di borace e acido borico per ridurre il rischio di attacchi di muffe, termiti e insetti xilofagi.



Figura 64. "Adding bamboo poles to our treatment tank".  
Photo by: Stéphane Schröder © www.guaduabamboo.com

Infine, i culmi vengono lasciati **essiccare** al sole contro una superficie verticale al fine di garantire la corretta stabilizzazione del materiale prima dell'impiego.

Tale passaggio è fondamentale ma anche critico, poiché il bambù, essendo un materiale igroscopico<sup>20</sup>, tende ad assorbire nuovamente umidità se

esposto a condizioni ambientali avverse.

Questo fenomeno può compromettere la qualità del materiale in quanto un contatto diretto e prolungato con l'acqua porta alla comparsa di fessurazioni, scolorimenti e, nel tempo, a un progressivo degrado delle cellule. Proprio per questo l'umidità residua è considerata un indicatore utile anche per stimare lo stato di degrado delle fibre, che con il tempo aumentano la propria capacità di imbibizione<sup>21</sup>. Per mitigare questi rischi si ricorre a rivestimenti superficiali resistenti all'acqua e ai raggi UV oppure a metodi tradizionali, come l'applicazione di un rivestimento di fango o letame, tuttora utilizzati in molte comunità rurali.

<sup>20</sup> In fisica e chimica, indica una sostanza che, esposta all'aria, è capace di assorbire l'umidità, cioè l'acqua allo stato di vapore in essa presente, sia perché entra con questa in combinazione chimica (per es., l'ossido di calcio, il cloruro di magnesio, l'acido solforico) sia per semplice adsorbimento (per es., il gel di silice, certi tessuti animali e vegetali). L'avvenuto assorbimento si manifesta spesso con mutamenti di aspetto, di dimensioni, di colore, che vengono opportunamente sfruttati nella fabbricazione di igrometri (Encyclopédia Treccani).

<sup>21</sup> L'assorbimento di un liquido da parte di un corpo o di una sostanza, senza che si verifichi alcuna reazione chimica.



Figura 65. "Sun bleaching bamboo poles".  
Photo by: Stéphane Schröder © www.guaduabamboo.com

Tali trattamenti risultano più efficaci quando affiancati da strategie progettuali adeguate, come evitare il contatto diretto tra bambù e terreno ed assicurare un'efficace protezione da funghi, muffe e termiti (Hodgkin & Prideaux, 2018). I culmi trattati e correttamente essiccati possono essere impiegati direttamente nella loro forma intera come elementi strutturali oppure aggregati in superfici e assemblaggi di vario tipo.

### Lavorazioni avanzate e prodotti ingegnerizzati

Oltre all'uso del culmo intero, esistono processi industriali per ottenere prodotti ingegnerizzati. La **spaccatura** dei culmi avviene attraverso uno "splitter" metallico a forma di stella e produce listelli che vengono appiattiti, mentre i nodi possono essere o rimossi o trasformati in filamenti.



Figura 66. "Bamboo Splitter". Fonte: Immagine web

La **frantumazione e pressatura** consiste nella frantumazione delle doghe di bambù grezzo in filamenti che vengono successivamente raggruppati e immersi in adesivi, così da garantire un'adeguata coesione del materiale. Questi filamenti vengono poi compressi meccanicamente ad alta pressione, dando origine a blocchi di bambù intrecciato che costituiscono una base versatile per ulteriori lavorazioni. Da tali blocchi, tramite operazioni di taglio, si ricavano elementi utilizzabili in differenti applicazioni, tra cui pannelli, pavimentazioni e componenti strutturali. In molti casi, il materiale viene anche sottoposto a trattamenti termici, utili a incrementarne la durabilità e a migliorarne le prestazioni soprattutto negli impieghi esterni, dove l'esposizione agli agenti atmosferici risulta più critica. Un'ulteriore lavorazione è la **laminazione**, in cui le lamelle vengono trattate termicamente e pulite per poi essere incollate verticalmente o orizzontalmente. Successivamente, queste lamelle vengono stratificate e pressate, fino a ottenere fogli omogenei che possono essere impiegati in diverse applicazioni strutturali e non strutturali. (Lewis et al., 2022).

### Stagionatura e controllo dell'umidità

Nell'impiego strutturale del bambù, la fase di stagionatura rappresenta un passaggio essenziale. Essa permette infatti di ridurre gradualmente il contenuto di umidità dei culmi, avvicinandolo ai valori tipici delle condizioni di esercizio. Questo processo non solo migliora la resistenza del materiale all'attacco di funghi e insetti, ma limita anche il rischio di fenomeni di restringimento non uniforme o di fessurazioni che potrebbero compromettere le connessioni tra gli elementi (Janssen, 2000).

La stagionatura dovrebbe avvenire preferibilmente in prossimità del luogo di raccolta, prima del trasporto verso l'area di utilizzo, in modo da stabilizzare il materiale e ridurre i rischi connessi alle variazioni termo-igrometriche durante il ciclo di vita del manufatto. Per i culmi di grande diametro, la sola essiccazione per stoccaggio può richiedere diversi mesi; per questo motivo, in contesti produttivi più organizzati, è possibile ricorrere a essiccatori solari o a forni, riducendo sensibilmente i tempi senza compromettere la qualità del materiale.

### Durabilità e trattamenti: metodi naturali e chimici

La durabilità del bambù è fortemente influenzata dalla specie, dal contenuto di zuccheri e dalla durezza del culmo: le specie più "dolci" risultano più appetibili per insetti e funghi, mentre quelle più "amaro" e dure tendono a essere meno soggette a degradazione biologica. Senza trattamenti adeguati, un elemento esposto può degradarsi anche nel giro di tre anni se collocato in ambiente esterno senza contatto con il terreno; l'utilizzo di sali di boro può estendere la vita utile fino a circa quindici anni e, combinando più tecniche, è possibile raggiungere una durabilità di trenta anni (Schröder, 2012; Kaminski et al., 2016). Alcune esperienze riportano risultati ancora più significativi: in India, una struttura in bambù trattata con CCA ha mantenuto la propria integrità per oltre quarant'anni (Kumar et al., 1994).

I trattamenti disponibili si dividono in naturali e chimici, ognuno con specifici vantaggi e limiti. La scelta dipende da diversi fattori: lo stato dei culmi (verdi o secchi), la forma del prodotto (se culmi interi o bambù spartito), l'uso finale (strutturale o non strutturale, interno o esterno), la quantità di materiale da trattare, il tempo disponibile, il budget e le principali cause di degrado attese.

Tra i **metodi naturali** si annoverano:

- Stagionatura in cespuglio (o per traspirazione): i culmi vengono recisi e lasciati in posizione verticale nel bambuseto per circa otto giorni. Durante questo periodo, la fermentazione degli zuccheri e dei carboidrati genera alcol, contribuendo ad allontanare gli insetti.
- Stagionatura per immersione in acqua: i culmi appena raccolti sono immersi in acqua per diverse settimane, così da favorire la dispersione di zuccheri e amidi. Un effetto collaterale può essere la comparsa di macchie sulla superficie esterna del culmo.
- Cottura: l'esposizione al calore, generalmente ponendo il bambù sopra una

brace o all'interno di forni a gas, viene spesso impiegata per modificarne la curvatura. Il calore elimina insetti e funghi, ma può provocare fessurazioni.

- Affumicatura: l'esposizione per pochi minuti in camere di calore provoca un cambiamento della colorazione del culmo.
- Incalzinatura: consiste nell'applicazione di uno strato di calce sulla superficie esterna, aumentando l'impermeabilità del bambù e la sua resistenza all'attacco degli insetti.
- Immersione nel fango: tecnica utile per ridurre il contenuto di amidi, sostanze di cui gli insetti si nutrono.

Essendo tecniche tradizionalmente adottate nei paesi in cui il bambù costituisce una risorsa storica, queste procedure risultano semplici da realizzare ed economicamente vantaggiose. Sono efficaci nel ridurre parzialmente il contenuto di amidi e nel contribuire alla stabilizzazione del culmo; tuttavia, il loro effetto è limitato e non offre un livello di protezione adeguato per applicazioni strutturali permanenti. Inoltre, l'assorbimento dei preservanti risulta ulteriormente ostacolato dal fatto che avviene attraverso i vasi conduttori, i quali tendono a chiudersi entro circa un giorno dal taglio del culmo. Di conseguenza, il trattamento deve essere effettuato nelle primissime ore successive alla raccolta.

I **trattamenti chimici** risultano generalmente più efficaci e comprendono sia metodi a breve termine (spray, pennello, immersione rapida) sia a lungo termine, come:

- Immersione: il culmo viene completamente immerso per circa otto settimane in una soluzione di acido borico e borace (2-4%); talvolta vengono aggiunti anche solfati di rame o cromato di zinco.
- Diffusione verticale: disponendo il bambù in posizione verticale e forando i nodi, si introduce quotidianamente per 14 giorni una soluzione di pentaborato (4-6%). È fondamentale verificare che il materiale non presenti fessure o perforazioni, che provocherebbero la fuoriuscita del preservante.
- Bollitura: il bambù viene immerso in una soluzione di soda caustica mantenuta tra 94 e 100 °C per circa 30 minuti; immersioni più prolungate possono deteriorare il materiale.
- Trattamento in pressione: tramite autoclave si accelera la penetrazione della soluzione di pentaborato, applicando pressioni comprese tra 0,5 e 1,5 N/mm<sup>2</sup>.
- Metodi Boucherie: il preservante viene iniettato direttamente nei vasi conduttori del culmo; quando si utilizza una pompa o un compressore si parla di metodo Boucherie modificato.
- Metodo per traspirazione delle foglie: consiste nel far assorbire la soluzione preservante attraverso le foglie; richiede tempi lunghi e un elevato quantitativo di prodotto.
- Trattamento caldo-freddo: prevede l'immersione alternata del bambù (in tavole o in strisce) in una soluzione a 100 °C e poi a temperatura ambiente.

Queste tecniche mirano tutte all'introduzione del composto preservante all'interno della parete del culmo. I preservanti per impieghi interni (*non-fixing types*), come boro, borato di sodio e acido borico, sono meno persistenti; quelli destinati all'uso esterno (*fixing types*), come arsenocromato di rame o arseniato di rame ammoniacale, offrono maggiore resistenza ma comportano rischi più elevati per l'uomo e l'ambiente. Per questo motivo si stanno sperimentando alternative meno pericolose: ad esempio, benché il boro sia naturalmente presente in alcune forme, la sua elevata solubilità ne favorisce la fuoriuscita dai culmi in condizioni di forte umidità, riducendo l'efficacia del trattamento (Schroder 2012). Parallelamente, i preservanti a base di rame vengono formulati oggi senza arsenico e cromo, risultando meno tossici; sono efficaci contro funghi, termiti e coleotteri e vengono assorbiti agevolmente dal bambù, rendendoli idonei per l'esterno. Tuttavia, richiedono trattamenti a pressione semi-industriali, con costi più elevati. Una complicazione ulteriore deriva dall'alto contenuto di silice del bambù, che rende difficile la penetrazione di molti preservanti.

Nel complesso, mentre i metodi naturali sono economicamente vantaggiosi ma poco efficaci nel lungo periodo, i trattamenti chimici offrono prestazioni superiori ma richiedono maggiore attenzione, sia in termini ambientali sia di gestione dell'intero ciclo di vita del materiale. Un approccio combinato risulta quindi la strategia più adeguata per aumentare in modo significativo la durabilità delle strutture in bambù. (Laverde, 2011).

## / Canne, assi, listelli e cinghie

Il culmo è la forma più immediata di utilizzo del bambù. Una volta privato di rami, foglie e rizoma, viene impiegato come **canna** intera per colonne, travi e sistemi tridimensionali, soprattutto sfruttando la parte basale del fusto, caratterizzata da maggiore spessore e migliore rapporto tra diametro e lunghezza dell'internodo. La forma cava del culmo, spesso considerata un limite, diventa invece un vantaggio in termini di leggerezza e comportamento flessionale.

Dalle porzioni intermedie del fusto si ricavano le **assi** (o tavole), ottenute tramite tagli longitudinali che permettono l'apertura della canna in un elemento piano. La Figura 67 mostra il metodo più efficace per l'essiccazione e la conservazione della tavola. Per realizzare con successo una tavola, è necessario utilizzare bambù maturo, tagliato di recente e sufficientemente umido. Storicamente utilizzate come superfici di tamponamento nelle abitazioni rurali, oggi trovano impiego anche come casseforme economiche o come pannelli leggeri nelle chiusure verticali, in particolare in America Latina.

Le **strisce** e i **listelli** derivano dalla suddivisione longitudinale delle canne. Le prime, più sottili, possono essere intrecciate (Figura 68) o piegate dopo ammollo in acqua per alcune ore; i secondi, ottenuti rimuovendo la parte esterna e il tessuto interno, presentano una sezione rettangolare più idonea a processi di laminazione. Le **cinghie** (Figura 69) sono segmenti longitudinali della parte esterna delle canne molto più stretti dei listelli, normalmente larghi fino a 1 cm, e mantengono un'elevata flessibilità e una buona resistenza alla trazione, risultando utili come legature e sistemi di connessione meccanica. Da queste lavorazioni è evidente come l'impiego di questo materiale permetta di ottenere una grande varietà di elementi funzionali, con un grado di energia incorporata minimo e un'elevata potenzialità di riuso.



Figura 67. "Drying and storing the plank"



Figura 68. "Weave of bamboo strips"

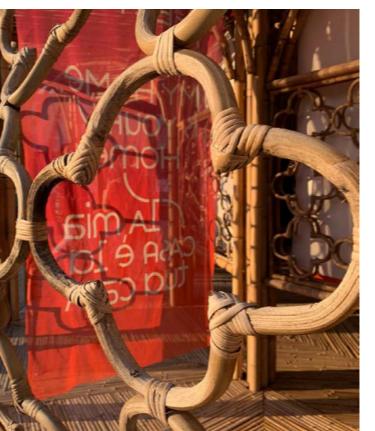


Figura 69. "Bamboo belts used to join strips". Foto dell'autore della tesi

Photo 67, 68 by: Stéphane Schröder © www.guaduabamboo.com

## Elementi laminati

Negli ultimi decenni l'industria del bambù ha conosciuto un'evoluzione significativa grazie allo sviluppo di tecniche di laminazione e compressione, che hanno permesso di trasformare un materiale naturalmente eterogeneo in prodotti ingegnerizzati dotati di prestazioni elevate e maggiore standardizzazione. Gli elementi laminati quali assi, tavole, colonne, travi e pannelli, sono ottenuti principalmente da listelli ricavati dalla lavorazione del culmo: l'interno e l'esterno delle strisce vengono rimossi per ottenere pezzi a sezione rettangolare (Figura 70), successivamente uniti mediante adesivi sintetici o, in alcune applicazioni sperimentali, tramite sistemi di giunzione meccanica come bulloni in legno.

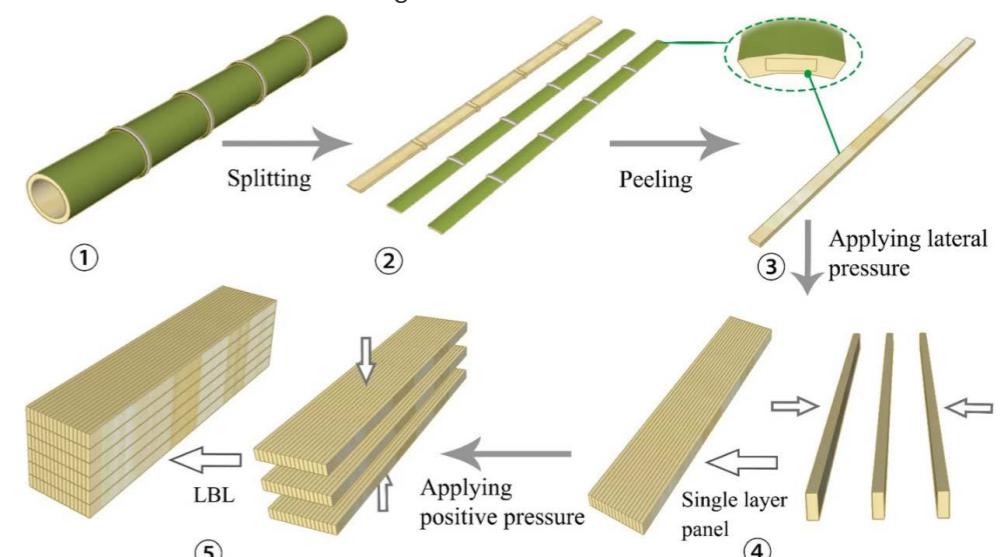


Figura 70. "LBL processing schematic diagram". Fonte: Chen et al., 2023. <https://doi.org/10.1007/s10570-023-05480-6>

In Cina i pannelli di bambù laminato sono prodotti su scala industriale fin dagli anni Ottanta. Secondo Hidalgo (2003), tali pannelli sono costituiti da tre o cinque strati di strisce di 4-5 mm di spessore, incollate ortogonalmente in modo alternato con resine a base di fenolo-formaldeide o urea-formaldeide e consolidate mediante pressione e calore.

Questo processo consente di ottenere densità particolarmente elevate, fino a  $1.200 \text{ kg/m}^3$ , e garantisce caratteristiche di impermeabilità che permettono ai laminati di sostituire legni duri provenienti da foreste primarie, con un potenziale beneficio in termini di conservazione delle risorse forestali.

Gli studi sulle prestazioni meccaniche dei laminati mostrati da López e Correal (2009) riportano, per il "guadua" laminato con densità media pari a  $715 \text{ kg/m}^3$  e contenuto di umidità del 12%, una resistenza alla trazione parallela alla fibra pari a 132 MPa e un modulo elastico in trazione di circa 17.468 MPa. La resistenza alla compressione parallela alla fibra raggiunge i 48 MPa, mentre quella perpendicolare si attesta intorno ai 5 MPa.

Questi dati confermano una marcata anisotropia: la resistenza alla trazione parallela alla fibra è fino a 120 volte maggiore rispetto alla direzione perpendicolare, mentre la resistenza alla compressione parallela può risultare fino a dieci volte superiore a quella perpendicolare. Tali valori collocano

il bambù laminato in un intervallo prestazionale paragonabile, e talvolta superiore, a quello di alcuni legni duri tradizionalmente impiegati in edilizia (cfr. capitolo 2.3).

Come prima citato, tutti i prodotti in bambù ingegnerizzato richiedono l'impiego di resine o laminati per la loro realizzazione, spesso le stesse colle sintetiche utilizzate nell'industria dei pannelli lignei, come melammina-urea-formaldeide, fenolo-formaldeide (PF) o isocianato polimerico in emulsione. La percentuale in peso della colla varia sensibilmente a seconda del prodotto: si passa da circa il 2% nei laminati destinati ad applicazioni strutturali, fino al 10% nelle assi per esterni, raggiungendo valori superiori al 40% nei compositi a base di bambù.

Poiché tali adesivi non sono di origine biologica né biodegradabili, il compostaggio non risulta praticabile. In assenza di alternative bio-based, la soluzione di "fine vita" più coerente per questa categoria di prodotti è attualmente il recupero energetico tramite incenerimento controllato, a condizione che avvenga in impianti di bioenergia dotati di sistemi per la cattura dei fumi e delle emissioni nocive. Va tuttavia sottolineato che i prodotti durevoli in bambù presentano spesso una vita utile superiore ai 25 anni, configurandosi come alternativa circolare a materiali abiotici ad elevato impatto, quali il PVC per i pavimenti o i compositi legno-plastica per le superfici esterne. (Figura 71)

Le analisi del ciclo di vita recenti confermano inoltre che i materiali ingegnerizzati in bambù possono presentare un bilancio di carbonio negativo lungo l'intero ciclo (dalla culla alla tomba), anche quando trasportati e impiegati in paesi dell'Europa occidentale come i Paesi Bassi (van der Lugt e Vogtländer, 2015).

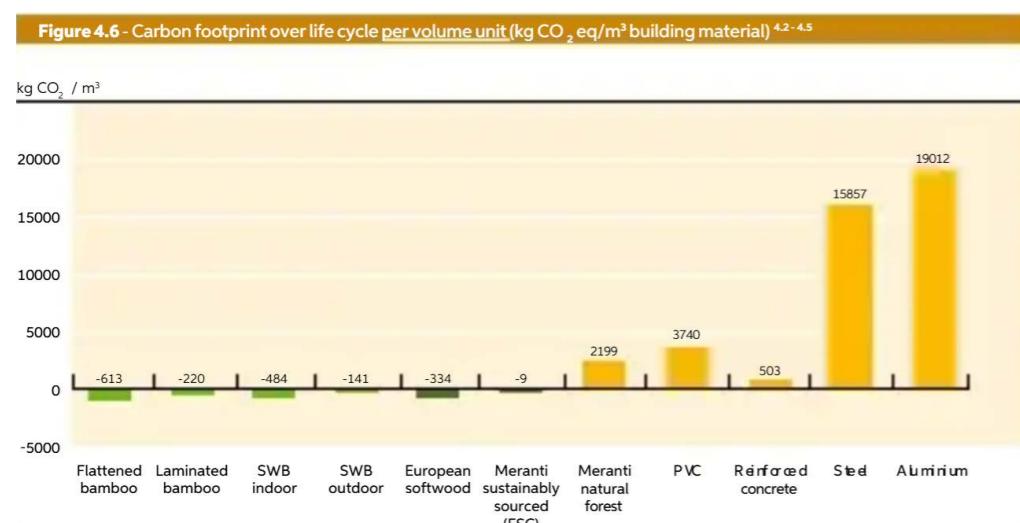


Figura 71. "Carbon footprint over life cycle per volume unit (kg CO<sub>2</sub> -eq/m<sup>3</sup> building material)". Credit: MaterialDistrict (Lugt, 2019) [https://www.inbar.int/wp-content/uploads/2019/12/Bamboo-in-the-Circular-Economy\\_v3\\_10.14.20.pdf](https://www.inbar.int/wp-content/uploads/2019/12/Bamboo-in-the-Circular-Economy_v3_10.14.20.pdf)

## 2.4.2. Applicazioni ed usi

Una volta compresi i processi di lavorazione e trasformazione del bambù, risulta possibile interpretare con maggiore chiarezza la varietà dei suoi impieghi in architettura e nelle costruzioni. Seguendo le elaborazioni di Minke, Hidalgo e Yadav & Mathur (2021), emerge come il bambù possa essere declinato in un ventaglio estremamente ampio di applicazioni, che spaziano dal design di piccoli oggetti d'uso quotidiano "dal cucchiaio" alla realizzazione di sistemi strutturali complessi "alla città".

### Elementi secondari

A livello micro, uno degli utilizzi più diffusi riguarda l'arredo e gli elementi secondari: corrimano, balconi, scale, pannellature interne, ma anche sistemi di apertura per porte e finestre, realizzati tramite telai in canne, intrecci di strisce o tessuti laminati. Queste applicazioni valorizzano la leggerezza del materiale e la facilità con cui può essere modellato e combinato in soluzioni decorative o funzionali.



Figura 72. "Elementi di design" Fonte: Web

Anche le pavimentazioni costituiscono un ambito interessante di applicazione del bambù. Esse possono essere realizzate mediante elementi spaccati, appiattiti o sotto forma di pannelli laminati. Le proprietà isolanti del materiale, abbinate alla rapidità di posa, ne favoriscono l'uso in contesti climatici caldi e umidi. Nelle versioni ingegnerizzate, il bambù offre una valida alternativa ai legni duri tropicali, contribuendo alla riduzione della pressione sulle foreste primarie.



Figura 73. "Floor detail". Credit: Ziegert | Roswag | Seiler Architekten Ingenieure

Figura 74. "Dean Bamboo Flooring". Fonte: Web

## Elementi strutturali

1) Colonne: essendo elementi compressi posti verticalmente richiedono particolare attenzione ai dettagli costruttivi per evitare fenomeni di instabilità o schiacciamento. Una soluzione ricorrente consiste nel riempire la canna con malta cementizia fino al primo nodo per impedirne l'apertura, eventualmente accompagnata da una camicia metallica esterna.

Per ridurre la vulnerabilità all'umidità, il piede della colonna può essere sollevato tramite barre metalliche annigate in malta. In alternativa, al cemento può sostituirsi una miscela di resina epossidica con sabbia o ghiaia. Altre soluzioni prevedono l'inserimento di un nucleo interno rigido, come un tubo d'acciaio o un elemento ligneo, fissato tramite viti o perni in legno.



Figura 75. "Struttura in costruzione". Fonte: Photo by Stéphane Schröder © Guadua Bamboo <https://www.guaduabamboo.com/>

2) Travi, capriate e porticati: una singola canna non è generalmente sufficiente per resistere a flessione su campate significative. Per questo, le travi vengono spesso composte sovrapponendo due o tre canne collegate tramite perni inclinati. Per migliorare la connessione e prevenire fessurazioni, l'appoggio deve avvenire in corrispondenza di un nodo o mediante riempimento dell'estremità con materiali resistenti alla compressione (cemento, malta epossidiche). Tecniche avanzate prevedono estremità coniche dotate di tiranti filettati.

La rigidezza può essere incrementata tramite pretensionamento: una canna inferiore funge da elemento teso in una configurazione simile a travi composite.

Quando i carichi aumentano, il sistema più efficiente è la capriata. Le capriate in bambù permettono di ottenere strutture leggere, ampie e resistenti.



Figura 76. "Dettaglio trave". Fonte: © Hiroyuki Oki. <https://www.archdaily.com/559125/son-la-restaurant-vo-trong-nghia-architects>



Figura 77. "Bamboo Structre of the Arc at Green School Bali". Photo: Tommaso Riva. <https://archello.com/it/news/dettaglio-struttura-in-bambu-dell'arco-della-green-school-di-bali>

3) Archi: La realizzazione di archi in bambù presenta notevoli complessità, poiché piegare intere canne in forma arcuata è un processo difficile da controllare. Per questo motivo, nelle pratiche costruttive è più comune adottare soluzioni basate su strisce di bambù sovrapposte, unite tramite perni o legature, che consentono di ottenere curvature regolari e gestibili.

In questo ambito, le ricerche condotte dal FEB dell'Università di Kassel hanno sperimentato configurazioni particolarmente innovative. Tra queste, la rimozione di cunei nella parte inferiore della canna per facilitare una curvatura controllata e la costruzione di archi composti da strisce collegate tramite pezzi nodali fissati con rivetti POP, in grado di migliorare la continuità strutturale dell'elemento.

I test effettuati su queste soluzioni hanno evidenziato prestazioni sorprendenti grazie alla cura del dettaglio e alla distribuzione più efficace degli sforzi. Tali archi sono risultati capaci di sostenere carichi molto elevati fino a 500 kg senza mostrare deformazioni significative.



Figura 78. "Roofing Systems for Bamboo Buildings". Fonte: BambooU . <https://www.archdaily.com/962225/roofing-systems-for-bamboo-buildings>

4) Solai e tetti: I solai in bambù possono essere realizzati mediante assi ricavate da canne spaccate o appiattite, oppure mediante l'impiego di canne sottili disposte parallelamente. Nei tetti tradizionali, il bambù funge da supporto per coperture leggere (foglie di palma) o per tegole pesanti. La combinazione tra leggerezza e resistenza meccanica ne facilita la messa in opera, mentre l'elevata capacità a trazione e flessione consente di ottenere soluzioni strutturalmente affidabili. Inoltre, la capacità "di piegarsi senza rompersi" lo rende adatto anche a zone sismiche, riducendo il rischio di collassi fragili. (Drunen et al. 2015).

### 5) Pareti e sistemi di tamponamento:

Nelle strutture intelaiate, il bambù svolge il ruolo di montante e traverso, mentre il riempimento costituito da assi, stuoie intrecciate o graticci conferiscono protezione dagli agenti atmosferici. Soluzioni costruttive più recenti reinterpretano tecniche tradizionali integrando terra cruda o intonaci leggeri, offrendo un equilibrio interessante tra innovazione e continuità con i metodi vernacolari. Il bambù è ampiamente impiegato nella realizzazione di pareti divisorie e tamponamenti, dove pilastri e travi costituiscono gli elementi portanti principali. Lo scopo del riempimento è proteggere da animali, vento e pioggia e garantire la privacy, in modo da garantire la completa stabilità della struttura quando esposta a forze orizzontali. L'elevata elasticità del materiale conferisce inoltre ottime prestazioni sismiche in quanto le pareti in bambù mostrano una ridotta probabilità di collasso e, qualora ciò avvenga, tendono a generare danni relativamente contenuti sia alle persone sia alle proprietà.



Figura 79. "Bahareque". Credit: © Pedro Bravo, Sofia Hernández, Francisco Martínez. <https://www.archdaily.com/tag/bahareque>

Un ulteriore ambito di impiego del bambù riguarda le **impalcature**, che continuano a costituire la soluzione maggiormente adottata per la realizzazione di edifici multipiano soprattutto nelle regioni che dispongono localmente della risorsa. Tale scelta è legata alle caratteristiche intrinseche del materiale che garantisce standard di sicurezza adeguati anche in contesti ad alta densità urbana. La costruzione delle strutture avviene mediante l'accostamento e il collegamento delle canne attraverso legature specifiche, progettate in modo da distribuire le forze verticali in modo ottimale, incastrando i nodi nei giunti. Questo metodo consente, inoltre, di ritensionare i giunti con precisione e di smontarli rapidamente, garantendo flessibilità operativa e sicurezza durante le fasi di montaggio e smontaggio.

## 2.5. Materiali bio-based in Nepal: esempi di architettura vernacolare

L'impiego di materiali bio-based trova le proprie radici nell'uso tradizionale delle risorse locali, pratica che da secoli caratterizza l'architettura vernacolare. Quest'ultima rappresenta la forma più "pura" del costruire ed è espressione diretta della relazione tra comunità, ambiente e disponibilità materiale: un sapere costruttivo sviluppato nel tempo attraverso l'esperienza e la trasmissione di conoscenze ancorate al contesto geografico e culturale. In questo senso, l'architettura vernacolare costituisce un riferimento originario per la progettazione sostenibile contemporanea, poiché dimostra come l'utilizzo di materiali naturali e rinnovabili possa rispondere in modo efficiente e coerente alle esigenze abitative, riducendo al contempo l'impatto ambientale legato ai processi di costruzione. (Benkari, 2021)

Come afferma Ghisleni (2020)

*"l'architettura vernacolare può essere definita come un tipo di costruzione locale o regionale, che utilizza materiali e risorse tradizionali del luogo in cui sorge l'edificio. Di conseguenza, questa architettura è strettamente legata al suo contesto ed è consapevole delle specificità geografiche e degli aspetti culturali del suo ambiente, subendone fortemente l'influenza. Per questo motivo, è unica in diversi luoghi del mondo, diventando persino un mezzo per riaffermare un'identità".*

Ghisleni, Camilla 2020. "What is Vernacular Architecture?". ArchDaily. (Trans. Duduch, Tarsila). ISSN 0719-8884

La difficoltà nel definire in modo univoco il concetto di architettura vernacolare è stata sottolineata da Paul Oliver (2006), che nel suo volume "Built to Meet Needs: Cultural Issues in Vernacular Architecture" (2006) ha definito questa categoria come *"l'architettura delle persone, comprese le loro case e altre strutture legate al loro ambiente e alle loro risorse, tipicamente costruite dai proprietari o dalla comunità con metodi convenzionali. È progettata per soddisfare requisiti specifici e tenere conto delle credenze, dello stile di vita e dell'economia di una particolare cultura"*.

(Oliver, P. (2006), *Built to meet needs: cultural issues in vernacular architecture*, Elsevier, Oxford, p.15)

Frank Lloyd Wright descrive l'architettura vernacolare come una "architettura popolare", capace di soddisfare i bisogni reali delle persone e di adattarsi al proprio ambiente in modo spontaneo. Nella stessa direzione, Noble (2013) distingue l'architettura popolare come quella prodotta da persone prive di formazione specialistica, ma riconosce che l'architettura vernacolare può anche essere il risultato del lavoro di costruttori formati sul campo, attraverso l'esperienza e l'apprendistato, che impiegano tecniche tradizionali e materiali locali.

Tradizione e contestualizzazione risultano quindi le caratteristiche fondanti: un sapere sedimentato nel tempo, che rispetta le condizioni locali e si adatta al clima, alla vegetazione e alla topografia.

In quest'ottica, l'architettura vernacolare è stata spesso definita come il "dialetto locale o regionale, la lingua comune dell'edificio" (Oliver, 1997 cit. in Widyalankara, 2022), sottolineandone la natura profondamente popolare e radicata nel territorio.

Secondo la Carta del Patrimonio Vernacolare Costruito dell'ICOMOS, l'architettura vernacolare può essere compresa come il risultato di un processo spontaneo e tradizionale con cui le comunità hanno dato forma al proprio "habitat". Essa non è statica, ma si evolve attraverso continui adattamenti, in risposta alle esigenze sociali ed ambientali del contesto (Dipasquale & Mecca, 2016). I materiali assumono quindi un ruolo fondamentale.

Il contesto climatico e geografico costituisce uno dei fattori principali nella definizione delle forme e delle soluzioni costruttive vernacolari. Attraverso un processo di tentativi ed errori, ogni comunità ha elaborato risposte architettoniche in grado di rispondere efficacemente alle condizioni ambientali e alla disponibilità di risorse, integrando al contempo esigenze sociali, culturali e simboliche (Benkari, 2025).

Rispetto al contesto nepalese, si osserva una crescita significativa del settore edilizio, strettamente legata ai processi di urbanizzazione e alla progressiva trasformazione del territorio da rurale a urbano. Secondo i dati del Central Bureau of Statistics (2012) e del National Statistics Office (2021), tra il 2011 e il 2021 il numero complessivo di edifici è aumentato del 22,82%. Questa espansione del patrimonio costruito ha portato ad un incremento della domanda energetica, che nel paese si basa prevalentemente su fonti fossili, con conseguenti impatti rilevanti in termini di emissioni e sostenibilità ambientale (cfr capitolo 2.1).

La rapida urbanizzazione ha inoltre innescato un processo di modernizzazione del costruito comportando una progressiva sostituzione delle architetture tradizionali realizzate in terra cruda, pietra, mattoni e legno, con edifici in cemento armato (RCC) a struttura a telaio universale. Tale transizione, tuttavia, si è spesso sviluppata senza un'adeguata attenzione alle condizioni climatiche locali e alle pratiche costruttive vernacolari, né al valore dei materiali naturali e sostenibili impiegati nelle costruzioni tradizionali (K.C. et al., 2025). Ciò ha comportato una perdita significativa del patrimonio di conoscenze costruttive locali come l'utilizzo delle fasce di legno ("nas<sup>22</sup>"), la pratica del "sur milaune<sup>23</sup>" e del "chukul<sup>24</sup>", un tempo indispensabili

<sup>22</sup> La tecnica "Nas" è un metodo costruttivo tradizionale nepalese che prevede l'inserimento di fasce lignee orizzontali all'interno della muratura in pietra o mattoni, con la funzione di aumentare la coesione e la resistenza sismica dell'edificio.

<sup>23</sup> La tecnica "Sur Milaune" consiste nell'incastro accurato delle pietre senza l'uso di malta, tipico delle costruzioni tradizionali nepalesi, finalizzato a garantire stabilità, flessibilità e resistenza sismica attraverso l'adattamento reciproco degli elementi lapidei.

<sup>24</sup> La tecnica "Chukul" prevede l'inserimento di travi lignee orizzontali tra i corsi di muratura in pietra o mattoni, con la funzione di distribuire le sollecitazioni sismiche e migliorare la coesione strutturale delle pareti negli edifici tradizionali nepalesi.

per garantire la resistenza sismica e la coesione delle pareti (Adhikary & Johnson, n.d.). Secondo Bodach (2014) l'architettura contemporanea tende a trascurare le condizioni ambientali e le potenzialità delle risorse naturali, generando edifici più energivori e meno integrati nel contesto, mentre l'architettura vernacolare grazie all'impiego di materiali locali e strategie passive di regolazione termica offre spazi abitativi confortevoli coerenti agli specifici contesti climatici.

Rielaborando i dati di Kandel (2024) e Bodach (2024), la mappa seguente (Figura 80) offre una visione complessiva delle risorse naturali localmente disponibili in Nepal e della loro distribuzione nelle tre principali regioni geografiche: Terai, Hills e Mountain.

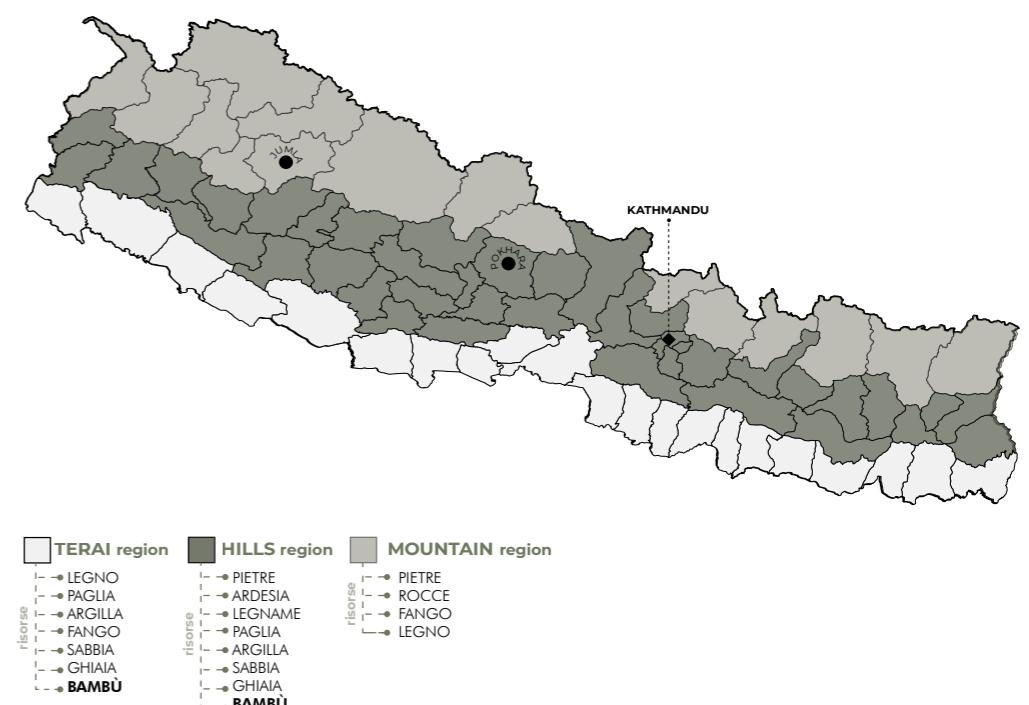


Figura 80. "Distribuzione e disponibilità delle risorse in Nepal". Fonte: Kandel (2024), Rielaborazione dell'autore della tesi. <https://doi.org/10.3126/tj.v4i1.73952>

Un approfondimento specifico sui materiali impiegati nelle costruzioni è presentato nella Figura 81, che sintetizza e illustra le principali modalità di utilizzo dei materiali locali nell'architettura nepalese.

Ricostruendo un profilo delle tecniche vernacolari in Nepal, emerge come la straordinaria varietà geografica ed etnica (comunità come i Tharu nel Terai, i Gurung e i Magar nelle zone collinari, o i Newar e gli Sherpa nelle regioni montane) del paese abbia generato un'ampia gamma di soluzioni architettoniche adattate ai differenti contesti ambientali (Kandel et al., 2024). Le conoscenze costruttive tradizionali si basano proprio sull'impiego di materiali bio-based come legno, bambù e paglia scelti per la loro disponibilità locale e per la capacità di rispondere in modo funzionale e sostenibile alle specifiche condizioni climatiche e geologiche del territorio.

In Nepal, la relazione tra clima, materiali e forma architettonica è particolarmente evidente nelle tre principali zone fisiografiche: **Terai**, **Hills** e **Mountain**, (cfr. capitolo 1.4) ciascuna caratterizzata da specifiche strategie costruttive e soluzioni bioclimatiche.



Figura 81. "Materiali da costruzione utilizzati in Nepal". Fonte: Bodach (2014), Nepal School Project. Rielaborazione dell'autore della tesi. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.022>

### Regione del Terai: Architettura per il clima subtropicale umido (Kathmandu)

Nella pianura del Terai, le abitazioni tradizionali, realizzate principalmente con materiali bio-based quali bambù, paglia, canne e risorse naturali come la terra cruda, rispondono in modo efficace alle condizioni climatiche subtropicali e alle ricorrenti inondazioni stagionali. La costruzione su piattaforme rialzate, generalmente tra 90cm e 300 cm, consente infatti di proteggere gli edifici dall'acqua durante la stagione monsonica (Gautam et al., 2016). La circolazione dell'aria all'interno dell'edificio è garantita dall'altezza dei soffitti e dall'elevazione da terra su pali in legno. I pavimenti sono fatti di terra compattata, piastrelle di argilla o pietre disponibili localmente che sono eventualmente ricoperte da intonaco di cemento.

L'organizzazione planimetrica degli insediamenti è pensata per favorire la ventilazione naturale e la vita comunitaria (Kandel, 2024): le abitazioni sono disposte liberamente lungo la strada o si sviluppano intorno a cortili centrali e presentano aperture di medie dimensioni (20-40%) dotate di sistemi di ombreggiamento per escludere la luce diretta estiva, orientate lungo l'asse est-ovest per limitare i guadagni termici e massimizzare la ventilazione trasversale (Bodach et al., 2014). I materiali leggeri e permeabili, come le

pareti in bambù intrecciato rivestite con fango, calce o intonaco di argilla, garantiscono un buon comfort termoigrometrico, mentre i tetti in paglia o tegole d'argilla assicurano un'adeguata protezione dalle piogge intense e una risposta elastica alle sollecitazioni sismiche.

Il bambù, risorsa locale a rapida crescita e facilmente rinnovabile, è impiegato sia come elemento strutturale sia come sistema di tamponamento, attraverso la tecnica del **"wattle and daub"**, in cui la trama intrecciata è rivestita con una miscela di fango e paglia. Dopo gli anni Ottanta, si è diffuso l'uso della lamiera zincata per le coperture, in risposta alle esigenze di durabilità, ventilazione e manutenzione ridotta (Pokharel et al., 2020).

Dal punto di vista sociale e simbolico, l'architettura del Terai riflette un profondo legame con la cultura locale. La tipologia abitativa dei **"Tharu"** ne è un esempio significativo: costruita in terra cruda e bambù, integra strategie di mitigazione del rischio idrogeologico e sismico con una concezione spaziale centrata sulla comunità e sulla relazione con l'ambiente. Le abitazioni vernacolari del Terai hanno dimostrato negli anni resilienza sia alle inondazioni sia ai terremoti, grazie alla flessibilità delle strutture leggere e alla capacità dei materiali naturali di dissipare energia sismica; rappresentando un modello di sostenibilità costruttiva. (Bodach et al. 2014; Kandel, 2024)



Figura 82. "Tharu house with wide roof overhang and shaded veranda".

Fonte: Bodach (2014), <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.022>

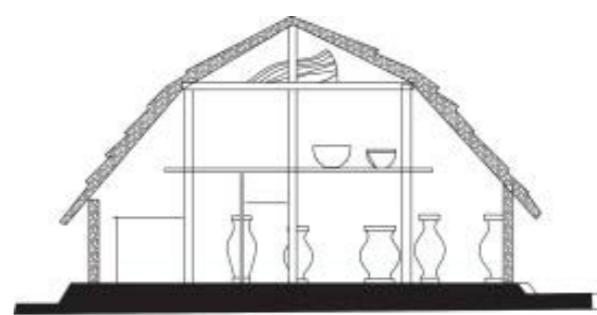


Figura 83. "Section of Dangaura Tharu House"

Fonte: Bodach (2014), <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.022>

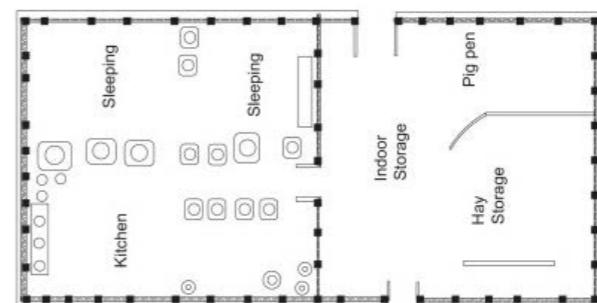


Figura 84. "Floor plan of Dangaura Tharu House"

Fonte: Bodach (2014), <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.022>

## Regione collinare: Architettura per il clima subtropicale temperato (Pokhara)

Nella fascia collinare del Nepal, caratterizzata da un clima subtropicale temperato e da una morfologia complessa, l'architettura vernacolare si distingue per la capacità di adattarsi al contesto ambientale e topografico. Le abitazioni tradizionali, realizzate prevalentemente con **pietra, legno e fango**, rappresentano un equilibrio tra solidità strutturale e flessibilità costruttiva (Rijal & Yoshida, 2002).

Le case delle comunità Gurung e Magar, diffuse nella regione di Pokhara, sono generalmente a due piani e presentano muri spessi in muratura di pietra e fango, piccoli infissi in legno e coperture a doppia falda in lastre di ardesia o lamiera zincata (Maharjan & Singh Dongol, 2024). La configurazione compatta e il ridotto numero di aperture garantiscono un buon isolamento termico in inverno e limitano le dispersioni. Allo stesso tempo, la scelta dei materiali naturali consente una moderata inerzia termica utile per regolare le variazioni giornaliere di temperatura.

Tra le tipologie più rappresentative si distingue la "Ghumauro Dhi", abitazione a pianta circolare costruita in muratura di pietra e legno. Essa presenta una forma compatta, regolarità nelle aperture e un'elevata resistenza sismica grazie all'inserimento di fasce lignee orizzontali ("nas"). La tecnica del "sur milaune", ossia l'incastro dei blocchi di pietra senza l'uso di malta rigida, consente una maggiore capacità di dissipazione delle sollecitazioni, riducendo il rischio di collasso in caso di terremoto. L'uso di connessioni lignee e "picchetti" di legno per unire le travi del tetto migliora ulteriormente la coesione strutturale (Gautam et al., 2016).

L'orientamento prevalente verso sud risponde a strategie bioclimatiche volte a massimizzare i guadagni solari invernali e proteggere dai venti freddi settentrionali. Logge e verande fungono da spazi di transizione che garantiscono ventilazione naturale, favorita ulteriormente da aperture ridotte e schermate, e regolazione termica stagionale ottenuta grazie ai muri massivi che trattengono il calore durante il giorno e lo rilasciano nelle ore notturne. (Gautam et al., 2016).

Dal punto di vista socio-culturale, queste architetture esprimono un forte legame con il paesaggio e con le risorse del territorio ed un esempio emblematico è la casa tradizionale "Newari"; essa utilizza mattoni di argilla essiccati al sole o cotti come materiale principale per le pareti. I muri hanno uno spessore compreso tra 28 cm e 70 cm, il che determina un'elevata massa termica dell'edificio. Il muro esterno è fatto di mattoni cotti mentre sul lato interno vengono utilizzati mattoni essiccati al sole (adobe) (Bodach et al. 2014). Queste abitazioni presentano una fondazione costituita da uno zoccolo in pietra profondo 60-80 cm e sono disposte in file compatte o attorno a cortili, presentano piante rettangolari e si articolano su più livelli, ciascuno con una funzione specifica (Maharjan, 2024). La cura nell'orientamento, l'uso di materiali naturali e la presenza di decorazioni simboliche dimostrano come la dimensione costruttiva sia profondamente intrecciata con quella culturale e identitaria (Kandel, 2024).



