

Giacomo Chiesa, <https://orcid.org/0000-0003-3783-5143>
Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino, Italia

giacomo.chiesa@polito.it

Abstract. L'instabilità indotta dai cambiamenti climatici richiede di sviluppare modelli e strumenti per prevedere e prevenire il loro impatto sulle performance proprie dell'ambiente costruito. Il paper introduce un nuovo strumento per mappare le conseguenze del cambiamento climatico, sia a scala di singolo edificio, sia a scala territoriale. Tale strumento permette ai professionisti di studiare gli impatti delle scelte tecnologico-progettuali considerando un clima dinamico per incrementare la conoscenza, valutare i possibili rischi e supportare azioni di prevenzione e incremento della resilienza. Il contributo, derivato da una ricerca H2020 co-finanziata dalla EU, descrive la metodologia sviluppata, focalizzandosi sul trattamento dei dati climatici, e discute alcuni risultati.

Parole chiave: Cambiamento climatico; Rischio climatico; Progettazione bioclimatica; Simulazione e scenari; Valutazione impatti.

Introduzione e stato dell'arte

Il clima gioca un ruolo fondamentale nella progettazione sostenibile degli edifici, influenzando l'applicabilità tecnologica e la verifica delle performance attese (Wu *et al.*, 2026; Khdair *et al.*, 2026). Spesso, tuttavia, il clima è ancora inteso come elemento fisso di un luogo – «the conditions for a particular region» (Davis and Jokiniemi, 2008). Tale assunto è, nell'era dei cambiamenti climatici, superato in quanto trasforma la componente temporale della tipicità ed espone configurazioni spaziali e scelte tecnologiche alle diverse scale del progetto a potenziali rischi (Košir, 2019). Tra tali rischi si possono citare alcune cause del performance gap energetico, incertezze nei tempi di ritorno economici di un intervento e potenziali esposizioni di edifici a fenomeni perturbativi inaspettati (IEA-EBC, 2024). Con i cambiamenti climatici, la dinamicità del clima è divenuta fondamentale, per quanto normative, disponibilità di dati per progettisti, strumenti progettuali e consuetudini rendano ancora difficile analizzarne a fondo gli im-

patti e mitigarne i rischi in modo consapevole e predittivo (Machard *et al.*, 2020). Diversi studi hanno dimostrato l'impatto della scelta di un file climatico obsoleto sui risultati progettuali e performativi attesi – per esempio, (Chiesa e Grosso, 2015; Murano *et al.*, 2016; Lupato and Manzan, 2019) comparano le variazioni di performance mostrando divergenze anche superiori al 30%. Da un lato, i cambiamenti climatici rendono alcune attuali strategie bioclimatiche e tecnologiche potenzialmente inadatte ai climi locali futuri (es. Zhang *et al.*, 2021; Machado *et al.*, 2025), dall'altro lato, tali cambiamenti non trovano ancora una giusta considerazione e traduzione nelle banche dati, nelle normative e negli strumenti messi a disposizione dei professionisti (IEA-EBC, 2024). Si identificano i seguenti ambiti di innovazione in cui nuove ricerche sono necessarie: i) definire il clima come parametro medio variabile al fine di quantificare l'impatto del rischio dei cambiamenti climatici sui progetti per renderli adatti ai climi futuri; ii) sviluppare metodologie e strumenti per integrare la variabilità climatica nel progetto alle diverse scale.

La ricerca ha come obiettivo principale l'introduzione di possibili soluzioni ai due ambiti di innovazione sopra identificati. Sono perseguiti i seguenti obiettivi specifici:

- proporre una nuova metodologia capace di integrare le principali banche dati climatiche europee (Copernicus Data Store) (CDS, 2025) con la prassi e gli strumenti di analisi propri della progettazione tecnologico-ambientale, identificando specifiche famiglie di indicatori (KPI – Key Performance Indicators).
- tradurre tale metodologia in una piattaforma integrata per la simulazione climatica avanzata adattando l'innovativa

A new tool for mapping climate change in architecture: method and perspectives

Abstract. The instability induced by climate change requires the development of models and tools to predict and mitigate its impact on the performance of the built environment. This paper introduces a new tool for mapping the impact of climate change, both at the scale of individual buildings and at the territorial level. The tool enables professionals to study the effects of technological and design choices in the face of a dynamic climate, aiming to increase knowledge, assess potential risks, and support preventive actions to enhance resilience. The paper, derived from an H2020 research project co-funded by the EU, describes the developed methodology, focusing on climate data processing, and discusses some preliminary results.

Keywords: Climate change; Climate risk; Bioclimatic design; Simulation and scenarios; Impact assessment.

Introduction and state of the art

Climate plays a fundamental role in sustainable building design, influencing technological applicability and verifying expected performance (Wu *et al.*, 2026; Khdair *et al.*, 2026). However, climate is still often perceived as a fixed attribute of a place – «the conditions for a particular region» (Davis and Jokiniemi, 2008). This assumption is outdated in the era of climate change as it overlooks the temporal component of typicality, thus exposing spatial configurations and technological choices across different project scales to potential risks (Košir, 2019). Some causes of the energy performance gap, uncertainty in economic payback time for building renovation, and the exposure of buildings to unexpected perturbation phenomena can be found in them (IEA-EBC, 2024). With climate change, understanding climate as a

dynamic phenomenon has become essential. Nevertheless, regulations, data availability for designers, design tools, and current practices still make it challenging to comprehensively analyse their impacts, and to intentionally mitigate risks in a predictive manner (Machard *et al.*, 2020). Several studies have demonstrated the effect of using an obsolete climate file on design and performance results. For example, (Chiesa and Grosso, 2015; Murano *et al.*, 2016; Lupato and Manzan, 2019) compare variations in performance, showing divergences exceeding 30%. Moreover, climate change renders specific current bioclimatic strategies and technologies potentially unsuitable for future local climates. These changes are still insufficiently addressed and translated into climate databases, standards, and professional tools. Two key innovation areas can be identified

libreria PREDYCE (Chiesa *et al.*, 2023) che permette la simulazione dinamica (energetica e IEQ) degli edifici tramite EnergyPlus. Lo strumento deve permettere di studiare e ottimizzare sia singoli edifici, sia sviluppare analisi territoriali;

- testare tale modulo e mostrarne potenziali ambiti di applicazione per valutare gli impatti e la resilienza ai cambiamenti climatici, mappando le variazioni delle performance a scala europea.

