



Luce senza consumo

Design per un'illuminazione rigenerativa negli ecosistemi naturali

testo di/text by Gianpiero Alfarano, Alessandro Spennato

gianpiero.alfarano@unifi.it - alessandro.spennato@unifi.it / University of Florence, Italy

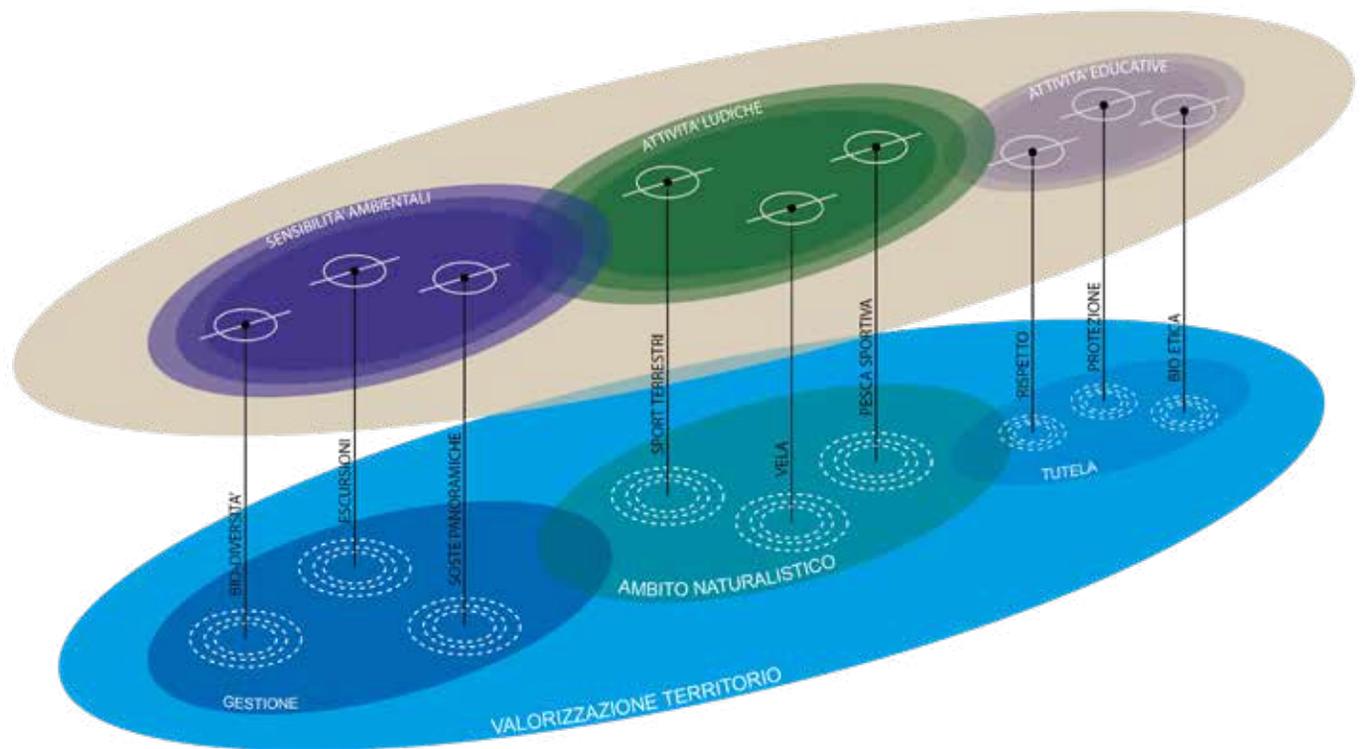
Light without consumption. Design for regenerative lighting in natural ecosystems

Introduction

In recent years, the concept of public lighting has undergone a radical transformation, evolving from an exclusively technical function to a key element for environmental sustainability and landscape enhancement. Regenerative lighting is emerging as a new paradigm that goes beyond simply reducing energy consumption, integrating innovative materials and designing strategies that harmonise with natural ecosystems (Alfarano, 2023). This research analyses the case study of the Andolaccio area, located along the shores of Lake Bilancino in Tuscany, as an experimental model for the application of passive lighting technologies. The experiment focuses on photoluminescent materials, zero-consumption lighting strategies and sustainable energy storage systems. These solutions are part of a broader reflection on reducing light pollution and harnessing light to generate innovative perceptual experiences without negatively impacting the environment (Alfarano, 2015). Artificial lighting plays a crucial role in transforming public spaces. However, its misuse has generated significant side effects, including alterations to ecosystems and disruptions to the circadian rhythms of local fauna and flora (Gaston et al., 2022). The adoption of technologies that reduce energy consumption and enhance the nighttime landscape without causing visual disturbance is a

Introduzione

Negli ultimi anni, il concetto di illuminazione pubblica ha subito una radicale trasformazione, evolvendo da una funzione esclusivamente tecnica a un elemento chiave per la sostenibilità ambientale e la valorizzazione del paesaggio. L'illuminazione rigenerativa si pone come un nuovo paradigma che supera la semplice riduzione del consumo energetico, integrando materiali innovativi e strategie progettuali in grado di armonizzarsi con gli ecosistemi naturali (Alfarano, 2023). Questa ricerca analizza il caso studio dell'area di Andolaccio, situata lungo le sponde del Lago di Bilancino, in Toscana, come modello sperimentale per l'applicazione di tecnologie di illuminazione passiva. La sperimentazione si concentra su materiali fotoluminescenti, strategie di illuminazione a consumo zero e sistemi di accumulo energetico sostenibile. Queste soluzioni si inseriscono in una riflessione più ampia sulla riduzione dell'inquinamento luminoso e sulla capacità della luce di generare esperienze percettive innovative senza impattare negativamente sull'ambiente (Alfarano, 2015). L'illuminazione artificiale, infatti, ha un ruolo critico nella trasformazione dello spazio pubblico, ma il suo abuso ha generato effetti collaterali significativi, tra cui alterazioni degli ecosistemi e interferenze nei ritmi circadiani della fauna e della flora locali (Gaston et al., 2022). L'adozione di tecnologie che riducano il consumo energetico e valorizzino il paesaggio notturno senza generare disturbo visivo è una sfida centrale per la progettazione contemporanea (Holker et al., 2020). Andolaccio si configura come un laboratorio naturale per testare soluzioni di illuminazione che rispondano a queste necessità. La posizione strategica dell'area, caratterizzata da un'ampia estensione verde e dalla presenza di percorsi naturali, la rende ideale per sperimentare nuove modalità di fruizione degli spazi pubblici notturni. L'uso di pigmenti fotoluminescenti consente di creare segnalazioni luminose senza necessità di alimentazione elettrica, mentre l'integrazione con sistemi di accumulo solare apre nuove prospettive per un'illuminazione urbana energeticamente autonoma (Alfarano, 2023). Questo approccio si inserisce nel più ampio dibattito sulla *smart lighting ecology*, che considera la luce non solo come un elemento funzionale, ma come uno strumento capace di generare valore ecologico e culturale. Studi recenti sul *lighting design* confermano l'importanza di adottare soluzioni che minimizzino l'impatto sulla biodiversità e favoriscano una maggiore consapevolezza dell'ambiente notturno da parte delle comunità locali (Kyba et al., 2021). L'illuminazione rigenerativa proposta in questa ricerca si basa su tre principi chiave: autonomia energetica, grazie all'uso di tecnologie luminose passive e materiali reattivi alla luce; integrazione ecologica, con un impatto minimo sugli ecosistemi locali; e valorizzazione dell'esperienza percettiva, attraverso soluzioni progettuali che enfatizzano la qualità dello spazio notturno. L'analisi di questo caso studio offre spunti per lo sviluppo di linee guida replicabili in altri contesti,