Figura 85. "Section of Newar house with vertical space arrangement".  
Fonte: Bodach (2014). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.022>

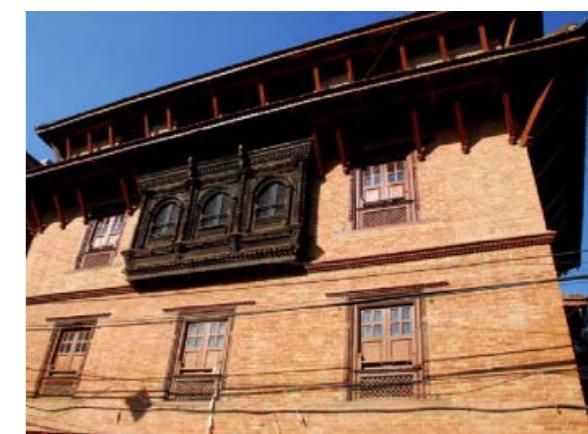


Figura 86. "Façade of Newar house with big wood carved window and large roof overhang".  
Fonte: Bodach (2014). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.022>

## Regione montuosa: Architettura per il clima subartico (Jumla)

Nelle regioni montuose come l'area di Jumla, il clima subartico, caratterizzato da rigidi inverni e forti escursioni termiche (cfr capitolo 1.4), ha determinato lo sviluppo di un'architettura compatta, massiva e fortemente isolata. Le abitazioni tradizionali sono costruite quasi interamente con materiali naturali locali, principalmente **pietra e legno**, scelti per la loro elevata massa termica e capacità di accumulare e restituire calore in modo graduale.

Le case, generalmente a due piani, sono realizzate in muratura di pietra a secco o con legante di fango e presentano pareti spesse fino a 60 centimetri, in grado di garantire un notevole sfasamento termico e una protezione efficace contro le basse temperature (Pokharel et al., 2020). L'uso del legno negli elementi strutturali e nei rivestimenti interni contribuisce a migliorare l'isolamento, ma anche a creare un ambiente abitativo confortevole, riducendo la dispersione di calore.

Nel contesto di Jumla e delle regioni sub-himalayane, le coperture a forte pendenza, originariamente realizzate in ardesia o legno, sono progettate per favorire lo scorrimento della neve e limitare l'accumulo di umidità. In tempi più recenti,



Figura 87. "Jumla vernacular architecture".  
Fonte: Pokharel et al., 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110073>

queste sono state spesso sostituite da lamiere zincate, una scelta che risponde alla necessità di reperibilità e manutenzione ridotta (Rijal, 2021). Le aperture, generalmente inferiori al 20% della superficie di facciata, riducono al minimo le dispersioni termiche, mentre l'orientamento degli edifici verso sud consente di massimizzare i guadagni solari nei mesi più freddi.

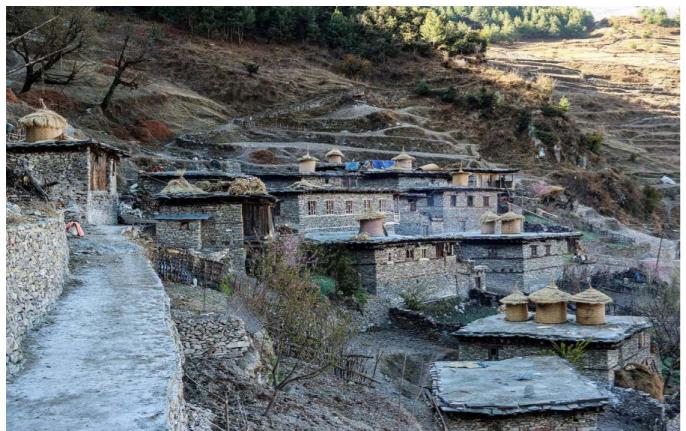


Figura 88. "Jumla vernacular architecture". Fonte: Pokharel 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110073>

Diversamente, nell'architettura himalayana d'alta quota (come nei distretti di Manang e Mustang) prevale una tipologia edilizia compatta con tetto piano, realizzata in pietra e terra cruda. Questa configurazione riflette la scarsità di legname, la difficoltà di reperimento di materiali organici e la necessità di ridurre le dispersioni termiche. I volumi rettangolari o quadrati, spesso addossati tra loro, creano un tessuto urbano denso e protetto: gli edifici condividono pareti per minimizzare la superficie esposta al vento e migliorare l'efficienza energetica. Le strade strette e gli alti muri di recinzione contribuiscono ulteriormente a mitigare l'effetto dei venti freddi e a mantenere microclimi più favorevoli.

La distribuzione interna delle abitazioni segue un'organizzazione verticale: il piano terra, generalmente destinato agli animali, funge da barriera termica naturale; il piano intermedio ospita gli ambienti di vita quotidiana; mentre il livello superiore o il tetto piano è utilizzato per l'essiccazione dei prodotti agricoli o come spazio di relazione durante i mesi più miti. La stufa a legna, collocata centralmente, costituisce il cuore termico e simbolico della casa, svolge la funzione bivalente di sistema di riscaldamento e luogo di aggregazione familiare (Kandel, 2024).

In insediamenti come Braga (Manang) o Mustang, i cortili chiusi e le terrazze coperte assumono un ruolo climatico e sociale fondamentale: proteggono dal freddo e dai venti forti, ma fungono anche da spazi intermedi per le attività quotidiane e collettive.

Diversamente, nell'architettura himalayana d'alta quota (come nei distretti di Manang e Mustang) prevale una tipologia edilizia compatta con tetto piano, realizzata in pietra e terra cruda. Questa configurazione riflette la scarsità di legname, la difficoltà di reperimento di materiali or-

ganici e la necessità di ridurre le dispersioni termiche. I volumi rettangolari o quadrati, spesso addossati tra loro, creano un tessuto urbano denso e protetto: gli edifici condividono pareti per minimizzare la superficie esposta al vento e migliorare l'efficienza energetica. Le strade strette e gli alti muri di recinzione contribuiscono ulteriormente a mitigare l'effetto dei venti freddi e a mantenere microclimi più favorevoli.

La distribuzione interna delle abitazioni segue un'organizzazione verticale: il piano terra, generalmente destinato agli animali, funge da barriera termica naturale; il piano intermedio ospita gli ambienti di vita quotidiana; mentre il livello superiore o il tetto piano è utilizzato per l'essiccazione dei prodotti agricoli o come spazio di relazione durante i mesi più miti. La stufa a legna, collocata centralmente, costituisce il cuore termico e simbolico della casa, svolge la funzione bivalente di sistema di riscaldamento e luogo di aggregazione familiare (Kandel, 2024).

In insediamenti come Braga (Manang) o Mustang, i cortili chiusi e le terrazze coperte assumono un ruolo climatico e sociale fondamentale: proteggono dal freddo e dai venti forti, ma fungono anche da spazi intermedi per le attività quotidiane e collettive.

## 2.6. Il bambù in Nepal: disponibilità e tecniche costruttive

Il Nepal è riconosciuto come uno degli "hotspot" mondiali di biodiversità e ospita un patrimonio vegetale di straordinaria varietà, tra cui il bambù, spesso definito "oro verde" per il suo valore ecologico, economico e sociale (Bhatta, 2023).

Questo paese rappresenta, dunque, un contesto privilegiato per osservare e sperimentare il ruolo del bambù come risorsa strategica. La presenza di questa pianta nel paese è significativa: secondo le ricerche, sono state censite oltre 53 specie distribuite in 12 generi, che si estendono dalle pianure del Terai alle colline e fino alle regioni montuose oltre i 3.500 metri di altitudine (Das, 2013; Ghimire, 2024; Ayer, 2025). In particolare, il Nepal ospita sia specie tropicali, tipiche del Sud-est asiatico, sia specie temperate, provenienti dal Tibet e dal Bhutan (Karki e Karki, 1996; Stapleton, 1994). Le regioni orientali del paese, caratterizzate da condizioni climatiche più umide, costituiscono l'area di maggiore diffusione: nel solo Terai orientale si concentra più della metà della produzione nazionale (Rai, 2016) (Figura 89). Tradizionalmente questa risorsa vegetale viene coltivata lungo i margini delle terrazze agricole in collina e all'interno dei campi nel Terai, dove molte famiglie agricole possiedono da due a dieci piante sui propri terreni.

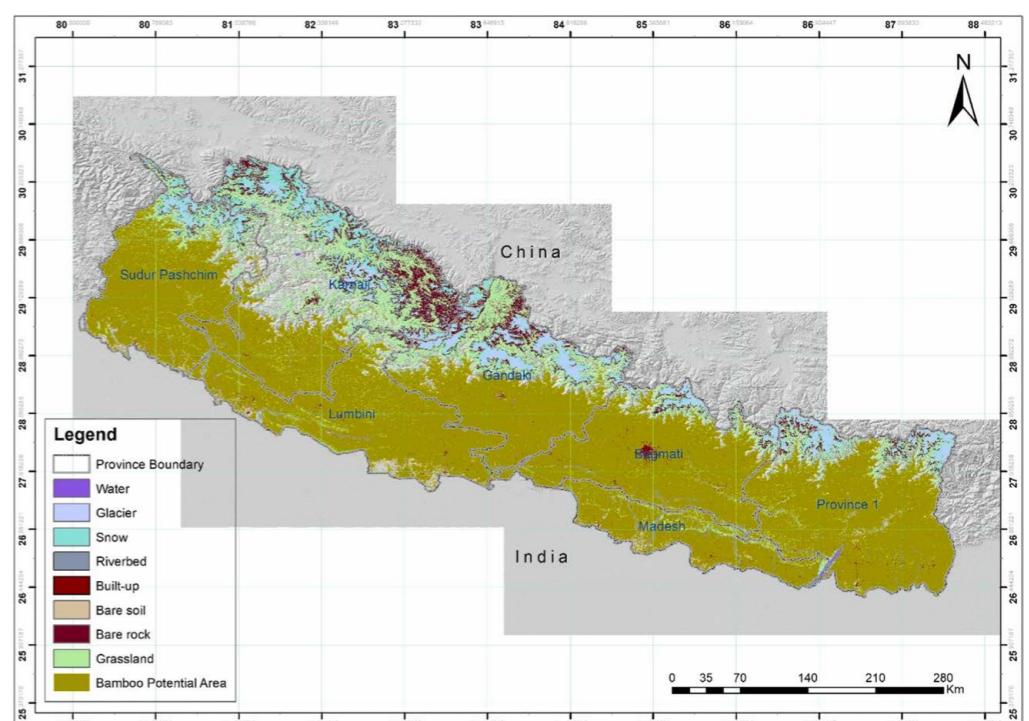


Figura 89. "Distribuzione del bambù in Nepal". Fonte: Ayer (2025) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2773139123000137#fig0030>

I generi più rappresentati in Nepal sono *Bambusa* e *Dendrocalamus*, (Figura 91) predominanti nel Terai e nelle zone collinari, mentre *Thamnocalamus*, *Himalayacalamus* e *Yushania* (Figura 90 e 92) caratterizzano le aree montane.

La distribuzione delle specie riflette le differenze ecologiche delle tre principali regioni nepalesi: nel Terai e nelle colline si concentrano le varietà di grande diametro (*Bambusa* e *Dendrocalamus*), mentre nelle aree montane prevalgono specie di piccolo diametro appartenenti ai generi *Drepanostachyum*, *Himalayacalamus*, *Thamnocalamus* e *Yushania* (Das & Thapa, 2013). La maggiore diversità di specie nelle regioni collinari è correlata alle condizioni climatiche temperate e alla maggiore disponibilità di suolo adatto alla crescita del bambù rispetto al clima caldo del Terai e alle temperature rigide delle montagne (Das & Thapa, 2013; Bhatta et al., 2021).

## MOUNTAIN region

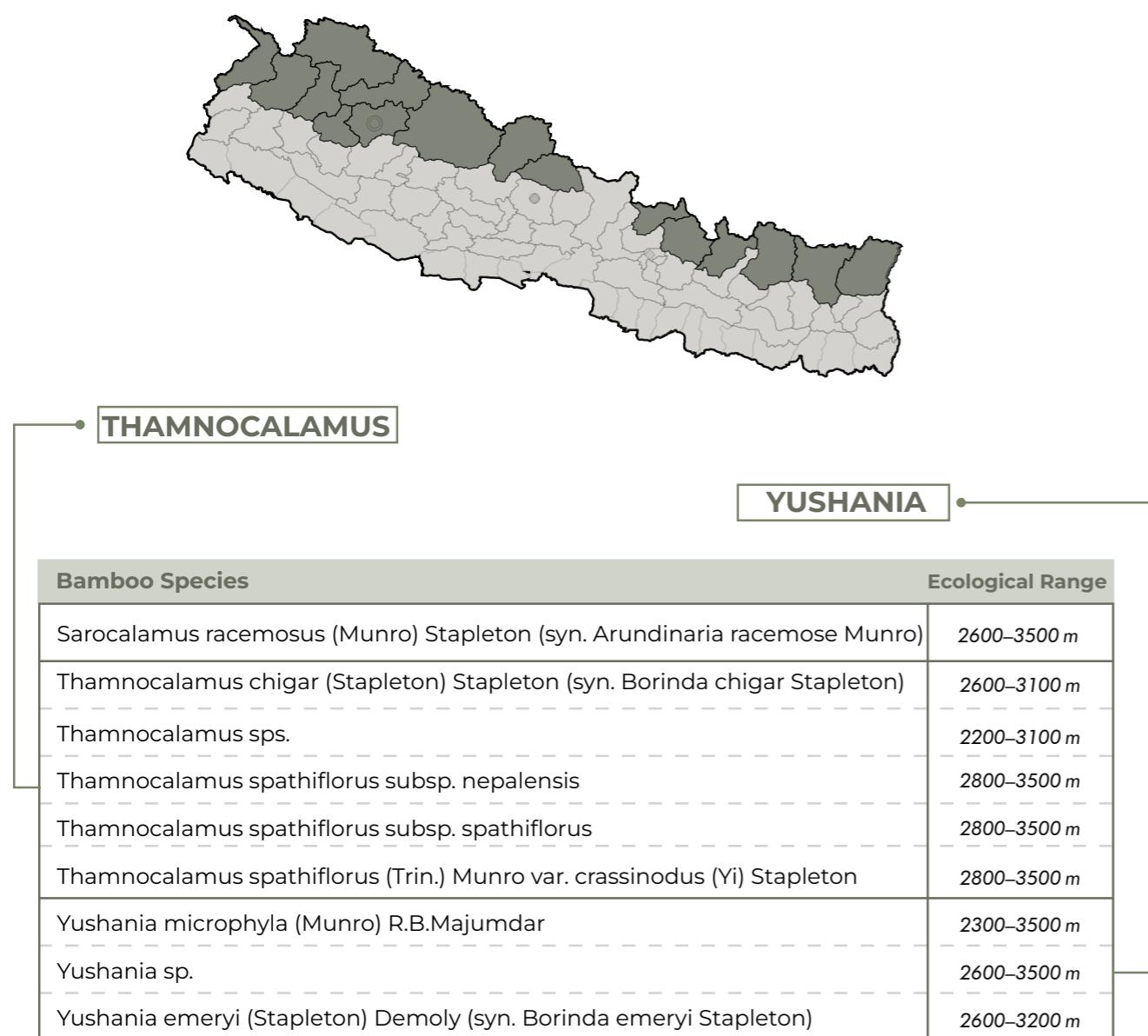
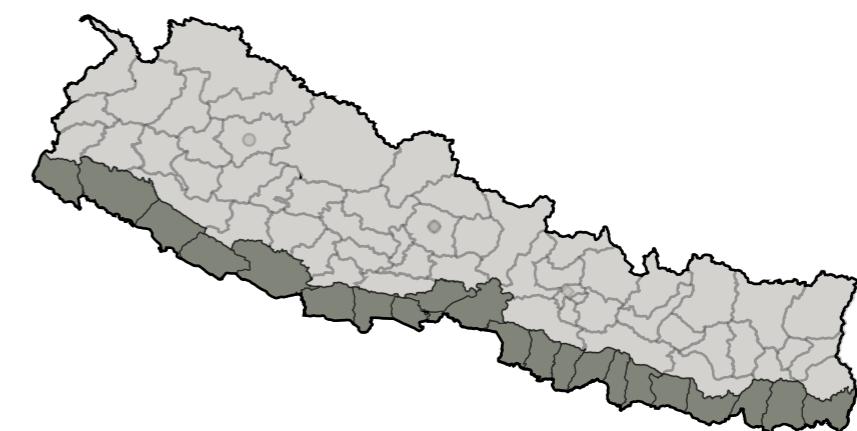


Figura 90. "Specie di bambù presenti della regione Mountain". Fonte: (Stapleton, 1994, Barlow, 2002, MoFSC, 2004, Das and Thapa, 2011) rielaborazione dell'autore della tesi

## TERAI region



Bamboo Species	Ecological Range
<i>Bambusa</i> <i>jaintiana</i> R.B.Majumdar (syn. <i>Bambusa alamii</i> Stapleton)	Fino 1000 m
<i>Bambusa</i> <i>bambos</i> (L.) Voss (syn. <i>Bambusa arundinacea</i> Bonpl.)	Fino 3000 m
<i>Bambusa</i> <i>balcooa</i> Roxb.	Fino 1400 m
<i>Bambusa</i> <i>multiplex</i> (Lour.) Raeusch. Ex Schult. & Schult.f.	Fino 1400 m
<i>Bambusa</i> <i>multiplex</i> var. <i>riviereorum</i> Maire	Fino 1400 m
<i>Bambusa</i> <i>teres</i> Buch.-Ham. (syn. <i>Bambusa nutans</i> subsp. <i>cupulata</i> Stapleton)	Fino 1400 m
<i>Bambusa</i> <i>nutans</i> Wall. ex Munro subsp. <i>nutans</i>	Fino 1500 m
<i>Bambusa</i> sp./ <i>B.tulda</i>	Fino 1000 m
<i>Bambusa</i> <i>tulda</i> Roxb	Fino 1000 m
<i>Bambusa</i> <i>vulgaris</i> Schrad. ex J.C.Wendl.	Fino 1400 m
<i>Dendrocalamus</i> <i>asper</i> Backer ex K.Heyne	Fino 1400 m
<i>Dendrocalamus</i> <i>giganteus</i> Munro	Fino 1000 m
<i>Dendrocalamus</i> <i>strictus</i> Nees	Fino 1000 m
<i>Dendrocalamus</i> <i>strictus</i> (Roxb.) Nees	Fino 1200 m
<i>Melocanna</i> <i>baccifera</i> Kurz	Fino 1400 m
<i>Cephalostachyum</i> sp	Fino 1000 m
<i>Thrysostachys</i> <i>siamensis</i> Gamble (syn. <i>Arundinaria siamensis</i> Kurz)	Fino 1000 m

Figura 91. "Specie di bambù presenti della regione Terai". Fonte: (Stapleton, 1994, Barlow, 2002, MoFSC, 2004, Das and Thapa, 2011) rielaborazione dell'autore della tesi

## HILLS region

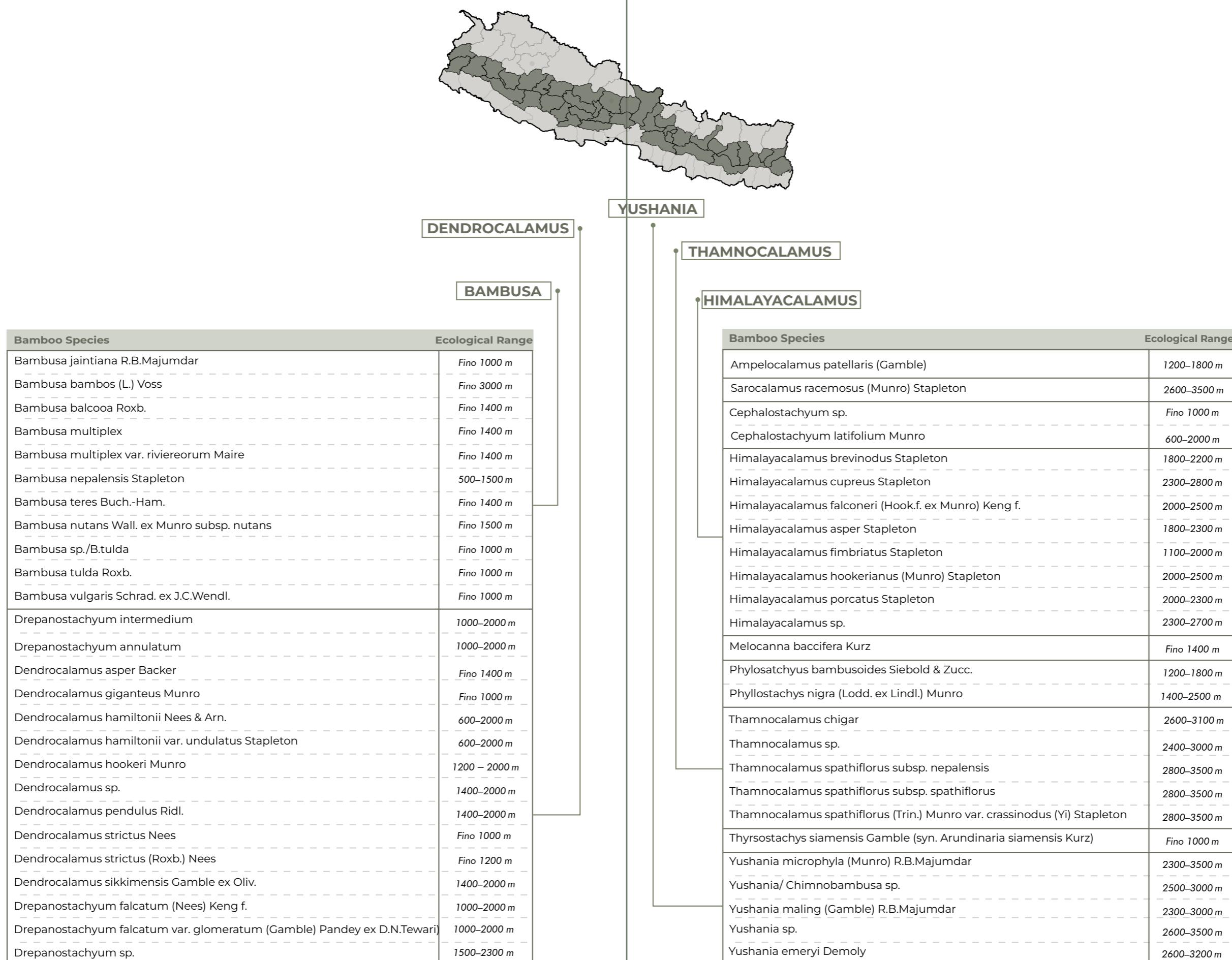


Figura 92. "Specie di bambù presenti della regione Hills".

Fonte: (Stapleton, 1994, Barlow, 2002, MoFSC, 2004, Das and Thapa, 2011) rielaborazione dell'autore della tesi

In particolare, *Dendrocalamus strictus* (Figura 93), *Bambusa nutans* (Figura 77), *Bambusa balcooa* (Figura 94), *Bambusa tulda* (Figura 95) e *Dendrocalamus hamiltonii* (Figura 96) sono tra le specie più impiegate in edilizia e artigianato per le loro qualità meccaniche e versatilità (Karki & Karki, 1996). Alcune specie, come *Yushania maling*, diffuse tra i 2.300 e i 3.000 m di altitudine, mostrano invece un comportamento invasivo che può alterare la struttura ecologica delle foreste (Roy et al., 2016; Gaira et al., 2022).



Figura 93. "Dendrocalamus strictus"



Figura 94. "Bambusa nutans"



Figura 95. "Bambusa balcooa"

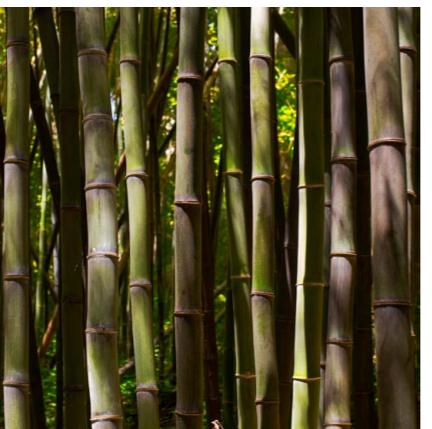


Figura 96. "Bambusa tulda"



Figura 97. "Dendrocalamus hamiltonii"

Localmente, il bambù è conosciuto come "bans" (culmi con diametro superiore a 4 cm) o "nigalo" (culmi più sottili) (Das, 1988; Stapleton, 1994; Karki & Karki, 1996). Nelle regioni orientali è frequente anche il termine "malingo", usato per indicare alcune varietà adatte alla tessitura e alla produzione di germogli commestibili (Das, 2004). Il bambù è coltivato sia ai margini delle terrazze agricole sia in aree marginali e degradate, poco adatte ad altre colture (Karki & Karki, 1996). La sua presenza diffusa ne ha favorito l'impiego in molteplici ambiti: dalla costruzione di abitazioni e spazi comunitari, alla produzione artigianale e tessile, fino a usi alimentari e rituali (Das, 2013).

Tuttavia, è stato solo in seguito ai disastrosi terremoti del 2015 e del 2023 che se ne è compreso appieno il potenziale come materiale da costruzione in un contesto altamente sismico. Il terremoto del 2015 (magnitudo 7,8) ha causato oltre 8.600 vittime e distrutto centinaia di migliaia di abitazioni ed edifici pubblici, mentre quello del 2023 ha colpito 62.039 abitazioni in tredici distretti, con oltre 26.000 crolli totali (MOHA, 2015; UNICEF, 2023) (cfr capitolo 1.4). In entrambi i casi i normali modelli di vita sono stati gravemente sconvolti ma il ricorso al bambù si è rivelato determinante nella fase di ricostruzione immediata: il materiale è stato utilizzato per erigere rifugi temporanei e abitazioni grazie alla sua disponibilità locale, alla leggerezza e alla facilità di lavorazione (Ghimire & Lamichhane, 2024).

Dal punto di vista tecnico, la resistenza sismica delle strutture in bambù è legata a proprietà intrinseche del materiale: la flessibilità consente di assorbire e dissipare l'energia delle scosse, mentre la leggerezza riduce il rischio di danni gravi in caso di cedimento (Rai, 2016). Tali caratteristiche, unite al rapido ciclo di crescita e al basso impatto ambientale, rendono il bambù una risorsa strategica per un'edilizia sostenibile e circolare (cfr. capitolo 2.3).

Negli ultimi anni, istituzioni e programmi di ricerca nazionali hanno avviato iniziative per promuovere la gestione sostenibile del bambù, favorendo la creazione di vivai, la formazione di agricoltori e artigiani, e incentivi per le imprese che ne utilizzano i prodotti in chiave ecologica (GoN, 2020).

### Tecniche costruttive in bambù in Nepal: dal "wattle and daub" al "bahareque" ingegnerizzato

Tra le tecniche tradizionali più diffuse in Nepal si distingue quella del "wattle and daub" (cfr. capitolo 2.5), una pratica antica utilizzata tradizionalmente in Inghilterra, che consiste nella realizzazione di un'intelaiatura in legno o bambù intrecciato (wattle), successivamente rivestita da una miscela di terra, fango e paglia (daub). In Nepal, questa tecnica viene impiegata da secoli nelle aree collinari e del Terai, grazie alla disponibilità locale dei materiali e alla loro capacità di regolare in modo naturale temperatura e umidità (Kutu, 2022). Le strutture così realizzate si adattano bene alle condizioni climatiche e sismiche locali, offrendo un'elevata flessibilità e una facile riparabilità.

A partire da questa tradizione, si è progressivamente sviluppata una tecnica più evoluta e ingegnerizzata: il "bahareque". Derivato dalla tradizione

costruttiva latinoamericana, il *bahareque* è stato reinterpretato anche in contesti asiatici, tra cui il Nepal, come una versione migliorata del wattle and daub, capace di coniugare materiali locali e principi strutturali moderni (Kaminski, Lawrence & Trujillo, 2016; INBAR, 2020).

La tecnica prevede la realizzazione di un telaio in solo bambù o in bambù e legno, irrigidito da elementi orizzontali e diagonali, successivamente rivestito da pannelli in bambù schiacciato e da un intonaco in malta di terra o cemento (Figura 98). L'intero sistema funziona come una parete di taglio, in grado di dissipare le sollecitazioni sismiche grazie al comportamento composito tra telaio, matrice e rivestimento (Kaminski et al., 2016).

Nel contesto nepalese, l'adozione del *bahareque* ingegnerizzato è stata incoraggiata in particolare dopo il terremoto del 2015, quando la necessità di ricostruire in modo rapido, economico e resiliente ha stimolato la sperimentazione di soluzioni costruttive ibride. Il sistema combina la tradizione vernacolare con criteri ingegneristici moderni: fondamenta in cemento armato sollevano la struttura principale in bambù, riducendo il rischio di degrado per contatto diretto con il suolo e le pareti sono rinfinate con un intonaco sottile, preferibilmente a base di calce per limitare l'impatto ambientale e migliorare la traspirabilità (Kaminski et al., 2016; Pablo Luna Studio, 2023).

Rispetto al wattle and daub, il *bahareque* presenta un potenziale significativamente superiore in termini di durabilità, protezione contro l'umidità e resistenza sismica. Queste prestazioni derivano dalla presenza di un telaio continuo in legno o bambù e da un sistema di connessioni meccaniche che garantiscono un efficace trasferimento dei carichi. Il telaio, la matrice di riempimento e l'intonaco di malta cementizia agiscono in modo composito, comportandosi come una parete di taglio e contribuendo così alla stabilità globale della struttura. Il *bahareque* risulta particolarmente adatto per edifici a uno o due piani, nei quali il peso ridotto e la flessibilità del bambù rappresentano un vantaggio strutturale (Kaminski et al., 2016). Le versioni più recenti, definite "bahareque ingegnerizzato", integrano l'uso di rete metallica come armatura dell'intonaco, migliorando ulteriormente la resistenza meccanica e la durabilità della parete. Se correttamente progettate e mantenute, tali costruzioni possono raggiungere una vita utile di circa cinquant'anni. Dal punto di vista ambientale, il sistema mostra un bilancio energetico favorevole, poiché si basa sull'impiego di materiali locali e rinnovabili, come il bambù, e consente di ridurre le emissioni di carbonio fino alla metà rispetto alla muratura tradizionale (Kaminski et al., 2017; INBAR, 2020). Inoltre, lo spessore dell'intonaco contribuisce alla protezione passiva contro il fuoco: uno strato di 15 mm offre una protezione di base, mentre uno spessore di 25 mm può garantire una resistenza fino a 30 minuti, incrementando la sicurezza complessiva dell'edificio (INBAR, 2016).

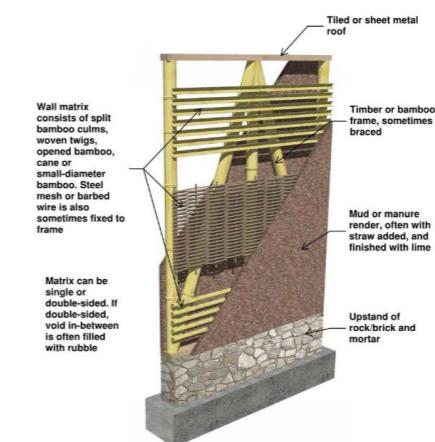


Figura 98. "Traditional bahareque wall". Fonte: EARTH ARCHITECTURE <https://eartharchitecture.org/?cat=80>



Figura 99. "Guadalajara, Messico: un edificio comunitario con pareti in graticcio e argilla e un reticolo di canne. Processo di costruzione." Credit: © Pedro Bravo, Sofía Hernández, Francisco Martínez

Un aspetto fondamentale della costruzione in bambù, sia nelle versioni vernacolari sia in quelle ingegnerizzate, riguarda i collegamenti tra gli elementi strutturali. In Nepal, come in altri paesi del Sud-Est asiatico, sono ampiamente utilizzati i collegamenti a **pioli e perni** (peg and dowel joints), che rappresentano una soluzione tradizionale e a basso impatto ambientale per unire tra loro i culmi di bambù (Figura 100). Questi collegamenti prevedono una foratura trasversale nei pali e l'inserimento di pioli di bambù o legno duro, fissati a pressione o battuti in sede.



Figura 100. "Peg and Pin Connections". Fonte: Pablo Luna Studio, 2023. Photo by Airyelf via Teachphilippines <https://pablolunastudio.com/bamboo-joinery/>



Tale sistema, utilizzato anche nelle abitazioni rurali e nei ponti pedonali delle regioni collinari, garantisce una connessione flessibile ma resistente, capace di dissipare energia durante gli eventi sismici. Inoltre, i collegamenti a pioli, realizzati interamente con materiali locali e biodegradabili, eliminano la necessità di componenti metallici o colle sintetiche, contribuendo così alla riduzione delle emissioni di carbonio e alla semplificazione delle operazioni di manutenzione. Tali giunti, facilmente riparabili o sostituibili in caso di danneggiamento, promuovono un approccio costruttivo basato su principi di adattabilità e circolarità (Pablo Luna Studio, 2023).

# /CAPITOLO III: IL RUOLO DELL'ARCHITETTURA NELLA RESILIENZA CLIMATICA E SOCIALE



## 3.1. L'architettura come rifugio climatico e sociale

*"Eco design's goals are the seamless and benign biointegration of our **human-built environment**, and everything that we, as humans, make and do **with the natural environment**."*

Olgyay, Victor et al. (2015) *Design with Climate : Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism - New and Expanded Edition*. New and expanded. Princeton, NJ: Princeton University Press, p. 9

Nel contesto della crisi climatica e delle crescenti disuguaglianze sociali, l'architettura è chiamata ad assumere un ruolo attivo nella costruzione di un **habitat resiliente e inclusivo**, capace di rispondere alle molteplici vulnerabilità ambientali e sociali che caratterizzano il presente.

La resilienza è un concetto polisemico che ha attraversato più discipline e che, nella sua declinazione contemporanea, è centrale per pensare un'architettura capace di affrontare la crisi climatica.

Essa può essere intesa come *"la capacità dei sistemi sociali, economici e ambientali di far fronte a un evento, una tendenza o un disturbo pericolosi, rispondendo o riorganizzandosi in modi che mantengano la loro funzione, identità e struttura essenziali, mantenendo al contempo la capacità di adattamento, apprendimento e trasformazione"*

(definizione adottata dall'Arctic Council 2013 e richiamata dall'IPCC, 2018, Allegato I: Glossario, pp 541-562 10.1017/9781009157940.008).

Questa definizione evidenzia due elementi cruciali per la progettazione architettonica: da un lato, la necessità di preservare le funzioni essenziali del sistema costruito; dall'altro la capacità di adattamento legata alla possibilità di trasformarsi in modo strutturale quando le condizioni lo richiedono.

La genealogia concettuale della resilienza risale al campo dell'ecologia (Holling, 1973) e si è poi estesa, a partire dagli anni Novanta e nel primo decennio del XXI secolo, a studi sui sistemi socio-ecologici e organizzativi (Gunderson & Holling, 2001). Tale transizione interdisciplinare ha contribuito a spostare l'attenzione dalla semplice resistenza alla perturbazione verso la comprensione dei processi dinamici di adattamento e trasformazione. La resilienza, dunque, non è un attributo statico o puramente tecnico, ma una qualità relazionale che emerge dalle interazioni tra elementi fisici, sociali e istituzionali.

La letteratura distingue spesso tre capacità interconnesse: **assorbimento** (resistenza immediata al disturbo), **adattamento** (modifiche incrementali che permettono di convivere con nuove condizioni) e **trasformazione** (capacità di cambiare strutturalmente il sistema quando il ritorno allo stato precedente non è desiderabile o possibile). L'IPCC sottolinea l'importanza di integrare in questo processo la dimensione dell'apprendimento e della trasformazione,

spostando l'attenzione dalla ricostruzione post-evento alla costruzione di capacità preventive. (IPCC, 2018). Analogamente, nell'ambito organizzativo la resilienza si sposta su un livello umano: la resilienza organizzativa dipende in larga misura dall'abilità degli individui di reagire e adattarsi, un elemento che caratterizza anche le comunità in contesti di rischio (Rirolli & Savicki, 2003, p. 228; Sutcliffe & Vogus, 2003, p. 97).

Dal punto di vista operativo, la resilienza si declina in:

- La **Resilienza Ingegneristica** (*Engineering Resilience*) è la capacità di un materiale di resistere a forze dinamiche assorbendo energia con deformazioni elastiche e plastiche e mantenendo la stabilità della struttura alle sollecitazioni fino a rottura (Holling, 1973).
- La **Resilienza Ecologica** (*Ecological Resilience*) è la capacità di un sistema ecologico di ritornare al suo stato iniziale dopo essere stato sottoposto a una perturbazione che lo ha allontanato dal suo stato iniziale (Holling, 1996).
- La **Resilienza Socio-Ecologica** (*Socio-Ecological Resilience*) è l'abilità di un sistema complesso di cambiare, adattarsi e trasformarsi in risposta a sollecitazioni e tensioni (Carpenter et al, 2001).
- **Resilienza istituzionale/organizzativa**: capacità delle istituzioni locali (governo, ONG, sistemi di protezione civile) di pianificare, intervenire e apprendere; qui si collocano le pratiche HRO e i meccanismi di governance (Limnios et al., 2014);

È necessario chiarire un punto spesso fonte di equivoci nel dibattito progettuale: **sostenibilità ≠ resilienza**, anche se i due concetti sono tra loro complementari (Elmgvist et al., 2019). La sostenibilità viene intesa come un obiettivo normativo volto alla riduzione dell'impatto ambientale a lungo termine e al miglioramento delle condizioni sociali ed ecologiche future. La resilienza, invece, è focalizzata sulla capacità di gestione degli "shock" e delle perturbazioni; può includere misure a breve termine (shelter temporanei, rafforzamenti) così come trasformazioni strutturali che incidono sulla futura vulnerabilità (Holling, 1973). Un progetto maturo integra entrambe le logiche: parte dai principi bioclimatici basati sulla progettazione passiva e dalla riduzione della domanda energetica per poi combinare soluzioni miste e tecnologie appropriate per prevedere strategie che garantiscano la continuità funzionale in condizioni estreme (Olgyay, 2015).

Ciò riflette la necessità di progettare ad una dimensione multi-scalare e interdisciplinare: non basta intervenire sul dettaglio costruttivo, è necessario lavorare sul sito, sull'infrastruttura, sulle pratiche d'uso e sulle reti sociali. In questo senso, gli studi su *design for disaster resilience* (Charlesworth & Fien, 2022) propongono un metodo che inizia con la corretta formulazione del problema, attraverso un'analisi sistematica delle relazioni sociali, ambientali e politiche; a cui prosegue lo sviluppo e il test di soluzioni alternative attraverso prototipazione e sperimentazione locale. Questo approccio è in linea con la pratica vernacolare osservata in Nepal, dove la resilienza degli insediamenti si è costruita empiricamente tramite adattamenti "intelligenti" e uso di risorse locali (Gautam et al., 2016).

Il concetto di resilienza può, dunque, essere tradotto nella capacità dello spazio costruito di diventare **rifugio**: ovvero un luogo in grado di proteggere, accogliere, rigenerare ed in grado di fornire una risposta spaziale alle nuove condizioni ambientali imposte dalla crisi climatica. Il rifugio climatico e sociale rappresenta una forma di resilienza costruita, dove l'architettura diventa un dispositivo capace di mediare tra l'ambiente naturale e la vita delle persone, riducendo le vulnerabilità e rafforzando le capacità di adattamento delle comunità (Karimi et al., 2023).

L'idea di rifugio, d'altronde, è alla base stessa dell'architettura. Come ricorda Viollet-le-Duc (1876), il gesto primordiale del costruire nasce dal bisogno di protezione: tre rami intrecciati, un intreccio di ramoscelli e fango, o blocchi di neve che si trasformano in igloo rappresentano le prime manifestazioni dell'abitare.

In questi contesti, l'architettura assume un ruolo fondamentale nel garantire comfort e sicurezza attraverso strategie passive, che minimizzano la dipendenza da sistemi meccanici e tecnologie energivore. Secondo Bodach (2014), l'architettura vernacolare, in assenza di mezzi meccanici, ha da sempre sviluppato soluzioni climaticamente sensibili, basate su misure solari passive e sull'uso di materiali locali.

Oggi, la crescente urbanizzazione e la diffusione di modelli costruttivi universali, standardizzati e spesso decontextualizzati, stanno progressivamente cancellando quella sapienza costruttiva che permetteva agli edifici di funzionare come "rifugi climatici" naturali (Pandey et al., 2022). In Nepal, come accennato nel punto 2.4, la sostituzione delle strutture in terra, pietra e legno con edifici in cemento armato sta determinando un aumento della domanda energetica e una perdita del legame tra costruzione e territorio (Pandey et al., 2022). Questo processo rappresenta un passaggio critico: la perdita di continuità con il sapere costruttivo locale riduce la capacità di adattamento delle comunità, rendendo gli insediamenti più vulnerabili alle crisi climatiche e sociali. Da qui l'urgenza di reinterpretare il concetto di rifugio non solo come spazio di protezione fisica, ma come luogo di resilienza sociale, in cui l'architettura favorisce coesione, cura e appartenenza.

Il rifugio climatico ha lo scopo di equilibrare il **rapporto tra uomo, ambiente e costruzione**, recuperando i principi dell'architettura vernacolare e reinterpretandoli alla luce delle sfide contemporanee, integrando conoscenze locali e tecnologie sostenibili per costruire spazi che rispondano alle condizioni reali del luogo.

Dal punto di vista sociale, il rifugio si configura come uno spazio di continuità e cura. In contesti segnati da fragilità economiche e disastri naturali ricorrenti, come il Nepal, le abitazioni e gli edifici collettivi assumono un valore che va oltre la mera funzione: diventano luoghi di aggregazione, educazione e ripartenza; luoghi per la comunità. (Pandey et al., 2022)

Progettare un rifugio climatico e sociale significa, dunque, agire su due piani complementari: quello fisico, legato alle prestazioni ambientali e strutturali dell'edificio, e quello relazionale, che riguarda la dimensione umana, culturale e identitaria dello spazio.

L'architettura sostenibile contemporanea deve quindi essere in grado di integrare in modo coerente la dimensione ambientale e quella sociale, reinterpretando il concetto di "rifugio" non più come semplice protezione fisica, ma come spazio capace di garantire continuità ecologica, sicurezza strutturale e coesione comunitaria.

È a partire da questa riflessione che si è sviluppato il percorso progettuale di questa tesi, assumendo il **rifugio climatico e sociale** come principio guida per definire un'architettura capace di rispondere alle condizioni ambientali locali e, al tempo stesso, di generare valore per la comunità che la abita.

### 3.2. Educare attraverso lo spazio: l'edificio come strumento pedagogico

Nel contesto della transizione ecologica e sociale, la scuola si configura ad oggi come un presidio fondamentale per la costruzione di comunità resilienti e consapevoli (UNICEF Nepal, 2018). Gli edifici scolastici, intesi come spazi di apprendimento e di relazione, assumono un ruolo chiave nella promozione di nuove forme di educazione orientate alla sostenibilità, all'inclusione e alla crescita collettiva. In questo senso, la dimensione fisica dello spazio diventa essa stessa strumento pedagogico, in grado di educare attraverso la propria forma, la propria materia e la propria capacità di accogliere e trasformarsi. L'architettura scolastica non è soltanto un contenitore di attività educative, ma un agente attivo di apprendimento, in grado di influenzare i comportamenti, stimolare la creatività e favorire la costruzione di una coscienza critica. Il rapporto tra educazione e architettura si fonda dunque su una relazione di reciprocità: come afferma Scavuzzo (2016), entrambe rappresentano esercizi di pensiero critico e atti sociali, accomunati dalla tensione conoscitiva del "formarsi" e del "dare forma". L'architettura, nel suo costruire, e l'educazione, nel suo costruirsi, si incontrano in un processo auto-formativo di "bildung", concetto centrale nel pensiero di Hans-Georg Gadamer (2012), che indica il continuo processo di formazione e trasformazione dell'individuo attraverso l'esperienza e il confronto con il mondo. Non si tratta quindi di un'educazione intesa come semplice trasmissione di conoscenze, ma di un percorso di crescita interiore e collettiva, in cui l'essere umano si costruisce mentre costruisce il proprio ambiente di vita. In questa prospettiva, l'architettura diventa uno strumento educativo capace di accompagnare tale processo, favorendo lo sviluppo della consapevolezza e del senso critico. Di fatti l'ambiente circostante, fisico e relazionale, per un bambino svolge un ruolo fondamentale soprattutto nei primi anni di vita, influenzando le conoscenze, le competenze e le abilità (Sameroff et al., 1993).

In questa prospettiva, le riflessioni pedagogiche di John Dewey assumono una rilevanza fondamentale. Il filosofo americano sottolineava l'importanza dell'esperienza diretta, dell'apprendimento e della partecipazione democratica come elementi centrali del processo educativo. Per Dewey, l'apprendimento autentico nasce dal coinvolgimento attivo e dall'interazione con l'ambiente: l'arte, intesa come esperienza, diventa così un veicolo di crescita personale e comunitaria (Dewey, 1938). Tale visione è oggi ripresa dall'educazione esperienziale, che riconosce nell'ambiente fisico e relazionale una componente essenziale dello sviluppo cognitivo ed emotivo (Pant et al., 2023).

Analogamente, la "Teoria dell'apprendimento trasformativo" di Mezirow amplia questa prospettiva, ponendo l'accento sulla riflessione critica e sul superamento dei presupposti culturali e cognitivi. L'educazione non è solo acquisizione di conoscenze, ma un processo di trasformazione interiore, di

costruzione di senso e di consapevolezza (Mezirow, 1997). In questa logica, anche l'architettura può essere letta come strumento educativo, capace di generare esperienze trasformative attraverso lo spazio.

La pedagogia critica introduce una dimensione etica e sociale al discorso educativo, riconoscendo alle arti e, per estensione, all'architettura, la capacità di rivelare e contrastare le disuguaglianze (Freire, 1970; Giroux 2004; Peters 2016). Lo spazio educativo diventa così luogo politico, aperto alla partecipazione, dove l'apprendimento si intreccia con la costruzione della cittadinanza (Pant et al., 2023). Così facendo l'edificio scolastico si configura come "terzo insegnante" (Malaguzzi, 2010), in grado di offrire una qualità dello spazio che si traduce in qualità dell'esistenza (Scavuzzo, 2016).

In questa direzione, la riflessione architettonica contemporanea individua nella flessibilità, nell'innovazione e nell'inclusività i principi fondanti della scuola del futuro (Fiorese, 2025). Gli ambienti di apprendimento devono poter rispondere a esigenze di utenti in continua evoluzione, facilitando la cooperazione e l'interazione.

Il dialogo tra design, architettura e pedagogia fonda dunque il concetto di **"educare attraverso lo spazio"**.

La pedagogia di Maria Montessori offre un contributo prezioso in questa direzione. Il suo concetto di "ambiente preparato" evidenzia come lo spazio fisico (nel complesso di ambiente e nel dettaglio di arredo) possa stimolare autonomia, curiosità e apprendimento attivo (Borrelbach, 2009; Al et al., 2012). La disposizione degli arredi, la luce naturale, i materiali e i colori diventano parte integrante del processo educativo, configurando un'architettura che educa prima ancora del suo uso. Questa visione trova eco anche nella pratica architettonica contemporanea, dove la progettazione degli spazi per l'infanzia e l'educazione è pensata come estensione dei processi cognitivi e sociali.

La scuola, dunque, non è solo il luogo dell'istruzione, ma il cuore pulsante della comunità, un presidio culturale e sociale capace di promuovere resilienza e coesione.

In contesti vulnerabili, come il Nepal, tale funzione si amplifica. Dopo il terremoto del 2015, che in soli quaranta secondi ha distrutto oltre 8.000 scuole (UNICEF Nepal, 2018), l'educazione in Nepal ha assunto un significato ancora più profondo, diventando non solo un diritto fondamentale ma anche uno strumento di ricostruzione sociale e comunitaria. Le scuole, infatti, sono state tra le prime strutture a essere ricostruite proprio perché riconosciute come elementi centrali della vita collettiva.