Tali obiettivi sono fortemente innovativi, permettendo di studiare i rischi e gli impatti del cambiamento non solo su singoli siti selezionati (Machado *et al.*, 2025; Al-Assaad *et al.*, 2025), ma a livello territoriale, includendo inoltre la possibilità di simulare dinamicamente a tale scala archetipi di edifici. Al momento non esistono altre piattaforme capaci di integrare sia la gestione/elaborazione di grandi database climatici per renderli utilizzabili in ambito architettonico, sia la possibilità di gestire flussi massivi di simulazioni, includendo variazioni di parametri progettuali e operativi, sia il calcolo di specifiche KPI edilizie per prevenire possibili rischi.

Metodologia e sviluppo del nuovo strumento

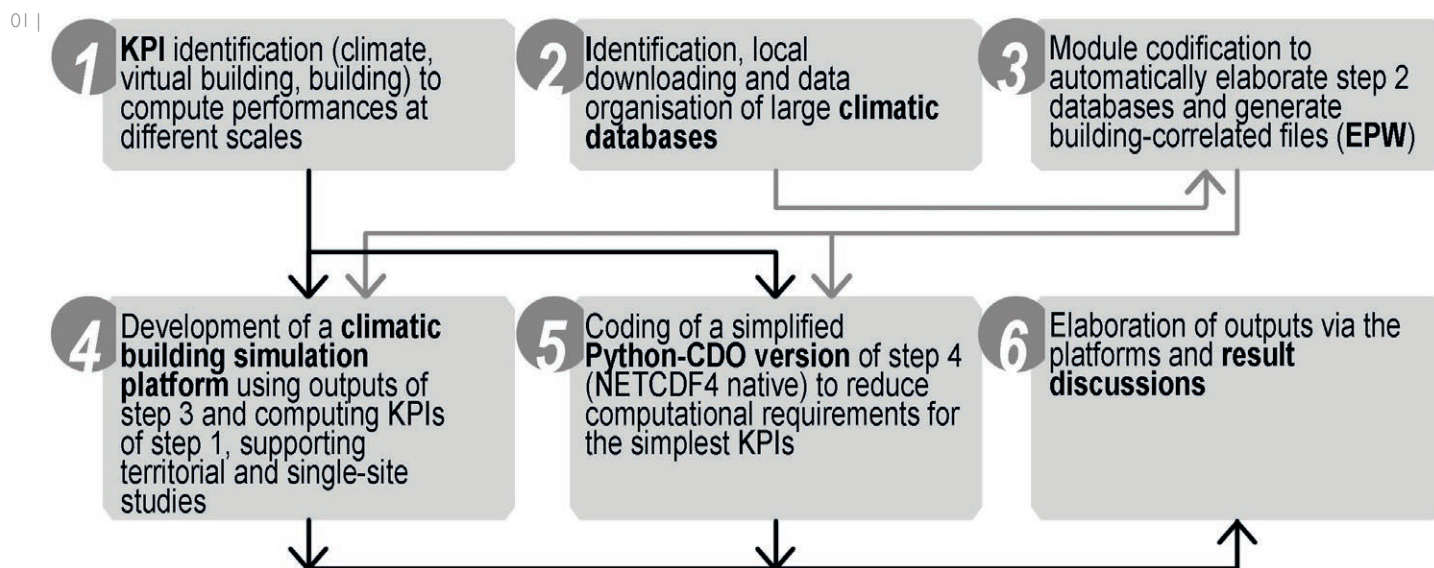
Questo paper introduce la nuova pipeline metodologica e la struttura della piattaforma di

calcolo, focalizzandosi sulle banche dati climatiche e sulla loro elaborazione. La metodologia è descritta in Figura 1 e articolata in 6 step di seguito dettagliati.

La piattaforma di simulazione integrata include numerosi indicatori di performance (KPI) raggruppati in tre principali categorie di analisi: i. KPI climatiche (es. temperature medie,

numero di notti tropicali); ii. KPI di meta-edificio (es. gradi giorno, zonizzazioni climatiche, diagrammi bioclimatici); e iii. KPI di edificio (es. modelli di comfort termico, fabbisogni energetici). La prima categoria si basa sull'elaborazione diretta dei dati climatici. La seconda categoria permette di analizzare KPI tipiche delle fasi meta-progettuali, includendo l'impatto virtuale degli edifici e calcolando il potenziale di numerose tecnologie bioclimatico-passive. La terza categoria si basa sulla simulazione dettagliata di specifici edifici, includendo sia la componente energetica sia la qualità ambientale.

Definiti i KPI, la ricerca si concentra sulle fonti di dati climatici, considerando i database europei ed includendo sia fonti di re-analisi (basate sull'integrazione di osservazioni meteorologiche e modelli) (Copernicus, 2025a), sia proiezioni climatiche basate su modelli numerici globali e regionali (Copernicus, 2025b). Si sono considerate tre principali fonti di dati: ERA5 e ERA5-land (re-analisi) e un vasto set di proiezioni EURO-CORDEX. I database ERA5 a disposizione includono un vasto numero di variabili includendo una stima delle incertezze (CDS, 2025). I dati sono disponibili a scala globale con un dettaglio territoriale basato su una griglia di circa 30 km e con un dettaglio temporale orario a partire dagli anni 40 del '900. ERA5-land si focalizza sull'evoluzione di variabili climatiche a livello della superficie terrestre. I dati, disponibili dagli anni 50 del '900, sono forniti con una risoluzione spaziale di circa 9 km di griglia (CDS, 2025). Per le proiezioni future si sono adottati i modelli EURO-CORDEX (CDS, 2025), basati sui quattro scenari di emissioni RCP (Representative Concentration Pathways) elaborati dall'IPCC nel quinto report (IPCC, 2019). I modelli utilizzati combinano modelli globali GCM (General Circula-



tion Models) e regionali RCM (Regional Climate Models). Lo studio del clima futuro necessita di considerare un insieme di proiezioni climatiche per ogni scenario RCP e non un solo modello, al fine di includere potenziali incertezze (Vautard *et al.*, 2021). Attualmente, la piattaforma sviluppata incorpora più di 20 combinazioni GCM-RCM con un sufficiente numero di variabili per generare un file idoneo per il contesto edilizio. Le diverse combinazioni GCM-RCM sono anche fornite di un database storico con dati dal 1951 al 2005 per valutare gli scenari rispetto a dati osservati.

