

Linee di tendenza nella progettazione di *vertical farm*. Verso un approccio biodinamico?

SAGGI E PUNTI
DI VISTA/
ESSAYS AND
VIEWPOINT

Gian Luca Brunetti, <https://orcid.org/0000-0002-4476-6775>
Dipartimento di Architettura e Studi Urbani, Politecnico di Milano, Italia

gianluca.brunetti@polimi.it

Abstract. Il contributo fa il punto sullo stato dell'arte nell'ambito delle esperienze di coltivazione verticale che hanno sperimentato approcci alternativi a quello prevalente, oggi orientato al controllo attivo – dei preparati nutrienti, delle condizioni microclimatiche e delle condizioni di illuminazione – e spesso scarsamente consapevole delle relazioni urbane. Queste sperimentazioni contrappongono all'approccio consolidato un approccio naturale, basato sulla creazione di suoli in elevazione, chiusura dei cicli biologici, climatizzazione passiva, massimizzazione dell'illuminazione naturale, che presenta vantaggi funzionali consistenti, incoraggiando la intensità di relazioni con i contesti. Tra questi vantaggi vi è la riduzione degli impatti ambientali complessivi e del tasso di agenti patogeni operanti sui vegetali.

Parole chiave: *Vertical farm*; Serra solare; Guadagno solare passivo; Coltivazione in serra; Agricoltura urbana

Introduzione

Il concetto di *vertical farm* è affiorato sulla scena del dibattito architettonico all'inizio degli anni 2000 (Despommier, 2011) nel contesto della stessa esigenza culturale che ha generato i concetti della coltivazione urbana interstiziale (Hallet *et al.*, 2016), della coltivazione su coperture verdi (Walters and Stoelzle Midden, 2018), delle facciate verdi (Manso e Castro-Gomez, 2015) e della riforestazione urbana come risposta ai cambiamenti climatici (Teo *et al.*, 2021) (Fig. 1). Il presente contributo investiga lo stato dell'arte nell'ambito delle sperimentazioni sulle *vertical farm* ed individua approcci alternativi a quelli prevalenti (Teo *et al.*, 2024), ed orientati ad una maggiore sostenibilità ambientale.

Le *vertical farm* ampliano il concetto di serra agricola ibridandolo con il modello della serra botanica di grande altezza (Fig. 2), sviluppandolo all'interno di una visione urbana ad alta densità, ma contrariamente alle serre solari agricole, e ancor

più, delle serre agricole climatizzate in modo attivo (che, per motivi socioeconomici e culturali, costituiscono la gran parte delle infrastrutture a serra nel mondo occidentale, in linea con quanto accade nel campo dell'architettura) – generano impatti complessivi che, secondo molti ricercatori, sono non ambientalmente sostenibili. A questa troppo modesta sostenibilità e all'alto costo economico è probabilmente attribuibile il fatto che le *vertical farm* siano oggi ancora poco diffuse. La nazione con il maggior numero di unità operanti sono gli Stati Uniti, che ne hanno un centinaio. La quantità di *vertical farm* costruite è quindi ancora troppo bassa per incidere in modo sostanziale sugli impatti ambientale della produzione agricola e sui consumi urbani; ma essa potrebbe aumentare qualora la situazione di vivissimo interesse a cui si sta assistendo perdurasse.

L'insostenibilità del modello "consolidato" di *vertical farm* sembra derivare dalla combinazione di tre specifici tipi di problemi funzionali connessi alla coltivazione in altezza:

1. problemi strutturali, generati dal fatto che i carichi consistenti derivanti dall'utilizzo di terreno in altezza richiedono investimenti di risorse significativi, paragonabili a quelli di solito riservati ad ambienti ospitanti persone;
2. problemi di controllo delle condizioni igrotermiche, derivanti dal fatto che l'alta densità insediativa degli ambienti urbani rende arduo ottenere condizioni di esposizione solare e ventilativa ottimali, indispensabili al controllo ambientale bioclimatico passivo;
3. problemi di illuminazione naturale, generati dalla combinazione dell'alta densità degli insediamenti urbani e l'impossibilità di accesso della luce zenitale in configurazioni multipiano.

Trends in vertical farm designs. Towards a biodynamic approach?

Abstract. This paper provides an overview of the state of the art in vertical farming experiments that have explored alternative approaches to the prevailing model, which is currently oriented toward active control of nutrient solutions, microclimatic conditions, and lighting, and is often scarcely aware of urban relations. These experiments propose a natural approach as an alternative to the established model, emphasising the creation of elevated soils, closure of biological cycles, passive climate control, maximisation of natural lighting, and establishing relations with the surrounding context. This approach offers significant functional advantages over the prevailing model, including a reduction in overall environmental impacts and the rate of pathogens affecting plants.

Keywords: Vertical farm; Solar greenhouse; Passive solar gain; Crop-growing; Urban agriculture.

Introduction

The concept of vertical farming emerged on the architectural debate scene in the early 2000s (Despommier, 2011) within the same cultural context that gave rise to concepts such as interstitial urban farming (Hallet *et al.*, 2016; Vatistas *et al.*, 2022), green roof cultivation (Walters and Stoelzle Midden, 2018), green façades (Manso and Castro-Gomez, 2015), and urban reforestation (Teo *et al.*, 2021), as a response to climate change, particularly in urban systems (Fig. 1). This paper investigates the state of the art in vertical farm experiments, and identifies alternative approaches to the prevailing ones (Association for Vertical Farming, 2023; Teo *et al.*, 2024). It is orientated towards environmental sustainability.