Come evidenziano Andersson e Lindkvist (2000), il sistema educativo nepalese ha storicamente dovuto confrontarsi con forti disuguaglianze territoriali e socio-economiche: la maggior parte delle scuole rurali si trova in condizioni precarie, spesso prive di risorse materiali e di adeguata formazione del personale docente. (Hunter, 2006; Olson & Kellum, 2003).

Persino la distribuzione territoriale delle scuole risulta disomogenea: le regioni più remote e montuose sono penalizzate rispetto alla Valle di Kathmandu, dove si concentra la maggior parte delle istituzioni secondarie (Skar & Cederroth, 1997).

Gli obiettivi principali definiti dalle politiche nazionali sono l'acquisizione di competenze di base in lettura, scrittura e calcolo, insieme a una formazione civica elementare. Attualmente, il sistema scolastico nepalese è articolato in:

- Istruzione di base (*Basic Education*) comprende otto anni, dalla prima all'ottava classe, e si conclude con l'esame: *Basic Level Examination (BLE)*.
- Istruzione secondaria, invece, si articola in due cicli: base (classi 9-10) e superiore (classi 11-12), culminando con il *National Examination Board Certificate*, necessario per l'accesso all'università (Edusanjal, 2025).

Parallelamente al sistema formale esistono percorsi tecnici e professionali promossi dal *Council for Technical Education and Vocational Training (CTEVT)*, che offrono corsi di pre-diploma e diploma finalizzati alla formazione di una forza lavoro qualificata.

LEVELS	GRADE	AGE
BASIC EDUCATION	PRE-PRIMARY EDUCATION (PPE)/ EARLY CHILDHOOD DEVELOPMENT (ECED)	P1 - P2 3 - 5
	PRIMARY EDUCATION	1 - 5 6 - 10
	LOWER SECONDARY EDUCATION	6 - 8 11 - 14
SECONDARY EDUCATION	SECONDARY EDUCATION	9 - 10 15 - 16
	HIGHER SECONDARY EDUCATION	11 - 12 17 - 18
HIGHER EDUCATION	HIGHER EDUCATION (UNIVERSITY) GENERAL, PROFESSIONAL, TECHNICAL	13 - 17+ 19 - 22+

Figura 101. "Sistema scolastico nepalese". Fonte: UNICEF Nepal. (2018), Edusanjal (2025), rielaborazione dell'autore della tesi

Le scuole nepalesi si suddividono in due categorie principali: le *Community Schools* e le *Institutional Schools*. Le prime sono finanziate dallo Stato e rappresentano la maggioranza delle istituzioni educative, mentre le seconde sono private e sostenute economicamente dalle famiglie. Nonostante la scuola pubblica sia gratuita (Skar & Cederroth, 1997; Khaniya & Kiernan,

1994), le spese per uniformi, materiali didattici ed esami rappresentano un ostacolo significativo per molte famiglie, contribuendo all'elevato tasso di abbandono scolastico (El Comedor, 2025). I dati evidenziano che solo il 68% degli studenti completa la scuola primaria e meno di un terzo raggiunge la fine del ciclo secondario.

Le disuguaglianze economiche e sociali sono ulteriormente aggravate da fattori culturali e di genere. La povertà costringe molti bambini a lavorare fin da piccoli, mentre le bambine, in particolare quelle appartenenti alle comunità più marginalizzate, affrontano barriere multiple dovute alla discriminazione di casta e ai matrimoni precoci: secondo i dati di Human Rights Watch, circa il 37% delle ragazze si sposa prima dei 18 anni, interrompendo prematuramente il proprio percorso educativo (UNICEF Nepal, 2018).

A ciò si aggiunge la carenza di infrastrutture scolastiche adeguate, che incide profondamente sulla dimensione sociale e sull'inclusività dell'ambiente educativo. La mancanza di spazi progettati con attenzione alle differenze di genere, come la separazione e l'adeguata gestione dei servizi igienici, rappresenta infatti una delle principali cause di abbandono scolastico femminile (Human Rights Watch 2025). In molti contesti, l'assenza di strutture che garantiscano privacy, sicurezza e igiene adeguata durante il periodo mestruale genera nelle ragazze un senso di disagio e vulnerabilità, compromettendo la loro partecipazione scolastica continuativa. Ciò evidenzia come la qualità architettonica e progettuale degli spazi educativi costituisca un fattore determinante nel favorire l'uguaglianza di accesso all'istruzione e nel promuovere una scuola realmente inclusiva e rispettosa delle diverse esigenze sociali e culturali.

Un altro aspetto critico è rappresentato dalla straordinaria diversità linguistica del Paese: in Nepal si parlano 123 lingue madri appartenenti a 125 gruppi etnici differenti, ma solo 24 di esse vengono utilizzate per i libri di testo. In molte scuole, infatti, solo una piccola parte degli studenti parla correntemente il nepalese, lingua ufficiale dell'insegnamento (UNICEF Nepal, 2018). Questa barriera linguistica incide sull'apprendimento: secondo le valutazioni dell'UNICEF, gli studenti non madrelingua nepalese hanno il 70% di probabilità in più di non raggiungere il livello minimo di comprensione della lettura rispetto ai loro coetanei di lingua nepalese.

Negli ultimi anni, il governo e le organizzazioni internazionali hanno tentato di promuovere l'uso della lingua madre nei primi anni di istruzione, incoraggiando un approccio più inclusivo e rispettoso della diversità culturale. Tuttavia, la carenza di insegnanti formati, l'assenza di materiali didattici multilingue e la fragilità delle strutture scolastiche ostacolano la piena realizzazione di questo modello. La formazione degli insegnanti, in particolare, rappresenta una criticità storica: fino a pochi anni fa, il superamento dell'esame di decimo livello (SLC Exam) era sufficiente per insegnare nella scuola primaria, senza alcuna formazione pedagogica specifica (Andersson & Lindkvist, 2000).

Nonostante le molteplici difficoltà la scuola rappresenta per molti bambini e famiglie l'unico accesso a opportunità di crescita e miglioramento della qualità di vita.

Dopo il terremoto, come accennato precedentemente, il ruolo dell'istituzione scolastica è andato ben oltre la sua funzione educativa. Le scuole temporanee, spesso costruite con materiali locali e tecniche costruttive a basso impatto, sono diventate simboli di resilienza. Queste strutture non solo hanno permesso la ripresa immediata delle attività didattiche, ma hanno anche favorito il rafforzamento del legame tra comunità, territorio e architettura divenendo dei veri e propri rifugi climatici e sociali (nel sottocapitolo successivo verranno affrontati più nel dettaglio tali aspetti).

Nei momenti di emergenza, le aule si trasformano in spazi di accoglienza o ricovero, mentre nei periodi ordinari l'edificio scolastico torna a essere luogo di apprendimento e di crescita collettiva.

Le politiche di ricostruzione e sviluppo promosse dal governo nepalese e dalle organizzazioni internazionali dopo il 2015 hanno progressivamente integrato il concetto di **“safe school”**, ponendo l'accento sulla sicurezza strutturale e sulla sostenibilità ambientale. Tuttavia, come sottolinea *Education Cluster Nepal* (2016), la sicurezza non può essere intesa unicamente in termini fisici: essa comprende anche il benessere psicologico e sociale degli studenti, la possibilità di apprendere in un ambiente sano, accogliente e culturalmente radicato.

Gli interventi architettonici che hanno accompagnato la ricostruzione, spesso realizzati in collaborazione con ONG e altri volontari, hanno mostrato come un progetto attento al contesto possa contribuire non solo alla ricostruzione materiale del luogo, ma anche alla ricostruzione simbolica di esso. La progettazione partecipata (insegnati, genitori, abitanti), l'uso di materiali come il bambù, la terra cruda o il legno locale, e la valorizzazione del sapere costruttivo vernacolare hanno favorito processi di appropriazione collettiva dello spazio, trasformando la scuola in luogo di apprendimento esteso. Progettare una scuola in Nepal, oggi, significa dunque riflettere non solo sulla qualità dell'ambiente educativo, ma anche sul ruolo simbolico e sociale dell'architettura nel sostenere la resilienza delle comunità. In questo senso, la scuola si conferma come presidio di sostenibilità e coesione, un luogo in cui la dimensione spaziale, pedagogica e ambientale si fondono.

### 3.3. Oltre l'uso educativo: spazi scolastici polifunzionali e resilienti

Il Nepal rappresenta oggi un caso emblematico di come l'architettura scolastica possa trasformarsi in risposta alle emergenze ambientali e sociali. Come precedentemente accennato, i numerosi disastri naturali che hanno colpito il paese (cfr. capitolo 1.4), hanno segnato una svolta decisiva nella definizione delle priorità nazionali, spingendo il paese a mettere la sicurezza scolastica e la resilienza delle comunità al centro delle proprie politiche pubbliche. Da allora, il Nepal si è posto in prima linea nell'affrontare le sfide poste dalla crisi climatica, contribuendo in modo significativo alla definizione di politiche regionali e globali per la riduzione del rischio di catastrofi nel settore educativo. (GADRRRES, 2024)

In questo contesto si inserisce il concorso "Nepal School Project", che evidenzia ancor più come la scuola venga riconosciuta non solo come luogo di apprendimento, ma anche come presidio fondamentale per la coesione e la sicurezza della comunità. Tale visione ha portato il governo nepalese a pubblicare il quadro nazionale e le linee guida per l'attuazione delle Scuole come Zone di Pace (SZOP), con l'obiettivo di elevare l'impegno politico verso la salvaguardia dell'istruzione anche in situazioni di conflitto, garantendo la continuità dell'insegnamento e dell'apprendimento.

Parallelamente, le politiche educative hanno iniziato a includere componenti specifiche per il miglioramento delle infrastrutture scolastiche, promuovendo edifici sicuri, flessibili e sostenibili.

*"Una scuola più sicura e resiliente può salvare vite umane, fornire un rifugio sicuro per la comunità locale, fungere da riparo temporaneo e contribuire a riportare la normalità nella società in tempi di calamità".*

(D'Ayala et al., 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101446>)

Tuttavia, gli edifici scolastici pubblici costruiti prima dell'entrata in vigore di adeguati regolamenti edilizi presentano spesso carenze strutturali, accentuate da una configurazione architettonica spesso non adeguata. Tutto ciò ha stimolato la redazione del **Comprehensive School Safety Framework** (CSS), elaborato in collaborazione con l'UNICEF, Save the Children e la Global Alliance for Disaster Risk Reduction and Resilience in the Education Sector (GADRRRES): istituita nel 2013 con lo scopo di passare dall'ottica di recupero dai disastri alla preparazione e prevenzione dei disastri. Il Nepal ha promosso un approccio integrato che unisce la sicurezza strutturale delle strutture di apprendimento, la gestione del rischio e l'educazione al rischio e alla resilienza (D'Ayala et al., 2020; UNICEF Nepal, 2023). Le scuole diventano così spazi polifunzionali: luoghi di apprendimento quotidiano, ma anche rifugi temporanei in caso di calamità naturali, come inondazioni o terremoti, e centri di aggregazione sociale in grado di sostenere la ripresa post-disastro.

*"La riduzione del rischio di catastrofi inizia a scuola"*

(United Nations/ISDR & UNESCO (2006). *Disaster Risk Reduction Begins at School: World Disaster Reduction Campaign 2006–2007*. Geneva: United Nations International Strategy for Disaster Reduction.)

Per far sì che questa frase diventi realtà in Nepal, la *National Society for Earthquake TechnologyNepal* (NSET) ha implementato il Programma di Sicurezza Sismica nelle Scuole (SESP) nepalesi. Grazie a questo, tutti gli edifici ristrutturati subito dopo il terremoto sono stati utilizzati come rifugio sicuro dalla comunità. È stato proprio il coinvolgimento diretto della comunità nei processi di ricostruzione a determinare la percezione delle scuole come luoghi sicuri. La partecipazione attiva degli abitanti ha infatti permesso loro di conoscere in modo concreto i materiali impiegati e le tecniche costruttive adottate, generando un senso diffuso di fiducia e appartenenza nei confronti dell'edificio scolastico.

Divulgare alla comunità conoscenza e competenze sulla sicurezza antisismica dovrebbe essere uno sforzo continuo e dovrebbe essere svolto in tutte le scuole nepalesi, anche quelle ancora inadeguate.

Le "Guidelines for Developing Type Designs for School Buildings" in Nepal (Government of Nepal, Ministry of Education, 2016) introducono un approccio modulare e standardizzato, volto a garantire la rapidità costruttiva, la sostenibilità economica e la durabilità delle strutture. Tali linee guida sottolineano l'importanza di considerare fin dalle prime fasi di progetto la resilienza ai disastri e la sostenibilità ambientale, promuovendo l'uso di materiali locali e tecnologie appropriate rispetto al contesto geoclimatico. Gli edifici scolastici sono pensati come sistemi flessibili, in grado di adattarsi ed accogliere la comunità durante situazioni di emergenza. L'integrazione di spazi di emergenza, aree multifunzionali e servizi di base, come kit di pronto soccorso o aree dedicate all'accoglienza temporanea, risponde alla necessità di una scuola che diventi nodo territoriale di sicurezza e cura.

Parallelamente, il modello educativo stesso influisce sulla configurazione spaziale. Le aule Montessori, ad esempio, offrono un paradigma di spazio educativo aperto e partecipativo, dove l'ambiente costruito diventa parte attiva del processo di apprendimento. Le classi con alunni di età mista vengono progettate partendo dal presupposto che ogni bambino è unico; quindi, lo sviluppo di ogni bambino è diverso e ciò si riflette nell'organizzazione flessibile degli arredi e l'assenza della tradizionale cattedra a favore di un "help desk" per l'insegnante favoriscono l'autonomia e la cooperazione (Hertzberger, 2008; Selda Al et al., 2012).

Questo tipo di configurazione spaziale, basata sulla libertà di scelta, sull'apprendimento per scoperta e sull'interazione tra pari, rappresenta un modello capace di ispirare la progettazione di spazi scolastici dinamici, adattabili e aperti anche a funzioni sociali più ampie.

In questo scenario, il tema dell'accessibilità universale assume un ruolo centrale. La scuola deve essere accessibile non solo fisicamente, ma anche

socialmente e cognitivamente: uno spazio in cui la diversità diventa valore e occasione di apprendimento.

Le linee guida per la progettazione sostenibile e inclusiva delle scuole devono quindi fondarsi su alcuni principi chiave:

- Garantire **sicurezza strutturale e resilienza**, progettando spazi in grado di resistere alle vulnerabilità legate alla crisi climatica (punto 1 della figura 102);

● Promuovere **accessibilità e inclusione**, progettando ambienti che favoriscano l'autonomia e la partecipazione di tutti gli utenti, qui vi si fonda il concetto di "Design for All" che nasce dall'evoluzione dei principi del "Universal Design" di Ronald L. Mace e mira a creare ambienti e prodotti utilizzabili da chiunque, indipendentemente da età, abilità o condizione sociale. Tale approccio promuove la progettazione per la diversità umana, l'inclusione sociale e l'uguaglianza (EIDD, 2004), superando l'idea di "utente standard" e riconoscendo la complessità delle esperienze umane (Mace, 1998) (punto 2 della figura 102);

● Progettare attraverso principi di **modularità e flessibilità funzionale**, affinché gli spazi possano essere riconfigurati e utilizzati anche come rifugi o centri di emergenza. La standardizzazione e la modularizzazione sono elementi fondamentali per ridurre i costi, migliorare la qualità, facilitare l'efficienza, la supervisione, il monitoraggio ed il controllo della qualità (Ministry of Education, 2016) (punto 3 della figura 102);

● Valorizzare **materiali locali e tecnologie appropriate**, riducendo l'impatto ambientale e rafforzando l'identità territoriale (punto 4 della figura 102).

In conclusione, progettare spazi scolastici polifunzionali e resilienti significa pensare la scuola come un'infrastruttura sociale capace di educare, proteggere e rigenerare attraverso un'architettura sensibile al contesto ed ai bisogni di una comunità.

1

## DESIGN FOR LONGEVITY

La principale sfida progettuale è quella di sviluppare una struttura resiliente e durevole in grado di garantire la sicurezza in caso di **eventi sismici**, considerando l'elevata attività tettonica del Nepal, ma anche in grado di resistere alle inondazioni legate al **clima monsonico**. Questa resilienza strutturale deve essere raggiunta mantenendo la sostenibilità ambientale e l'efficienza economica, in modo che il progetto sia accessibile, replicabile e realmente applicabile al contesto locale.

2

## DESIGN FOR ALL

Tale approccio progettuale mira a rendere spazi, prodotti e servizi accessibili e fruibili dal maggior numero possibile di persone, indipendentemente da età, abilità o condizioni sociali. Nasce dal funzionalismo scandinavo e si consolida con le politiche di welfare europee orientate alla **"società per tutti"**, evolvendosi poi in una filosofia centrata sull'inclusione e sull'uguaglianza. L'obiettivo è superare il concetto di "utente standard" per abbracciare la diversità umana, promuovendo soluzioni che uniscono estetica, funzionalità e accessibilità.

3

## MODULAR DESIGN

I principi di **modularità, flessibilità e scalabilità** sono fondamentali, con l'obiettivo di consentire la progressiva integrazione di nuovi elementi man mano che i finanziamenti diventano disponibili. Poiché la costruzione dell'edificio sarà effettuata principalmente da manodopera locale, è fondamentale che le soluzioni proposte siano pratiche e semplici da implementare e mantenere.

L'applicazione dei principi di **Design for Disassembly (DfD)** è un modo strategico per semplificare il montaggio e lo smontaggio e consentire una futura adattabilità, promuovendo così la sostenibilità e l'economia circolare nel processo di costruzione.

4

## DESIGN FOR REUSABILITY

Architettura capace di mantenere le proprie prestazioni nel lungo periodo, riducendo gli sprechi e promuovendo un ciclo virtuoso di **riuso e rigenerazione dei materiali**. Si pone la sostenibilità come principio guida nelle scelte architettoniche, promuovendo l'uso consapevole delle risorse e la riduzione dell'impatto ambientale lungo l'intero ciclo di vita dell'edificio. In questa prospettiva, la selezione dei materiali assume un ruolo centrale assieme all'integrazione di sistemi di energia rinnovabile.

Figura 102. "Linee guida per una progettazione sostenibile". Dell'autore della tesi

## /CAPITOLO IV: CASI STUDIO: NEPAL E CONTESTI AFFINI



Il presente capitolo analizza una serie di casi studio selezionati in base a criteri ispirati ai principi del Nuovo Bauhaus Europeo (NEB), movimento che promuove un approccio integrato tra sostenibilità ambientale, qualità estetica e inclusione sociale. I progetti esaminati mirano a coniugare innovazione tecnologica e costruttiva con la dimensione culturale e comunitaria, mostrando come l'architettura possa farsi strumento di trasformazione sociale e rigenerazione territoriale.

La selezione dei casi risponde a criteri che soddisfano sia la **dimensione funzionale**, legata agli obiettivi climatici, alla circolarità dei materiali, alla riduzione dell'inquinamento e alla tutela della biodiversità, sia la **dimensione sociale**, orientata alla creazione di spazi inclusivi, accessibili e in grado di valorizzare la diversità. Allo stesso tempo, è stata considerata la **componente estetica**, intesa come qualità dell'esperienza e armonia tra forma e funzione, capace di conferire significato e identità ai luoghi dell'apprendimento e della comunità.

Figura 103. "Mappa di contesto: distribuzione globale dei casi studio". Dell'autore della tesi

## 4.1. Scuole per territori vulnerabili

In questa sezione vengono analizzati progetti scolastici realizzati in contesti caratterizzati da vulnerabilità ambientale, sociale o climatica. L'obiettivo è comprendere come le strategie architettoniche e tecnologiche adottate rispondano alle esigenze di sicurezza, adattabilità e inclusione, ponendo particolare attenzione ai principi di riduzione del rischio e sostenibilità.

### /BAAN NONG BUA SCHOOL

**Progettisti:** Jun Sekino

**Luogo:** Baan Nong Bua, Thailand

**Anno:** 2011

**Destinazione d'uso:** Scuola primaria

**Materiali:** Acciaio, Pannelli in legno cemento, Bambù, Policarbonato ondulato

**Utilizzo del bambù:** Impiegato per rivestimenti esterni e finiture



Figura 104. "Vista esterna dell'ingresso".



Figura 105. "Vista dall'interno dell'aula".

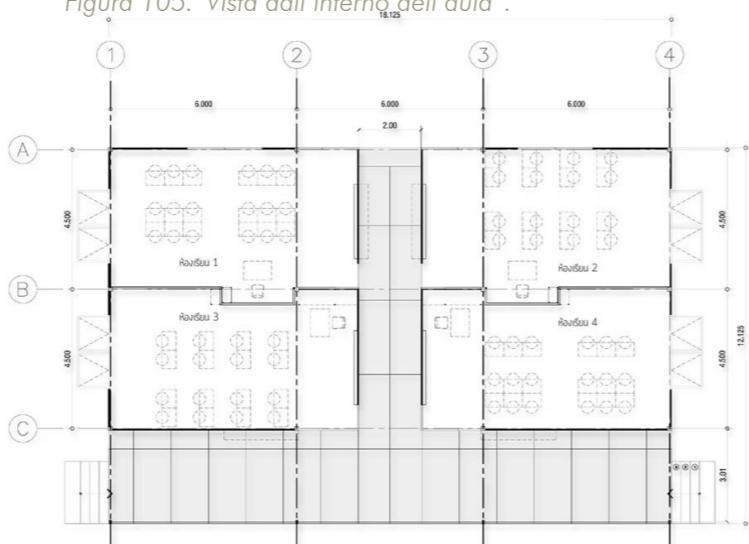


Figura 106. "Pianta piano terra".



Figura 107. "Dettaglio degli elementi strutturali dall'esterno".



Figura 108. "Vista dell'atrio".

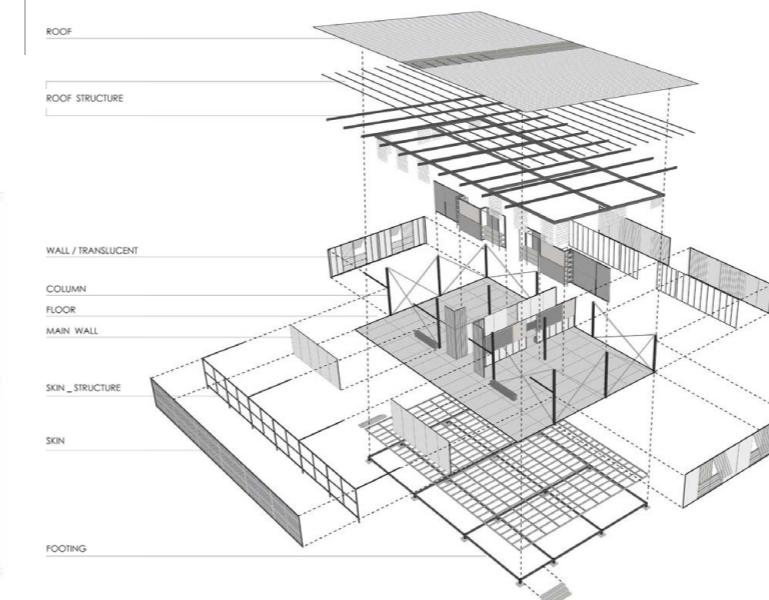


Figura 109. "Esploso assonometrico".

in legno cemento, un materiale economico, facilmente reperibile e versatile, impiegato sia per i tamponamenti che per gli arredi interni (Figura 105). Questa scelta consente di ridurre al minimo gli scarti di cantiere e di favorire eventuali adattamenti futuri da parte degli utenti. La scuola è infatti progettata come spazio dinamico e modificabile, capace di evolversi nel tempo: studenti e insegnanti possono intervenire direttamente nella configurazione delle aule, ad esempio rimuovendo parti di pannelli o integrando materiali locali come il bambù.

Dal punto di vista climatico, l'edificio risponde in modo diretto alle condizioni della Thailandia settentrionale: la copertura a falda unica e le ampie gronde sporgenti proteggono dalle piogge monsoniche, mentre le verande esterne e i divisorii in bambù e policarbonato ondulato favoriscono la ventilazione naturale e il comfort termico (Figura 108). La presenza di uno spazio di transizione destinato a togliersi le scarpe, in linea con la tradizione culturale thailandese, conferisce al progetto un valore simbolico oltre che funzionale, trasformando la soglia tra esterno e interno in un luogo di relazione e rispetto (Figura 104).

La partecipazione attiva della comunità locale è stata determinante non solo nella fase costruttiva, ma anche nella percezione dell'edificio come luogo sicuro e condiviso. Gli abitanti, avendo contribuito direttamente alla costruzione, riconoscono nella scuola non solo un'infrastruttura educativa, ma un presidio comunitario e un punto di riferimento in caso di emergenza. Questa dimensione collettiva e partecipata rappresenta uno degli aspetti più significativi del progetto: la scuola non appartiene a un singolo soggetto, ma all'intera comunità, diventando espressione concreta di resilienza.

Descrizione caso studio ed immagini tratte da fonte:  
<https://www.dezeen.com/2015/11/03/baan-nong-bua-earthquake-resistant-primary-elementary-school-chiang-rai-thailand-jun-seokino/>  
 (Consultato il 11/04/2025)  
<https://divisare.com/projects/301912-junsekino-spaceshift-studio-baan-nong-bua-school> (Consultato il 12/04/2025)

## /MOVING SCHOOLS

**Progettisti:** Dan LaRossa, Building Trust international, Amadeo Bennetta

**Luogo:** Mae Sot, Thailand

**Anno:** 2013

**Destinazione d'uso:** Edificio scolastico "trasportabile"

**Materiali:** Acciaio, Bambù

**Utilizzo del bambù:** Impiegato per realizzare pannelli di rivestimento

Il progetto MOVING School, sviluppato per l'organizzazione no-profit "Building Trust International", nasce come risposta concreta alle esigenze educative delle comunità di migranti e rifugiati birmani che vivono lungo il confine tra Thailandia e Myanmar. Si tratta di un contesto caratterizzato da forte instabilità territoriale e assenza di diritti fondiari, dove la costruzione di infrastrutture permanenti risulta spesso impossibile. In questo quadro, il progetto si configura come una soluzione architettonica flessibile e trasferibile, concepita per essere smontata, trasportata e rimontata in funzione delle necessità delle comunità locali. La struttura portante è costituita da un telaio modulare in acciaio prefabbricato, rialzato da terra per ridurre il rischio di allagamenti e favorire la ventilazione naturale (Figura XX). Pneumatici di recupero riempiti di ghiaia formano le fondamenta che possono essere ricollocate insieme alla scuola, se lo si desidera (Figura XX).

Il rivestimento dell'edificio utilizza pannelli di bambù prodotti localmente e un tessuto tecnico impermeabile e resistente ai raggi UV per la copertura, in grado di migliorare le prestazioni termoacustiche rispetto ai tradizionali teloni o tetti in lamiera. Il tetto a una falda, dotato di un'intercapedine di ventilazione, garantisce la circolazione dell'aria e il comfort interno, mentre la veranda ombreggiata e i pannelli mobili di bambù favoriscono l'interazione tra spazio interno ed esterno, in continuità con la tradizione architettonica locale (Figura XX).

Dal punto di vista spaziale, le pareti interne mobili consentono di riconfigurare facilmente gli ambienti, adattandoli a diverse funzioni didattiche o



Figura 110. "Vista esterna del complesso".



Figura 111. "Pneumatici utilizzati per le fondazioni".



Figura 112. "Scheletro della struttura in acciaio".



Figura 113. "Vista dell'atrio".



Figura 114. "Vista interna dell'aula".

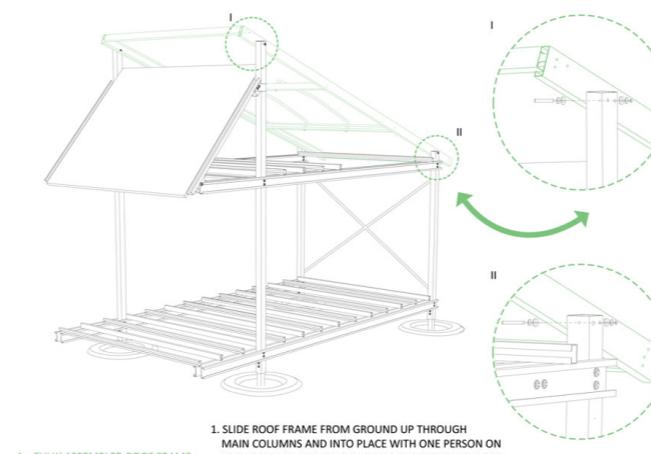


Figura 115. "Dettaglio della struttura".



Figura 116. "Pianta piano terra".

comunitarie (Figura XX). Le istruzioni di montaggio, liberamente scaricabili dal sito di Building Trust, rendono il progetto replicabile e accessibile, promuovendo un modello di edilizia educativa aperta e condivisa.

Oltre all'aspetto tecnico, il progetto ha un forte valore sociale e pedagogico. La costruzione delle scuole è infatti accompagnata da programmi di formazione professionale rivolti alla popolazione locale, in collaborazione con l'impresa sociale "Ironwood Studio". In questo modo, la scuola diventa non solo uno spazio per l'educazione dei bambini, ma anche un laboratorio di apprendimento per la comunità, che acquisisce competenze costruttive e capacità di gestione delle risorse locali.

Le MOVING Schools hanno trasformato radicalmente la qualità degli spazi di apprendimento per oltre mille bambini, passando da strutture precarie in tela e fango a edifici sicuri, luminosi e ventilati, che fungono anche da centri di aggregazione comunitaria.

In prospettiva critica, la MOVING School dimostra come l'architettura possa farsi strumento di empowerment e adattamento territoriale, offrendo una risposta flessibile alle fragilità di contesti vulnerabili, senza rinunciare alla qualità dello spazio educativo e alla dignità del costruire.

Descrizione caso studio ed immagini tratte da fonte:  
<https://divisare.com/projects/245041-dan-larossa-building-trust-international-amadeo-bennetta-moving-schools-001>  
(Consultato il 12/04/2025)

## /UNIÓN ALTO SANIBENI NURSERY AND PRIMARY SCHOOL

**Progettisti:** Marta Maccaglia, Semillas

**Luogo:** Tanquín, Perù

**Anno:** 2019

**Destinazione d'uso:** Scuola materna e primaria

**Materiali:** Calcestruzzo armato, Legno, Pannelli OSB, Mattoni in argilla cotta

**Utilizzo del bambù:** Non previsto

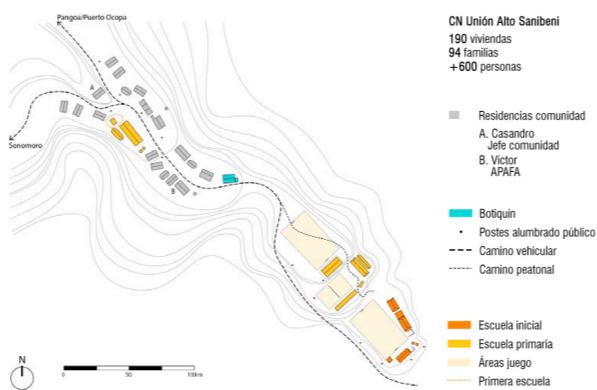


Figura 117. "Planimetria".



Figura 118. "Vista esterna del complesso".

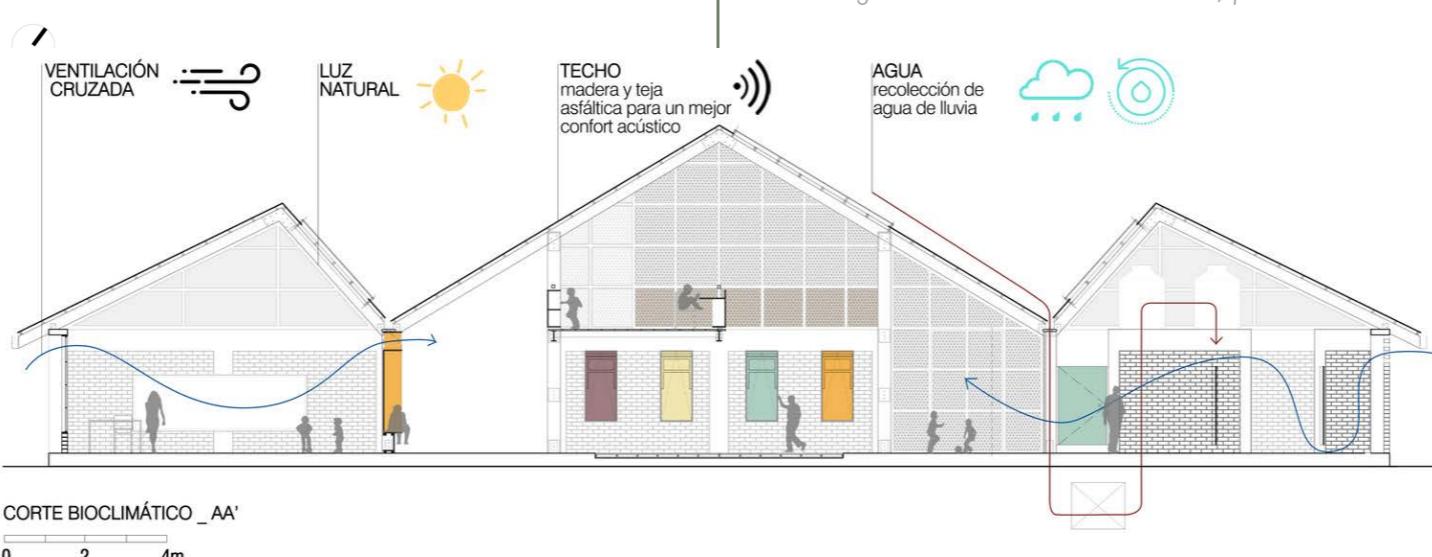


Figura 119. "Sezione tecnologica che illustra le strategie bioclimatiche".

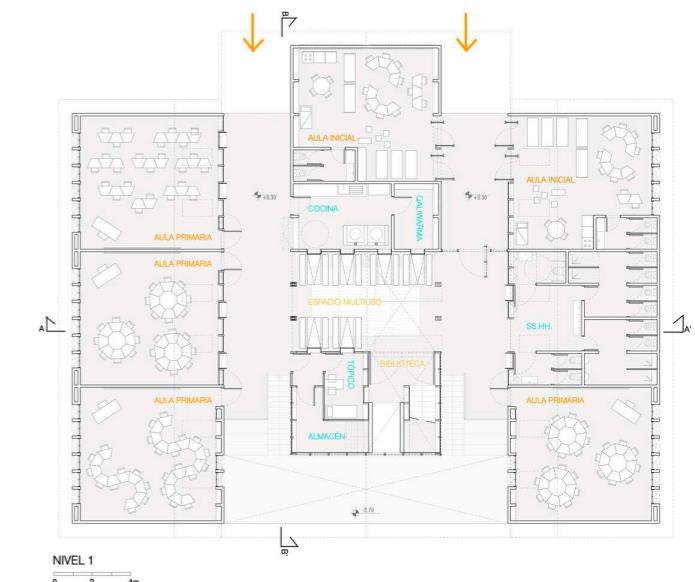


Figura 121. "Vista interna dell'aula, primo piano".



Figura 122. "Vista interna dell'aula, piano terra".

degli ambienti. La piazza interna, distribuita su più livelli, è collegata al piano superiore attraverso due scivoli e una scala, configurandosi come uno spazio multifunzionale per attività ricreative, educazione fisica, incontri e laboratori. La biblioteca, disposta su due livelli e collegata a un laboratorio tramite un ponte, sfrutta i doppi volumi per favorire la percezione spaziale e la luce naturale (Figura 120). Dal punto di vista costruttivo, l'edificio si adatta con sensibilità al terreno irregolare e all'orientamento sud-est. I corpi laterali si sviluppano su due livelli, mentre quello centrale raggiunge il terzo piano, definendo una composizione armonica e ben inserita nel contesto. La struttura portante è in cemento armato e legno, mentre le pareti esterne sono realizzate in mattoni di argilla cotta, materiale locale di facile reperibilità e buona inerzia termica. Gli interni impiegano pannelli lignei per garantire comfort e calore percettivo, mentre la copertura è costituita da pannelli OSB e tegole di asfalto, scelti per la loro leggerezza e resistenza alle condizioni climatiche.



Descrizione caso studio ed immagini tratte da fonte:  
<https://www.archdaily.com/935373/union-alto-sanibeni-nursery-and-primary-school-semillas>  
 (Consultato il 29/04/2025)

## 4.2. Scuole in bambù

Questa sezione raccoglie esempi di edifici scolastici in cui il bambù viene impiegato come materiale principale. L'analisi mira a evidenziare le potenzialità del bambù in termini di prestazioni strutturali, durabilità e valore culturale, indagando come il materiale possa contribuire alla definizione di architetture sostenibili e radicate nel contesto locale.

### /PANI COMMUNITY CENTRE

**Progettisti:** SchilderScholte architects

**Luogo:** Rajarhat, Bangladesh

**Anno:** 2014

**Destinazione d'uso:** : Centro comunitario con aule scolastiche, laboratori artigianali e spazi comuni per attività sociali.

**Materiali:** Bambù, Mattoni modellati a mano, Legno di mango, Acciaio riutilizzato, Malta locale e sottilissimi pannelli ondulati riciclati.

**Utilizzo del bambù:** Impiegato a livello strutturale (colonne, copertura) e rivestimenti di pareti e infissi

Il Pani Community Centre di Rajarhat, nel Bengala settentrionale, rappresenta un esempio significativo di architettura sostenibile e socialmente impegnata, sviluppata per la fondazione olandese Pani.

Il progetto, realizzato pro bono, nasce dall'intento di creare un edificio che fungesse sia da scuola sia da centro comunitario per la popolazione locale, offrendo spazi educativi e ricreativi destinati a diverse fasce d'età, dai bambini agli anziani.

L'approccio progettuale si fonda sulla **valorizzazione delle risorse materiali e umane locali**, ponendo particolare attenzione alla sostenibilità ambientale e all'autonomia costruttiva della comunità. Tutti i materiali impiegati sono infatti reperiti entro un raggio di 24 km dal sito di intervento, riducendo l'impatto ambientale dovuto al trasporto e sostenendo l'economia locale. Tra questi figurano bambù, mattoni fatti a mano, legno di mango, acciaio di recupero, malta locale e pannelli di acciaio ondulato riciclati. L'intero processo costruttivo è stato improntato alla riduzione dei consumi energetici: l'uso di elettricità e combustibili fossili è stato pressoché nullo, promuovendo così un modello di edilizia a basso impatto.

Il complesso è composto da tre volumi principali



Figura 123. "Vista del cortile esterno".



Figura 124. "Pianta piano terra".



Figura 125. "Sezione trasversale".



Figura 126. "Vista esterna della corte centrale".



Figura 127. "Vista interna dell'aula".



Figura 128. "Dettaglio strutturale".

disposti sotto un'unica grande copertura a forma di U realizzata con pannelli metallici ondulati sostenuti da colonne di bambù. Due blocchi a due piani ospitano la scuola, mentre il terzo, a un solo piano, accoglie un'officina per biciclette, un negozio e uno spazio per riunioni comunitarie sul tetto. Questa articolazione volumetrica genera una serie di spazi aperti e semiacuti che favoriscono l'interazione sociale, in particolare il cortile centrale, concepito come una piazza coperta destinata alle attività collettive (Figura 126). Dal punto di vista bioclimatico, il progetto sfrutta l'orientamento est-ovest per massimizzare la ventilazione trasversale e ridurre la necessità di ventilatori elettrici. La copertura sospesa, oltre a proteggere dalle piogge monsoniche, consente di ombreggiare le facciate e convogliare l'acqua piovana verso un sistema di raccolta (Figura 125). Il raffrescamento naturale è inoltre potenziato dalla vegetazione e dalla presenza di uno stagno nelle vicinanze, che contribuisce a mitigare le temperature interne.

Le facciate sono realizzate in mattoni intonacati, in parte dipinti di giallo brillante, tonalità ispirata ai fiori di senape tipici del paesaggio bengalese (Figura 128). Le pareti interne sono invece tinte di azzurro-grigio, una scelta cromatica derivata da osservazioni di biomimetica: questo colore tende infatti a tenere lontane le mosche e altri insetti (Figura 123). Il bambù assume in questo edificio un ruolo di rilievo simbolico e strutturale. Oltre a sorreggere la grande copertura, viene impiegato per il rivestimento delle pareti, delle porte-finestre con la volontà di riqualificare il valore del materiale tradizionale. L'impianto spaziale favorisce la partecipazione comunitaria: al piano terra si trovano gli spazi didattici e i servizi igienici, mentre al primo piano, sopra l'officina, un'area per assemblee pubbliche è collegata alle aule tramite una passerella in legno.

Il progetto diviene, dunque, laboratorio di innovazione costruttiva, capace di reinterpretare tecniche e materiali vernacolari in chiave contemporanea, promuovendo al contempo una cultura della sostenibilità condivisa.

Descrizione caso studio ed immagini tratte da fonte:  
"Pani Community Centre / SchilderScholte architects" 24 Feb 2015. ArchDaily. Accessed 24 Nov 2025. ISSN 0719-8884. <https://www.archdaily.com/600713/pani-community-centre-schilderscholte-architects>

## /BIDYANONDO SAMPRITI ORPHANAGE SCHOOL

**Progettisti:** AKM Saleh Ahmed Anik, Kanak Saha, Sayon Sur; Associates-Babu Singh, Hlatun Singh, Saiful Islam.

**Luogo:** Ramu, Cox Bazar, Bangladesh

**Anno:** 2019/2020

**Destinazione d'uso:** Scuola e centro ricreativo per bambini orfani

**Materiali:** Bambù, Legno

**Utilizzo del bambù:** Struttura portante, pareti e finiture

Il progetto si colloca nel villaggio di Ramu, nel sud del Bangladesh, ed è parte dell'orfanotrofio gestito dalla fondazione Bidyanondo, che ospita oltre cento bambini appartenenti a comunità indigene. Il progetto nasce dall'esigenza di sostituire una struttura temporanea a un piano con un complesso più articolato, comprendente ostelli separati per ragazzi e ragazze e una nuova scuola che potesse fungere anche da spazio polivalente per attività collettive. Questa scuola rappresenta un modello emblematico di architettura capace di reinterpretare, attraverso l'utilizzo del bambù e di tecniche costruttive tradizionali, una visione contemporanea.

L'edificio, di 28 x 13 metri, si configura come un padiglione aperto immerso nel paesaggio rurale e circondato su tre lati da uno stagno, utilizzato dalla comunità per l'allevamento di pesci e ninfee (Figura 131). Questa relazione diretta con l'acqua e i campi circostanti contribuisce a definire un ambiente sereno e pedagogicamente stimolante, dove il contatto visivo e fisico con la natura diventa parte integrante dell'esperienza educativa. La disposizione sfalsata delle aule consente di creare due spazi semi-aperti che fungono da aree di studio e gioco all'aperto, favorendo un apprendimento dinamico e informale (Figura 132).

Dal punto di vista costruttivo, il progetto si basa sull'impiego di materiali naturali e locali, come bambù, legno e foglie di Golpata, raccolte nella vicina regione delle Sundarbans. La copertura in Golpata garantisce un buon isolamento termico e contribuisce al comfort ambientale interno, mantenendo freschi gli spazi durante le stagioni



Figura 129. "Vista esterna del complesso".



Figura 130. "Vista esterna dell'ingresso".

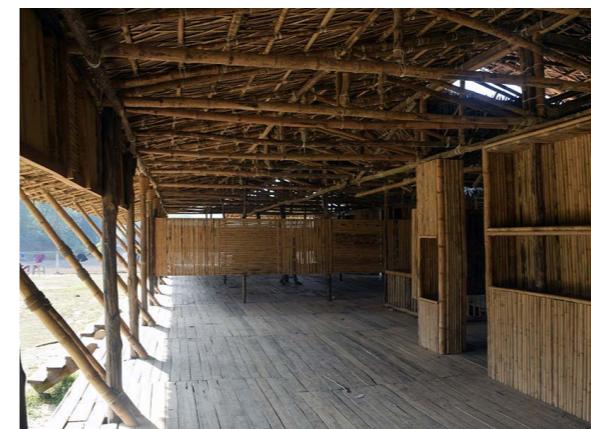


Figura 132. "Vista interna".



Figura 133. "Vista interna con dettaglio della copertura".

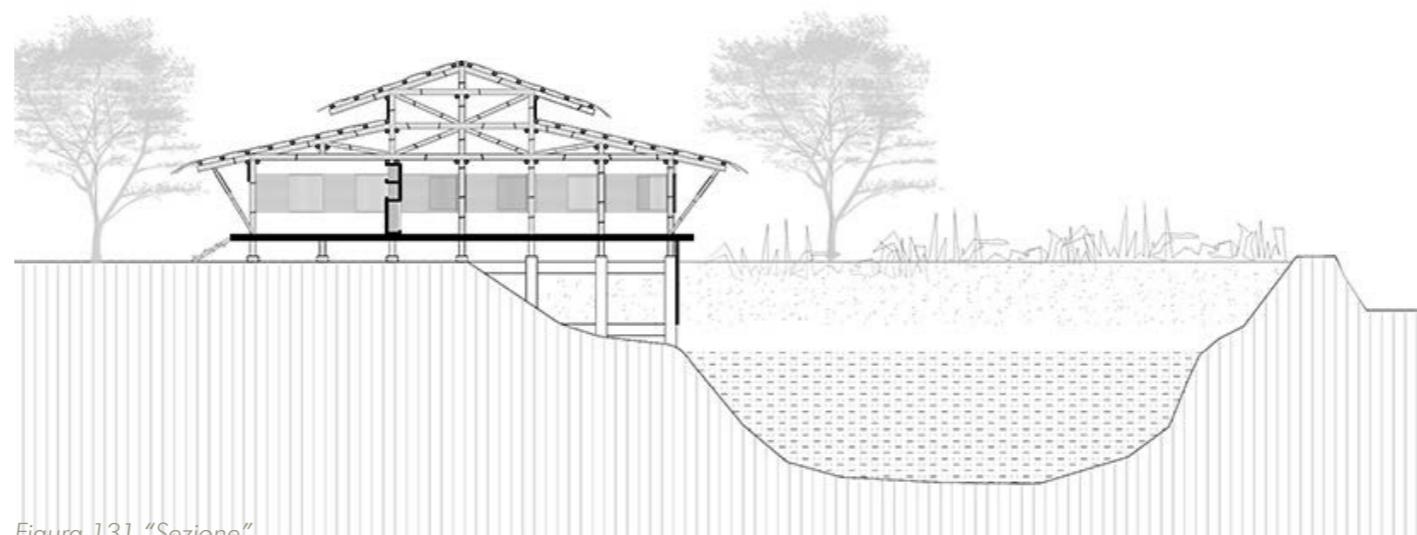


Figura 131. "Sezione".

calde e umide, tipiche del clima del Cox's Bazar. L'utilizzo di materiali facilmente reperibili e a basso impatto ambientale riduce al minimo l'impronta ecologica dell'intervento, promuovendo una costruzione sostenibile e replicabile.

Uno degli aspetti più significativi del progetto riguarda la collaborazione con la comunità locale. Molte delle tecniche tradizionali di lavorazione del bambù erano state dimenticate, rendendo necessario un processo di ricerca e sperimentazione condivisa.

Gli architetti hanno studiato metodi costruttivi vernacolari, recuperandoli da testi e archivi, e hanno realizzato modelli in scala con la popolazione locale per testare soluzioni costruttive prima della fase esecutiva (Figura 134). Questo approccio partecipativo ha permesso di ricostruire un saper fare collettivo, restituendo alla comunità un ruolo attivo e consapevole nel processo di costruzione.

