



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE

## FLORE

# Repository istituzionale dell'Università degli Studi di Firenze

### **L'impiego degli automi cellulari per la costruzione di scenari di cambiamento dell'uso del suolo**

Questa è la Versione finale referata (Post print/Accepted manuscript) della seguente pubblicazione:

*Original Citation:*

L'impiego degli automi cellulari per la costruzione di scenari di cambiamento dell'uso del suolo / I. Bernetti; N. Marinelli. - In: AESTIMUM. - ISSN 1592-6117. - STAMPA. - 52:(2008), pp. 1-30.

*Availability:*

The webpage <https://hdl.handle.net/2158/594769> of the repository was last updated on

*Terms of use:*

Open Access

La pubblicazione è resa disponibile sotto le norme e i termini della licenza di deposito, secondo quanto stabilito dalla Policy per l'accesso aperto dell'Università degli Studi di Firenze (<https://www.sba.unifi.it/upload/policy-oa-2016-1.pdf>)

*Publisher copyright claim:*

La data sopra indicata si riferisce all'ultimo aggiornamento della scheda del Repository FloRe - The above-mentioned date refers to the last update of the record in the Institutional Repository FloRe

(Article begins on next page)

Iacopo Bernetti  
Nicola Marinelli

*Dipartimento di Economia Agraria e  
delle Risorse Territoriali  
Università degli Studi di Firenze  
email: iacopo.bernetti@unifi.it  
email: nicola.marinelli@unifi.it*

## **L'impiego degli automi cellulari per la costruzione di scenari di cambiamento dell'uso del suolo**

The paper moves from the necessity of understanding the implications of landscape changes, as it is a very important issue for the sustainable planning of rural areas.

The observation of the current decrease in rural landscape, which is mainly due to both abandonment and the uncontrolled and rapid spreading of certain urban areas, especially underlines the pressure on rural-urban fringes. The attention to these areas is increasing, as policy makers and institutions recognise their particular role in the balance of rural landscape and, as a consequence, the particular issues and requirements.

The paper aims at the definition and testing of an integrated system for the analysis and the evaluation of the effects of agricultural and urban policies on land use change and landscape, in order to supply policy makers and public administrators with an important tool for the decision making process.

*Parole chiave: Paesaggio, Uso del  
suolo, Politiche agricole, Pianificazione  
urbanistica, Automi cellulari*

---

### **1. Introduzione**

La comprensione delle implicazioni connesse con i cambiamenti del paesaggio è di fondamentale importanza per la pianificazione sostenibile del territorio rurale. Numerosi studi (Prieler 2005 (MOSUS); EEA 2006; Bernetti et al. 2007; Bernetti e Marinelli 2007), hanno dimostrato come le dinamiche in atto siano caratterizzate dalla diminuzione di paesaggio rurale dovuta a due effetti distinti: l'abbandono e l'espansione disordinata e diffusa degli agglomerati urbani. L'analisi delle tendenze in atto e dei possibili futuri scenari hanno dimostrato come il consumo di suolo agricolo da parte delle attività insediative avvenga prevalentemente nei sistemi agricoli periurbani<sup>1</sup>. Il problema delle aree agricole al margine delle città è stato recentemente recepito da un parere del Comitato Economico e Sociale Europeo del 16 settembre 2004. In tale documento si riconoscono quali problematiche significative per la continuità e la stabilità dell'attività produttiva agricola nelle cinture urbane, la pressione dello sviluppo edilizio, la concezione di un'agricoltura senza agricoltori e la stessa riforma della PAC. Tali problemi appaiono molto più accentuati che in altre zone agroclimatiche analoghe, cosa che determina un rischio

---

<sup>1</sup> L'agricoltura periurbana, secondo la definizione di Donadieu e Fleury (1997) è "l'agricoltura che si trova alla periferia delle città, qualunque sia l'ordinamento culturale ed il sistema di produzione".

maggiore di scomparsa dell'attività agricola. Per poter armonizzare i rapporti fra città e campagna nei sistemi agricoli di pianura sono quindi necessari interventi integrati di sviluppo rurale e di pianificazione urbana e territoriale.

Da quanto esposto risulta essenziale poter disporre di un'adeguata base informativa tale da poter indagare i rapporti esistenti fra scenari di politica territoriale e rurale e conseguenti effetti in termini di cambiamento sul paesaggio.

Dall'esperienza internazionale acquisita dagli anni '70 ad oggi nell'ambito della modellizzazione dei cambiamenti di uso del suolo si sono apprese due fondamentali lezioni. (A) Il ruolo di questi modelli non è quello di realizzare previsioni esatte di ciò che accadrà in futuro, bensì prospettare scenari alternativi il più possibile diversi nel lungo termine che debbono essere impiegati per valutare opzioni nel breve termine. (B) La complessità dei problemi coinvolti (socioeconomici, geografici, geomorfologici, ecosistemici, ecc.) ha portato sempre di più ad utilizzare approcci che integrano più modelli di analisi che lavorano sinergicamente fra di loro.

In letteratura sono stati proposti molti metodi di individuazione e valutazione dei futuri scenari. I modelli maggiormente utilizzati sono basati su regressioni logistiche, *multi agent model* e sui cosiddetti *cellular automaton model*.

Ciò premesso, scopo del presente lavoro è quello di proporre un sistema integrato di analisi e valutazione paesistica degli effetti territoriali di scenari di politiche integrate attraverso l'impiego dell'approccio *Markov cellulari automaton* combinato con modelli di analisi multicriteriale geografica.

## 2. Le analisi tramite scenari: teoria, metodi e applicazione al caso in esame

La determinazione degli scenari da utilizzare nell'analisi del cambiamento dell'uso del suolo è stata oggetto di un ampio dibattito in letteratura. Negli ultimi venti anni sono stati infatti proposti molti studi basati sulla costruzione di scenari che hanno risposto a differenti necessità attraverso l'implementazione di specifiche metodologie, tentando di dare una risposta a differenti domande.

La prima considerazione che emerge dall'analisi della letteratura è che la tipologia degli scenari che vengono prescelti varia in modo considerevole in base allo scopo dello studio. A tal fine sono state formalizzate tre tipologie di scenari in base ai processi ai quali gli studi intendono fornire un supporto: *policy optimisation*, *vision building* e *strategic orientation*<sup>2</sup>. Nella prima categoria ricadono gli scenari prescelti essenzialmente allo scopo di fornire risposte relative al miglior modo per raggiungere obiettivi determinati, scenari che quindi si risolvono nella determinazione del range degli indirizzi politici possibili e del loro svilupparsi in un arco di tempo predeterminato a partire da una delineata situazione di base comune. La seconda categoria riguarda invece gli scenari costruiti in rappresentazione di situazioni future che costituiscano il concreto obiettivo da raggiungere o, alternativamente, ciò che si vuole evitare che accada. La terza categoria è invece costrui-

---

<sup>2</sup> Westhoek et al. 2006

ta sulla base dell'ottica specifica di uno dei possibili agenti: si tratta in sostanza di una visione limitata (ad un'impresa, ad un'agenzia, ad un ente pubblico...) che tiene conto delle opzioni strategiche limitatamente all'agente considerato.

Come vedremo nel dettaglio in seguito, gli scenari prescelti per questo lavoro sono strettamente legati a scelte di carattere politico e di pianificazione.

I cambiamenti nell'uso del suolo in una specifica area geografica possono essere dettati da una moltitudine di fattori (dalle scelte di politica agricola, alle strategie delle singole aziende agricole, alle scelte urbanistiche) ognuno dei quali può rivelarsi più o meno determinante in un'ottica di lungo periodo. La letteratura<sup>3</sup>, però, sconsiglia la scelta di un numero elevato di dimensioni per la costruzione degli scenari, in quanto tale soluzione condurrebbe a una fase di analisi e di valutazione quanto mai complessa e con un alto fattore di incertezza. La scelta migliore, quindi, risulta essere quella di selezionare pochi casi che però risultino molto significativi; nel nostro caso la scelta è ricaduta su due dimensioni che rappresentano la presenza/assenza di fattori considerati rilevanti, una riguardante la pianificazione urbanistica e una riguardante la pianificazione rurale, che danno origine a una matrice  $2 \times 2$  per la definizione dei quattro scenari su cui si basa l'analisi del presente studio (Figura 1).

Attraverso la prima dimensione, che riguarda la pianificazione urbanistica, si cerca di rappresentare quelli che sono gli estremi scenari determinati da forte e debole azione di pianificazione. In particolare, la direzione della forte pianificazione considera non solo la compresenza e coesistenza dell'urbano e del rurale all'interno dei fronti urbani, ma considera la loro positiva compenetrazione. L'area geografica oggetto del presente studio, infatti, sebbene con le proprie peculiarità distintive, presenta numerose caratteristiche che contraddistinguono le fattispecie dei fronti urbano-rurali che sono stati oggetto di approfonditi studi di pianificazione in tutta Europa (Busck et al. 2007; Lange et al. 2007; Countryside Agency 2004). L'area di riferimento è collocata all'interno di quella che si può definire la "città ellittica" (Bernetti e Marinelli 2008), uno spazio che si estende da Firenze lungo la valle dell'Arno e comprende i centri urbani di Prato, Pistoia, Empoli, Lucca e Pisa; un'area che vede lo sviluppo urbanistico intorno ai centri più importanti e lungo le principali vie di comunicazione. Il fronte urbano-rurale viene a caratterizzarsi per un cambiamento progressivo non solo del suo aspetto, ma anche dei suoi connotati economici e sociali, in una situazione in cui il settore agricolo perde progressivamente il proprio ruolo in termini di settore economico di riferimento e l'estensione delle aree residenziali introduce problematiche relative alla presenza di molteplici funzioni sul territorio.

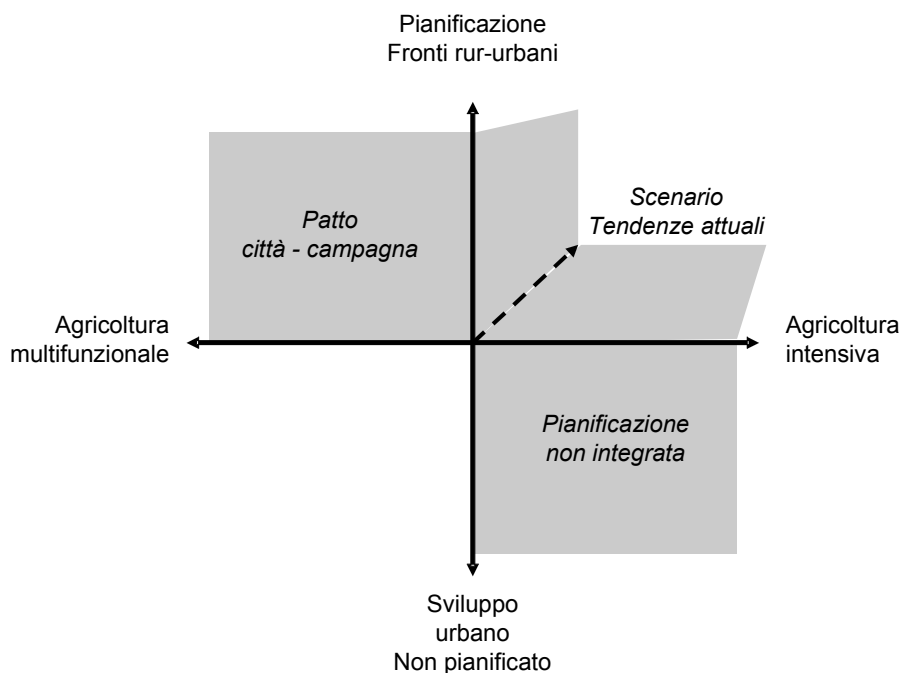
L'esperienza britannica in sede di studio degli aspetti della pianificazione nei fronti urbano-rurali (Countryside Agency 2004) può essere considerata un concreto punto di riferimento per la rappresentazione delle complesse problematiche in esame. Tale studio, infatti, parte dal presupposto imprescindibile che lo sviluppo

---

<sup>3</sup> Wack 1985; van der Heijden 1996; Ogilvy and Schwartz 1998; Westhoek et al. 2006.