Vertical farms expand the concept of agricultural greenhouses by hybrid-

ising it with the model of botanical greenhouse developed in height (Fig. 2), and developing it within a high-density urban vision. However, unlike solar agricultural greenhouses and, even more so, actively climate-controlled agricultural greenhouses – which, for socio-economic and cultural reasons, make up the majority of greenhouse agricultural infrastructure in the Western world, aligning with broader architectural trends (Banham, 1969) – vertical farms generate overall impacts that, according to many researchers, are environmentally burdensome. This overly modest sustainability and the high economic cost are likely the reasons why vertical farms are still not widespread today. The country with the highest number of operating units is the United States (followed by Singapore), which counts about a hundred. The number of ver-

01 | Parte del masterplan sostenibile proposto dallo studio EXCEPT per la città di Singapore, basato sulla costruzione di vertical farm e canali d'acqua per il raffrescamento ambientale che li congiungono (immagine: EXCEPT 2020, Licenza Creative Commons). Queste vertical farm possono essere viste come una versione avveniristica, ma ortodossa, del modello proposto da Despommier
Part of the sustainable masterplan proposed by the EXCEPT studio for the city of Singapore, based on the construction of vertical farms and water channels for environmental cooling that connect them (image: EXCEPT 2020, Creative Commons License). These vertical farms can be seen as a futuristic yet orthodox version of the model proposed by Despommier

02 | Serra art-deco "Jewel Box", da 15 metri di altezza, realizzata a St Louis, Missouri nel 1936 su progetto di William C.E. Becker (Photo: joetta@sbcglobal.net, 2008; Licenza Creative Commons)
The art-deco greenhouse "Jewel Box", standing 15 metres tall, built in St. Louis, Missouri, in 1936, designed by William C.E. Becker (Photo: joetta@sbcglobal.net, 2008; Creative Commons License)



Si tratta di problemi per risolvere i quali la produzione di impatti elevati non è inevitabile, ma che senz'altro si verificano attraverso le modalità di risposta correnti. Il modello vigente infatti:

1. affronta il problema del carico del terreno in elevazione attraverso la coltivazione idroponica e aeroponica, che richiede il pompaggio costante dell'intero spettro delle sostanze nutritive necessarie alle piante per tutto il loro ciclo di vita (Gallo and Casazza, 2016);
2. risponde alle esigenze di controllo climatico attraverso strategie di controllo attivo basate sull'impiego di impianti meccanici (Zhang *et al.*, 2022);
3. affronta il problema della scarsità di illuminazione naturale con strategie di illuminazione artificiale a LED (Wong *et al.* 2020) (Fig. 3).

L'impatto di questa impostazione solleva interrogativi sulla giustificazione dell'investimento non solo in termini di materiali ed energia (Al-Chalabi, 2019), ma anche riguardo al fatto che il risparmio di suolo ottenuto non sia complessivamente effettivo, se si considera la sua impronta ecologica complessiva (Bomford, 2023).

Recentemente, però, sono emerse iniziative imprenditoriali che hanno iniziato a discostarsi dalla formula "idroponica + attiva + LED", intervenendo su ciascuna delle tre direzioni menzionate. In primo luogo, applicando la coltivazione in suolo alle



vertical farm (Ellis, 2022). In secondo luogo, aumentando la quota delle strategie di controllo climatico passivo a discapito di quello attivo, sulla scorta di studi che dimostrano che strategie di controllo climatico passive sono applicabili con vantaggio nelle vertical farm (Ahamed *et al.*, 2023). In terzo luogo, dimostrando con applicazioni pratiche la fattibilità e profittabilità di un approccio basato sull'illuminazione naturale (Agritech Future, 2021).

Esistono forti analogie tra quest'ultima direzione di innovazione e gli sviluppi avvenuti negli ultimi 50 anni nel campo delle

tical farms built is, therefore, still too low to have a substantial impact on the environmental effects of agricultural production and urban consumption; however, it could increase if the intense interest currently being observed continues.

The unsustainability of the "consolidated" vertical farm model seems to stem from the combination of three specific types of functional problems associated with high-rise cultivation:

1. structural problems, arising from the fact that the significant loads due to the use of soil at height require substantial resource investments, comparable to those typically reserved for spaces hosting people;
2. problems in controlling hygrothermal conditions, due to the high density of urban environments, which makes it challenging to achieve

optimal solar exposure and ventilation conditions, essential for passive bioclimatic environmental control;

3. problems with natural lighting, resulting from the combination of the high density of urban settlements and the impossibility of accessing zenithal light in multi-story configurations.

These problems, while challenging, do not inevitably lead to high impacts; however, they do occur under current approaches. Indeed, the prevailing model:

1. addresses the issue of soil load at elevation through hydroponic and aeroponic cultivation, which requires constant pumping of the full spectrum of nutrients necessary for plant life cycles;
2. meets the climate control through active control strategies that rely on mechanical systems (Zhang *et al.*,

- 2022; Avgoustaki and Xydis, 2020);
3. tackles the scarcity of natural lighting with artificial LED lighting strategies (Wong *et al.*, 2020; Tomar, 2024) (Fig. 3).