Selezionati i database, si è proceduto al download automatizzato dei file NETCDF4 sul server locale dell'unità di ricerca. Tali dati sono stati elaborati sviluppando nuove versioni del modulo EPW_compiler della piattaforma PREDYCE adatte ai diversi database selezionati. La Figura 2 illustra la specifica metodologia sviluppata. L'elaborazione dei dati originali mira alla generazione di file in formato EPW (EnergyPlus Weather), un riconosciuto standard di dati climatici utilizzato da alcuni dei più diffusi tool di simulazione degli edifici (Crawley and Barnaby, 2019), tra cui EnergyPlus. Tra le elaborazioni dati necessarie si ricordano lo splitting della radiazione solare globale orizzontale (GHI) nelle sue componenti e l'interpolazione dei dati futuri per raggiungere la risoluzione oraria adottando diverse strategie scientifiche ricorrenti in base alle specifiche variabili: interpolazione lineare (es. temperatura, umidità e pressione), dato costante nel range temporale (es. direzione e velocità del vento, precipitazioni e radiazione infrarossa), interpolazione polinomiale con mantenimento dei valori tri-orari originali ed eventuale adattamento al corretto intervallo alba-tramonto (Ruiz-Arias, 2022).

where further research is needed: i) defining climate as a variable average parameter to quantify the risk of climate change on projects and make them suitable for future climates; ii) developing methodologies and tools to integrate climate variability into design processes across multiple scales, supporting the decisions of both designers and public administrations.

The primary objective of the research is to propose potential solutions to the two innovation areas identified above. The following specific objectives are pursued:

- Propose a new methodology capable of integrating major European climate databases (Copernicus Data Store) (CDS, 2025) with the practices and simulation tools of environmental and technological design, while identifying specific families of

indicators (KPI – Key Performance Indicators).

- Translate this methodology into an integrated platform for advanced climate simulation, adapting the innovative dynamic simulation library (energy and IEQ, integrating the EnergyPlus engine) of PREDYCE (Chiesa *et al.*, 2023) to the aforementioned climate databases. The tool must allow to study and optimise both individual buildings and territorial-scale analyses.
- Test this module and demonstrate potential application areas for assessing the impacts and resilience to climate change by mapping performance variations at the European scale.

These objectives are highly innovative as they allow to study climate change risks and impacts not only on individual selected sites (Machado *et al.*,

Complete le fasi di elaborazione delle variabili, i file meteorologici annuali sono stati post-elaborati generando tre tipologie di file EPW (o NETCDF4) per simulazioni proprie delle discipline progettuali: i. file TMY (Typical Meteorological Year) – formato standard basato sull'individuazione di mesi tipici in un intervallo di almeno 10 anni secondo la UNI EN ISO 15927-4:2005 –; ii. Av.MY (Average Meteorological Year) – basati sulla media delle variabili su base oraria in un intervallo di almeno 10 anni –; e iii. AMY (Actual Meteorological Year) – file basati sull'elaborazione dei dati di un singolo anno effettivo (es. 2025). Per le simulazioni e il calcolo dei KPI, si è sviluppato in Python un nuovo scenario di uso della piattaforma PREDYCE. Lo scenario di analisi climatica permette di supportare sia analisi di singolo sito sia analisi a scala territoriale, con una produzione massiva di file climatici. Al fine di ridurre i tempi computazionali per gli indicatori che non necessitano di simulazioni dinamiche di edificio, si è anche implementata una versione semplificata in ambiente Python-CDO capace di calcolare tali KPI direttamente su database in formato NETCDF4 (una singola mappa europea può superare i 260 000 punti di simulazione). Definito il quadro metodologico, l'articolo riporta alcuni risultati di analisi territoriali a scala europea per discutere le potenzialità della piattaforma.

Primi risultati

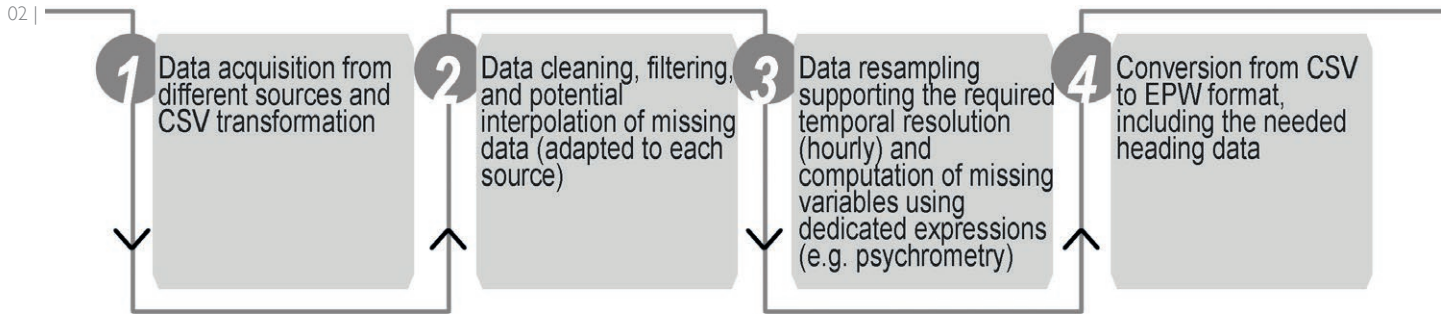
Al fine di dimostrare l'impatto pratico progettuale dello strumento sviluppato, si riportano i risultati di tre analisi, una per categoria di KPI. I risultati si focalizzano sulle proiezioni future, riportando i dati relativi a 4 combinazioni di modelli GCM-RCM EURO-CORDEX per lo scenario RCP8.5. L'analisi riporta

2025; Al-Assaad *et al.*, 2025), but also at the territorial scale by including the possibility of simulating building archetypes dynamically. Currently, no other platforms are capable of both: i) integrating the management and processing of large climate databases to make them usable in the architectural field, and ii) handling massive flows of simulations, including variations of design and operational parameters, while calculating building-specific KPIs to prevent potential risks.

Methodology and development of the new tool

This paper introduces the new methodological pipeline and the computational platform structure with a focus on climate databases and their processing. The methodology is illustrated in Figure 1, and is organised into a six-step approach detailed below.