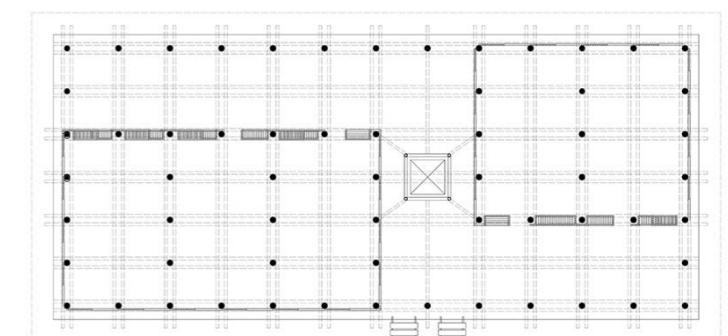


Figura 134. "Pianta piano terra".

Descrizione caso studio ed immagini tratte da fonte:  
<https://contextbd.com/bidyanondo-sampriti-orphanage-school/>  
<https://sthapattiya-o-nirman.com/en/projects/bidyanondo-project>  
(Consultato il 24/04/2025)

## /EARTHEN SCHOOL TIPU SULTAN MERKEZ

**Progettisti:** Ziegert, Roswag, Seiler Architekten Ingenieure

**Luogo:** Jar Maulwi, Pakistan

**Anno:** 2006

**Destinazione d'uso:** Edificio scolastico

**Materiali:** Bambù, Terra battuta

**Utilizzo del bambù:** Impiego strutturale per la realizzazione del piano superiore, in copertura e per rivestimento

Il progetto scolastico promosso da Tipu Sultan Merkez propone un intervento innovativo che coniuga tradizione costruttiva locale e sostenibilità ambientale, dimostrando come materiali naturali quali terra e bambù possano essere reinterpretati in chiave contemporanea per garantire sicurezza, durabilità ed efficienza energetica.

La scuola, concepita per ospitare otto aule, è articolata su due livelli e realizzata attraverso un sistema costruttivo misto: un basamento massivo in terra battuta al piano terra e una struttura leggera in bambù al piano superiore. L'obiettivo principale è quello di valorizzare le tecniche costruttive in terra e in bambù, (tradizionalmente impiegato solo per costruzioni temporanee) come materiali da costruzione capaci di garantire un'elevata qualità architettonica e prestazionale.

Dal punto di vista spaziale, il complesso si compone di due corpi principali in terra battuta che ospitano le aule, affiancati da una struttura centrale in bambù che integra le scale, le aree di servizio e la sala studio (Figura 136). Gli spazi didattici al piano terra sono caratterizzati da ampie nicchie finestrate orientate a sud, dotate di panche integrate che favoriscono la fruizione dello spazio come luogo di sosta o di lettura (Figura 137).

Dal punto di vista tecnico-costruttivo, la scuola è stata realizzata in due fasi, seguendo un principio di simmetria assiale che contribuisce alla stabilità complessiva dell'edificio in caso di eventi sismici. Le fondamenta in mattoni cotti, rialzate di circa 60 cm dal suolo, proteggono la struttura dalle inondazioni e dagli schizzi d'acqua, garantendo al contempo



Figura 135. "Planimetria".



Figura 136. "Vista esterna del complesso".



Figura 138. "Dettaglio veranda".



Figura 139. "Dettaglio esterno".



Figura 140. "Vista interna dell'aula".

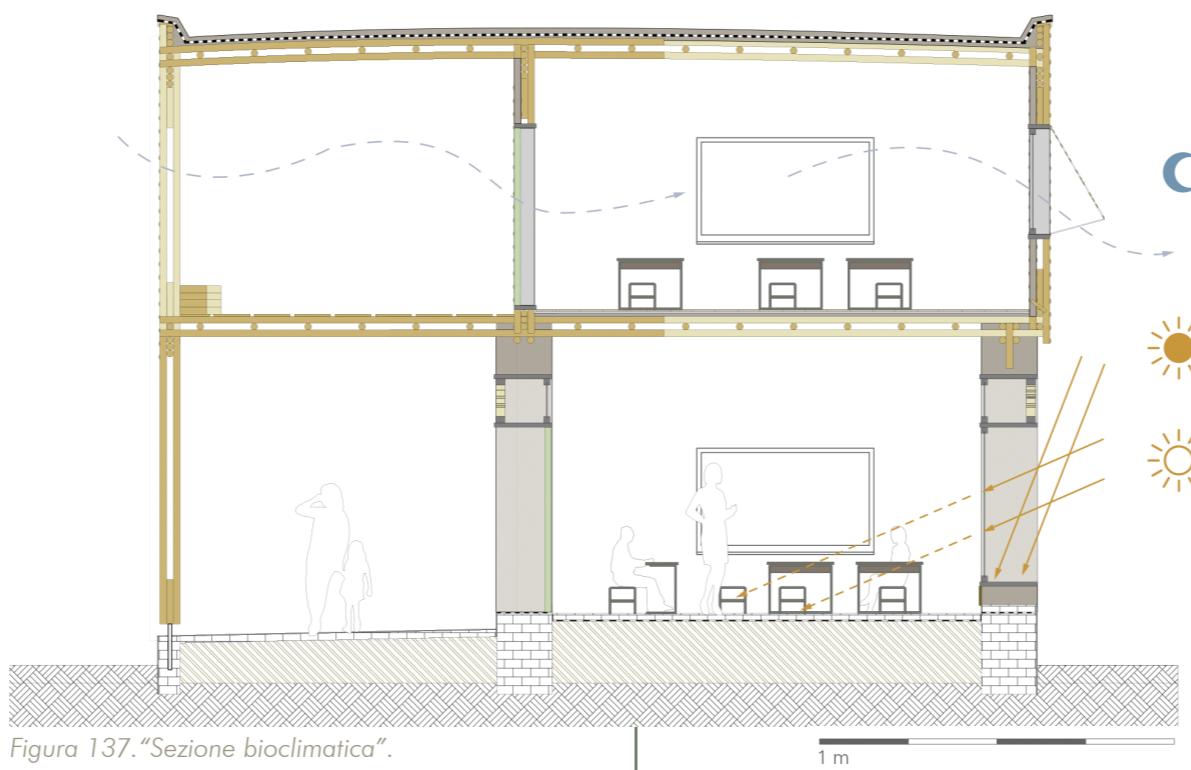


Figura 137. "Sezione bioclimatica".

un'adeguata ventilazione alla base dei muri. Le pareti in terra battuta, realizzate con la **tecnica del cob**, una miscela di terra e paglia lavorata manualmente, riprendono le pratiche costruttive vernacolari, migliorandone però la durabilità grazie all'inserimento di una barriera orizzontale contro l'umidità di risalita e di trattamenti antiparassitari naturali.

Il piano superiore è costituito da una struttura in bambù con tamponamenti in terra e rivestimento esterno in intreccio di bambù, che agisce come filtro climatico e protezione solare. Le aule del primo piano si affacciano su una veranda in bambù a doppia altezza, concepita come estensione delle aule e zona cuscinetto contro le piogge monsoniche provenienti da nord-ovest. La copertura piana, realizzata con una tripla intelaiatura in bambù e rivestita da uno strato di terra, contribuisce alla regolazione igrometrica e al comfort termico interno (Figura 138).

Dal punto di vista bioclimatico, il progetto sfrutta le proprietà di inerzia termica della terra per garantire ambienti freschi durante la stagione calda e un riscaldamento passivo nei mesi invernali, grazie all'orientamento nord-sud e all'apporto solare controllato. Le ampie aperture finestrate assicurano una buona ventilazione naturale e un'illuminazione diffusa, riducendo la necessità di sistemi meccanici di climatizzazione e illuminazione artificiale (Figura 140).

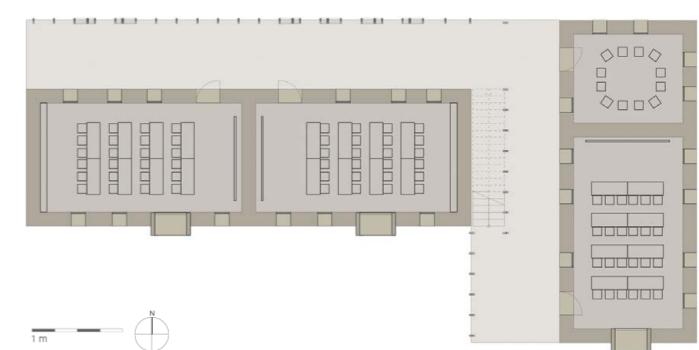


Figura 141. "Pianta piano terra".

Descrizione caso studio ed immagini tratte da fonte:  
<https://divisare.com/projects/309226-ziegert-roswag-seiler-architekten-ingenieure-earthen-school-tipu-sultan-merkez-pakistan>  
 (Consultato il 30/04/2025)

## /SCHOOL IN RUDRAPUR: METI SCHOOL

**Progettisti:** Anna Heringer, Eike Roswag

**Luogo:** Dinajpur, Bangladesh

**Anno:** 2006

**Destinazione d'uso:** Scuola primaria

**Materiali:** Bambù, Fango

**Utilizzo del bambù:** Impiego strutturale per la realizzazione del solaio, della copertura e rivestimenti.

Il progetto METI Handmade School nasce dall'esigenza di migliorare le condizioni di vita e di apprendimento nelle aree rurali attraverso un approccio sostenibile e partecipativo. In un contesto caratterizzato da edifici tradizionali in terra e bambù, la scuola propone una reinterpretazione di queste tecniche costruttive, combinando materiali locali e innovazioni tecnologiche per aumentare la durabilità e la qualità dello spazio architettonico. La scuola è il risultato di un processo di autostruzione comunitaria che ha coinvolto e formato venticinque artigiani locali. Il progetto diventa così anche un'esperienza di formazione basata sul principio dell'"aiuto professionale per l'auto-aiuto" (Figura 146).

L'edificio si sviluppa su due livelli: il piano terra, in terra cruda e mattoni cotti, ospita tre aule che si affacciano su piccoli spazi organici, le cosiddette "grotte", dedicate ad attività più raccolte e di concentrazione; il piano superiore, interamente realizzato in bambù, è invece più leggero e permeabile, con ampie aperture che favoriscono la ventilazione naturale e il rapporto visivo con il paesaggio circostante.

La struttura del solaio è composta da travi di bambù intrecciate su più strati, con una tecnica che richiama la carpenteria tradizionale ma ne migliora la resistenza e la stabilità. Il tetto in lamiera ondulata è sostenuto da una serie di travi in bambù e leggermente inclinato per consentire il deflusso dell'acqua piovana. Il sistema costruttivo integra una barriera impermeabile in pellicola di polietilene (PE), elemento fondamentale per garantire la durabilità dei muri in terra in un contesto climatico umido.



Figura 142. "Planimetria".



Figura 143. "Vista esterna del complesso".



Figura 146. "Vista del processo costruttivo".

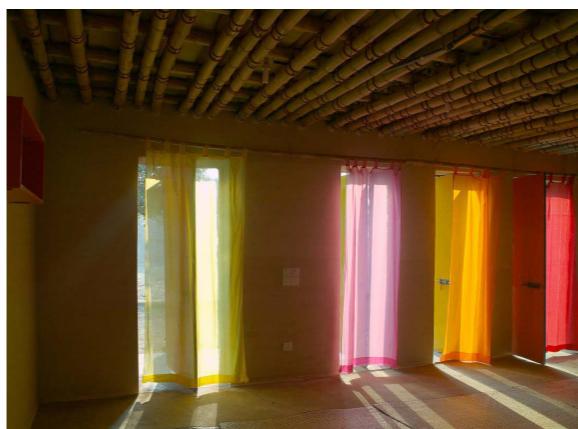


Figura 147. "Vista interna dell'aula".

Le finiture esaltano l'autenticità dei materiali locali: le superfici in terra rimangono in gran parte a vista, mentre le pareti interne sono intonacate con argilla e calce naturale (Figura 143). Le "grotte" interne, modellate in terra e paglia, restituiscono una qualità tattile e sensoriale agli ambienti (Figura 148). Al piano superiore, i telai in legno e bambù intrecciato filtrano la luce naturale e creano giochi di ombre che animano gli spazi.

Per la sua qualità progettuale e il forte valore culturale, nel 2007 il progetto è stato insignito dell'Aga Khan Award for Architecture.



Figura 148. "Vista interna della grotta".

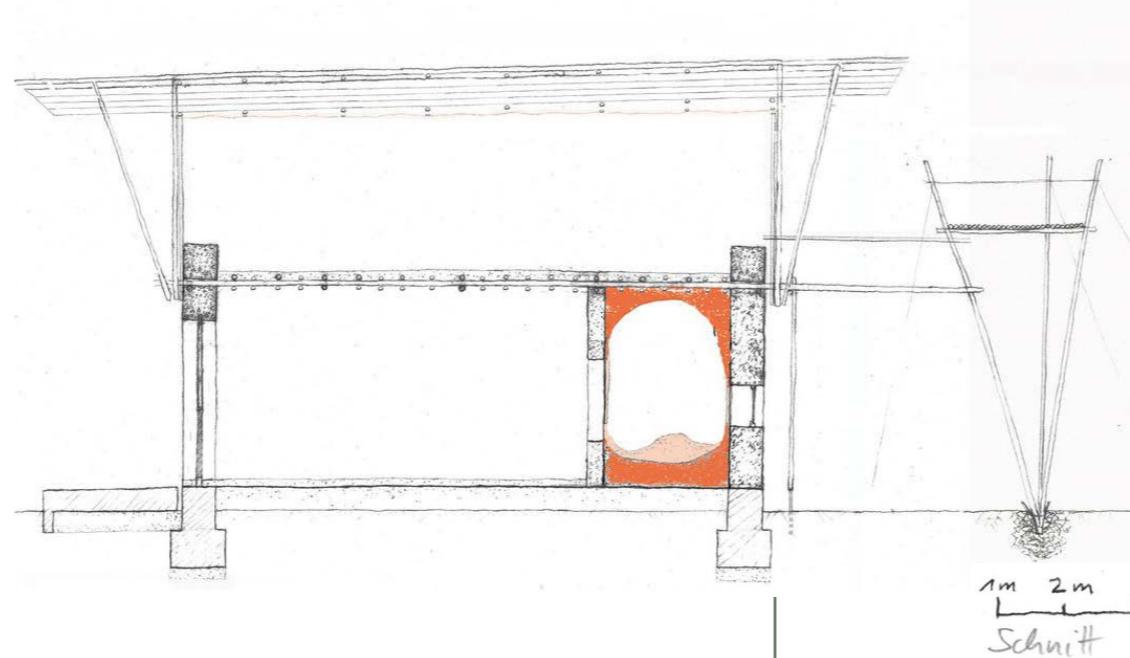


Figura 144. "Sezione".

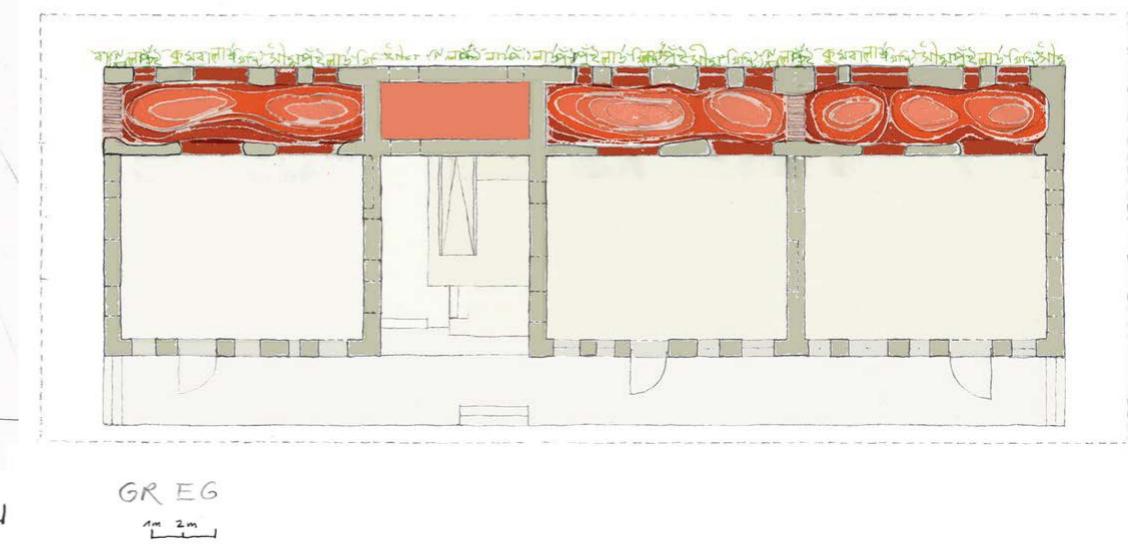


Figura 145. "Pianta piano terra".

Descrizione caso studio ed immagini tratte da fonte:  
<https://www.anna-heringer.com/projects/meti-school-bangladesh/>  
 (Consultato il 12/05/2025)

## KOPILA VALLEY SCHOOL

**Progettisti:** Nripal Adhikary, Rakshya Rayamajhi, Asmita Sigdel, Pranathi

**Luogo:** Birendranagar, Surkhet, Nepal

**Anno:** 2018

**Destinazione d'uso:** Scuola primaria

**Materiali:** Bambù, Terra battuta, Acciaio

**Utilizzo del bambù:** Struttura portante, muri, tetto, rivestimenti e finiture.

La Kopila Valley School rappresenta un caso studio emblematico in quanto ridefinisce l'idea di scuola nei territori rurali nepalesi offrendo un modello replicabile di architettura resiliente che integra tradizione costruttiva e innovazione.

Il progetto nasce dall'iniziativa di Maggie Doyne e Top Malla, fondatori della Kopila Valley School, con l'obiettivo di creare un ambiente educativo e abitativo sicuro e rigenerativo per bambini orfani o in condizioni di vulnerabilità.

L'edificio, realizzato principalmente in terra battuta e bambù, si configura come un modello di architettura bioclimatica e di autonomia locale (Figura 152). La scelta di questi materiali risponde a motivazioni sia ambientali che sociali: da un lato, essi sono risorse abbondanti e rinnovabili, provenienti dal territorio circostante; dall'altro, il loro impiego consente di valorizzare saperi costruttivi tradizionali e di ridurre l'impatto ambientale dell'edilizia scolastica, favorendo al contempo la resilienza sismica e la tracciabilità dei materiali.

La forma a U dell'edificio si apre verso ovest, proteggendo gli spazi interni dal forte irraggiamento solare estivo. Gli spazi aperti e i cortili favoriscono la ventilazione naturale, eliminando la necessità di sistemi meccanici di raffrescamento o riscaldamento.

Dal punto di vista tecnico, i muri in terra battuta provengono da terre locali accuratamente selezionate e non stabilizzate con cemento, per garantire la traspirabilità e la riciclabilità del materiale (Figura 154). La loro superficie è trattata con caseina naturale per migliorarne la resistenza all'acqua, mentre una rete sintetica e barre d'armatura conferiscono stabilità e



Figura 149. "Planimetria".

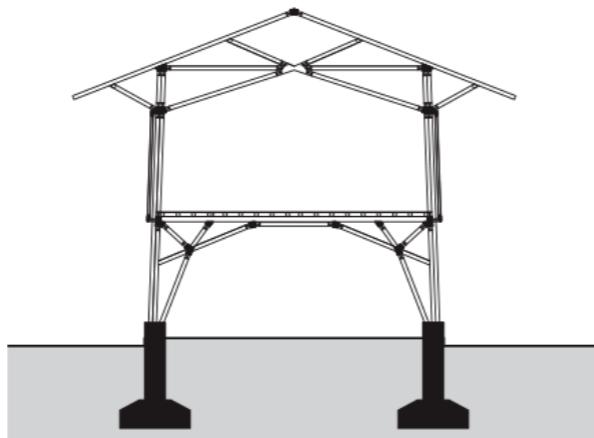


Figura 150. "Sezione".

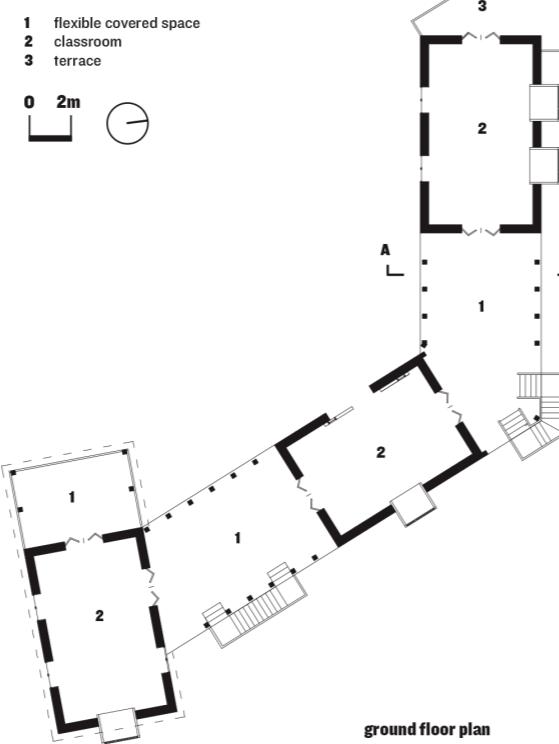


Figura 151. "Pianta piano terra".



Figura 152. "Vista esterna del complesso".



Figura 153. "Vista interna dell'aula".



Figura 154. "Dettaglio del muro".



Figura 155. "Dettaglio del nodo".



Figura 156. "Vista esterna laterale".

comportamento antisismico. Le travi e capriate in bambù offrono leggerezza, duttilità e un'elevata resistenza meccanica, caratteristiche che rendono la struttura flessibile e sicura in caso di sisma.

La scuola si distingue anche per l'approccio integrato e rigenerativo: l'acqua piovana viene raccolta e riutilizzata, l'energia è fornita da pannelli solari, e l'alimentazione dei bambini proviene in gran parte dalla fattoria di permacultura adiacente. L'insieme di questi elementi crea un sistema autosufficiente, educativo e sostenibile che diventa un punto di riferimento per l'intera regione.

## 4.3. Altri esempi di architetture in bambù

L'ultima sezione approfondisce diversi approcci progettuali che utilizzano il bambù come elemento strutturale e costruttivo. I casi selezionati vengono suddivisi in base al tema prevalente:

- **Struttura portante:** esempi in cui il bambù costituisce lo scheletro principale dell'edificio.
- **Dettagli dei nodi strutturali:** casi studio focalizzati sulle soluzioni di giunzione e connessione tra gli elementi.
- **Partizioni e finiture:** progetti che indagano l'uso del bambù per la definizione di pareti, tamponamenti o elementi di separazione interna.

### Struttura portante: /CONVENTO HOUSE

**Progettisti:** Enrique Mora Alvarado

**Luogo:** Chone, Ecuador

**Anno:** 2015

**Destinazione d'uso:** Residenza privata

**Materiali:** Bambù, Legno, Calcestruzzo

**Utilizzo del bambù:** Struttura portante e rivestimenti

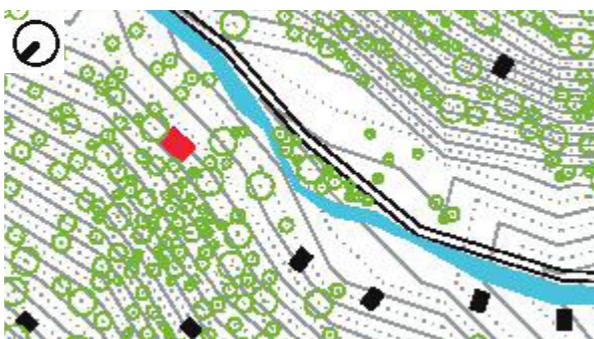


Figura 157. "Planimetria".



Figura 158. "Vista esterna del complesso".



Figura 159. "Vista interna".



Figura 160. "Sezione".



Figura 161. "Vista dello "scheletro" strutturale".

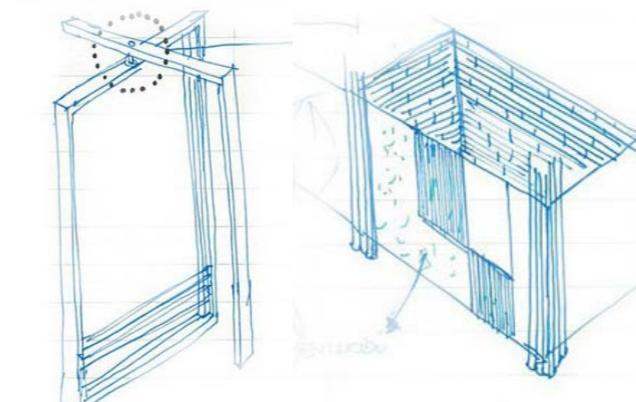


Figura 162. "Details".



Figura 163. "Vista di dettaglio".



Figura 164. "Pianta piano terra".

Descrizione caso studio ed immagini tratte da fonte:  
<https://divisare.com/projects/312887-enrique-mora-alvarado-jag-studio-convento-house>  
<https://www.archdaily.com/578654/convento-house-enrique-mora-alvarado> (Consultato il 12/04/2025)

## Dettagli dei nodi strutturali: /RIFUGIO DI EMERGENZA CON ECO-MATERIALI

**Progettisti:** Laboratorio de Vivienda de Interés Social (LabVIS, Juan Carlos Bamba, Enrique Mora, Jorge Ludeña, Robinson Vega)

**Luogo:** Guayaquil, Ecuador

**Anno:** 2024

**Destinazione d'uso:** Prototipo di modulo abitativo di emergenza.

**Materiali:** Bambù, Acciaio, Fibre di scarto agroindustriali

**Utilizzo del bambù:** Struttura portante e pannelli di chiusura.

Il rifugio rappresenta un prototipo abitativo di emergenza progettato per rispondere rapidamente a situazioni di disastri naturali in Ecuador, con l'obiettivo di fornire un rifugio temporaneo ma dignitoso per le famiglie colpite, e realizzato con materiali locali come bambù e fibre agroindustriali. Il sistema modulare e prefabbricato consente una facile autocostruzione da parte delle comunità vulnerabili, favorendo la resilienza abitativa post-emergenza. Il progetto integra principi di economia circolare e architettura bioclimatica, con una struttura rialzata, ventilazione naturale e ampi aggetti per la protezione da sole e pioggia.



Figura 165. "Vista esterna del complesso".



Figura 166. "Dettaglio del solaio".



Figura 167. "Vista di dettaglio".

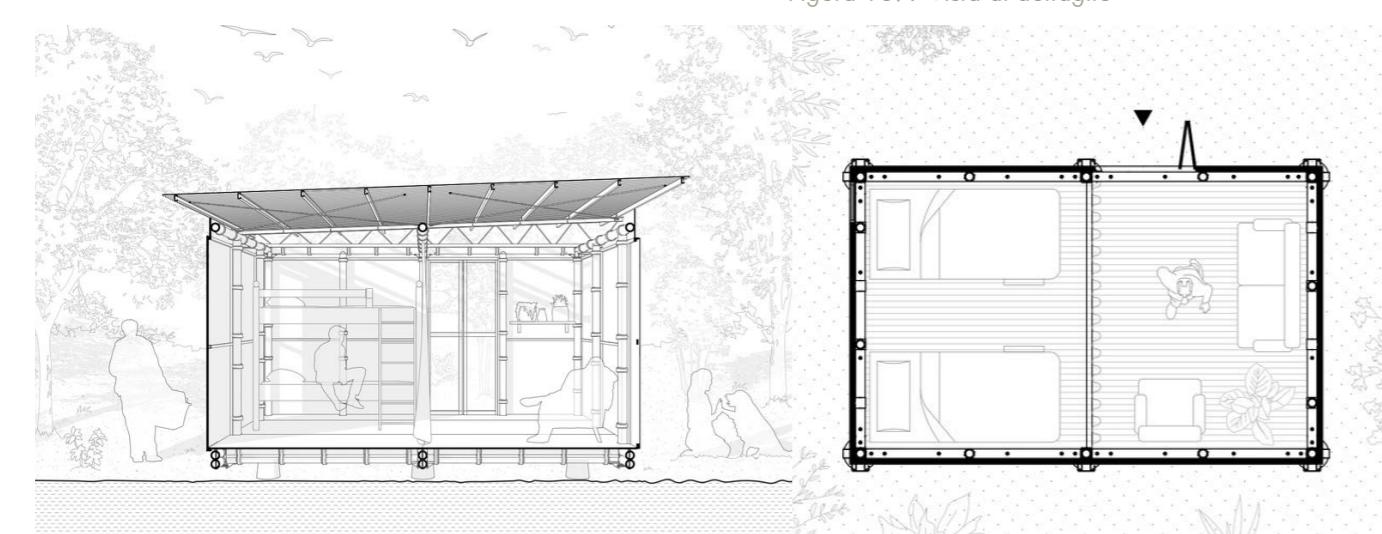


Figura 168. "Sezione prospettica".

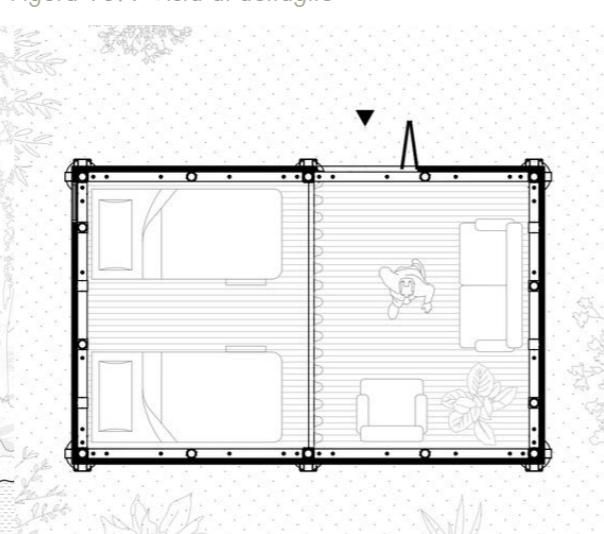


Figura 169. "Pianta piano terra".

Descrizione caso studio ed immagini tratte da fonte:  
<https://www.archdaily.cl/cl/1026085/refugio-de-emergencia-con-ecomateriales-laboratorio-de-vivienda-de-interes-social-labvis>  
 (Consultato il 13/04/2025)

## Partizioni e finiture: /A FOREST FOR A MOON DAZZLER

**Progettisti:** Benjamin Garcia

**Luogo:** Costa Rica

**Anno:** 2010

**Destinazione d'uso:** Residenza privata

**Materiali:** Bambù, Legno, Lamiera

**Utilizzo del bambù:** Impiegato per la realizzazione di pannelli per partizioni interne/esterne



Figura 170. "Vista esterna del complesso".

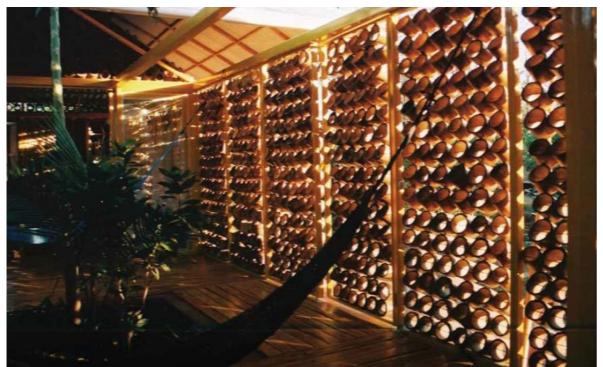


Figura 171. "Dettaglio del muro".

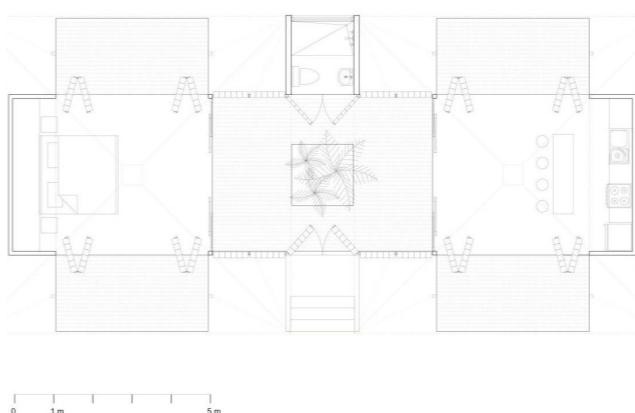


Figura 172. "Pianta piano terra".

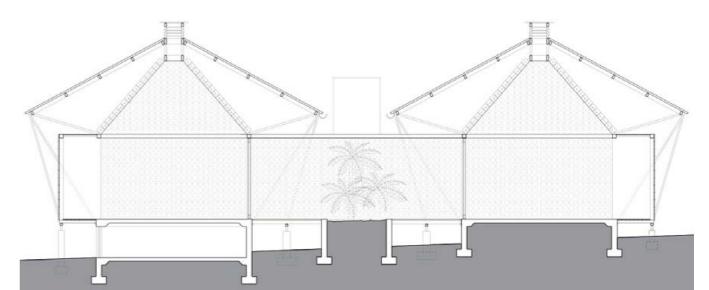


Figura 173. "Sezione".

Descrizione caso studio ed immagini tratte da fonte:  
[www.archdaily.com/61814/a-forest-for-a-moon-dazzler-benjamin-garcia-saxe?ad\\_medium=gallery](https://www.archdaily.com/61814/a-forest-for-a-moon-dazzler-benjamin-garcia-saxe?ad_medium=gallery)  
 (Consultato il 12/05/2025)

Analogamente a questo studio, un esempio simile è quello di:

## / PARETI PERMEABILI IN BAMBÙ PER UN PADIGLIONE URBANO IN MALESIA

**Progettisti:** Eleena Jamil in collaborazione con UNHabitat

**Luogo:** Malesia

**Anno:** 2018

**Destinazione d'uso:** Padiglione urbano

**Materiali:** Bambù

**Utilizzo del bambù:** Utilizzato integralmente per la struttura portante, per le partizioni ed oggetti di arredo



Figura 174. "Vista esterna del complesso".

Tale progetto, si distingue per l'uso innovativo del bambù attraverso anelli circolari ricavati da pali di scarto, riducendo gli sprechi e valorizzando materiali locali. Le pareti permeabili offrono una ventilazione naturale, mentre i pannelli semitrasparenti colorati creano giochi di luce, integrando estetica e funzionalità. Questa soluzione dimostra come il bambù possa essere impiegato in modo creativo e sostenibile anche in contesti urbani.



Figura 175. "Dettaglio del muro".

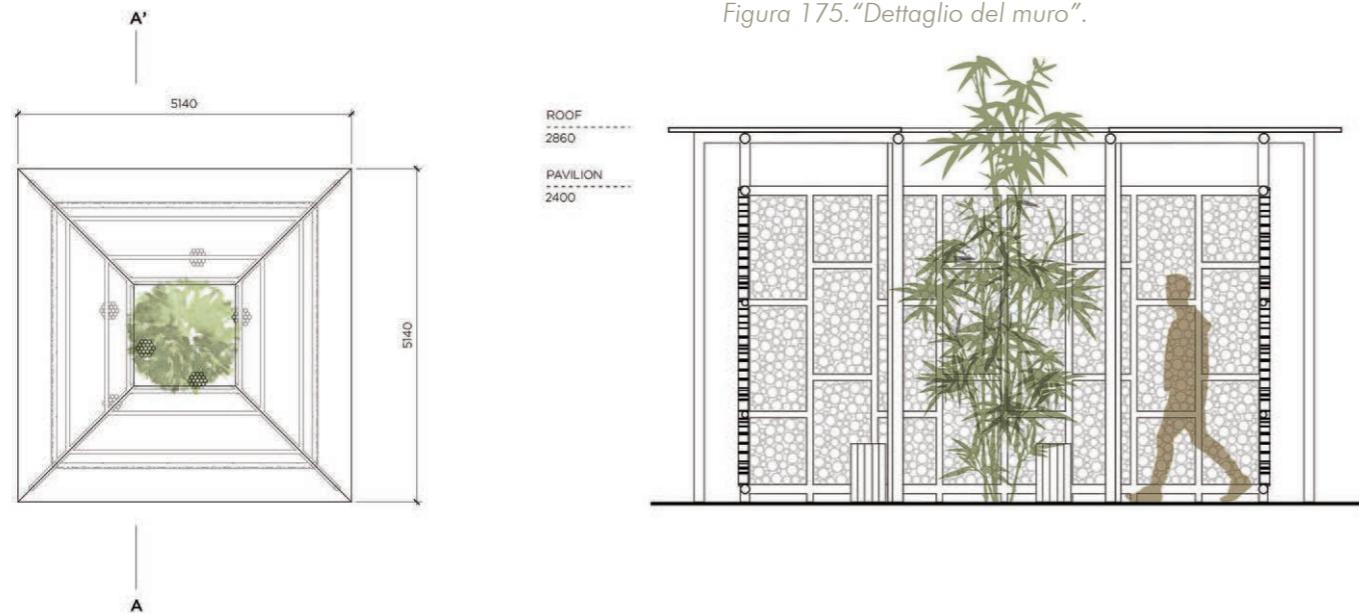


Figura 176. "Pianta della copertura".

Figura 177. "Sezione".

Descrizione caso studio ed immagini tratte da fonte:  
<https://www.archdaily.cl/cl/889291/muros-permeables-de-bambu-para-un-pabellon-urbano-en-malasia> (Consultato il 29/04/2025)

# /CAPITOLO V: IL PROGETTO



## 5.1. Il concorso “Nepal School Project”

Organizzato da Archstorming in collaborazione con la Karmayog Foundation Nepal e Nepal Rising, il concorso “Nepal School Project” nasce come risposta all’urgenza della distruzione scolastica causata da eventi climatici estremi e ricorrenti terremoti in Nepal. Il bando offre l’opportunità di progettare un modello scolastico sostenibile, rispettoso dell’ambiente e replicabile, con l’intento di ridefinire il futuro dell’istruzione e della resilienza comunitaria nel paese. Le scuole richieste dal concorso devono configurarsi come **centri multifunzionali**, in grado di garantire spazi sicuri per l’apprendimento quotidiano e, allo stesso tempo, fungere da **rifugi di emergenza** per la popolazione in caso di calamità. L’obiettivo è ripristinare l’accesso all’istruzione per i bambini, creare spazi di crescita e offrire alla comunità un punto di riferimento sicuro, resiliente e duraturo.

Tra gli enti promotori vi sono:



**Archstorming**, promotore dell’iniziativa, è una piattaforma internazionale di progettazione architettonica a vocazione umanitaria, con l’obiettivo di generare un impatto sociale positivo e formare una nuova generazione di architetti consapevoli delle proprie responsabilità. I concorsi proposti sono basati su casi reali e affrontano tematiche critiche, offrendo soluzioni progettuali che rispondono a bisogni essenziali quali istruzione, abitazione, accesso all’acqua potabile, riscaldamento e coesione sociale. Tali soluzioni fanno leva sull’impiego di materiali locali e su tecniche semplici e accessibili, facilmente comprensibili e replicabili dalle stesse comunità beneficiarie.



**La Karmayog Foundation** è un’organizzazione non governativa attiva nelle aree rurali del Nepal, impegnata nel miglioramento delle condizioni di vita delle comunità emarginate attraverso un approccio integrato allo sviluppo locale. Come dichiarato nella loro missione: “Selfless service to the defenceless”. In situazioni di emergenza come terremoti, frane o alluvioni; la Fondazione attiva prontamente interventi di soccorso e sostegno, consolidando così il proprio ruolo di riferimento resiliente nel territorio. Operando secondo una visione umanitaria e partecipativa, mobilita risorse e persone per costruire un futuro più equo e sostenibile.



**Nepal Rising** è una campagna di cooperazione globale, gestita da Daayitwa USA (organizzazione no-profit registrata negli Stati Uniti) e guidata da volontari, nata con l’obiettivo di portare aiuto, ricostruzione e resilienza alle comunità colpite in Nepal e oltre. Creata in risposta alla devastazione causata dal terremoto del 25 aprile 2015, la campagna, attraverso collaborazioni locali e internazionali, offre una piattaforma condivisa per la diffusione di informazioni, la raccolta fondi e il coordinamento dei volontari, con lo scopo di costruire comunità stabili, capaci di affrontare le avversità.

Una caratteristica rilevante del concorso è l'assenza di un sito progettuale specifico. Ai partecipanti è stato fornito un **lotto generico di forma rettangolare** (30 x 60 metri) (Figura 178), rappresentativo della tipologia di terreno normalmente messa a disposizione dalle scuole pubbliche nepalesi. Questa scelta accentua ulteriormente l'obiettivo del concorso di progettare un prototipo scolastico modulare e adattabile, replicabile su tutto il territorio nazionale.

### SCHOOL WILL ACCOMODATE 200 STUDENTS aged 3 to 14

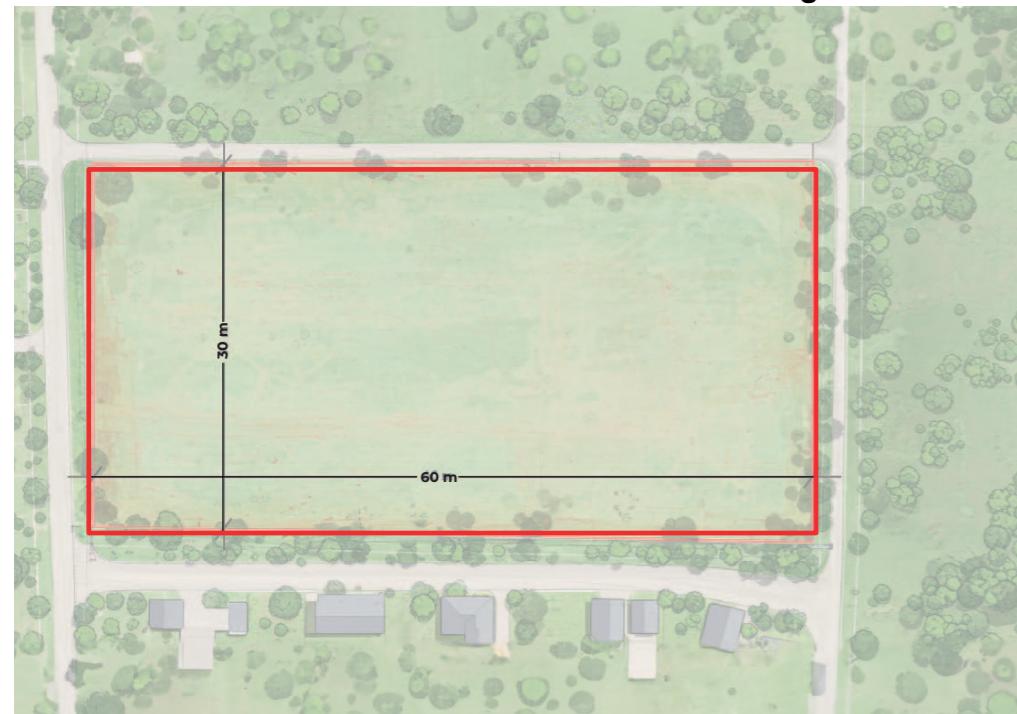


Figura 178. "Proposed land". Fonte: Nepal School Project  
<https://nepalschoolproject.com/>

In Figura 179 per ciascuna delle aree funzionali richieste dal bando di concorso, sono specificate le superfici minime e i requisiti fondamentali da soddisfare.

Un aspetto importante riguarda la tempistica di sviluppo del progetto, suddiviso in tre fasi distinte:

**Fase 1:** "Strutture principali" (Core facilities): comprende gli spazi minimi necessari per avviare le attività scolastiche.

**Fase 2:** "Strutture aggiuntive" (Additional facilities): prevede l'integrazione di aule aggiuntive man mano che la scuola cresce e che diventano disponibili nuove risorse finanziarie.

**Espansioni future:** il progetto deve essere concepito con una logica modulare che consenta l'aggiunta di nuove aule o spazi funzionali in base alle necessità. I partecipanti possono anche proporre locali aggiuntivi che

ritengono utili e che potrebbero essere costruiti in fasi successive. Questo approccio graduale rende il progetto immediatamente realizzabile e al contempo aperto a una crescita progressiva nel tempo. Poiché l'organizzazione non dispone di un budget fisso (il finanziamento dipende da contributi volontari e da partnership esterne) la strategia modulare consente di priorizzare interventi essenziali, sperimentare soluzioni a basso costo e scalare le opere in funzione delle risorse effettivamente disponibili.

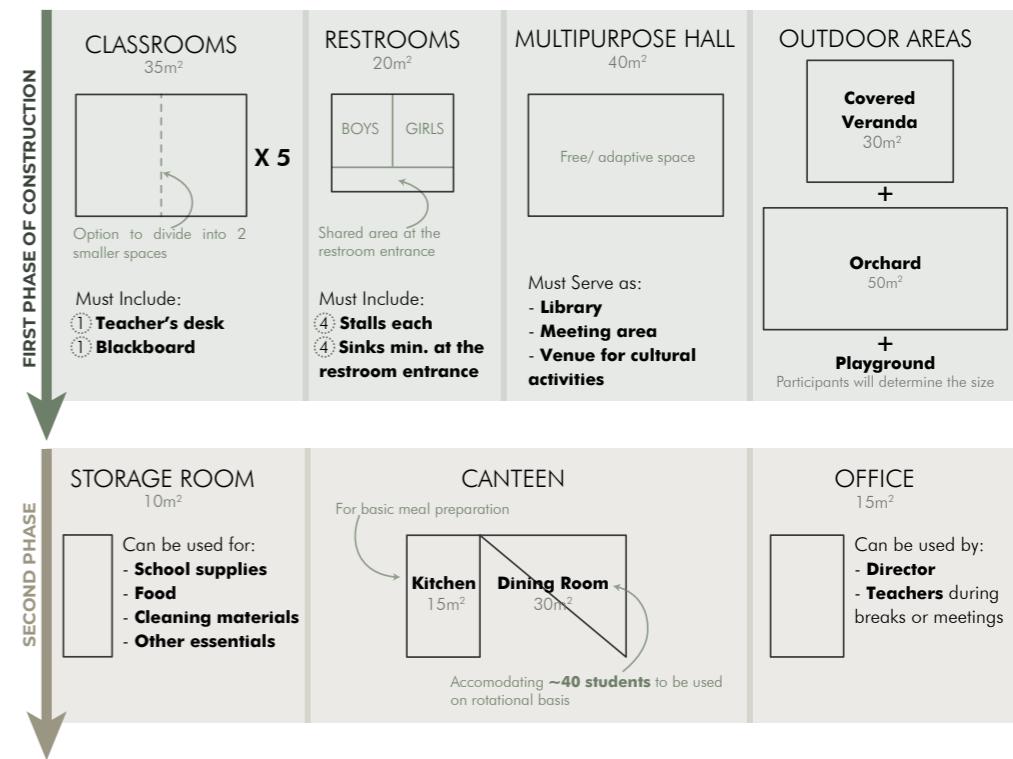


Figura 179. "Vincoli progettuali". Fonte: Nepal School Project  
Rielaborazione dell'autore della tesi. <https://nepalschoolproject.com/>

Il concorso richiede che il progetto risponda a priorità quali sicurezza, durabilità e l'adozione di soluzioni adeguate al contesto. Considerando l'elevata sismicità del territorio nepalese (cfr. capitolo 1.4) la progettazione deve garantire un comportamento strutturale adeguato.

Un ulteriore requisito riguarda la realizzazione di basamenti rialzati, necessari per prevenire fenomeni di allagamento e limitare l'ingresso di fauna potenzialmente pericolosa, come serpenti o scorpioni. Altrettanto centrale è l'attenzione alla sostenibilità ambientale, che si traduce nella scelta consapevole dei materiali (Figura 180) e nell'integrazione di sistemi energetici rinnovabili, come pannelli solari e dispositivi per la raccolta e il riuso dell'acqua piovana, utili per attività quotidiane come irrigazione e pulizia. Parallelamente, l'adozione di strategie di progettazione passiva quali la ventilazione naturale e un adeguato apporto di luce diurna contribuisce a

ridurre il fabbisogno energetico e a migliorare il comfort degli utenti. Infine, la modularità del sistema costruttivo costituisce un aspetto centrale, poiché da un lato permette di integrare progressivamente nuovi componenti o ampliamenti in relazione alle risorse economiche disponibili, garantendo al progetto flessibilità e capacità di adattamento nel tempo; dall'altro, semplifica il processo costruttivo affidato principalmente alla manodopera locale.