This approach raises questions about the justification for the investment, not only in terms of materials and energy (Beacham *et al.*, 2015; Al-Chalabi, 2019; Phillips, 2024) but also regarding whether the soil savings achieved are genuinely effective when considering the overall ecological footprint (Bomford, 2023; De Decker, 2021).

Recently, however, entrepreneurial initiatives have begun to move away from the "hydroponic+active+LED" formula, addressing each of the three aforementioned directions, firstly, by applying soil cultivation in vertical farms (Ellis, 2022). Secondly, by increasing the share of passive climate control strategies at the expense of ac-

tive ones, on the basis of studies that demonstrate the applicability and advantages of passive climate control strategies (Ahamed *et al.*, 2023). Thirdly, by practically demonstrating the feasibility and profitability of an approach based on natural lighting (Agritech Future, 2021).

There are strong analogies between this latest direction of innovation and developments over the last 50 years in the field of bioclimatic greenhouses. The described direction of experimentation on vertical farms shows significant points of convergence with experiments on self-balanced greenhouse ecosystems conducted in the 1970s, such as the Solar Arks by the New Alchemy Institute (Todd and Todd, 1984), inspired by the principles of Permaculture, which demonstrated the feasibility of closing natural cycles (Prance, 2002). This convergence be-

serre bioclimatiche al suolo. La direzione di sperimentazione sulle *vertical farm* descritta presenta significativi punti di convergenza con le sperimentazioni sugli ecosistemi autoequilibrati in serra effettuate negli anni '70, tra cui le Solar Arks del New Alchemy Institute (Todd and Todd, 1984), ispirate ai principi della Permacultura, con cui si è dimostrata la fattibilità della chiusura dei cicli naturali (Prance, 2002). Questa convergenza tra *vertical farm* e bioshelters è auspicabile non solo per la riduzione dell'energia necessaria alla climatizzazione, ma anche in considerazione della massimizzazione della riduzione dell'uso di acqua, nutrienti e pesticidi che le serre bioclimatiche consentono, sia rispetto alle coltivazioni all'aperto, sia rispetto alle coltivazioni in serra convenzionali.

L'obiettivo della coltivazione in altezza di suolo pensile

Esperienze recenti che mostrano la competitività e la redditività della coltivazione nel suolo nelle *vertical farm* evidenziano

vantaggi significativi in termini di riduzione del tasso di agenti patogeni e di mantenimento degli equilibri ecosistemici naturali della popolazione microbiotica. Questi equilibri risultano fondamentali sia per la salute delle piante, sia per la fissazione del carbonio nel suolo e la sua sottrazione dall'atmosfera, generando effetti benefici per la mitigazione dei cambiamenti climatici (Ellis, 2022).

Il vantaggio chiave dell'uso del suolo sta nella preservazione dell'equilibrio dell'ambiente naturale microbiotico del medium di crescita, che si traduce in una maggiore resistenza delle piante ai parassiti e agli altri agenti patogeni, oltre che in un ridotto uso di energia di mantenimento, consentito dalla minore neces-

sità di pompaggio dell'acqua di irrigazione e dall'eliminazione del pompaggio delle sostanze nutritive, che sarebbero normalmente prodotte a spese degli ecosistemi dai quali vengono prelevate.

La composizione del suolo è profondamente legata alla vita microbiotica che esso ospita, ma dipende a sua volta dagli strati profondi, che non possono essere presenti in una coltivazione verticale (Gross and Harrison, 2019). Questo fa sì che l'implementazione di coltivazioni su riparti in serra verticale richieda un aggiornamento dei saperi consolidati basati sulla disponibilità di strati profondi, in serra e non. Si tratta di un indirizzo strategico che non può avvenire per mera traslazione né delle pratiche proprie delle *vertical farm*, né di quelle proprie delle serre solari, ma richiede una sintesi tecnica calibrata sulle necessità, mai finora sperimentate, di un'architettura solare in altezza caratterizzata da riparti di suolo pensile indoor. Questo richiede, tra le varie cose, la selezione di tipologie di coltivazioni appropriate e il controllo della microflora e microfauna di un medium sottoposto a condizioni ancora poco sperimentate (Song *et al.*, 2024).

L'obiettivo del controllo climatico passivo

Le strategie di climatizzazione attive oggi predominanti nelle *vertical farm* sono impostate su

tecniche che non sono esclusive di queste strutture, ma che li assumono una sintesi caratteristica. Allo stesso modo, è verosimile pensare che le strategie necessarie per la climatizzazione passiva delle *vertical farm* possano non essere esclusive di tali strutture, ma che per risultare efficaci richiedano il raggiungimento di equilibri specifici. L'introduzione dell'approccio passi-

tween vertical farms and bioshelters is desirable not only to reduce the energy required for climate control, but also to maximise the reduction of water, nutrient, and pesticide use that bioclimatic greenhouses enable – both compared to outdoor cultivation and relative to conventional greenhouse farming.

The objective of high-rise soil-based cultivation

Recent experiences demonstrating the competitiveness and profitability of soil cultivation in vertical farms highlight significant advantages in terms of pathogen rates reduction and maintenance of the natural ecosystem balance of the microbiotic population. These balances are essential for both plant health and soil carbon sequestration, which helps remove carbon from the atmosphere (Ellis, 2022), generating

beneficial effects for mitigating climate change (Boekhout, 2023).