The integrated simulation platform includes numerous performance indicators (KPIs) grouped into three main categories: i) Climate KPIs, e.g., average temperatures and number of tropical nights; ii) Meta-building KPIs, e.g., degree days, climate zoning, and bioclimatic diagrams; iii) Building KPIs, e.g., thermal comfort models and energy demand. Climate KPIs are directly based on climate data processing. Meta-building KPIs support early design-phase analysis, including the virtual impact of buildings and the quantitative potential of passive bioclimatic technologies. Building KPIs are derived from detailed simulations of specific buildings, encompassing both energy and environmental quality aspects, thereby enabling a fine integration of technological systems with the local climate.



per ogni modello i valori assoluti delle KPI per l'Av.MY della serie storica (Av.MY 1970-89) e le differenze con il periodo attuale (2010-29) e con l'Av.MY del lontano futuro (2090-2100). La prima analisi si focalizza sul KPI climatico “numero di notti tropicali”, indicatore che conta il numero di giorni nell'anno in cui la temperatura minima giornaliera è superiore a 20°C (Karl, 1999). I risultati in Figura 3 mostrano un consistente e progressivo incremento di tale fenomeno nel sud Europa e nel bacino mediterraneo sud-orientale, con la riduzione conseguente del potenziale di raffrescamento ventilativo in tali territori, ma anche la comparsa di tale fenomeno di rischio nelle zone centro e nord europee. I risultati delle proiezioni sul periodo contemporaneo sono comparabili con quelli di recenti studi basati sulle osservazioni (es. Yavaşlı and Erlat, 2024). La seconda analisi si focalizza sul KPI di meta-edificio “Zone climatiche”, calcolato sull'intero territorio europeo adottando la metodologia italiana – DPR 412 del 26 agosto 1993 e successive modifiche – basata su sei classi di gradi-giorno (GG) di

riscaldamento (UNI 10349-3:2016). La Figura 4 mostra come i cambiamenti climatici inducano un progressivo decremento delle classi, con una forte mitigazione dei climi invernali e una conseguente necessità di ridurre/modificare l'incisività dei requisiti minimi energetici degli edifici a scala locale. La variazione delle zone climatiche si basa sui dati dei differenziali di temperatura. I dati di temperatura nelle serie storiche dei modelli trovano validazione nei dati osservati, così come discusso nel paragrafo successivo.

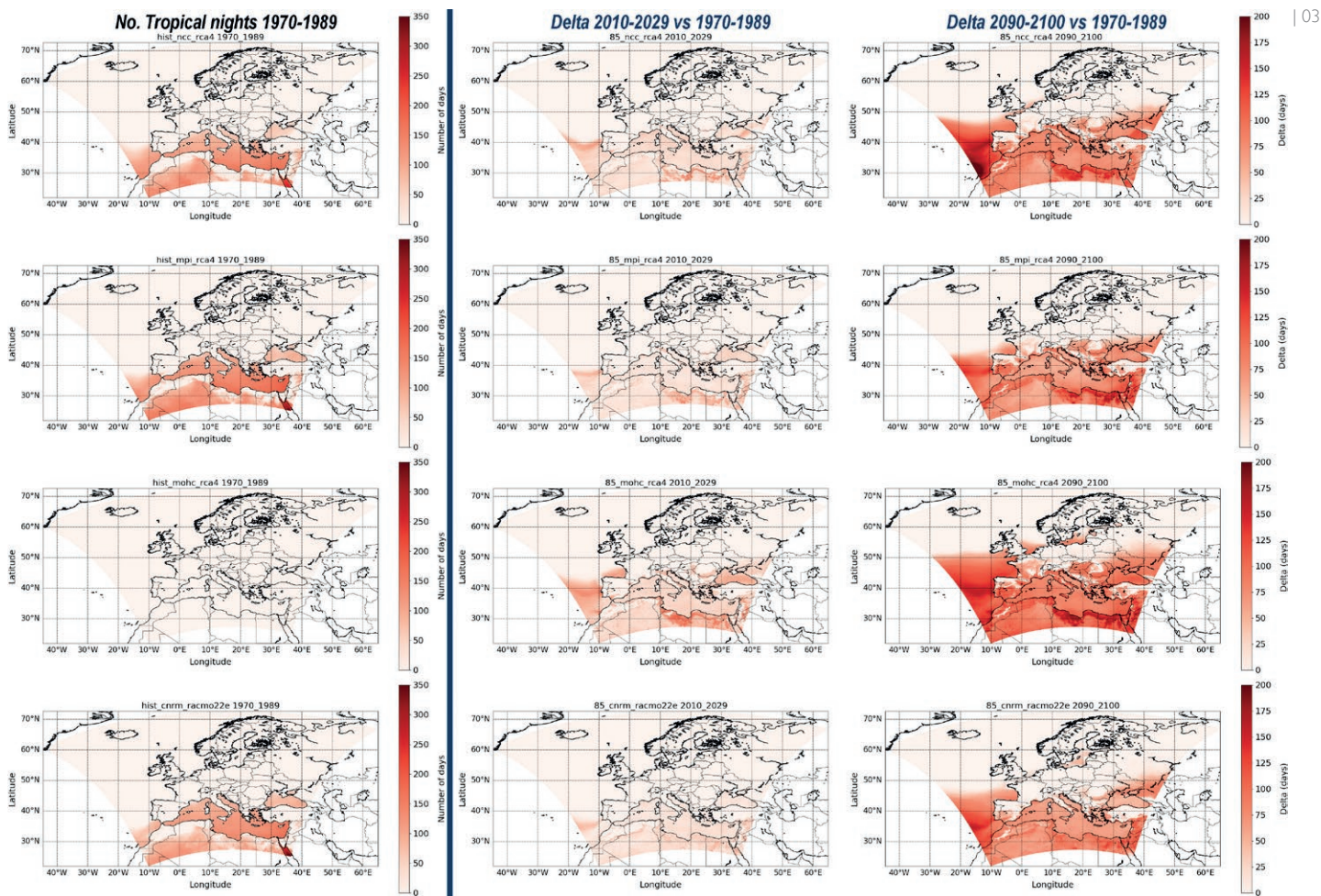
Infine, si è analizzato un KPI di edificio che calcola la variazione percentuale tra l'impatto del fabbisogno energetico per il riscaldamento (Q_c [kWh_{PE}]) e il fabbisogno energetico totale (Q_{tot} [kWh_{PE}] = Q_h + Q_c) locale a scala europea permette ai progettisti di analizzare più nel dettaglio i due fenomeni precedenti. Il calcolo è stato condotto applicando ai database EURO-CORDEX derivate polinomiali (predittori basati sui GG) capaci di stimare i consumi totali e di raffrescamento di un edificio residenziale standard (derivato dal DOE medium residential bu-