central challenge for contemporary design (Holker et al., 2020). Andolaccio is a natural laboratory for testing lighting solutions that meet these needs. The strategic location of the area, characterised by extensive green spaces and natural trails, makes it ideal for experimenting with new ways of using public spaces at night. The use of photoluminescent pigments enables the creation of light signals without the need for electricity. At the same time, integration with solar storage systems opens up new possibilities for energy-autonomous urban lighting (Alfarano, 2023). This approach is part of the broader debate on smart lighting ecology, which considers light not only as a functional element but as a tool capable of generating ecological and cultural value. Recent studies on lighting design confirm the importance of adopting solutions that minimise the impact on biodiversity and promote greater awareness of the nighttime environment among local communities (Kyba et al., 2021). The regenerative lighting proposed in this research is based on three key principles: energy autonomy, achieved through the use of passive lighting technologies and light-reactive materials; ecological integration, with minimal impact on local ecosystems; and enhancement of the perceptual experience, through design solutions that emphasise the quality of the nighttime space. The analysis of this case study provides insights for developing guidelines that can be replicated in other contexts, proposing design as a tool for redefining the relationship between lighting, territory, and sustainability. This article will therefore explore the technologies used, the co-design methodologies adopted, and comparisons with other international experiences of sustainable lighting design, contributing to the academic debate on the transformation of public lighting towards a more ecological and resilient approach.

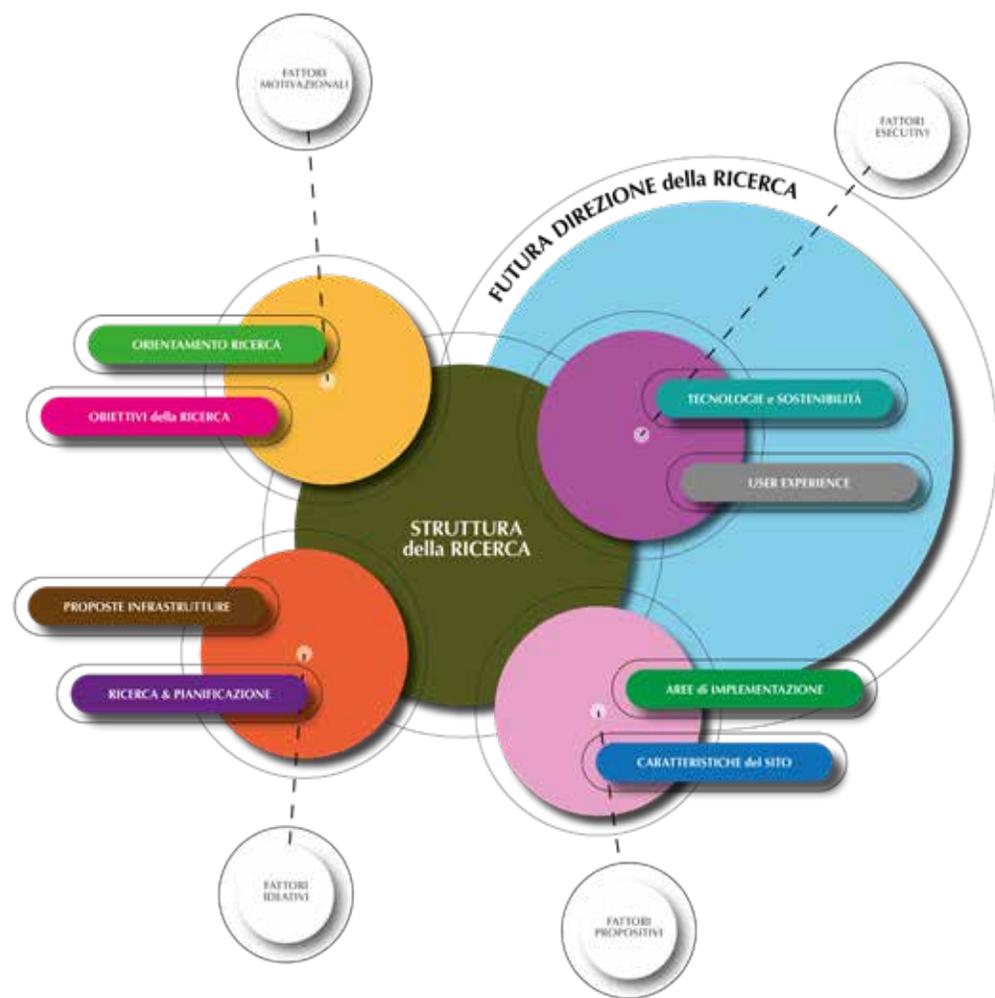
proponendo il design come strumento per ridefinire il rapporto tra illuminazione, territorio e sostenibilità. Questo articolo esplorerà quindi le tecnologie impiegate, le metodologie di co-progettazione adottate e il confronto con altre esperienze internazionali di *lighting design* sostenibile, con l'obiettivo di contribuire al dibattito accademico sulla trasformazione dell'illuminazione pubblica in un'ottica più ecologica e resiliente.

Materiali e metodi

L'approccio metodologico adottato in questa ricerca si basa su un modello sperimentale che coniuga l'uso di materiali innovativi e tecniche di illuminazione rigenerativa con l'analisi del contesto naturale e le esigenze di fruizione dello spazio pubblico. Il caso studio dell'area di Andolaccio, parte del più ampio intervento di riqualificazione del Lago di Bilancino, si configura come un laboratorio di sperimentazione per l'integrazione tra design, tecnologia e sostenibilità. L'adozione di materiali fotoluminescenti e l'implementazione di strategie di illuminazione a basso impatto sono state testate attraverso un processo iterativo che ha coinvolto diverse fasi di progettazione, prototipazione e verifica sul campo. L'uso dei pigmenti fotoluminescenti rappresenta il cuore dell'indagine, in quanto consente di ottenere una luce visibile nelle ore notturne senza ricorrere a fonti energetiche esterne. Questi materiali, la cui efficacia è stata dimostrata in precedenti ricerche nel campo del *lighting design* sostenibile (Alfarano, 2015), si basano sulla capacità di assorbire la luce solare durante il giorno e di rilasciarla gradualmente nel buio. L'applicazione su superfici pavimentali, arredi urbani e installazioni di segnalazione ha permesso di valutare le potenzialità di tali materiali in termini di durata, intensità luminosa e resistenza agli agenti atmosferici. Il processo di selezione dei materiali si è basato su criteri di efficienza luminosa, compatibilità ambientale e resistenza meccanica, prendendo in considerazione pigmenti a base di alluminati alcalino-terrosi attivati con europio e disprosio, già utilizzati con successo in altri contesti urbani e paesaggistici (Alfarano, 2023). Parallelamente, è stata adottata una metodologia di analisi del contesto che ha incluso lo studio delle caratteristiche morfologiche dell'area, l'osservazione delle dinamiche di fruizione e la valutazione dell'impatto della luce artificiale sulla biodiversità locale. L'indagine ha previsto il rilievo delle condizioni di illuminazione preesistenti e la simulazione degli effetti dei materiali fotoluminescenti attraverso test in condizioni reali. L'area di Andolaccio, caratterizzata da una morfologia eterogenea con tratti di sponde rinaturalizzate e percorsi pedonali, ha richiesto un'attenzione particolare nella scelta delle soluzioni illuminotecniche, al fine di garantire un equilibrio tra visibilità e rispetto per l'ambiente notturno. La sperimentazione ha evidenziato come la luce fotoluminescente possa rappresentare un'alternativa efficace all'illuminazione convenzionale nelle aree a bassa densità infrastrutturale, riducendo al minimo la necessità di manutenzione e consumo energetico. Per valutare l'efficacia del progetto, sono stati condotti test di laboratorio e verifiche sul campo, con particolare attenzione alla capacità dei materiali di mantenere un'intensità luminosa sufficiente nel corso della notte. I dati raccolti sono stati confrontati con le prestazioni di altri materiali luminescenti testati in ambito urbano e paesaggistico, al fine di individuare le configurazioni più adatte per l'area di intervento. Le analisi hanno incluso misurazioni fotometriche, test di esposizione agli agenti atmosferici e simulazioni di scenario per verificare l'interazione

