

Tecnologie e spazi di prossimità: strumenti per scelte consapevoli nella transizione ecologica

Just Accepted: October 22, 2022 Published: May 30, 2023

RICERCA E
SPERIMENTAZIONE/
RESEARCH AND
EXPERIMENTATION

Paola Marrone, <https://orcid.org/0000-0003-2843-7768>
Ilaria Montella, <https://orcid.org/0000-0001-8589-9681>
Federico Fiume, <https://orcid.org/0000-0002-0735-2370>
Dipartimento di Architettura, Università Roma Tre, Roma, Italia

paola.marrone@uniroma3.it
ilaria.montella@uniroma3.it
federico.fiume@uniroma3.it

Abstract. Le città sono il principale campo di applicazione di innovazioni tecnologiche per la transizione ecologica e la decarbonizzazione. Con riferimento ai suoi spazi di prossimità, la ricerca propone una visione multidisciplinare e trans-scalare in cui metodi analitici e quantitativi di progettazione urbana si combinano con metodi di valutazione qualitativa di progettazione tecnologica, per simulare e misurare gli impatti degli interventi in termini di mitigazione e adattamento agli effetti del cambiamento climatico. Uno strumento di supporto alla programmazione, basato sulla teoria dei giochi, orienta nella scelta tra soluzioni efficaci e interdipendenti per la decarbonizzazione attraverso la produzione energetica da fonti rinnovabili, servizi ecosistemici e accessibilità ai servizi essenziali.

Parole chiave: Mitigazione climatica; *Smart environment*; Accessibilità; Servizi Ecosistemici; Sistemi energetici decentrati.

Introduzione e contesto di riferimento

Le città stanno affrontando una tripla crisi: gli impatti sulla salute del Covid-19; l'emergenza climatica ed ecologica; la disuguaglianza sociale ed economica. Per sostenere queste sfide, la UE ha definito un ampio quadro di strumenti per la transizione verso una crescita economica e sociale sostenibile¹. Queste strategie si basano sulla consapevolezza che le città rappresentino un'importante forza trainante il cui potenziale d'integrazione intersettoriale sta trasformando in centri di innovazione e impegno sociale. Le città, infatti, sono il principale campo di applicazione di innovazioni tecnologiche per la transizione ecologica e la decarbonizzazione, in grado di creare economie di scala per la sperimentazione² di processi ideativi e scenari d'intervento, grazie alle applicazioni delle tecnologie dell'ICT, dell'IoT, del *monitoring* o *simulating*³. In questo contesto, si presentano alcuni risultati di una ricerca⁴ che sta studiando un sistema di supporto alle decisioni per pro-

Technologies and
proximity spaces: tools
for conscious choices in
ecological transition

Abstract. Cities are the main field of application of technological innovations for ecological transition and decarbonisation. With reference to its proximity spaces, the research proposes a multidisciplinary and transcalar vision in which analytical and quantitative methods of urban design are combined with qualitative assessment methods of technological design to simulate and measure the impacts of interventions in terms of mitigation and adaptation to the effects of climate change. A planning support tool, based on game theory, guides the choice between effective and interdependent solutions for decarbonisation through renewable energy production, ecosystem services and accessibility to essential services.

Keywords: Climate mitigation; Smart environment; Accessibility; Ecosystem services; Decentralised energy systems.

getti di riconfigurazione degli spazi urbani di prossimità, finalizzati alla mitigazione e all'adattamento agli effetti dei cambiamenti climatici, a partire dal considerare condizioni multiple di sostenibilità individuate da tre ambiti d'intervento e dalle loro relazioni di interdipendenza più efficaci per la decarbonizzazione: energie rinnovabili, accessibilità e mobilità sostenibile, servizi ecosistemici.

Dagli scenari alle decisioni: metodologia e risultati

- le tipologie di spazi di prossimità e le rispettive vocazioni per i casi studio individuati (fase 1);
- le loro potenzialità in "mappe delle opportunità", costruite con un sistema informativo per la loro caratterizzazione (fase 2);
- scenari di riconfigurazione per il potenziamento dei singoli tre ambiti d'intervento (fase 3);
- modelli di simulazione per la valutazione degli interventi relativi ai tre ambiti (fase 4);
- uno strumento di supporto alla scelta tra possibili opzioni d'intervento (fase 5).

Spazi di prossimità e potenziali funzioni

La prima fase ha elaborato una tassonomia degli spazi di prossimità, ossia di quegli spazi urbani aperti che si configurano tra gli edifici (giardini pubblici o privati, corti, cortili, aree di risul-

Per individuare, in fase di programmazione, gli interventi più efficaci misurandone l'impatto, la ricerca⁴ ha studiato:

Introduction and context

Cities are facing a triple crisis: the health impacts of Covid-19; climate and ecological emergency; social and economic inequality. To support these challenges, the EU has defined a broad framework of tools for the transition to sustainable economic and social growth¹. These strategies are based on the realisation that cities represent an important driving force, whose potential for cross-sectoral integration is transforming them into centres of innovation and social engagement. Cities are, in fact, the main field of application of technological innovations for ecological transition and decarbonisation, capable of creating economies of scale for the experimentation² of ideational processes and intervention scenarios, thanks to the applications of ICT, IoT, monitoring or simulating technologies³.

In this context, we present some results of a research⁴ that is studying a decision-making support system for projects to reconfigure urban proximity spaces, aimed at mitigating and adapting to the effects of climate change, starting from the consideration of multiple conditions of sustainability identified by three areas of intervention and their most effective interdependent relationships for decarbonisation: renewable energies, accessibility and sustainable mobility, ecosystem services.

From scenarios to decisions: methodology and results

In order to identify, at the planning stage, the most effective interventions by measuring their impact, the research⁴ studied:

- the types of proximity spaces and their respective vocations for the

ta, ma anche coperture praticabili, ecc.), partendo dall'analisi di cinque quartieri della città di Roma (Italia), Testaccio, Balduina, Tor Bella Monaca, Prima Porta, Piazza Mazzini, scelti come casi di studio perché rappresentativi di significative tipologie di evoluzione dei tessuti urbani. Nell'ambito più generale degli spazi urbani aperti, la ricerca si è posta inizialmente l'obiettivo di esplorare quelli strettamente interrelati agli edifici, escludendo, in questa fase, parchi pubblici, aree naturali e seminaturali (Fig. 1). Per ogni tipologia di spazio sono state individuate le potenzialità in termini di prestazioni, riconoscendo "funzioni oggi espresse ma non soddisfatte oppure in atto"; "funzioni innovative latenti oppure già in essere ma suscettibili di sviluppi interessanti nel prossimo futuro"; "funzioni che deriveranno da esigenze ad oggi non percepite ma che potrebbero affermarsi in futuro".

Mappa delle opportunità

L'ambiente urbano è caratterizzato da componenti molto eterogenee, rendendo spesso difficile identificare le matrici morfologiche, tecniche e strutturali del tessuto costruito. Questa difficoltà si rispecchia anche nelle azioni per una trasformazione dell'ambiente antropizzato verso città più sostenibili. È uno dei motivi per cui si parla di *transizione ecologica*, ossia di un processo che appunto richiede tempo per tener conto delle variazioni cui sono soggette le città, in quanto organismi vivi che mutano a velocità differenti in base al contesto e agli eventi (Droege, 2008). Si è deciso, pertanto, di proporre un approccio basato su scenari di transizione dell'assetto delle parti di città analizzate, potenziando le opportunità più efficaci in termini di decarbonizzazione.

- case studies identified (phase 1);
- their capabilities in "opportunity maps", built with an information system for their characterisation (phase 2);
- reconfiguration scenarios for the enhancement of the three individual areas of intervention (step 3);
- simulation models for the evaluation of interventions for the three fields (step 4);
- a tool to support the choice between possible intervention options (step 5).

Proximity spaces and potential functions

The first phase elaborated a taxonomy of proximity spaces, with reference to open urban spaces that are configured between buildings (public or private gardens, courtyards, courtyard areas, but also practicable roofs, etc.), start-

ing from the analysis of five districts in Rome (Italy) (Testaccio, Balduina, Tor Bella Monaca, Prima Porta, Piazza Mazzini), chosen as case studies because they are representative of significant types of urban fabric development. Within the more general framework of open spaces, the research initially set itself the objective of exploring those closely interrelated to buildings, excluding, at this stage, public parks, natural and semi-natural areas (Fig. 1). For each type of space, the potential in terms of performance was identified, recognising "functions that are currently expressed but not fulfilled or already in place"; "innovative functions that are latent or already in place but susceptible to interesting developments in the near future"; "functions that will derive from needs that are not perceived today but which may assert themselves in the future".