Having defined the KPIs, the research focused on the European climatological data sources, including both reanalysis datasets (integrating meteorological observations with models) (Copernicus, 2025a), and climate projections based on global and regional numerical models (Copernicus, 2025b). Three primary sources were considered: ERA5, ERA5-Land (reanalysis), and a broad set of EURO-CORDEX projections. ERA5 databases encompass a diverse range of numerical variables, along with uncertainty estimates (CDS, 2025). Data are provided globally, with a spatial resolution of ≈ 30 km and an hourly temporal resolution, starting from the 1940s. ERA5-Land focuses on the evolution of surface-level climate variables with a spatial resolution of ≈ 9 km, starting from the 1950s (CDS, 2025). For future climate projections,

the study adopted EURO-CORDEX models (CDS, 2025), based on the four Representative Concentration Pathways (RCP) defined by the IPCC Fifth Assessment Report (IPCC, 2019). The used models combine Global Circulation Models (GCM) and Regional Climate Models (RCM). Studying future climates requires using multiple climate projections per RCP scenario, rather than a single case, to incorporate potential uncertainties (Vautard *et al.*, 2021). Over 20 GCM-RCM combinations were integrated in the platform, each with a sufficient number of variables to generate files suitable for the building context. Each combination also includes a historical database (1951–2005) to allow comparison of projections with observed data. Once the databases were selected, automated downloading of NETCDF4 files was implemented on the research

unit's local server. The data were processed by developing new versions of the 'EPW_compiler' module of PREDYCE, customised for each database. Figure 2 illustrates the methodology. The processing pipeline generates EPW files (EnergyPlus Weather), a recognised standard for climate data used by some of the most widespread building simulation tools (Crawley and Barnaby, 2019), including EnergyPlus. Key operations include splitting global horizontal solar radiation into its components, and interpolating future data for hourly resolution using established scientific strategies: i) linear interpolation (e.g., temperature, humidity, pressure), ii) constant value within time intervals (e.g., wind speed/direction, precipitation, infrared radiation), and iii) polynomial interpolation with preservation of original tri-hourly values, and adaptation

to the correct sunrise-sunset interval (Ruiz-Arias, 2022). After processing, annual weather files were post-processed to generate three types of EPW (or NETCDF4) climate files: i) TMY (Typical Meteorological Year) – based on the identification of typical months over at least 10 years (UNI EN ISO 15927-4:2005); ii) Av.MY (Average Meteorological Year) – hourly averages of variables over a minimum 10-year interval; and iii) AMY (Actual Meteorological Year) – based on data from a specific actual year (e.g., 2025). To support simulation and computing KPIs, a new analysis scenario for PREDYCE was developed in Python. The climate analysis scenario supports both single-site analyses and territorial-scale analyses, which generate massive numbers of climate files. To reduce computational time for KPIs



that do not require dynamic building simulations, PREDYCE was adapted to run directly on NETCDF4 databases (a single European map generation exceeds 260,000 simulation points). Finally, the paper presents sample results focused on territorial-scale analyses at the European level to discuss the potentialities of the developed platform.

Preliminary results

Results from three analyses are presented – one for each KPI category – to demonstrate the practical design relevance of the developed tool. The results focus on future projection models, reporting data for four GCM-RCM EURO-CORDEX combinations under the RCP8.5 scenario. The following are reported for each model:

- absolute KPI values for the Av.MY historical period (1970–1989),

- differences with the current period (2010–2029), and
- differences with the Av.MY of the distant future (2090–2100).

The first analysis focuses on the climate KPI “Number of Tropical Nights”, which counts the days in a year when the daily minimum temperature exceeds 20°C (Karl, 1999). The results in Figure 3 show a consistent and progressive increase in this phenomenon across Southern Europe and the south-eastern Mediterranean basin areas, reducing the potential for natural ventilative cooling in these regions, and indicating the emergence of this risk in Central and Northern Europe. The results obtained for the current period align with recent analyses based on observed data (e.g., Yavaşlı and Erat, 2024).

The second analysis focuses on the meta-building KPI “Climate Zones”

computed on the entire European territory, and adopting the Italian methodology – DPR 412 of 26 August 1993, and subsequent amendments – based on six classes of heating degree days (HDD) (UNI 10349-3:2016). Figure 4 illustrates how climate change leads to a progressive decrease in classification levels, resulting in a significant mitigation of winter climates and the subsequent need to either revise or adjust the minimum energy requirements for buildings at the local scale. Climate zoning is based on temperature differences. The temperature data in the EURO-CORDEX models were validated against historical observations, as discussed in the next section. Finally, the building KPI “Qc/Qtot Percentage”, which analyses the variation in the percentage ratio between cooling energy demand (Qc [kWhPE]) and total energy demand (Qtot [kWhPE]) =

$Q_h + Q_c$), is computed at the European scale, allowing designers to investigate the two previous results in greater detail. The calculation was done by applying polynomial derivatives (degree-day predictors) to EURO-CORDEX databases. These predictors estimate the total and cooling energy demands of a standard residential building (derived from the DOE medium residential building and adapted to EN 16798-1:2019 inputs), based on the results of 44,000 dynamic energy simulations performed by PREDYCE in Energy-Plus on ERA5 databases (European coverage), and two TMY-EPW series (1950-1973 and 1999-2022). Primary energy was calculated using COP and EER values of 5.0 and 5.6, respectively, and a conversion factor of 1.9 for electricity to primary energy, consistently with market values and UNI/TS 11300 standards. Figure 5 illustrates that the

