

**Zeitschrift:** Archi : rivista svizzera di architettura, ingegneria e urbanistica = Swiss review of architecture, engineering and urban planning

**Herausgeber:** Società Svizzera Ingegneri e Architetti

**Band:** - (2006)

**Heft:** 2

**Artikel:** Modelli matematici per la simulazione della dinamica dei sistemi urbani

**Autor:** Albeverio, S. / Andrey, D. / Giordano, P.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-133446>

#### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 16.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**



# Modelli matematici per la simulazione della dinamica dei sistemi urbani

S. Albeverio, D. Andrey,  
P. Giordano, A. Vancheri

## Introduzione

È possibile prevedere lo sviluppo di un sistema urbano? Come cambia l'assetto territoriale di un sistema urbano dopo la modifica di una zona d'insediamento? È possibile prevedere gli effetti di una revisione del piano regolatore sullo sviluppo di un territorio? A partire da quando un centro interrompe il suo sviluppo e inizia quello della sua periferia? È per rispondere a domande come queste che nel 2002 è iniziata l'attività del nostro gruppo di ricerca di matematica dell'Accademia di architettura di Mendrisio, grazie al progetto *Mathematical Modelling of urban growth processes: a cellular automata and statistical mechanical based approach*, finanziato dal Fondo Nazionale Svizzero per la Ricerca Scientifica e dall'USI. Recentemente una collaborazione interdisciplinare con l'*Institute for Contemporary Urban Project* dell'Accademia ha permesso di aumentare ulteriormente la qualità dei risultati ottenuti.

L'obiettivo generale della ricerca intrapresa è di sviluppare modelli matematici per la simulazione della dinamica dei sistemi urbani. Tali modelli permettono di fare previsioni sull'evoluzione nel tempo della localizzazione spaziale e della densità dei diversi utilizzi del territorio. Gli scenari di sviluppo elaborati possono essere impiegati per esempio quale supporto per gli esperti che devono decidere in tema di pianificazione e gestione del territorio, per fare previsioni sull'evoluzione dei prezzi dei terreni e del valore degli immobili e per cercare di prevedere l'impatto ambientale. Questo tipo di ricerca ha una consolidata tradizione soprattutto nel Regno Unito, in Olanda, in Francia, negli USA, e fa parte della cosiddetta *Geografia quantitativa* (si veda ad esempio [www.casa.ucl.ac.uk](http://www.casa.ucl.ac.uk)).

Il gruppo di ricerca ha sviluppato un proprio modello, denominato ACME, acronimo di Automa Cellulare e Master Equation, basato su un automa cellulare probabilistico a stati continui. Il concetto di base di un automa cellulare è ricostruire il comportamento complesso di un sistema a partire da semplici regole che descrivono l'interazione

di micro-componenti spaziali, dette celle, in cui si pensa suddiviso il sistema. Si tenta di descrivere un sistema complesso, come un sistema urbano, non «dall'alto» usando complesse equazioni, ma descrivendolo mediante interazioni di celle che seguono semplici regole, lasciando che la complessità emerga da queste interazioni. Nel nostro caso queste regole sono probabilistiche, nel senso che un'interazione non avviene in modo deterministico, ma solo con una certa probabilità. È importante notare che a causa della sua natura probabilistica il modello non può essere impiegato per fare previsioni a scale di tempo o di spazio troppo piccole: in generale esso non può dirci in modo sicuro se, né quando e neanche in quale parcella un dato evento si produrrà; ma a scale più grandi le fluttuazioni stocastiche tendono ad elidersi, e gli effetti sistematici ad emergere ed ecco che a queste scale una previsione diviene possibile. Le informazioni contenute nelle celle, che costituiscono il cosiddetto *stato della cella*, nella maggior parte degli automi cellulari utilizzati per questo tipo di ricerche, sono limitate ad un numero finito di valori (e.g. «cella prevalentemente di tipo residenziale»); una delle idee fondamentali del nostro progetto è di permettere invece un *continuo di valori* per una più adeguata descrizione degli stati di una cella (per esempio mediante le densità dei vari tipi di utilizzi). Il nostro automa cellulare può essere studiato con apparsi matematici molto potenti come quello della meccanica statistica o quello dei sistemi dinamici continui (cioè con equazioni differenziali), che per certi versi permettono una deduzione più agevole delle sue proprietà.



