

FEDERICO MARTELLOZZO, FEDERICO AMATO, BENIAMINO MURGANTE

## FINO A CHE PUNTO È SOSTENIBILE IL CONSUMO DI SUOLO?

COMPARAZIONE DELLE RIPERCUSSIONI DI DIFFERENTI INDIRIZZI DI  
POLICY MEDIANTE SIMULAZIONE NUMERICA E ANALISI MULTICRITERIA

*Introduzione.* – Le aree urbane in tutto il mondo hanno visto un’espansione costante in epoca recente che ha spesso interessato la sostituzione di suolo naturale e semi-naturale (Ramankutty *et al.*, 2008). Analogamente, la popolazione mondiale, ed in particolare quella urbana, è cresciuta ad un ritmo senza precedenti, anche favorita da un massiccio spopolamento delle aree rurali. Conseguentemente, la domanda di risorse naturali per sostenere le attività umane in ambito urbano è cresciuta di pari passo, ed è ora riconosciuta come una delle più importanti minacce alla resilienza del nostro pianeta (Foley *et al.*, 2005; Rockström *et al.*, 2009). Questa serie di eventi concomitanti non fa che aggravare le conseguenze drammatiche del cambiamento climatico globale ed ambientale in molte parti del mondo.

Il consumo di suolo e la corrispondente perdita di ambiente naturale e semi-naturale sono tra le conseguenze più rilevanti ed evidenti dei fenomeni sopra citati (Cobbinah e Aboagye, 2017). Infatti, è stato osservato come le aree vegetate costituiscano le classi di copertura del suolo che più risentono dei processi di espansione urbana in molte parti del mondo (fra queste, ad esempio, pascoli, boschi, arbusti, terre coltivate, ecc.) (Seto, Güneralp, e Hutyra, 2012). Uno degli effetti più evidenti di questo fenomeno è il paradossale conflitto fra il bisogno di nuovo suolo da destinare a uso urbano e il bisogno del medesimo per la coltivazione di più cibo (o risorse in generale) per il sostentamento dell’aumentato numero di popolazione che dovrebbe abitare e vivere queste nuove aree urbane (Amato *et al.*, 2016, n.d.; Ontario Federation of Agriculture, 2015). Le ripercussioni di questo conflitto per l’uso del suolo hanno raggiunto, in molte regioni, una minaccia per la sostenibilità del sistema socio-economico-ecologico (Foley *et al.*, 2011).

L’applicazione presentata in questo studio <sup>(1)</sup> utilizza l’analisi dei cambiamenti di uso e copertura del suolo (LUCC) avvenuti in passato come base su cui costruire delle

---

(1) Il presente lavoro è stato svolto in piena sintonia fra gli autori, tuttavia si precisa che i paragrafi: Introduzione, Il modello di espansione urbana SLEUTH e l’Analytic Hierarchy Process, Implicazioni per le politiche agricole, Aspetti critici relativi all’utilizzo del modello SLEUTH si devono a F. Martellozzo; i paragrafi: Materiali e metodi, Costruzione di due scenari *policy-oriented* mediante AHP, Risultati si devono a F. Amato; i paragrafi: Discussione, Implicazioni sulle politiche di adattamento ai cambiamenti climatici, Implicazioni in materia di tutela dell’ambiente e del paesaggio, Conclusioni si devono a B. Murgante.

proiezioni di tali cambiamenti per il futuro per l'Italia. A tale scopo, sono state utilizzate carte di copertura del suolo, dati socio-economici, e carte inerenti la distribuzione dei regolamenti protettivi vigenti per le aree naturali; le previsioni di LUCC sono state elaborate mediante modellizzazione ad automi cellulari con il modello SLEUTH.

Gli obiettivi principali di questo lavoro sono fondamentalmente tre: primo, offrire un'analisi dei LUCC avvenuti in passato in funzione delle politiche di pianificazione. In particolare, si vuole procedere con una lettura critica riguardo gli effetti di politiche di pianificazione attuate in Italia in epoca recente, o meglio si vuole problematizzare riguardo la mancanza di forza nella loro implementazione, o inadeguatezza, sottolineando come queste abbiano fallito nel regolamentare i processi di LUCC e nel prevenire un eccessivo livello di urbanizzazione (Amato *et al.*, 2015), poiché sovente subordinate ad interessi di altra natura (e.g. economici) (Amato *et al.*, 2016). Tale lettura critica è funzionale all'argomentazione secondo la quale al fine di raggiungere, o almeno avvicinare, i *Sustainable development goals* internazionali (SDGs) legati al consumo di suolo, le regolamentazioni future in tema di pianificazione territoriale, come la legge sul consumo di suolo ampiamente dibattuta in Italia da oltre 20 anni (Marinosci *et al.*, 2013; Russo, 2013), devono mirare ad obiettivi più ambiziosi così da controbilanciare l'influenza di fattori contrastanti, per i quali non è possibile controllare l'aleatorietà (ad esempio l'influenza del mercato).