Nella fase 2, pertanto, è stato costruito un sistema informativo⁵ per studiare la configurazione attuale degli spazi di prossimità e identificare le informazioni utili per elaborare scenari di decarbonizzazione nella fase 3. Dal sistema informativo sono state estratte le "mappe delle opportunità" che restituiscono le diverse tipologie di spazi fisici suscettibili di ospitare nuove o rafforzate funzioni relative ai tre ambiti considerati (Fig. 1).

Scenari per prefigurare la transizione ecologica

Definite le mappe delle opportunità, nella fase 3 sono stati elaborati alcuni scenari di transizione, al fine di massimizzare il potenziale di decarbonizzazione che gli spazi di prossimità possono offrire considerando singolarmente i tre ambiti d'intervento: produzione energetica da fonti rinnovabili (FER) in loco; potenziamento dei servizi ecosistemici; riorganizzazione della mobilità sostenibile e dei servizi di prossimità.

Per gli scenari di elettrificazione con FER è stato applicato il modello delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER). Si è cercato di valutare l'effettivo potenziale degli spazi e delle superfici disponibili, ipotizzando anche velari fotovoltaici temporanei, per accogliere sistemi di generazione energetica distribuita in rapporto ai consumi, dipendenti dalla densità abitativa, dalle funzioni degli edifici e dallo stato di conservazione di ciascun ambito urbano (Marrone and Montella, 2022). Con riferimento ai valori dei consumi medi riportati nel Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima del 2019, sono stati stimati dappprincipio i consumi attuali e poi tre scenari che prevedono potenzialità crescenti di produzione di energia elettrica da FER in rapporto ai consumi e, conseguentemente, definiscono la dimensione necessaria a costituire le CER stesse. Nello scenario

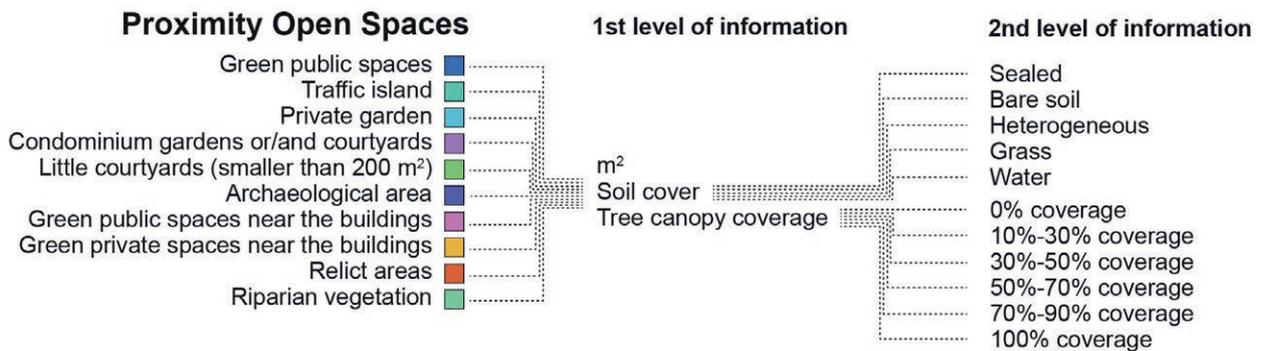
Map of opportunities

The urban environment is characterised by very heterogeneous components, often making it difficult to identify the morphological, technical and structural matrices of the built fabric. This difficulty is also reflected in actions for a transformation of the built environment towards more sustainable cities. This is one of the reasons why we speak of ecological transition, i.e. a process that precisely takes time to take into account the variations to which cities are continuously subjected as living organisms that change at different speeds according to context and events (Droege, 2008). It was decided, therefore, to propose an approach based on transition scenarios of the layout of the analysed parts of cities, enhancing most effective opportunities in terms of decarbonisation. Hence, in phase 2, an information sys-

tem⁵ was constructed to study the current configuration of proximity spaces and to identify information useful for developing decarbonisation scenarios in phase 3. From the information system, 'opportunity maps' were extracted, showing the different types of physical spaces that are likely to host new or enhanced functions related to the three areas considered (Fig. 1).

Scenarios for prefiguring the ecological transition

Once the opportunity maps were defined, transition scenarios were developed in phase 3 to maximise the decarbonisation potential that proximity spaces can offer by considering the three areas of intervention individually: on-site renewable energy production (RES); enhancement of ecosystem services; and reorganisation of sustainable mobility and neighbourhood services.



E01, si è ipotizzata una produzione da FER utilizzando solo i tetti degli edifici con destinazione d'uso a servizi pubblici, e i consumi elettrici attuali; nello scenario E02 si è ipotizzato di utilizzare tutti i tetti, al 60% della superficie disponibile per i residenziali, e all'80% per i pubblici, e l'elettrificazione dei consumi termici (con PDC – COP 4); nello scenario E03, oltre alla produzione da FER ed elettrificazione dei consumi termici, è stato previsto anche l'efficientamento energetico degli edifici ipotizzando la riduzione del 50% dei consumi (Fig. 2).

Parimenti, per i servizi ecosistemici⁶ sono stati elaborati due scenari costruiti su due elementi base; il primo di natura spaziale (gli spazi di prossimità disponibili per il rafforzamento dei servizi ecosistemici) e il secondo di natura funzionale (i servizi ecosistemici che possono essere concretamente rafforzati oppure introdotti nei diversi spazi di prossimità). Partendo dalla "mappa del *cooling*" attuale, espressiva del servizio ecosistemico oggi erogato nell'area di studio, ovvero del contributo che la vegetazione offre all'attenuazione dei picchi di calore, è stato costruito lo scenario SE01 ipotizzando l'incremento più ampio possibile della "*Tree Canopy Coverage*" – ed in senso esteso delle coperture vegetali, anche arbustive ed erbacee – negli spazi censiti nella relativa mappa delle opportunità. Lo scenario SE02 rappresenta uno "Scenario Multifunzionalità" che punta sia a un consistente incremento della "*Tree Canopy Cover*", sia alla introduzione di servizi ecosistemici attualmente assenti nell'area di studio⁶ (Fig. 3).

Analogamente ai due ambiti precedenti, anche per quello della mobilità e accessibilità è stato elaborato uno scenario MA01 che si ispira alla sperimentazione delle *Superilles* di Barcellona e che prevede di alternare le strade, una ogni due o tre, lasciando al-

ternativamente una strada a maggiori funzioni di accessibilità, con viabilità carrabile, parcheggi e installazioni per la consegna a domicilio dei prodotti dell'*e-commerce*, e destinando l'altra ad ospitare gli interventi di più intensa trasformazione a favore della prossimità, con piste ciclabili, spazi di sosta, verde o servizi essenziali raggiungibili a piedi o in bicicletta. In questo scenario si persegue un criterio di sostenibilità urbana attraverso la riduzione dell'impatto ambientale della mobilità (Fig. 4).

Modelli di simulazione e acquisizione di dati

Allo scopo di misurare impatti e verificare l'efficacia degli interventi degli scenari dei tre ambiti, si è effettuato un *downscaling* scegliendo un quadrante significativo del quartiere considerato. Modelli di simulazione e metodologie di indagine sono stati elaborati nella fase 4 per acquisire dati propedeutici alla valutazione delle azioni previste negli scenari e delle loro possibili interazioni. Per quanto riguarda l'ambito Energia sono stati elaborati modelli⁷ di:

- simulazione delle condizioni microclimatiche, verificate con misure ambientali *in situ*, per individuare criticità e punti di forza in termini di comfort degli spazi di prossimità;
- simulazione dell'irraggiamento dei fronti stradali più critici, per testare sistemi adattivi di ombreggiamento e produzione energetica;
- dimensionamento delle CER in rapporto ai consumi e alle strategie di efficienza energetica;
- valutazione del rischio per intercettare anomalie e garantire la continuità di erogazione energetica in distretti auto-sufficienti (Fig. 5).

For electrification scenarios with renewable energy sources, the Renewable Energy Communities (RECs) model was applied. An attempt was made to assess the actual potential of the available spaces and surfaces, also assuming temporary photovoltaic canopies, and to accommodate distributed energy generation systems in relation to consumption, depending on housing density, building functions and the state of conservation of each urban area (Marrone and Montella, 2022). With reference to the average consumption values reported in the 2019 National Integrated Energy and Climate Plan, first the current consumption was estimated and then three scenarios were illustrated that foresee increasing potential for electricity production from renewable energy in relation to consumption. They, consequently, define the size necessary

to constitute the RECs themselves. In the E01 scenario, production from renewable energy sources was assumed using only the roofs of buildings allocated for public services, and current electricity consumption. In the E02 scenario, all roofs were assumed to be 60% of the available surface area for residential buildings, and 80% for public buildings, and electrification of thermal consumption was presumed (with PDC – COP 4). In the E03 scenario, in addition to production from RES, and the electrification of thermal consumption, the energy efficiency was also envisaged, assuming a 50% reduction in consumption (Fig. 2). Similarly, for ecosystem services⁶, two scenarios were defined based on two basic elements; the first of a spatial nature (the proximity spaces available for the strengthening of ecosystem services) and the second of a func-

tional nature (the ecosystem services that can be concretely strengthened or introduced in the different proximity spaces). Starting from the current "cooling map", expression of the ecosystem service currently provided in the study area, i.e. the contribution that vegetation offers to mitigating heat peaks, scenario SE01 was constructed by hypothesising the widest possible increase in Tree Canopy Coverage – and in a broader sense of vegetation cover, including shrubs and grasses – in the spaces surveyed in the relative map of opportunities. Scenario SE02 represents a Multi-Functional Scenario that aims both at a consistent increase in Tree Canopy Cover, and at the introduction of ecosystem services, which are currently absent in the study area⁶ (Fig. 3).