Materials and methods

The methodological approach adopted in this research is based on an experimental model that combines the use of innovative materials and regenerative lighting techniques with the analysis of the natural context and the needs of public space users. The case study of the Andolaccio area, part of the broader redevelopment of Lake Bilancino, serves as a testing ground for integrating design, technology, and sustainability. The use of photoluminescent materials and the implementation of low-impact lighting strategies were tested through an iterative process involving several stages of design, prototyping and field testing. The use of photoluminescent pigments is at the heart of the investigation, as it enables visible light to be generated at night without relying on external energy sources. These materials, whose effectiveness has been demonstrated in previous research on sustainable lighting design (Alfarano, 2015), are based on their ability to absorb sunlight during the day and release it gradually at night. Applying them to flooring, street furniture, and signage has helped us understand how these materials perform in terms of their durability, brightness, and weather resistance. The material selection process was based on criteria of luminous efficiency, environmental compatibility, and mechanical resistance, taking into account alkaline earth alumina pigments activated with europium and dysprosium, which have been successfully used in other urban and landscape contexts (Alfarano, 2023). At the same time, a context analysis methodology was adopted, which included studying the morphological characteristics of the area, observing usage dynamics, and assessing the impact of artificial light on local biodiversity. The survey involved surveying the existing lighting conditions and simulating the effects of photoluminescent materials through tests in real conditions. The Andolaccio area, characterised by a heterogeneous morphology with sections of naturalised banks and footpaths, required particular attention in the choice of lighting solutions to ensure a balance between visibility and respect for the nighttime environment. The experiment demonstrated that photoluminescent light can be an effective alternative to conventional lighting in areas with low infrastructure density, thereby minimising maintenance and energy consumption. To assess the project's effectiveness, laboratory and field tests were conducted, with a particular focus on the material's ability to maintain sufficient light intensity throughout the night. The data collected was compared with the performance of other luminescent materials tested in urban and landscape settings in order to identify the most suitable configura-



tions for the area of intervention. The analyses included photometric measurements, weathering tests and scenario simulations to verify the interaction between light and the natural environment. Integration with solar microcell-based energy storage systems was evaluated as a potential extension of the project, enabling a wider range of applications and increased lighting autonomy in low-sunlight conditions. The method adopted for implementing the project is based on an iterative approach, in which practical experimentation plays a central role in validating the design solutions. The involvement of the Department of Architecture of the University of Florence and the collaboration with the Municipality of Barberino di Mugello have made it possible to develop a model that can be replicated in other contexts, offering ideas for the integration of sustainable lighting technologies in the design of public spaces. The effectiveness of the regenerative lighting model was evaluated through a comparative analysis with other sustainable design experiences, highlighting the potential and critical issues of the solutions adopted. The comparison with international case studies has made it possible to identify optimisation strategies and possible future developments, with particular reference to the scalability of the project and its applicability in urban and natural environments. The methodological approach outlined here is therefore part of a broader reflection on the possibility of redefining the role of light in

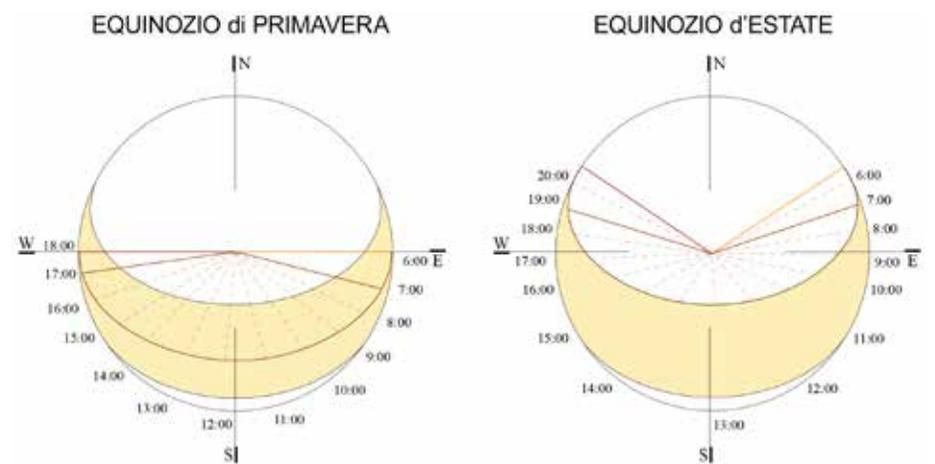
public spaces, promoting a lighting model that is not only efficient but also capable of generating environmental and cultural value.

Discussion

The experiment conducted in the Andolaccio area has highlighted the potential of regenerative lighting as a sustainable design tool capable of responding to environmental challenges and redefining the nighttime landscape's perceptual experience. The use of photoluminescent materials has proven to be an effective solution for ensuring visibility in public spaces with minimal energy impact, offering a viable alternative to traditional artificial lighting. This result is particularly significant in contexts where conventional lighting would involve high energy consumption and interference with the local ecological balance. Photoluminescence enables the generation of diffuse, non-invasive light, thereby avoiding the light pollution that often characterises urban and peri-urban installations. Analysis of the collected data showed that surfaces treated with luminescent pigments maintain effective light emission for a sufficient period to ensure the orientation and use of public spaces after sunset. However, the duration of luminescence was influenced by atmospheric conditions and the intensity of solar radiation during the day, factors that determine variations in the material's effectiveness. Measurements showed that maximum light intensity was recorded in the first two hours



after sunset, with a gradual decline in the following hours. This trend suggests that the use of photoluminescence should be complemented by solutions, such as solar storage systems or materials with varying release times, to ensure greater continuity of lighting at night (Alfarano, 2015). From an environmental sustainability perspective, the project confirmed that the use of photoluminescent materials significantly reduces the ecological footprint of public lighting. Compared to traditional systems based on street lamps and spotlights powered by the mains, passive lighting does not require complex infrastructure or ongoing maintenance, resulting in a reduction in resource consumption and operating costs. Furthermore, the total absence of direct light emissions prevents the negative effects of light pollution on local wildlife, avoiding interference with the circadian rhythms of animal species present in the Andolaccio area. This aspect is particularly relevant in an area of high biodiversity, where ecosystem protection is a priority for landscape management (Holker et al., 2020). A further point for consideration concerns the integration of regenerative lighting into territorial redevelopment strategies. The experiment conducted demonstrates that the use of luminescent materials can become a distinctive feature for enhancing public spaces, giving them a new visual identity, particularly in paths and rest areas. The perceptual effect generated by luminescence creates a new sensory experience, transforming lighting into a narrative element that guides the enjoyment of the nighttime landscape. This approach presents interesting prospects for the application of photoluminescence in other contexts, such as urban parks, nature trails, and protected areas, where respect for the environment is combined with the need to ensure safety and orientation for visitors (Alfarano, 2023). The critical issues that emerged during the experiment primarily concern



tra luce e contesto naturale. L'integrazione con sistemi di accumulo energetico a base di microcelle solari è stata valutata come possibile estensione del progetto, permettendo di ampliare il range di applicazioni e garantire una maggiore autonomia luminosa in condizioni di bassa esposizione solare. Il metodo adottato per l'implementazione del progetto si basa su un approccio iterativo, in cui la sperimentazione pratica ha avuto un ruolo centrale nel processo di validazione delle soluzioni progettuali. Il coinvolgimento del Dipartimento di Architettura dell'Università di Firenze e la collaborazione con il Comune di Barberino di Mugello hanno permesso di sviluppare un modello di intervento replicabile in altri contesti, offrendo spunti per l'integrazione di tecnologie luminose sostenibili nella progettazione degli spazi pubblici. L'efficacia del modello di illuminazione rigenerativa è stata valutata attraverso un'analisi comparativa con altre esperienze di design sostenibile, evidenziando le potenzialità e le criticità delle soluzioni adottate. Il confronto con casi studio internazionali ha permesso di individuare strategie di ottimizzazione e possibili sviluppi futuri, con particolare riferimento alla scalabilità del progetto e alla sua applicabilità in ambiti urbani e naturali. L'approccio metodologico qui delineato si inserisce quindi in una più ampia riflessione sulla possibilità di ridefinire il ruolo della luce negli spazi pubblici, promuovendo un modello di illuminazione che sia non solo efficiente, ma anche in grado di generare valore ambientale e culturale.