Secondo, questa ricerca vuole proporre un quadro metodologico per la modellizzazione di LUCC che sia in grado di produrre previsioni realistiche del processo di urbanizzazione e di LUCC, e in funzione di una pluralità di criteri considerati contemporaneamente (socio-economici, ecologici, morfologici, ambientali, politici, ecc.), così da permettere la stima e la localizzazione di potenziali LUCC riconducibili ad uno specifico scenario di pianificazione. Il fine è quello di elaborare due differenti simulazioni, ognuna pertinente ad uno specifico scenario *policy-oriented*. Gli scenari sono stati elaborati con il contributo di un panel di esperti così composto: un professore di pianificazione urbana, il cui contributo principale era legato all'analisi del rapporto tra crescita urbana e tutela del paesaggio; due ricercatori nella pianificazione urbana, che hanno discusso le relazioni tra norme di tutela comunitaria della Rete Natura 2000 e le politiche del paesaggio nazionale italiano. Un professore di estimo, che ha discusso il rapporto tra mercato immobiliare e trasformazioni territoriali ed un ricercatore in geografia che ha analizzato le dinamiche di LUCC ed in particolare l'espansione urbana.

Il primo scenario riassume una prevalenza degli interessi economici sugli strumenti regolamentativi di protezione ambientale, o altri fattori, così da riproporre una situazione che secondo il panel di esperti è molto simile a quanto successo in Italia negli ultimi decenni (Romano e Zullo, 2014), e che per questo definiremo come scenario *business-as-usual* (BAU), o *diffusion*. Al contrario, la seconda modellizzazione è costruita partendo da uno scenario caratterizzato da un'inversione del peso relativo dei fattori considerati. Questo secondo scenario, sempre elaborato a partire dal giudizio del panel di esperti, mira invece ad una maggiore conservazione e protezione degli elementi del paesaggio con una elevata rilevanza ecologica. Il suo utilizzo è funzionale alla determinazione della reale possibilità di realizzazione, del tempo di attuazione, e di quale importanza reciproca debbano assumere i vari elementi di pianificazione al fine di raggiungere, o avvicinarsi, al principale obiettivo in termini di consumo di suolo stabilito con gli SDGs («*nearly zero*

*soil consumption* entro il 2030») (UNDESA, 2015), ovvero di ridurre al minimo il tasso di LUCC in suolo impermeabilizzato.

I criteri utilizzati per la determinazione degli scenari sono stati scelti fra i *driver* più importanti sottostanti i processi di LUCC e urbanizzazione noti in letteratura (e.g. variabili socio-economiche, ecologiche e di pianificazione del paesaggio) (Torrens e Alberti, 2000; Sudhira, Ramachandra, e Jagadish, 2004). L'insieme di dati utilizzato, anche se a volte limitato dalla disponibilità, accuratezza e completezza, comprende un sottoinsieme rappresentativo ed esaustivo di questi criteri. La pertinenza e l'importanza relativa delle variabili utilizzate (per ogni criterio e per tutti i criteri) è stata mediata dal giudizio del panel di esperti. Le variabili sono state valutate ed adeguatamente fuse mediante analisi multicriteria in modo tale da simulare due scenari caratterizzati da orientamenti di pianificazione contrastanti. Le due alternative sono state implementate separatamente nel modello di previsione ad automi cellulari, in modo da caratterizzare ognuna la propria serie temporale di risultati, per poi poter operare un confronto fra le due ipotesi di simulazione. L'ipotesi di base è che variando nel modello solamente lo scenario alla base della previsione, e mantenendo tutti gli altri parametri invariati, le differenze nei risultati devono necessariamente essere riconducibili alle differenze fra i due scenari. In questo modo è possibile elaborare una lettura critica comparativa degli indirizzi di *policy* alla base dei due scenari supportata da dati empirici intellegibili.

Terzo, il presente lavoro vuole elaborare una cartografia dei potenziali LUCC futuri, e dell'espansione urbana, omogenea a scala nazionale. Il caso di studio di questa ricerca interessa tutto il territorio della penisola italiana (più le due isole principali). Questo è il primo tentativo, al meglio della nostra conoscenza, di applicare tale modellizzazione a scala Nazionale. Infatti, solitamente le analisi di espansione urbana e LUCC vengono effettuate a scala loco-regionale. Questo per un duplice motivo: da un lato le transizioni territoriali legate alle forme urbane sono più evidenti a scala locale e rispondono principalmente a dinamiche loco-regionali (Pontius *et al.*, 2008); dall'altro, si tende a limitare l'analisi a contesti loco-regionali perché trovare dati a scala nazionale con una risoluzione, o precisione, al dettaglio locale per molteplici fattori non sempre è possibile. Inoltre, vi è anche la difficoltà oggettiva di dover manipolare una grande mole di dati per la quale serve una capacità di calcolo notevole. Questo tipo di limitazioni secondarie è molto meno evidente in epoca attuale grazie al fatto che questo momento storico è caratterizzato da una sovrabbondanza sia di dati che di capacità di calcolo (es. *super computing*, *quantum computing*, *cloud computing*, ecc.) (Szul e Bednarz, 2014). Queste limitazioni però hanno rappresentato per lungo tempo un rilevante impedimento per gli studiosi interessati a questo tipo di indagine (Batty, 1997). Quindi, risulta estremamente rilevante ed utile la possibilità di cartografare con precisione per l'intero contesto nazionale le conseguenze delle dinamiche di LUCC tenendo ben presenti fattori loco-regionali e mantenendo una prospettiva sul contesto globale del fenomeno. Infatti, molto spesso, l'insieme di strumenti che insistono e regolano il territorio interviene a differenti livelli, che di norma sono gerarchicamente strutturati (es. comune, realtà locali, regione, nazione, internazionale, ecc.) (Las Casas e Scorza, 2016; Lombardini e Scorza, 2016). Il fine del quadro di indagine qui proposto, unitamente al tipo di risultati che questo è in grado di fornire, è di offrire un valido supporto per i *policy makers* e *practitioners* della pianificazione territoriale sia consentendo la possibilità