Similarly to the two previous areas, an MA01 scenario has been defined for

that of mobility and accessibility, which is inspired by the Barcelona *Superilles* experimentation, and which envisages alternating the streets, one every two or three, leaving one street for more accessibility functions, with driveways, parking spaces and installations for the home delivery of e-commerce products, and allocating the other to host the most intense transformation interventions in favour of proximity, with bicycle lanes, parking spaces, green spaces or essential services that can be reached on foot or by bicycle. In this scenario, an urban sustainability criterion is pursued by reducing the environmental impact of mobility (Fig. 4).

Simulation models and data acquisition

In order to measure impacts and verify the effectiveness of actions of the scenarios in the three areas, downscaling was carried out by choosing a signifi-

Estimated annual electricity consumption

Estimated annual electricity PV production

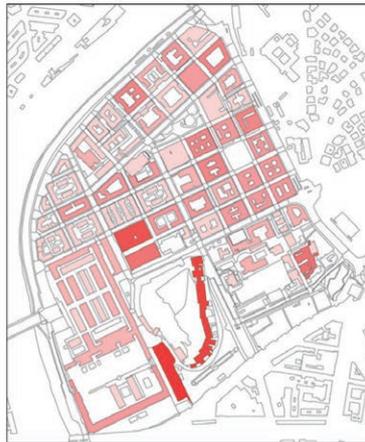
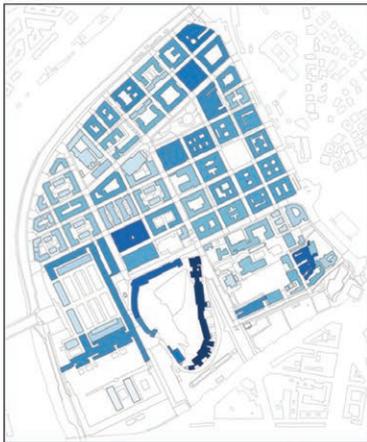
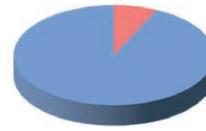


Scenario E01:

Estimated current electricity consumption:
31.081,46 MWh/year

Estimated electricity production from PV using only the roofs of public buildings and parking:
2.339,79 MWh/year

8% of needs covered by RES

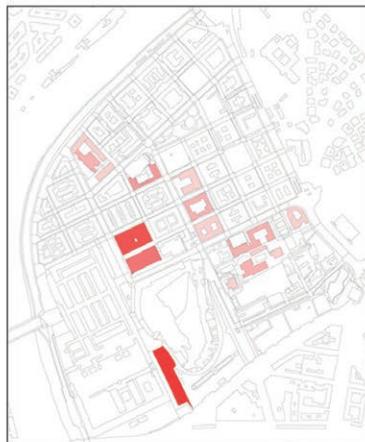
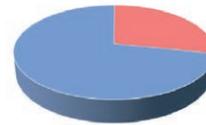


Scenario E02:

Estimated electricity consumption electric heating (heat pump COP 4*):
47.458,48 MWh/year

Estimated electricity production from PV using all flat roof and all the available sloped roof**:
19.597,24 MWh/year

41% of need covered by RES

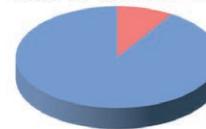


Scenario E03:

Estimated electricity consumption post building energy upgrading intervention (heat pump COP 4* and envelope upgrading) with 50% reduction in consumption:
23.729,24 MWh/year

Estimated electricity production from PV using only the roofs of public buildings and parking:
2.339,79 MWh/year

10% of needs covered by RES



1 - 30 MWh/year
 30 - 100 MWh/year
 100 - 200 MWh/year
 200 - 350 MWh/year
 350 - 500 MWh/year
 500 - 700 MWh/year
 700 - 900 MWh/year
 900 - 1.100 MWh/year
 1.100 - 4.500 MWh/year
 4.500 - 6.500 MWh/year



1 - 200 MWh/year
 200 - 300 MWh/year
 300 - 400 MWh/year
 400 - 500 MWh/year
 500 - 600 MWh/year
 600 - 700 MWh/year
 700 - 800 MWh/year
 800 - 900 MWh/year
 900 - 950 MWh/year



*Thermal consumption was transformed into electrical consumption by dividing the sum of these by 4 (COP). This because almost all thermal needs are currently covered by gas heating systems, so, assuming these systems are replaced by electrical heat pumps, it was necessary to transform these thermal kWh into electric kWh.
 **For residential buildings using 60% of available space for non residential 60%.

03| **Scenario SE00:
 Actual tree canopy**



**Scenario SE01:
 Maximised tree canopy**



**Scenario SE02:
 Ecosystem services**



Scenario interventions

Scenario SE01:

The SE01 scenario was constructed anticipating the largest possible increase in “Tree Canopy Coverage”- and with a greater breadth vegetation cover, including bushes and grasses:

- Increase in tree cover, with an average “canopy” of 60/80%, along all streets, open parking areas and relevant spaces
- Increase of vegetation and bush coverage in private gardens, courtyards, open private and public spaces
- Creation of green roofs on all the flat roofs of buildings
- “Desealing” and planting in derelict areas

Scenario SE02:

Scenario SE02 represents a “Multifunctionality Scenario” that aims at both a substantial increase in tree canopy cover and the introduction of ecosystem services that are currently absent in the study area:

- Enhance the provision of street trees
- Develop and extend tree planting in public gardens
- “Desealing” of a large unused asphalt area
- Creation of urban vegetable gardens
- Sitting “facilities/green points” in the communal gardens and courtyards
- Creation of a children’s playground
- Creation of “swales”
- Increasing the usability of archaeological areas
- Placement of green roofs on all flat roofs