Discussione

La sperimentazione condotta nell'area di Andolaccio ha messo in luce il potenziale dell'illuminazione rigenerativa come strumento di progettazione sostenibile, capace di rispondere alle sfide ambientali e di ridefinire l'esperienza percettiva del paesaggio notturno. L'uso di materiali fotoluminescenti si è rivelato una soluzione efficace per garantire visibilità negli spazi pubblici senza impatto energetico, offrendo un'alternativa concreta all'illuminazione artificiale tradizionale. Questo risultato è particolarmente significativo in contesti in cui l'illuminazione convenzionale comporterebbe un consumo

sotto/below: Stato attuale di uno dei sentieri del parco (in alto) e fotoinserimento dei ciottoli in vetro borosilicato con inserto di pigmenti fotoluminescenti inseriti nella pavimentazione dei sentieri principali e nelle aree di sosta (in basso) / *Current state of one of the park's paths (top) and photo insertion of borosilicate glass pebbles with photoluminescent pigments inserted into the paving of the main paths and rest areas (bottom)*

the variability of light performance in response to environmental factors and the limited diffusion of large-scale passive lighting technologies. The performance of photoluminescent materials is closely linked to solar exposure conditions, which implies the need to identify strategies to optimise their performance during periods of lower radiation. Furthermore, the large-scale production and commercialisation of these materials are still under development, which may hinder their widespread adoption. However, growing interest in sustainable lighting technologies and advances in luminescent materials research suggest that the range of applications will expand in the coming years (Gaston et al., 2022). The methodological approach adopted in this research has enabled the testing of photoluminescence as a potential solution for lighting public spaces, providing useful guidelines for future implementations. The combination of laboratory analysis, field tests and comparison with other international experiences has made it possible to evaluate the effectiveness of the experimental model and outline possible developments for its improvement. The adoption of co-design strategies and the involvement of the local community could represent a further step towards consolidating the role of regenerative lighting in the participatory design of public spaces. Overall, the experiment conducted in the Andolaccio area confirms that lighting design can be a key element in the transition towards sustainable design models. Regenerative lighting not only reduces energy impact but also helps to create new perceptual scenarios that enhance the relationship between people and the environment. The integration of photoluminescent solutions with other low-impact technologies could pave the way for a new generation of lighting systems in which light becomes an integral part of ecosystems without altering their natural balance. This study, therefore, represents a starting point for further research aimed at exploring the potential of passive lighting in different contexts, consolidating the role of design as a tool for innovation and sustainability.

Results

The analysis conducted in the Andolaccio area yielded significant data on the effectiveness and potential of photoluminescent materials in a natural and landscape context. The results of the experiment demonstrate how the use of these materials can contribute to redefining the lighting of public spaces, reduce environmental impact, and improve nighttime perception of the landscape. Surfaces treated with luminescent pigments demonstrated the ability to absorb sunlight and gradually release it in the dark, providing diffused



energetico elevato e un'interferenza con gli equilibri ecologici locali. La fotoluminescenza, infatti, consente di generare una luce diffusa e non invasiva, evitando l'inquinamento luminoso che spesso caratterizza le installazioni urbane e periurbane. L'analisi dei dati raccolti ha dimostrato che le superfici trattate con pigmenti luminescenti mantengono un'emissione luminosa efficace per un arco temporale sufficiente a garantire l'orientamento e la fruizione degli spazi pubblici dopo il tramonto. La durata della luminescenza è stata tuttavia influenzata dalle condizioni atmosferiche e dall'intensità dell'irraggiamento solare durante il giorno, fattori che determinano variazioni nell'efficacia del materiale. Le misurazioni effettuate hanno evidenziato che la massima intensità luminosa si registra

lighting for a variable period of time, depending on the intensity of daylight. Tests conducted showed good light performance in the first hours after sunset, with a gradual decrease in intensity. Although reduced compared to initial values, this intensity was still sufficient to indicate paths and improve user orientation. In terms of resistance and durability, the photoluminescent materials used in the project showed excellent ability to maintain their luminous properties even after prolonged exposure to atmospheric agents. The experiment demonstrated that the decay of photoluminescent capacity is limited, with a loss of intensity visible only after prolonged exposure to adverse weather conditions. This confirms the validity of choosing these materials for outdoor applications, especially in contexts where routine maintenance of lighting infrastructure is complex or costly (Chen et al., 2021). Additionally, surface abrasion tests have demonstrated that luminescent pigments incorporated into paving materials and street furniture retain their efficiency even under mechanical stress, such as foot traffic and the erosive actions of water and wind. One of the most significant aspects to emerge from the research concerns the effectiveness of photoluminescence in reducing light pollution, a phenomenon increasingly recognised for its negative effects on natural ecosystems and human health (Falchi et al., 2019). The absence of traditional artificial light sources has enabled the preservation of the natural darkness in the area, thereby reducing interference with local wildlife and enhancing the perceived quality of the nighttime landscape. Measurements have confirmed that the light emitted by photoluminescent materials does not produce significant light dispersion into the atmosphere, thus avoiding the phenomenon of over-illumination that characterises many urban and peri-urban areas. This result suggests that passive lighting may be a viable alternative for contexts where it is necessary to ensure the usability of public spaces without altering the natural cycle of darkness and light. From the perspective of public space usage, the experiment demonstrated a positive impact on users' perceptions of the environment. Participants in the exploratory tests conducted in the Andolaccio area reported a greater sense of safety and orientation thanks to the presence of discreet light signals, which facilitate the perception of paths and rest areas without being intrusive or disturbing. The aesthetic quality of the luminescence, characterised by soft, glare-free light, was particularly appreciated, suggesting that this technology could also be used for artistic and landscaping purposes. Recent studies have confirmed that soft, diffused lighting has a positive effect on users' mental and physical well-being,