di indagare la rilevanza combinata di criteri locali e globali alla base delle dinamiche di LUCC e di espansione urbana nei vari contesti loco-regionali, sia permettendo la loro comparazione e contestualizzazione in spazi più ampi grazie all'omogeneità del metodo di elaborazione e completezza della copertura nazionale.

*Materiali e metodi.* – Il quadro metodologico fonde l'analisi di serie storiche di LUCC con proiezioni future delle stesse mediante modellizzazione ad automi cellulari. I dati utilizzati come input dell'elaborazione riguardano un insieme eterogeneo di carte tematiche, di copertura del suolo, dati archiviali, censimento economico.

L'analisi delle serie storiche si basa su una tecnica di stima del cambiamento di uso del suolo di tipo *map-to-map* (Mas, 1999). I dati impiegati per questa procedura sono gli stessi utilizzati come input del modello CA (SLEUTH) per la simulazione dei LUCC futuri. SLEUTH è in grado di considerare input differenti, sebbene in questi la distribuzione spaziale dei vari fenomeni debba essere sempre esplicita (es. cartografia tematica). Uno degli elementi fondamentali per SLEUTH, al fine di produrre simulazioni verosimili per LUCC e urbanizzazione, è il modo in cui il modello considera l'intensità di diverse aree nel resistere alle dinamiche di transizione. In questo lavoro, questa informazione è stata elaborata mediante analisi multicriteria in funzione di specifici scenari *policy-oriented* (descritta nel paragrafo successivo). Per questo studio si è scelto di modellizzare i LUCC tramite SLEUTH, non perché sia il miglior modello in tal senso, ma in primo luogo perché i dati di input necessari a questo CA <sup>(2)</sup> per produrre proiezioni verosimili cartograficamente esplicite sono tutti disponibili gratuitamente, e distribuiti dall'Agenzia Ambientale Europea (EEA) (vedi paragrafo successivo); ed in secondo luogo perché la concezione dello spazio e degli elementi dinamici che lo costituiscono ben si fonde con il metodo multicriteriale scelto per la costruzione di differenti scenari (vedi paragrafo successivo). La cartografia di base ha una risoluzione spaziale più che sufficiente per il tipo di analisi che qui si intende proporre, e la risoluzione temporale è congrua con quanto necessitato da SLEUTH. Inoltre, sebbene il caso di studio presentato si concentri sull'Italia, si prevede di poter applicare la medesima metodologia a scala europea, e i dati di cui sopra sono distribuiti dalla EEA per tutta Europa.

*Il modello di espansione urbana SLEUTH e l'Analytic Hierarchy Process.* – SLEUTH è un automa cellulare sviluppato per fornire proiezioni valide, statisticamente robuste, e realistiche di espansione urbana e LUCC. Per questo motivo è ampiamente utilizzato ed è alla base di molteplici casi di studio in tutto il mondo (Clarke, 2014). Quindi, vi è abbondante letteratura riguardo il flusso di lavoro interno del modello, le regole alla base del suo funzionamento, e le sue capacità (Dietzel e Clarke, 2004, 2007; Martellozzo e Clarke, 2011; Amato *et al.*, 2015; Di Palma *et al.*, 2016). Brevemente, SLEUTH è la combinazione di due modelli CA: il modello di crescita urbana *Urban Growth Model*,

(2) Esistono vari approcci modellistici differenti per l'elaborazione di proiezioni di LUCC, tutti con i propri punti di forza e debolezza. SLEUTH è particolarmente robusto dal punto di vista statistico e ha dato prova di essere anche efficace, sebbene pecchi per staticità e rigidità nel controllo degli input. Tuttavia esistono comunque anche altri modelli differenti che teoricamente potrebbero poter essere utilizzati con la metodologia descritta in questo studio. Per una trattazione più esaustiva e precisa dei differenti approcci modellistici di LUCC presenti in letteratura si rimanda a Brown *et al.*, 2012, e Maguire *et al.*, 2005.