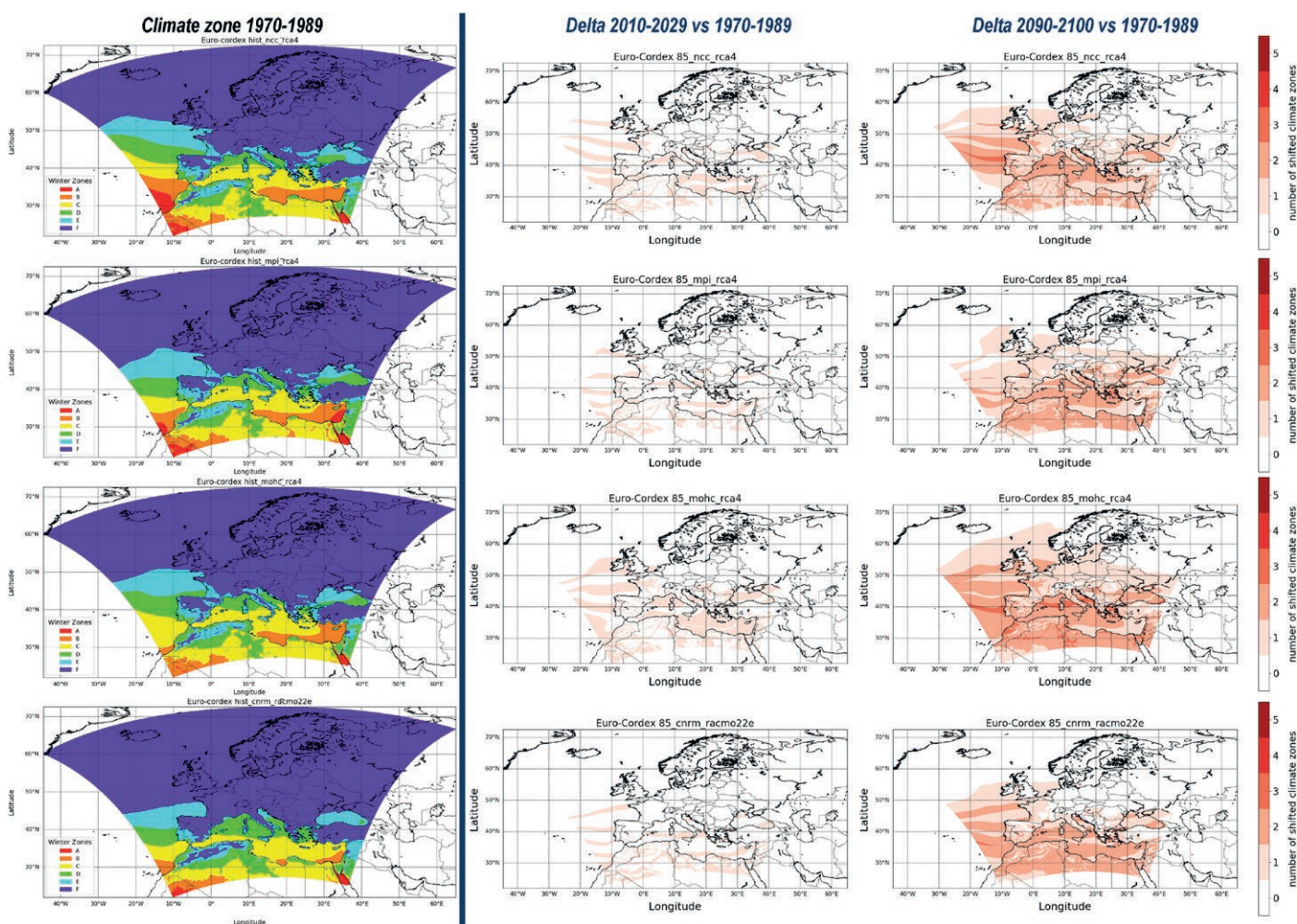
ilding e adattato agli input della EN 16798-1:2019) calcolate dai risultati di un pacchetto di 44 000 simulazioni energetico dinamica condotte da PREDYCE in EnergyPlus sul database ERA 5 (intero territorio europeo) e su due serie di EPW-TMY (1950-73 e 1999-2022). L'energia primaria è stata derivata applicando un valore di COP ed EER pari a 5.0 e 5.6 e il fattore di conversione di energia elettrica in primaria di 1.9 in linea con valori di mercato e compatibili con le normative UNI/TS 11300. La figura 5 mostra come la variazione dell'impatto del raffrescamento sia progressivamente crescente su tutto il territorio europeo con la conseguente necessità di ripensare il comparto normativo attuale che basa i requisiti minimi principalmente sui fabbisogni di riscaldamento. Per esempio, la percentuale di Qc nel lontano futuro (media dei 4 modelli) cresce di +12.5% (st.dev. 0.1), +39.5% (0.07) e +38.7% (0.03) rispettivamente a Parigi, Roma e Atene. I dati di Atene trovano conferma nei risultati di prece-

denti studi (es. Asimakopoulos *et al.*, 2012). La crescita media nel periodo presente è invece di +0.3%, +9.1% e +10.5%.

Discussioni, prospettive e conclusioni

I risultati preliminari dimostrano come le variazioni indotte dai cambiamenti climatici impattino sensibilmente sulle KPI progettuali e sull'applicabilità delle tecnologie passive. La domanda di energia di riscaldamento mostra una costante riduzione sia nelle serie storiche, sia nei modelli previsionali futuri, mentre l'impatto della domanda di raffrescamento è in costante crescita e supererà a breve quella di riscaldamento al sud e centro Europa, dettagliando quanto anticipato in precedenti studi (es. Isaac and Vuuren, 2009). Nei prossimi 80 anni le condizioni climatiche dell'attuale nord Italia caratterizzeranno il nord della Francia e Germania, superando i 50°N di longitudine. Si prevede anche un in-