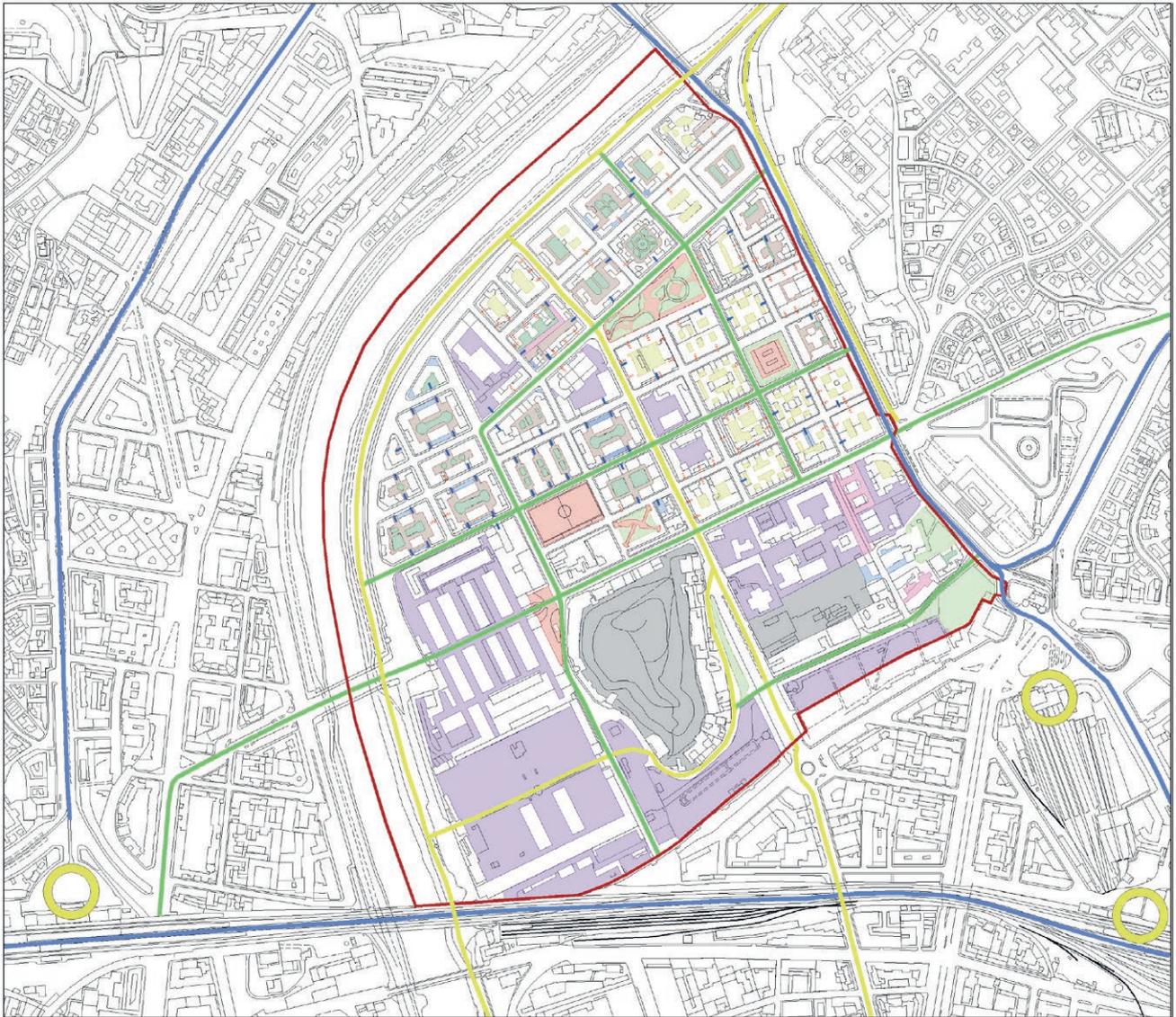
Tree canopy coverage

- 0% coverage
- 10%-30% coverage
- 30%-50% coverage
- 50%-70% coverage
- 70%-90% coverage
- 100% coverage

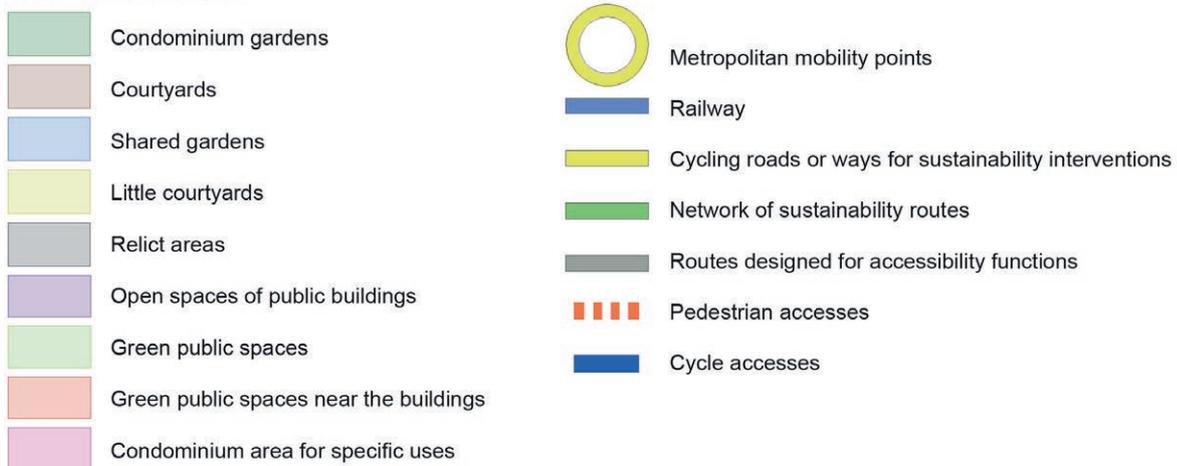
Ecosystem services

- Green points
- Urban vegetable garden
- Codd path
- Swales
- Public park
- Children’s playground
- Archeological area
- Green roof
- Habitat restoration

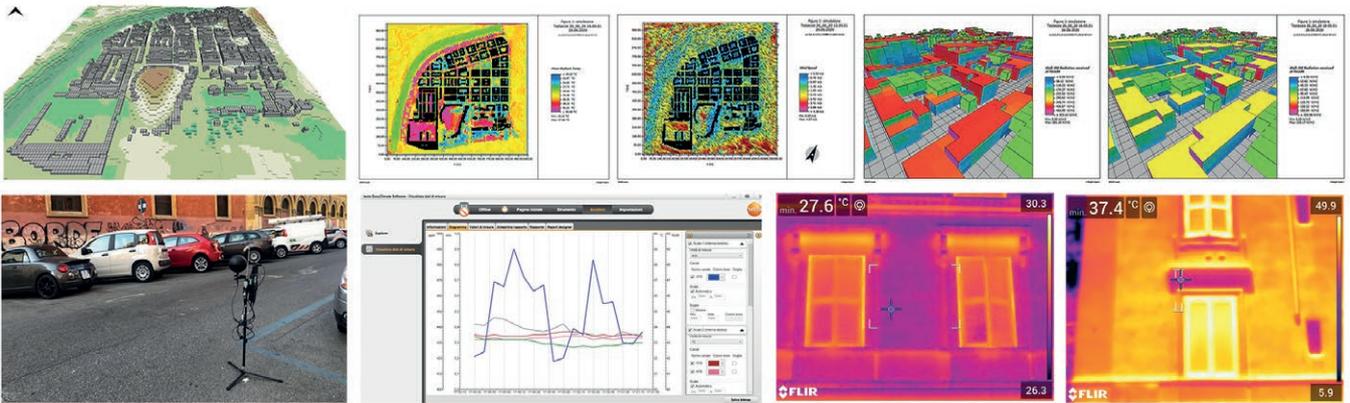
Scenario MA01:



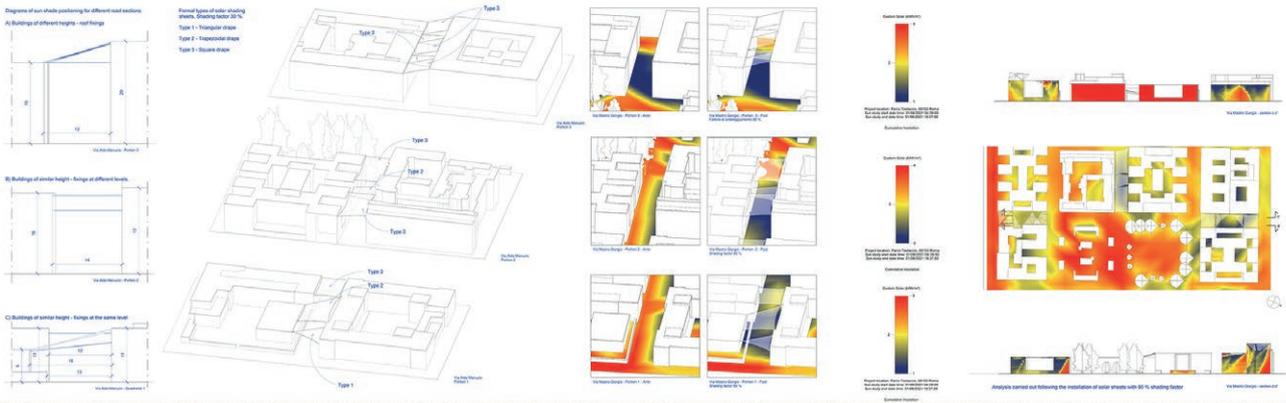
Scenario MA01:



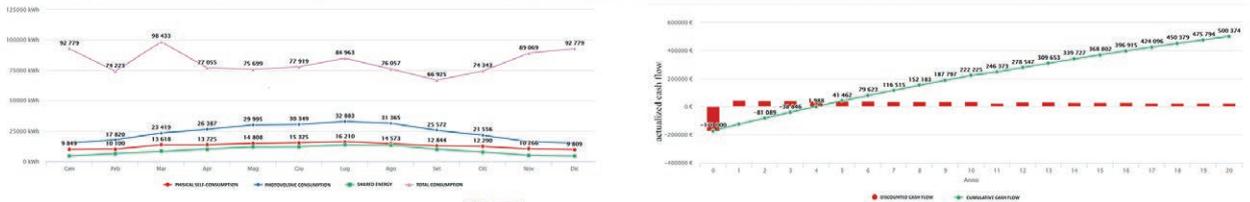
05 | Microclimate conditions simulations with ENVI-met software and in situ environmental measurements



Irradiance simulation of road facades for adaptive shading systems using Revit's Insights software



Dimensioning of RECs with the RECON tool of the ENEA - Laboratory Smart Cities and Communities