e il modello per i cambiamenti di copertura del suolo *DeltaTron* (Clarke, 2014). La procedura di simulazione dell'espansione urbana e di LUCC in SLEUTH si basa su una concezione dello spazio secondo una griglia bidimensionale, costituita da un insieme di celle ordinate. Lo stato di una cella è determinato dalla copertura o uso del suolo che la caratterizza. Ogni singola cella è un'entità singola che cambia di stato in funzione degli input sottostanti e delle celle che le sono prossime. Per arrivare ad un risultato previsionale SLEUTH svolge numerose attività di simulazione del comportamento di ogni singola cella. SLEUTH utilizza quattro tipi di comportamento di crescita spaziale per la previsione di LUCC futuri e, in particolare, per la crescita urbana (Clarke, 2008). SLEUTH è l'acronimo per i sei strati informativi richiesti come input: la pendenza dei suoli (*slope*), l'uso del suolo (*landuse*), uno strato esplicitante la resistenza alle transizioni (*exclusion*), le aree urbanizzate (*urban*), l'infrastruttura dei trasporti (*transportation*), ed un'immagine sfondo per contestualizzare spazialmente le simulazioni prodotte che pertanto non ha un'influenza sul comportamento del modello, di solito si usa l'ombreggiatura del terreno (*hillshade*)<sup>(3)</sup>. Per calibrare adeguatamente SLEUTH (Jantz, Goetz, e Shelley, 2004), ed in particolare il sotto-modello che controlla i LUCC (cioè *DeltaTron*), sono necessarie carte con omogenea classificazione d'uso del suolo per almeno due istanti temporali distinti. I dati riguardo uso del suolo, estensione urbano e profilo morfologico sono stati presi dall'Agenzia Ambientale Europea (Corine Land Cover, EU-DEM) ed utilizzati ad una risoluzione spaziale di 500m. L'intervallo delle serie storiche va dal 1990 al 2012 (Corine Land cover del 1990, 2000, 2006, 2012), mentre la previsione è stata spinta fino al 2030. Il layer *exclusion* viene utilizzato per introdurre nella modellizzazione l'influenza dei fattori limitanti i LUCC e la crescita urbana o aree su cui ogni trasformazione è impossibile, ad esempio corsi e specchi d'acqua sono esclusi dalla computazione perché non è possibile che su di essi intervenga alcuna trasformazione. Da notare come questo strato informativo non deve necessariamente essere esplicitato in maniera binaria, ma ammetta anche gradi di resistenza intermedi grazie ad una pesatura all'interno di un intervallo prestabilito (Jantz *et al.*, 2010; Silva e Clarke, 2002).

Anche se il modello SLEUTH è stato ampiamente applicato per studiare l'evoluzione spaziale della forma urbana (Chaudhuri e Clarke, 2013), i suoi risultati sono stati spesso esposti a critiche a causa della sua limitata flessibilità nel recepire le variabili socio-economiche (Albin, 1975; Maria De Almeida *et al.*, 2002). Il modello ha sostanzialmente una struttura chiusa, che richiede un numero fisso di variabili; pertanto, l'unica possibilità per l'utente di introdurre nella modellizzazione variabili socio-economiche è manipolando uno degli input richiesti dal modello stesso. A tal proposito, il più adatto è proprio il layer delle esclusioni. Infatti, dal momento che questo strato può essere ponderato, è spesso utilizzato per definire diversi livelli di resistenza a processi territoriali di trasformazione e urbanizzazione. Questo strato informativo è stato generalmente utilizzato per rappresentare un solo criterio alla volta, come vincoli di pianificazione, o la presenza di parchi e aree naturali protette, ed era l'analista stesso in funzione di specifiche conoscenze regionali o evidenze teoriche disponibili in let-

(3) Gli strati inerenti uso e copertura del suolo sono presi dal Corine Land Cover, i dati *slope* e *hillshade* sono derivati dal DTM presente sul geoportale nazionale.

teratura a determinare (soggettivamente) l'intensità relativa della resistenza ai processi trasformativi per ogni unità dell'area oggetto di studio.

Tuttavia, sono molteplici i fenomeni che possono intervenire nell'influenzare il grado di predisposizione o resistenza a processi trasformativi ed urbanizzazione. Questi possono essere ricondotti a variabili socio-economiche, ambientali, storiche, indirizzi e regole di pianificazione, e la valutazione di tali criteri non è sempre né semplice né unica. Sebbene il modello SLEUTH sia piuttosto rigido nella gestione dei suoi input, la sua flessibilità consiste proprio nel fatto che il modello non ha modo di controllare quali criteri siano stati utilizzati per popolare lo strato di esclusione e come, ma si limita a controllarne solo la coerenza spaziale e ontologica con gli altri input. Ciononostante, in letteratura, non è ancora stato sviluppato per il modello SLEUTH un metodo robusto per tenere conto in maniera sistematica di una molteplicità di criteri eterogenei (cioè variabili socio-economico, ambientali, politiche, ecc.), e che di conseguenza possa investigare il peso relativo di queste variabili nel determinare trasformazioni territoriali ed urbanizzazione. Questo lavoro si concentra principalmente su questo aspetto, e a tale scopo viene proposta una metodologia basata su analisi multicriteria, che è anche utile nell'ottica di elaborare uno strumento a supporto di processi di pianificazione partecipata.