Figura 1 – Dimensioni scenari

- Prima dimensione: pianificazione urbanistica
  - o Sviluppo città compatta, fronti urbani biopermeabili con diminuzione dell'artificializzazione effettiva per il 10% dell'urbanizzato 2006
  - o Sviluppo urbano su margini e linee di comunicazione
- Seconda dimensione: pianificazione rurale con interventi per il recupero delle aree estensivizzate o abbandonate nel periodo 1987-2006
  - o Agricoltura multifunzionale
    - Interventi agroambientali, miglioramento rete ecologica
    - Sviluppo agricoltura periurbana
    - Colture energetiche legnose (SRF) in aree collinari o in formazioni lineari multifunzionali (siepi da legno)
  - o Agricoltura industriale
    - Colture energetiche annuali in pieno campo



armonico dei fronti urbano-rurali debba basarsi su una chiara definizione di sostenibilità che faccia riferimento ai costi e ai benefici in termini economici, sociali e ambientali<sup>4</sup> all'interno dell'area di studio. Tutto questo allo scopo di dar forma ad

<sup>4</sup> Le cosiddette "tre gambe dello sgabello" della sostenibilità. Lo studio della Countryside Agency, a tal proposito, richiama il concetto di multifunzionalità delle attività agricole nei fronti urbano-rurali, sebbene in una accezione piuttosto diversa da quella proposta dalla letteratura italiana sull'argomento e più vicina ad un concetto di pluri-attività delle strutture agricole (diversificazione delle produzioni con inclusione di attività extra-agricole).

un sistema locale che rappresenti una sorta di “ponte” tra città e campagna che comprenda le nuove funzioni che l'insediamento residenziale richiede, nel rispetto e nel concreto miglioramento degli aspetti ecologici, economici, sociali, storici ed estetici dell'area di riferimento.

Come estremo opposto alla situazione appena descritta, nell'ambito della dimensione riguardante la pianificazione urbanistica, è stata prescelta una fattispecie meno restrittiva che permette uno sviluppo dell'urbanizzazione piuttosto libero, uno sviluppo che procede, non regolamentato, prevalentemente lungo i margini urbani e lungo le principali linee di comunicazione.

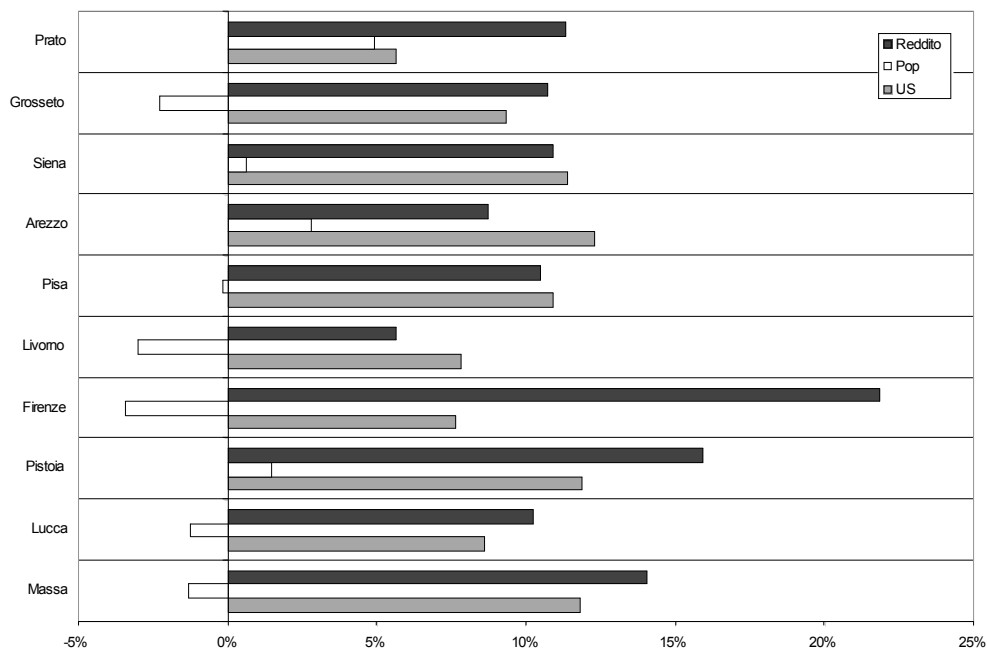
Le indicazioni per definire un simile contesto possono essere trovate proprio nell'analisi dello sviluppo dell'urbanizzazione all'interno della regione Toscana (Bernetti e Marinelli 2008), dove in alcune province sono rintracciabili indicazioni piuttosto evidenti di una apparentemente non pianificata espansione delle aree residenziali, svincolata da indicatori che possano fornire una razionale giustificazione ai cambiamenti in atto. Nello specifico, l'analisi del rapporto esistente tra l'*urban sprawl* all'interno delle singole province, il tasso di crescita della popolazione e il tasso di crescita del reddito pro-capite, dà luogo alla situazione descritta in Figura 2.

Fatta eccezione per le province di Firenze e Prato, nelle quali l'espansione delle zone residenziali è in particolar modo limitata dalla disponibilità di suolo rispetto alle altre province per motivi legati sia alle politiche urbanistiche in atto sia alle caratteristiche geografiche del territorio, per alcune province (Lucca, Pisa, Livorno, Massa e Grosseto) è registrato un aumento dell'*urban sprawl* che, sebbene accompagnato da un trend positivo per quanto riguarda il reddito, non coincide con un contemporaneo aumento della popolazione residente. Tale dato assume ancora più importanza se associato a quello relativo all'aumento dell'uso del suolo destinato all'industria, altro aspetto particolarmente importante nel contesto della “città ellittica”. Infatti, le province di Prato, Pistoia e Lucca fanno registrare un aumento dell'uso del suolo per l'industria non giustificato né da particolari aumenti del valore aggiunto per il settore né dell'occupazione, manifestando comportamenti di tipo essenzialmente speculativo nella destinazione del suolo.

La seconda dimensione utilizzata per la costruzione degli scenari riguarda invece la destinazione dell'uso del suolo per l'agricoltura.

Già nel 1999, a livello comunitario, è stata formalizzata per le aree agricole periurbane la necessità condivisa di considerarle aree soggette a particolari difficoltà e, di conseguenza, la necessità di affrontare i problemi di pianificazione in tali aree con particolare attenzione. L'articolo 20 del Regolamento (CE) n. 1257/1999 del FEAOG, infatti, afferma che *“Possono essere assimilate alle zone svantaggiate altre zone nelle quali ricorrono svantaggi specifici, e nelle quali l'attività agricola dovrebbe essere continuata, se del caso e a talune condizioni particolari, per assicurare la conservazione o il miglioramento dell'ambiente naturale, la conservazione dello spazio naturale e il mantenimento del potenziale turistico o per motivi di protezione costiera”*. Tale approccio è ribadito anche in Agenda 2000 e nella Revisione di Medio Termine della PAC. Successivamente, il parere di iniziativa del Comitato Economico e Sociale Europeo sull'agri-

Figura 2 – tassi di crescita del reddito pro-capite, della popolazione e dell'urban sprawl nelle province toscane nel periodo 1990-2000 (Fonte: ISTAT, Tagliacarne).



cultura periurbana del 16 settembre 2004 ha citato proprio tale regolamento per rafforzare la propria visione degli spazi agricoli periurbani in cui si pratica l'agricoltura periurbana come *"zone soggette a particolari difficoltà"*. Tali difficoltà sono le stesse citate anche dagli studi di pianificazione urbanistica per i fronti urbano-rurali citati in precedenza e che colgono nelle peculiarità produttive, paesaggistiche, sociali e storiche delle aree rurali ai confini delle città un'imprescindibile valore di cui tener conto per l'armonizzazione di tali realtà con l'espansione urbanistica. Gli aspetti multifunzionali dell'agricoltura sono quindi portati in primo piano anche nei contesti di sviluppo delle aree di confine tra città e campagna.

A livello nazionale, la questione dell'agricoltura nelle aree periurbane ha dato luogo a una serie di iniziative tese al riconoscimento delle opportunità rintracciabili per tali aree nei confronti del progressivo aumento dell'urbanizzazione e all'individuazione di modelli e indirizzi per lo sviluppo di un settore agricolo periurbano. Un importante passo in tal senso è costituito dalla proposta, nel 2006, di una Carta dell'Agricoltura Periurbana da parte della Cia, documento in cui si intende mettere in evidenza le particolari pressioni a cui sono sottoposte le aree agricole in prossimità urbana ma anche le opportunità legate al mercato, alla sicurezza alimentare e ai servizi ambientali generate proprio da tale prossimità. Anche in questo contesto vengono ripresi i principi formulati con il regolamento 1957/1999 e con il parere del Comitato Economico e Sociale Europeo del 2004, in

particolar modo relativamente alla necessità da parte delle aree metropolitane di essere dotate di strumenti di pianificazione che non compromettano l'esistenza del tessuto organico delle aree agricole periurbane e relativamente alla necessità di promuovere per tali aree dei processi di sviluppo sostenibile e dinamico attraverso interventi specifici e mirati.

Una particolare attenzione nel costruire la dimensione relativa all'agricoltura è stata riservata agli aspetti inerenti la presenza di colture energetiche. Gli estremi della dimensione prevedono infatti indirizzi di politica agricola che mirano a:

1. un'agricoltura di tipo multifunzionale determinata da interventi di tipo agroambientale, dal miglioramento delle reti ecologiche, dallo sviluppo dell'agricoltura periurbana secondo le opportunità relative a sicurezza alimentare e tipicità delle produzioni locali, dalla promozione di colture energetiche legnose in aree collinari o in formazioni lineari (siepi da legno);
2. un'agricoltura di tipo industriale prevalentemente basata su colture energetiche annuali di pieno campo.

La particolare attenzione nei confronti delle colture energetiche nella definizione degli scenari è dovuta al fatto che con la riforma della PAC<sup>5</sup> e con l'aggravarsi dell'"emergenza" riguardante i combustibili fossili tali colture hanno visto una forte espansione delle superfici ad esse destinate. Tali colture quindi entrano in diretta competizione con le colture tradizionali per l'uso del suolo, dando luogo a forme molto diverse di impatto sull'ambiente (Palchetti e Vazzana 2006).

### **3. L'approccio degli automi cellulari nella simulazione dei cambiamenti dell'uso del suolo**

Gli automi cellulari sono nati alla fine degli anni '40 grazie al lavoro dei matematici Stanislaw Ulam and John von Neumann (Wolfram 1986); Un successivo importante sviluppo, anche con una particolare attenzione alle possibili applicazioni, si è poi avuto grazie a lavori di Stephen Wolfram e altri. Gli automi cellulari sono stati applicati in fisica, chimica, biologia, ecologia e, a partire dalla fine degli anni '80, nello studio delle dinamiche urbane e territoriali.

L'idea che sta alla base del concetto di automa cellulare (AC) è che da interazioni locali semplici scaturiscono comportamenti globali complessi. Nei seguenti paragrafi introdurremo i dati che costituiscono un generico AC.

1. Spazio: Nello spazio  $\mathbb{R}^d$  (dove  $d$  è la dimensione dello spazio nel quale si trova l'AC, solitamente  $d \leq 3$ ) viene considerato un insieme di "cellule" (o "celle"), disposte in genere su un "reticolo"  $U$ .

---

<sup>5</sup> Tra le misure di mercato, la Riforma prevede per le colture energetiche un aiuto di 45 €/ha subordinato alla stipulazione di un contratto con l'industria.



2. Intorno: Si assume che una qualsiasi cella  $i \in U$  interagisca solo con un certo insieme  $N(i)$  di altre celle (ad esempio quelle immediatamente vicine).
3. Stati: Ad ogni cella è attribuito uno "stato", che esprime una sua qualità. Gli stati sono per ipotesi in numero finito.
4. Regole di transizione: Si introduce una "dinamica" nel modello, cioè delle regole per precisare come gli stati delle celle evolvono nel tempo. Le regole di transizione descrivono il passaggio dallo stato  $\sigma_{i,t}$  = "stato della cella  $i$  al tempo  $t$ " a quello  $\sigma_{i,t+1}$  al tempo  $t+1$ . Si noti, quindi, che il tempo in un AC è per ipotesi discreto  $t = 0, 1, 2, 3, \dots$ . Infine la regola di evoluzione viene assunta dipendere dagli stati  $\sigma_{j,t}$  per  $j$ , cioè solo dagli stati delle celle  $j$  vicine a  $i$  (nel senso di appartenenti all'intorno prefissato  $N(i)$ ).