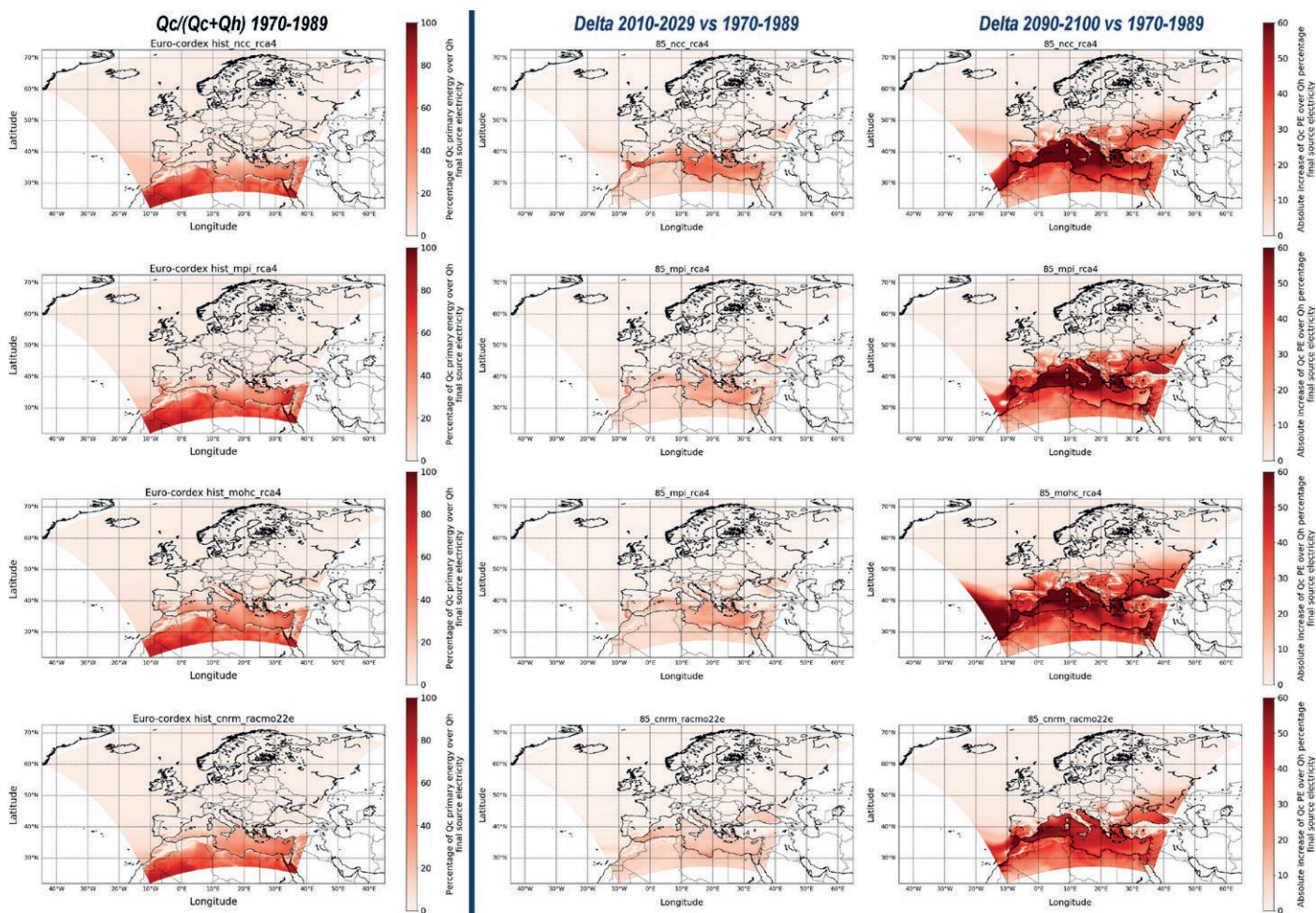
04 |



cremento dell'applicabilità delle tecnologie di raffreddamento passivo al nord e centro Europa e una riduzione della loro potenzialità al sud.

Tali risultati sono basati su database climatici da modelli predittivi validati da numerose ricerche. Il lavoro di (Machard *et al.*, 2020) ha dimostrato che nel periodo storico 1955-2000 gli errori ricadono nel range di incertezza dei modelli. Similmente, (Cannon, 2018) ha sottolineato come sia possibile comparare nei periodi storici i dati dei modelli Eurocordex con dati osservati, essendo i precedenti forzati nei margini dei modelli ERA. Come dimostrato dai paper citati, l'analisi territoriale delle variazioni percentuali rimane validata, tuttavia, è possibile correggere i modelli di proiezione tramite un approccio bias adattato a singole città (Machard *et al.*, 2024) per quanto tale modalità non sia replicabile a scala di analisi territoriale. Si ricordano le evidenti incertezze derivate dalla modellazione futura, per quanto la comparazione di numerosi modelli alternativi possa migliora-

re la capacità di prevedere statisticamente gli andamenti futuri (Vautard *et al.*, 2021). Relativamente ai modelli di re-analisi, gli stessi includono dati da osservazioni. La loro validità è anche dimostrata in numerosi lavori (es. Machado *et al.*, 2005). La piattaforma di simulazione dinamica utilizzata è anch'essa stata validata su dati sperimentali in precedenti pubblicazioni, rimanendo in un range di errore inferiore al 5% su base oraria in linea con la guideline 14 dell'ASHRAE (Chiesa *et al.*, 2025). La piattaforma dimostra un'elevata potenzialità e flessibilità nel definire previsioni di rischio e nel calcolare il potenziale di prevenzione di specifiche scelte progettuali essendo compatibile con una vasta gamma di KPI sia climatiche, sia meta-progettuali, sia correlate a dettagliate scelte progettuali. La ricerca ha dirette implicazioni sia in ambito scientifico, facilitando studi e analisi dell'impatto dei cambiamenti climatici sull'ambiente costruito, sia in ambito professionale, aprendo nuovi strumenti per l'ottimizzazione e la valutazione in fase di progetto del com-



portamento di edifici in diversi scenari climatici. Inoltre, tale approccio permette di sviluppare una nuova visione normativa, includendo il clima come variabile e non come dato fisso, permettendo di sviluppare database climatici per i progettisti e generare materiali informativi. Tra gli attuali limiti della piattaforma si sottolineano la mancanza di un'interfaccia grafica e la complessità di mantenere aggiornate le banche dati e la gestione manuale di alcune operazioni di elaborazione dei risultati. Tra gli sviluppi futuri, si prevede di facilitare la gestione lato utente, semplificare la gestione delle analisi simulate parametriche e rendere automatica la comparazione di diversi modelli climatici. Ulteriori strumenti di simulazione sono in corso di sviluppo, integrando modelli surrogate e correlazioni multivariate per simulare velocemente complesse variazioni progettuali e tecnologiche sui pesanti database EURO-CORDEX e ERA5.

ATTRIBUZIONE, RICONOSCIMENTI, DIRITTI D'AUTORE

Si ringrazia A.JahaniRahaei e gli altri Assegnisti di Ricerca dell'unità locale per il loro contributo nello sviluppo di codici e nell'elaborazione dati.

La ricerca amplia i lavori del D8.5 ed è stata co-finanziata dall'Unione Europea, programma H2020 Research and Innovation, Grant Agreement n. 958345, coordinamento generale Aalborg University (Denmark), prof. M.Z.Pomianowski.

REFERENCES

Al-Assaad, D. et al (2025), "Resilient passive cooling strategies during heat waves: a quantitative assessment in different climates", *Building and Environment*, Vol. 274, 112698. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112698>

cooling impact progressively increases across Europe, underscoring the need to reassess regulatory frameworks, as the latter bases the minimal energy requirements on heating needs. For example, the Qc percentage in the far future (average of the 4 GCM-RCM models) rises by 12.5% (standard deviation 0.1), 39.5% (0.07), and 38.7% (0.03), respectively, for Paris, Rome, and Athens. The Athens data align with previous studies (e.g., Asimakopoulos *et al.*, 2012), demonstrating the quality of the results. The average rises in the current period are 0.3%, 9.1%, and 10.5%, respectively.

Discussion, perspectives, and conclusions

The preliminary results demonstrate that climate change significantly affects KPIs and the applicability of passive technologies. Heating energy de-

mand shows a steady decrease, both in historical series and future projection models. Cooling energy demand is constantly increasing, and is expected to surpass heating demand in Southern and Central Europe soon, detailing what was predicted in previous studies (e.g., Isaac and Vuuren, 2009). Within the next 80 years, climate conditions similar to those of today's Northern Italy will characterise Northern France and Germany, extending beyond the 50°N latitude. Additionally, the applicability of passive ventilative cooling technologies is expected to increase in Northern and Central Europe, while decreasing in Southern Europe.