Al fine di elaborare una rappresentazione spazialmente esplicita dell'impatto di queste variabili sui processi di trasformazione territoriale – così da poter essere usata in SLEUTH – la scelta è ricaduta su uno strumento dell'analisi multicriteria (*MultiCriteria Decision Analysis*) (Figueira, Greco, e Ehrgott, 2016) denominato *Analytic Hierarchic Process* (AHP) (Saaty, 1988). L'AHP è stato applicato con successo in molteplici e variegati contesti scientifici (Saaty, 2016) come: problemi di localizzazione (Yang e Lee, 1997; Chen, 2006), gestione naturale e ambientale delle risorse (Schmoldt *et al.*, 2001; Tesfamariam e Sadiq, 2006), supporto di analisi in campo sanitario (Liberatore e Nydick, 2008). Data questa sua flessibilità di applicazione, l'AHP è perciò risultato particolarmente adatto anche per gli scopi di questo lavoro. L'AHP permette di stilare una classifica di criteri e di associare loro un peso specifico. Il processo si basa sul confronto a coppie di tutti i criteri presi singolarmente; al termine del confronto a coppie è possibile assegnare a ciascun criterio un peso. Di conseguenza, nella costruzione del nostro layer di esclusione, tutte le alternative vengono valutate in funzione della somma ponderata del peso dei criteri per il valore delle variabili associate che insistono su di essa (Saaty, 1980, 1990). Poiché le nostre alternative sono tutte le unità che compongono lo strato di esclusione, ovvero i pixel che definiscono la griglia della carta per la nostra area di studio, il loro valore è determinato dalla somma dell'importanza di ogni criterio (ovvero il peso di ogni criterio determinato con l'AHP) moltiplicato per il valore della variabile associata a ciascun criterio in corrispondenza del singolo pixel, come in equazione [1]:

$$S_{map} = \sum W_i * V_i \rightarrow [1]$$

Dove:

$S_{map}$  è il valore assunto da ciascun pixel della mappa di sintesi.

$W_i$  è il peso dei criteri  $i$ -th.

$V_i$  è il valore della mappa rappresentante i criteri  $i$ -th in qualsiasi data posizione.

I dati utilizzati per la determinazione dei criteri e del loro peso provengono da molteplici fonti e comprendono:

1. Il Codice dei Beni Culturali (CBCP) (Parlamento Italiano, 2004). Il CBCP presenta la delimitazione dei più importanti paesaggi e siti culturali protetti. In particolare, sono stati individuati i seguenti elementi:

- a. Le aree all'interno di un buffer a 300 metri dalla linea di costa.
- b. Le aree all'interno di un buffer 300 metri dalla linea costiera dei laghi.
- c. Corsi d'acqua, zone fluviali e aree all'interno di un buffer di 150 metri da queste.
- d. Ghiacciai e nevi perenni aree.
- e. Riserve e parchi nazionali e regionali.
- f. Le foreste e i boschi.
- g. Zone umide.

2. Il Progetto Natura 2000 (Consiglio delle Comunità europee, 1992). Questo è un progetto della UE che definisce tutte le aree che rivestono un'importanza ecologica per la riproduzione, il riposo, ed il passaggio di specie rare o minacciate. I principali strati di questo layer informativo sono:

a. Siti di Importanza Comunitaria (SIC) e zone speciali di conservazione (ZSC). Le ZSC di solito sono incluse nel SIC.

b. Zone di Protezione Speciale (ZPS). In Italia queste aree coprono circa il 19% delle acque interne e il 4% delle aree marine.

3. *Important Bird Areas* (IBA). Queste aree sono state mappate e catalogate nell'ambito delle attività del progetto *BirdLife*. Anche se rappresentano un habitat fondamentale ma necessario per la conservazione degli uccelli selvatici, queste aree non sono incluse in un piano normativo di regolamentazione o di azione.

I criteri elencati finora rappresentano tutti una limitazione potenziale o effettiva per i LUCC e l'urbanizzazione e sono definiti omogeneamente a livello nazionale. Ne risulta che l'intensità di inibizione dei processi di trasformazione territoriale a questi associata non varia localmente. Tuttavia, abbiamo già detto in precedenza come i processi di trasformazione prendono molto spesso una connotazione fortemente influenzata dal contesto loco-regionale. Al fine di superare tale difficoltà e non fare affidamento solo su criteri nazionali – che sono tuttavia fondamentali per garantire una coerenza generale – e per meglio rappresentare una differenziazione delle tendenze trasformatrici a scala loco-regionale, sono stati usati anche criteri in grado di catturare questa dimensione. In particolare, si è fatto affidamento a variabili economiche a scala comunale che ritraggono il dinamismo del mercato immobiliare:

4. Il numero di transazioni totali (NTT). Questi dati vengono distribuiti dall'Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT). L'NTT rappresenta il numero totale delle transazioni immobiliari in una determinata porzione di territorio ponderata per l'effettiva quota di proprietà che viene venduta/acquistata.

5. L'indice del mercato degli alloggi (HMI). Questa seconda variabile identifica la proporzione di NTT sul totale della disponibilità abitativa esistente in un'unità territoriale specifica.

Questi indicatori sono considerati delle utili proxy per la vitalità del settore immobiliare in qualsiasi area. Il loro utilizzo si basa sul presupposto che luoghi in cui il mercato immobiliare è più vivace sono più inclini a urbanizzazione e consumo di suolo (Glaeser, Gyourko, e Saks, 2006).