Figura 180. "Materiali localmente disponibili ed utilizzabili". Fonte: Nepal School Project  
Rielaborazione dell'autore della tesi. <https://nepalschoolproject.com/>

## 5.2. Analisi metodologica: il Metaprogetto

"What is a System Requirements Analysis?":

L'analisi dei requisiti di sistema è un modo strutturato per comprendere cosa deve fare un sistema per soddisfare le esigenze dei suoi utenti o clienti. Aiuta a definire quali risorse sono necessarie e quali requisiti specifici tali risorse devono soddisfare, per guidare il processo di progettazione. In parole poche, funziona come un ponte tra ciò che il cliente desidera e il design tecnico che lo realizzerà. Il processo inizia scomponendo le esigenze dei clienti e poi descrivendo chiaramente cosa deve fare il sistema per soddisfarle. (Grady, 2006)

L'analisi bisogni-prestazioni è una metodologia qualitativo/quantitativa volta a identificare e garantire la qualità, intesa come corrispondenza tra i requisiti dell'utente e le effettive prestazioni di un progetto. (Vaira, 2024)

Nella progettazione architettonica, rappresenta un approccio fondamentale per garantire che gli spazi progettati rispondano in modo ottimale alle esigenze degli utenti coinvolti.

Il metodo si svolge tipicamente in quattro fasi chiave:

- 1) Selezione degli **UTENTI**: identificazione di chi utilizzerà direttamente o indirettamente lo spazio progettato.
- 2) Ipotesi delle **ATTIVITÀ**: comprensione delle azioni che gli utenti eseguiranno nello spazio.
- 3) Determinazione dei **BISOGNI**: individuazione dei bisogni essenziali degli utenti relativi a tali azioni.
- 4) Traduzione di tali esigenze in **REQUISITI** e **REQUISITI PRESTAZIONALI**: cioè specifiche tecniche e funzionali che devono essere soddisfatte dagli elementi architettonici.

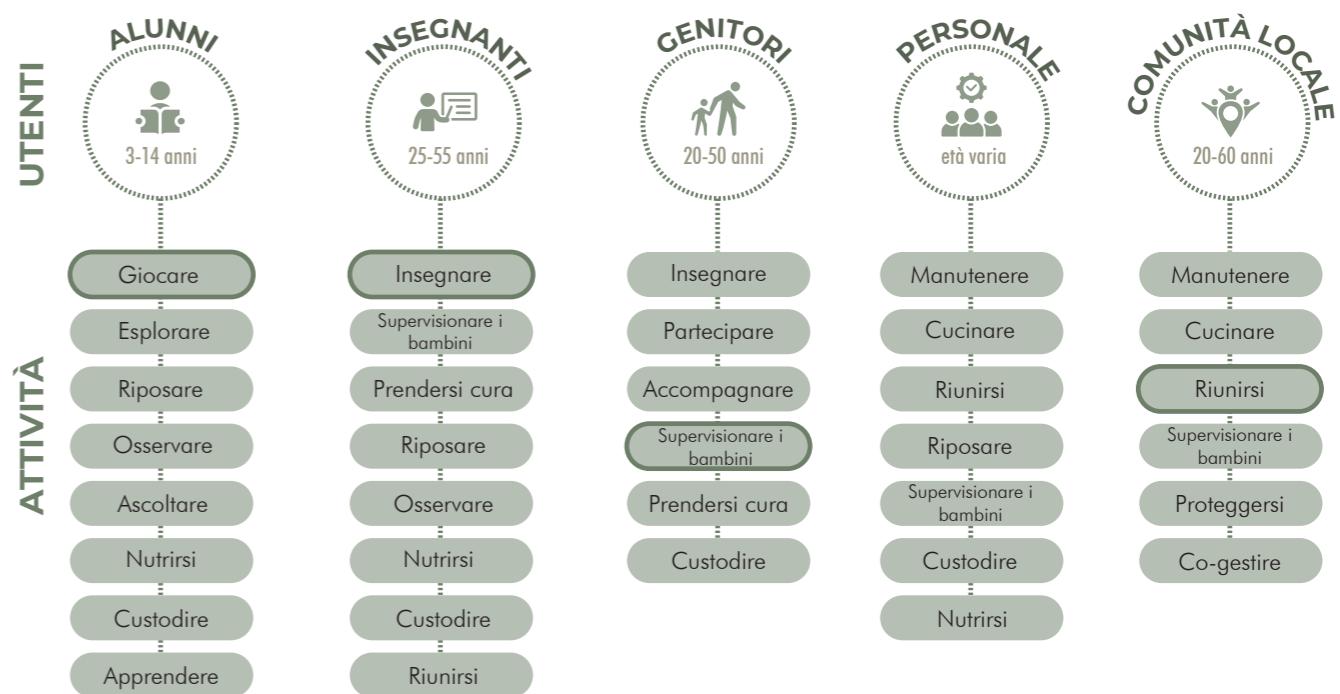


Figura 181. "Definizione del profilo degli utenti". Dell'autore della tesi

## Definizione dei bisogni e delle esigenze:

La descrizione del profilo di ciascun utente è sintetizzata nelle tabelle seguenti (da T.01 a T.05). Per ogni utente, l'attività è stata analizzata in modo approfondito in termini di esigenze, requisiti e requisiti prestazionali, secondo il diagramma riportato di seguito:

ATTIVITÀ		
ESIGENZE	REQUISITI	REQUISITI PRESTAZIONALI

In cui:

### REQUISITI PRESTAZIONALI

 Rapporto con l'estero

 Vista panoramica

 Privacy / SICUREZZA

 Accessibilità/ FRUIBILITÀ

 Illuminazione naturale

 Isolamento acustico

 Isolamento termico

 ASPETTO/Estetica

 GESTIONE

 SALVAGUARDIA DELL'AMBIENTE

BENESSERE

## ALUNNI

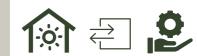
Educazione pre-primaria= Età: dai 3 ai 5 anni

Educazione primaria + Educazione secondaria inferiore (Educazione di base)= Età: dai 6 ai 14 years

ATTIVITÀ		
ESIGENZE	REQUISITI	REQUISITI PRESTAZIONALI

### GIOCARE

- Aree sicure per il **gioco libero**, stimolando fantasia e movimento.
- Attività per sviluppare agilità, equilibrio e forza fisica.
- Permettere attività di gioco anche in **condizioni meteo sfavorevoli**.
- Facilitare lo **sviluppo sociale e relazionale**. (Inclusività)
- Spazi aperti ampi o strutture adatte a tali attività.
- Area gioco attrezzata al chiuso/ riparo.
- Spazi dotati di **piani di appoggio e sedute**.



### ESPLORARE

- Incoraggiare la curiosità verso lo **spazio circostante**, sia vicino che lontano.
- Sprementare in modo libero e sicuro l'ambiente scolastico.
- Percorsi ed angoli **stimolanti**.
- Area **senza barriere rigide**, integrate con la natura e con perimetri sicuri e controllabili.



### RIPOSARE

- Fornire **spazi di riposo** pomeridiano ed eventualmente notturni.
- Rendere lo **spazio accessibile** ed utilizzabile sempre.
- Postazioni facilmente removibili, con **ingombro minimo** per garantire flessibilità d'uso e ottimizzazione degli ambienti.



### OSSERVARE

- Lo spazio deve stimolare l'osservazione di **elementi naturali o artificiali**, sia in prossimità sia a distanza, incoraggiando la curiosità e l'**esplorazione visiva**.
- La configurazione spaziale deve permettere l'**utilizzo simultaneo da parte di più studenti**, senza compromettere la qualità dell'esperienza individuale.
- L'elemento architettonico dovrebbe essere concepito in modo da orientare lo sguardo verso un panorama o un punto di interesse specifico.



### ASCOLTARE

- Favorire la **condivisione di pensieri** ed esperienze con i compagni e le maestre.
- Avere ambienti attrezzati predisposti per l'**ascolto attivo**.
- Spazi attrezzati progettati per il racconto e il confronto collettivo.
- Soluzioni architettoniche e tecnologiche che favoriscono la percezione uditiva.



### NUTRIRSI

- Disporre di uno **spazio dedicato per consumare** i pasti in modo confortevole, sicuro e igienico.
- Consentire la **conservazione sicura** degli alimenti.
- Favorire la socializzazione durante i pasti.
- Svolgimento di attività educative legate alla nutrizione e alla sostenibilità.
- Spazi attrezzati per la consumazione e conservazione degli alimenti.
- Ambiente che favorisce il benessere psicofisico.



### APPRENDERE

- Spazi che favoriscono la **concentrazione e il benessere**, riducendo le fonti di distrazione.
- Potersi muovere e cambiare facilmente assetto durante le attività.
- Trovare **ambienti stimolanti**, accoglienti e sicuri.
- Spazi flessibili e modulari, con arredi mobili che consentano la riconfigurazione per attività individuali e di gruppo.
- Ambiente che favorisce il benessere psicofisico.



### CUSTODIRE

- Promuovere il **rispetto e la cura degli spazi comuni** e dell'ambiente esterno.
- Spazi comuni per il deposito di materiali didattici condivisi.



#### LEGENDA-REQUISITI PRESTAZIONALI

 Rapporto con l'estero

 Privacy / SICUREZZA

 Illuminazione naturale

 Isolamento termico

 GESTIONE

 SALVAGUARDIA DELL'AMBIENTE

 Vista panoramica

 Accessibilità/ FRUIBILITÀ

 Isolamento acustico

 ASPETTO/Estetica

# INSEGNANTI

Età: dai 25 ai 55 anni

ATTIVITÀ		
ESIGENZE	REQUISITI	REQUISITI PRESTAZIONALI
<b>INSEGNARE</b>		
- Assicurare la disponibilità di materiali a supporto delle attività didattiche.	- Le strutture in cui riporre il materiale non devono essere raggiungibile dai bambini.	  
- Prevenire l'uso improprio del materiale didattico da parte degli alunni.		
- <b>Proteggere</b> gli strumenti dagli agenti climatici.	- Le strutture di deposito devono essere adeguatamente riparate da agenti atmosferici.	  
- Garantire l'inclusione di tutti i bambini, in particolare dei bambini con bisogni educativi speciali (SEN) e dei bambini con disabilità.	- Le strutture devono includere la rimozione delle barriere architettoniche.	
<b>SUPERVISIONARE I BAMBINI</b>		
- Spazi sicuri, controllati e <b>facilmente supervisionabili</b> .	- Non devono essere presenti elementi che rendano difficile la visione.	  
- <b>Possibilità di accedere alle strutture</b> dei bambini per intervenire in caso di necessità.	- Le strutture (sia di gioco che di servizio) devono essere adeguatamente dimensionate.	  
	- Luoghi che rispondano ai requisiti di sicurezza.	
<b>PRENDERSI CURA</b>		
- Gestire le esigenze primarie dei bambini (igiene, alimentazione, riposo)	- Presenza di ambienti protetti e privi di pericoli.	  
- Favorire l'autonomia progressiva dei bambini nelle attività quotidiane.	- <b>Accesso agevole</b> a servizi igienici sicuri e <b>igienicamente adeguati</b> .	  
- <b>Garantire la sicurezza fisica</b> dei bambini durante la permanenza negli spazi scolastici.	- Disponibilità di acqua potabile, e <b>beni primari</b> .	  
	- Spazi dedicati alla consumazione dei pasti e al riposo.	
<b>RIPOSARE</b>		
- Fornire <b>spazi di riposo</b> pomeridiano ed eventualmente notturni.	- <b>Postazioni facilmente removibili, con ingombro minimo</b> per garantire flessibilità d'uso e ottimizzazione degli ambienti.	  
- Rendere lo <b>spazio accessibile</b> ed utilizzabile sempre.		  
<b>OSSERVARE</b>		
- Lo spazio deve stimolare l'osservazione di <b>elementi naturali o artificiali</b> , sia in prossimità sia a distanza, incoraggiando la curiosità e l'esplorazione visiva.	- La configurazione spaziale deve permettere l'utilizzo simultaneo da parte di più studenti, senza compromettere la qualità dell'esperienza individuale.	 
	- L'elemento architettonico dovrebbe essere concepito in modo da orientare lo sguardo verso un panorama o un punto di interesse specifico.	  
<b>NUTRIRSI</b>		
- Disporre di uno <b>spazio dedicato per consumare</b> i pasti in modo confortevole, sicuro e igienico.	- Spazi attrezzati per la consumazione e conservazione degli alimenti.	  
- Consentire la <b>conservazione sicura</b> degli alimenti.		  
- Favorire la socializzazione durante i pasti.	- Ambiente che favorisce il benessere psicofisico.	 
- Svolgimento di attività educative legate alla nutrizione e alla sostenibilità.		
<b>CUSTODIRE</b>		
- Promuovere il <b>rispetto e la cura degli spazi comuni</b> e dell'ambiente esterno.	- Spazi comuni per il deposito di materiali didattici condivisi.	   
<b>RIUNIRSI</b>		
- Avere accesso a un'area spaziosa, confortevole e sicura per attività di gruppo o riunioni.	- Modularità e versatilità.	  
- Garantire che i mobili siano progettati per supportare <b>soluzioni flessibili basate sull'attività</b> .	- Spazio aperto privo di ostacoli permanenti per facilitare un utilizzo e una supervisione flessibili.	  

## LEGENDA-REQUISITI PRESTAZIONALI

 Rapporto con l'esterno	 Privacy / SICUREZZA	 Illuminazione naturale	 Isolamento termico	 GESTIONE	 SALVAGUARDIA DELL'AMBIENTE
 Vista panoramica	 Accessibilità/ FRUIBILITÀ	 Isolamento acustico	 ASPETTO/Estetica		

# GENITORI

Età: dai 20 ai 50 anni

ATTIVITÀ		
ESIGENZE	REQUISITI	REQUISITI PRESTAZIONALI
<b>INSEGNARE</b>		
- Assicurare la disponibilità di materiali a supporto delle attività didattiche.	- Le strutture in cui riporre il materiale non devono essere raggiungibile dai bambini.	  
- Prevenire l'uso improprio del materiale didattico da parte degli alunni.		
- <b>Proteggere</b> gli strumenti dagli agenti climatici.	- Le strutture di deposito devono essere adeguatamente riparate da agenti atmosferici.	  
- Garantire l'inclusione di tutti i bambini, in particolare dei bambini con bisogni educativi speciali (SEN) e dei bambini con disabilità.	- Le strutture devono includere la rimozione delle barriere architettoniche.	
<b>PARTECIPARE</b>		
- Avere la possibilità di contribuire attivamente, in base alle competenze	- Lo spazio progettato deve poter facilmente <b>accogliere molte persone</b> .	 
- Favorire <b>relazioni positive</b> tra scuola e famiglia.	- Presenza di <b>ambienti accessibili</b> e confortevoli per l'accoglienza dei genitori.	
- Poder svolgere <b>attività legate al giardinaggio e alla cura dell'orto scolastico</b> .	- Permettere un accesso alternativo e/o facilitato all'area dell'orto per persone che vengono dall'esterno	
<b>ACCOMPAGNARE I BAMBINI</b>		
- Avere la possibilità di accompagnare il bambino e assicurarsi che sia al sicuro.	- Progettare uno <b>spazio filtro</b> in cui il genitore ha la possibilità di accompagnare lo studente.	  
<b>SUPERVISIONARE I BAMBINI</b>		
- Spazi sicuri, controllati e <b>facilmente supervisionabili</b> .	- Non devono essere presenti elementi che rendano difficile la visione.	 
- <b>Possibilità di accedere alle strutture</b> dei bambini per intervenire in caso di necessità.	- Le strutture (sia di gioco che di servizio) devono essere adeguatamente dimensionate.	 
	- Luoghi che rispondano ai requisiti di sicurezza.	
<b>PRENDERSI CURA</b>		
- Gestire le esigenze primarie dei bambini (igiene, alimentazione, riposo)	- Presenza di ambienti protetti e privi di pericoli.	 
- Favorire l'autonomia progressiva dei bambini nelle attività quotidiane.	- <b>Accesso agevole</b> a servizi igienici sicuri e <b>igienicamente adeguati</b> .	 
- <b>Garantire la sicurezza fisica</b> dei bambini durante la permanenza negli spazi scolastici.	- Disponibilità di acqua potabile, e <b>beni primari</b> .	 
	- Spazi dedicati alla consumazione dei pasti e al riposo.	
<b>CUSTODIRE</b>		
- Promuovere il <b>rispetto e la cura degli spazi comuni</b> e dell'ambiente esterno.	- Spazi comuni per il deposito di materiali didattici condivisi.	   

## LEGENDA-REQUISITI PRESTAZIONALI

 Rapporto con l'esterno	 Privacy / SICUREZZA	 Illuminazione naturale	 Isolamento termico	 GESTIONE	 SALVAGUARDIA DELL'AMBIENTE
 Vista panoramica	 Accessibilità/ FRUIBILITÀ	 Isolamento acustico	 ASPETTO/Estetica		

# PERSONALE

Età: dai 20 ai 60 anni

ATTIVITÀ		
ESIGENZE	REQUISITI	REQUISITI PRESTAZIONALI
<b>MANUTENERE</b>		
- Garantire la <b>pulizia regolare</b> di tutti gli spazi scolastici.	- Spazi facilmente accessibili per riporre prodotti e utensili.	
- Garantire la <b>durabilità</b> delle strutture e degli elementi costruiti.	- Le soluzioni tecnologiche selezionate devono garantire la possibilità di <b>sostituire parti della struttura senza dover sostituire completamente l'intero dispositivo.</b> - Scelta di <b>materiali durevoli</b> nel tempo.	  
- Eseguire la <b>manutenzione del verde</b> e dell'area senza ostacoli.	- Progettare tenendo conto della presenza del <b>verde circostante</b> .	
<b>CUCINARE</b>		
- Preparare il cibo in <b>spazi dedicati</b> , separati dalle aree pranzo o di servizio.	- Progettare un ambiente sicuro, igienico e ben ventilato, adatto alla preparazione degli alimenti.	  
- Avere accesso a <b>layout di cucina ergonomici e funzionali</b> che supportino flussi di lavoro sicuri e fluidi.	- <b>Conservazione organizzata</b> e accessibile di ingredienti, utensili e prodotti per la pulizia.	  
<b>RIUNIRSI</b>		
- Avere accesso a <b>un'area spaziosa, confortevole</b> e sicura per attività di gruppo o riunioni.	- Modularità e versatilità.	   
- Garantire che i mobili siano progettati per supportare <b>soluzioni flessibili basate sull'attività</b> .	- Spazio aperto privo di ostacoli permanenti per facilitare un utilizzo e una supervisione flessibili.	  
<b>RIPOSARE</b>		
- Fornire <b>spazi di riposo</b> pomeridiano ed eventualmente notturni.	- Postazioni <b>facilmente removibili</b> , con <b>ingombro minimo</b> per garantire flessibilità d'uso e ottimizzazione degli ambienti.	  
- Rendere lo <b>spazio accessibile</b> ed utilizzabile sempre.		  
<b>SUPERVISONARE I BAMBINI</b>		
- Spazi sicuri, controllati e <b>facilmente supervisionabili</b> .	- Non devono essere presenti elementi che rendano difficile la visione.	  
- <b>Possibilità di accedere alle strutture</b> dei bambini per intervenire in caso di necessità.	- Le strutture (sia di gioco che di servizio) devono essere adeguatamente dimensionate. - Luoghi che rispondano ai requisiti di sicurezza.	   
<b>CUSTODIRE</b>		
- Promuovere il <b>rispetto e la cura degli spazi comuni</b> e dell'ambiente esterno.	- Spazi comuni per il deposito di materiali didattici condivisi.	   
<b>NUTRIRSI</b>		
- Disporre di uno <b>spazio dedicato per consumare</b> i pasti in modo confortevole, sicuro e igienico.	- Spazi attrezzati per la consumazione e conservazione degli alimenti.	  
- Consentire la <b>conservazione sicura</b> degli alimenti.		  
- Favorire la socializzazione durante i pasti.	- Ambiente che favorisce il benessere psicofisico.	 
- Svolgimento di attività educative legate alla nutrizione e alla sostenibilità.		

## LEGENDA-REQUISITI PRESTAZIONALI

 Rapporto con l'esterno	 Privacy / SICUREZZA	 Illuminazione naturale	 Isolamento termico	 GESTIONE	 SALVAGUARDIA DELL'AMBIENTE
 Vista panoramica	 Accessibilità/ FRUIBILITÀ	 Isolamento acustico	 ASPETTO/Estetica		

# COMUNITÀ LOCALE

Età varia

ATTIVITÀ		
ESIGENZE	REQUISITI	REQUISITI PRESTAZIONALI
<b>MANUTENERE</b>		
- Garantire la <b>pulizia regolare</b> di tutti gli spazi scolastici.	- Spazi facilmente accessibili per riporre prodotti e utensili.	
- Garantire la <b>durabilità</b> delle strutture e degli elementi costruiti.	- Le soluzioni tecnologiche selezionate devono garantire la possibilità di <b>sostituire parti della struttura senza dover sostituire completamente l'intero dispositivo.</b> - Scelta di <b>materiali durevoli</b> nel tempo.	  
- Eseguire la <b>manutenzione del verde</b> e dell'area senza ostacoli.	- Progettare tenendo conto della presenza del <b>verde circostante</b> .	
<b>CUCINARE</b>		
- Preparare il cibo in <b>spazi dedicati</b> , separati dalle aree pranzo o di servizio.	- Progettare un ambiente sicuro, igienico e ben ventilato, adatto alla preparazione degli alimenti.	  
- Avere accesso a <b>layout di cucina ergonomici e funzionali</b> che supportino flussi di lavoro sicuri e fluidi.	- <b>Conservazione organizzata</b> e accessibile di ingredienti, utensili e prodotti per la pulizia.	  
<b>RIUNIRSI</b>		
- Avere accesso a <b>un'area spaziosa, confortevole</b> e sicura per attività di gruppo o riunioni.	- Modularità e versatilità.	  
- Garantire che i mobili siano progettati per supportare <b>soluzioni flessibili basate sull'attività</b> .	- Spazio aperto privo di ostacoli permanenti per facilitare un utilizzo e una supervisione flessibili.	  
<b>RIPOSARE</b>		
- Fornire <b>spazi di riposo</b> pomeridiano ed eventualmente notturni.	- Postazioni <b>facilmente removibili</b> , con <b>ingombro minimo</b> per garantire flessibilità d'uso e ottimizzazione degli ambienti.	  
- Rendere lo <b>spazio accessibile</b> ed utilizzabile sempre.		  
<b>SUPERVISONARE I BAMBINI</b>		
- Spazi sicuri, controllati e <b>facilmente supervisionabili</b> .	- Non devono essere presenti elementi che rendano difficile la visione.	  
- <b>Possibilità di accedere alle strutture</b> dei bambini per intervenire in caso di necessità.	- Le strutture (sia di gioco che di servizio) devono essere adeguatamente dimensionate. - Luoghi che rispondano ai requisiti di sicurezza.	   
<b>PROTEGGERSI</b>		
- Fornire <b>spazi sicuri e accessibili</b> in caso di calamità naturali.	- Struttura elevata e resistente ai terremoti per la protezione dalle inondazioni.	 
- Gestire i <b>bisogni di sopravvivenza</b> di base (acqua, cibo, igiene).	- Ingressi facilmente accessibili. - Aree interne protette e prive di ostacoli.	  
<b>CO-GESTIRE</b>		
- <b>Collaborare</b> con il personale scolastico e i comitati locali nella <b>gestione delle emergenze</b> .	- Lo spazio progettato deve essere in grado di ospitare facilmente un gran numero di persone.	 
- Contribuire alla manutenzione e alla cura degli spazi scolastici comuni.	- <b>Formazione di base sul primo soccorso</b> e sulla gestione dei rifugi. - <b>Disponibilità di utensili</b> e materiali per piccole riparazioni o pulizie.	 

## LEGENDA-REQUISITI PRESTAZIONALI

 Rapporto con l'esterno	 Privacy / SICUREZZA	 Illuminazione naturale	 Isolamento termico	 GESTIONE	 SALVAGUARDIA DELL'AMBIENTE
 Vista panoramica	 Accessibilità/ FRUIBILITÀ	 Isolamento acustico	 ASPETTO/Estetica		

## Metaprogetto Workflow:

### Definizione delle unità ambientali:

Le attività individuate sono state numerate ed organizzate all'interno di specifici spazi/lughi, ricavati sia dagli ambienti obbligatori previsti dal bando sia da ulteriori spazi considerati necessari in relazione alle esigenze d'uso. Successivamente, tali spazi sono stati aggregati in unità ambientali più ampie (Figura 182), ottenute raggruppando tra loro le attività compatibili per caratteristiche, funzioni e requisiti prestazionali, così da costruire una struttura coerente utile alla definizione del metaprogetto.

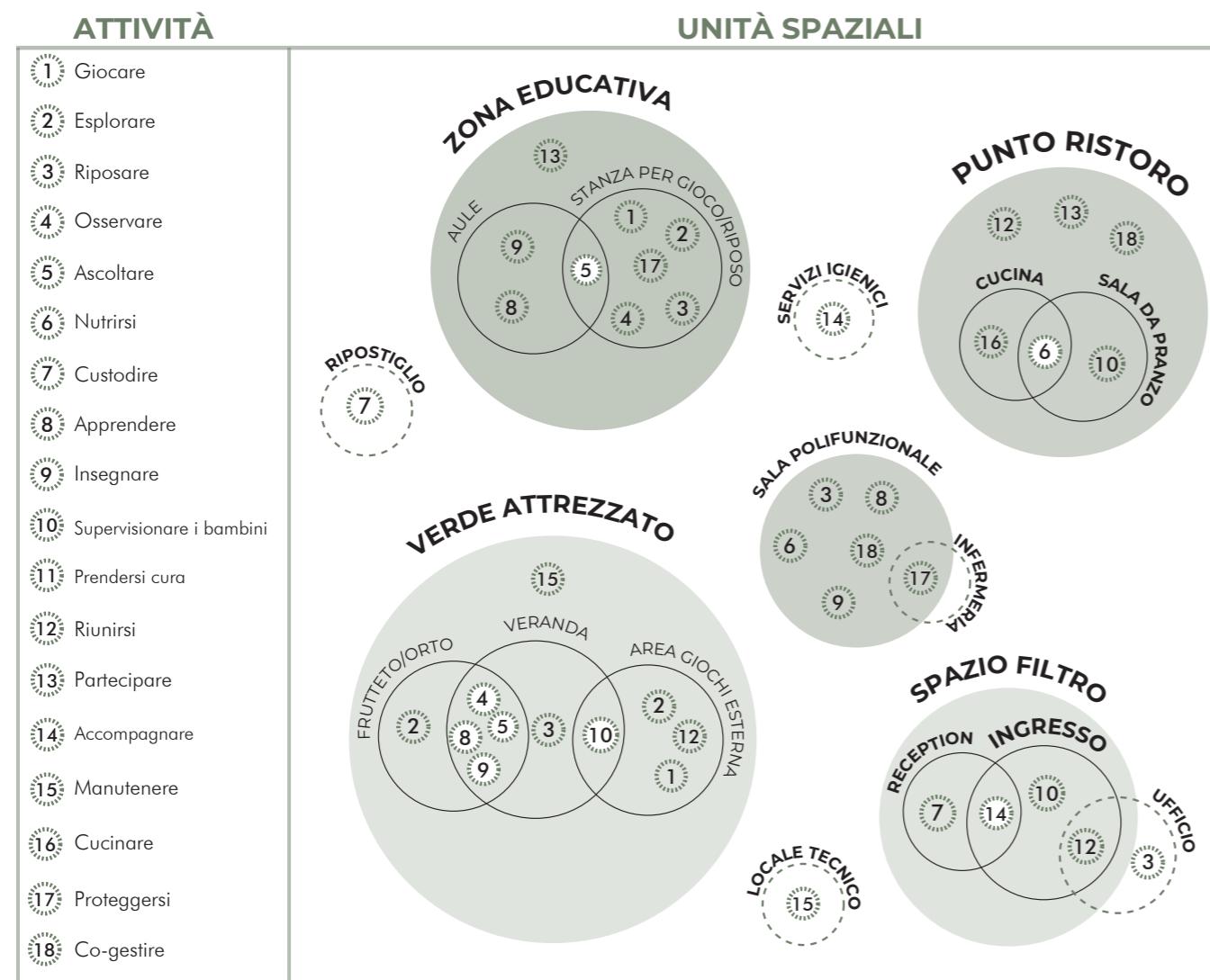


Figura 182. "Definizione delle unità ambientali". Dell'autore della tesi

### Connessione delle unità ambientali:

Lo step successivo ha previsto l'attribuzione dei requisiti prestazionali a ciascuna unità ambientale e la definizione delle relazioni tra di esse, distinguendo tra connessioni forti e connessioni deboli (Figura 183).

Questo passaggio risulta fondamentale poiché il tipo di relazione che si instaura tra gli spazi orienta la definizione del metaprogetto e fornisce indicazioni utili per l'organizzazione distributiva. L'analisi dell'intensità delle interdipendenze tra le unità ambientali ha permesso di definire linee guida progettuali in grado di garantire un funzionamento complessivo coerente ed efficace.

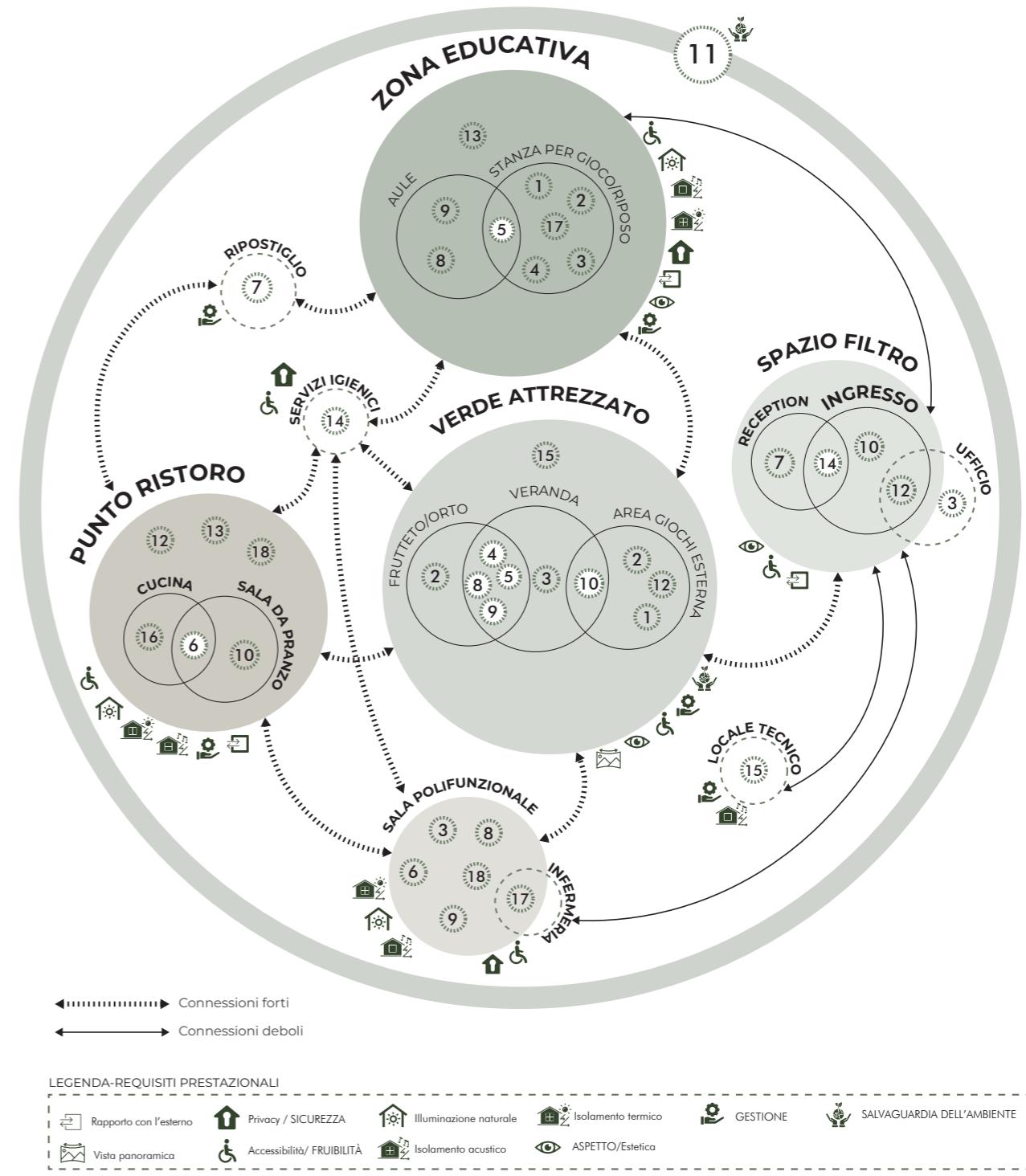


Figura 183. "Metaprogetto". Dell'autore della tesi

### 5.3. Proposta progettuale e strategie di sostenibilità

Il progetto "Bamboo School", sviluppato per il concorso Nepal School Project, è stato elaborato in collaborazione con **Fiamma Martina Morselli** e **Juan Diego Vergas Velasquez**. La partecipazione al concorso si è svolta nell'arco di circa un mese; di conseguenza, l'intero workflow progettuale ha dovuto adattarsi a tempistiche ristrette. L'analisi qui presentata si basa quindi su una conoscenza approfondita ma necessariamente sintetica del contesto nepalese considerandone le condizioni climatiche, geografiche e sociali e non raggiunge il livello di dettaglio dell'analisi territoriale più ampia illustrata in precedenza nella tesi. Al fine di comprendere l'impostazione generale del lavoro, che sarà poi approfondita nei paragrafi successivi, di seguito è riportata la descrizione riassuntiva del progetto che è stata presentata al concorso (in allegato insieme alla tavola):

**Il progetto propone una scuola primaria modulare per il Nepal, concepita non solo come struttura educativa ma anche come potenziale rifugio di emergenza per la comunità. La proposta integra principi di resilienza, riferimenti alla tradizione costruttiva locale e strategie di sostenibilità, con l'obiettivo di offrire un modello replicabile e adattabile a diversi contesti rurali. Particolare attenzione è stata dedicata alla risposta ai rischi ambientali più rilevanti del territorio, come la forte sismicità e le ricorrenti inondazioni monsoniche.**

*L'organizzazione generale si fonda su un sistema a griglia regolare che orienta la distribuzione funzionale e consente una costruzione per fasi. La prima fase prevede la realizzazione di una fondazione rialzata in cemento armato, progettata per garantire un comportamento sismico adeguato e ridurre la vulnerabilità agli allagamenti. La fase successiva introduce un sistema di copertura modulare composta da elementi prefabbricati in loco, caratterizzati da pendenze variabili ottimizzate per la raccolta dell'acqua piovana e predisposte per l'integrazione futura di pannelli solari. Sotto questa copertura unificante trovano posto i volumi modulari destinati alle funzioni principali, in particolare le aule. In una fase successiva vengono costruiti gli altri spazi, pensati come ambienti flessibili e aree comuni.*

*Il progetto adotta strategie ambientali passive coerenti con il clima locale, promuovendo ventilazione naturale, illuminazione diffusa e comfort termico. La scelta dei materiali ha un ruolo centrale: il bambù è impiegato come principale elemento strutturale per la sua disponibilità locale, il ridotto impatto energetico e le buone prestazioni in caso di sisma. I sistemi di tamponamento utilizzano tecniche tradizionali basate sull'intreccio di bambù combinato con miscele di terra e paglia, che garantiscono inerzia termica. Una caratteristica distintiva riguarda l'impiego delle estremità dei culmi di bambù, disposte in motivi geometrici all'interno di telai per realizzare schermature e balaustre. Questi elementi consentono il riutilizzo di parti generalmente scartate e*

*allo stesso tempo producono effetti di luce filtrata, migliorando la qualità percettiva degli spazi senza compromettere privacy e ventilazione.*

*La scuola è concepita come un vero e proprio centro comunitario, capace di accogliere attività educative, momenti collettivi, spazi coltivati e un frutteto dedicato al sostegno della sicurezza alimentare. In situazioni di emergenza, l'edificio può essere utilizzato come rifugio, offrendo protezione, acqua e spazi comuni sicuri per la comunità.*

*La modularità e la flessibilità costituiscono principi guida del progetto, che nasce per essere adattato a diverse condizioni topografiche, climatiche e materiche del contesto nepalese".*

Riprendendo le linee guida per una progettazione sostenibile delineate in quattro punti nel capitolo 3.3 (Figura 102), è possibile illustrare il percorso progettuale che ha condotto alla realizzazione di "Bamboo School".

#### 1

#### DESIGN FOR LONGEVITY

Sebbene il bando richiedesse la progettazione di una scuola elementare replicabile in qualsiasi area del Nepal, è stato comunque necessario approfondire il contesto climatico per comprendere in modo più accurato le condizioni ambientali entro cui il progetto si sarebbe collocato. A tal fine, sono stati considerati i dati climatici relativi a **Kathmandu**, capitale del paese e situata in una fascia intermedia tra quelle analizzate nel capitolo 1.4 ovvero: fascia collinare e zona "Cwa: subtropicale umida". Le sue caratteristiche geografiche ( $27^{\circ}42'36''$  N,  $85^{\circ}19'12''$  E; altitudine 1.400 m) offrono un riferimento utile per definire strategie progettuali adattabili anche ad altri insediamenti con condizioni analoghe.

##### Analisi dei venti.

La rosa dei venti evidenzia una prevalenza di venti provenienti da sud-ovest (Figura 184), con velocità variabili nel corso dell'anno. Questo dato è stato fondamentale per orientare correttamente gli ambienti e garantire una buona ventilazione naturale (cross ventilation), soprattutto nelle aule, che richiedono un ricambio d'aria costante per assicurare comfort termo-igrometrico e qualità dell'aria interna. L'orientamento delle aule verso sud deriva dalla necessità di massimizzare l'apporto solare, ma anche dalla possibilità di favorire una ventilazione trasversale efficace. In contesti caratterizzati da elevata umidità, come molte aree del Nepal, sfruttare adeguatamente il vento diventa fondamentale per garantire il comfort interno e ridurre il ricorso a sistemi meccanici.

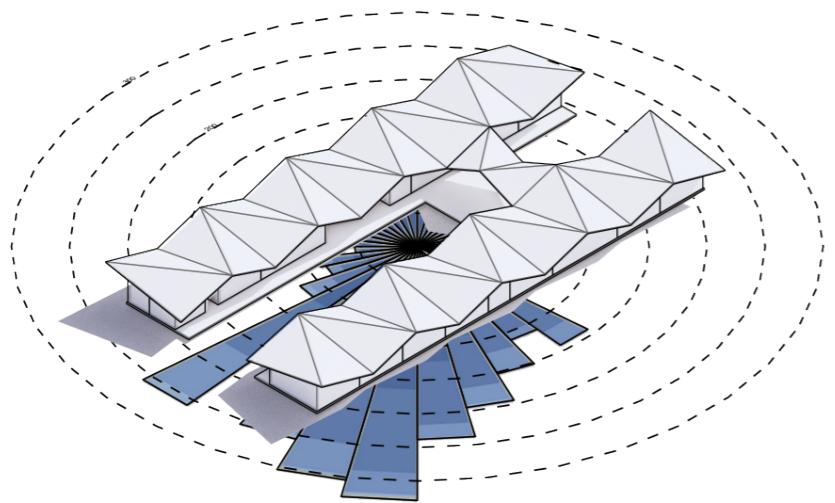


Figura 184. "Annual Wind Rose". Elaborato da Falcioni, Morselli, Vergas Velasquez

#### Analisi del percorso solare.

La mappa solare (Figura 185) ha permesso di progettare consapevolmente rispetto alla variazione stagionale dell'inclinazione dei raggi solari, che influenza direttamente sia le scelte di esposizione degli ambienti sia la conformazione della copertura. Progettare a Kathmandu significa confrontarsi con inverni freddi ed estati calde (cfr. capitolo 1.4), condizioni che richiedono strategie differenziate. Nei mesi invernali è necessario massimizzare il guadagno solare (*heat gain*) durante il giorno, così da accumulare calore e rilasciarlo gradualmente nelle ore notturne, contribuendo al comfort interno. Al contrario, in estate l'elevata inclinazione del sole rende indispensabili sistemi di ombreggiamento.

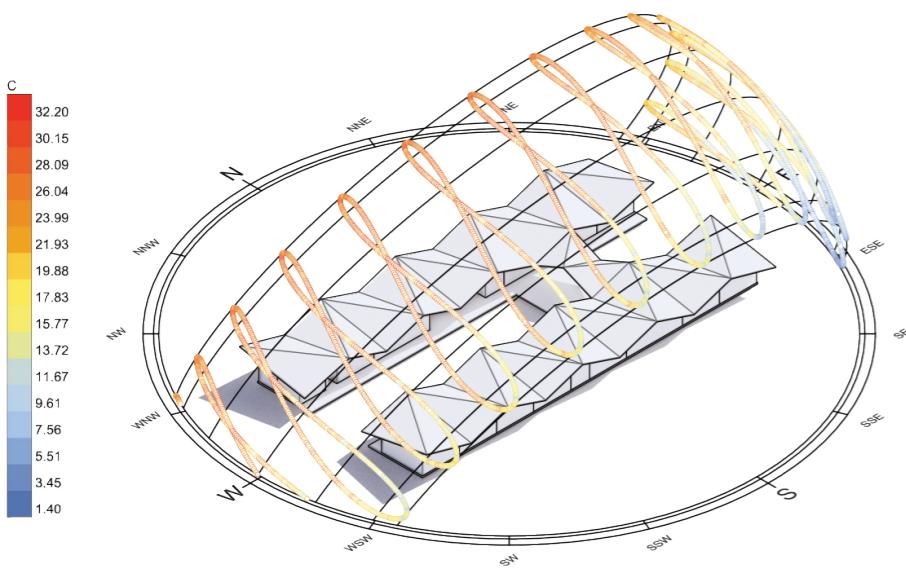


Figura 185. "Sun path". Elaborato da Falcioni, Morselli, Vergas Velasquez

Nell'ottica del *design for longevity*, le analisi condotte sul clima monsonico del Nepal hanno orientato lo sviluppo di un progetto volto a garantire resilienza nel lungo periodo. In questo quadro, la copertura assume un ruolo centrale: oltre a mediare il controllo solare, definito attraverso lo studio delle diverse inclinazioni dei raggi nelle differenti stagioni, essa contribuisce alla protezione dell'edificio dagli eventi meteorologici estremi, riducendo il degrado dei muri perimetrali particolarmente esposti in un contesto caldo-umido e soggetto a precipitazioni intense.

Durante il processo progettuale sono emerse due vulnerabilità principali alle quali era necessario rispondere con soluzioni mirate: la vulnerabilità sismica e quella alluvionale.

Per quanto riguarda il rischio sismico, una delle strategie adottate è stata la scelta del materiale strutturale. Il bambù risulta particolarmente adatto per la sua ampia disponibilità locale, ma soprattutto per le sue proprietà meccaniche e fisiche, che garantiscono un comportamento favorevole sotto sollecitazione dinamica (cfr. capitolo 2.3). La scelta del bambù risponde anche a considerazioni ambientali, approfondite nel capitolo 2.3, legate al suo ridotto impatto in termini di energia incorporata e alla rapidità di rigenerazione. A supporto di questa strategia, la modularità del sistema costruttivo contribuisce ulteriormente alla sicurezza sismica, permettendo una distribuzione più uniforme dei carichi e una maggiore adattabilità della struttura alle deformazioni.

Per affrontare invece la vulnerabilità legata alle alluvioni, il progetto prevede l'elevazione dell'edificio di circa 60 cm, riducendo il rischio di infiltrazioni e danni durante gli eventi monsonici più intensi. A questo si affiancano soluzioni integrate per la gestione dell'acqua, tra cui un sistema di raccolta e accumulo in una cisterna sotterranea. Ciò permette di mitigare il deflusso superficiale durante le piogge intense e di garantire una riserva idrica utile alle attività quotidiane della scuola e disponibile, in caso di emergenza, a supporto della comunità.

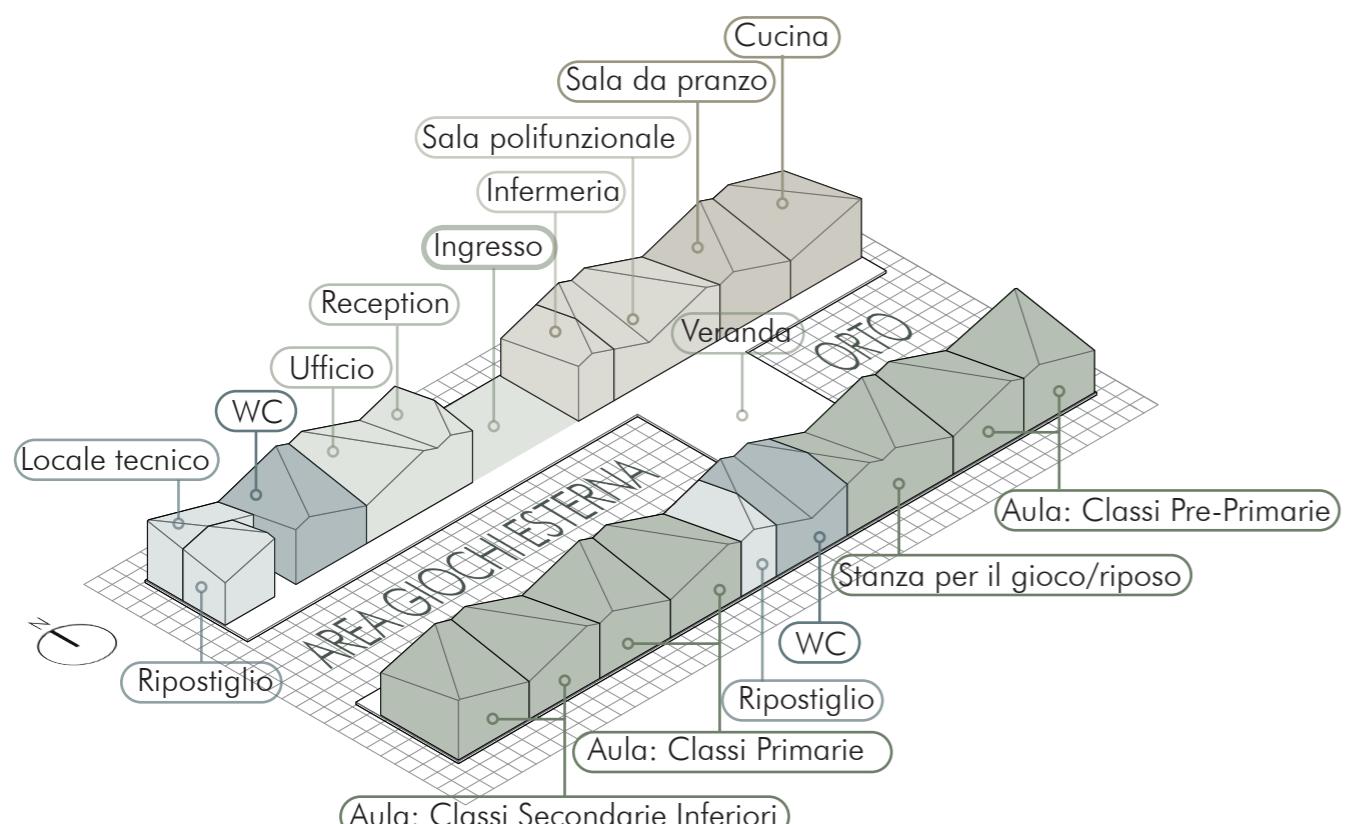
## 2

## DESIGN FOR ALL

Dal metaprogetto (cfr. capitolo 5.2) sono emersi quattro unità spaziali principali: la zona educativa, il punto ristoro, lo spazio filtro e la sala polifunzionale. A partire da questi, integrando l'analisi dell'esposizione solare e della mappa dei venti precedentemente illustrata, è stata elaborata la Figura 186, che rappresenta lo schema funzionale dell'intero complesso. Il concept prevede l'organizzazione del progetto in due blocchi principali (schema in basso a destra): uno a **nord**, destinato alle **funzioni pubbliche**, e uno a **sud**, dedicato alle attività scolastiche e quindi di carattere più **privato**. Il blocco educativo, che ospita le aule e rappresenta l'area maggiormente utilizzata durante la giornata, è stato collocato a sud per consentire l'inserimento del maggior numero possibile di aperture lungo la facciata

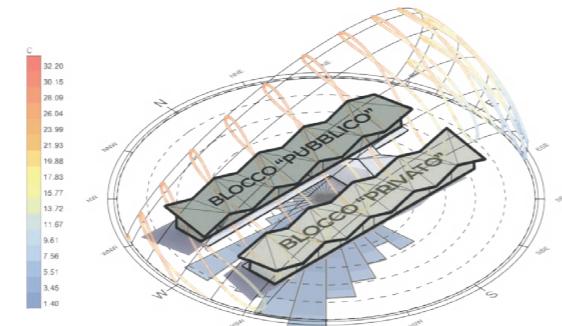
più estesa e meglio esposta al sole. In questo modo è possibile ottimizzare l'apporto di luce naturale e il guadagno solare diretto, fondamentali in un'ottica di comfort ambientale e riduzione dei consumi energetici.