The key advantage of using soil lies in preserving the balance of the natural microbiotic environment of the growth medium. This translates into increased plant resistance to pests and, more generally, pathogens, as well as reduced maintenance energy use, due to the lower need for pumping irrigation water and elimination of pumping nutrients, which would be otherwise typically produced at the expense of the ecosystems from which they are extracted.

The composition of the soil is deeply linked to the microbiotic life it hosts, but it also depends on the deeper soil layers, which cannot be present in a vertical cultivation system (Gross and Harrison, 2019). This means that implementing tiered cultivation in vertical greenhouses requires an update



| 03

vo nelle *vertical farm* è incoraggiata da studi recenti che dimostrano come il loro attuale alto impatto ambientale sia fortemente legato al consumo energetico per il controllo del clima (Zhang *et al.*, 2022), e che le strategie di controllo climatico passivo potrebbero ridurlo significativamente (Ahamed *et al.*, 2023).

Attualmente, la strategia di controllo climatico delle *vertical farm* dà risposta al consistente fabbisogno di energia principalmente attraverso la produzione da fonti rinnovabili, piuttosto che riducendo i fabbisogni stessi; cosa che ha portato a ipotizzare l'utilizzo delle *vertical farm* per la produzione energetica a beneficio dei tessuti costruiti circostanti (Blom *et al.*, 2024). Ma questa impostazione non risolve il problema del consumo energetico: lo sposta semplicemente più a monte, nei processi di produzione industriale degli impianti, che incorporano quantità significative di energia, proporzionali alla loro potenza (Martin *et al.*, 2023).

Ne deriva che le sfide nella direzione del controllo climatico passivo delle *vertical farm* sono numerose. Tra queste:

1. il posizionamento di masse di inerzia termica in altezza in misura sufficiente alle strategie passive dà luogo a problemi di natura strutturale e meccanica. Questo suggerisce la possibilità di non basare tutta l'inerzia termica sull'uso di terreno pensile, ma di limitare l'uso del terreno a quanto necessario alla salute delle piante;
2. la necessità di assicurare un adeguato guadagno solare anche in presenza di alte densità insediative richiede un compromesso tra l'esigenza di esposizione solare, tipica delle serre solari (Brunetti, 2022) e la necessità di evitare di ombreggiare le proprietà vicine, mantenendo il volume costruito all'interno dell'involuppo solare (Knowles, 1981);

use vertical farms for energy production to benefit the surrounding built environment (Blom *et al.*, 2024). However, this approach does not resolve the issue of energy consumption. It simply shifts it further upstream, into the industrial production processes of the systems, which incorporate significant amounts of energy, in proportion to their capacity (Martin *et al.*, 2023). As a result, the specific challenges in the direction of passive climate control in vertical farms are numerous. Among these:

1. positioning thermal mass at sufficient height for passive climate control strategies poses structural and mechanical challenges. This suggests the possibility of not relying entirely on elevated soil for thermal inertia, but limiting soil use to what is necessary for plant health, while achieving the additional required

thermal inertia through the use of phase change materials (Zhang *et al.*, 2019);

2. ensuring adequate solar gain even in high-density urban settings requires a compromise between the need for solar exposure, typical of solar greenhouses (Brunetti, 2022), and the need to avoid shading adjacent properties by keeping the built volume within the solar envelope (Knowles, 1981);
3. the need to revise preliminary criteria for the design of natural ventilation in relation to the greater heights involved requires increasing the role of the stack effect, while also countering the significant tendency towards the thermal stratification it can cause through constant air mixing at height. This can be achieved passively by exploiting the different temperatures of differently oriented

3. la necessità di rivedere i criteri preliminari per la progettazione della ventilazione naturale in funzione delle maggiori altezze implicate non può che passare per un aumento del ruolo dello *stack effect*, ma deve anche contrastare la consistente tendenza alla stratificazione termica a cui esso può dare luogo, attraverso un rimescolamento costante dell'aria in altezza, ottenibile in modo passivo sfruttando la differente temperatura di chiusure orientate diversamente, o in modo semiattivo tramite ventole.

Non vi è nulla che impedisca di approfondire i tre obiettivi separatamente, anche separatamente dalla sopraelevazione del suolo coltivato. È quanto avviene, ad esempio, nella sperimentazione di coltivazione verticale solare (nel caso specifico, idroponica) operata dall'azienda americana Novagric, incentrata sul posizionamento "solare" delle scaffalature coltivate. Ma un approccio complessivo alla climatizzazione naturale non può – più che mai in questo caso – che avvenire nel contesto di una profonda discussione della forma stessa della *vertical farm*, lungo una direttrice di reinvenzione tipologica che è, ad oggi, solo parzialmente tracciata. La sperimentazione più rispondente ai principi dell'esposizione solare nello scenario odierno è probabilmente la *vertical farm* di "Vertical Harvest" a Jackson, Wyoming, USA (Cox and Horton, 2018) (Fig. 4).