*Costruzione di due scenari policy-oriented mediante AHP.* – Uno dei principali aspetti critici delle applicazioni SLEUTH, e in generale di modellizzazioni basate su automi cellulari, per la simulazione di LUCC e espansione urbana è la difficoltà di integrare all'interno della simulazione l'influenza e l'importanza che le scelte socio-politiche e gli orientamenti di *policy* specifici hanno sulle dinamiche di tali processi. Al fine di superare questa limitazione ed integrare nel processo di analisi simulativa l'influenza ascrivibile a differenti indirizzi di *policy* sono stati elaborati due scenari differenti mediante AHP che fanno da contesto e caratterizzano le simulazioni. Ovvero, a partire dai criteri sopraelencati sono stati elaborati due strati informativi *exclusion* con i quali sono state caratterizzate due applicazioni separate di SLEUTH. Lo scopo è di creare due applicazioni previsionali che dipendano in tutto e per tutto dai medesimi dati, e che si distinguano solamente per lo strato informativo *exclusion*. I due strati sono stati costruiti a partire da una differente pesatura dei criteri, ognuna rispondente ad un particolare scenario. L'assunto di base è che rimanendo invariati tutti i dati di input e variando solo lo scenario caratterizzante (esplicitato tramite il layer *exclusion*), sia ragionevole ricondurre le differenze nei risultati delle due applicazioni previsionali alle differenze ascrivibili ai due scenari stessi. In pratica è stata applicata la seguente procedura (fig. 1):

- i. Due diversi scenari ascrivibili a indirizzi di *policy* differenti definiti dalle raccomandazioni del panel di esperti.
- ii. Due versioni di uno stesso strato informativo (*exclusion*) sono state sviluppate per incorporare i criteri riconducibili ai due scenari mediante AHP.
- iii. Gli strati informativi sono stati utilizzati per differenziare due simulazioni di SLEUTH altrimenti identiche.
- iv. L'analisi comparativa dei risultati delle due applicazioni previsionali considera tali differenze riconducibili alle differenze fra gli scenari di *policy* con cui sono state rispettivamente caratterizzate.

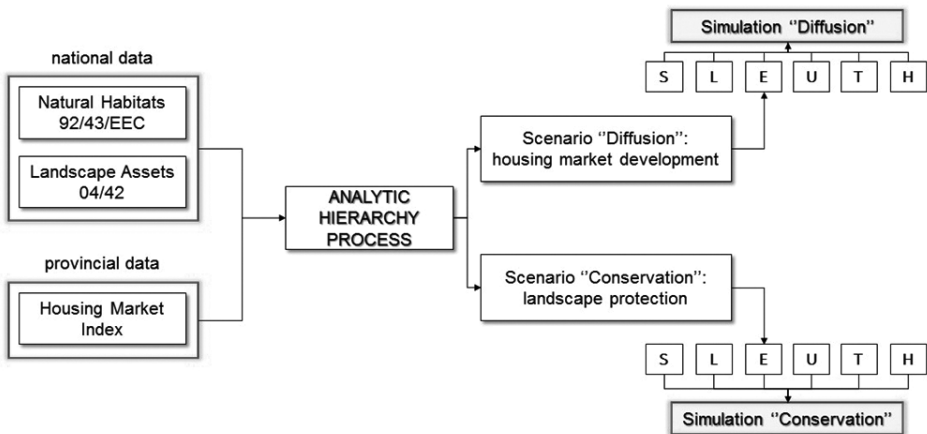


Fig. 1 – Flusso di lavoro di elaborazione, dalla scelta dei criteri per l'elaborazione di scenari

Fonte: elaborazione ad opera degli autori



Il ruolo del panel di esperti ha sia offerto un parere scientificamente informato e robusto, sia simulato un processo di pianificazione partecipata. Nello specifico, hanno svolto il loro lavoro in due fasi: una prima fase mirata a selezionare un congruo numero di criteri e variabili sottendenti processi di trasformazione territoriale che risultasse significativo, esaustivo, non ridondante, e utilizzabile con il metodo AHP; una seconda fase finalizzata all'elaborazione di due «pesature» differenziate e rappresentative di due scenari evolutivi differenti. Il primo di questi scenari mira alla minimizzazione del consumo di suolo mediante la subordinazione degli interessi economici agli elementi ecologici (*conservation*); quindi maggiore peso è dato a quei criteri che rappresentano una limitazione alla trasformazione del paesaggio. Al contrario, il secondo scenario si propone di imitare il consumo di suolo e le trasformazioni territoriali in atto, caratterizzate da LUCG degradanti ed espansione urbana rilevante (*diffusion*). In questo secondo caso, il pane di esperti ha dato maggiore peso alle dinamiche già in atto e ha indicato questo come uno scenario *business-as-usual* (BAU), influenzato da politiche fortemente orientate a promuovere il settore delle costruzioni, che è elemento trainante per l'economia (Zullo *et al.*, 2015), ed in favore del quale molte volte – in Italia e non – si è andati in deroga alle regole vigenti, e/o si è intervenuti con un atteggiamento adattivo *ex-post* piuttosto che preventivo *ex-ante*. Si pensi per esempio alle attività di costruzione abusiva, con più di 4,6 milioni di edifici illegali costruiti dal 1948 e tollerata dalle misure straordinarie del 1985, 1994 e 2003. Analogamente, si pensi che l'Italia ancora non ha normative nazionali in materia di consumo di suolo, e che la legislazione nazionale in materia risale grossomodo al 1942. È un dato di fatto che, dalla seconda guerra mondiale, anche dopo la crisi economica globale che ha colpito l'Italia attorno al 2006, il principale settore economico è sempre stato quello delle costruzioni (Romano e Zullo, 2015).