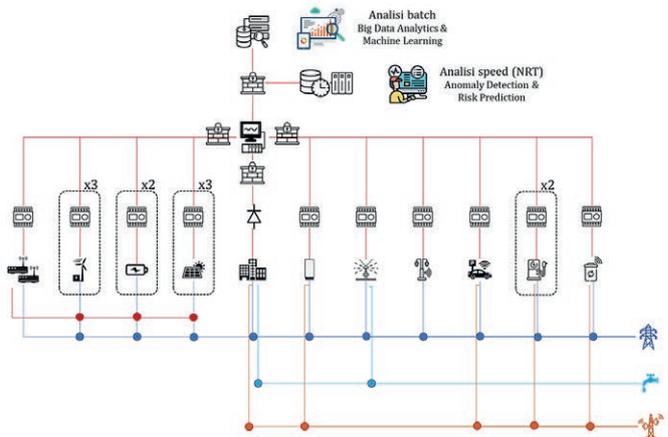
ENEA Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development | RECON Renewable Energy Community eONomic simulator

Dimensioning of RECs with the RECON tool of the ENEA - Laboratory Smart Cities and Communities

Management and control system



- batch analysis database
- speed analysis database
- system SCADA
- checker DCS/PLC
- managed switch
- firewall
- data diode
- waste collection center
- electric vehicle charging station
- Information Totem
- adaptive lighting
- irrigation of green spaces
- smart parking system



Per quanto riguarda l'ambito Servizi Ecosistemici è stato elaborato un modello per la valutazione dell'efficacia del "Tree Canopy Coverage" e simularne la "cooling capacity". Questo modello si è avvalso di una metodologia sperimentata in una recente ricerca (Geneletti *et al.*, 2020) in cui la "cooling capacity" non è traducibile effettivamente in termini di diminuzione delle temperature, ma di differenze di temperature indotte dai successivi scenari di rafforzamento dei servizi ecosistemici, utile pertanto per un confronto tra scenari e tra casi di studio.

Lo scenario della mobilità sostenibile e dell'accessibilità è stato studiato con riferimento al noto modello della città dei 15' (Moreno *et al.*, 2021). Poiché la definizione di città dei 15' è più una valutazione a posteriori che uno strumento progettuale che possa essere sfruttato per ricucire il tessuto urbano e collocare servizi utili ai fini della transizione ecologica, è stato introdotto un altro modello, quello della teoria dei grafi in ambito urbano. Se rappresentiamo la città come un grafo (D'Autilia and Spada, 2018; Achler *et al.*, 2010), allora, possiamo riformulare il concetto di città dei 15' non più come un'area intorno al servizio, ma come l'intersezione su tutti i servizi dell'unione degli insiemi di punti che accedono a un tipo di servizio in meno di 15' (C40, 2020). In questa rappresentazione i nodi dei 15-minuti mostrano topologie complesse che identificano lo stato di salute ambientale di un quartiere e dal quale, pertanto, dedurre dove collocare i possibili servizi di tipo ecologico trasformandoli in elementi di connessione (Fig. 6).

Dai modelli per prefigurare a uno strumento di supporto alle decisioni

Delineati gli scenari con i modelli di calcolo e simulazione, nell'ultima fase, sono state misurate le effettive potenzialità degli

cant quadrant of the district considered. Simulation models and survey methodologies were defined in phase 4 to acquire preparatory data for the evaluation of actions foreseen in the scenarios and their possible interactions.

With regard to the Energy area, models⁷ were developed for:

- simulation of microclimatic conditions, verified with in-situ environmental measurements, to identify criticalities and strengths in terms of the comfort of proximity spaces;
- simulation of the irradiation of the most critical street frontages, to test adaptive shading and energy production systems;
- sizing of RECs in relation to consumption and energy efficiency strategies;
- risk assessment to intercept anomalies and ensure energy supply continuity in self-sufficient districts (Fig. 5).

In the area of Ecosystem Services, a model was developed to assess the effectiveness of Tree Canopy Coverage and to simulate cooling capacity. This model made use of a methodology tested in recent research (Geneletti *et al.*, 2020) in which the cooling capacity is not actually translatable in terms of decreasing temperatures, but in terms of temperature differences induced by successive Ecosystem Service enhancement scenarios. This is useful for a comparison between scenarios and between case studies.

The sustainable mobility and accessibility scenario was studied with reference to the well known 15' city model (Moreno *et al.*, 2021). Since the definition of the 15' city is more of an *a posteriori* evaluation than a design tool that can be exploited to stitch together the urban fabric and place useful services for the purpose of eco-

logical transition, another model was introduced, that of graph theory in the urban context. If we represent the city as a graph (D'Autilia and Spada, 2018; Achler *et al.*, 2010), then we can no longer reformulate the concept of the 15-minute city as an area around the service, but as the intersection over all services of the union of sets of points that access a type of service in less than 15' (C40, 2020). In this representation, the 15-minute nodes show complex topologies that identify the environmental health status of a district, and from which the position of possible ecological services can be deduced by transforming them into connecting elements (Fig. 6).

spazi di prossimità in termini di capacità di mitigazione e adattamento attraverso gli interventi attuabili e relativi alla costituzione di sistemi energetici rinnovabili distribuiti in rapporto ai consumi e alle diverse condizioni fisico-ambientali (Fremouw, *et al.*, 2020); al potenziamento dei servizi ecosistemici e, soprattutto, della loro "cooling capacity"; alla dislocazione, in un'ottica di accessibilità e mobilità sostenibile, dei servizi essenziali. Poiché per ciascun ambito d'intervento si prefigurano soluzioni tra loro alternative, la ricerca ha cominciato a studiare uno strumento di supporto alla scelta dell'intervento più efficace in termini di contributo teorico alla decarbonizzazione, che può essere calcolato sulla base dei costi economici, dei benefici ambientali e dei vincoli urbani. Tuttavia, poiché gli interventi possibili insistono su aree già abitate, la scelta deve coinvolgere in qualche modo i cittadini che abitano la zona e corrisponde, pertanto, a un modello teorico che rappresenta un obiettivo da approssimare nel migliore modo possibile.

Il modello teorico prevede la diffusione capillare di piccoli interventi in punti in cui gli interessi degli abitanti possono essere in conflitto, ad esempio, con le scelte sulla destinazione d'uso degli spazi di prossimità. Questo problema viene generalmente affrontato attraverso la partecipazione (Hirt and Zahm, 2012) o gli incentivi economici (Liu *et al.*, 2021).

La modellizzazione delle scelte partecipative guidate da possibili incentivi economici o ambientali può essere calcolata con un modello di "population game", cioè una dinamica di popolazione guidata da un modello di Teoria dei Giochi (Sandholm, 2010)⁸.

Abbiamo applicato questa teoria al caso pilota del quartiere di Testaccio, considerando come 'agenti' gli spazi di prossimità e come 'strategie' i loro usi; abbiamo sperimentato questa teoria

logical transition, another model was introduced, that of graph theory in the urban context. If we represent the city as a graph (D'Autilia and Spada, 2018; Achler *et al.*, 2010), then we can no longer reformulate the concept of the 15-minute city as an area around the service, but as the intersection over all services of the union of sets of points that access a type of service in less than 15' (C40, 2020). In this representation, the 15-minute nodes show complex topologies that identify the environmental health status of a district, and from which the position of possible ecological services can be deduced by transforming them into connecting elements (Fig. 6).

From prefiguring models to a decision-making support tool

Having outlined the scenarios with calculation and simulation models,

in the last phase, the actual potential of proximity spaces was measured in terms of mitigation and adaptation capacity through implementable interventions related to the constitution of distributed renewable energy systems in relation to consumption and different physical-environmental conditions (Fremouw, *et al.*, 2020); to the enhancement of ecosystem services and, above all, their cooling capacity; and to dislocation of essential services, with a view to accessibility and sustainable mobility.

As alternative solutions are envisaged for each area of intervention, research has begun to study a tool to support the choice of the most effective intervention in terms of its theoretical contribution to decarbonisation, which can be calculated on the basis of economic costs, environmental benefits and urban constraints. However, since

06 | **Graph 15 minute city:
 Testaccio**



**Graph 15 minute city:
 Prima Porta**



- Point ≤ 15' far from pharmacy, supermarket and post office
- Point > 15' far from pharmacy, supermarket and post office
- Streets

the possible interventions insist on areas that are already inhabited, the choice must, somehow, involve citizens living in the area and, therefore, correspond to a theoretical model that represents a target to be approximated as far as possible.

The theoretical model envisages the widespread implementation of small interventions in places where the interests of the inhabitants may conflict, for example, with decisions on the use of proximity spaces. This is generally addressed through participation (Hirt and Zahm, 2012) or economic incentives (Liu *et al.*, 2021).