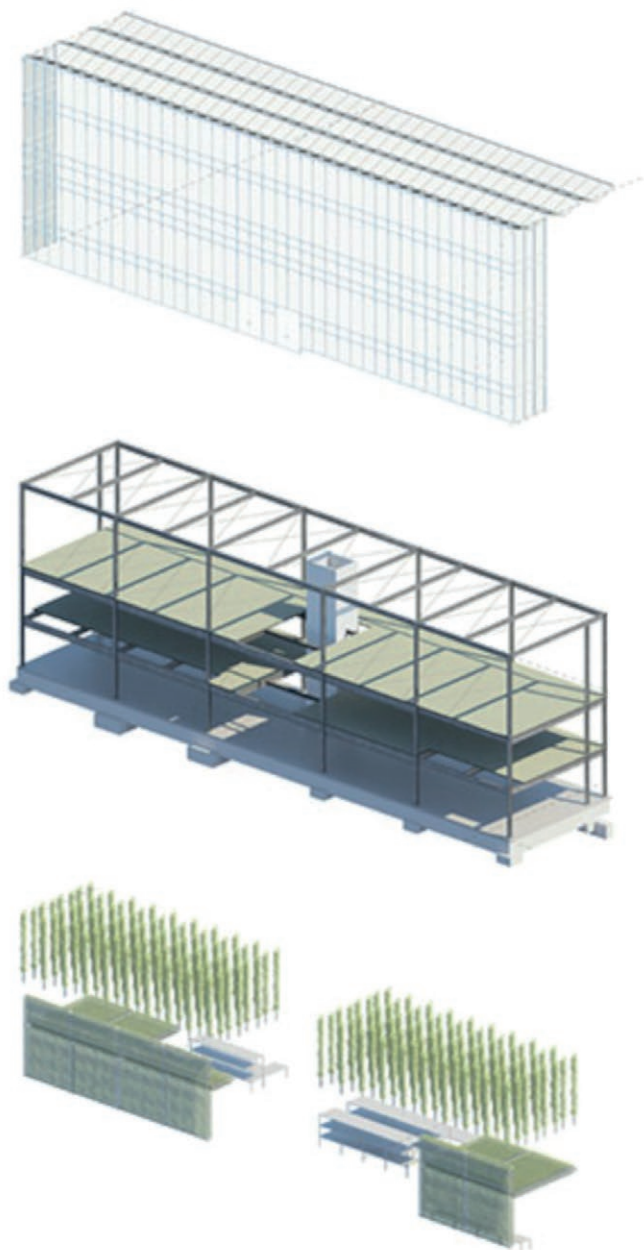
L'obiettivo dell'illuminazione naturale

Il perseguimento dell'illuminazione naturale implica non solo l'accettazione dell'impossibilità

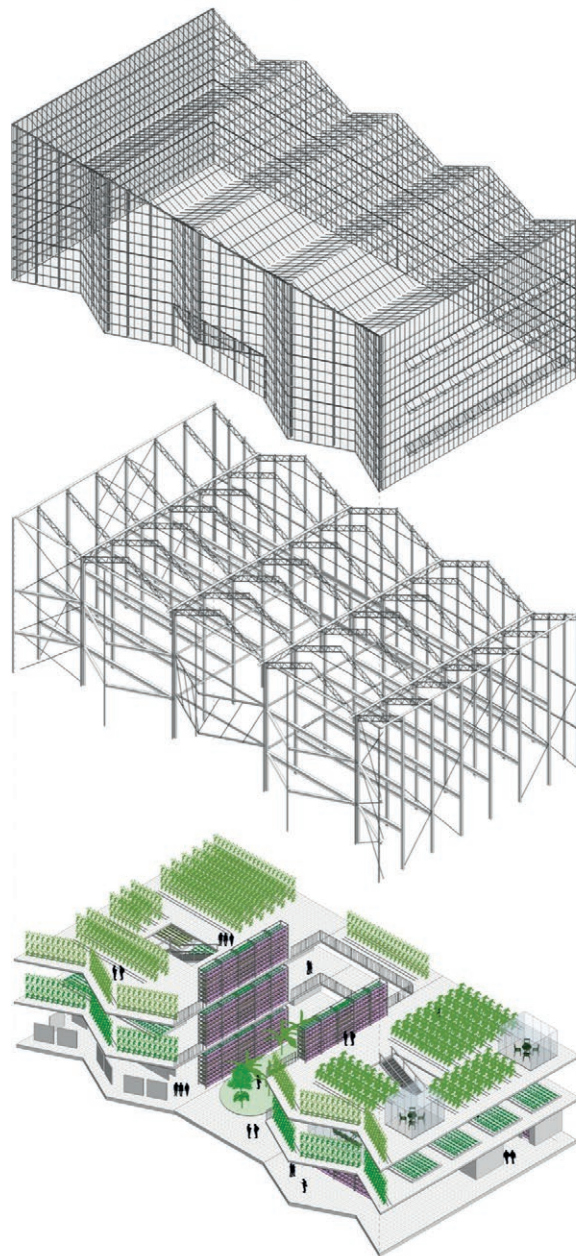
di sovvertire le stagionalità attraverso l'input di energia luminosa addizionale durante le stagioni con minore luminosità naturale o nei giorni di cielo coperto (Agritech Future, 2021), ma



05 | Vertical Harvest in Jackson, Wyoming ey/e Architects



Vertical farm in Beijing van Bergen Kolpa Architects



enclosures, or semi-actively by using fans. There is nothing to prevent these three objectives from being explored separately, and also separately from the elevation of cultivated soil. This is the case, for example, of the experimentation with solar vertical cul-

tivation (in this specific case, hydroponic) carried out by the American company Novagric, which involves the “solar” positioning of cultivated shelves. However, a comprehensive approach to natural climate control cannot – more than ever in this case – occur outside the context of a deep

reconsideration of the very form of the vertical farm, along a path of typological reinvention that is, to date, only partially mapped out. The experiment most aligned with the principles of solar exposure in the current scenario is likely the “Vertical Harvest” vertical farm in Jackson, Wyoming, USA (Cox

and Horton, 2018; Vertical Harvest Jackson) (Fig. 4).