Il blocco nord, invece, accoglie lo spazio filtro che funge da ingresso principale alla struttura insieme al punto ristoro e alla sala polifunzionale. Questa scelta risponde alla necessità di rendere facilmente accessibili i luoghi che possono essere utilizzati non solo dagli studenti, ma anche dalla comunità locale. La collocazione degli spazi pubblici in prossimità dell'ingresso facilita la fruizione di tali ambienti anche al di fuori dell'orario scolastico.



- ZONA EDUCATIVA**
- SPAZIO FILTRO**
- PUNTO RISTORO**
- SALA POLIFUNZIONALE**

Figura 186. "Schema funzionale". Elaborato dall'autore della tesi



Seguendo i principi del *design for all*, orientati a rendere spazi e servizi accessibili e fruibili dal maggior numero possibile di persone (indipendentemente da età, abilità o condizioni sociali) la progettazione ha perseguito soluzioni funzionali, inclusive e coerenti dal punto di vista estetico. La distribuzione elaborata è stata quindi sottoposta a un'analisi dei flussi (Figura 187), utile a verificarne l'efficienza complessiva, l'accessibilità dei percorsi e la coerenza delle interazioni tra le diverse unità funzionali.

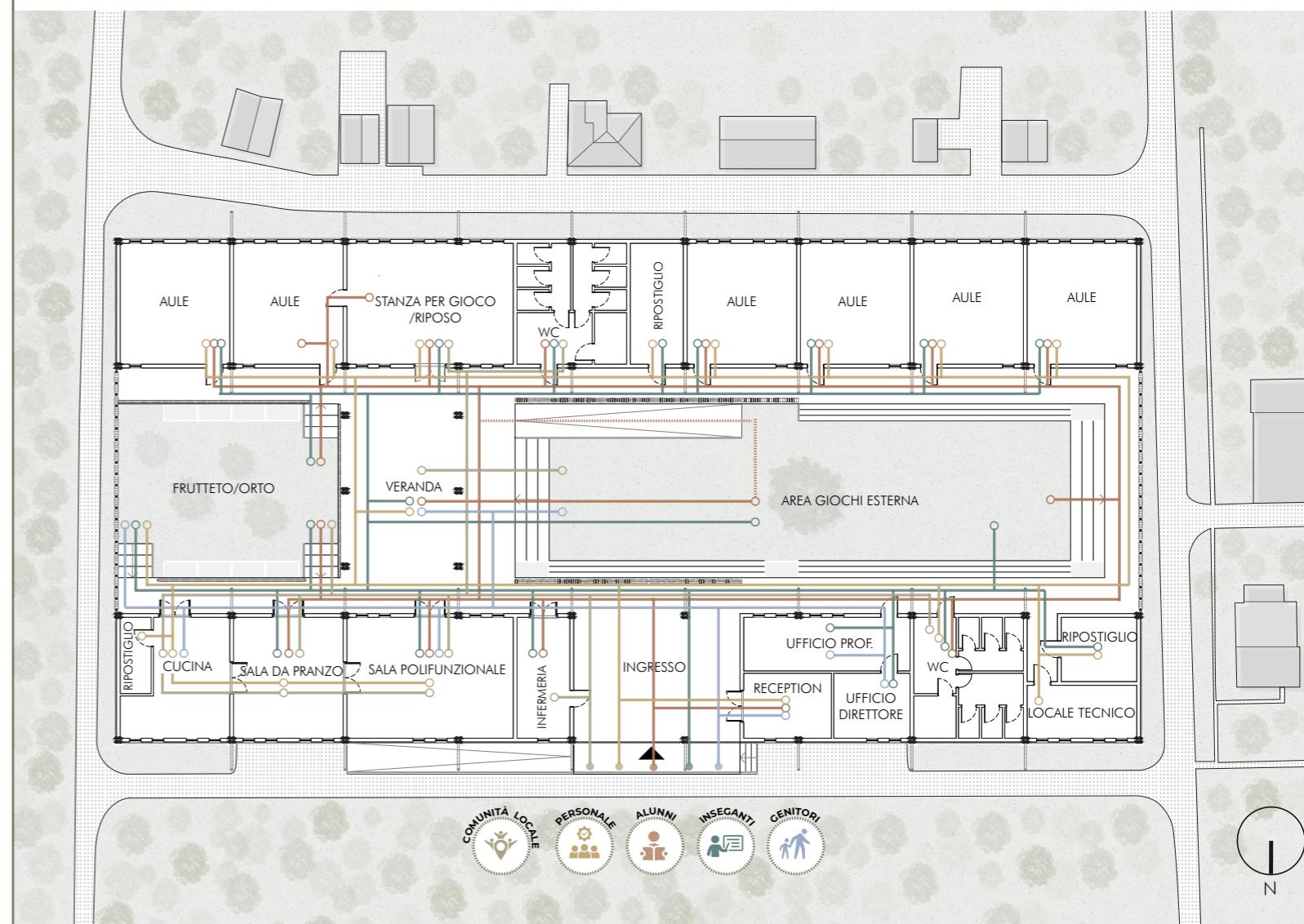


Figura 187. "Analisi dei flussi". Elaborato dall'autore della tesi

### 3 MODULAR DESIGN

I principi di **modularità, flessibilità e scalabilità** hanno costituito i principali generatori del progetto.

L'intero concept, e di conseguenza l'organizzazione spaziale, si basa su una griglia modulare di 60 cm (Figura 188).

Questa scelta ha permesso di definire con precisione la distribuzione degli ambienti secondo una logica costruttiva chiara, semplificando allo stesso tempo la gestione della scalabilità del sistema edilizio.

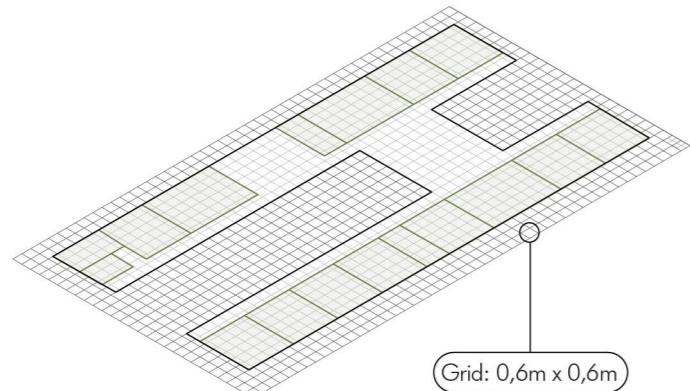


Figura 188. "Griglia di progetto". Elaborato dall'autore della tesi

Nel rispetto della griglia modulare è stato quindi studiato anche il sistema costruttivo: il passo strutturale dei setti murari e l'impostazione dei plinti di fondazione seguono infatti la stessa logica di regolarità.

Il sistema di copertura e la struttura portante in bambù (Figura 189) adottano tecniche costruttive semplici e facilmente realizzabili. Considerando che la costruzione dell'edificio sarà affidata in gran parte a manodopera locale, le soluzioni progettuali sono state pensate per garantire praticità, chiarezza esecutiva e facilità sia nelle operazioni di montaggio sia nelle attività di manutenzione nel tempo.

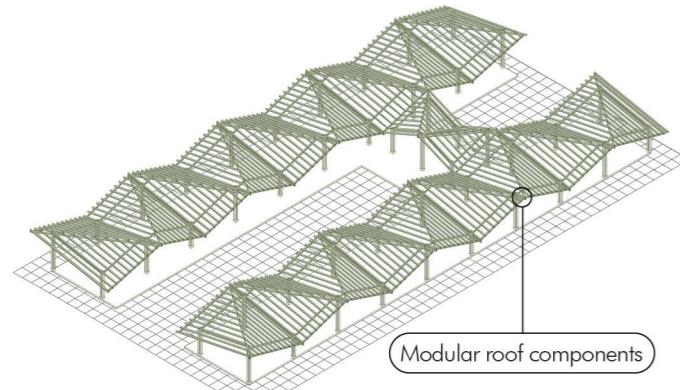


Figura 189. "Concept della struttura portante in bambù". Elaborato dall'autore della tesi

In questa direzione si inserisce anche l'applicazione dei principi del *Design for Disassembly (DfD)*, adottati per semplificare le operazioni di montaggio e smontaggio e per garantire una futura adattabilità dell'edificio. Questo approccio favorisce pratiche costruttive più sostenibili e in linea con i principi dell'economia circolare.

La copertura rappresenta la prima fase di costruzione, insieme alle fondazioni e al basamento rialzato. Essa assume il ruolo di elemento unificante, una sorta di "tetto continuo" che definisce il perimetro protetto dell'intero complesso. Sotto questa struttura vengono successivamente eretti i vari moduli che compongono gli spazi individuati nel progetto.

Nella Figura 190 tali moduli sono differenziati per colori, in relazione alle diverse fasi costruttive previste dal concorso.

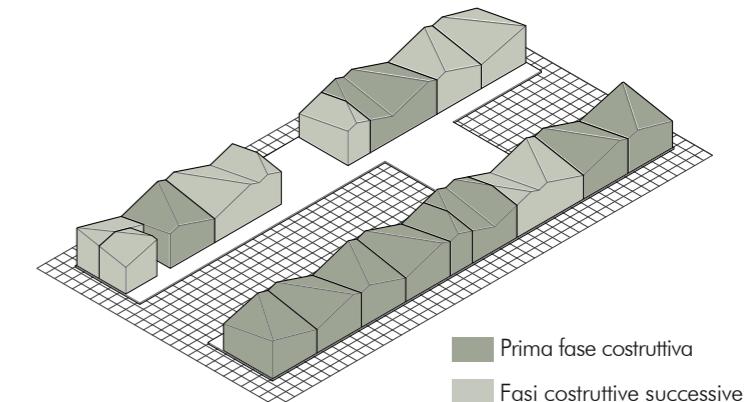


Figura 190. "Concept della costruzione per fasi". Elaborato dall'autore della tesi

L'immagine 191 restituisce la configurazione spaziale complessiva del progetto e consente di interpretare in maniera chiara le principali scelte compositive e funzionali. La forma generale dell'edificio deriva dal concept articolato in due blocchi distinti, collocati a nord e a sud, una scelta che richiama la logica distributiva delle abitazioni tradizionali nepalesi organizzate intorno a una corte (cfr. capitolo 2.5). I fronti est e ovest, lasciati volutamente privi di volumi costruiti, sono stati definiti da una barriera semi-trasparente composta da culmi di bambù inseriti in un telaio. Tale soluzione, approfondita successivamente, contribuisce a delineare un perimetro riconoscibile e protetto pur mantenendo un rapporto visivo aperto verso l'esterno.

La necessità di configurare uno spazio sicuro è emersa come tema centrale già nelle fasi preliminari del metaprogetto. La possibilità di supervisionare agevolmente i bambini durante le attività quotidiane richiede infatti un ambiente definito, privo di barriere visive invasive ma comunque sufficientemente delimitato da garantire protezione e controllo. L'assetto distributivo, già illustrato in precedenza, si integra con le riflessioni sviluppate a partire dall'analisi di casi studio relativi ad esempi di architetture scolastiche e una ricerca sul sistema scolastico nepalese indagando le pratiche educative locali.

L'architettura "si fa" strumento pedagogico, capace di accompagnare pratiche didattiche innovative e attività esperienziali. Gli spazi esterni sono pensati per ospitare momenti di apprendimento all'aperto, come la cura dell'orto scolastico e attività legate all'alimentazione consapevole, come il consumo dei prodotti coltivati.

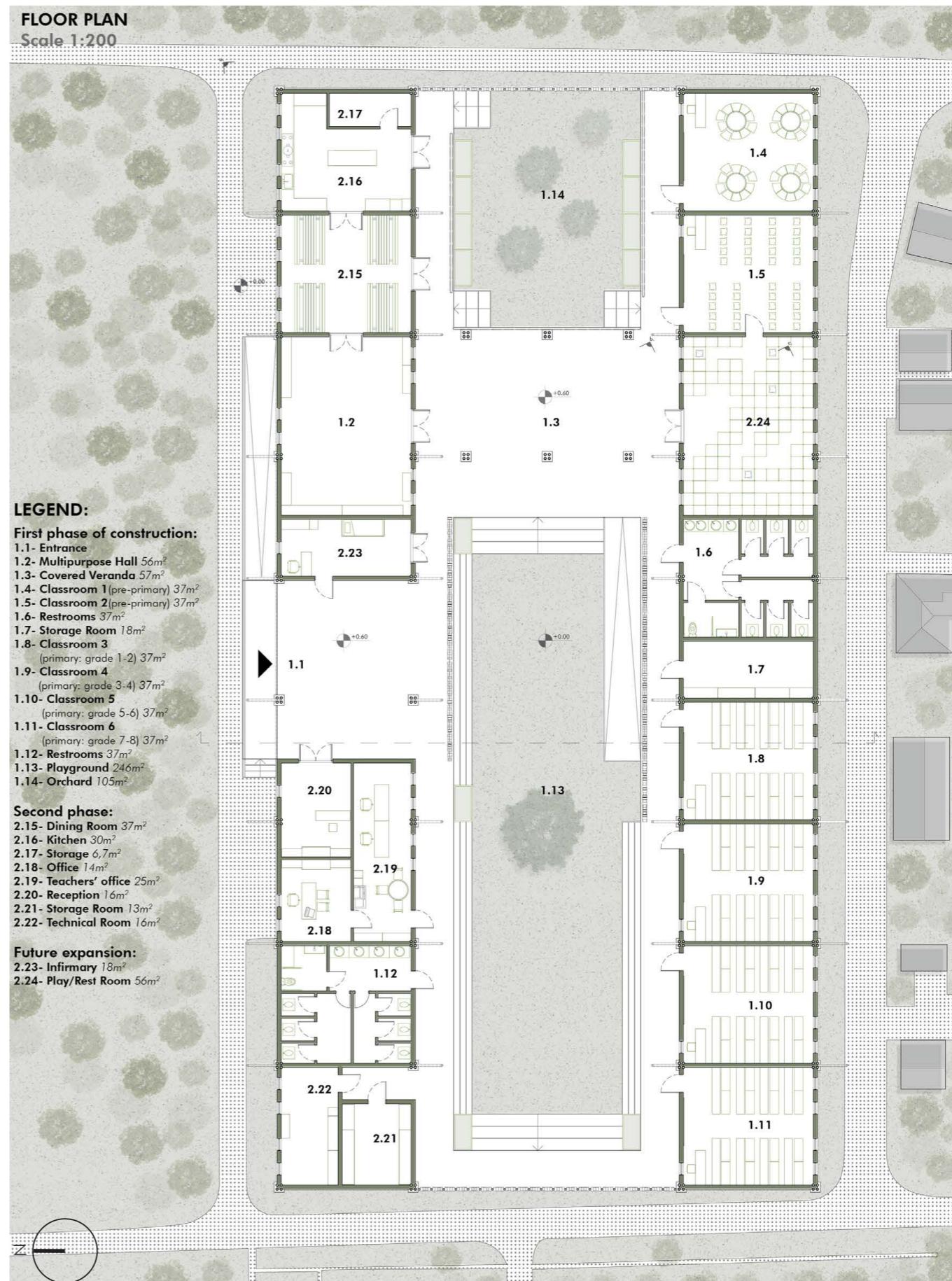


Figura 191. "Pianta 1:200". Elaborato da Falcioni, Morselli, Vergas Velasquez

L'immagine 192 offre una sintesi delle principali scelte progettuali, mettendo in relazione gli aspetti bioclimatici che hanno guidato l'impostazione dell'edificio, in particolare la ventilazione trasversale e il controllo del guadagno solare. L'andamento stagionale dell'inclinazione solare è rappresentato per evidenziare il ruolo della copertura nell'ottimizzare sia la protezione nei mesi più caldi sia l'apporto solare durante la stagione invernale.

All'interno della corte, nell'area destinata al *playground*, è stata collocata una cisterna per la raccolta delle acque meteoriche. La forma e l'inclinazione delle falde di copertura sono state progettate per convogliare l'acqua piovana verso questo punto, consentendo un sistema di raccolta efficiente e controllato. L'inserimento della cisterna risponde alle esigenze funzionali della

scuola e assume un ruolo strategico all'interno di un contesto vulnerabile come quello nepalese, dove durante la stagione monsonica la disponibilità di acqua può diventare critica e la struttura può essere chiamata ad assolvere al ruolo di rifugio in situazioni di emergenza.

Per garantire la sicurezza in caso di allagamenti, l'edificio è stato sopraelevato di 60 cm rispetto al piano di campagna. Tale scelta è stata valorizzata progettando un sistema di gradonate che consente di superare il dislivello e, al tempo stesso, definisce un luogo "per lo stare" e per le attività all'aperto. Questo spazio, accessibile e multifunzionale, diventa un punto di incontro per alunni, insegnanti, famiglie e membri della comunità, contribuendo a rafforzare la dimensione sociale della scuola e a incrementare la qualità degli spazi collettivi.

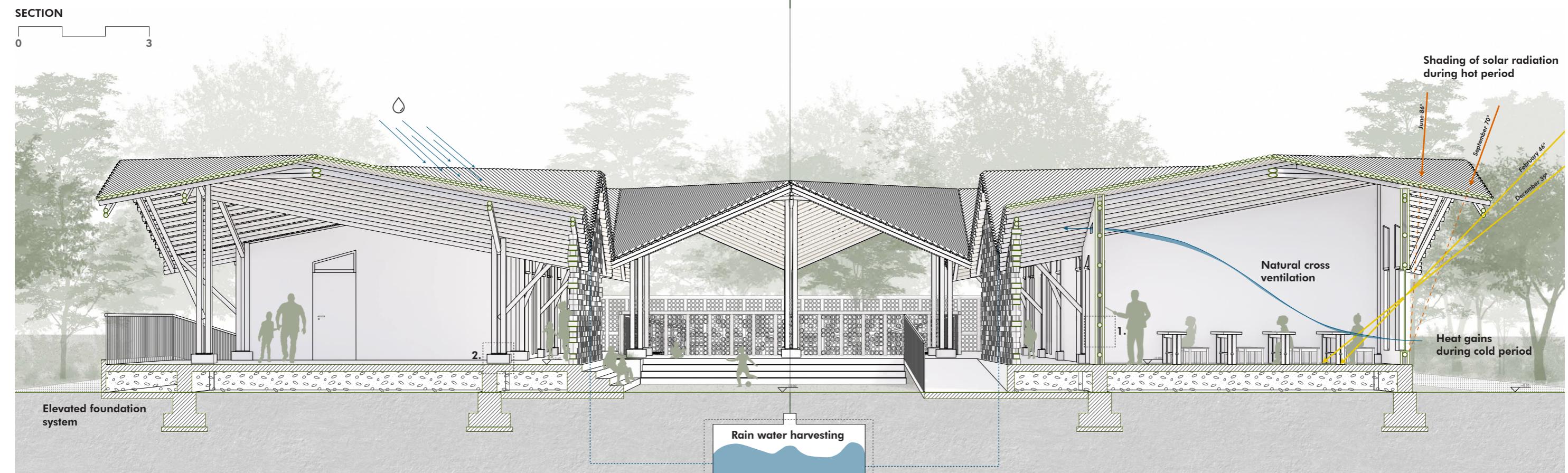


Figura 192. "Sezione prospettica". Elaborato da Falcioni, Morselli, Vergas Velasquez

## 4

## DESIGN FOR REUSABILITY

L'ultima fase del progetto si concentra sull'analisi dei materiali e sulla loro gestione sostenibile lungo l'intero ciclo di vita dell'edificio, in linea con i principi del *Design for Reusability*. L'architettura è concepita per mantenere le proprie prestazioni nel tempo, minimizzando gli sprechi e favorendo un ciclo di riuso e rigenerazione dei materiali.

Progettando in un contesto caratterizzato da una disponibilità significativa di risorse locali (cfr. capitolo 2.6), particolare attenzione è stata dedicata alla definizione delle tecniche costruttive. Il bambù è stato impiegato come materiale strutturale principale per la realizzazione dell'intero scheletro dell'edificio, ad eccezione delle fondazioni, realizzate in calcestruzzo armato (CLS). La progettazione ha quindi previsto l'integrazione del bambù con soluzioni costruttive coerenti, sia dal punto di vista tecnico sia dal punto di vista sostenibile, garantendo continuità tra struttura, involucro e finiture.

Per le pareti perimetrali è stata adottata la tecnica del *torquis*, storicamente utilizzata in Nepal con il nome di *wattle and daub* (cfr. capitolo 2.6), che combina elementi in bambù intrecciati con materiali locali quali fango e paglia. Particolare attenzione è stata dedicata alle modalità di connessione tra il bambù e il basamento in CLS, come approfondito nel punto 2 in figura 193, al fine di garantire stabilità strutturale, durabilità e facilità di manutenzione.

Il progetto mira, dunque, all'integrazione dei principi di sostenibilità, economia circolare e valorizzazione delle risorse locali, indagando come la selezione e l'impiego dei materiali possano costituire un efficace strumento progettuale, in grado di supportare sia la resilienza dell'edificio sia il benessere della comunità che lo utilizza.

## EXPLODED AXONOMETRY

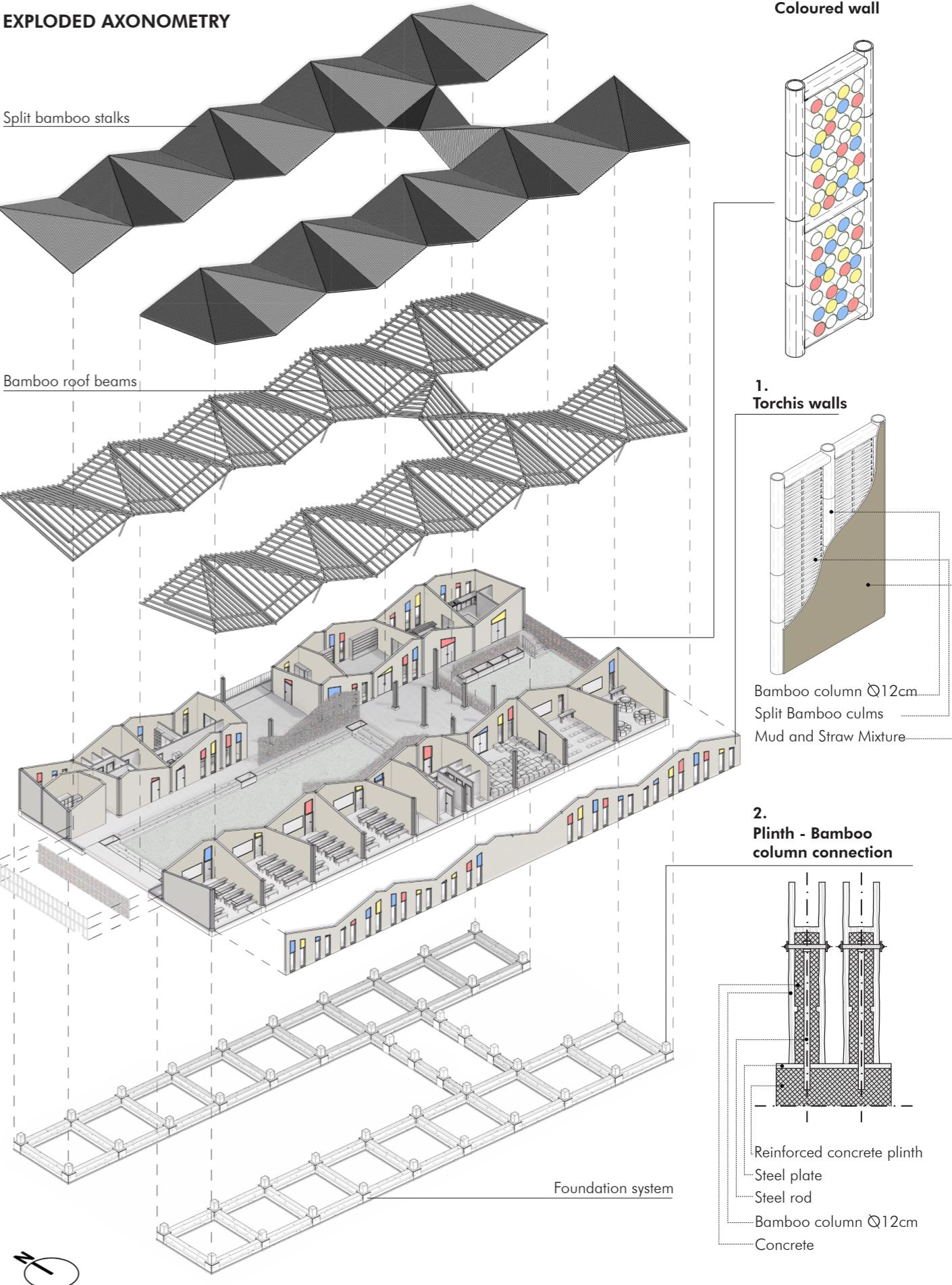


Figura 193. "Esploso assonometrico con dettagli costruttivi". Elaborato da Falcioni, Morselli, Vergas Velasquez



Figura 194. "Render vista esterna"



Figura 195. "Playroom Render".

L'immagine 195 mostra la playroom, progettata secondo principi di modularità, adattabilità e flessibilità. I "cuscinetti" morbidi possono essere utilizzati per il gioco e il riposo quotidiano, ma anche disposti a terra come secondo pavimento per accogliere la comunità in caso di emergenza. Impilandoli, è inoltre possibile liberare completamente la stanza e modificarne la configurazione a seconda delle necessità.



Figura 196. "Render corte interna".



Figura 197. "Disposizione dei culmi di bambù su fili".



Figura 198. "Disposizione dei culmi di bambù su telaio".

#### **Bamboo Coloured wall**

Il principio di minimizzazione degli sprechi è stato applicato attraverso il riutilizzo dei culmi e degli anelli circolari ricavati da pali di bambù di scarto, valorizzando materiali locali e riducendo l'impatto ambientale della costruzione. Le pareti permeabili realizzate con questa tecnica favoriscono la ventilazione naturale, mentre i pannelli semi-trasparenti e colorati introducono giochi di luce che integrano funzionalità ed estetica. Gli anelli circolari, opportunamente trattati e colorati, sono stati montati su una struttura portante anch'essa in bambù, configurandosi come partizioni semi-trasparenti. La loro disposizione, talvolta sospesa con fili (Figura 197) invece di essere fissata rigidamente (Figura 198), permette la creazione di effetti luminosi e sonori, contribuendo a generare un ambiente stimolante e sensorialmente ricco. Queste soluzioni mirano a valorizzare i materiali locali, migliorano il comfort e il benessere di chi utilizza la struttura, promuovendo un'esperienza spaziale dinamica e coinvolgente.

## 5.4. Revisione critica del progetto

Il progetto **Bamboo School**, sviluppato per il concorso Nepal School Project, ha raggiunto la fase delle **semifinali**, un risultato significativo che testimonia la validità delle scelte progettuali. Al fine di condurre una revisione critica completa, risulta utile confrontare il nostro lavoro con quello del progetto vincitore, in particolare alla luce dei commenti espressi dai giudici:

“One of the project’s strongest features is the central interior corridor that allows users to move throughout the school without exposure to weather conditions, enhancing the building’s cohesion as a single, unified structure. It also creates opportunities for informal and sheltered gathering spaces. I was also impressed by the construction logic: a standardized frame system that can accommodate walls, doors, or windows, using a variety of local infill materials. This approach allows for prefabrication, faster assembly, and reduced costs. The design cleverly adapts to Nepal’s climatic diversity, with the central corridor enclosed in colder areas or left open as a covered veranda”

Filippo Berardi, Co-founder of Studio Berardi Miglio

Dal confronto visivo, distributivo e concettuale tra i due progetti emergono alcune analogie significative (Figure 199, 200). Entrambi prevedono una corte centrale che accoglie orti, frutteti e spazi verdi comuni, e utilizzano le gradonate come dispositivi funzionali e aggregativi. Una differenza rilevante riguarda invece il trattamento del perimetro. Nel progetto “Bamboo School” i lati sud e ovest restano aperti, definiti da una parete permeabile in bambù realizzata con materiali di scarto, che garantisce sicurezza senza compromettere la ventilazione e la permeabilità visiva. Il progetto vincitore, pur collocando funzioni su tutti i lati della corte, non configura un perimetro rigidamente chiuso, poiché ammette configurazioni variabili del lotto e non prevede elementi strutturali permanenti che ne vincolino la forma finale. Da ciò emerge che il progetto vincitore adotta un’impostazione maggiormente orientata alla riconfigurabilità: i moduli possono essere riorganizzati nel tempo o adattati a lotti con caratteristiche differenti (Figura 201). *Bamboo School* segue invece un approccio diverso. Pur basandosi sui principi di modularità e flessibilità, non si configura come un insieme di moduli autonomi accostati. L’intero impianto si sviluppa a partire da una griglia modulare che determina la posizione di pilastri, setti e fondazioni, mentre la struttura poggia su un basamento continuo che riprende lo stesso schema. Anche la copertura è unitaria e abbraccia l’intero lotto, in contrasto con la soluzione del progetto vincitore, che prevede coperture distinte per ciascun modulo funzionale. All’interno di questa struttura unitaria, le diverse funzioni vengono integrate in fasi successive, secondo un processo costruttivo che consente ampliamenti progressivi mantenendo coerenza formale e strutturale.

Un’ulteriore differenza riguarda la collocazione del playground. Nel progetto di tesi esso è inserito all’interno della corte per garantire maggiore protezione e controllo, mentre nel progetto vincitore si trova all’esterno del perimetro principale. Nonostante queste divergenze, entrambi i progetti adottano un sistema costruttivo modulare e facilmente realizzabile attraverso processi di autocostruzione, favorendo la replicabilità e il coinvolgimento della comunità locale. Per quanto concerne la gestione delle acque meteoriche, entrambi prevedono coperture inclinate collegate a sistemi di raccolta distribuiti lungo la corte centrale.

La proposta del progetto vincitore risulta complessivamente più “semplice”, immediata e facilmente interpretabile, poiché concretizza in modo diretto il principio di modularità. Questo aspetto è evidente sia all’esterno, attraverso le diverse configurazioni che il sistema può assumere, sia all’interno, dove ogni elemento dalle finiture agli arredi, fino agli infissi è progettato secondo logiche modulari e ripetibili. Il progetto vincitore propone consapevolezza e praticità grazie all’impiego di pareti scorrevoli e componenti standardizzati che consentono una rapida riconfigurazione degli spazi in base alle esigenze didattiche, contribuendo al tempo stesso a ridurre i tempi complessivi di costruzione.

L’analisi mette in luce una differenza sostanziale nella replicabilità su larga scala. *Bamboo school* è stato sviluppato a partire da un’analisi climatica mirata all’area di Kathmandu e risulta particolarmente efficace in quel contesto specifico; la sua applicazione in altre fasce climatiche richiederebbe ulteriori verifiche e adattamenti. Il progetto vincitore, al contrario, propone soluzioni più generiche e flessibili, pensate per essere adattate a una varietà di contesti regionali. Pur non approfondendo il microclima locale con lo stesso livello di dettaglio, offre un modello scalabile, più facilmente replicabile in condizioni climatiche diverse.

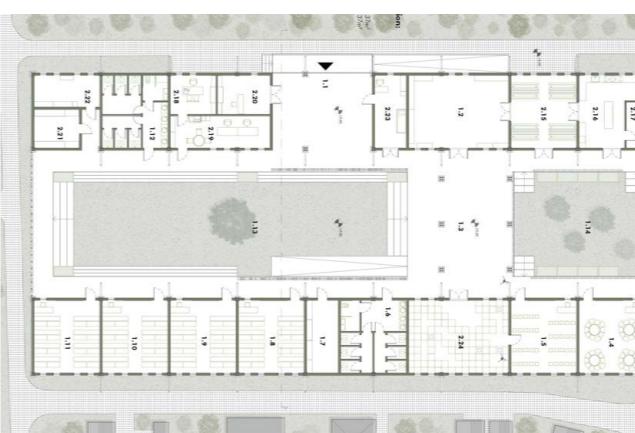


Figura 199. “Bamboo School, Pianta (fuori scala)”. Dell’autore della tesi

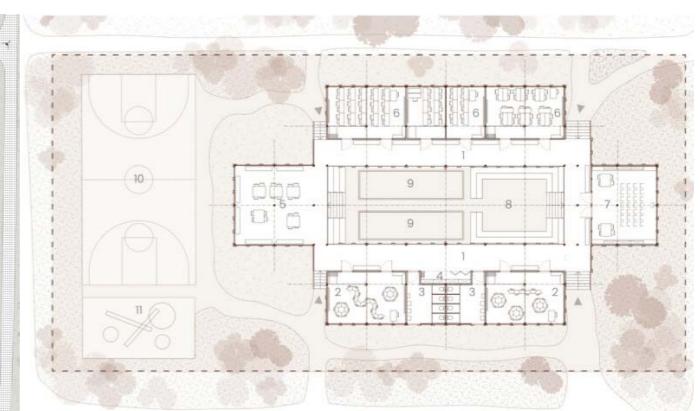


Figura 200. “Progetto vincitore, Pianta (fuori scala)”. Credit: Julian Hendigery, Nina Dobroczynska, Emiliya Skipar

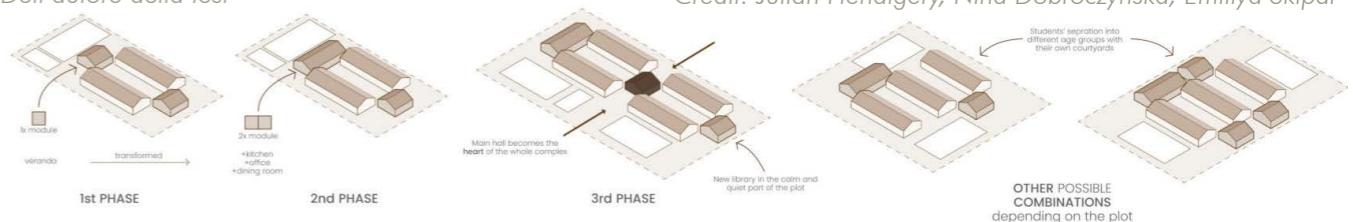


Figura 201. “Design concept”. Credit: Julian Hendigery, Nina Dobroczynska, Emiliya Skipar. <https://nepalschoolproject.com/>

## 5.5. Rielaborazione progettuale

A seguito della revisione critica del progetto presentato al concorso e del confronto con la proposta vincitrice, il presente lavoro approfondisce gli aspetti rimasti solo parzialmente sviluppati nella prima fase, mettendo a fuoco in modo più rigoroso i principi di resilienza, adattabilità, flessibilità e modularità. L'obiettivo della rielaborazione è stato quello di consolidare il progetto secondo un principio di longevità, garantendo una struttura capace di mantenere nel tempo la propria efficacia funzionale sin dal momento della sua realizzazione.

In quest'ottica, la scelta di adottare un basamento e una copertura come elementi "permanenti" risulta coerente con la volontà di definire un'architettura stabile, sicura e flessibile nella distribuzione degli spazi interni. Sono stati quindi sviluppati dettagli costruttivi aggiuntivi che chiariscono il sistema costruttivo (Figura 202, 203, 204, 205, 206, 207) e il processo di costruzione, analizzando le connessioni tra travi e pilastri (Figura 209). Nel progetto presentato al concorso è stata mostrata la configurazione finale ritenuta più efficace per il contesto specifico, ma la logica strutturale adottata permette, se necessario, di elaborare varianti distributive senza comprometterne la coerenza progettuale.

Particolare attenzione è stata dedicata alla **copertura**, elemento chiave in quanto unico componente realizzato integralmente fin dalla prima fase. Ciò comprova che gli spazi sottostanti "liberi" possono essere utilizzati in relazione alle necessità della comunità diventano così aree protette e immediatamente fruibili compensando la carenza di luoghi sicuri e coperti in un contesto come quello nepalese. Come evidenziato anche nella parte teorica della tesi, l'obiettivo è superare la dimensione esclusivamente scolastica dell'edificio, trasformandolo in un presidio comunitario capace di accogliere, formare e proteggere. L'architettura diventa così uno strumento educativo. Gli spazi che si generano, dunque, possono ospitare attività rivolte alla comunità, quali laboratori e workshop dedicati ai temi della crisi climatica, dei materiali locali e delle tecniche costruttive tradizionali, con particolare attenzione al bambù (Figura 210). Questa dimensione partecipativa si estende anche agli studenti, che possono apprendere dagli artigiani locali pratiche costruttive e contribuire alla realizzazione di componenti architettoniche. La natura versatile del bambù, infatti, consente la produzione sia di elementi d'arredo sia di strutture più complesse, come la parete permeabile (*coloured wall*) descritta in precedenza.

Essendo la copertura elemento cardine di progetto, la rielaborazione ha indagato più approfonditamente il suo funzionamento dal punto di vista termoigometrico. La copertura ventilata proposta in origine è stata quindi integrata con un sistema di isolamento basato su pannelli in fibra di paglia

compressa inseriti all'interno del telaio di bambù (Figura 208).

Tale soluzione, illustrata nei nodi costruttivi, permette di migliorare le prestazioni passive dell'edificio e di mantenere coerenza con i criteri di progettazione bioclimatica e con l'impiego di materiali naturali a basso impatto.

La configurazione generale rimane quindi prevalentemente invariata nel tempo, mentre è la flessibilità d'uso degli ambienti a garantire l'adattabilità richiesta dal contesto nepalese.

Parallelamente, il progetto è stato ricalibrato in termini di modularità e adattabilità d'uso.

La riorganizzazione interna ha portato alla ricollocazione del blocco servizi, che nella versione originaria interferiva con la leggibilità dei moduli e generava una discontinuità modulare. La nuova configurazione restituisce un impianto planimetrico più razionale e coerente con la logica dell'edificio (Figura 212). L'approfondimento ha inoltre riguardato la flessibilità degli spazi interni, attraverso l'introduzione di sistemi di partizione mobili che permettono differenti configurazioni delle aule. Tra le soluzioni analizzate figurano pannellature leggere in amakan (Figura 208, 213, 214), realizzate mediante intreccio di bambù, coerenti sia con la disponibilità locale del materiale sia con l'idea di produrre *in situ* ciò che serve, riducendo la necessità di elementi prefabbricati esterni.

## PROCESSO COSTRUTTIVO /FASE I

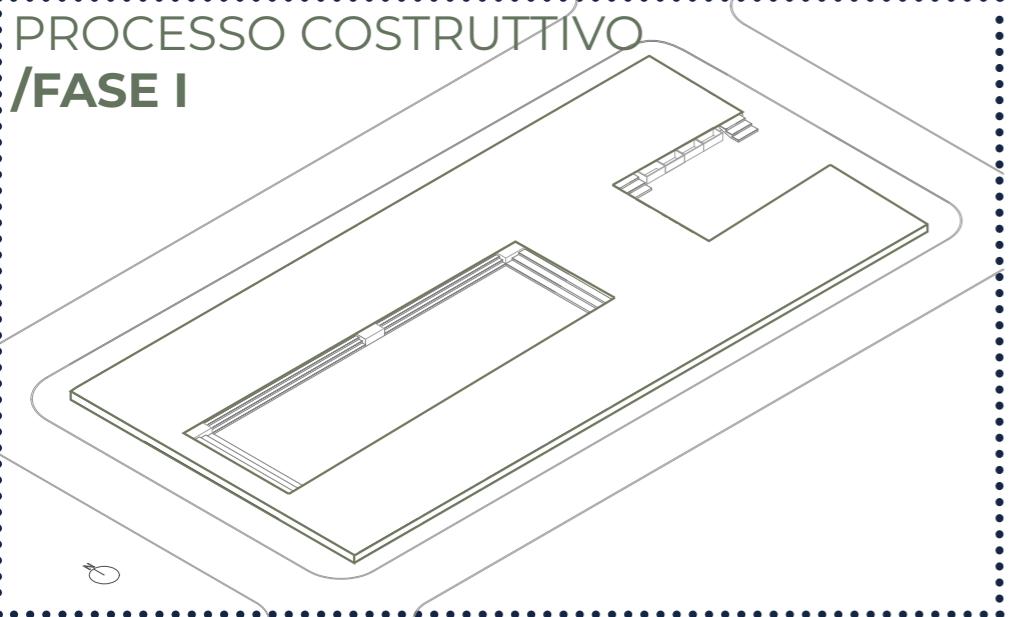


Figura 202.  
"1:basamento rialzato".  
Dell'autore della tesi

### Basamento rialzato

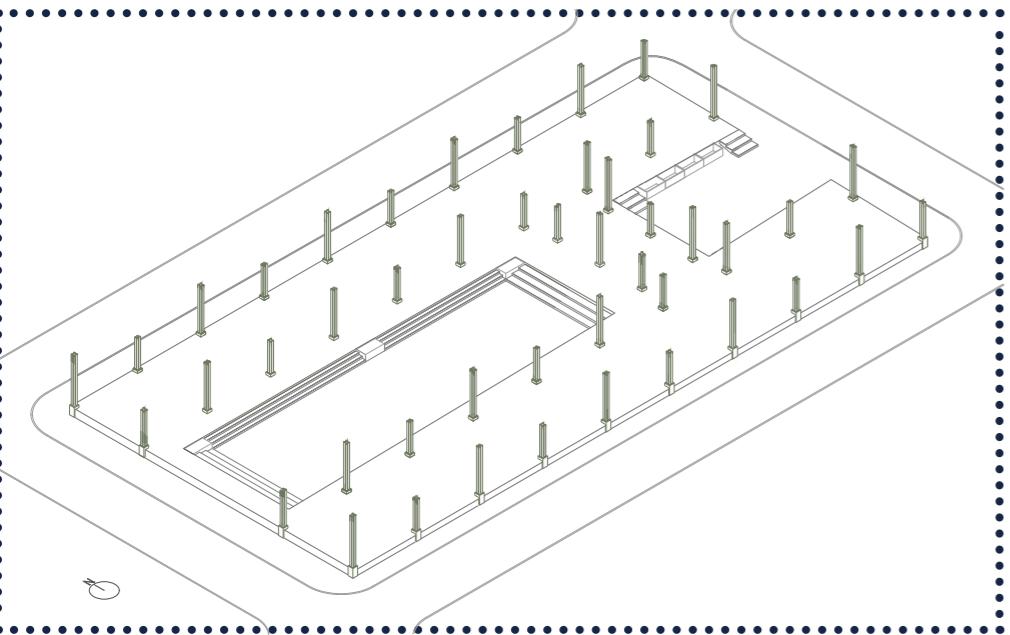


Figura 203.  
"2: Pilastri".  
Dell'autore della tesi

### Pilastri

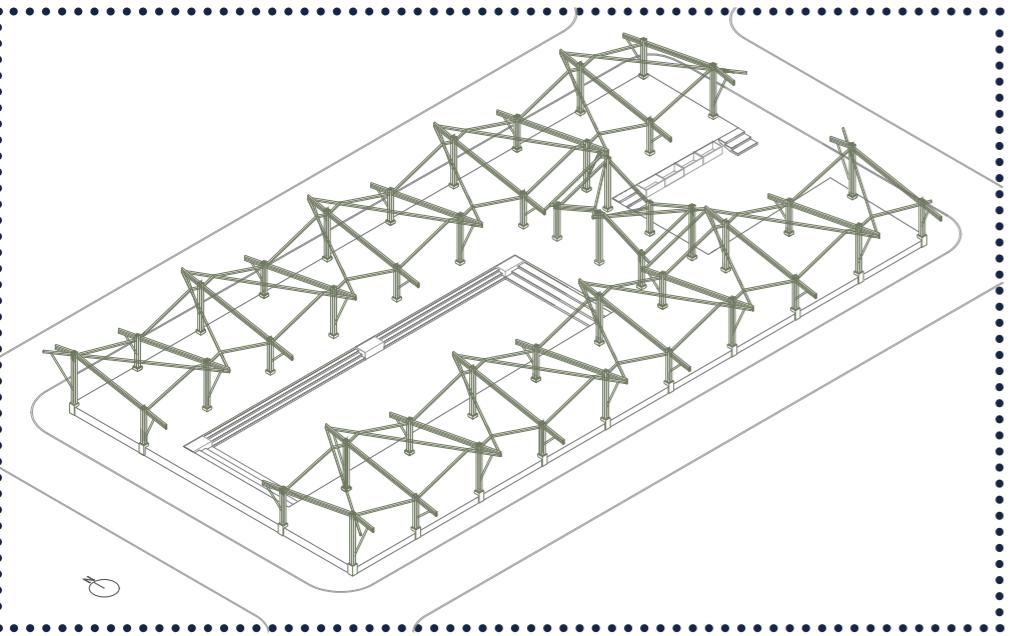


Figura 204.  
"3: Travi, orditura primaria".  
Dell'autore della tesi

### Travi (orditura primaria)

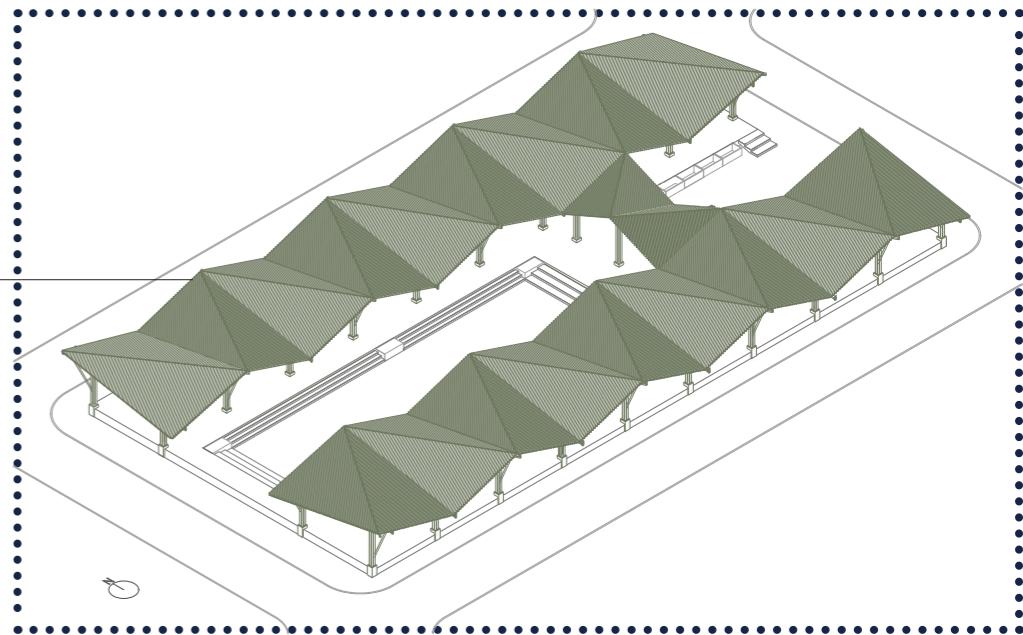
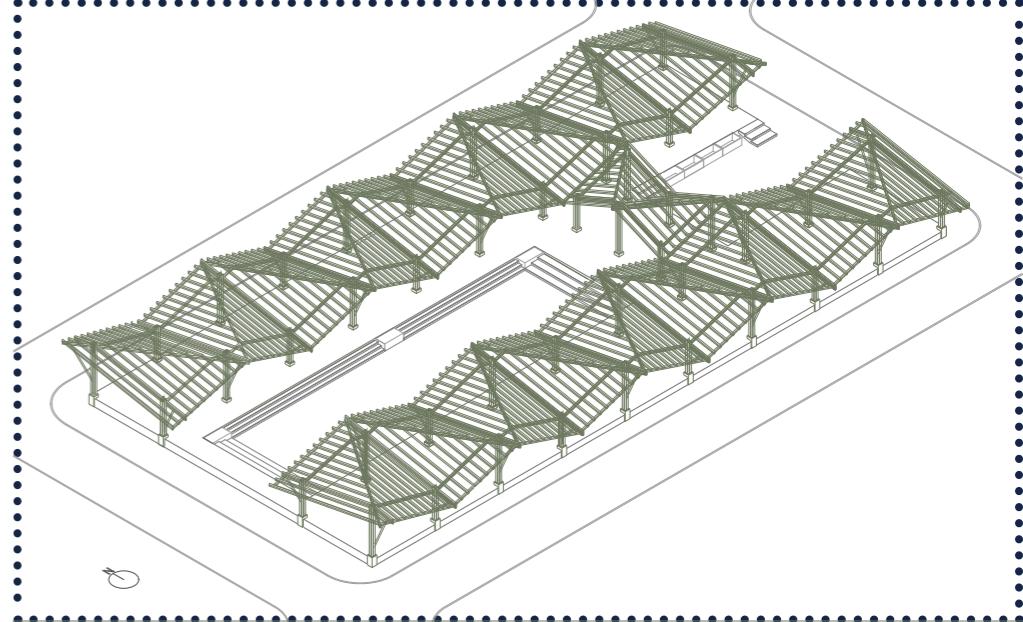
Figura 205.  
"3: Travi, orditura secondaria". Dell'autore della tesi