Una simulazione dello sviluppo della densità del costruito in Capriasca – Val Colla (abitanti per ettaro; 2004 - 2015)

## Idee fondamentali del modello

Lo scopo della nostra ricerca è quindi quello di cercare di prevedere l'evoluzione nel tempo di diverse grandezze dinamiche che descrivono un dato sistema urbano: la densità di volumi costruiti per i diversi utilizzi, la densità di copertura del suolo, il costo di terreni e quello degli affitti<sup>1</sup>, ma anche fare previsioni di flussi di traffico legati alla dislocazione delle diverse attività, il valore di indicatori di qualità della vita (ad esempio la superficie verde per abitante, l'emissione di sostanze inquinanti, l'accessibilità ai servizi), il valore di indicatori di sostenibilità ambientale (ad esempio il consumo di energia e di acqua ed i flussi di rifiuti prodotti dalla città).

Prima di tutto è importante capire come ogni cambiamento che interessa il sistema urbano (ad esempio costruzione o abbattimento di volumi, cambiamento di destinazione d'uso di volumi, di superfici e di terreni, occupazione o abbandono di volumi residenziali) sia il risultato di un atto decisionale operato da individui o gruppi, detti agenti (popolazione, amministrazione, imprenditori, operatori del settore terziario e commerciale)<sup>2</sup>.

Il modello simula quindi le decisioni degli agenti che sono responsabili dell'evoluzione del sistema urbano. L'informazione rilevante per i processi decisionali degli agenti viene trattata nel modello facendo uso di metodi di intelligenza artificiale (teoria fuzzy della decisione).

I processi decisionali degli agenti simulati si realizzano a diverse scale spaziali corrispondenti a diversi livelli di analisi cognitiva del contesto urbano. Alla scala macroscopica si tiene conto di fattori economici (ad esempio tasso di crescita dell'economia, domanda di manodopera e servizi, costo del denaro), di fattori geografici (ad esempio posizione e ruolo della città in un contesto regionale) e di fattori socio-demografici (ad esempio il tasso di crescita della popolazione, comportamenti di gruppi in relazione ai consumi). Alla scala mesoscopica troviamo invece le decisioni degli agenti legate per esempio alla rete di trasporto, alle infrastrutture e ai poli di attrazione turistica. Alla scala microscopica i fattori importanti sono quelli che contribuiscono a determinare la tipologia dell'insediamento urbano nelle immediate vicinanze di una proprietà, come ad esempio la densità dell'insediamento, la densità della copertura del suolo, la presenza di fonti di disturbo, le attività presenti, la presenza di zone verdi, come pure i parametri e i vincoli edificatori legati ai piani regolatori comunali.

Ogni processo decisionale sottende un insieme di obiettivi da raggiungere e di vincoli da rispettare. Un agente ha di fronte a sé un ventaglio molto ampio di opzioni tra le quali scegliere, ad esempio un imprenditore edile valuta fra più parcelle da costruire (il dove), il tipo di edificio e gli utilizzi previsti (il cosa), i volumi e le superfici lorde (il quanto), i valori di occupazione e di sfruttamento del terreno (il come). Per ognuna delle diverse alternative (valutazioni parziali) bisogna valutare il grado di soddisfacimento di vincoli e obiettivi. Le alternative che meglio soddisfano obiettivi e vincoli (valutazione globale) sono quelle che, nel modello, avranno luogo con maggiore probabilità. Una particolarità della teoria fuzzy della decisione, con la quale queste valutazioni parziali vengono assemblate per ottenere la valutazione globale, è la sua capacità di fungere da linguaggio interdisciplinare. Infatti una prima descrizione in linguaggio naturale del sistema di vincoli e obiettivi viene poi trasformata in una valutazione numerica. Questo procedimento ci permette di avvalerci della competenza di esperti ad esempio nel campo dell'economia, della sociologia e di esperti immobiliari in un effettivo e flessibile lavoro interdisciplinare.

## Il modello ACME

Per costruire un modello sulla base delle idee esposte sopra occorre innanzitutto possedere una descrizione della configurazione del sistema urbano a un dato istante di tempo, quindi una definizione della dinamica del sistema urbano; è necessario cioè definire come il modello simula le forze che determinano l'evoluzione della città.

Per descrivere il sistema urbano è importante introdurre una griglia spaziale. Nel nostro caso ogni cella della griglia è dell'ordine di un ettaro ed è formata dall'aggregarsi di parcelle o dallo spezzarsi di parcelle particolarmente grandi. Inoltre ad ogni cella è associato un intorno, cioè un insieme di celle che si trovano entro una fissata distanza. Con esso si tiene conto degli effetti di prossimità dei processi urbani (disturbo, presenza o assenza di determinati servizi o attrezzature pubbliche, prezzo di un bene nell'intorno stesso, ecc.).