The modelling of participatory choices driven by possible economic or environmental incentives can be calculated with a 'population game' model, i.e. a population dynamic driven by a Game Theory model (Sandholm, 2010)⁸. We have applied this theory to the pilot

case of the Testaccio district, considering proximity spaces as 'agents' and their uses as strategies. We have tested this theory on flat roofs for experimentation, whose uses – according to the scenarios outlined above – may be the installation of photovoltaic panels, heat pumps, green roofs or even a non-intervention. Each strategy has an economic cost and an environmental benefit, and the payoff of an agent depends on the behaviour of its opponent in the sense that, if the opponent installs photovoltaic panels, it may become worthwhile for the agent to install an electric heat pump because the cost of energy has been reduced.

The environmental benefit of each strategy can be calculated in terms of a reduction in emissions. The evaluation of the cost of the strategy is more complex because it concerns the investment, its payback time, the change

in property value or the hedonic price. With the intention of quantifying the achievable decarbonisation, a transition from the current state of electricity consumption to production from renewable sources was hypothesised for application to the flat roofs of Testaccio. The purpose was to identify, among the conflicts of use of the space, the equilibrium condition in which it will not be convenient to change the intended use because it has been identified as the most convenient strategy in terms of the ratio between the economic cost of the intervention and the achievable environmental benefit.

A payoff matrix was hypothesised in which, for experimental purposes, only three roof use variables were considered: preservation of the current state of consumption (N), installation of photovoltaic panels for electricity production (PV), and installation of

heat pumps for winter air conditioning (PDC).

The electricity and heat costs in the current situation were calculated from sources in the literature and from the estimated kWh cost averaged between that of various electricity and gas suppliers. A CO₂/kWh value was assigned for the calculation of the environmental costs, of the electricity and heat portion (Lo Vullo *et al.*, 2020) (Fig. 7). To compare the costs of the current situation with the other two variables (PV and PDC), the same methodology was repeated for both configurations, also taking into account the installation and maintenance costs and, for the PDC, the costs of electricity for activation⁹.

At this point a payoff matrix was set up to study the possible combinations of use of the 100 m² flat roof of two Testaccio buildings, entering the

sui tetti piani, i cui usi – secondo gli scenari precedentemente delineati – possono essere l’installazione di pannelli fotovoltaici, di pompe di calore, di tetti verdi o anche un non-intervento. Ogni strategia ha un costo economico e un beneficio ambientale e il *payoff* di un ‘agente’ dipende dal comportamento del suo ‘opponente’ nei termini in cui, se l’opponente installa pannelli fotovoltaici, può diventare conveniente per l’agente installare una pompa di calore elettrica perché il costo dell’energia si è ridotto. Il vantaggio ambientale di ciascuna strategia può essere calcolato in termini di riduzione delle emissioni; la valutazione del

costo della strategia è invece più complessa perché riguarda l’investimento, il suo tempo di recupero, il cambiamento del valore immobiliare o il prezzo edonico.

Con l’intento di quantificare la decarbonizzazione conseguibile, per l’applicazione ai tetti piani di Testaccio è stata ipotizzata una transizione dallo stato attuale dei consumi elettrici a una produzione da fonte rinnovabile per individuare, tra i conflitti d’uso dello spazio, la condizione di equilibrio in cui non converrà cambiare la scelta d’uso, perché identificata come strategia più conveniente in termini di rapporto tra costo economico

ACTUAL CONSUMPTIONS >>> ENERGY TRANSITION >>> FUTURE CONSUMPTIONS



CURRENT CONSUMPTION SCENARIO¹

• **Electric consumptions:** 21 kWh/sqm per year x 100 sqm = 2.100 kWh per year • **Thermal consumptions:** 123 kWh/ sqm per year x 100 sqm = 12.300 kWh year

ANNUAL ECONOMICAL COSTS²



• **Electric:** 2.100 kWh x € 0,28/kWh = € 588,00 per year
 • **Thermal (gas):** 1.149,53 m³ per year³ x 1,08 €/m³ = 1.241,9 € per year

ANNUAL ENVIRONMENTAL COSTS



• **Electric:** 2.100 kWh x 0.352 kg CO₂/kWh = 739,2 kg CO₂ per year
 • **Thermal:** 12.300 kWh x 0.277 kg CO₂/kWh = 3.407,1 kg CO₂ per year

TOTAL ECONOMICAL COSTS =
1.829,49 € per year

TOTAL ENVIRONMENTAL COSTS =
4.146,3 kg CO₂ per year



ANNUAL ECONOMICAL COSTS⁴

• **Installation:** € 12.000,00/25 per years = € 480,00 per year
 • **Maintenance:** € 35,00⁵/kWp per year x 10 kWp = € 350,00 per year

ECONOMICAL UTILITIES PV



• **Electricity bill savings:** 10 kWp⁷ x 1.562 kWh/sqm x 1,13 x 0,8 = 14.120,50 kWh per year
 For current electricity consumption of 2.100 kWh year, there is the complete savings of the electricity bill € 588,00 per year

ENVIRONMENTAL UTILITIES PV



• **CO₂ savings:** the cost of the electricity component, 739,2 kg CO₂ per year, is subtracted



ANNUAL ECONOMICAL COSTS⁴

• **Installation:** € 15.000,00/25 per years = € 600,00 per year
 • **Maintenance:** € 150.00 per year
 • **Electricity:** 12.300 kWh per year (thermal)/4 (Heat Pump COP)⁶ = 3075 kWh per year (electric) x € 0,28/kWh = € 861

ECONOMICAL UTILITIES HP



• **Thermal bill savings:** the HP replaces existing gas boilers, so there is a zero gas consumption, with a bill savings of €1241,49 per year

ENVIRONMENTAL UTILITIES HP



• **CO₂ savings:** the CO₂ cost of the gas component was subtracted from the initial environmental cost and the CO₂ amount of the HP electrical consumption was added. 3.407.1 kg CO₂ per year - (3075 kWh per year x 0.352 kg CO₂/kWh) = 2324.7 kg CO₂ per year

N: actual consumptions **PV:** Photovoltaic panels **HP:** heat pumps

¹ | source: Integrated National Energy and Climate Plans (NIPECs), Electricity consumption: 21 kWh/sqm per year; Thermal consumption: 123 kWh/sqm per year; Total consumption: 144 kWh/sqm per year (energy data of current buildings with fossil fuel thermal generator)

² | Average cost per kWh estimated among various electricity and gas suppliers in July 2022

³ | To calculate the thermal costs due to methane gas, kWh per year was transformed into m³ per year (1 kWh contains thermal energy generated by burning 0.09345806 m³ gas (12300 kWh per year x 0.09345806 = 1.149,53 m³ gas per year)

⁴ | Estimated prices per kWp in the Superbonus 100% scenario, assuming a reference period of 25 years of life cycle, and spreading the costs over the time period

⁵ | Considering 1kWp/10 sqm and a total area of 100 sqm

⁶ | A consumption of 0,25 electrical W for each thermal W

⁷ | Estimated annual production of 10 kWp on 100 sqm, average radiation on horizontal surface of 1.562 kWh/sqm, correction coefficient of 1,13 (tilt of 30° and South orientation), coefficient of 0,8 for 20% losses

dell'intervento e beneficio ambientale conseguibile.

È stata ipotizzata una matrice di *payoff* in cui, a scopo sperimentale, sono state considerate solo tre variabili d'uso del tetto: conservazione dello stato attuale dei consumi (N), installazione di pannelli fotovoltaici per la produzione di energia elettrica (FV), installazione di pompe di calore per la climatizzazione invernale (PDC).

A partire da fonti in letteratura, e dal costo in kWh stimato in media tra quello di vari fornitori di energia elettrica e di gas, sono stati calcolati i costi elettrici e i costi termici in bolletta della situazione attuale. Per il calcolo dei costi ambientali, della porzione elettrica e termica, è stato attribuito un valore di CO₂/kWh (Lo Vullo *et al.*, 2020) (Fig. 7).

Per confrontare i costi della situazione attuale, con le altre due variabili (FV e PDC) è stata ripetuta la stessa metodologia per entrambe le configurazioni inserendo anche i costi per l'installazione e la manutenzione e, per la PDC, i costi dell'energia elettrica per l'attivazione⁹.

A questo punto è stata impostata una matrice di *payoff* per lo studio delle possibili combinazioni d'uso del tetto piano di 100 m² di due edifici di Testaccio, inserendo i valori in € e in CO₂ calcolati per le varie opzioni, ed eseguendo il rapporto tra costo unitario e decarbonizzazione (€/kg CO₂) secondo la bimatrice in cui N, FV e PDC sono il rapporto per unità di area tra costo economico e decarbonizzazione delle diverse strategie sui due tetti.