I due set di pesi utilizzati per la costruzione dei layer *exclusion* per il primo scenario (*conservation*), ovvero quello caratterizzato da una maggiore importanza delle limitazioni a trasformazioni territoriali e finalizzato alla simulazione di orientamento di *policy* incentrato sulla promozione e tutela dell'ambiente, e per il secondo scenario (BAU / *diffusion*), ovvero quello caratterizzato da una maggiore importanza dei fattori economici e finalizzato alla simulazione di orientamento di *policy* incentrato sul mantenimento degli attuali trend trasformativi, sono esplicitati in tabella 1.

	Scenario <i>conservation</i>	Scenario BAU / <i>diffusion</i>
CBCPa	0,112	0,085
CBCPb	0,112	0,085
CBCPc	0,112	0,085
CBCPd	0,112	0,085
CBCPe	0,112	0,085
CBCPf	0,112	0,085
CBCPg	0,112	0,085
SCIs	0,047	0,033
SPAs	0,047	0,033
IBA	0,031	0,022
HMI	0,02	0,32

Tabella 1 – I pesi da assegnare ai criteri considerati in base allo scenario *conservation* e allo scenario BAU / *diffusion*

I due strati di esclusione ottenuti attraverso AHP e rappresentati ciascuno uno scenario ed un indirizzo di *policy* differente sono stati poi integrati in distinte applicazioni del modello SLEUTH separatamente (fig. 2). I risultati ottenuti mediante le due distinte simulazioni con SLEUTH hanno permesso un'analisi in chiave comparativa dei due set di dati, e permesso di problematizzare e quantificare l'influenza differenziale ascrivibile ad indirizzi di *policy* differenti sui processi di urbanizzazione e LUCC.

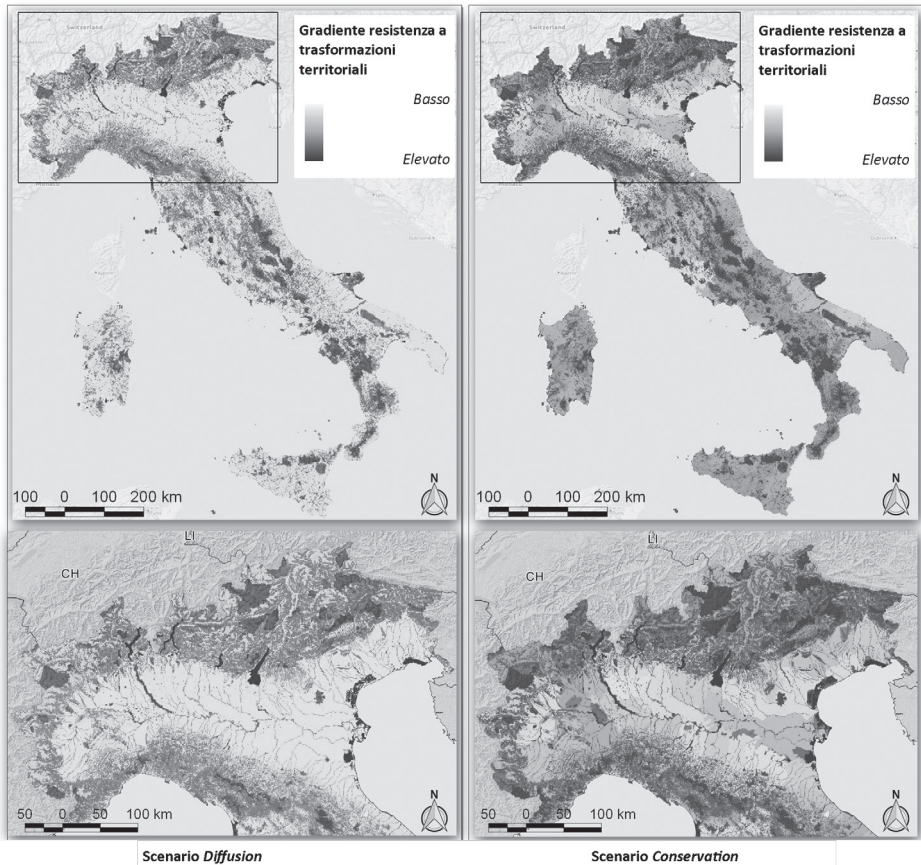


Fig. 2 – Gradiente di resistenza alle trasformazioni territoriali scenario BAU/diffusion (a sinistra) e conservation (a destra)  
Fonte: elaborazione ad opera degli autori