Nel caso di modelli applicati agli spazi territoriali si hanno le seguenti caratteristiche.

- Lo spazio considerato è uno spazio geografico, rappresentato da una mappa *raster*;
- L'intorno  $N(i)$ : è definito da una regione quadrata o circolare, detta *kernel* o finestra mobile, caratterizzata da una certa dimensione.
- Gli stati: rappresentano tipicamente l'uso del suolo dominante nella cella.
- Le regole di transizione dipendono da due ordini di fattori: fattori esogeni geografici, che definiscono la probabilità di transizione e stato delle celle nell'intorno alla localizzazione considerata. Il processo è regolato dal vincolo di scenario, che descrive lo stato finale del territorio in termini di superficie complessiva per ciascun uso del suolo.

Il modello applicato nel presente lavoro è quello proposto da Eastmann (2006) che combina il concetto di automa cellulare con le matrici di transizione markoviane per l'individuazione di scenari finali di uso del suolo e con l'analisi multicriteriale geografica per l'individuazione delle mappe di potenziale di transizione verso i diversi usi del suolo (metodo MCDM-MC-CA).

L'approccio proposto si basa sulla considerazione che i principali limiti della teoria degli automi cellulari così come sono stati definiti originariamente sono i seguenti: (1) le transizioni in un modello CA sono libere, ogni cella può liberamente mutare di stato; nei processi di cambiamento di uso del suolo invece è necessario ipotizzare una domanda finale per ciascuna tipologia di uso; (2) lo spazio in cui avvengono i cambiamenti è isotropico e le transizioni dipendono solamente dalle regole del modello e dallo stato delle celle confinanti, la trasformazione d'uso del suolo invece dipende non solo dagli usi del suolo confinanti alla localizzazione in esame, ma anche da caratteristiche sia di tipo socioeconomico che geografico. L'approccio integrato MCDM-MC-CA tenta di superare i due limiti ricorrendo per il primo al metodo delle matrici di transizione markoviane e per il secondo all'analisi multicriteriale.

Le catene Markoviane applicate alle probabilità di transizione hanno lo scopo di modellizzare la domanda di cambiamento di uso del suolo. Gli sviluppi che si sono

avuti negli ultimi anni nel settore del telerilevamento hanno reso possibile il confronto nei cambiamenti di uso del suolo a intervalli di tempo prefissati. In tali analisi i dati sono organizzati in matrici dette *Matrici di Transizioni*. Tali analisi sono generalmente realizzate in consuntivo, ma per il supporto di decisioni di politica ambientale e territoriale è di grande interesse la possibilità di poter calcolare possibili scenari di cambiamento futuro. La teoria di Markov è uno degli approcci più largamente usati nella analisi delle possibili traiettorie di cambiamento nell'uso del suolo.

Una catena markoviana è calcolata a partire da un vettore  $s$  di distribuzione delle superfici nelle classi di uso del suolo al tempo  $t$  e da una matrice di probabilità di transizione ad un uso del suolo  $u$  a  $u'$  in un dato intervallo di tempo ( $\tau$ ).

$$s_{t+\tau} = A(\tau)s_t \quad (1)$$

Per il calcolo delle probabilità di transizione è necessario disporre di due mappe dell'uso del suolo al tempo  $t + \tau$ . La stima della massima verosimiglianza della probabilità di cambiamento di ciascun uso del suolo durante l'intervallo è:

$$m_{s,s',t} = \frac{n_{s,s'}}{\sum_{s'} n_{s,s'}} \quad (2)$$

dove le  $m_{s,s',t}$  rappresentano la probabilità di transizione da  $s$  a  $s'$  nell'intervallo di tempo  $t$ , e  $n_{s,s'}$  è il numero totale di transizioni. Per proiezioni future su intervalli di tempo diversi è possibile utilizzare la seguente procedura di normalizzazione:

$$\begin{cases} m_{s,s'} = 1 - e^{(\ln(1-p_{u,u',y}))/\tau} & \text{per } s \neq s' \\ m_{s,s'} = 1 - \sum_{s'} p_{s,s'} & \text{per } s = s' \end{cases} \quad (3)$$

dove  $\tau$  esprime la frazione dell'intervallo di tempo desiderato.

Relativamente al secondo problema, è necessario specificare una regola di transizione che consideri sia le caratteristiche geografiche e socioeconomiche del territorio sia lo stato delle localizzazioni prossime a quella in esame. Allo scopo un automa cellulare può essere definito tramite la seguente quadrupla:

$$(U, S, N, T). \quad (4)$$

Nella notazione suesposta  $U$  è lo spazio complessivo,  $S$  è l'insieme dei possibili stati che una cella può assumere (classi di uso del suolo),  $N$  è il *kernel* di celle confinanti e  $T$  è la regola di transizione. Dal momento che  $U$  è generalmente tenuto costante, è possibile esprimere lo stato di una cella al tempo  $t+1$  tramite la seguente:

$$S_{t+1} = f(S_t, N, T). \quad (5)$$

La regola impiegata dal modello per individuare lo stato di ogni cella al tempo  $t+1$  è la massimizzazione complessiva del potenziale di transizione nello spazio  $U$ :

$$\begin{aligned} & \max_t \sum_U x_u \cdot sp_u^{s \rightarrow s'} \\ & s.a \\ & x = \{0,1\} \\ & \sum_u x_u^{st} = 1 \\ & \sum_u x_u^{st} = M_{st} \end{aligned} \quad (6)$$

Con  $x$  pixel  $u$ -esimo per  $u \in U$ , potenziale complessivo di transizione da  $s$  a  $s'$  per la cella  $u$ . Nella (12) la  $\sum x^{st}$  significa che la cella  $x_u$  binaria ( $x = \{0,1\}$ ) al tempo  $t$  può assumere interamente un ed un solo stato di uso del suolo, mentre la

$$\sum_u x_u^{st} = M_{st}$$

implica che al tempo  $t$  la superficie complessiva in classe di uso del suolo  $s$  deve soddisfare la domanda finale  $M_{st}$ .

Il potenziale complessivo di transizione può essere scomposto nella potenzialità derivante dalle caratteristiche geografiche e socioeconomiche del pixel  $Sg_u$  e dall'effetto derivante dallo stato che hanno i pixel confinanti  $N_u$ . Per il calcolo del fattore  $N$  è necessario definire tre fattori: dimensione del *kernel*, la sua forma e la natura dell'influenza. Nel modello MCDM-MC-CA la dimensione della finestra è stimata sulla base della reale influenza dei fattori locali in funzione della risoluzione del modello *raster*. Per quanto riguarda la forma, i modelli ad automa cellulare si riferiscono a due tipi di intorno: quello di Neuman, che non considera i collegamenti in diagonale, e quello di Moor, che invece definisce intorni quadrati. Infine per quanto riguarda la modellizzazione dell'influenza esercitata dalle localizzazioni confinanti, questa può essere costante, verosimile per intorni ristretti, lineare o infine non lineare. Genericamente il potenziale  $N_u$  è calcolato come segue:

$$N_u^{s'} = \frac{\sum_k x_k^{s'} f(d_k)}{K} \quad (7)$$

Con  $N_u^{s'}$  potenziale  $N$  per la cella  $u$  e per la transizione verso l'uso del suolo  $s'$ ,  $x_k^{s'}$  pixel appartenenti al *kernel*  $k$  e in uso del suolo  $s'$ ,  $f(d_k)$ , funzione di influenza e  $K$  numero di pixel all'interno del *kernel*.

Il fattore  $Sg^{s'}$  invece dipende da un vettore di caratteristiche geografiche e socioeconomiche nello spazio  $U$  e può essere stimato tramite una procedura di analisi multicriteriale geografica (Bernetti e Fagarazzi 2002).

Il ruolo della Analisi Multicriteriale Geografica nel metodo MCDM-MC-CA è quindi essenzialmente quello di stimare l'idoneità territoriale verso un certo uso del suolo. Formalmente una valutazione multicriteriale consiste nel combinare le informazioni provenienti da diversi criteri di analisi del problema in un unico indice di valutazione. In generale un modello di valutazione multicriteriale può essere scritto nella forma:

$$S = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Con  $S$  indice di valutazione della idoneità,  $x_n$  fattori che determinano la valutazione.

Nell'impostazione di un modello di valutazione MCDM di idoneità territoriale tramite si seguono le seguenti fasi:

- definizione dell'obiettivo della valutazione,
- identificazione e valutazione dei criteri,
- aggregazione dei criteri.

Nel metodo proposto l'obiettivo di valutazione è rappresentato dalla potenzialità del territorio per ciascuna transizione; i diversi criteri sono individuati sulla base delle caratteristiche territoriali attuali — sociali, geografiche o ambientali — che possono influenzare tale idoneità/trasformazione e la valutazione degli effetti dei criteri è effettuata tramite funzioni *fuzzy* (cfr. Bernetti e Fagarazzi 2002).

L'aggregazione dei criteri deve essere effettuata sulla base di operatori logico-matematici differenti in relazione al problema in esame. La famiglia di operatori di aggregazione più completa e in grado di modellizzare in modo efficace problemi di valutazione spaziale è ancora una volta basata sulla logica sfocata; tali metodi possono essere applicati non solo a valutazioni con metodi fuzzy, ma anche a quelle realizzate tramite trasformazioni lineari e — con certi limiti — tramite funzioni di utilità.

L'aggregazione può essere vista come una operazione che combina diversi criteri in modo da produrre un singolo insieme sfocato con caratteristiche tali da essere una efficace ed efficiente modellizzazione del problema di valutazione in esame. La scelta del corretto metodo di aggregazione rappresenta un momento cruciale della valutazione; allo scopo si può dare la seguente classificazione delle diverse famiglie di operatori sulla base della logica secondo la quale operano e del possibile campo di applicazione.

Operatore congiuntivo (*conjunctive operator*, detti anche *t-norm*). Gli operatori congiuntivi aggregano i criteri sulla base della logica AND. L'operatore di più comune impiego, adottato nel metodo è il seguente:

- Intersezione standard:  $\mu(Sg^{s'}) = \min\{\mu(x^c)\}$  con  $\mu(Sg^{s'})$  valutazione sfocata dei fattori socioeconomici e geografici per la transizione verso  $s'$  e  $\mu(x^c)$  valutazio-

ne del criterio  $c$  per  $c = 1, 2, \dots, C^s$  criteri che influenzano la transizione  $s'$ . Tale operatore è quello di impiego più generalizzato.

Operatori disgiuntivi (*disjunctive operator, t-conorm*). Gli operatori disgiuntivi aggregano i criteri sulla base di una logica OR. L'operatore usato è il seguente:

- unione standard:  $\mu(Sg^s) = \max\{\mu(x^c)\}$

L'impiego degli operatori disgiuntivi a livello di valutazione territoriale è appropriato quando si valutano elementi di valore territoriale ai fini di salvaguardia; in questo caso, infatti, è sufficiente che sia presente una emergenza territoriale per giustificare una elevata valutazione.

Operatori compensatori. Sono operatori non congiuntivi né disgiuntivi. In questo tipo di operatori, detti anche di compromesso, è possibile la compensazione fra criteri con valori alti e criteri con valori bassi. Nella metodologia sono stati adottati i seguenti indicatori.

- *media*:  $\mu(Sg^s) = 1/n \sum \mu(x^c)$ . È l'operatore di impiego più generalizzato.
- *fuzzy-AND*:  $\mu(Sg^s) = (1-\gamma) 1/n \sum \mu(x^c) + \gamma \cdot \min\{\mu(x^c)\}$ . Il parametro  $\gamma$  è detto grado di compensazione. Per  $\gamma \rightarrow 1$ , l'operatore converge verso l'AND logico, per  $\gamma \rightarrow 0$  l'operatore converge verso la media, mentre valori compresi da 0 e 1 danno risultati intermedi.
- *fuzzy-OR*:  $\mu(Sg^s) = (1-\gamma) 1/n \sum \mu(x^c) + \gamma \cdot \min\{\mu(x^c)\}$ . Le caratteristiche sono simili al precedente.