nelle prime due ore dopo il tramonto, con un graduale calo nelle ore successive. Questo andamento suggerisce che l'impiego della fotoluminescenza debba essere affiancato da soluzioni complementari, quali sistemi di accumulo solare o materiali con tempi di rilascio differenziati, per garantire una maggiore continuità dell'illuminazione nelle ore notturne (Alfarano, 2015). Dal punto di vista della sostenibilità ambientale, il progetto ha confermato che l'utilizzo di materiali fotoluminescenti riduce significativamente l'impronta ecologica dell'illuminazione pubblica. Rispetto ai tradizionali sistemi basati su lampioni e faretto alimentati da rete elettrica, l'illuminazione passiva non richiede infrastrutture complesse né manutenzione costante, contribuendo alla riduzione del consumo di risorse e dei costi operativi. Inoltre, la totale assenza di emissioni luminose dirette previene gli effetti negativi dell'inquinamento luminoso sulla fauna locale, evitando interferenze con i ritmi circadiani delle specie animali presenti nel territorio di Andolaccio. Questo aspetto si rivela particolarmente rilevante in un'area ad alta biodiversità, dove la tutela dell'ecosistema rappresenta una priorità per la gestione del paesaggio (Holker et al., 2020). Un ulteriore elemento di riflessione riguarda l'integrazione dell'illuminazione rigenerativa all'interno delle strategie di riqualificazione territoriale. La sperimentazione condotta dimostra che l'impiego di materiali luminescenti può diventare un elemento distintivo per la valorizzazione degli spazi pubblici, conferendo un'identità visiva inedita ai percorsi e alle aree di sosta. L'effetto percettivo generato dalla luminescenza crea un'esperienza sensoriale nuova, trasformando l'illuminazione in un elemento narrativo che guida la fruizione del paesaggio notturno. Questo approccio apre prospettive interessanti per l'applicazione della fotoluminescenza in altri contesti, come parchi urbani, percorsi naturalistici e aree protette, dove il rispetto per l'ambiente si coniuga con la necessità di garantire sicurezza e orientamento ai visitatori (Alfarano, 2023). Le criticità emerse nel corso della sperimentazione riguardano principalmente la variabilità delle prestazioni luminose in relazione ai fattori ambientali e l'ancora limitata diffusione di tecnologie di illuminazione passiva su larga scala. La resa dei materiali fotoluminescenti è strettamente legata alle condizioni di esposizione solare, il che implica la necessità di individuare strategie per ottimizzarne le performance nei periodi di minore irraggiamento. Inoltre, la produzione e la commercializzazione su vasta scala di questi materiali sono ancora in fase di sviluppo, e ciò può rappresentare un ostacolo alla loro adozione diffusa. Tuttavia, il crescente interesse per le tecnologie di illuminazione sostenibile e i progressi nella ricerca sui materiali luminescenti lasciano prevedere un ampliamento delle possibilità applicative nei prossimi anni (Gaston et al., 2022). L'approccio metodologico adottato in questa ricerca ha permesso di testare concretamente le potenzialità della fotoluminescenza come soluzione per l'illuminazione degli spazi pubblici, fornendo indicazioni utili per future implementazioni. La combinazione di analisi di laboratorio, test sul campo e confronto con altre esperienze internazionali ha consentito di valutare l'efficacia del modello sperimentale e di delineare possibili sviluppi per il suo miglioramento. L'adozione di strategie di co-design e il coinvolgimento della comunità locale potrebbero rappresentare un passo ulteriore per consolidare il ruolo dell'illuminazione rigenerativa nella progettazione partecipata dello spazio pubblico. Nel complesso, la sperimentazione condotta nell'area di Andolaccio conferma che il *lighting design* può essere un elemento chiave nella transizione verso modelli di progettazione sostenibile. L'illuminazione rigenerativa non solo riduce l'impatto energetico, ma contribuisce a creare nuovi scenari percettivi che valorizzano il rapporto tra uomo e ambiente. L'integrazione di soluzioni fotoluminescenti con altre tecnologie a basso impatto potrebbe aprire la strada a una nuova generazione di sistemi di illuminazione, in cui la luce diventa parte integrante degli ecosistemi senza alterarne gli equilibri naturali. Questo studio rappresenta quindi un punto di partenza per ulteriori ricerche volte a esplorare le potenzialità dell'illuminazione passiva in diversi contesti, consolidando il ruolo del design come strumento di innovazione e sostenibilità.

Risultati

L'analisi condotta nell'area di Andolaccio ha permesso di ottenere dati significativi riguardanti l'efficacia e le potenzialità dei materiali fotoluminescenti applicati a un contesto naturale e paesaggistico. I risultati della sperimentazione dimostrano come l'impiego di questi materiali possa contribuire a ridefinire l'illuminazione degli spazi pubblici, riducendo l'impatto ambientale e migliorando la percezione notturna del paesaggio. Le superfici trattate con pigmenti luminescenti hanno mostrato una capacità di assorbire la luce solare e di rilasciarla progressivamente nel buio, garantendo un'illuminazione diffusa per un arco temporale variabile in base all'intensità dell'irraggiamento diurno. I test condotti hanno evidenziato una buona performance luminosa nelle prime ore dopo il tramonto, con una decrescita graduale dell'intensità che, sebbene ridotta rispetto ai valori iniziali, è risultata comunque sufficiente a segnalare i percorsi e a migliorare l'orientamento degli utenti. Dal punto di vista

Lampada L3s "Banderuola notturna lamp"
con fusto in acciaio che sorregge la calotta
fotoluminescente in versione giorno e notte.
Le oscillanti entrano in dialogo con il moto
del vento che ne determina la ritmicità della
rotazione (Disegno di Gianpiero Alfarano)
/ L3s 'Night weather vane lamp' with steel

frame supporting the photoluminescent cap
in day and night versions. The oscillating
elements interact with the movement of the
wind, which determines the rhythm of their
rotation (Drawing by Gianpiero Alfarano)

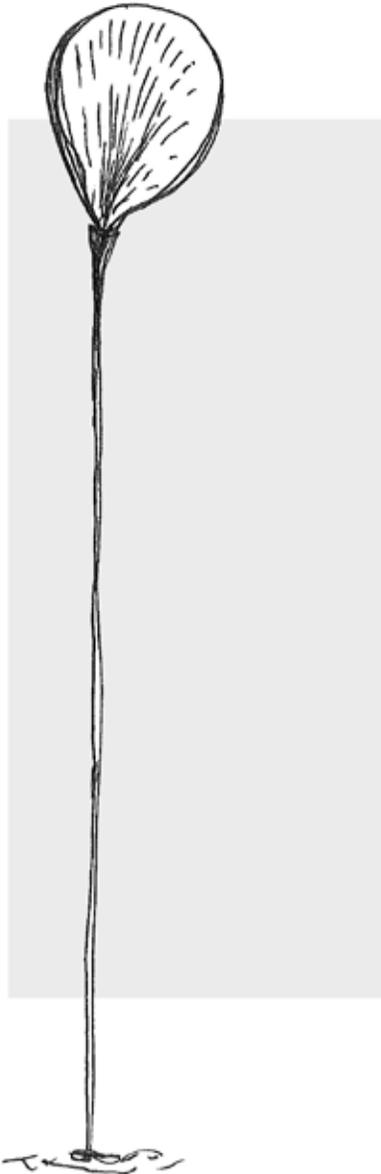


14

15



Lampada L1s "Foglia al vento lamp" con asta in acciaio che sorregge la foglia fotoluminescente, versione giorno e notte (Disegno di Gianpiero Alfano) / L1s 'Foglia al vento lamp' lamp with steel rod supporting the photoluminescent leaf, day and night version (Drawing by Gianpiero Alfano)



enhancing the experience of public spaces and encouraging greater use of natural environments at night (Küster et al., 2020). The integration of photoluminescence with landscape design proved to be another strength of the project. The use of luminescent materials in street furniture, signage and walkway surfaces made it possible to create a distinctive visual identity for the area, enhancing the context without introducing elements foreign to the natural language of the place. The research has shown that thanks to their ability to adapt to the site's characteristics, photoluminescent materials can be used as design tools that are not only functional but also evocative, helping to define new experiences of nighttime spaces. Comparative analyses with other sustainable lighting solutions have highlighted some limitations that

della resistenza e della durabilità, i materiali fotoluminescenti utilizzati nel progetto hanno mostrato un'ottima capacità di mantenere le loro proprietà luminose anche dopo un'esposizione prolungata agli agenti atmosferici. La sperimentazione ha evidenziato che il decadimento della capacità fotoluminescente è limitato, con una perdita di intensità visibile solo dopo lunghi periodi di esposizione a condizioni climatiche avverse. Questo aspetto conferma la validità della scelta di tali materiali per applicazioni outdoor, specialmente in contesti in cui la manutenzione ordinaria delle infrastrutture luminose risulta complessa o economicamente onerosa (Chen et al., 2021). Inoltre, i test di abrasione superficiale hanno dimostrato che i pigmenti luminescenti incorporati nei materiali di pavimentazione e negli elementi di arredo urbano mantengono la loro efficienza anche in presenza di sollecitazioni meccaniche, come il calpestio e l'azione erosiva dell'acqua e del vento. Uno degli aspetti più rilevanti emersi dalla ricerca riguarda l'efficacia della fotoluminescenza nel ridurre l'inquinamento luminoso, un fenomeno sempre più riconosciuto per i suoi effetti negativi sugli ecosistemi naturali e sulla salute umana (Falchi et al., 2019). L'assenza di sorgenti luminose artificiali tradizionali ha permesso di preservare l'oscurità naturale dell'area, riducendo le interferenze con la fauna locale e migliorando la qualità percettiva del paesaggio notturno. Le misurazioni effettuate hanno confermato che la luce emessa dai materiali fotoluminescenti non produce dispersione luminosa significativa nell'atmosfera, evitando così il fenomeno della sovra-illuminazione che caratterizza molte aree urbane e periurbane.