The objective of natural lighting

This implies not only accepting the impossibility of counteracting seasonality through additional light energy input during seasons with reduced natural

anche la rinuncia a superare la disponibilità di ore di luce naturale presente, come invece è possibile con l'illuminazione artificiale (Tomar, 2024). Ma ciò non esclude che molto possa essere fatto per aumentare la disponibilità di luce naturale.

In particolare, è prevedibile che, in futuro questa necessità possa intensificare il ricorso a tecniche di riflessione solare, sia speculare che diffusa (Choubchilangroudi e Zarei, 2021; Papakonstantinou *et al.*, 2021), alla sperimentazione di soluzioni innovative come i rivestimenti fluorescenti (Yalçın e Ertürk, 2020), e all'adozione di strategie ibride, attive o passive di tipo adattivo (Dinneen, 2023).

Conclusioni

Molte delle soluzioni necessarie per ripensare le *vertical farm* in chiave bioclimatica richiedono il recupero di approcci non *mainstream*, quali la capacità di ragionare in termini di rigenerazione naturale dei suoli e di chiusura dei cicli naturali, la capacità di applicare strategie bioclimatiche sofisticate in modo quantitativamente accurato, non raggiungibile attraverso modelli semplificati, e la capacità di perseguire l'illuminazione naturale tramite l'utilizzo di riflettori solari impostabili su scale di regolazione coesistenti – stagionale, giornaliera e in tempo reale. Ma anche, e non da ultimo, la volontà di non rinunciare a ricercare, nelle situazioni urbane, una composizione dell'irrisolto conflitto tra le necessità di orientamento e morfologiche dell'architettura solare passiva e quelle di salvaguardia della dimensione umana nella costruzione dell'isolato e della città. Questo stato di cose suggerisce che l'interpretazione della *vertical farm* come interfaccia tra livelli tecnici differenziati e codici semantici inesplorati possa richiedere, da una parte, la combi-

light or on overcast days (Agritech Future, 2021), but also relinquishing the ability to exceed the available hours of natural light, as can be done with artificial lighting (Tomar, 2024). However, this does not mean that much cannot be done to increase the availability of natural light.

In particular, it is foreseeable that, in the future, this need may intensify the use of solar reflection techniques, both specular and diffuse (Choubchilangroudi and Zarei, 2021; Papakonstantinou *et al.*, 2021), the experimentation of innovative solutions such as fluorescent coatings (Yalçın and Ertürk, 2020), and the adoption of adaptive hybrid strategies, both active and passive (Dinneen, 2023).

Conclusions

Many of the solutions necessary to rethink vertical farms from a biocli-

matic perspective require the revival of non-mainstream approaches. These comprise the ability to think in terms of natural soil regeneration and the closure of natural cycles, the ability to apply sophisticated bioclimatic strategies in a quantitatively precise manner – not achievable through simplified models – and the ability to pursue natural lighting through the use of solar reflectors adjustable on coexisting scales – seasonal, daily, and real-time. But also, and not least, the desire not to give up seeking, in urban contexts, a solution to the never-ending conflict between the orientation and morphological requirements of passive solar architecture, and the need to safeguard the human dimension in the construction of blocks and cities.

This situation suggests that interpreting the vertical farm as an interface between differentiated technical levels

nazione di approcci digitali (come il controllo automatico e l'applicazione di *digital twin*) e conoscenze solide e antiche come le pratiche di coltivazione biodinamica, fondate sull'assestamento delle risposte delle specifiche specie vegetali; e dall'altra, l'invenzione di nuove relazioni di paesaggio all'interno dei sistemi urbani e l'accettazione dell'ineluttabilità di rapporti sempre più bionici, sempre più intrecciati, tra la natura, l'uomo e i suoi artefatti.

Sperimentazioni non strettamente classificabili come *vertical farm*, ma prossime ad esse, quali la conversione a serra di edifici multipiano non finiti (Morabito, 2021) e la sopraelevazione a serra "verde" sono di per sé tecnologicamente "neutre", poiché interpretabili in modi molteplici, non necessariamente improntati a approcci solari passivi. Ma ad esse iniziano ad affiancarsi altri segnali di apertura di nuovi percorsi (Negrello, 2024). Uno dei principali tra questi è partito dalla Cina (la nazione dotata della maggiore estensione di serre solari agricole), dove lo Studio Van Bergen Kolpa, avente sede nei Paesi Bassi (il paese che vanta la più importante tradizione di serre agricole in Europa) ha recentemente completato la realizzazione di una serra multipiano climatizzata in modo parzialmente passivo (Astbury, 2024), intermedia tra il concetto "ortodosso" di *vertical farm* "a torre" e quello affacciato verso il sole tipico dell'architettura solare, ottenuta operando movimentazioni morfologiche dettate non solo da considerazioni funzionali, ma anche espressive, mirate alla definizione di nuovi rapporti l'infrastruttura produttiva e il paesaggio. Si tratta di una linea di ricerca improntata alla sintesi, che certamente va nella direzione di una mediazione tra le necessità di efficiente caratterizzazione di forma ed esposizione, ma anche in di una maggiore naturalità complessiva. La

and unexplored semantic codes may require the combination of digital approaches (such as automated control and the application of digital twins) and well established, ancient knowledge. Such know-how covers biodynamic farming practices that adapt to the responses of specific plant species, besides the invention of new landscape relationships within urban systems and acceptance of the inevitability of increasingly bionic intertwined relationships between nature, humans, and their artifacts.