Una volta calcolate le mappe di potenziale di transizione è possibile stimare il potenziale finale  $Sp_u^{s'}$ , dato da:

$$Sp_u^{s'} = N_u^{s'} \cdot Sg_u^{s'}$$

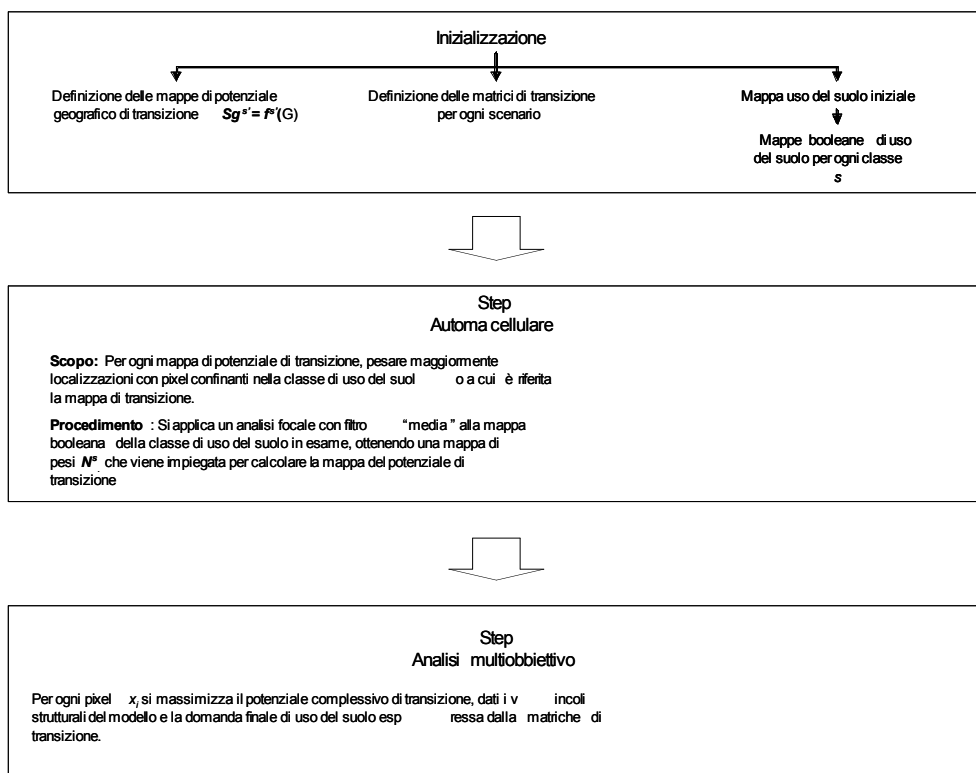
La Figura 3 riporta il diagramma di flusso complessivo del modello MCDM-MC-CA.

#### 4. L'area di studio e l'analisi delle tendenze attuali

Al fine di indagare i fenomeni di cambiamento dell'uso del suolo in un orizzonte temporale recente ed articolato, è stato realizzato un Sistema Informativo Territoriale tramite la costruzione di mappe di uso del suolo ottenute con una procedura di classificazione automatica di immagini satellitari Landsat riferite agli anni 1987, 2000 e 2006. Questa analisi si è limitata alla Toscana centrale<sup>6</sup>, in un'area risultata altamente significativa per l'entità e la tipologia di cambiamento in atto. La procedura di elaborazione di questi dati è stata la seguente.

<sup>6</sup> Coordinate UTM (WGS84) X min = 600100, Y min = 4822600, X max = 695100 Y max = 4880100.

Figura 3 – L'algoritmo di Automa Cellulare utilizzato



- Georeferenziazione e preparazione delle immagini Landsat 5 del 11 luglio 1987, Landsat 7 del 6 luglio 2000 e Landsat 5 del 22 luglio 2006.
- Calcolo per ciascuna data dell'indice di vegetazione normalizzato e dell'indice di artificializzazione<sup>7</sup>.

<sup>7</sup> L'indice di vegetazione normalizzato indica l'intensità fotosintetica presente su una data localizzazione. Per data-set Landsat 5 e 7 è calcolato come segue:

$$NDVI = \frac{DN4 - DN3}{DN4 + DN3}$$

con  $DN4$  e  $DN3$  valori rilevati nella banda del rosso (3) e dell'infrarosso vicino (4).

L'indice di artificializzazione invece è proporzionale al grado di artificializzazione di una localizzazione (edificato, asfaltato, ma anche suolo nudo scarificato) ed è calcolato sulla base del seguente rapporto:

$$UI = \frac{DN7 - DN4}{DN7 + DN4}$$

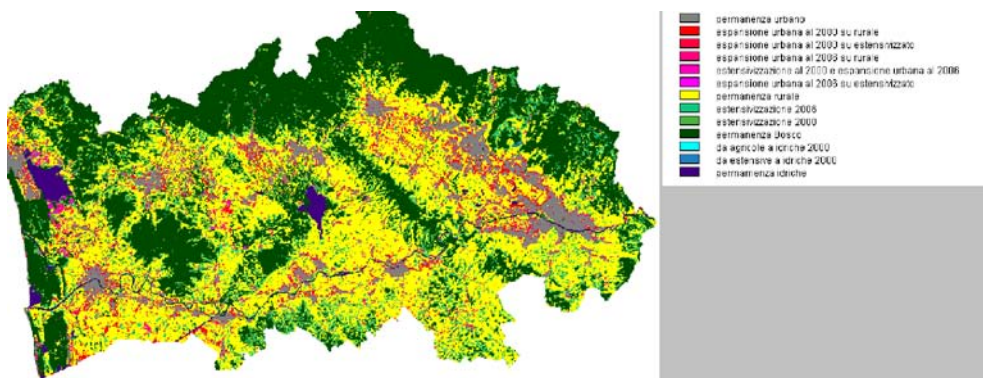
con  $DN7$  valore rilevato sulla banda dell'infrarosso termico.

- Acquisizione delle signature mediante fotointerpretazione su copertura ortofotografica. Le macroclassi utilizzate sono state le seguenti:
  - Aree urbane, industriali e infrastrutture
  - Aree agricole
  - Boschi, cespuglietti e aree in estensivizzazione
  - Aree idriche
- Elaborazione delle firme spettrali e purificazione delle signature<sup>8</sup>.
- Classificazione automatica “supervised” con il metodo della analisi discriminante su le bande spettrali 1, 2, 3, 4, 5, 7 e sugli indici di vegetazione e di artificializzazione.
- Valutazione dell’accuratezza tematica della classificazione ottenuta<sup>9</sup>.

La mappa riportata in Figura 4 ed il relativo grafico di Figura 5 riportano il risultato di questa analisi e consente di apprezzare l’evoluzione del territorio in questa area caratterizzata da un elevato dinamismo territoriale.

Il fenomeno maggiormente condizionante l’evoluzione del paesaggio è senz’altro quello della estensivizzazione delle aree agricole: quasi 23.000 ha nel periodo 1987-2000 e poco meno di 16.000 ha tra il 2000 ed il 2006. Rilevante anche la crescita dell’edificato a spese del territorio rurale, con circa 9.700 ettari nel 1987-2000 e ben 8.000 ettari nei soli sei anni dal 2000 al 2006, con un tasso di espansione che nei due periodi analizzati è cresciuto da circa 750 ha per anno ad oltre 1.300 ha per anno.

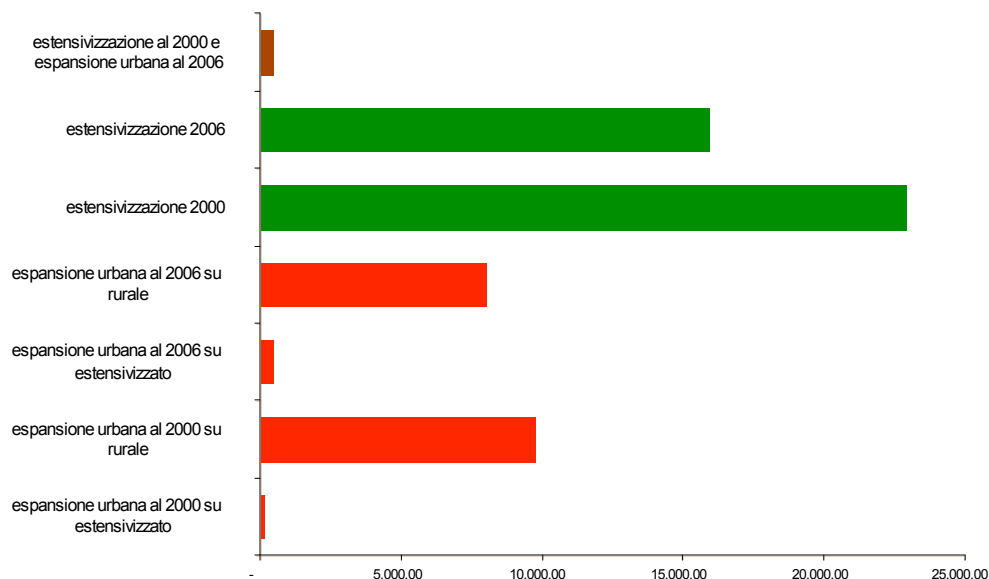
Figura 4 – Mappa evoluzione dell’uso del suolo



<sup>8</sup> È stato utilizzato il metodo della distanza di Mahalanobis dalla media della classe.

<sup>9</sup> La valutazione è avvenuta tramite aree circolari, ciascuna di superficie pari a 10 ha, dislocate secondo uno schema di campionamento casuale. All'interno di ciascuna area è stata definita la verità a terra per fotointerpretazione della copertura ortofotografica digitale IT2000. Sulla base dei dati raccolti sono stati calcolati gli indici *overall accuracy* e *Kappa index of agreement*, risultati soddisfacenti per i fini dell'analisi.

Figura 5 – Dinamiche territoriali 1987-2000-2006



In definitiva l'abbandono dell'agricoltura all'evoluzione naturale e l'espansione delle aree artificiali si confermano come i principali fattori di pressione del paesaggio agrario, con un tasso di variazione progressivamente crescente nel tempo.

## 5. L'applicazione del modello

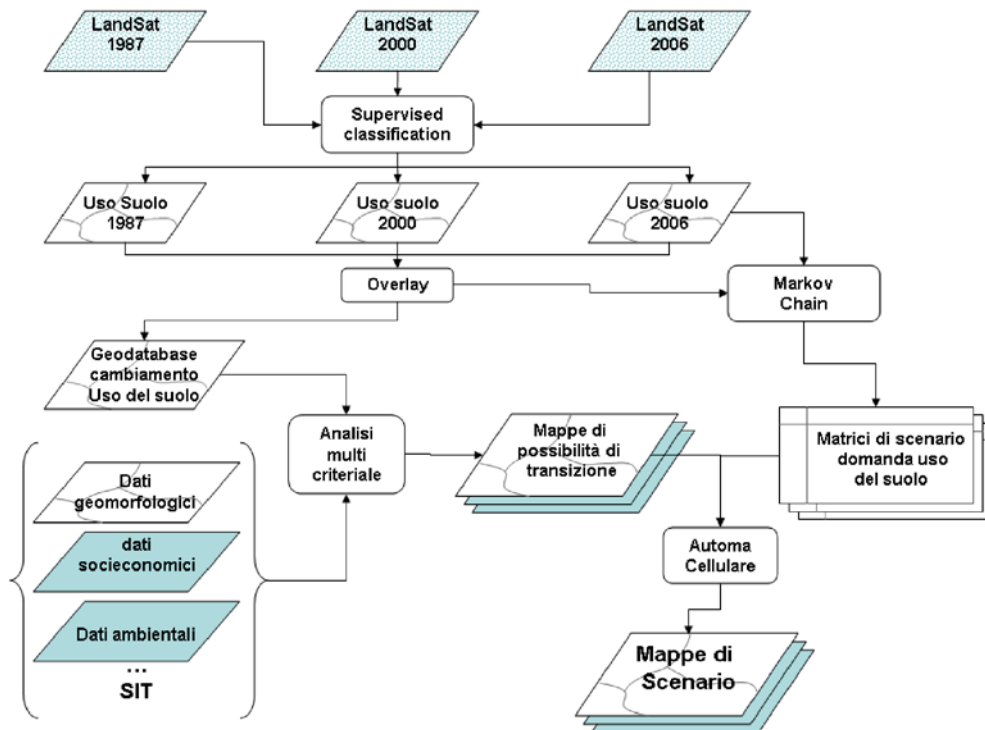
Il modello proposto è stato applicato, sulla base del diagramma di flusso illustrato in Figura 6, tramite le seguenti fasi: (a) individuazione delle matrici di transizione; (b) individuazione delle mappe potenziale di transizione per ciascun uso del suolo e per ciascun scenario; (c) elaborazione, tramite l'automa cellulare, delle mappe di scenario; (d) valutazione degli impatti paesaggistici degli scenari sul territorio analizzato.