could be addressed through further technological advancements. Among these, dependence on solar radiation is one of the main challenges for the large-scale implementation of photoluminescence. Although the materials tested have demonstrated high efficiency in retaining and releasing light energy, weather conditions affect the duration and intensity of nighttime lighting. Recent studies suggest that integrating solar microcells or long-release luminescent materials could further enhance the performance of this technology, making it more reliable in low-solar exposure conditions (Li et al., 2022). Overall, the results of the experiment conducted in the Andolaccio area confirm the value of photoluminescence as an innovative solution for sustainable lighting design. The tested applications have proven to effectively meet safety, orientation, and perceptual quality requirements while reducing environmental impact and energy consumption. The adoption of this technology in urban and natural settings could represent a significant opportunity for designing more sustainable public spaces, helping to redefine the relationship between light, landscape, and community. The research also suggests that the use of photoluminescence should not be considered exclusively in functional terms but also as a tool for creating new lighting atmospheres capable of transforming the perception of space and offering an innovative sensory experience.

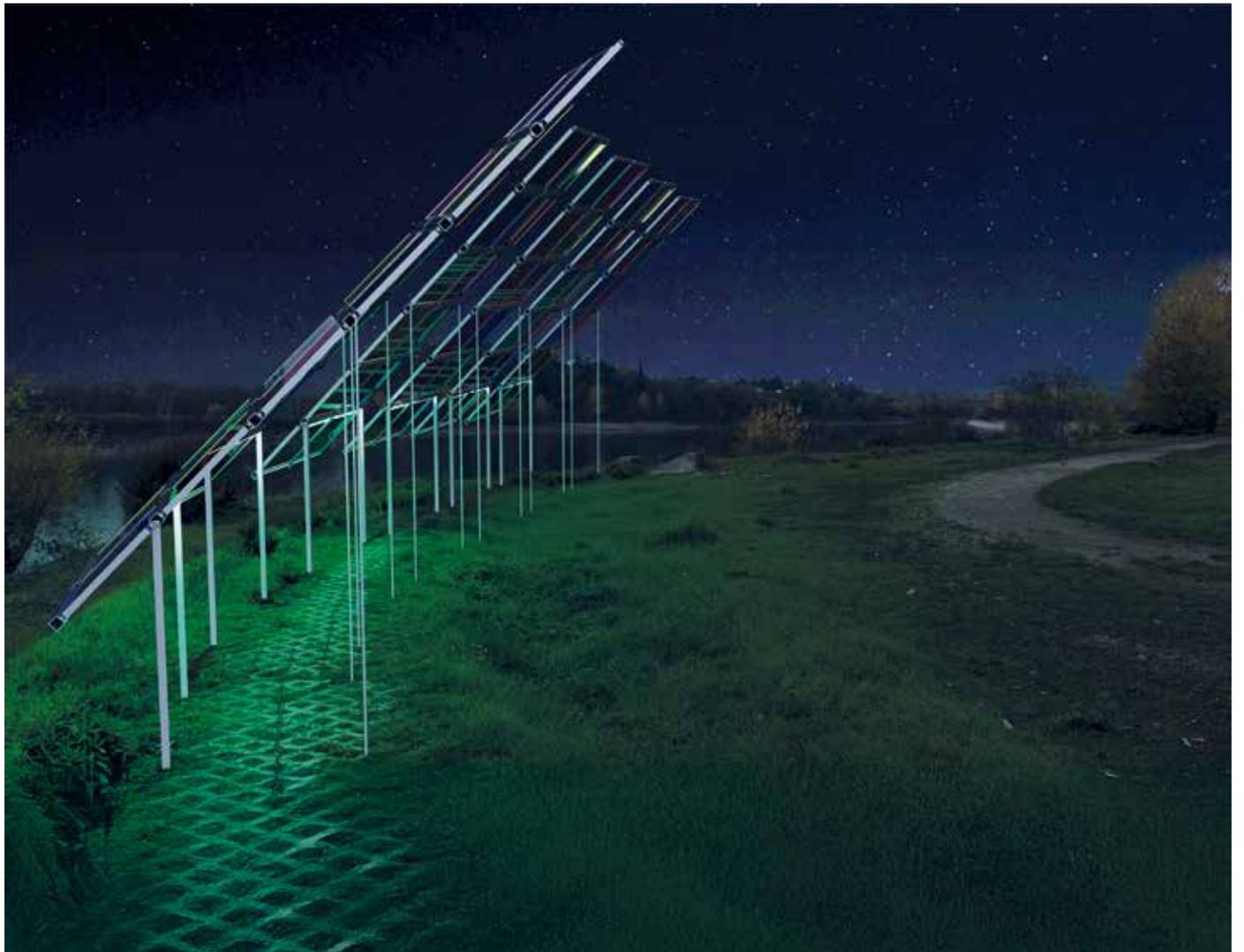
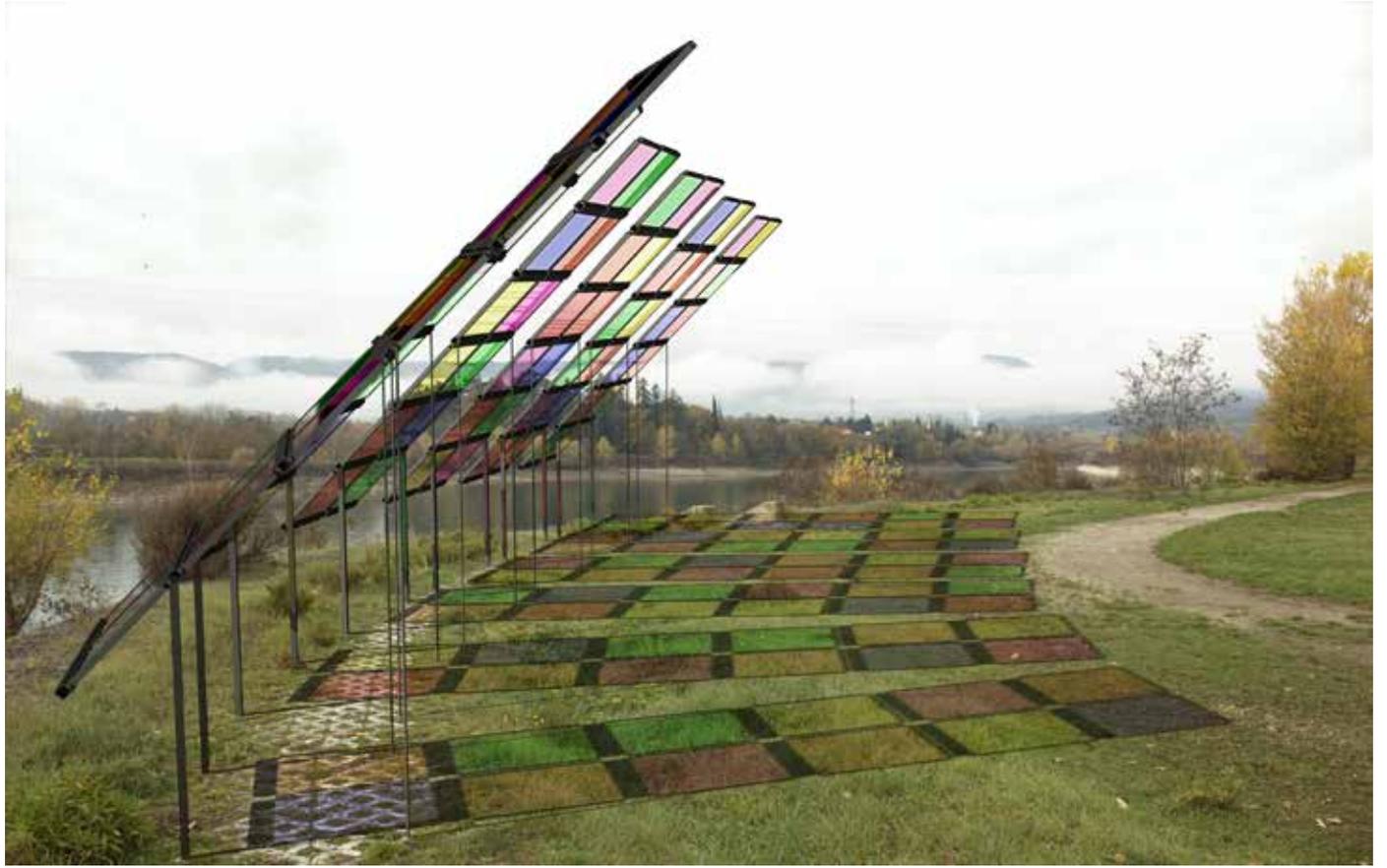
Conclusions