### Travi (orditura secondaria)

Figura 206.  
"Dettaglio del tetto.  
Dell'autore della tesi

Figura 207.  
"4:Copertura".  
Dell'autore della tesi

### Tetto Halved Bamboo Roof



### Isolamento in copertura

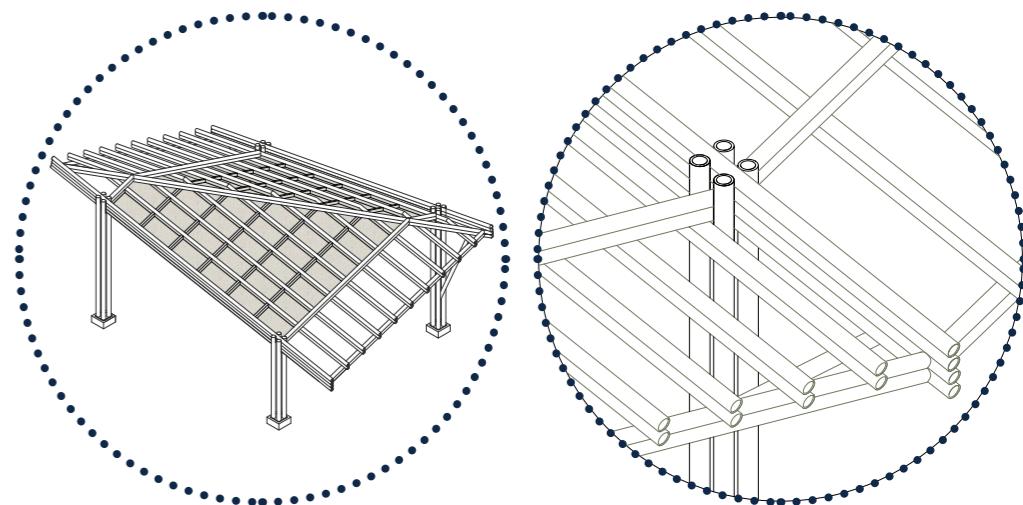


Figura 208."Isolamento in fibre di paglia  
compresso". Dell'autore della tesi

### Dettaglio nodo trave-pilastro

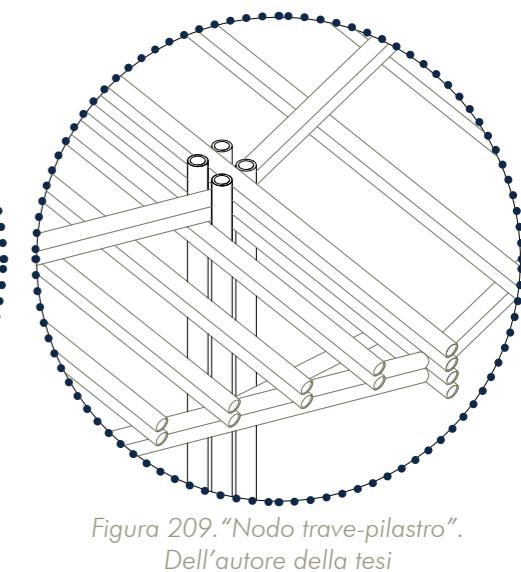
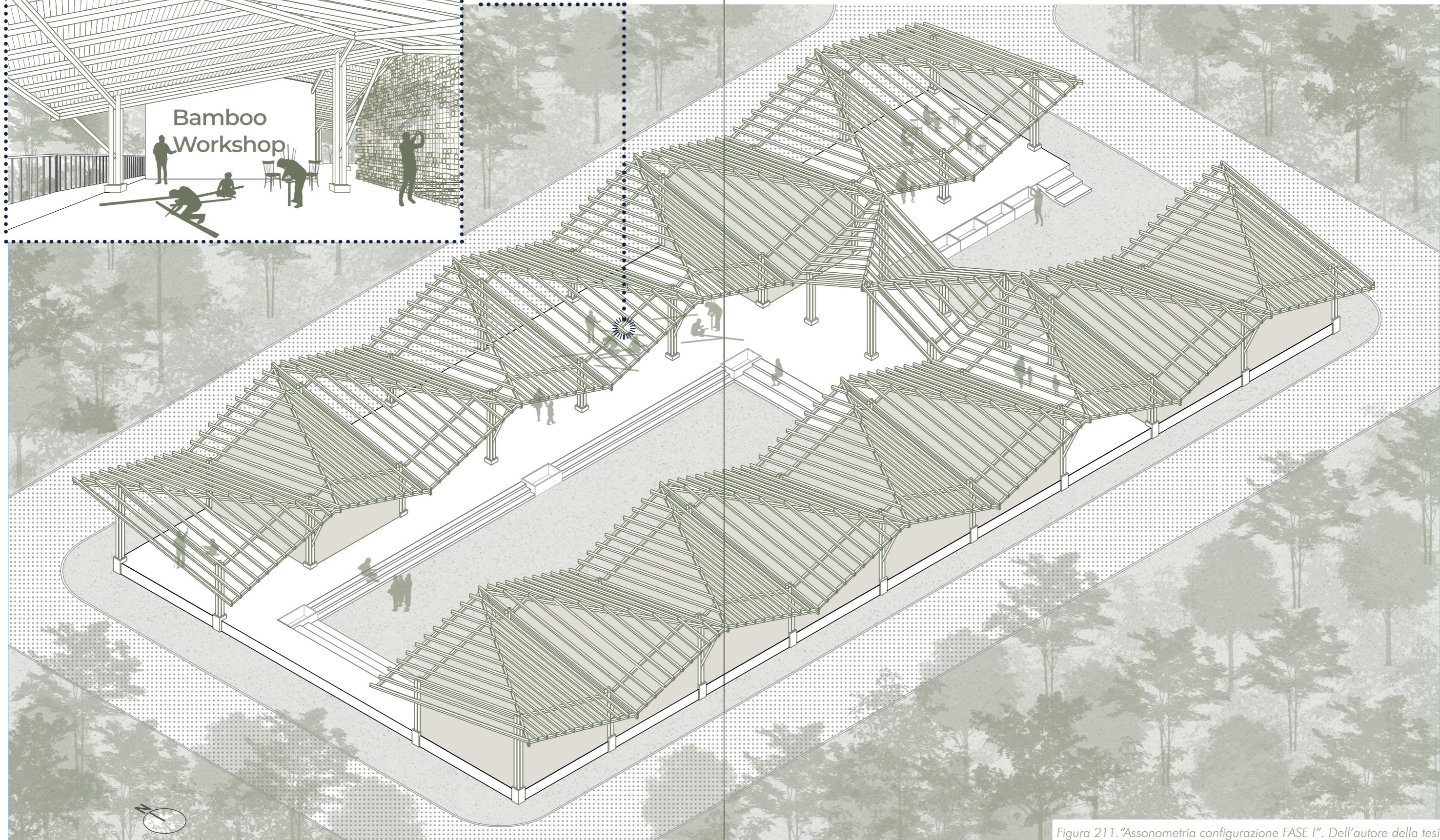


Figura 209."Nodo trave-pilastro".  
Dell'autore della tesi

## CONFIGURAZIONE BAMBOO SCHOOL **/FASE 1**



Figura 210. "Vista workshop in fase I". Dell'autore della tesi



L'area coperta diventa un luogo dedicato all'autostruzione, dove il sapere viene condiviso, in particolare quello legato alle tecniche tradizionali dell'impiego del bambù. In questa fase verranno infatti realizzati tutti gli elementi complementari del progetto (dal coloured wall ai corrimani, fino ai rivestimenti) prodotti in bambù dalla comunità e per la comunità.

Figura 211. "Assonometria configurazione FASE I". Dell'autore della tesi

# CONFIGURAZIONE BAMBOO SCHOOL /PLANIMETRIA 1: 200 RIELABORATA

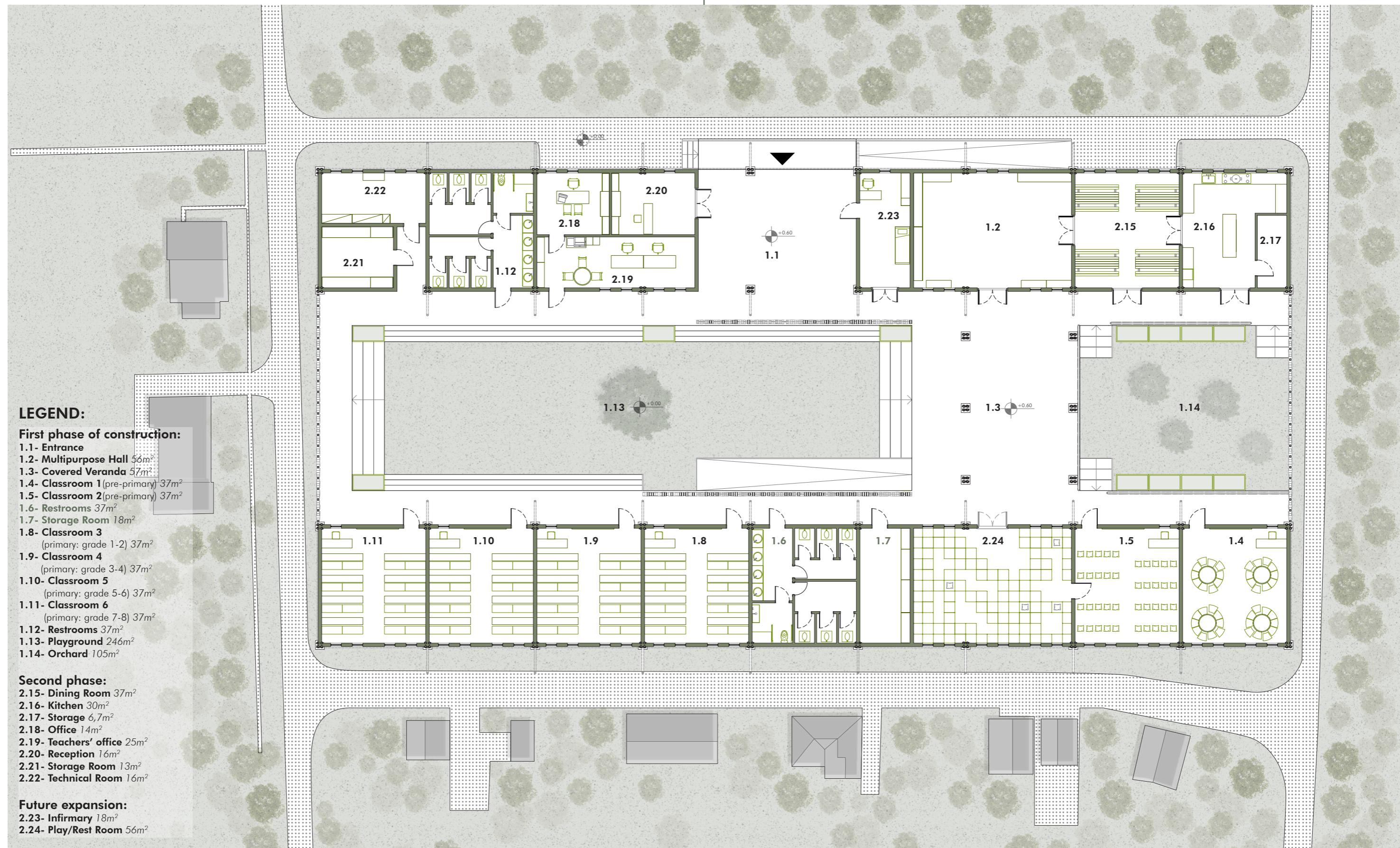


Figura 212. "Pianta Modificata, 1:200". Dell'autore della tesi

## CONFIGURAZIONE BAMBOO SCHOOL /FLESSIBILITÀ INTERNA

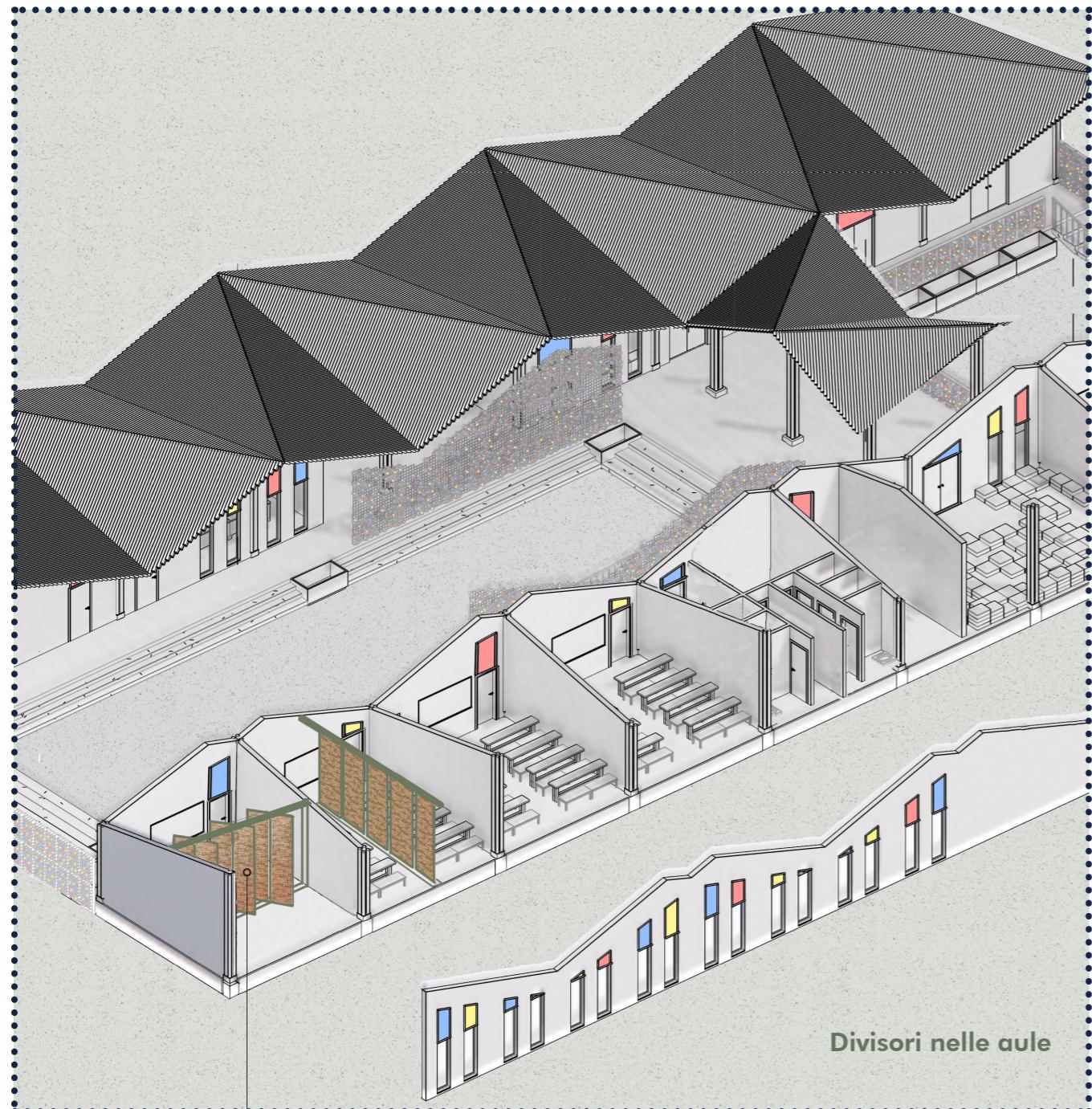
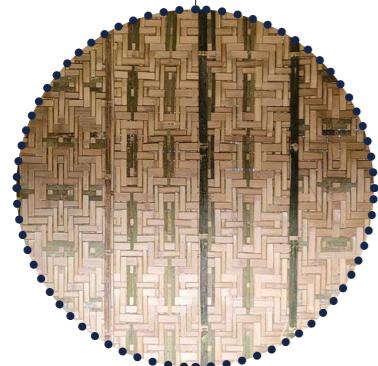


Figura 213. "Esplosivo con dettaglio della partizione interna". Dell'autore della tesi



**Tecnica Amakan**

Figura 214. "Pannello con tecnica Amakan".  
Fonte: Web

## CONFIGURAZIONE BAMBOO SCHOOL /RENDER



Figura 215. "Render rielaborato con inserimento dell'isolamento in copertura".  
Dell'autore della tesi, con contributo di Al

**Playroom**



Figura 216. "Render di uno scenario emergenziale".  
Dell'autore della tesi, con contributo di Al

**Scenario alluvione  
Corte interna**

# /CONCLUSIONI

Come afferma Zaha Hadid, “*The work of an architect today is complex and diverse. It reflects a world that has changed, and it must address the challenges of that change.*” Questa riflessione sintetizza bene il punto di partenza e il punto di arrivo del percorso sviluppato in questa tesi. Nell’attuale epoca dell’Antropocene, in cui gli effetti della crisi climatica sono ormai evidenti e sempre più frequenti, il ruolo dell’architetto assume una responsabilità civile e ambientale di particolare rilevanza. Progettare oggi significa confrontarsi con l’urgenza di ridurre l’impatto del settore delle costruzioni, uno dei principali contributori alle emissioni globali, e allo stesso tempo immaginare spazi capaci di rispondere alle trasformazioni ambientali e sociali in atto.

La tesi si è interrogata sul **potenziale del bambù nell’architettura contemporanea**, con particolare attenzione ai **contesti vulnerabili**, affrontando la domanda di ricerca, ovvero se e in che modo il bambù possa costituire un’alternativa sostenibile nei territori più esposti ai rischi climatici, attraverso una duplice prospettiva: un’analisi teorica del materiale e del contesto nepalese, seguita da una fase applicativa di progetto.

Dalla fase teorica è emerso come il bambù rappresenti una risorsa particolarmente adatta ai paesi in cui è presente in modo endemico, soprattutto quando questi sono caratterizzati da elevata vulnerabilità ambientale (quali rischi idrogeologici, attività sismiche e alluvioni ricorrenti) e da condizioni economiche e infrastrutturali limitate. In tali contesti, la possibilità di fare affidamento sul bambù come materiale locale costituisce un vantaggio significativo: la rapidità di rigenerazione, le buone prestazioni meccaniche, la leggerezza strutturale, la versatilità formale e costruttiva, insieme a un bilancio ambientale nettamente inferiore rispetto ai materiali convenzionali ad alto contenuto di carbonio, rendono il bambù un materiale strategico per affrontare le trasformazioni climatiche in atto attraverso soluzioni accessibili e a basso impatto. Un ulteriore elemento di valore riguarda la dimensione socioeconomica: l’impiego del bambù attiva e rafforza filiere locali che coinvolgono saperi artigianali preesistenti, dalla produzione di manufatti decorativi e di arredo fino alle tecniche costruttive tradizionali, contribuendo alla creazione di nuove opportunità lavorative e alla valorizzazione di competenze radicate nel territorio.

L’analisi ha tuttavia evidenziato come il reale vantaggio ambientale del bambù dipenda in modo determinante dal contesto di impiego. In assenza di una filiera locale strutturata, infatti, i costi energetici e le emissioni legate alle fasi di trasporto e trasformazione rischierebbero di ridurne drasticamente i benefici lungo l’intero ciclo di vita. Parallelamente, sono emersi alcuni limiti

intrinseci del materiale che richiedono un approccio progettuale consapevole: la vulnerabilità al fuoco, il rischio di attacchi da parte di insetti xilofagi e la necessità di adottare trattamenti adeguati per garantirne la durabilità nel tempo.

A livello globale, si registra un crescente interesse verso il bambù, che sta assumendo un ruolo emergente nei dibattiti sulla sostenibilità dei materiali da costruzione. Organizzazioni come INBAR e FAO stanno promuovendo standard tecnici e linee guida internazionali, mentre diversi paesi, tra cui l’Italia, stanno sviluppando nuove filiere produttive e incentivando la coltivazione di bambù proprio per le sue potenzialità ambientali, paesaggistiche e strutturali. Parallelamente, numerosi architetti stanno sperimentando con questo materiale, riconoscendone la capacità di orientare nuovi linguaggi costruttivi e di rispondere alle necessità della crisi climatica in modo ecologicamente e socialmente sostenibile.

La fase applicativa della tesi ha tradotto queste riflessioni in un modello di architettura scolastica specificamente concepito per il contesto nepalese. La scuola è stata interpretata come presidio fondamentale per la costruzione di comunità resilienti: uno spazio educativo capace di accogliere, formare e proteggere, assumendo un ruolo essenziale non solo nella quotidianità degli studenti ma anche nelle dinamiche sociali della comunità (UNICEF Nepal, 2018). In questo senso, lo spazio educativo si configura come “terzo insegnante” (Malaguzzi, 2010), ovvero dispositivo pedagogico che, attraverso la qualità dello spazio, contribuisce alla qualità dell’esperienza educativa e, più in generale, dell’esistenza (Scavuzzo, 2016), in cui l’apprendimento si intreccia con la costruzione di cittadinanza attiva e consapevole (Pant et al., 2023). Tale ruolo assume particolare rilevanza nei contesti caratterizzati da elevata vulnerabilità socioeconomica e ambientale, dove garantire il diritto allo studio significa, al tempo stesso, garantire accessibilità, inclusione e sicurezza. La scuola diventa quindi un’infrastruttura civica polivalente, un luogo in grado di offrire riparo e supporto a tutta la comunità anche nelle situazioni di emergenza. In questo quadro, la qualità dello spazio costruito si afferma come vero e proprio strumento pedagogico: un ambiente che educa attraverso la propria logica costruttiva, la gestione passiva del clima interno, la capacità di adattarsi alle trasformazioni e la coerenza con le risorse locali.

Il progetto **Bamboo School** è stato sviluppato come un modello replicabile di edificio resiliente, in grado di rispondere alle condizioni climatiche del Nepal (uno dei paesi oggi più esposti agli effetti della crisi climatica) e alle esigenze della comunità nelle fasi ordinarie ed emergenziali. Il prototipo proposto integra principi di progettazione bioclimatica, know-how costruttivo vernacolare e l'utilizzo del bambù come materiale principale, la cui versatilità ha reso possibile una progettazione scalabile, *"dal cucchiaio alla città"* (Ernesto Nathan Rogers, 1952, nella *"Carta di Atene"*).

Nel confronto con il progetto vincitore del concorso, è emerso un aspetto critico meritevole di attenzione. Sebbene il bando prevedesse una forte attenzione ai temi della sostenibilità ambientale, sociale e costruttiva, tale dimensione non sembra aver assunto un ruolo centrale nella fase di valutazione finale. La totale libertà concessa in termini di forma, orientamento e rapporto con il contesto climatico e microclimatico ha prodotto soluzioni che non affrontano esplicitamente le condizioni ambientali estreme del territorio nepalese. In un'ottica metodologica, sarebbe opportuno che le proposte illustrate, inclusa quella realizzata in questo lavoro di tesi, integrassero in modo più esplicito analisi relative a forma, orientamento, rapporto con il microclima locale e possibili adattamenti in base a differenti scenari insediativi. Tale commento non intende criticare le scelte progettuali o le decisioni della giuria, ma sottolineare la necessità, sempre più urgente, di un approccio sistematico alla sostenibilità. L'architettura contemporanea non può prescindere dall'integrazione tra clima, forma e tecnologia, e tali aspetti dovrebbero essere considerati elementi imprescindibili tanto nella progettazione quanto nei processi valutativi.

#### **La ricerca apre alcune possibili direzioni future.**

In primo luogo, il modello scolastico proposto potrebbe essere ulteriormente sviluppato attraverso una maggiore standardizzazione dei componenti e delle tecniche costruttive, così da rendere la costruzione più rapida ed eseguibile dalle comunità locali. In secondo luogo, sarebbe utile estendere l'indagine a contesti climatici affini al Nepal, per valutare quanto il modello possa essere adattato e replicato in altre regioni caratterizzate da vulnerabilità sia ambientale che sociale.

Un ulteriore ambito di approfondimento riguarda il potenziale del bambù come coltura da introdurre, in modo controllato, anche in regioni dove oggi non è diffuso. La letteratura di INBAR e FAO evidenzia come questa specie possa contribuire alla rigenerazione dei suoli degradati, alla stabilizzazione dei versanti e al recupero della fertilità grazie alla sua crescita rapida e alla struttura rizomatica.

Tuttavia, l'espansione della sua coltivazione richiede valutazioni accurate: occorre verificare l'adattabilità delle specie ai contesti pedoclimatici locali, il rischio di competizione con ecosistemi autoctoni, gli impatti idrici e la sostenibilità delle filiere di trasformazione. Allo stesso tempo, devono essere

considerati gli effetti socioeconomici, l'introduzione del bambù in nuovi territori può offrire importanti opportunità ambientali, sociali e costruttive, ma deve essere affrontata attraverso un approccio integrato.

In sintesi, questo lavoro vuole mostrare come l'uso del bambù in architettura contemporanea possa essere una possibile soluzione alla crisi del settore edilizio, aiutando a ridurre le emissioni e costruendo edifici capaci di adattarsi ai mutamenti climatici.

Il progetto della *Bamboo School* si propone come un punto di partenza: un invito a ripensare l'architettura come strumento di responsabilità ambientale, di adattamento e di costruzione di **resilienza, oggi più che mai necessaria**.

# /BIBLIOGRAFIA-REFERENCES:

## /INTRODUZIONE

Cabeza, L. F., Q. Bai, P. Bertoldi, J.M. Kihila, A.F.P. Lucena, É. Mata, S. Mirasgedis, A. Novikova, Y. Saheb, (2022): Buildings. In IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.011

CAT (Climate Action Tracker) (2024). *Proiezioni sul riscaldamento globale entro il 2100: emissioni e riscaldamento previsto in base agli impegni presi e alle politiche attuali*. Novembre 2024. Disponibile all'indirizzo: <https://climateactiontracker.org/global/temperatures/>

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>

The Copernicus Climate Change Service (C3S) (2025). *CLIMATE INDICATORS* <https://climate.copernicus.eu/climate-indicators>

The Copernicus Climate Change Service (C3S) (2024). *Greenhouse gases* <https://climate.copernicus.eu/climate-indicators/greenhouse-gases>

UNEP (United Nations Environment Programme) (2024). *2024 Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector*. GlobalABC. <https://globalabc.org/resources/publications/global-status-report-buildings-and-construction-beyond-foundations>

UNEP (United Nations Environment Programme), & Yale Center for Ecosystems + Architecture (2023). *Building Materials and the Climate: Constructing a New Future*. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/43293>

WMO (World Meteorological Organization) (2024). *State of the Global Climate 2023*. <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate>

## /CAPITOLO 1:

IPCC, (2018): Annex I: Glossary [Matthews, J.B.R. (ed.)]. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 541-562, doi:10.1017/9781009157940.008.

Van Aken, M. (2020). *Campati per aria*. Milano: Elèuthera

WMO (World Meteorological Organization) (2025). *State of Global Climate 2024*. <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024>

PBScience (Planetary Boundaries Science). (2025). *Planetary Health Check 2025*, edited by Kitzmann, N.H., Caesar, L., Sakschewski, B. and Rockström, J. with contributions from Sakschewski, B.\*, Caesar, L.\*., Andersen, L. S., Bechthold, M., Bergfeld, Beusen, A., L., Billing, M., Bodirsky, B. L., Botsyun, S., Dennis, D. P., Donges, J. F., Dou, X., Eriksson, A., Fetzer, I., Gerten, D., Häyhä, T., Hebdon, S., Heckmann, T., Heilemann, A., Huiskamp, W., Jahnke, A., Kaiser, Kitzmann, N.H., J., Krönke, J., Kühnel, D., Laureanti, N. C., Li, C., Liu, Z., Loriani, S., Ludescher, J., Matthesius, S., Norström, A., Otto, F., Paolucci, A., Pokhotelov, D., Rafiezadeh Shahi, K., Raju, E., Rostami, M., Schaphoff, S., Schmidt, C., Steinert, N. J., Stenzel, F., Virkki, V., Wendt-Potthoff, K., Wunderling, N., Rockström, J. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Potsdam, Germany. <https://planetaryhealthcheck.org>

PBScience (Planetary Boundaries Science), (2025). *Planetary Health Check 2025*. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Potsdam, Germany.

Stockholm Resilience Centre (2025), *Planetary boundaries*, ultimo accesso 18 ottobre 2025, <https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html>

WMO (World Meteorological Organization) (2025) *Global Annual to Decadal Climate Update (2025-2029)*. <https://wmo.int/files/wmo-global-annual-decadal-climate-update-2025-2029>

Cappi V. (2023). *Immaginare l'altrove nell'epoca dell'Antropocene. Media, confini e cambiamenti climatici*. Milano: FrancoAngeli.

WMO (World Meteorological Organization). (2025). *Extreme weather*. Geneva: WMO. <https://wmo.int/topics/extreme-weather>

EEA (European Environment Agency). (2025). *Extreme weather: floods, droughts and heatwaves* <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/extreme-weather-floods-droughts-and-heatwaves?activeAccordion=&activeTab=07e50b68-8bf2-4641-ba6b-ed1af544be>

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds. Pörtner, H.-O., et al.). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>

Germanwatch (2025). *Climate Risk Index 2025* <https://www.germanwatch.org/en/cri>

Carbon Brief (2024). *Mapped: How climate change affects extreme weather around the world* <https://interactive.carbonbrief.org/attribution-studies/index.html#the-studies>

Met Office (2025). *Global impacts of climate change - projections*. [https://www.metoffice.gov.uk/research/climate/climate-impacts/global-impacts-of-climate-change---projections#Food\\_insecurity](https://www.metoffice.gov.uk/research/climate/climate-impacts/global-impacts-of-climate-change---projections#Food_insecurity)

CCPI (Climate Change Performance Index). (2023). *CCPI 2025: Results*. Germanwatch, NewClimate

Institute & Climate Action Network. <https://ccpi.org>

Otto, FEL, Philip, S., Kew, S. et al. (2018). *Attribuzione di eventi estremi ad alto impatto su scale temporali diverse: uno studio di caso di quattro diverse tipologie di eventi*. Cambiamenti climatici 149, pp. 399–412 <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2258-3>

Baiani, Serena, and Antonella Valitutti. (2013). “*Resilienza Del Territorio e Del Costruito. Strategie e Strumenti Operativi per La Prevenzione, La Mitigazione e l'adattamento Di Contesti Fragili e Sensibili/ Land and Built Environment Resilience. Strategies and Operational Tools for Prevention, Mitigation and Adaptation of Fragile and Sensitive Contexts.*” Techne (Florence, Italy : 2011) 5.5 (2013): 95–100. Print.

Wang F., Harindintwali J.-D., Wei K., et al., (2023). *Climate change: Strategies for mitigation and adaptation*. The Innovation Geoscience 1(1), 100015. <https://doi.org/10.59717/j.xinn-geo.2023.100015>

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>

IEA (International Energy Agency). (2023). *Renewables 2023*. Paris: IEA.

EEA (European Environment Agency). (2025). *Climate change mitigation: reducing emissions*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Anderegg, W.R.L., Trugman, A.T., Badgley, G., et al. (2020). *Climate-driven risks to the climate mitigation potential of forests*. Science 368: eaaz7005. DOI: 10.1126/science.aaz7005.

Fleischman, F., Basant, S., Chhatre, A., et al. (2020). *Pitfalls of tree planting show why we need people-centered natural climate solutions*. Bioscience 70: 947–950.

Strassburg, B.B.N., Iribarrem, A., Beyer, H.L., et al. (2020). *Global priority areas for ecosystem restoration*. Nature 586: 724–729. DOI: 10.1038/s41586-020-2784-9.

Gibb, D., Ledanois, N., Ranalder, L., et al. (2022). *Renewables 2022 global status report+ Renewable energy data in perspective+ Press releases+ Regional fact sheets+ Country fact sheets*.

Wang F., Harindintwali J.-D., Wei K., et al., (2023). *Climate change: Strategies for mitigation and adaptation*. The Innovation Geoscience 1(1), 100015. <https://doi.org/10.59717/j.xinn-geo.2023.100015> (consultato il 21/10/2025)

C40 Cities & McKinsey Sustainability. (2021). *Focused Adaptation: A strategic approach to climate adaptation in cities*. C40 Knowledge Hub. [https://www.c40knowledgehub.org/s/article/Focused-Adaptation-A-strategic-approach-to-climate-adaptation-in-cities?language=en\\_US](https://www.c40knowledgehub.org/s/article/Focused-Adaptation-A-strategic-approach-to-climate-adaptation-in-cities?language=en_US) (consultato il 21/10/2025)

CAT (Climate Action Tracker). (2023). *Nepal country assessment*. <https://climateactiontracker.org/> National Technical Board (NTB), (2025). Provinces. <https://ntb.gov.np/en/provinces> (consultato il 23 ottobre 2025).

World Health Organization (WHO), United Nations Development Programme (UNDP), & Climate and Clean Air Coalition (CCAC). (2021). *Climate change impacts on health and livelihoods: Nepal assessment*. Geneva: World Health Organization <https://www.climatecentre.org/publications/5919/climate-change-impacts-on-health-and-livelihoods-nepal-assessment/> (consultato il 24/10/2025)

Khagendra Prasad Joshi, Susma Giri, Dipesh Kuinkel, Sajesh Kuikel, Rohini Devkota, Dhiraj Pradhananga, Suresh Marahatta, Binod Pokharel, (2025). *Forest fire dynamics in Nepal: Regional trends and socio-ecological drivers*, Trees, Forests and People, Volume 21, 100942, ISSN 2666-7193, <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2025.100942> (consultato il 25/10/2025)

Saugat Sapkota et al. (2025) Environ. Res. Commun. 7 055003 <https://doi.org/10.1088/2515-7620/add2db> (consultato il 25/10/2025)

Jones, M. W., Kelley, D. I., Burton, C. A., Di Giuseppe, F., Barbosa, M. L. F., Brambleby, E., Hartley, A. J., Lombardi, A., Mataveli, G., McNorton, J. R., Spuler, F. R., Wessel, J. B., Abatzoglou, J. T., Anderson, L. O., Andela, N., Archibald, S., Armenteras, D., Burke, E., Carmenta, R., Chuvieco, E., Clarke, H., Doerr, S. H., Fernandes, P. M., Giglio, L., Hamilton, D. S., Hantson, S., Harris, S., Jain, P., Kolden, C. A., Kurvits, T., Lampe, S., Meier, S., New, S., Parrington, M., Perron, M. M. G., Qu, Y., Ribeiro, N. S., Saharjo, B. H., San-Miguel-Ayanz, J., Shuman, J. K., Tanpipat, V., van der Werf, G. R., Veraverbeke, S., and Xanthopoulos, G. (2024). *State of Wildfires 2023–2024*, Earth Syst. Sci. Data, 16, 3601–3685, <https://doi.org/10.5194/essd-16-3601-2024> (consultato il 25/10/2025)

Climate Centre. (2021). *Seasonal Climate Patterns of Nepal*. Kathmandu: Department of Hydrology and Meteorology.

Department of Hydrology and Meteorology (DHM). (2024). *Annual Climate Bulletin of Nepal 2024*. Government of Nepal, Ministry of Energy, Water Resources and Irrigation.

Japan International Cooperation Agency (JICA). (2019). *Data Collection Survey on Ecosystem-based Disaster Risk Reduction in Nepal*. Tokyo: JICA.

Ministry of Forests and Environment (MoFE). (2019). *Nepal's Fourth National Report to the Convention on Biological Diversity*. Government of Nepal.

Nepal Tourism Board. (2023). *Climate and Weather Information for Travellers*. Kathmandu: Nepal Tourism Board.

United States Agency for International Development (USAID). (2017). *Climate Change Risk Profile: Nepal*. Washington, D.C.: USAID.

World Bank Group. (2023). *Nepal Country Climate and Development Report*. Washington, D.C.: World Bank

M. Luo , W. Xie , D. Li , TL Wan (2024). *La crescente minaccia degli incendi boschivi: un'analisi della frequenza degli incendi boschivi a livello globale negli ultimi due decenni*. Int Per. Rev. , 26 , pp. 224 - 233 , 10.1505/146554824838819860 (consultato il 25/10/2025)

LMG Ortiz, JAÁ. Lozano, LMG Ortiz, JAÁ. Lozano (2024). *Il cambiamento climatico regionale come fattore scatenante degli incendi boschivi*. IntechOpen, 10.5772/intechopen.110474 (consultato il 25/10/2025)

Chaudhary, R. P., Upadhyay, Y., Acharya, H. R., & Rimal, S. K. (2023). *Deforestation in Nepal: status, causes, consequences, and responses*. In *Biological and Environmental Hazards, Risks, and Disasters* (pp. 277-318). Elsevier.

Matin, M. A., Chitale, V. S., Murthy, M. S., Uddin, K., Bajracharya, B., & Pradhan, S. (2017). *Understanding forest fire patterns and risk in Nepal using remote sensing, geographic information system and historical fire data*. International journal of wildland fire, 26(4), 276-286.

Bhujel, K. B., Sapkota, R. P., & Khadka, U. R. (2022). *Temporal and spatial distribution of forest fires and their environmental and socio-economic implications in Nepal*. Journal of Forest and Livelihood, 21(1), 1-13.

Hamal, K., Ghimire, S. K., Khadka, A., Dawadi, B., & Sharma, S. (2022). *Interannual variability of spring fire in southern Nepal*. Atmospheric Science Letters, 23(9), e1096.

Kuikel, S., Pokharel, B., & Bhattarai, N. (2024). *The effect of wildfires on air quality in Kathmandu, Nepal*. Environmental Advances, 15, 100493.

Mishra, B., Panthi, S., Poudel, S., & Ghimire, B. R. (2023). *Forest fire pattern and vulnerability mapping using deep learning in Nepal*. Fire Ecology, 19(1), 3.

Pandey, H. P., Pokhrel, N. P., Thapa, P., Paudel, N. S., & Maraseni, T. N. (2022). *Status and practical implications of forest fire management in Nepal*. Journal of Forest and Livelihood, 21(1), 32-45.

Kunwar, R. M., & Khaling, S. (2006). *Forest fire in the Terai, Nepal: causes and community management interventions*. International Forest Fire News, 34(2006), 46-54.

Pokharel, B., Sharma, S., Stuivenvolt-Allen, J., Wang, S. Y. S., LaPlante, M., Gillies, R. R., & Aryal, D. (2023). *Amplified drought trends in Nepal increase the potential for Himalayan wildfires*. Climatic Change, 176(2), 17.

Parajuli, A., Manzoor, S. A., & Lukac, M. (2023). *Areas of the Terai Arc landscape in Nepal at risk of forest fire identified by fuzzy analytic hierarchy process*. Environmental Development, 45, 100810.

Ahn, S., Won, J., Lee, J., & Choi, C. (2024). *Comprehensive building fire risk prediction using machine learning and stacking ensemble methods*. Fire, 7(10), 336.

Janizadeh, S., Bateni, S. M., Jun, C., Im, J., Pai, H. T., Band, S. S., & Mosavi, A. (2023). *Combination four different ensemble algorithms with the generalized linear model (GLM) for predicting forest fire susceptibility*. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 14(1), 2206512.

Dhungana, N., Lee, C. H., Khadka, C., Adhikari, S., Pudasaini, N., & Ghimire, P. (2024). *Evaluating*

*community forest user groups (CFUGs)' performance in managing community forests: A case study in Central Nepal*. Sustainability, 16(11), 4471.

Kincey, M. E., Rosser, N. J., Swirad, Z. M., Robinson, T. R., Shrestha, R., Pujara, D. S., et al. (2024). *National-scale rainfall-triggered landslides susceptibility and exposure in Nepal*. Earth's Future, 12, e2023EF004102 <https://doi.org/10.1029/2023EF004102> (consultato il 25/10/2025)

Dilley, M. (2005). *Natural disaster hotspots: a global risk analysis* (Vol. 5). World Bank Publications. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/7376> (consultato il 25/10/2025)

Petley, D. N., Hearn, G. J., Hart, A., Rosser, N. J., Dunning, S. A., Owen, K. e Mitchell, W. A. (2007). *Tendenze nella frequenza delle frane in Nepal*. Pericoli naturali, 43 (1), 23-44 . <https://doi.org/10.1007/s11069-006-9100-3> (consultato il 25/10/2025)

Froude, M. J. e Petley, D. N. (2018). *Eventi globali di frane mortali dal 2004 al 2016*. Pericoli naturali e scienze del sistema terrestre, 18 (8), 2161-2181. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018> (consultato il 25/10/2025)

Ministry of Home Affairs. (2024). *Nepal Disaster Report, 2024: focus on reconstruction and resilience*, Ministry of Home Affairs, Government of Nepal, Kathmandu, Nepal.

Kabin Lamichhane, Saroj Karki, Keshab Sharma, Bharat Khadka, Bipav Acharya, Kamal Biswakarma, Sumit Adhikari, Rajan Kc, Anusha Danegulu, Samana Bhattarai, Abhilasha Regmi, Mandip Subedi, Pawan Kumar Bhattarai (2025). *Unraveling the causes and impacts of increasing flood disasters in the kathmandu valley: Lessons from the unprecedented September 2024 floods*, *Natural Hazards Research*, ISSN 2666-5921, <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2025.04.001> (consultato il 26/10/2025)

Tingsanchali, T. (2012). *Urban flood disaster management*. Procedia engineering, 32, 25-37. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705812012647> (consultato il 26/10/2025)

DHM, (2024). Department of Hydrology and Meteorology, Nepal. *Situational report on extreme precipitation and flooding event of 27-29*. [https://www.dhm.gov.np/uploads/dhm/downloads/Situational\\_Report\\_on\\_Extreme\\_Precipitation\\_and\\_Flooding\\_Event\\_of\\_27-29\\_September\\_2024.pdf](https://www.dhm.gov.np/uploads/dhm/downloads/Situational_Report_on_Extreme_Precipitation_and_Flooding_Event_of_27-29_September_2024.pdf) (consultato il 26/10/2025)

(NDDRMA) Government of Nepal, ministry of home affairs, national disaster risk reduction and management authority (2024) *September floods and landslides: Situation report #4* [https://bipad.gov.np/uploads/publication\\_pdf](https://bipad.gov.np/uploads/publication_pdf) (consultato il 26/10/2025)

World Bank Group. (2021). *Climate risk country profile: Nepal*. World Bank. [https://climateknowledgeportal.worldbank.org/sites/default/files/country-profiles/15720-WB\\_Nepal%20Country%20Profile-WEB.pdf](https://climateknowledgeportal.worldbank.org/sites/default/files/country-profiles/15720-WB_Nepal%20Country%20Profile-WEB.pdf) (consultato il 26/10/2025)

Paltan, H., Allen, M., Haustein, K., Fuldauer, L., & Dadson, S. (2018). *Global implications of 1.5°C and 2°C warmer worlds on extreme river flows*. *Global implications of 1.5°C and 2°C warmer worlds on extreme river flows*. Environmental Research Letters, 13. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aad985/meta> (consultato il 26/10/2025)

Willner, S., Levermann, A., Zhao, F., Frieler, K. (2018). *Adaptation required to preserve future high-end river flood risk at present levels*. *Science Advances*: 4:1. URL: <https://advances.sciencemag.org/content/4/1/eaao1914> (consultato il 26/10/2025)

Government of Nepal, National Disaster Risk Reduction and Management Authority. (2024). *Risk profile of Nepal* <http://www.drrportal.gov.np/risk-profile-of-nepal> (consultato il 26/10/2025)

IFRC (International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies), (2025, 8 luglio). *DREF operation: Nepal drought 2025 (MDRNP019)*. ReliefWeb <https://reliefweb.int/report/nepal/dref-operation-nepal-drought-2025-mdrnp019> (consultato il 26/10/2025)

Shrestha, S., Shrestha, S., & Rajbhandari, V. (2025). *Drought in the grain basket: A silent agricultural crisis in Nepal's Madhesh Province*. International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD). <https://blog.icimod.org/cryosphere-water-risks/drought-in-the-grain-basket-a-silent-agricultural-crisis-in-nepals-madhesh-province/> (consultato il 26/10/2025)

Zimmermann, M., Bichsel, M., & Kienholz, H. (1986). *Mountain hazards mapping in the Khumbu Himal, Nepal*. *Mountain Research and Development*, 29-40.

Deline, P., Hewitt, K., Reznichenko, N., & Shugar, D. (2015). *Rock avalanches onto glaciers*. In: *Landslide hazards, risks and disasters* (263-319). Academic Press.

Eckstein, D., Hutfils, M. L. & Winges, M. (2019). *Global Climate Risk Index 2019*; Berlin: Germanwatch

Khadka, N., Zhang, G., & Thakuri, S. (2018). *Glacial Lakes in the Nepal Himalaya: Inventory and Decadal Dynamics (1977–2017)*. *Remote Sensing*, 10, 1913, doi:10.3390/rs10121913.

Salerno, F., Thakuri, S., Guyennon, N., Viviano, G., & Tartari, G. (2016). *Glacier melting and precipitation trends detected by surface area changes in Himalayan ponds*. *The Cryosphere*, 10(4), 1433-1448.