### *Le matrici di transizione*

Come illustrato nel capitolo precedente, le matrici di transizione rappresentano la domanda finale di uso del suolo che deve essere allocata geograficamente sul territorio. La base di partenza per poter individuare tali modelli è stata la matrice di probabilità calcolata tramite il metodo delle catene markoviane per l'ultimo cambiamento di uso del suolo disponibile (2000-2006) e la relativa matrice delle transizioni. Entrambi i modelli sono stati calcolati con riferimento ad un orizzonte temporale di venti anni (anno 2026) al fine di poter amplificare gli effetti delle



Figura 6 – Diagramma di flusso



azioni di politica territoriale testate attraverso lo strumento degli scenari. I risultati ottenuti sono riportati nelle Tabelle 1 e 2.

Tale elaborazione, che costituisce il cosiddetto scenario neutro denominato “traiettoria in atto” (TA), è servito da base per individuare le modificazioni relative alle due direttrici di politica territoriale illustrate nel capitolo 2.

Il primo scenario, denominato “patto città-campagna” (PCC), individuato corrisponde alla combinazione di politiche territoriali orientate alla compattazione degli scenari agricoli e con politiche di sviluppo rurale volte alla incentivazione della agricoltura multifunzionale con particolare riguardo a:

- interventi agroambientali, miglioramento rete ecologica, con la creazione di fronti rur-urbani biopermeabili e multifunzionali;
- sviluppo agricoltura periurbana;
- colture energetiche legnose in aree collinari o in formazioni lineari multifunzionali (siepi da legno).

In termini di matrici di transizione si è ipotizzato che tali azioni consentissero il invertire, di fatto, la tendenza al consumo di suolo previsto per le aree urbane, con la possibilità di trasformare le periferie in fronti urbano-rurali multifunzionali

Tabella 1 – Probabilità di transizione

Probabilità	Urbano	Transizione attesa verso		
		Rurale	Bosco ed estensivo	Aree idriche
Urbano	100%	0%	0%	0%
Rurale	15%	57%	29%	0%
Bosco ed estensivo	2%	0%	98%	0%
Aree idriche	0%	0%	0%	100%

Tabella 2 – Transizioni espresse in pixels

Pixel 25×25m	Urbano	Transizione attesa verso		
		Rurale	Bosco ed estensivo	Aree idriche
Urbano	740.906	—	—	—
Rurale	304.627	1.165.177	590.951	—
Bosco ed estensivo	53.321	—	2.394.337	—
Aree idriche	—	—	—	91.272

(Gallent et al. 2004; Magnaghi, 2006; Gravsholt et al. 2007; Lange et al. 2007), riducendo di fatto il tasso di impermeabilizzazione e l'effetto di barriera ecologica del costruito; in definitiva nella matrice di transizione si è ipotizzato di convertire almeno il 10% delle aree urbane di frangia a tale tipologia progettuale. Per quanto riguarda il territorio aperto si è considerato di rimettere a cultura la metà delle superfici abbandonate nel periodo 2000 – 2006. La matrice di transizione relativa a tale scenario è riportata in Tabella 3.

Il secondo scenario, detto “Sviluppo non integrato” (SNI), combina le dimensioni della politica agricola volta ad incentivare le colture intensive a scopo industriale prevalentemente energetiche con l'espansione libera dei fronti urbani e delle infrastrutture. La relativa matrice delle transizioni prevede una espansione urbana pari al tasso riscontrato negli ultimi anni ed il recupero delle superfici agricole previsto nello scenario precedente, come riportato in Tabella 4.

### *Le mappe di potenziale di transizione*

Come illustrato nel capitolo 4 le mappe di potenziale sono costruite per ciascun uso del suolo indicato nel modello e riportano per ciascuna cella un valore sfocato proporzionale alla probabilità di trasformazione della cella nell'uso del suolo considerato.

Le mappe di transizione sono state create con una procedura di analisi multicriteriale geografica sfocata (Bernetti e Fagarazzi 2002) sulla base dei seguenti criteri.

Tabella 3 – Matrice di transizione dello scenario “Patto città-campagna”.

Pixel 25×25m	Transizione attesa verso			
	Urbano	Rurale	Bosco ed estensivo	Aree idriche
Urbano	592.725	148.181	—	—
Rurale	—	2.060.756	—	—
Bosco ed estensivo	—	127.442	2.320.217	—
Aree idriche	—	—	—	91.272

Tabella 4 – Matrice di transizione dello scenario “Sviluppo non integrato”

Pixel 25×25m	Transizione attesa verso			
	Urbano	Rurale	Bosco ed estensivo	Aree idriche
Urbano	740.906	—	—	—
Rurale	304.627	1.756.129	—	—
Bosco ed estensivo	53.321	310.986	2.083.352	—
Aree idriche	—	—	—	91.272

Per quanto riguarda lo scenario PCC, la mappa della possibilità di espansione dell’agricoltura multifunzionale (Figura 7a) è stata costruita sulla base di quattro criteri sfocati:

- potenzialità del territorio per la realizzazione di fronti urbani biopermeabili, calcolata per i pixel ad uso del suolo rurale sulla base della distanza con i diversi nuclei urbani compatti nel territorio in esame;
- potenzialità del territorio per interventi agroambientali di completamento della rete ecologica locale;
- potenzialità del territorio per la realizzazione di interventi agroambientali multifunzionali nelle aree limitrofe ai corsi d’acqua;
- potenzialità del territorio per il recupero di aree agronomicamente ed economicamente marginali.

Nello scenario SNI sono invece presenti due possibili transizioni: espansione dell’edificato ed espansione delle aree rurali (Figura 7b). La mappa dell’espansione dell’edificato è costruita sulla base della distanza sfocata da aree urbane e da strade esistenti. La potenzialità di espansione delle coltivazioni intensive industriali è invece determinata dai seguenti criteri:

- valutazione sfocata dell’orografia del territorio: lo sviluppo delle colture è quindi condizionato dalla quota e dalla pendenza,
- valore sfocato in funzione della possibilità di recuperare aree rurali abbandonate nel recente passato.

Figura 7a – Mappe possibilità di transizione per l'agricoltura multifunzionale nello scenario "Patto città-campagna"

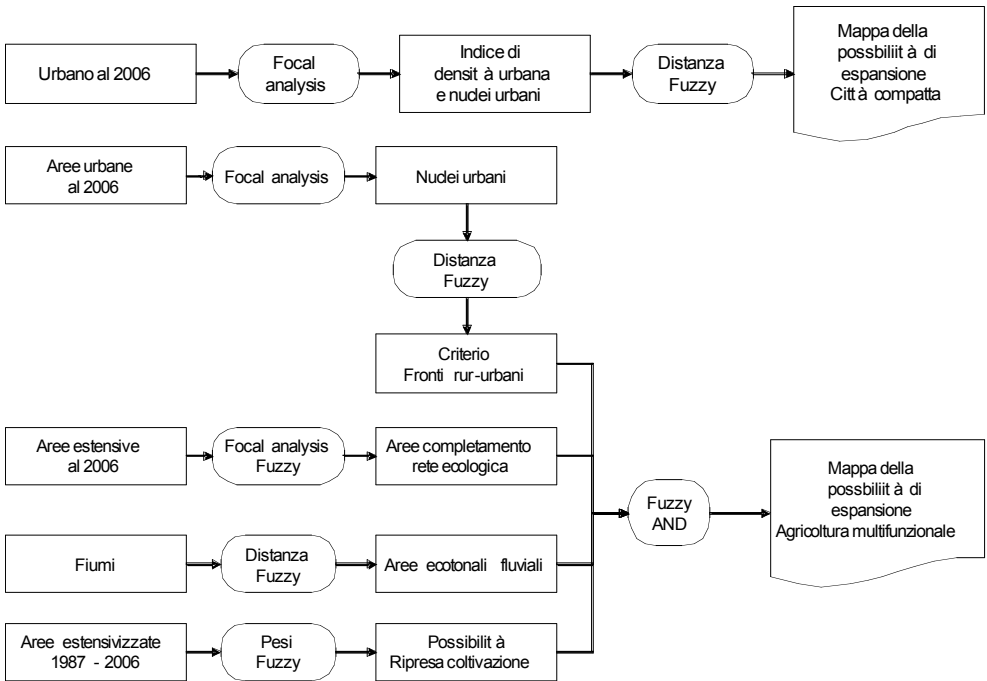
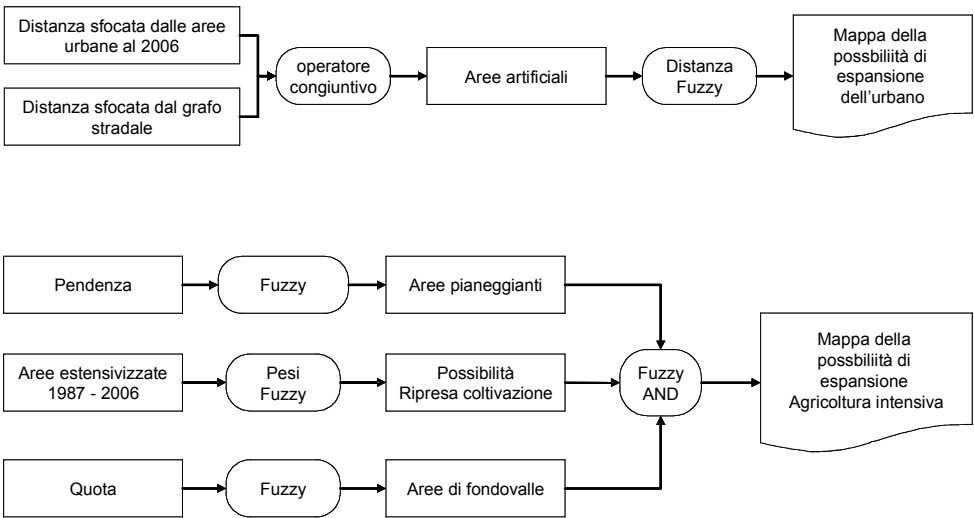


Figura 7b. Mappe di potenziale di transizione per lo scenario "Pianificazione dis-integrata"

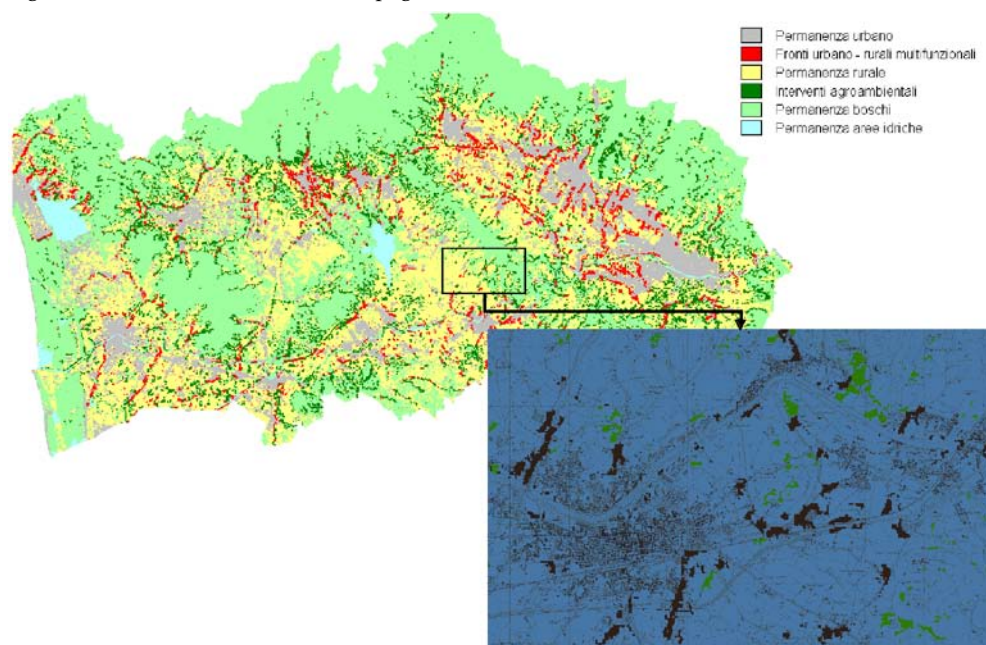


Infine, per lo scenario “traiettoria in atto” la potenzialità del cambiamento non è stata calcolata tramite analisi multicriteriale, ma sulla base delle probabilità calcolate tramite il confronto dei cambiamenti avvenuti nel periodo 2000-2006.