Facendo evolvere il sistema, un punto di equilibrio stabile si ottiene quando il 10% dei tetti resta inutilizzato, il 72% installa pannelli fotovoltaici e il restante 18% viene utilizzato per le pompe di calore, come mostrato nella Fig.8 elaborata con

values in € and in CO₂ calculated for the various options, and carrying out the ratio between unit cost and decarbonisation (€/kg CO₂) according to the bimatix in which N, PV and PDC are the ratio per unit area between economic cost and decarbonisation of the various strategies on the two roofs.

By evolving the system, a stable equilibrium point is obtained when 10% of the roofs remain unused, 72% install photovoltaic panels, and the remaining 18% are used for heat pumps, as shown in Fig. 8 obtained with EvoDyn-3s (Izquierdo *et al.*, 2018). In this way, we obtain "spontaneous" dimensioning towards which the population dynamics of flat roofs converge.

Conclusions

The phase-out from coal-fired generation has presented challenging objectives that do not only concern climate

change, but an ecological crisis, which must come to terms with multiple 'unsustainable conditions', from the consumption of available resources to ecosystem alterations, from impact on our health to the safety of the environment in which we live. For example, if the use of non-programmable sources, such as wind and photovoltaic power, is today a condition that cannot be postponed in order to achieve a generation almost exclusively from renewable sources by 2030, the construction of plants and components necessary to use renewable sources will entail a consumption of materials that will dramatically affect mining, with uncontrollable impacts on the landscape. One understands, then, how conscious choices for the ecological transition depend on a complex framework of 'conveniences'. For this reason, the research presented was developed by

EvoDyn-3s (Izquierdo *et al.*, 2018). In questo modo otteniamo un dimensionamento "spontaneo" verso cui converge la dinamica della popolazione dei tetti piani.

Conclusioni

Il *phase-out* dalla generazione a carbone ha posto obiettivi sfidanti che non riguardano soltanto il cambiamento climatico, ma una crisi ecologica che deve fare i conti con molteplici "condizioni di insostenibilità", dal consumo delle risorse disponibili alle alterazioni ecosistemiche, dagli impatti sulla nostra salute alla sicurezza dell'ambiente in cui viviamo. Per esempio, se il ricorso a fonti non programmabili, come eolico e fotovoltaico, è oggi una condizione improcrastinabile per raggiungere entro il 2030 una generazione quasi soltanto da rinnovabile, la realizzazione di impianti e di componenti necessari per impiegare fonti rinnovabili comporterà un consumo di materiali tale da incidere drammaticamente sull'attività di *mining*, con incontrollabili impatti paesaggistici. Si comprende, allora, come scelte consapevoli per la transizione ecologica dipendano da un complesso quadro di "convenienze". Per questa ragione, la ricerca presentata è stata sviluppata cercando le relazioni più efficaci tra tre aspetti determinanti della decarbonizzazione – energia accessibilità e mobilità, servizi ecosistemici – attraverso i quali individuare e misurare gli impatti degli interventi di riconfigurazione degli spazi di prossimità della città. Modelli di analisi quantitativa e qualitativa alle scale urbana e tecnologica sono stati utilizzati per prefigurare le soluzioni e il loro impatto. Un supporto alle decisioni in fase di programmazione basato sulla teoria dei giochi permette di individuare un "punto di equilibrio" tra diverse opzioni progettuali, misurandone il vantaggio ambien-

searching for the most effective relationships between three determining aspects of decarbonisation – energy accessibility and mobility, ecosystem services – through which to identify and measure the impacts of interventions to reconfigure the city's proximity spaces. Quantitative and qualitative analysis models at the urban and technological scales were used to prefigure solutions and their impacts. Support to decision-making at the planning stage based on game theory allows the identification of a 'balance point' between different design options by measuring the environmental benefit in terms of emissions, and the cost of the investment in terms of payback time, change in property value or hedonic price. Support to decision-making thus defined makes it possible to measure, in relation to achievable economic and environmental benefits, the possible

options of use and the related technological solutions corresponding to the three areas of intervention – energy, mobility and ecosystem services – for neighbourhood spaces, suggesting their preferential callings to public administrators and planners appointed to pursue outcomes that are now increasingly verifiable.

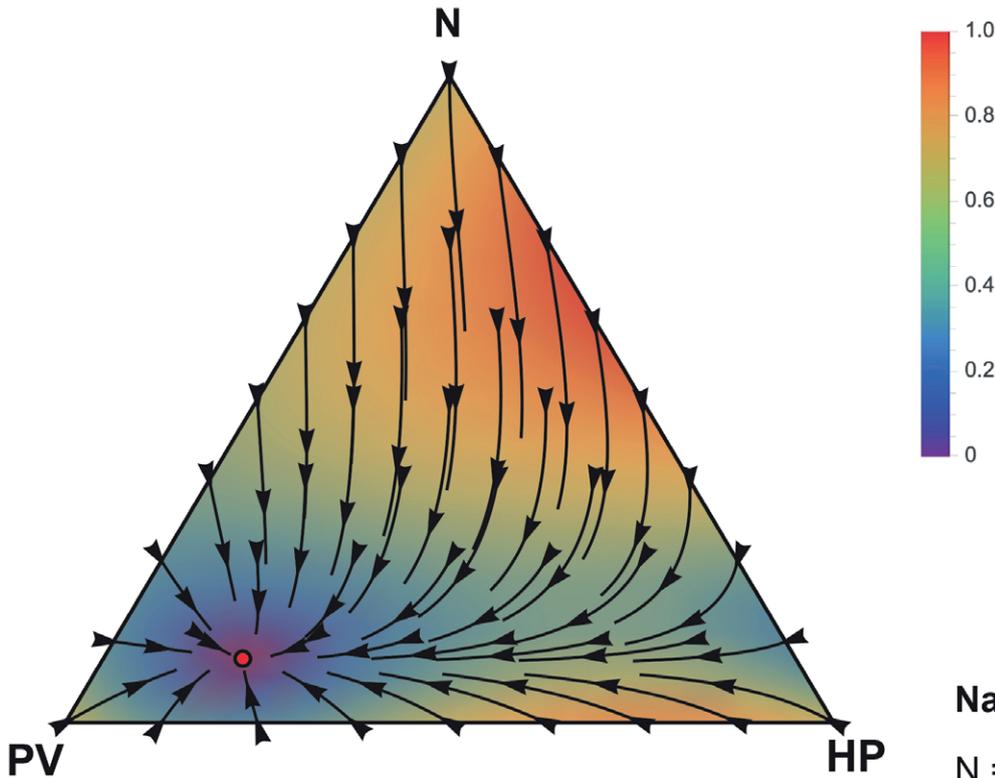
AUTHOR ATTRIBUTION AND ACKNOWLEDGEMENTS

Introduction, P.M.; Methodology, P.M. and I.M.; Models, I.M, F.F.; Decisions, I.M, F.F.; Conclusion, P.M. Special thanks to Roberto D'Autilia for the elaborations on Game Theory and City of 15¹.

NOTES

¹ Among the many initiatives: European Green Deal (EGD) strategy; Next-GenerationEU and Recovery and Re-

Nash equilibrium to the game theory for the use of the flat roof: N, PV and HP | 08



Nash equilibrium in %:

N = 10%
 PV = 72%
 HP = 18%

Economical payoff matrix 10 years period (€/year)

	N		PV		HP	
N	1.829,49	1.829,49	1.241,49	2.071,49	1.829,49	2.199,00
PV	2.071,49	1.241,49	2.071,49	2.071,49	2.071,49	750,00
HP	2.199,00	1.829,49	750,00	2.071,49	2.199,00	2.199,00

Ecological payoff matrix 10 years period (kg CO₂/year)

	N		PV		HP	
N	4.146,3	4.146,3	3.776,7	3.776,7	2.984,0	2.984,0
PV	3.776,7	3.776,7	3.407,1	3.407,1	1.703,6	1.703,6
HP	2.984,0	2.984,0	1.703,6	1.703,6	2.324,7	2.324,7

Economic/ecological payoff matrix 10 years period (€/kg CO₂/year)

	N		PV		HP	
N	0,44	0,44	0,33	0,55	0,61	0,74
PV	0,55	0,33	0,61	0,61	1,22	0,44
HP	0,74	0,61	0,44	1,22	0,95	0,95

tale in termini di emissioni e il costo dell'investimento in ragione del tempo di recupero, del cambiamento del valore immobiliare o del suo prezzo edonico. Il supporto alle decisioni così elaborato consente di misurare, in relazione a benefici economici e ambientali raggiungibili, le opzioni possibili d'uso e le relative soluzioni tecnologiche corrispondenti ai tre ambiti d'intervento energia, mobilità e servizi ecosistemici, per gli spazi di prossimità, suggerendone le vocazioni preferenziali agli amministratori pubblici e ai progettisti chiamati a perseguire esiti oggi sempre più verificabili.