I dati associati a ciascuna parcella sono i dati geometrici (necessari sia per una rappresentazione che per la sua posizione rispetto alle altre parcelle), la destinazione d'uso, la posizione delle infrastrutture, eventuali punti di richiamo turistico, i vincoli edificatori e infine i volumi e le superfici coperte distinti per destinazione d'uso.



Una simulazione dello sviluppo del valore delle residenze in Capriasca – Val Colla (chf; 2004 - 2015)

### Casi di studio

Il modello ACME è stato dapprima applicato ad un caso di studio artificiale, detto ArtCity: un sistema urbano inventato ma costruito il più possibile con dati dalle caratteristiche reali (vedi [www.mate.arch.unisi.ch/ACME](http://www.mate.arch.unisi.ch/ACME)); secondariamente è stato applicato a un caso di studio su dati reali, la regione della Capriasca e Val Colla. In questo secondo caso abbiamo voluto studiare lo sviluppo della regione nell'ipotesi di una forte pressione demografica da parte della vicina città di Lugano, dando quindi alla Capriasca e alla Val Colla il ruolo di «valvola di sfogo» per la crescita dell'agglomerato del Luganese. Tale amplificazione artificiale della pressione demografica è in parte giustificata dai dati statistici sul recente sviluppo della regione. La scelta aveva lo scopo principale di «collaudare» il modello per calibrarne i vari settori e testarne la capacità di produrre risultati verosimili sotto ipotesi specifiche. Esso ci ha permesso inoltre di imparare a trattare con dati reali (mappa catastale, piani regolatori e dati riguardanti gli edifici: superficie occupata, volume, tipo di occupazione preponderante).

### Vantaggi offerti dal modello ACME

Modelli matematici in urbanistica hanno una grande tradizione. In particolare negli ultimi 30 anni modelli che si avvalgono dello strumento informatico sono stati sviluppati e hanno trovato uso intenso in vari contesti (ad esempio il modello di White-Engelen nei Paesi Bassi, si veda [www.riks.nl](http://www.riks.nl)). Come accennato in precedenza il nostro modello presenta diversi vantaggi rispetto ai precedenti. Esso permette infatti una descrizione dettagliata del sistema urbano, fatta usando dati effettivamente utilizzati da chi si occupa di pianificazione o di territorio in generale, e con lo stesso linguaggio, e un'analisi il più possibile realistica dei processi decisionali degli agenti.

Un ulteriore vantaggio del modello è che la sua struttura di base, l'automa cellulare a stati continui nonché i processi decisionali descritti sopra, costituiscono il punto di partenza per tutta una serie di altri possibili modelli di sistemi complessi, alcuni strettamente legati all'urbanistica e all'architettura:

modelli per studiare la previsione dei prezzi (di terreni, affitti, immobili), modelli per studiare aspetti legati allo sviluppo sostenibile (inquinamento, uso delle risorse energetiche e idriche), modelli per studiare il traffico veicolare (analisi delle zone a maggior probabilità di ingorghi) o per studiare il movimento pedonale sia in aree urbane che all'interno di edifici (progettazione delle uscite di sicurezza, simulazioni di situazioni di panico, disposizione ottimale di opere artistiche in un museo).

### Conclusioni

Affrontare decisioni, anche politiche, sulla base di un adeguato approccio scientifico può essere importante ognqualvolta l'interagire con sistemi complessi può portare a conseguenze imprevedibili e non volute. I modelli matematici per il supporto alle decisioni non possono certo sostituire il decisore stesso, ma lo aiutano aumentando la base empirica su cui esso si può fondare, perfezionando la conoscenza su un sistema nel quale le molteplici interazioni rendono difficili le previsioni di comportamento. Revisionare un piano regolatore, decidere se e dove sistemare un grande generatore di traffico, progettare le uscite di sicurezza di uno stadio, ma anche capire se sostituire o meno semafori con rotatorie o decidere dove posizionare opere d'arte in modo da soddisfare obiettivi prefissati, costituiscono solo alcuni degli esempi per i quali il nostro modello matematico può essere proficuamente usato come sostegno all'opera dell'urbanista o dell'architetto.

### Note

1. Il modello ACME incorpora dei sottomodelli per la determinazione del costo del terreno e degli affitti.
2. Alcuni di questi eventi sono prodotti simulando internamente al modello i processi decisionali degli agenti, altri, come ad esempio la costruzione di un nuovo tratto autostradale, vengono inseriti «dall'esterno». In altre parole il modello cerca di prevedere solo la «dinamica naturale» del sistema e non quella «straordinaria».



Delimitazione geografica della zona considerata per il caso di studio