### *Le mappe di scenario*

Applicando la metodologia esposta nel paragrafo 4, con le matrici di transizione e i modelli di potenziale di cambiamento precedentemente esposti, sono state individuate le tre mappe di scenario riportate nelle Figure 8a, 8b e 8c. La mappa relativa allo scenario PCC (Figura 8a) si caratterizza essenzialmente per la presenza di cambiamenti fortemente localizzati, sia per quanto riguarda la riconversione dei fronti urbani sia per gli interventi di riconnessione ecologica. La maggiore riconversione dei margini urbani tramite azioni di agricoltura multifunzionale si riscontra nella zona ovest, su localizzazioni che tendono ad evitare la saldatura dell’urbanizzato. Le coltivazioni agroambientali invece si espandono prevalentemente nella aree collinari, ai margini del bosco esistente. La figura riportata consente anche di apprezzare il buon dettaglio territoriale delle basi dati ottenute<sup>10</sup>,

Figura 8a Scenario “Patto città – campagna”



<sup>10</sup> Le mappe che riportano l’intera area di studio, per ragioni di rappresentazione alla scala tipografica, sono state degradate nella risoluzione e sono stati evidenziate, fuori scala, le localizzazioni degli interventi.

tale da poter indirizzare sia progetti di pianificazione territoriale che azioni di sviluppo rurale.

Lo scenario SNI (Figura 8b) è invece caratterizzato da un lato dalla forte espansione dei margini dell'edificato, che tendono progressivamente a saldarsi formando una città continua che salda i nuclei storici di Pisa, Firenze, Prato, Pistoia e Lucca, saturando progressivamente le pianure fluviali. L'espansione della agricoltura in questo scenario è diffusa e tende a recuperare le localizzazioni abbandonate nel recente passato. Più contenuto appare infine l'espansione delle aree rurali su localizzazione agricole abbandonate.

Lo scenario TA (Figura 8c) infine, è contraddistinto dalla complessiva drastica riduzione delle aree rurali, soprattutto nel fondovalle, aree erose sia dalla espan-

Figura 8b Scenario "Sviluppo non integrato"

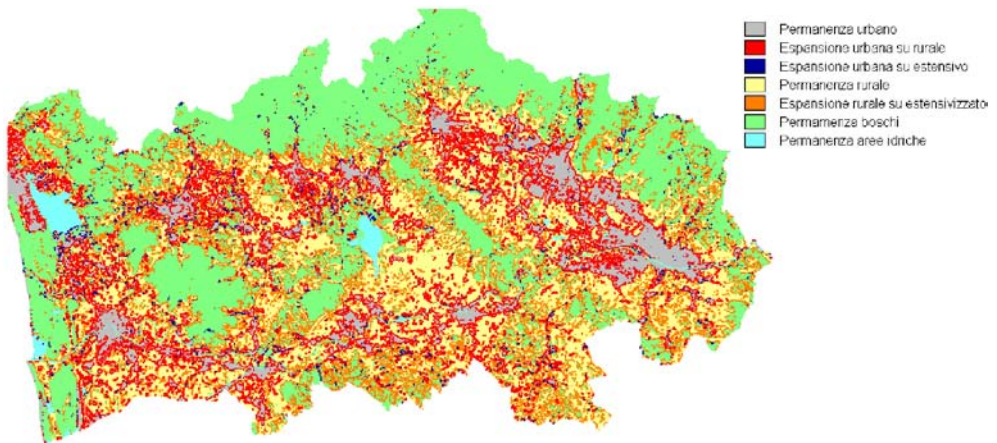
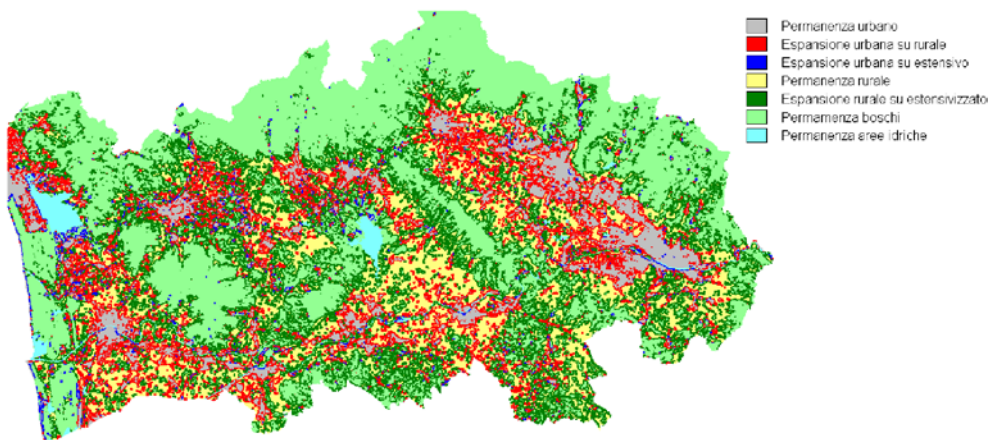


Figura 8c Scenario "Traiettorie in atto"



sione delle aree urbane sia dall'abbandono delle zone marginali meno produttive. Permangono prevalentemente le coltivazioni a più alto reddito, quali il vigneto nelle aree collinari dell'empolese e della zona di Montecarlo, mentre si accentua l'abbandono degli oliveti terrazzati in collina.

## 6. La valutazione dei risultati: l'analisi dei cambiamenti nei contesti paesaggistici

L'impatto ambientale di cambiamenti dell'uso del suolo non dipende solamente dall'estensione complessiva del cambiamento ma soprattutto dalla localizzazione di questo cambiamento in relazione anche agli usi del suolo confinanti. Per esempio una espansione urbana o industriale non ha lo stesso effetto ambientale se avviene completando un tessuto urbano esistente oppure accade in un mosaico paesistico-ambientale considerato tipico e non degradato. In ecologia del paesaggio<sup>11</sup> questo concetto è detto dimensione corologica del paesaggio intendendo con questo termine lo studio dei rapporti fra gli elementi che vanno a costituire lo spazio geografico<sup>12</sup>.

La valutazione degli effetti dei cambiamenti deve perciò tenere conto del contesto territoriale-paesistico nel quale questi avvengono. Questa problematica, che potremo definire "effetto di contesto"<sup>13</sup>, può essere analizzato con diverse metodologie. L'Agenzia Europea per l'Ambiente ha proposto un sistema di contestualizzazione, detto CORILIS (EEA 2006), basato sull'impiego di una procedura detta analisi focale. Questo strumento è stato ampiamente utilizzato sia per valutazioni ambientali<sup>14</sup> sia per studi di degrado<sup>15</sup> e di espansione delle aree urbane<sup>16</sup>. Nell'analisi focale ogni cella di una griglia viene analizzata sistematicamente. Quando una cella viene valutata, tutte le celle che sono ad una determinata distanza da essa entrano nell'analisi. La valutazione può essere realizzata sulla base di molte possibili funzioni; nel caso del metodo CORILIS alla cella centrale oggetto dell'analisi viene perciò assegnato l'uso del suolo prevalente nell'intorno geografico considerato. Successivamente la cella successiva diviene la nuova cella centrale e il processo si ripete fino ad ottenere una una mappa dei sistemi paesistici caratterizzati da un uso del suolo prevalente.

---

<sup>11</sup> Neef, (1982).

<sup>12</sup> Secondo Neef, il principio dell' omogeneità topica in senso stretto (fisiotopo/ecotopo) viene abbandonato nella dimensione corologica: l'unità corica viene cioè costruita attraverso una eterogeneità geografica. Ma assai più utile sembra l' osservazione di Leser (1997), secondo cui bisogna riconoscere un carattere omogeneo anche alle unità coriche od alle unità spaziali di grandi dimensioni. Le unità caratterizzanti la dimensione corologica (secondo Neef) in ordine gerarchico, dal basso verso l'alto, sono la struttura di ecotopi o gruppo di ecotopi (insieme di cellule di paesaggio per Paffen), il microcoro (piccolo paesaggio), il gruppo di microcori ed il mesocoro (paesaggio singolo) di ordine più o meno elevato.

<sup>13</sup> In inglese "neighbourhood effect".

<sup>14</sup> (Farina 1998; Hatten e Paradzick 2003)

<sup>15</sup> Tanser e Palmer 1999.

<sup>16</sup> Bianchin e Bravin 2004.

La metodologia è stata applicata agli scenari illustrati nel precedente capitolo, ottenendo le mappe di paesaggio prevalente riportate nelle Figure 9a, 9b e 9c. Dalle mappe riportate è evidente come lo scenario PCC consenta di ottenere contesti paesistici definiti, ricostruendo la centralità dei nuclei urbani, l'integrità del sistema paesistico della pianura fluviale e mantenendo la connessione con i principali nodi della rete ecologica. Nello scenario SNI invece si assiste alla saturazione degli agglomerati urbani, di Firenze, Prato e Pistoia e di Pisa-Pontedera e alla espansione ben oltre i nuclei storici, di Lucca e Montecatini. La riscoperta del ruolo produttivo dell'agricoltura però contribuisce alla definizione di sistemi paesistici agricoli di pianura ben definiti nelle restanti localizzazioni. L'agricoltura invece caratterizza in maniera molto limitata il paesaggio dello scenario TA, dove permane solo nelle zone collinari a viticoltura, in un contesto generale dove predomina da un lato l'espansione edilizia e dall'altro l'abbandono e l'esodo dal territorio rurale.

Risultati interessanti si ottengono anche confrontando l'uso del suolo con la superficie dei paesaggi prevalenti riportati in Figura 10; la maggior definizione di

Figura 9a – Sistemi di paesaggio scenario “Patto città-campagna”

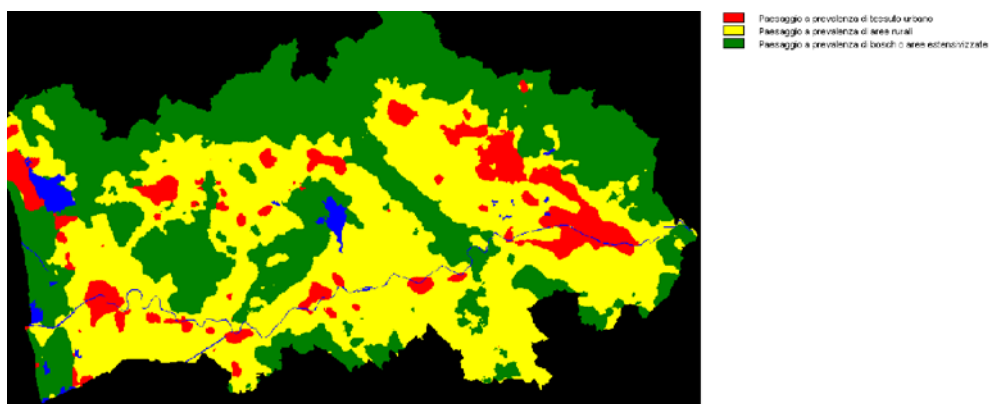


Figura 9b – Sistemi di paesaggio scenario “Sviluppo non integrato”