Results are based on future climate data derived from models validated over their historical periods by numerous research studies. In their work, (Machard *et al.*, 2020) demonstrated that errors within the historical pe-

Asimakopoulos, D.A. et al (2012), "Modelling the energy demand projection of the building sector in Greece in the 21st century", *Energy and Buildings*, Vol. 49, pp. 488-498. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.043>

CDS (2025), Copernicus Data Store. Available at: <https://cds.climate.copernicus.eu/> (Accessed on 04/09/2025)

Chiesa, G. and Grosso, M. (2015), "The Influence of Different Hourly Typical Meteorological Years on Dynamic Simulation of Buildings", *Energy Procedia*, Vol. 78, pp. 2560-2565. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.280>

Chiesa, G. *et al.* (2023), "Energy simulation platform supporting building design and management", *Techne*, Vol. 25, pp. 134-142. Available at: <https://doi.org/10.36253/techne-13583>

Chiesa, G. *et al.* (2025), "A new approach to assess the building energy performance gap: Achieving accuracy through field measurements and input data analysis", *Journal of Building Engineering*, Vol. 102, 111941, Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.111941>

Copernicus (2025a), Climate Reanalysis. Available at: <https://climate.copernicus.eu/climate-reanalysis> (Accessed on 04/09/2025).

Copernicus (2025b), Climate Projections. Available at: <https://climate.copernicus.eu/climate-projections> (Accessed on 04/09/2025).

Crawley, D.B. and Barnaby, C.S. (2019), "Weather and climate in building performance simulation", in Hensen, J.L.M. and Lamberts, R. (Eds.), *Building Performance Simulation for Design and Operation*, 2nd ed., Routledge, New York, pp. 191-220

Davies, N. and Jokiniemi, E. (2008), *Dictionary of architecture and building construction*, Architectural Press, Oxford.

Karl, T.R. *et al.* (1999), "Clivar/GCOS/WMO Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes: Workshop Summary", *Climatic Change*, Vol. 42, pp. 3-7. Available at: <https://doi.org/10.1023/A:1005491526870>

riod of 1955-2000 fall within the range of the model's uncertainty. Similarly, Cannon (2018) emphasised that EURO-CORDEX historical data can be compared with observations, as the previous data were constrained within the ERA model boundaries. As demonstrated in the cited studies, territorial analyses of percentage variations remain validated, although it is possible to add a bias correction for specific single cities (Machard *et al.*, 2024). However, this approach is not replicable at the territorial level. It is essential to remember that future models inherently involve a level of uncertainty, although it is possible to improve future statistical trends by comparing numerous alternative models (Vautard *et al.*, 2021). Re-analysis models are intrinsically validated, incorporating observed data, and are consistent with measured local values as underlined

by several papers (e.g., Machado *et al.*, 2005). Considering the adopted energy simulation platform, which has been validated against experimental data in previous publications, it allows for simulating building behaviours within an hourly error range of 5%, aligning with ASHRAE Guideline 14 (Chiesa *et al.*, 2025). The platform demonstrates high potential and flexibility in defining risk forecasts, and in calculating the preventive potential of specific design choices, while being compatible with a wide range of KPIs – including climatic, meta-design, and detailed project-level metrics. The research has direct implications for scientific research, facilitating studies and analyses of climate change impacts on the built environment, and professional practice by offering new tools for optimising and evaluating building behaviour during the design

Khdair, A.I. *et al.* (2026), "Advancing natural ventilation in sustainable architecture: mechanisms, innovations, and climate-responsive design for energy-efficient buildings", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 226, 116314. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116314>

Košir, M. (2019), *Climate adaptability of buildings*, Springer, Cham.

IEA-EBC (2024), Annex 80: Resilient Cooling. Available at: <https://annex80.iea-ebc.org/> (Accessed on 04/09/2025).

IPCC (2019), Representative Concentration Pathways (RCPs), Available at: https://sedac.ciesin.columbia.edu/ddc/ar5_scenario_process/RCPs.html (Accessed on 04/09/2025).

Isaac M. and Vuuren, D.P. (2009), "Modelling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change", *Energy Policy*, Vol. 37, pp. 507-521. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.051>

Lupato, G. and Manzan, M. (2019), "Italian TRYs: New weather data impact on building energy simulations", *Energy and Buildings*, Vol. 185, pp. 287-303. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.001>

Machado, R.M.S. *et al* (2025), "The impact of climate data uncertainty on bioclimatic zoning for building design", *Building and Environment*, Vol. 269, 112423. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112423>

Machard, A. *et al* (2020), "A Methodology for Assembling Future Weather Files Including Heatwaves for Building Thermal Simulations from the European Coordinated Regional Downscaling Experiment (EURO-CORDEX) Climate Data", *Energies*, Vol. 13, 3424. Available at: <https://doi.org/10.3390/en13133424>

Machard, A. *et al* (2024), "Typical and extreme weather datasets for studying the resilience of buildings to climate change and heatwaves", *Scientific Data*, Vol. 11, 531. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03319-8>

Murano, G. *et al* (2016), "The new Italian Climatic Data and their Effect in the Calculation of the Energy Performance of Buildings", *Energy*

Procedia, Vol. 101, pp. 153-160. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.020>

Ruiz-Arias, J.A. (2022), "Mean-preserving interpolation with splines for solar radiation modeling", *Solar Energy*, Vol. 248, pp. 121-127. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.10.038>

Vautard, R. *et al* (2021), "Evaluation of the Large EURO-CORDEX Regional Climate Model Ensemble", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 126, e2019JD032344. Available at: <https://doi.org/10.1029/2019JD032344>

Wu, Z. *et al* (2026), "Learning sustainable wisdom from the past: a generative framework for extracting climate-responsive design strategies from vernacular architecture", *Energy & Buildings*, Vol. 350, 116669. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116669>

Yavaşlı, D.D. and Erat E. (2024), "Tropical nights in the Mediterranean: A spatiotemporal analysis of trends from 1950 to 2022", *International Journal of Climatology*, Vol. 44, pp.1472-1488. Available at: <https://doi.org/10.1002/joc.8394>

Zhang, C. *et al* (2021), "Resilient cooling strategies – A critical review and qualitative assessment", *Energy and Buildings*, Vol. 251, 111312. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111312>

phase under various climate scenarios. Furthermore, this approach supports the development of a new regulatory vision where climate is treated as a variable and not as a fixed datum, while generating informative materials and climate databases for designers. Current limitations of the platform include the lack of a graphical user interface, the complexity of maintaining and upgrading the databases, and the manual management of some analyses comparing different climate models. Future developments include simplifying the user interface, managing parametric simulation analyses, and automating model comparison. Additional simulation tools are being developed by integrating surrogate models and multivariate correlations to quickly simulate complex design and technological variations on the

extensive EURO-CORDEX and ERA5 databases.

ATTRIBUTION, ACKNOWLEDGEMENTS, COPYRIGHT RIGHTS

A special thank you to A.Jahanirahaei and the other research fellows of the local research unit for their contributions during coding development and data elaboration.

The research builds upon the work of D8.5 and has received funding from the European Union's H2020 Research and Innovation Programme, Grant Agreement No. 958345, general coordination by Aalborg University (Denmark), Prof. M.Z.Pomianowski.