Lamichhane, K., Bhattarai, S., Rajan, K.C. et al. (2025). *State-of-the-art review of probabilistic seismic hazard analysis in Nepal: status, challenges, and recommendations*. *Geoenviroen Disasters* 12, 15. <https://doi.org/10.1186/s40677-025-00320-0> (consultato il 27/10/2025)

UNICEF. (2023). *Climate, Environment and Disaster Risk Reduction Strategy (2023–2030)*. Kathmandu: UNICEF Nepal.

World Bank Group. (2022). *Nepal Country Climate and Development Report*. Washington, D.C.: World Bank.

European Commission. (2023). *INFORM Risk Index 2023: Results and Data*. Brussels: Joint Research Centre.

Anautho Satya. (n.d.). *All Powerful Earthquake History in Nepal*. <https://anauthosatya.com/nature/all-powerful-earthquake-history-in-nepal/> (consultato il 27/10/2025)

Earthquake List. (2025). *M7.1 Earthquake-China/Nepal Border Region*. <https://earthquakelist.org/news/2025/01/07/m7-1-earthquake-china-1051170/> (consultato il 27/10/2025)

Volcano Discovery. (2025). *M7.0 Earthquake in Nepal*. Largest Earthquakes in or Near Nepal on Record Since 1900 | VolcanoDiscovery (consultato il 27/10/2025)

Ghimire, S., Parajuli, R. R., & Maskey, P. N. (2024). *Simulation of the 1934 Nepal-Bihar Earthquake in Kathmandu*. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/378073577\\_Simulation\\_of\\_the\\_1934\\_Nepal-Bihar\\_earthquake\\_in\\_Kathmandu](https://www.researchgate.net/publication/378073577_Simulation_of_the_1934_Nepal-Bihar_earthquake_in_Kathmandu) (consultato il 27/10/2025)

Nepalog. Nepal Structural Diary (n.d.). *Geography of Nepal*. <https://nepalog.com/geography-of-nepal/> (consultato il 27/10/2025)

Government of Nepal. (2020, 2023). *Nationally Determined Contributions (NDCs) -Updates*. Ministry of Forests and Environment, Kathmandu.

United Nations Development Programme (UNDP). (2021). *Nepal Climate Change and Disaster Risk Assessment*. Kathmandu: UNDP

World Population Review. (2021). *Nepal Population 2021*. <https://worldpopulationreview.com/> (consultato il 15/09/2025)

Nepal Disaster Risk Reduction Portal. (s.d.). *Nepal Disaster Risk Reduction Portal*. <https://drrportal.gov.np/> (consultato il 15/09/2025)

## /CAPITOLO 2:

GlobalABC (Global Alliance for Buildings and Construction). (2022). *2022 Global Status Report for Buildings and Construction*. UNEP. <https://globalabc.org> (consultato il 22/09/2025)

UNEP (United Nations Environment Programme). (2024). *Global Status Report for Buildings and Construction 2024*. UNEP. <https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-buildings-and-construction> (consultato il 22/09/2025)

Zhang, Y., Sattar, M. U., Cook, J., Johnson, J. R., & Fung, J. F. (2024). *Systematic Review of Embodied Carbon Assessment and Reduction in Building Life Cycles*. National Institute of Standards and Technology (NIST). <https://www.nist.gov/publications/systematic-review-embodied-carbon-assessment-and-reduction-building-life-cycles> (consultato il 22/09/2025)

UNEP & GlobalABC, (United Nations Environment Programme, & Global Alliance for Buildings and Construction). (2024). *Global Status Report for Buildings and Construction 2023: Beyond foundations -Integrating sustainable solutions to reduce the sector's emissions*. UNEP. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/42994> (consultato il 22/09/2025)

UNEP & GlobalABC, (United Nations Environment Programme, & Global Alliance for Buildings and Construction) (2025). *Not just another brick in the wall: The solutions exist - Scaling them will build on progress and cut emissions fast*. Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/47214> (consultato il 22/09/2025)

United Nations Environment Programme (UNEP), & Yale Center for Ecosystems + Architecture.

(2023). *Building materials and the climate: Constructing a new future*. UNEP. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/43293> (consultato il 22/09/2025)

Government of Nepal. (2020, 2023). *Nationally Determined Contributions (NDCs) – Updates*. Ministry of Forests and Environment, Kathmandu.

United Nations Development Programme (UNDP). (2021). *Nepal Climate Change and Disaster Risk Assessment*. Kathmandu: UNDP

World Population Review. (2021). *Nepal Population 2021*. <https://worldpopulationreview.com/> (consultato il 22/09/2025)

Nepal Disaster Risk Reduction Portal. (s.d.). *Nepal Disaster Risk Reduction Portal*. <https://drportal.gov.np/> (consultato il 22/09/2025)

Enerdata. (2020). *Global Energy and CO2 Data*. Grenoble, France. <https://www.enerdata.net/research/energy-market-data-co2-emissionsdatabase.html> (consultato il 28/10/2025)

UNDP (United Nations Development Programme). (2024). *LDC Graduation: Smooth Transition Strategy*. UNDP Nepal. <https://www.undp.org/nepal/publications/ldc-graduation-smooth-transition-strategy> (consultato il 28/10/2025)

World Bank. (2025). *Nepal overview*. <https://www.worldbank.org/en/country/nepal/overview#1> (consultato il 28/10/2025)

Climate Watch. (2025). *GHG Emissions and Emissions Targets in Nepal*. [https://www.climatewatchdata.org/countries/NPL?end\\_year=2022&source=Climate%20Watch&start\\_year=1990](https://www.climatewatchdata.org/countries/NPL?end_year=2022&source=Climate%20Watch&start_year=1990) (consultato il 28/10/2025)

Climate Action Tracker. (n.d.). *Nepal: Country profile*. <https://climateactiontracker.org/countries/nepal/> (consultato il 28/10/2025)

Torgal, Fernando Pacheco, Volodymyr Ivanov, and Daniel C. W. Tsang, eds. (2020). *Bio-Based Materials and Biotechnologies for Eco-Efficient Construction*. Duxford, United Kingdom ; Woodhead Publishing is an imprint of Elsevier. Web. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-04217-6> (consultato il 29/10/2025)

Thomas, Sabu, and Maya Jacob John, eds. (2022). *Bio-Based Materials : Contribution to Advancing Circular Economy*. Place of publication not identified: MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Print. <https://doi.org/10.3390/polym14183887> (consultato il 29/10/2025)

Ghrab, A., Feiz, A.A. (2025). *Innovative Architecture: Sustainable Design and the Role of Bio-Based Materials*. In: Amziane, S., Toledo Filho, R.D., da Gloria, M.Y.R., Page, J. (eds) *Bio-Based Building Materials - Proceedings of ICBBM 2025*. ICBBM 2025. RILEM Bookseries, vol 60. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-92777-5\\_56](https://doi.org/10.1007/978-3-031-92777-5_56) (consultato il 29/10/2025)

Carcassi, O. B., Paoletti, I., & 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, 63–70. <https://doi.org/10.36253/techne-10578> (consultato il 29/10/2025)

European Committee for Standardization (2014), EN 16575: *Bio-based products- Vocabulary*.

European Committee for Standardization (2015), EN 16760: *Bio-Based Products-Life Cycle Assessment*.

Thiébat, F., Morselli, F. (2024). *Biogenic materials for the decarbonization of the built environment*. Techne. Journal of Technology for Architecture and Environment, Just Accepted.

Ruta, M. F., Pittau, F., & Masera, G. (2024). *Towards zero-carbon buildings: Challenges and opportunities from reversing the material pyramid*. Sustainability, 16(11), 4454. <https://doi.org/10.3390/su16114454> (consultato il 29/10/2025)

Green Building Council Italia. (2023). *Strumenti per la decarbonizzazione: contabilizzazione dell'Embodied Carbon nel ciclo di vita di un manufatto edilizio*. A cura di R. Giordano & J. Andreotti. ISBN 978-88-6627-378-3.

Legambiente. (2023). *La bioeconomia delle Foreste*. VI Forum nazionale. [https://www.legambiente.it/wp-content/uploads/2021/11/La-bioeconomia-delle-Foreste\\_2023.pdf](https://www.legambiente.it/wp-content/uploads/2021/11/La-bioeconomia-delle-Foreste_2023.pdf) (consultato il 29/10/2025)

Göswein, V., Arehart, J., Phan-huy, C., Pomponi, F., & Habert, G. (2022). *Barriers and opportunities of fast-growing biobased material use in buildings*. Buildings and Cities, 3(1), 745–755. <https://doi.org/10.5334/bc.254> (consultato il 29/10/2025)

Göswein, V., Reichmann, J., Habert, G., & Pittau, F. (2021). *Land availability in Europe for a radical shift toward bio-based construction*. Sustainable Cities and Society, 70, 102929. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102929> (consultato il 29/10/2025)

Zea Escamilla, E., Habert, G., Correal Daza, JF, Archilla, HF, Echeverry Fernández, JS, e Trujillo, D. (2018). *Costruzione industriale o tradizionale in bambù? Valutazione comparativa del ciclo di vita (LCA) degli edifici in bambù*. Sostenibilità, 10 (9), 3096. <https://doi.org/10.3390/su10093096> (consultato il 29/10/2025)

Pomponi, F., Hart, J., Arehart, J. H., & D'Amico, B. (2020). *Buildings as a global carbon sink? A Pag. 8 di 19 reality check on feasibility limits*. One Earth, 3(2), 157–161. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.07.018> (consultato il 29/10/2025)

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

Pittau, F., Krause, F., Lumia, G., & Habert, G. (2018). *Fast-growing bio-based materials as an opportunity for storing carbon in exterior walls*. Building and Environment, 129, 117–129

Wagermaier, W., Razghandi, K., & Fratzl, P. (2025). *A bio-inspired perspective on materials sustainability*. Advanced Materials, 37(22), e2413096. <https://doi.org/10.1002/adma.202413096> (consultato il 29/10/2025)

Weiss, M., Haufe, J., Carus, M., Brandão, M., Bringezu, S., Hermann, B., & Patel, M. K. (2012). *A review of the environmental impacts of biobased materials*. Journal of Industrial Ecology, 16, S169-S181. <https://doi.org/10.1162/jie.2012.0901>

doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00468.x (consultato il 29/10/2025)

Bourbia, S., Kazeoui, H. e Belarbi, R. (2023). *Una revisione della ricerca recente sui materiali da costruzione di origine biologica e le loro applicazioni*. Mater Renew Sustain Energy 12, 117-139 <https://doi.org/10.1007/s40243-023-00234-7> (consultato il 29/10/2025)

Sustainability Directory. (2023). *What are the potential benefits and drawbacks of using bio-based materials in different industries?* <https://sustainability-directory.com/question/what-are-the-potential-benefits-and-drawbacks-of-using-bio-based-materials-in-different-industries/> (consultato il 29/10/2025)

Madhura Yadav, Mahek Agarwal (2021). *Biobased building materials for sustainable future: An overview*, Materials Today: Proceedings, Volume 43, Part 5, Pages 2895-2902, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.165>. (consultato il 29/10/2025)

Zea Escamilla, E., Habert, G., & Wohlmuth, E. (2016). *When CO<sub>2</sub> counts: Sustainability assessment of industrialized bamboo as an alternative for social housing programs in the Philippines*. Building and Environment, 103, 44-53. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.003> (consultato il 29/10/2025)

Xu, J., Xie, S., Han, A., Rao, R., Huang, G., Chen, X., Hu, J., Liu, Q., Yang, X., & Zhang, L. (2019). *Forest resources in China-The 9th National Forest Inventory*. National Forestry and Grassland Administration

Arehart, J. H., Hart, J., Pomponi, F., & D'Amico, B. (2021). *Carbon sequestration and storage in the built environment*. Sustainable Production and Consumption, 27, 1047-1063. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.028> (consultato il 29/10/2025)

Ruta, M. F., Pittau, F., & Masera, G. (2024). *Towards zero-carbon buildings: Challenges and opportunities from reversing the material pyramid*. Sustainability, 16(11), 4454. <https://doi.org/10.3390/su16114454> (consultato il 29/10/2025)

FAO. (2007). *World bamboo resources. A thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment*. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations. <https://www.fao.org/3/a1243e/a1243e00.htm> (consultato il 29/10/2025)

Huang, Z., Y. Sun, and F. Musso (2017). *Assessment on Bamboo Scrimber as a Substitute for Timber in BuildingEnvelope in Tropical and Humid Subtropical Climate Zones - Part 2 Performance in Building Envelope*. IOPConference Series: Materials Science and Engineering, 264, 012007. 10.1088/1757-899X/264/1/012007 (consultato il 03/11/2025)

Vogtländer, J.G.; van der Velden, N.M.; van der Lugt, P. (2014). *Carbon sequestration in LCA, a proposal for a new approach based on the global carbon cycle; cases on wood and on bamboo*. Int. J. Life Cycle Assess. 19, 13-23.

Legambiente, & Kyoto Club. (2021). *Il settore edilizio verso una nuova sfida: La decarbonizzazione delle costruzioni. La situazione normativa e le buone pratiche in Italia e all'estero*.

United Nations Environment Programme (2023). *Building Materials and the Climate: Constructing a*

*New Future*. Nairobi

Milanounica. (2023). *I materiali bio-based*. Milano Unica. <https://www.milanounica.it/it/i-materiali-bio-based> (consultato il 22/09/2025)

Disruptive Design. (2021). *Quick guide to sustainable design strategies*. Medium. <https://medium.com/disruptive-design/quick-guide-to-sustainable-design-strategies-641765a86fb8> (consultato il 22/09/2025)

IFAR/INBAR. (1991). *Bamboo: Current research*. International Network for Bamboo and Rattan.

Tewari, D. N. (1992). *A monograph on bamboo*. International Book Distributors.

INBAR (International Bamboo and Rattan Organisation) (2019). *Bamboo for Climate Change*. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/28818>. (consultato il 24/09/2025)

Lobovikov, M., Paudel, S., Piazza, M., Ren, H., & Wu, J. (2007). *World bamboo resources: A thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005*. FAO.

Gernot, Minke. (2016). *Building with Bamboo : Design and Technology of a Sustainable Architecture*. 2nd and revised ed. ed. Basel: Birkhäuser. Print.

Bambuseto. (s.d.). *Il bambù: origine, caratteristiche e diffusione*. <https://www.bambuseto.it/il-bambu/> (consultato il 24/09/2025)

Bamboo (2023). *5 Interesting Myths About Bamboo Debunked*. <https://bamboo.com/5-interesting-myths-about-bamboo-debunked/> (consultato il 24/09/2025)

Moso Bamboo Blog (2023). *Debunked: 8 miti sul bamboo Moso*. [https://blog.moso-bamboo.com/it/debunked-8-miti-sul-bamboo-moso?lang\\_selected=true](https://blog.moso-bamboo.com/it/debunked-8-miti-sul-bamboo-moso?lang_selected=true) (consultato il 24/09/2025)

Hemate, Nikhil. "Redefining Eco-Friendly Construction with Nature's Green Steel (Bamboo)." *INTERANTIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC RESEARCH IN ENGINEERING AND MANAGEMENT* 8.5 (2024): 1-5. Web.

*Bamboo: green steel of 21st century*. (2021, Nov 22). University Wire <https://www.proquest.com/wire-feeds/bamboo-green-steel-21st-century/docview/2600355244/se-2> (consultato il 24/09/2025)

Khatib, Jamal M. (2009) *Sustainability of Construction Materials*. Cambridge, England; Woodhead Publishing Limited, 2009. Print.

Velástegui Toro, Belén, and Ricardo Tendero Caballero. (2021) "Vernacular Building with Bamboo = Edificio Vernáculo Con Bambú." *Building & management* 5.2. 36. Web.

PABLO VAN DER LUGT (2017), *Booming Bamboo - The (re)discovery of a sustainable material with*

endless possibilities, Materia Exhibitions B.V., Naarden, The Netherlands

P. G. Dixon and L. J. Gibson, (2014). *Sample of the Data Generated in the Structural Bamboo Project of the Cellular Solids Group (at MIT)*, DSpace@MIT. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/88182> (consultato il 11/11/2025)

Layth S. Al-Rukaibawi, Sadik L. Omairey, György Károlyi, (2021). *A numerical anatomy-based modelling of bamboo microstructure*, *Construction and Building Materials*, Volume 308, 125036, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125036> (consultato il 11/11/2025)

Borowski, P. F., Patuk, I., & Bandala, E. R. (2022). *Innovative Industrial Use of Bamboo as Key "Green" Material*. *Sustainability*, 14(4), 1955. <https://doi.org/10.3390/su14041955> (consultato il 12/11/2025)

Awalluddin, D., Ariffin, M. A. M., Osman, M. H., Hussin, M. W., Ismail, M. A., Lee, H. S., & Lim, N. H. A. S. (2017). *Mechanical properties of different bamboo species*. In MATEC web of conferences (Vol. 138, p. 01024). EDP Sciences. [10.1051/matecconf/201713801024](https://doi.org/10.1051/matecconf/201713801024) (consultato il 12/11/2025)

Janssen, J. A. J. (2000). *Designing and building with bamboo* (INBAR Technical Report No. 20). International Network for Bamboo and Rattan. ISBN 81-86247-46-7, Technical University of Eindhoven, The Netherlands

Borowski, P. F., Patuk, I., & Bandala, E. R. (2022). *Innovative Industrial Use of Bamboo as Key "Green" Material*. *Sustainability*, 14(4), 1955. <https://doi.org/10.3390/su14041955> (consultato il 12/11/2025)

Liese, W., & Kohl, M. (2015). *Bamboo. The plant and its uses*. Tropical Forestry 10. 10.1007/978-3-319-14133-6 (consultato il 12/11/2025)

Liese, W. (1985). *Bamboos-Biology, Silvics, Properties, Utilisation*. Series of the German Society for Technical Cooperation (GTZ), no.180. Rossdorf

J.M.O. Scurlock, D.C. Dayton, B. Hames (2000). *Bamboo: an overlooked biomass resource?*, *Biomass and Bioenergy*, Volume 19, Issue 4, Pages 229-244, ISSN 0961-9534, [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00038-6](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00038-6) (consultato il 12/11/2025)

Liese, W. (1998). *The anatomy of bamboo culms* (Vol. 18). Brill.

Xu, P., Tam, V. W. Y., Li, H., Zhu, J., & Xu, X. (2025). *A critical review of bamboo construction materials for sustainability*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 210, 115230. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115230> (consultato il 25/09/2025)

Progettare con il bambù: alla scoperta dell'acciaio vegetale <https://www.infobuild.it/approfondimenti/progettare-con-il-bambu-all-a-scoperta-dellacciaio-vegetale/> (consultato il 25/09/2025)

International Bamboo and Rattan Organisation (INBAR) (2019). *Bamboo for Climate Change*. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/28818>. (consultato il 25/09/2025)

Amada, S., Ichikawa, Y., Munekata, T., Nagase, Y., & Shimizu, H. (1997). *Fiber texture and mechanical graded structure of bamboo*. *Composites Part B: Engineering*, 28(1-2), 13-20. ISSN 1359-8368, [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(96\)00020-0](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(96)00020-0). (consultato il 25/09/2025)

Sharma, B., Gatóo, A., Bock, M., & Ramage, M. (2015). *Engineered bamboo for structural applications*. *Construction and Building Materials*, 81, 66-73. ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.077>. (consultato il 25/09/2025)

Ghavami, K. (2005). *Bamboo as reinforcement in structural concrete elements*. *Cement & Concrete Composites*, 27(6), 637-649. ISSN 0958-9465, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.06.002>. (consultato il 25/09/2025)

Ghisleni, Camilla. "What is Vernacular Architecture?" [O que é arquitetura vernacular?] 25 Nov 2020. ArchDaily. (Trans. Duduch, Tarsila). ISSN 0719-8884 <https://www.archdaily.com/951667/what-is-vernacular-architecture> (consultato il 02/10/2025)

Oliver, P. (2006). *Built to meet needs: cultural issues in vernacular architecture*, Elsevier, Oxford, p.15 (consultato il 02/10/2025)

Widyalankara, Anuththaradevi. (2022). *Conventional Methods Meet the Contemporary Scientific Adaptations in Vernacular Architecture* |Volume VI, Issue XII. VI. 2454-6186. (consultato il 02/10/2025)

Infobuild. (2025). *Architettura vernacolare come modello sostenibile*. A cura di: Giorgio Pirani [https://www.infobuild.it/approfondimenti/architettura-vernacolare-come-modello-sostenibile/#Cosa\\_si\\_intende\\_per\\_architettura\\_vernacolare](https://www.infobuild.it/approfondimenti/architettura-vernacolare-come-modello-sostenibile/#Cosa_si_intende_per_architettura_vernacolare) (consultato il 02/10/2025)

Dipasquale, L., & Mecca, I. (2016). *L'architettura vernacolare come modello codificato per il progetto contemporaneo sostenibile/Vernacular architecture as codified model for the contemporary sustainable project*. *Techne*, 12, 190-198. doi: <https://doi.org/10.13128/Techne-19352> (consultato il 02/10/2025)

2050 Materials. (s.d.). *What is vernacular architecture?* <https://2050-materials.com/blog/what-is-vernacular-architecture/> (consultato il 02/10/2025)

Susanne Bodach, Werner Lang, Johannes Hamhaber, (2014). *Climate responsive building design strategies of vernacular architecture in Nepal*, *Energy and Buildings*, 81, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.022> (consultato il 02/10/2025)

T.R. Pokharel, H.B. Rijal, M. Shukuya (2020). *A field investigation on indoor thermal environment and its associated energy use in three climatic regions in Nepal*, *Energy and Buildings*, Volume 222, 110073, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110073> (consultato il 05/11/2025)

Maharjan, B. e Singh Dongol, M. (2024). *Esplorazione delle tecniche costruttive tradizionali nepalesi e del ruolo del legno nell'integrità strutturale*. *KEC Journal of Science and Engineering*, 8 (1), 77-86. <https://doi.org/10.3126/kjse.v8i1.69269> (consultato il 05/11/2025)

Kandel, S., Thapa, L., Chhetri, K., & Baniya, P. (2024). *Vernacular Architecture in Nepal: A Review on*

- Planning and Building Materials.* Technical Journal, 4(1), 50–63.  
<https://doi.org/10.3126/tj.v4i1.73952> (consultato il 05/11/2025)
- Gautam, D., Prajapati, J., Paterno, KV et al. (2016). *Tecnologia abitativa vernacolare resiliente ai disastri in Nepal.* *Geoenviron Disasters* 3, 1. <https://doi.org/10.1186/s40677-016-0036-y> (consultato il 05/11/2025)
- Rijal, H. B., & Yoshida, H. (2002). *comparison of summer and winter thermal environment in traditional vernacular houses in several areas of nepal.* In *Advances in Building Technology* (Vol. 2)
- Ajay Kumar K.C., Brijesh Mainali, Anish Ghimire, Bikash Adhikari, Sunil Prasad Lohani, Bivek Baral, (2025). *Role of vernacular architecture in enhancing the environmental sustainability of the building sector,* *Energy for Sustainable Development*, 86,101695, ISSN 0973-0826, <https://doi.org/10.1016/j.esd.2025.101695> (consultato il 05/11/2025)
- Adhikary, N., & Johnson, A. L. (n.d.). *Rebuilding Nepal with Traditional Techniques.* ABARI. <https://abari.earth/rebuildingnepalwithtraditionaltechnology> (consultato il 05/11/2025)
- Karki, J. B. S., & Karki, M. (1996). *Bamboo production, use and trade in Eastern Nepal: A case study. Role of Bamboo, Rattan and Medicinal Plants in Mountain Development*, 144–155. (consultato il 03/10/2025)
- Binay Kharel, Santosh Ayer, Samit Kafle, Sachin Timilsina, Kishor Prasad Bhatta, Jeetendra Gautam, Amul Kumar Acharya, Prakash Lamichhane, Janak Airee,(2024). *Current and future habitat suitability modelling of Bambusa teres outside forest areas in Nepal under climate change scenarios.* *Advances in Bamboo Science*,9,100112, ISSN 2773-1391. <https://doi.org/10.1016/j.bamboo.2024.100112>. (consultato il 03/10/2025)
- Bhatta,(2023). *Bamboo forests in Nepal: Status, distribution, research trends and contribution to local livelihoods,* *Advances in Bamboo Science*, 4, 100027,ISSN 2773-1391. <https://doi.org/10.1016/j.bamboo.2023.100027> (consultato il 03/10/2025)
- Pramod Ghimire, Uchita Lamichhane,(2024). *Importance of bamboo for immediate earthquake recovery: A study from Nepal,* *Advances in Bamboo Science*,Volume 6,100059,ISSN 2773-139. <https://doi.org/10.1016/j.bamboo.2024.100059>. (consultato il 03/10/2025)
- Rai, B. L. (2016, 16 settembre). *Bamboo housing in Nepal: Importance and opportunities.* Spaces Blog. <https://spacesnepalblog.wordpress.com/2016/09/16/bamboo-housing-in-nepal-importance-and-opportunities-2/> (consultato il 03/10/2025)
- Das, A., & Thapa, H. (2013). *Distribuzione e utilizzo del bambù nelle regioni centro-occidentali e dell'estremo ovest del Nepal.* Banko Janakari, 21 (1), 13–14. <https://doi.org/10.3126/banko.v21i1.9059> (consultato il 03/10/2025)
- Santosh Ayer (2025). *Potential barriers to bamboo-based carbon credit initiatives in Nepal: What stands in the way?,* *advances in Bamboo Science*,12,100179, ISSN 2773-1391. <https://doi.org/10.1016/j.bamboo.2025.100179>. (consultato il 03/10/2025)
- GoN(Government of Nepal),2020. *The Fifteenth Plan.* National Planning Commission. Available online: [https://npc.gov.np/images/category/15th\\_plan\\_English\\_Version.pdf](https://npc.gov.np/images/category/15th_plan_English_Version.pdf) (consultato il 03/10/2025)
- MoHA, (2015). *Nepal Earthquake 2072: Situation Update as of 11th May 2015.* Ministry of Home Affairs, Nepal. 4 pp. (consultato il 03/10/2025)
- UNICEF, (2023). *UNICEF Nepal Humanitarian Situation Report No. 2 (Earthquake): 13 November 2023 - Nepal.* Available on: <https://reliefweb.int/report/nepal/unicef-nepal-humanitarian-situation-report-no-2-earthquake-13-november-2023>. (consultato il 03/10/2025)
- C. Stapleton, (1994). *Bamboo of Nepal, an illustrated guide.* Forestry Department, University of Aberdeem, Royal Botanic Garden, Edinburgh in Association with FRIC, Kathamndu, Nepal
- Kutu, S. (2022). *Comparative Analysis of Traditional Building Practice (Wattle and Daub) and CSEB- Alternative Building Technology.* 12th IOE Graduate Conference, Tribhuvan University.
- Farbiarz, J., Mogollón, F. J., & Prieto, S. D. (2016). *Manual de construcción sismo resistente de viviendas en bahareque encimentado.* Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) [https://www.desenredando.org/public/libros/2001/csrve/guadua\\_lared.pdf?utm\\_medium=website&utm\\_source=archdaily.cl](https://www.desenredando.org/public/libros/2001/csrve/guadua_lared.pdf?utm_medium=website&utm_source=archdaily.cl) (consultato il 10/11/2025)
- Kaminski,S. and Lawrence,A. and Trujillo,D., (2016). *International Network for Bamboo and Rattan (INBAR), Design guide for engineered bahareque housing.* English, Bulletin, China, (No.38), Beijing, Technical Report - International Network for Bamboo and Rattan (INBAR), (vii + 84 pp.), 20173001893
- Pablo Luna Studio (2023). *Bamboo Joinery.* <https://pablolunastudio.com/bamboo-joinery/> (consultato il 10/11/2025)
- INBAR (2020). *Construction and Housing with Bamboo: Technical Guidelines.* Beijing: International Network for Bamboo and Rattan. <https://www.inbar.int/wp-content/uploads/2020/05/1519866460.pdf> (consultato il 10/11/2025)
- Gernot, Minke. (2016). *Building with Bamboo : Design and Technology of a Sustainable Architecture.* 2nd and revised ed. ed. Basel: Birkhäuser. Print. (consultato il 08/10/2025)
- Hunnarshala Foundation. (2013). *Bamboo Construction Source Book.* Kathmandu: Hunnarshala Foundation.
- Lumgailu Panmei, Thiru Selvan, Jayaraman Durai, Selim Reza, (2025). *Ecological restoration of fragile Eastern Himalayan landscapes through bamboo bioengineering,* *Advances in Bamboo Science*, Volume 13, 100203, ISSN 2773-1391 <https://doi.org/10.1016/j.bamboo.2025.100203>. (consultato il 08/10/2025)
- Payal Kotangale, Ashish Agashe, Riya Sawarkar, Chetan Dewangan, Gayatri Tijare, Lal Singh, 2025, *Unlocking the hidden power of bamboo rhizomes: A comprehensive review of their role in nutrient storage, water retention, and plant growth,* *Advances in Bamboo Science*, Volume 10, 100122, ISSN 2773-1391, <https://doi.org/10.1016/j.bamboo.2025.100122> (consultato il 08/10/2025)

Suman Dutta, Subrata Gorain, Jyotirmay Roy, Ritwika Das, Santanu Banerjee, Sudip Kumar Gorai, Malini Roy Choudhury, Sumanta Das, (2025). *Bamboo for global sustainability: a systematic review of its environmental and ecological implications, climate action, and biodiversity contributions*, *Environmental Reviews*, Volume 33, Pages 1-26, ISSN 1208-6053, <https://doi.org/10.1139/er-2025-0032> (consultato il 08/10/2025)

INBAR (2014). *Bamboo: A Strategic Resource for Countries to Reduce the Effects of Climate Change*. Policy Synthesis Report 1, International Network of Bamboo and Rattan, Beijing, China

Sthapit, K.M., Tennyson, L.C., (1991). *Bio-engineering erosion control in Nepal*. *Unasylva* (FAO), 42(164), pp. 16-23.

Purwito. (2015). *Laminated Bamboo: The Future Wood*. Proceeding of International Construction Workshop and Conference Parahyangan Bamboo Nation 2. Page 19-58. Bandung: Unpar Press.

Esti Asih Nurdiah, (2016). *Potential of Bamboo as Building Material in Organic Shaped Buildings*, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Volume 216, Pages 30-38, ISSN 1877-0428, <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.12.004>. (consultato il 08/10/2025)

CARDENAS LAVERDE, MAURICIO. (2011). *Il bambù come materiale da costruzione. Sistemi editoriali*. (consultato il 15/11/2025)

Chen, Y., Li, H., Cheng, G. et al. (2023). *Parallel-to-grain tensile mechanical behavior of laminated bamboo lumber for bolted connections*. *Cellulose* 30, 9775-9791. <https://doi.org/10.1007/s10570-023-05480-6> (consultato il 15/11/2025)

Van der Lugt, P., & King, C. (2019). *Bamboo in the circular economy: The potential of bamboo in a zero-waste, low-carbon future*. International Bamboo and Rattan Organisation (INBAR). [https://www.inbar.int/wp-content/uploads/2019/12/Bamboo-in-the-Circular-Economy\\_v3\\_10.14.20.pdf](https://www.inbar.int/wp-content/uploads/2019/12/Bamboo-in-the-Circular-Economy_v3_10.14.20.pdf) (consultato il 15/11/2025)

Madhura Yadav, Arushi Mathur (2021). *Bamboo as a sustainable material in the construction industry: An overview*, *Materials Today: Proceedings*, Volume 43, Part 5, Pages 2872-2876, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.125> (consultato il 15/11/2025)

Lewis, P., Tsurumaki, M., & Lewis, D. J. (2022). *Manual of biogenic house sections*.

Damigella, D. (2019). *Sperimentazione di un blocco a matrice cementizia fibrorinforzato con bambù per il mercato delle costruzioni haitiano = Experimentation of a fiber-reinforced cement block with bamboo for the Haitian construction market* (Tesi di laurea magistrale). Politecnico di Torino. Relatori: A. Bocco, A. Lacirignola.

Ciocia, S. (2021). *Architettura umanitaria: progetto di shelter resiliente in bambù = Humanitarian architecture: design of a bamboo resilient shelter* (Tesi di laurea magistrale). Politecnico di Torino. Relatori: F. De Filippi, R. Pennacchio, A. Monaco.

### /CAPITOLO 3:

IPCC,2018:Allegato I:Glossario [Matthews,JBR (acuradi)]. In: *Riscaldamento globale di 1,5°C. Un rapporto speciale dell'IPCC sugli impatti del riscaldamento globale di 1,5°C rispetto ai livelli preindustriali e sui relativi percorsi di emissione di gas serra a livello globale, nel contesto del rafforzamento della risposta globale alla minaccia del cambiamento climatico, dello sviluppo sostenibile e degli sforzi per sradicare la povertà* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, PR Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, JBR Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor e T. Waterfield (a cura di)]. Cambridge University Press, Cambridge, Regno Unito e New York, NY, USA, pp. 541-562, doi:10.1017/9781009157940.008 (consultato il 04/10/2025)

Elena Alexandra Mamouni Limnios, Tim Mazzarol, Anas Ghadouani, Steven G.M. Schilizzi, (2014) *The Resilience Architecture Framework: Four organizational archetypes*, *European Management Journal*, Volume 32, Issue 1, Pages 104-116, ISSN 0263-2373, <https://doi.org/10.1016/j.emj.2012.11.007> (consultato il 04/10/2025)

Pandey, S.; Mishra, B.K. (2022). *Spatial and Temporal Analysis of Extreme Precipitation under Climate Change over Gandaki Province, Nepal*. *Architecture*, 2, 724-759. <https://doi.org/10.3390/architecture2040039> (consultato il 04/10/2025)

Charlesworth, E.; Fien, J. (2022). *Design and Disaster Resilience: Toward a Role for Design in Disaster Mitigation and Recovery*. *Architecture*, 2, 292-306. <https://doi.org/10.3390/architecture2020017> (consultato il 04/10/2025)

Elmqvist, T., Andersson, E., Frantzeskaki, N. et al. (2019). *Sostenibilità e resilienza per la trasformazione nel secolo urbano*. *Nat Sustain* 2, 267-273 <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0250-1> (consultato il 04/10/2025)

Olgyay, Victor et al. (2015). *Design with Climate : Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism - New and Expanded Edition*. New and expanded. Princeton, NJ: Princeton University Press,

Susanne Bodach, Werner Lang, Johannes Hamhaber, (2014). *Climate responsive building design strategies of vernacular architecture in Nepal*, *Energy and Buildings*, 81, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.022> (consultato il 04/10/2025)

Gautam, D., Prajapati, J., Paterno, KV et al. (2016). *Tecnologia abitativa vernacolare resiliente ai disastri in Nepal*. *Geoenviron Disasters* 3, 1. <https://doi.org/10.1186/s40677-016-0036-y> (consultato il 04/10/2025)

Holling, C. S. (1973, November). *Resilience and stability of ecological systems*. *Annu Rev Ecol Syst*, 4: 1-23

Holling, C. S. (1996) *Engineering resilience versus ecological resilience*: In: PC Schulze (ed) *Engineering Within Ecological Constraints*, pp. Washington, DC, National Academy Press, pp. 31-44.

L.H. Gunderson, C.S. Holling (Eds.), (2001). *Panarchy: Understanding transformations in human and natural systems*, Island Press, Washington, DC

- Rioli, L., & Savicki, V. (2003). *Information system organizational resilience*. *Omega*, 31(3), 227-233.
- Sutcliffe, K. M. (2003). *Organizing for resilience. Positive organizational scholarship: Foundations of a new discipline*.
- Viollet-le-Duc, Eugène-Emmanuel. (1876). *The habitations of man in all ages*. J.R. Osgood and Company. Retrieved from <https://library.si.edu/digital-library/book/habitationsofma00viol> (consultato il 04/10/2025)
- Karimi, R., Shirowzhan, S. e Sepasgozar, SME (2023). *Criteri di progettazione architettonica che considerano l'economia circolare e la realizzabilità per la prototipazione di rifugi intelligenti per i soccorsi in caso di calamità*. *Edifici*, 13 (7), 1777. <https://doi.org/10.3390/buildings13071777> (consultato il 04/10/2025)
- Carpenter, S., Walker, B., Andries, J. et al. (2001). *From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What?* *Ecosystems* 4, 765-781. <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0045-9> (consultato il 04/10/2025)
- Andersson, J., & Lindkvist, J. (2000). *Education in Nepal: A Study of Nepalese Teachers' Views on their School Situation*. Tesi di laurea, Department of Educational Science, Linköping University.
- UNICEF Nepal. (2018). *Invest in Every Child: Fundraising Document*. Education Programme 2018–2022. Kathmandu: UNICEF Nepal.
- Jitendra Agarwal, Rishi Ram Parajuli, Maria G. Xanthou, Anastasios G. Sextos, (2025). *Inclusive resilience: a participatory methodology for self-improving seismic resilience of school communities in Nepal*, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Volume 129, 105759, ISSN 2212-4209, <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2025.105759> (consultato il 05/10/2025)
- Edusanjal. (2025). *School & Higher Education System in Nepal*. Edusanjal. <https://edusanjal.com/blog/education-levels-nepal/> (consultato il 05/10/2025)
- Pant, B.P., Luitel, B.C., Bjønness, B. et al. (2023). "Science" and "art" as ways of knowing in school education in Nepal for an inclusive learning environment. *Discov Educ* 2, 16. <https://doi.org/10.1007/s44217-023-00039-w> (consultato il 05/10/2025)
- Freire P. (1970). *Pedagogy of the oppressed*. London: Continuum
- Giroux HA. (2004). Cultural studies, public pedagogy, and the responsibility of intellectuals. *Communication and critical/cultural studies*; 1(1):59-79. <https://doi.org/10.1080/1479142042000180935>. (consultato il 05/10/2025)
- Peters C. (2016). *Critical pedagogy and art*. In: Peters MA, editor. *Encyclopedia of educational philosophy and theory*. Singapore: Springer; p. 1-6.
- Scavuzzo, G. (2016). *Costruire e/è costruirsi. Il complesso rapporto tra architettura e educazione*. FAMagazine. Ricerche E Progetti sull'architettura E La Città, (37), 7-18. <https://doi.org/10.12838/fam/issn2039-0491/n37-2016/3> (consultato il 05/10/2025)
- H. Gadamer, (2014). *Educare è educarsi*, Il Melangolo, Genova
- H. Gadamer, (2012) *Umanesimo oggi?*, in *Bildung e umanesimo*, Il Melangolo, Genova.
- Fiorese, G. (2025). *Ridefinire lo spazio: design, architettura e pedagogia nell'educazione del futuro*. In, *Ambienti flessibili. Creatività, inclusione, ecologia, reale/virtuale*. Architettura, Società e Innovazione 5: Teorie e buone pratiche per la pedagogia (pp. 83-89). Cura di B. De Angelis , RomaTrePress.
- Sameroff, A., Seifer, R., Baldwin ,A. & Baldwin, C. (1993). *Stability of intelligence from preschool to adolescence: the influence of social and family risk factors*. *Child Development*, 64 (1), pp. 80-97.
- Malaguzzi, L. (2010). *I cento linguaggi dei bambini. L'approccio di Reggio Emilia all'educazione dell'infanzia*. Bergamo: Edizioni Junior, 2010.
- MIUR (2022). *Linee guida per progettare, costruire e abitare le scuole del futuro*.
- Hunter, M. A. (2006). *Public school facilities: Providing environments that sustain learning*. New York, NY: Teachers College Columbia University, National Access Network.
- Olson, S. L., & Kellum, S. (2003). *The impact of sustainable buildings on educational achievements in K-12 schools*. *Leonardo*, 2, 1-14.
- Borrelbach, S. (2009). *The historical development of school buildings in Germany*. Rotraut Walden (ed). *Schools for the Future: Design Proposals from Architectural Psychology*. Hogrefe&Huber Publishers, Germany.
- Khaniya, T.R. & Kiernan, M.A. (1994). *Nepal: System of Education*. In *The International Encyclopedia of Education*. Second Edition, Volume 7. Pergamon.
- Skar, H., Cederroth, S. (1997). *Development Aid to Nepal*. NIAS (Nordic Institute of Asian Studies). Copenhagen, Denmark. Curzon Press, Richmond.
- Dewey J. (1938). *Experience and education*. New York: Macmillan.
- Mezirow J. (1997). *Transformative learning: theory to practice*. In: Cranton P, editor. *Transformative learning in action: insights from practice*. Hoboken: Jossey-Bass; p. 5-12.
- El Comedor Estudiantil G. Liva. (2025). *Il sistema scolastico in Nepal*. El Comedor. <https://www.elcomedor.it/2025/03/il-sistema-scolastico-in-nepal/> (consultato il 05/10/2025)
- GADRRRES (2024). *Case Study: Transforming School Safety in Nepal*, GADRRRES.
- Selda Al, Reyhan Midilli Sari, Nimet Candas Kahya, (2012). *A Different Perspective on Education: Montessori and Montessori School Architecture*, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Volume 46, Pages 1866-1871, ISSN 1877-0428, <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.05.393> (consultato il 05/10/2025)
- Hertzberger, H. (2008). *Space and Learning*. 010 Publishers, Rotterdam.

UNICEF Nepal. (2023, ottobre). *Safer and Resilient Education: Institutionalization of Comprehensive School Safety*. Kathmandu: UNICEF Nepal. <https://www.unicef.org/nepal/reports/safer-and-resilient-education> (consultato il 05/10/2025)

Dina D'Ayala, Carmine Galasso, Arash Nassirpour, Rohit Kumar Adhikari, Luis Yamin, Rafael Fernandez, Dexter Lo, Lessandro Garciano, Andres Oreta, (2020). *Resilient communities through safer schools*, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Volume 45, 101446, ISSN 2212-4209, <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101446>. (consultato il 06/10/2025)

Government of Nepal, Ministry of Education. (2016). *Guidelines for Developing Type Designs for School Buildings in Nepal*. Kathmandu: Ministry of Education, Nepal.

Marasini, N. P., Shrestha, S. N., Guragain, R., Shrestha, H., Prajapati, R., & Khatiwada, P. (2019). *Enhancing Earthquake Safety of Schools: Lessons Learned from Nepal*. Kathmandu: National Society for Earthquake Technology-Nepal (NSET).

#### **/CAPITOLO 4:**

Jun Sekino (2011). *Baan Nong Bua School* <https://www.dezeen.com/2015/11/03/baan-nhong-bua-earthquake-resistant-primary-elementary-school-chiang-rai-thailand-jun-seokino/> (Consultato il 11/04/2025) <https://divisare.com/projects/301912-junsekino-spaceshift-studio-baan-nong-bua-school> (Consultato il 12/04/2025)

Dan LaRossa, Building Trust international, Amadeo Bennettta (2013). *MOVING Schools* <https://divisare.com/projects/245041-dan-larossa-building-trust-international-amadeo-bennetta-moving-schools-001> (Consultato il 12/04/2025)

Marta Maccaglia, Semillas (2019). *Unión Alto Sanibeni Nursery and Primary School* <https://www.archdaily.com/935373/union-alto-sanibeni-nursery-and-primary-school-semillas> (Consultato il 29/04/2025)

SchilderScholte architects (2014). *Pani Community Centre* <https://www.dezeen.com/2015/02/14/bangladesh-community-centre-schilder-scholte-architecten-india-bamboo-canopy/> (Consultato il 11/04/2025)

AKM Saleh Ahmed Anik, Kanak Saha, Sayon Sur; Associates-Babu Singh, Hlatun Singh, Saiful Islam. (2019-2020). *Bidyanondo Sampriti Orphanage School* <https://contextbd.com/bidyanondo-sampriti-orphanage-school/> <https://sthapatty-o-nirman.com/en/projects/biddanondo-project> (Consultato il 24/04/2025)

Ziegert, Roswag, Seiler Architekten Ingenieure (2006). *Earthen School Tipu Sultan Merkez* <https://divisare.com/projects/309226-ziegert-roswag-seiler-architekten-ingenieure-earthen-school-tipu-sultan-merkez-pakistan> (Consultato il 30/04/2025)

Anna Heringer, Eike Roswag (2006). *School in Rudrapur: METI SCHOOL* <https://www.anna-heringer.com/projects/metischool-bangladesh/> (Consultato il 12/05/2025)

Nripal Adhikary, Rakshya Rayamajhi, Asmita Sigdel, Pranathi (2018). *Kopila Valley School* <https://abari.earth/ecv> (Consultato il 11/04/2025)

Enrique Mora Alvarado (2015). *Convento House* <https://divisare.com/projects/312887-enrique-mora-alvarado-jag-studio-convento-house> <https://www.archdaily.com/578654/convento-house-enrique-mora-alvarado> (Consultato il 12/04/2025)

Laboratorio de Vivienda de Interés Social (LabVIS, Juan Carlos Bamba, Enrique Mora, Jorge Ludeña, Robinson Vega (2024). *Rifugio di emergenza con eco-materiali* <https://www.archdaily.cl/cl/1026085/refugio-de-emergencia-con-ecomateriales-laboratorio-de-vivienda-de-interes-social-labvis> (Consultato il 13/04/2025)

Benjamin Garcia (2010). *A forest for a Moon Dazzler* [www.archdaily.com/61814/a-forest-for-a-moon-dazzler-benjamin-garcia-saxe?ad\\_medium=gallery](https://www.archdaily.com/61814/a-forest-for-a-moon-dazzler-benjamin-garcia-saxe?ad_medium=gallery) (Consultato il 12/05/2025)

#### **/CAPITOLO 5:**

Archstorming. (n.d.). *ARCHSTORMING – Architecture Competitions*. <https://www.archstorming.com/> (consultato il 09/10/2025)

Archstorming. (n.d.). *Nepal School Project Competition Brief*. <https://www.archstorming.com/competitions/nepal.html> (consultato il 09/10/2025)

Karmayog Foundation. (n.d.). *About us: Who we are*. <https://karmayog.org.np/> (consultato il 09/10/2025)

Nepal Rising (Daayitwa US) (n.d.). *About us* <https://daayitwaus.org/> (consultato il 09/10/2025)

Vaira, E. (2024). *Progettare per educare: il ruolo del design nelle strategie didattiche*. Tesi di laurea, Politecnico di Torino.

Grady, J. (2006). *System Requirements Analysis*. Academic Press/ Elsevier

# /RINGRAZIAMENTI

Alla conclusione di questo percorso desidero esprimere la mia profonda gratitudine alla professoressa Francesca Thiebat, per avermi seguita con attenzione e interesse nella realizzazione di questo progetto.

Un ringraziamento altrettanto sincero va alla mia correlatrice Fiamma, per la sua disponibilità, il suo entusiasmo e la cura con cui ha accompagnato ogni fase del lavoro. Grazie inoltre per aver condiviso con me e con Juan Diego, che ringrazio altrettanto, l'esperienza del concorso: il vostro contributo, le vostre conoscenze e l'attenzione ai dettagli sono stati preziosi e hanno arricchito in modo significativo sia lo sviluppo di questo progetto sia la mia esperienza di crescita.

I ringraziamenti più profondi vanno alla mia famiglia, per avermi sempre sostenuta e supportata, credendo in me e spronandomi ogni giorno a inseguire i miei sogni. Questa tesi è dedicata a voi.

Grazie alle amiche e agli amici con cui ho condiviso questi anni, il vostro sostegno è stato fondamentale e ha reso questo percorso ancora più speciale.

Infine, un grande e sincero ringraziamento va a Sasha, per essere stato al mio fianco nei momenti felici e in quelli più difficili. Il tuo supporto e il tuo amore sono per me una forza costante. Grazie per avermi fatto compagnia nelle lunghe nottate di lavoro e per riuscire sempre a regalarmi un sorriso.

Elisa



*Elisa Falcioni*