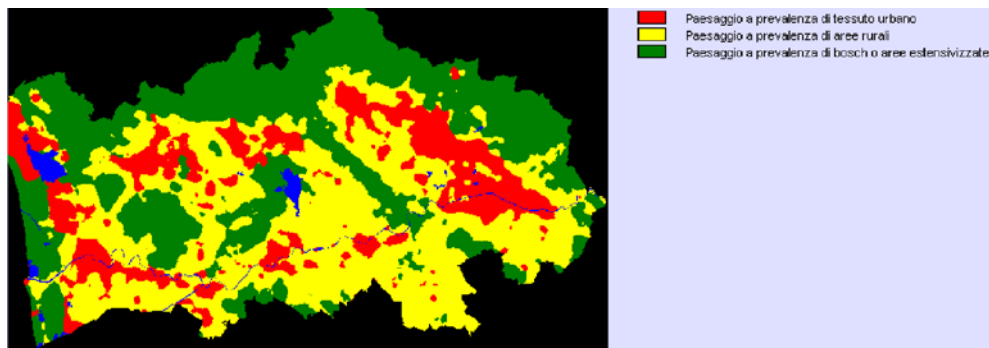




Figura 9c – Sistemi di paesaggio scenario “traiettorie in atto”

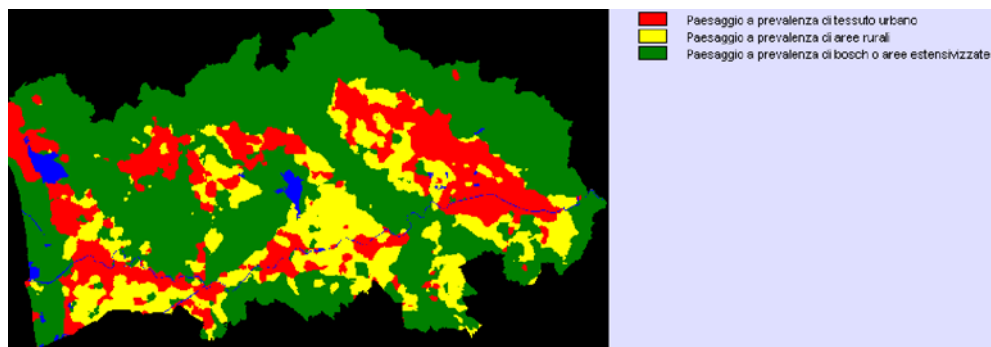
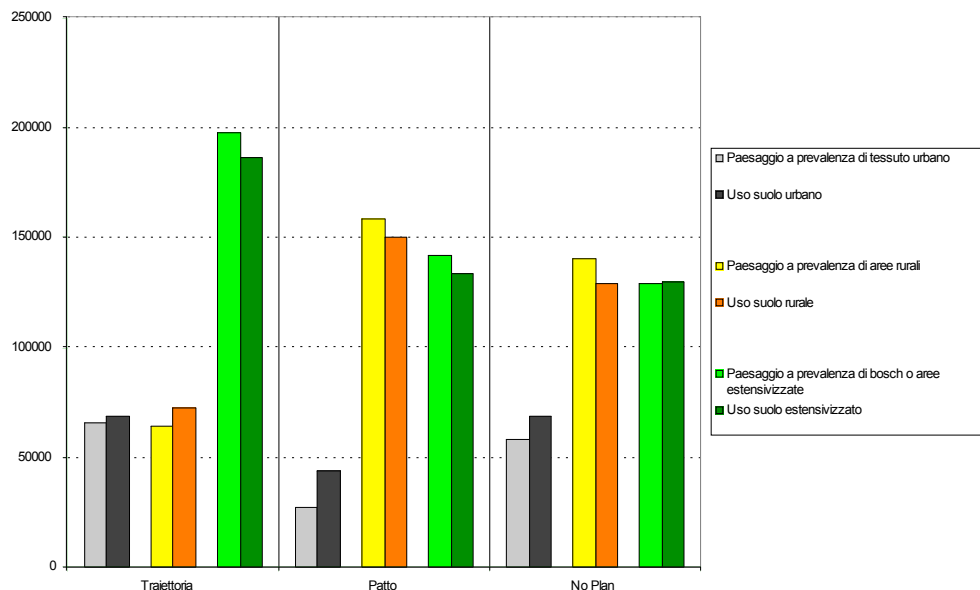


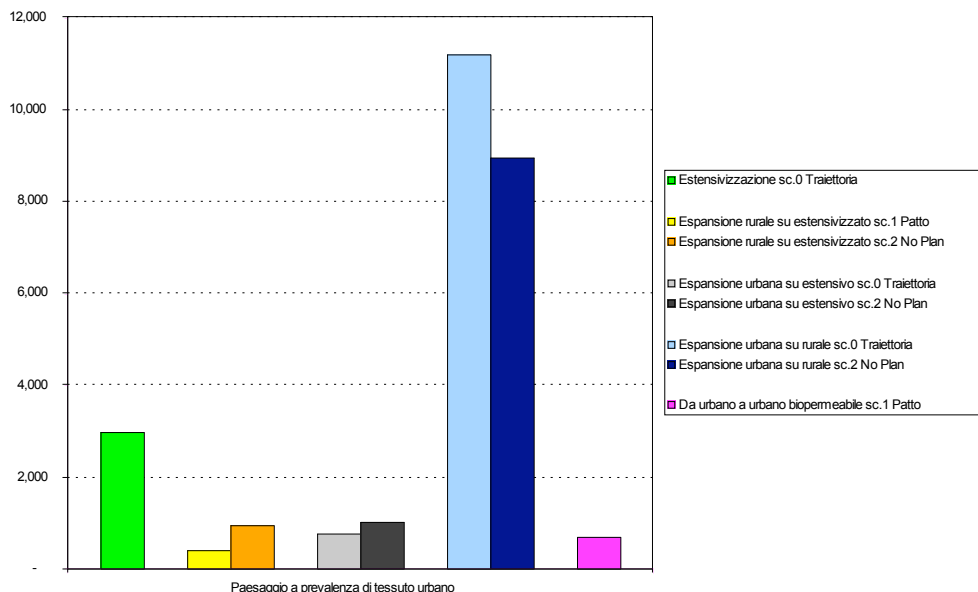
Figura 10 – Distribuzione dei sistemi di paesaggio nei diversi scenari



contesti paesistici univoci dello scenario PCC si evidenzia col fatto che le superfici dei sistemi paesistici sono maggiori dei relativi usi di suolo per quanto riguarda le aree rurali e naturali estensivizzate e minore per l'edificato.

La sovrapposizione fra i cambiamenti causati dai diversi scenari e i sistemi di paesaggio presenti all'anno 2006 consente infine di valutare le pressioni positive e negative che potranno insorgere nell'area in esame. Nel caso del paesaggio urbano (Figura 11a) il cambiamento più evidente è rappresentato dalla ulteriore espansione dell'edificato sul territorio rurale causato dagli scenari TA e SNI; per poter valutare correttamente tale cambiamento è necessario considerare che questo avviene nelle

Figura 11a – Pressioni sul paesaggio urbano.



aree residue dell'agricoltura parzialmente totalmente intercluse nell'edificato: tale fenomeno da un lato è perciò comunque preferibile ad una espansione su aree a prevalenza agricola o naturale. Il paesaggio rurale (Figura 11b) invece subisce pressioni ambientali negative considerevoli da parte degli scenari TA e SNI e, nel contesto, una azione limitata in termini di superfici, ma positiva da parte dello scenario PCC. Infine il sistema di paesaggio a prevalenza di boschi (Figura 11c) non sembra rischiare pressioni negative, ma un sostanziale incremento solo per lo scenario TA.

## 7. Conclusioni

L'applicazione effettuata ha dimostrato la possibilità di integrare fra loro dati e metodi diversi al fine di costruire e scenari alternativi di possibile evoluzione nell'uso del suolo. L'impiego di immagini satellitari riferite a date significative nel recente passato ha infatti permesso di avere informazioni con elevato dettaglio temporale relativamente ai cambiamenti in atto nell'uso del suolo, fino ad arrivare ad ottenere una immagine aggiornata dello stato attuale. L'analisi si è a questo proposito focalizzata in un'area significativa del territorio nazionale, sia per le rapide dinamiche in atto, ma anche per l'elevato interesse paesistico dovuto alla presenza di città d'arte e di centri minori di elevato valore storico.

Su questa localizzazione si è innestata l'analisi dei possibili scenari evolutivi, impostata su due dimensioni chiave. Innanzitutto l'evoluzione del paesaggio rurale, che sembra dipendere sia dai cambiamenti in atto nei mercati agroalimentari ed

Figura 11b – Pressioni sul paesaggio rurale

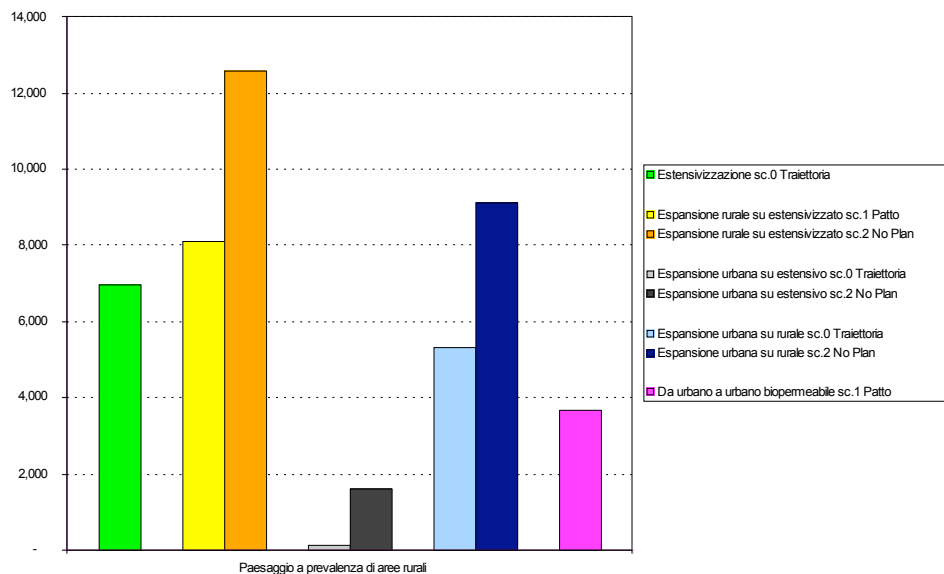
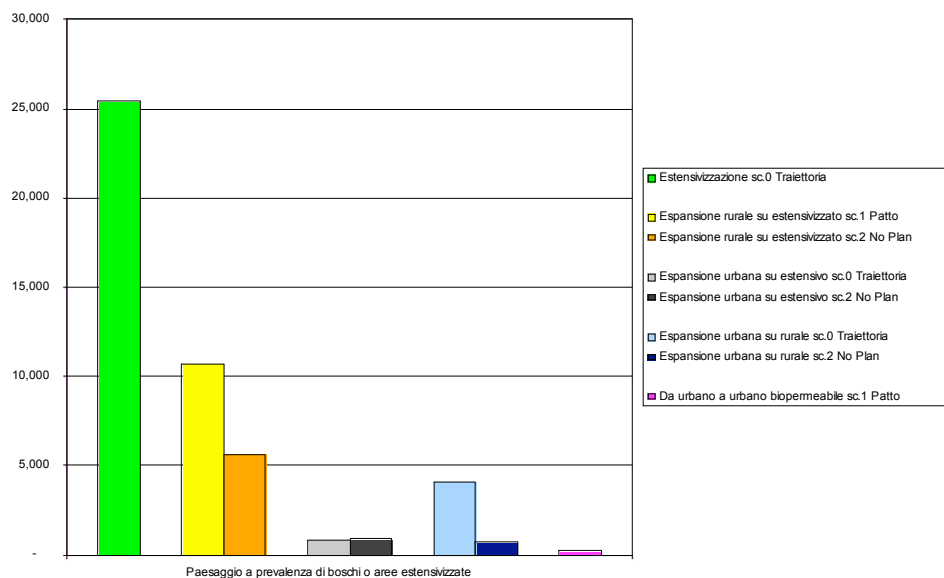


Figura 11c – Pressioni sul paesaggio a prevalenza di boschi



energetici sia dal potenziamento previsto delle politiche di sviluppo rurale, volte a privilegiare produzioni locali diversificate e di qualità. Recenti studi (Bernetti e Ma-

rinelli 2007) hanno però dimostrato come le politiche agrarie non sono da sole sufficienti a governare il paesaggio, ma una forte influenza, in positivo e negativo, è data dalla pianificazione territoriale. Sotto questo aspetto l'analisi ha preso in considerazione da un lato le recenti tendenze di sviluppo delle aree urbane ed industriali, caratterizzate da una espansione non correlata con i parametri macroeconomici, dall'altro i recenti indirizzi di pianificazione urbanistica volta a progettare fronti urbani sostenibili con la conservazione delle peculiarità dei paesaggi rurali, con la produzione agricola, e con la rete ecologica locale (Bernetti e Bologna 2008). Tali scenari sembrano sviluppare tendenze evolutive che tendono ad invertire la direzione della traiettoria in atto, caratterizzata dall'abbandono delle aree rurali. Risultato di questa fase del lavoro è stato l'elaborazione di tre scenari evolutivi fortemente differenziati denominati "Patto città-campagna" "Sviluppo non integrato" e "Traiettorie in atto".