The experiment conducted in the Andolaccio area has demonstrated that regenerative lighting can be a concrete and sustainable solution for designing public spaces in natural contexts. The use of photoluminescent materials has highlighted the possibility of reducing energy consumption and environmental impact while offering an innovative perceptual experience. The results obtained confirm that passive lighting, based on the ability to accumulate and gradually release light, is a reliable technology for improving the nighttime usability of public spaces without introducing invasive artificial light sources. This approach aligns with the latest research in sustainable lighting design, which emphasises the importance of minimising light pollution and preserving natural light cycles in the landscape (Bogard, 2022). A comparative analysis with traditional lighting solutions has highlighted the potential of photoluminescence, not only from an environmental perspective but also in terms of management and maintenance. The absence of complex electrical infrastructure and the long life of the materials used make this technology particularly suitable for contexts where lighting must be guaranteed with minimal impact

Questo risultato suggerisce che l'illuminazione passiva possa rappresentare una valida alternativa per i contesti in cui sia necessario garantire la fruibilità degli spazi pubblici senza alterare il ciclo naturale del buio e della luce. Dal punto di vista della fruizione degli spazi pubblici, la sperimentazione ha evidenziato un impatto positivo sulla percezione dell'ambiente da parte degli utenti. I partecipanti ai test esplorativi condotti nell'area di Andolaccio hanno riferito un senso di maggiore sicurezza e orientamento grazie alla presenza di segnali luminosi discreti, che facilitano la percezione dei percorsi e delle aree di sosta senza risultare invadenti o disturbanti. La qualità estetica della luminescenza, caratterizzata da una luce soffusa e non abbagliante, è stata particolarmente apprezzata, suggerendo che questa tecnologia possa essere impiegata anche con finalità artistiche e paesaggistiche. Alcuni studi recenti confermano che l'illuminazione morbida e diffusa ha un effetto positivo sul benessere psicofisico degli utenti, migliorando l'esperienza dello spazio pubblico e incentivando una maggiore frequentazione degli ambienti naturali durante le ore notturne (Küster et al., 2020). L'integrazione della fotoluminescenza con il design del paesaggio si è rivelata un ulteriore punto di forza del progetto. L'uso di materiali luminescenti in elementi di arredo urbano, segnaletica e superfici di camminamento ha permesso di delineare un'identità visiva distintiva per l'area, valorizzando il contesto senza introdurre elementi estranei al linguaggio naturale del luogo. La ricerca ha dimostrato che, grazie alla loro capacità di adattarsi alle caratteristiche del sito, i materiali fotoluminescenti possono essere impiegati come strumenti di progettazione non solo funzionali, ma anche evocativi, contribuendo a definire nuove esperienze di fruizione degli spazi notturni. Le analisi comparative con altre soluzioni di illuminazione sostenibile hanno evidenziato alcuni limiti che potrebbero essere superati con ulteriori sviluppi tecnologici. Tra questi, la dipendenza dall'irraggiamento solare rappresenta una delle principali sfide per l'implementazione su larga scala della fotoluminescenza. Sebbene i materiali testati abbiano dimostrato un'elevata efficienza nel trattenere e rilasciare energia luminosa, le condizioni meteorologiche influenzano la durata e l'intensità dell'illuminazione notturna. Studi recenti suggeriscono che l'integrazione con microcelle solari o con materiali luminescenti a rilascio prolungato potrebbe migliorare ulteriormente le prestazioni di questa tecnologia, rendendola più affidabile in condizioni di bassa esposizione solare (Li et al., 2022). Nel complesso, i risultati della sperimentazione condotta nell'area di Andolaccio confermano il valore della fotoluminescenza come soluzione innovativa per il *lighting design* sostenibile. Le applicazioni testate hanno dimostrato di poter rispondere efficacemente alle esigenze di sicurezza, orientamento e qualità percettiva, riducendo al contempo l'impatto ambientale e i consumi energetici. L'adozione di questa tecnologia in contesti urbani e naturalistici potrebbe rappresentare un'importante opportunità per la progettazione di spazi pubblici più sostenibili, contribuendo a ridefinire il rapporto tra luce, paesaggio e comunità. La ricerca suggerisce inoltre che l'uso della fotoluminescenza non debba essere considerato esclusivamente in chiave funzionale, ma anche come strumento per la creazione di nuove atmosfere luminose, capaci di trasformare la percezione dello spazio e di offrire un'esperienza sensoriale innovativa.