Experiments not strictly classifiable as vertical farms, but closely related to them, such as the conversion of unfinished multi-story buildings into greenhouses (Morabito, 2021) and the addition of "green" roof-greenhouse extensions are themselves technologically "neutral", as they can be interpreted in multiple ways, not necessar-

ily based on passive solar approaches. But these are now being joined by other signs of new pathways. One of the main developments has originated in China (the nation with the largest area of agricultural solar greenhouses), where the Studio Van Bergen Kolpa, based in The Netherlands (the country with the most significant tradition of agricultural greenhouses in Europe) has recently completed a partially passively climatized multi-story greenhouse (Astbury, 2024). This project lies somewhere between the "orthodox" concept of a "tower" vertical farm and the sun-facing designs typical of passive solar architecture, achieved through morphological adaptations dictated not only by functional considerations, but also expressive ones, aimed at defining new relationships between productive infrastructure and the landscape.

conseguenza più interessante di tali sperimentazioni potrebbe essere quella di una traslazione del concetto di *vertical farm* da un'impostazione *high-tech* a una *low-tech*, che, gettando le basi per una maggiore accessibilità e democratizzazione dell'approccio tecnologico in questione, potrebbe rimuovere le barriere che ne hanno – è evidente – finora ostacolato la diffusione.

REFERENCES

- Agritech Future (2021), "UK's Largest Vertical Farm that Uses Only Sunlight Begins First Harvest", *Agritech Future*, October 29. Available at: <https://www.agritechfuture.com/vertical-farming/uks-largest-vertical-farm-that-uses-only-sunlight-begins-first-harvest> (Accessed on 04/02/2025).
- Ahamed, M.S., Sultan, M., Monfet, D., Zahid, A., Bilal, M., Ahsan, T.M.A., Achour, Y. (2023), "A critical review on efficient thermal environment controls in indoor vertical farming", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 425, 138923. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138923>.
- Al-Chalabi, M. (2015), "Vertical farming: Skyscraper sustainability?", *Sustainable Cities and Society*, Vol. 18, pp. 74-77. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.06.003>.
- Astbury, J. (2024), "Van Bergen Kolpa Architecten designs Vertical Farm Beijing as a "beacon in the city", *Dezeen*, 18 May. Available at: <https://www.dezeen.com/2024/05/18/van-bergen-kolpa-architecten-vertical-farm-beijing-urban-horticulture> (Accessed on 04/02/2025).
- Blom, T., Jenkins, A., van den Dobbelsteen, A.A.J.F. (2024), "Synergetic urbanism: a theoretical exploration of a vertical farm as local heat source and flexible electricity user", *Sustainable Cities and Society*, Vol. 103: 105267. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105267>.
- Bomford, M. (2023), "More bytes per acre: do vertical farming's land sparing promises stand on solid ground?", *Agriculture and Human Values*, Vol. 40, pp. 879-895. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10460-023-10472-0>.
- Brunetti, G.L. (2022), *Design and Construction of Bioclimatic Wooden Greenhouses – vol. 1 – Preliminary Design*, ISTE and Wiley, Paris and New York.
- Choubchilangroudi, A., Zarei, A. (2022), "Investigation the effectiveness of light reflectors in transmitting sunlight into the vertical farm depth to reduce electricity consumption", *Cleaner Engineering and Technology*, Vol. 7: 100421. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100421>.
- Cox, J.C., Horton, M.J. (2018), "Vertical Harvest of Jackson, Wyoming", *B>Quest*. Available at: <https://www.westga.edu/~bquest/2018/verticalharvest2018.pdf> (Accessed on 04/02/2025).
- Despommier, D.D. (2011), *The vertical farm : feeding the world in the 21st century*, St. Martin's Press, New York.
- Dinneen, J. (2023), "Vertical farm cuts energy use 75 per cent by using sunlight", *New Scientist*, May 3. Available at: <https://future-of-farming.co.uk/news/newscientist.com/article/vertical-farm-cuts-energy-use-75-per-cent-by-using-sunlight> (Accessed on 04/02/2025).
- Ellis, J. (2022), "Meet the founder: Future Crops CEO Gary Grinspan makes the case for soil-based vertical ag", *AFN – agfundernews.com*, April 25. Available at: <https://agfundernews.com/future-crops-gary-grinspan-makes-case-soil-based-vertical-ag-meet-the-founder> (Accessed on 04/02/2025).
- Gross, C.D., Harrison, R.B. (2019), "The Case for Digging Deeper: Soil Organic Carbon Storage, Dynamics, and Controls in Our Changing World", *Soil Systems*, Vol. 3(2): 28. Available at: <https://doi.org/10.3390/soilsystems3020028>.
- Hallett, S., Hoagland, L., Toner, E. (2016), "Urban Agriculture: Environmental, Economic, and Social Perspectives", *Horticultural Reviews*, Vol. 44, pp. 65-120. Available at: <https://doi.org/10.1002/9781119281269.ch2>.
- Islam, R., Asiabanpour, B. (2023), "Smart Passive Ambient Control For Indoor Vertical Farming by Simulation", *2023 Congress in Computer Science, Computer Engineering, and Applied Computing (CSCE)*, pp. 916-921. Available at: <https://www.american-cse.org/csce2023-ieee/pdfs/CSCE2023-5LlpKs7cpb4k2UysbLCuOx/275900a916/275900a916.pdf> (Accessed on 04/02/2025).