ATTRIBUZIONE AUTORI E RICONOSCIMENTI

Introduction, P.M.; Methodology, P.M. e I.M.; Models, I.M, F.F.; Decisions, I.M, F.F.; Conclusion, P.M.

Un particolare ringraziamento a Roberto D'Autilia per le elaborazioni su Teoria dei Giochi e Città dei 15².

NOTE

¹ Tra le numerose iniziative: Strategia del *Green Deal* europeo (EGD); *Next-GenerationEU* e dispositivo per la ripresa e la resilienza (PNRR); Nuova iniziativa *Bauhaus* europea (NEB); Agenda Urbana europea 2021–2027; “*Fit For 55*” package.

² La EU ha selezionato 100 città che parteciperanno alla *EU Mission for 100 climate-neutral and smart cities by 2030*.

³ Si vedano i numerosi interventi su *The European Climate Adaptation Platform Climate-ADAPT*.

⁴ La ricerca è stata condotta nell'ambito del progetto PRIN 2017 “TECHSTART-key enabling TECHNOLOGIES and Smart environment in the Age of gReen economy. Convergent innovations in the open space/building system for climate mitigation” (PI Prof. Mario Losasso).

silience Facility (NRP); New European Bauhaus Initiative (NEB); European Urban Agenda 2021-2027; ‘Fit For 55’ package.

² The EU has selected 100 cities to participate in the EU Mission for 100 climate-neutral and smart cities by 2030.

³ See the numerous contributions on The European Climate Adaptation Platform Climate-ADAPT.

⁴ The research was conducted as part of the PRIN 2017 project “TECHSTART-key enabling TECHNOLOGIES and Smart environment in the Age of gReen economy. Convergent innovations in the open space/building system for climate mitigation” (PI Prof. Mario Losasso).

⁵ The database was developed with QGIS and Open Street Map basis.

⁶ Reference is made to the definition in the Millennium Ecosystem Assessment (2005).

⁵ Il data base è stato elaborato con QGIS e base *Open Street Map*.

⁶ Si fa riferimento alla definizione contenuta nel *Millennium Ecosystem Assessment* (2005).

⁷ I modelli sono stati elaborati con i software: ENVI-met (condizioni microclimatiche attuali e di progetto); Insights di Revit (ombreggiamento fronti stradali e irraggiamento superfici); tool RECON ENEA-Laboratorio *Smart Cities and Communities* (CER); *Supervisory Control And Data Acquisition* (SCADA) (previsione del rischio).

⁸ Questo approccio è stato di recente utilizzato per calcolare l'evoluzione dell'uso delle abitazioni a Venezia (Arbara and D'Autilia, 2021), e può essere una metodologia molto efficiente per il dimensionamento degli usi degli spazi di prossimità considerando essi come agenti, i cui comportamenti non condizionano localmente le altre scelte, determinando che il *payoff* dipenda solo dalle scelte degli oppositori. Dato che nei “*population game*” i *payoff* sono definiti come funzioni continue, il rapporto tra costi economici e benefici ambientali può essere un buon criterio quantitativo per misurare quale scelta, individuata secondo gli scenari dei tre ambiti d'intervento, sia più efficace. Dunque il modello prevede una sola popolazione e un set *S* di possibili strategie (usi degli spazi) allo scopo di calcolare quale frazione degli agenti, che chiamiamo “stato sociale”, adotterà l'una o l'altra strategia. A questo scopo è necessaria una matrice che associ ad ogni stato sociale un *payoff* *F*, economico e ambientale, per ogni strategia, consentendo di calcolare il *payoff* complessivo dell'area e il livello di decarbonizzazione. Individuate le strategie, possiamo dire che uno stato sociale è un equilibrio di Nash per il gioco *F* se ogni agente sceglie la risposta migliore (Izquierdo *et al.*, 2018). Definendo una matrice *A* di *payoff* come in Teoria dei Giochi, allora un “*population game*” è dato dall'equazione $F(x)=Ax$ dove *x* è lo stato della popolazione. Questo comportamento viene iterato fino al raggiungimento di un equilibrio.

⁹ Sono stati calcolati i benefici economici dovuti alla produzione di energia elettrica da FV, tenendo conto del risparmio sulla bolletta elettrica rispetto alla configurazione iniziale, e i benefici economici dovuti alla PDC, considerando l'azzeramento del consumo di gas per il riscaldamento e il relativo

quantitative criterion for measuring which choice identified according to the scenarios of the three policy areas is most effective. Therefore, the model involves a single population and a set *S* of possible strategies (uses of space) with the intention of calculating which fraction of the agents, which we call the social state, will adopt one or the other strategy. This requires a matrix that associates each welfare state with a set of payoffs *F*, economic and environmental, for each strategy, allowing us to calculate the overall payoff of the area and the level of decarbonisation. Having identified the strategies, we can say that a welfare state is a Nash equilibrium for the *F* game if each agent chooses the best response (Izquierdo *et al.*, 2018). Defining a payoff matrix *A* as in Game Theory, then a ‘population game’ is given by the equation $F(x)=Ax$ where *x* is the population state. This

behaviour is iterated until an equilibrium is reached.

⁹ The economic benefits due to the production of electricity from PV were calculated, taking into account the savings on the electricity bill compared to the initial configuration, and the economic benefits due to the PDC, considering the zero consumption of gas for heating and the related savings on the bill. For the CO₂ benefits of the PV, the CO₂ cost of the electricity component was subtracted, while for the PDC, the CO₂ cost of the gas component was subtracted from the initial environmental cost and the amount of CO₂ due to the PDC's electricity consumption was added.

risparmio in bolletta. Per i benefici in termini di CO₂ relativi al FV, è stato sottratto il costo in CO₂ della componente elettrica, mentre per la PDC è stato sottratto, rispetto al costo ambientale iniziale, il costo di CO₂ della componente gas e aggiunta la quantità di CO₂ dovuta ai consumi elettrici della PDC.

REFERENCES

- Achler, G. and Barra, A. (2010), "A numerical investigation of the jamming transition in traffic flow on diluted planar 198 networks", *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 24, pp. 6351-6363.
- Arbara, S. and D'Autilia, R. (2021), "A Population Game Model for the Expansion of Airbnb in the City of Venice", *Sustainability*, Vol. 13(7), p. 3829.
- C40 Knowledge Hub (2020), "How to build back better with a 15-minute city", available at: https://www.c40knowledgehub.org/s/article/How-to-build-back-better-with-a-15-minute-city?language=en_US (accessed on 22/08/2022).
- D'Autilia, R. and Spada, M. (2010) "Extension of Space Syntax Methods to Generic Urban Variables", *Urban Science 2018*, Vol. 196, n. 2, p. 82.
- Droege, P. (2008), *La città rinnovabile. Guida completa ad una rivoluzione urbana*, Edizioni Ambiente.
- Fremouw, M., Bagaini, A. and De Pascali, P. (2020), "Energy potential mapping: Open data in support of urban transition planning", *Energies*, vol. 13(5), pp. 1-15.
- Geneletti, D., Cortinovis, C., Zardo, L. and Blal Adem, E. (2020), *Planning for Ecosystem Services in Cities*, Springer Open, Cham, Switzerland.
- Hirt, S. and Zahm, D. (2014) "The Urban Wisdom of Jane Jacobs, Routledge", available at: <https://doi.org/10.4324/9780203095171> (Accessed on 22/08/2022).
- Izquierdo, L.R., Izquierdo, S.S. and Sandholm, W.H. (2018), "EvoDyn-3s: A Mathematica computable document to analyze evolutionary dynamics in 3-strategy games", *SoftwareX*, Vol. 7, pp. 226-233.
- Liu, Z., Wang, S., Qi Lim, M., Kraft, M. and Wang, X. (2021), "Game theory-based renewable multi-energy system design and subsidy strategy optimization", *Advances in Applied Energy*, Vol. 2, 100024.
- Lo Vullo, E., Muntean, M., Duerr, M., Kona, A. and Bertoldi, P. (2020), "GHG Emission Factors for Electricity Consumption", European Commission, Joint Research Centre, available at: <http://data.europa.eu/89h/919df040-0252-4e4e-ad82-c054896e1641> (accessed on 22/08/2022).
- Marrone, P. and Montella, I. (2022), "An experimentation on the limits and potential of Renewable Energy Communities in the built city: buildings and proximity open spaces for energy decentralization", *Renewable and Sustainable Energy Transition*, Vol. 2.
- Moreno, C., Allam, Z., Chabaud, D., Gall, C. and Pratlong, F., "Introducing the 15-minute city: Sustainability resilience and place identity in future post-pandemic cities", *Smart Cities*, Vol. 4, n. 1, pp. 93-111.
- Sandholm, W.H. (2010), *Population Games and Evolutionary Dynamics*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts London, England.