Conclusioni

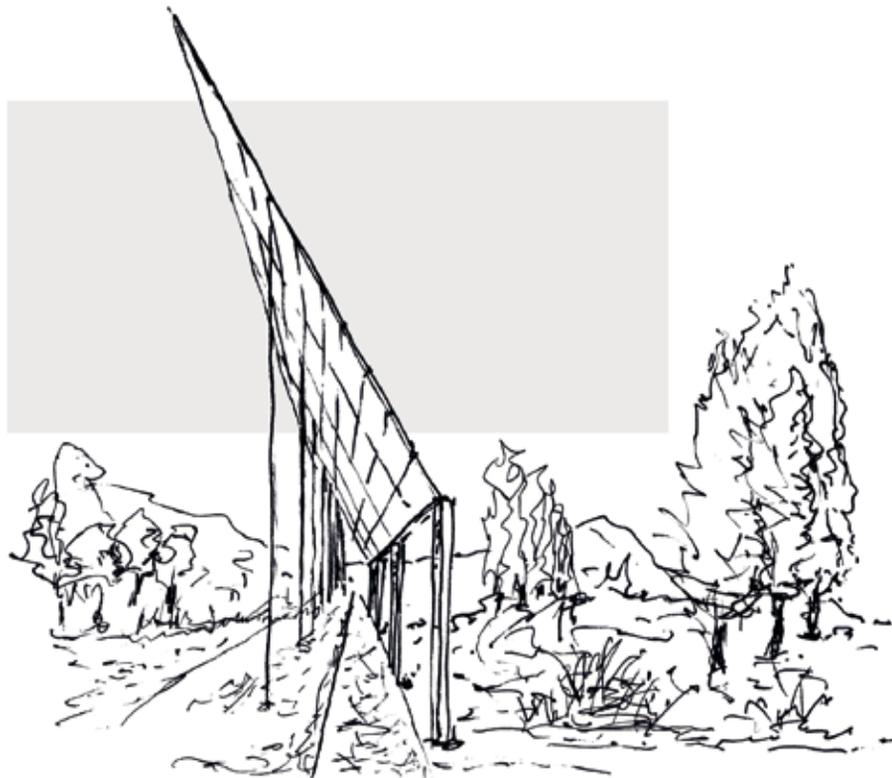
La sperimentazione condotta nell'area di Andolaccio ha dimostrato come l'illuminazione rigenerativa possa rappresentare una soluzione concreta e sostenibile per la progettazione degli spazi pubblici in contesti naturali. L'impiego di materiali fotoluminescenti ha evidenziato la possibilità di ridurre il consumo energetico e l'impatto ambientale, offrendo al contempo un'esperienza percettiva innovativa. I risultati ottenuti confermano che l'illuminazione passiva, basata sulla capacità di accumulo e rilascio graduale della luce, è una tecnologia affidabile per migliorare la fruibilità notturna degli spazi pubblici senza introdurre sorgenti luminose artificiali invasive. Questo approccio si allinea con le più recenti ricerche nel campo del *lighting design* sostenibile, che evidenziano l'importanza di ridurre l'inquinamento luminoso e di preservare i cicli naturali della luce nel paesaggio (Bogard, 2022). L'analisi comparativa con le tradizionali soluzioni di illuminazione ha messo in luce le potenzialità della fotoluminescenza non solo dal punto di vista ambientale, ma anche in termini di gestione e manutenzione. L'assenza di infrastrutture elettriche complesse e la lunga durata dei materiali utilizzati rendono questa tecnologia particolarmente adatta per contesti in cui l'illuminazione deve essere garantita con il minimo impatto sulle risorse naturali. Il coinvolgimento della comunità locale nella fase di valutazione dell'esperienza percettiva ha inoltre evidenziato come la qualità della luce fotoluminescente possa influenzare positivamente il rapporto tra gli utenti e lo spazio, migliorando la percezione della sicurezza e incentivando la frequentazione degli ambienti naturali anche nelle ore notturne (Stone, 2020). Nonostante i risultati positivi, la ricerca ha anche evidenziato alcune criticità che devono essere affrontate per rendere l'illuminazione rigenerativa una pratica ampiamente appli-



Lampada L2o "Cromo Panel lamp", versione giorno e notte. Attraverso i pannelli in plexiglass l'energia viene catturata e polarizzata a perimetro della struttura. La pensilina permette il transito notturno illuminandosi con la fotoluminescenza ricaricata con l'energia immagazzinata dalla tecnologia LSC (Disegno di Gianpiero Alfano) / L2o 'Cromo

Panel lamp', day and night version. Energy is captured and polarised around the perimeter of the structure through the plexiglass panels. The canopy allows night-time passage by illuminating itself with photoluminescence recharged with energy stored by LSC technology (Drawing by Gianpiero Alfano)

on natural resources. The involvement of the local community in evaluating the perceptual experience also highlighted how the quality of photoluminescent light can positively influence the relationship between users and space, thereby improving the perception of safety and encouraging people to visit natural environments even at night (Stone, 2020). Despite the positive results, the research also highlighted some critical issues that need to be addressed in order to make regenerative lighting a widely applicable practice. The variability of light performance in response to solar radiation suggests the need to develop materials with longer release times or hybrid solutions that integrate solar microcells to ensure greater lighting autonomy. Furthermore, the availability of photoluminescent materials on a large scale and their initial cost still represent a limitation to their widespread use despite the economic benefits of reduced maintenance and energy consumption in the long term. This research contributes to consolidating the role of design as a tool for innovation for sustainability, suggesting new possibilities for lighting design in urban and natural areas. Regenerative lighting is not only a technical solution for reducing environmental impact but also an opportunity to rethink the role of light in public spaces, promoting a more conscious and harmonious interaction with the landscape. The future of this technology will depend on the ability to develop increasingly efficient materials and integrate these systems into design strategies that enhance the natural heritage without compromising its ecological balance (Roetzel et al., 2021).



cabile. La variabilità delle prestazioni luminose in funzione dell'irraggiamento solare suggerisce la necessità di sviluppare materiali con tempi di rilascio più prolungati o soluzioni ibride che integrino microcelle solari per garantire una maggiore autonomia luminosa. Inoltre, la disponibilità di materiali fotoluminescenti su larga scala e il loro costo iniziale rappresentano ancora un limite alla loro diffusione, nonostante i benefici economici derivanti dalla riduzione della manutenzione e dei consumi energetici nel lungo periodo. Questa ricerca contribuisce a consolidare il ruolo del design come strumento di innovazione per la sostenibilità, suggerendo nuove possibilità per il *lighting design* in aree urbane e naturali. L'illuminazione rigenerativa si configura non solo come una soluzione tecnica per la riduzione dell'impatto ambientale, ma anche come un'opportunità per ripensare il ruolo della luce nello spazio pubblico, favorendo un'interazione più consapevole e armonica con il paesaggio. Il futuro di questa tecnologia dipenderà dalla capacità di sviluppare materiali sempre più efficienti e di integrare questi sistemi in strategie di progettazione che valorizzino il patrimonio naturale senza comprometterne l'equilibrio ecologico (Roetzel et al., 2021).

References

- Alfano, G. (2015). Forms of perception of form [Forme di percezione della forma]. In J. Filieri (Ed.), *The product alone is not enough [Il prodotto da solo non basta]* (pp. 78-85). Firenze: Altralinea.
- Alfano, G. (2019). Neomorphism and the design of object-things [NeoMorfismo e il design degli oggetti-di]. *AND Rivista di Architettura, Città e Architetti*, 35(1). <https://and-architettura.it/index.php/and/article/view/153>
- Alfano, G. (2023). *Multisensory Space Design for lighting*. Milano: Pietro Macchione Editore.
- Bogard, P. (2022). *The end of night: Searching for natural darkness in an age of artificial light*. Back Bay Books.
- Chen, G., Xu, Y., Yang, Y., & Liu, H. (2021). Luminescent materials for sustainable lighting design: Advances and challenges. *Journal of Sustainable Materials and Technologies*, 29, 102345. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.02.006>
- Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C. C. M., Elvidge, C. D., Baugh, K., ... & Furgoni, R. (2019). The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances*, 2(6), e1600377. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600377>
- Gaston, K. J., Bennie, J., Davies, T. W., & Hopkins, J. (2022). The ecological impacts of nighttime light pollution: A global perspective. *Science Advances*, 8(4), eabl6891. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abl6891>
- Holker, F., Schlesinger, S., & Kyba, C. (2020). Impact of artificial light on biodiversity. *Nature Ecology & Evolution*, 4(3), 219-220. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-1081-5>
- Kuster, N., Durst, A., & Kuhler, K. (2020). Human-centric lighting design and its impact on well-being and perception in public spaces. *Lighting Research & Technology*, 52(4), 397-414. <https://doi.org/10.1177/1477153519877194>
- Li, X., Zhang, W., & Sun, Y. (2022). Energy-efficient luminescent materials: Towards a new paradigm in lighting technology. *Advanced Functional Materials*, 32(12), 2201078. <https://doi.org/10.1002/adfm.202201078>
- Roetzel, A., Tsangrassoulis, A., & Dietrich, U. (2021). Adaptive lighting design: Integrating daylight and passive luminescence for sustainable environments. *Building and Environment*, 191, 107593. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107593>
- Stone, T. (2020). *Light pollution: Responses and solutions for a brighter future*. Springer.