This is a line of research aimed at synthesis, certainly moving toward reconciling the need for efficient solar-oriented form and exposure, while also fostering greater overall naturalness. The most interesting consequence of these experiments could be the shift of the vertical farm concept from a high-tech to a low-tech model, laying the groundwork for greater accessibility and democratisation of the technological approach in question. This could remove the barriers that have so far – quite evidently – hindered its widespread adoption.

- Kalantari, F., Tahir, O.M., Akbari, J.R., Fatemi, E. (2018), "Opportunities and challenges in sustainability of vertical farming: a review", *Journal of Landscape Ecology*, Vol. 11: 1, pp. 35-60. Available at: <https://doi.org/10.1515/jlecol-2017-0016>.
- Knowles, R.L. (1981), *Sun Rhythm Form*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Manso, M., Castro-Gomes, J. (2015), "Green wall systems: A review of their characteristics", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 41, pp. 863-871. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.203>.
- Martin, M., Elnour, M., Siñol, A.C. (2023), "Environmental life cycle assessment of a large-scale commercial vertical farm", *Sustainable Production and Consumption*, Vol. 40, pp. 182-193. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.06.020>.
- Morabito, V. (2021), "Ecologia, paesaggio e agricoltura urbana. Un involucro innovativo per serre verticali", *TECHNE*, Vol. 22, pp. 149-158. Available at: <https://doi.org/10.36253/techne-10588>.
- Negrello, M. (2024), "Agricoltura urbana indoor: dalla sperimentazione progettuale innovativa alla norma", *TECHNE*, Vol. 27, pp. 81-88. Available at: <https://dx.doi.org/10.36253/techne-15136>.
- Papakonstantinou, I., Portnoi, M., Debije, M.G. (2021), "The Hidden Potential of Luminescent Solar Concentrators", *Advanced Energy Materials*, Vol. 11: 2002883. Available at: <https://doi.org/10.1002/aenm.202002883>.
- Prance, G.T. (2022), "A Paradise for economic botanists. The Eden project", *Economic Botanist*, Vol. 56, pp. 226-230. Available at: <https://www.jstor.org/stable/4256575>.
- Soli Organic Inc. (2024), "Fresh from Texas: Inside San Antonio's first soil-based vertical farm, Soli Organic cultivates 140,000 square feet of organic produce and economic opportunity", *PR Newswire*, Jun 05. Available at: <https://www.soliorganic.com/2024/06/fresh-from-texas-inside-san-antonios-first-soil-based-vertical-farm-soli-organic-cultivates-140000-square-feet-of-organic-produce-and-economic-opportunity> (Accessed on 04/02/2025).
- Song, S., Ong, E.J.K., Lee, A.M.J., Chew, F.T. (2024), "How crop breeding programs can improve plant factories' business and environmental sustainability Insights from a farm level analysis", *Sustainable Production and Consumption*, Vol. 44: pp. 298-311. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.12.020>.
- Southey, F. (2021), "First soil-based vertical farm developed for greater crop stability and resistance", *Foodnavigator*, Dec 09. Available at: <https://www.foodnavigator.com/Article/2021/12/09/Future-Crops-develops-first-soil-based-indoor-vertical-farm-developed-for-greater-crop-stability-and-resistance> (Accessed on 04/02/2025).
- Teo, H.C., Zeng, Y., Sarira, T.V., Fung, T.K., Zheng, Q., Song, X.P., Chong, K.Y., Koh, L.P. (2021), "Global urban reforestation can be an important natural climate solution", *Environmental Research Letters*, Vol. 16: 034059. Available at: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe783>.
- Teo, Z.W.N., Yu, H. (2024), "Genetic breeding for indoor vertical farming", *Sustainable Agriculture*, Vol. 2: 13. Available at: <https://doi.org/10.1038/s44264-024-00021-5>.
- Tomar, A. (2024), "Enhancing crop productivity in photovoltaic greenhouses using extended PAR-based photosynthesis", *Solar Energy*, Vol. 276: 112689. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112689>.
- Walters, S.A., Stoelzle Midden, K. (2018), "Sustainability of Urban Agriculture: Vegetable Production on Green Roofs", *Agriculture*, Vol. 8: 168. Available at: <https://doi.org/10.3390/agriculture8110168>.
- Zhang, Y., Marcelis, L.F.M. (2021), "Current status and future challenges in implementing and upscaling vertical farming systems", *Nature Food*, Vol. 2, pp. 944-956. Available at: <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00402-w>.