Per la valutazione degli effetti in termini di uso del suolo derivante dai tre scenari è stato impiegato un approccio integrato che combina matrici di transizione, analisi multicriteriale e automi cellulari. A livello metodologico il metodo adottato ha fatto riscontrare i seguenti vantaggi:

- possibilità di impiego di dati relativi alla recente evoluzione di uso del suolo derivante da piattaforma satellitare LANDSAT;
- realizzazione di mappe di scenario di buon dettaglio cartografico;
- possibilità di impostare un sistema di valutazione degli impatti dei tre scenari sui sistemi di paesaggio attualmente presenti nell'area in esame;
- flessibilità nella definizione degli scenari, con la possibilità di ipotizzare, a partire da dati in serie storica anche recente, evoluzioni anche molto diverse da quelle passate.

Gli svantaggi intrinseci alla struttura del modello, che necessiteranno di ulteriori approfondimenti metodologici sono:

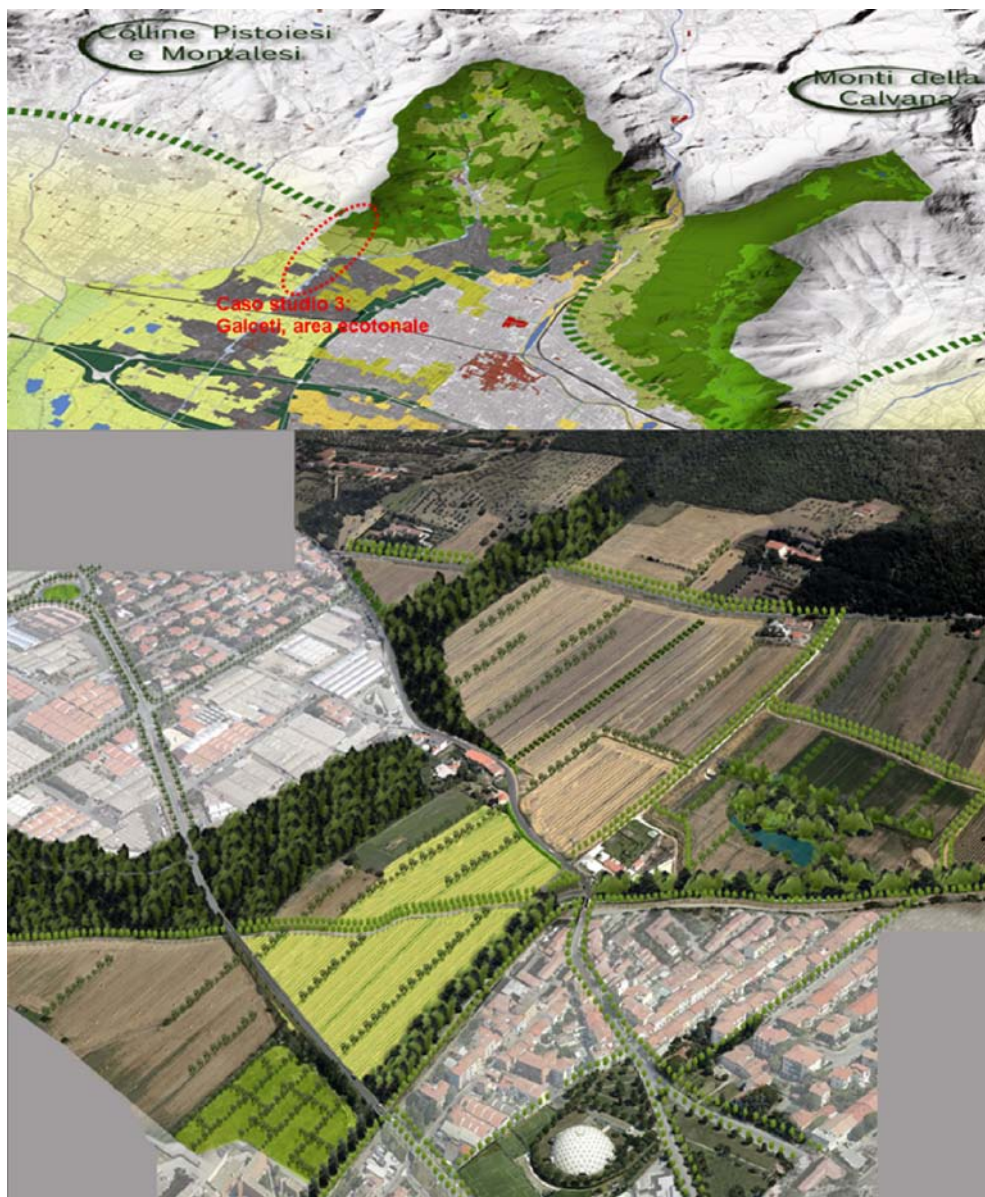
- la domanda finale di uso del suolo deriva da valutazioni esogene al modello,
- risulta impossibile di impostare una verifica statistica dell'affidabilità degli scenari costruiti (al contrario di altri approcci quali i modelli di tipo neurale<sup>17</sup>).

L'applicazione effettuata ha consentito di verificare che l'impossibilità di una validazione statistica degli scenari ha una valenza in parte teorica, se lo scenario ipotizzato ha forti caratteristiche prescrittive, cioè è fortemente dipendente dalla realizzazione di precisi indirizzi di pianificazione. Infatti, nel caso dello scenario "Patto città-campagna" l'affidabilità delle localizzazioni degli interventi è stata verificata attraverso la successiva realizzazione di specifiche analisi progettuali. A tale proposito la Figura 12 riporta l'esempio di progettazione di fronte rurale-urbano multifunzionale nella provincia di Prato in una localizzazione prevista dal modello "Patto città-campagna".

---

<sup>17</sup> Per una esauriente rassegna su tale tema si rimanda a Maguire et al. (2005).

Figura 12 – Esempio di applicazione progettuale di fronte rurale-urbano multifunzionale (per gentile concessione di Fanfani D., Poli, D., Ruffini G., in corso di stampa)



I risultati ottenuti hanno inoltre dimostrato che l'integrazione fra politiche urbanistiche e di sviluppo rurale consente di salvaguardare l'identità storica paesaggistica e produttiva dei paesaggi di pianura, ricercando nel rapporto con la città

un elemento di valorizzazione del ruolo multifunzionale della agricoltura. In questa prospettiva sia i piani aziendali sia i piani di sviluppo rurale possono essere organizzati in modo che gli agricoltori oltre a produrre *beni di mercato* (alimentari, energetici) producano contemporaneamente *beni e servizi pubblici* remunerati in quanto tali. Questa evoluzione può essere favorita sia dalle nuove politiche europee in materia di disaccoppiamento (finanziamenti mirati alle produzioni di qualità), sia alle nuove funzioni attribuite all'agricoltura nei piani di sviluppo. In questa ottica la pianificazione di fronti rur-urbani può qualificarsi come uno strumento attraverso il quale si potrebbe realizzare una interazione costruttiva fra gli spazi aperti e quelli urbani, attraverso politiche, azioni e progetti di valorizzazione multifunzionale dell'agricoltura e della produzione di "beni pubblici" che essa svolge.

## Bibliografia

- Bernetti I., Bologna S. (2008). *Paesaggio agrario e reti ecologiche. Contesti*. Dipartimento di Urbanistica e Pianificazione Territoriale, Università degli Studi di Firenze.
- Bernetti I., Casini L., Marinelli N. (2007). *Spatial Small Case Modelling of Land Use Change: an Application for the analysis of CAP Reform Scenarios*, relazione al convegno IASS Satellite Conference on Small Area Estimation, Pisa 3-5 settembre 2007
- Bernetti I., Fagarazzi C. (2002), L'impiego dei modelli multicriteriali geografici nella pianificazione territoriale, *Aestimum* 41.
- Bernetti I., Marinelli N. (2007). Cambiamenti in atto nel paesaggio agrario toscano. Possibili scenari evolutivi, *Atti dell'Accademia dei Georgofili*, in corso di stampa.
- Bianchin A., Bravin L. (2004). Defining and detecting changes in urban areas, *XX ISPRS Congress*, 12-23 July 2004 Istanbul, Turkey.
- Busck A.G., Kristensen S.P., Præstholm S., Primdahl S. (2007). Porous Landscapes – The Case of Great Copenhagen. *Urban Forestry & Urban Greening*, Elsevier.
- Comitato Economico e Sociale Europeo (2004), *Parere sul tema "L'agricoltura periurbana"*. Buxelles, 16 settembre 2004, NAT/204.
- Countryside Agency (2004). *Vision for a Sustainable, Multi-Functional Rural-Urban Fringe – Final Report*, The Countryside Agency, London, UK
- Donadieu P., Fleury A. (1997). De l'agriculture periurbaine à l'agriculture urbaine". *Courrier de l'environnement*, INRA, 31.
- Eastman J.R. (2006). *IDRISI 15.0: The Andes Edition*. Worcester MA, Clark University.
- EEA (2006). Land accounts for Europe 1990–2000. EEA report No 11/2006.
- Farina A. (1998). *Principles and methods in landscape ecology*. Chapman & Hall, London, UK, p. 58.
- Gallent N., Tudor C., Andersson J., Bianconi M. (2004). *Vision for a Sustainable, Multi-Functional Rural-Urban Fringe, Final Report*. The Countryside Agency.
- Hatten J.R., Paradzick C.E. (2003). A Multiscaled Model of Southwestern Willow Flycatcher Breeding Habitat. *The Journal of Wildlife Management* 67(4): 774-788.
- Lange E., Hehl-Lange S., Brewer M.J. (2007). Scenario-visualization for the assessment of perceived green space qualities at the urban-rural fringe. *Journal of Environmental Management* (doi:10.1016/j.jenvman.2007.01.061).
- Magnaghi A. (2006). *A green core for the polycentric urban region of central Tuscany and the Arno Master Plan*. Review 02, IsoCaRP.
- Maguire D.J., Batty M., Goodchild M.F. (a cura di) (2005). GIS, spatial analysis and modelling. ESRI press, Redlands, California.
- Neef E. (1982). Stages in the development of landscape ecology, in *Perspectives in Landscape Ecology*, a cura di Tjallingii S.P. e de Veer A.A., pp. 19-27. Pudoc, Wageningen.

- Ogilvy J.A., Schwartz P. (1998). Plotting your Scenarios, in *Learning from the Future: Competitive Foresight Scenarios*, a cura di Fahey L., Randall R. John Wiley & Sons, New York, pp. 57-80.
- Palchetti E., Vazzana C. (2006). *Le colture da energia: prospettive future e loro sostenibilità nei sistemi aziendali*. Relazione al convegno *Colture a scopo energetico e ambiente*, Roma 5 ottobre 2006.
- Prieler S. (2005). *Built-up and associated land area increases in Europe* WP 3. Environmental Evaluation, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Land Use Change and Agriculture Project.
- Tanser F.C., Palmer A.R. (1999). The application of remotely-sensed diversity index to monitor degradation patterns in semi-arid heterogeneous, South African landscape. *Journal of Arid Environment* 43: 477-484.
- van der Heijden K. (1996). *Scenarios: the Art of Strategic Conversation*. John Wiley & Sons, London.
- Wack P. (1985). Scenarios: Uncharted Waters Ahead. *Harvard Business Review* 63: 73-89.
- Westhoek H.J., van der Berg M., Bakkes J.A. (2006). Scenario development to explore the future of Europe's rural areas. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 114.
- Wolfram S. (1986). *Theory and Applications of Cellular Automata*, World Scientific, Singapore.