*Risultati.* – L'analisi dei LUCC avvenuti in passato tra il 1990 ed il 2012 non solo è funzionale all'elaborazione degli input geo-morfologici di cui SLEUTH ha bisogno per la fase previsionale, ma è parte di per sé rilevante perché permette di capire, valutare ed individuare le dinamiche che hanno sotteso i cambiamenti nella composizione degli elementi costitutivi del paesaggio. Tra queste è possibile individuare alcune dinamiche prevalenti, ovvero le aree classificate come terreno agricolo sono diminuite, al contrario le aree urbane si sono espanse. Infatti dal 1990 ad oggi sono andati persi

circa 72.000 ettari di terreno agricolo, quindi una porzione di territorio non trascurabile, pur non essendo una percentuale rilevante della superficie totale. Tutt'altro discorso per le aree urbane invece (o per meglio di dire il costruito). Infatti, nonostante la costante diminuzione del tasso di crescita della popolazione in Italia sin dalla seconda guerra mondiale (il tasso di crescita ha fatto registrare il minimo storico nel 1995 con un 0%), che ha visto le sue unità passare da 56,7 Ml nel 1990 a solo 59,5 Ml nel 2012 (un aumento di < 4,5%), e nonostante che la percentuale di popolazione in aree urbane sia cresciuta solo lievemente dal 1990 (66.7%) al 2012 (68.5%).

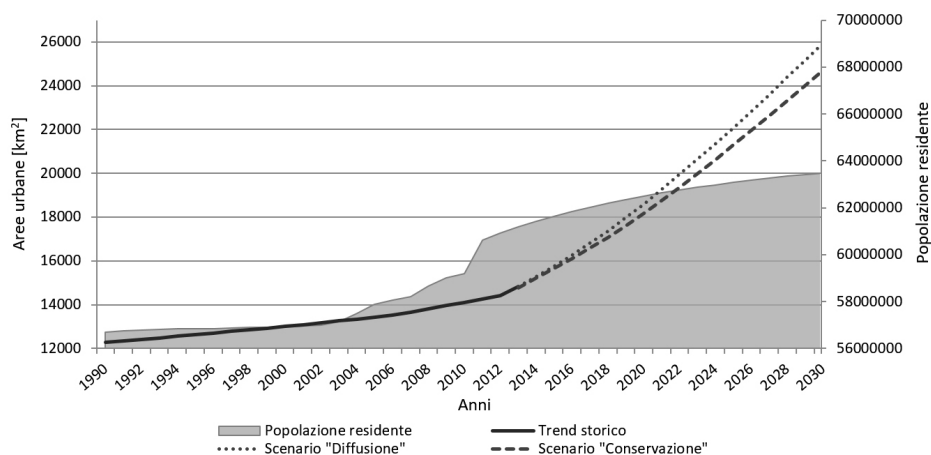


Fig. 3 – Trend di crescita dell'estensione urbana e della popolazione osservati tra il 1990 ed il 2012, e proiezioni di crescita dell'estensione urbana in base ai due scenari policy-oriented fino al 2030. I dati passati e le proiezioni riguardo la popolazione sono distribuiti dall'ISTAT. La tabella mostra il tasso di crescita annuo nei diversi periodi

Fonte: elaborazione ad opera degli autori

Lo sviluppo dell'urbanizzazione ha interessato più di 200.000 ettari tra il 1990 e il 2012, che corrispondono ad un aumento di quasi il 20% (fig. 3). In aggiunta, questa espansione è avvenuta per la maggior parte a scapito del terreno agricolo. Secondo i dati della Banca Mondiale l'estensione delle aree seminative pro capite (dopo esser già stato dimezzato nell'intervallo 1960-1990, passando da 0,26 ettari/pro capite a 0,16 ettari/pro capite) si è ridotto di quasi un terzo al 2012 (0,12 ettari/pro capite) (World Bank, 2012; Ott, 2014). L'analisi LUCC sui dati di classificazione di uso del suolo utilizzati (Corine Land Cover) conferma questa preoccupante tendenza di degradazione del valore ecologico dei suoli. Infatti, durante lo stesso periodo più di 200.000 ettari di aree naturali (foreste, arbusti, aree vegetate scarsamente o poco) sono andati perduti (a causa di conversioni in terreno agricolo e urbano), il che corrisponde ad una perdita di vegetazione di un'area grossomodo equivalente all'estensione dell'intero comune di Roma (il più grande d'Europa, ~ 1.250 km). Inoltre, l'analisi di LUCC effettuata in questo studio quantifica la perdita di suolo agricolo tra il 1990 e il 2012 in circa 2.500 ettari, a causa prevalentemente dell'urbanizzazione.

Il lavoro di modellizzazione ha dato come risultato, in entrambi gli scenari, una notevole espansione urbana per il prossimo futuro. Tuttavia, la differenza fra le due simulazioni è rilevante e corrisponde a  $\sim 126.000$  ettari; il che significa che il delta imputabile alle differenze fra i due scenari è equivalente a  $\sim 10\%$  dell'estensione totale delle aree urbane nel 1990. In altre parole, la previsione secondo lo scenario BAU/*Diffusion* stima un aumento delle aree urbane di  $\sim 80\%$  (vale a dire  $\sim 2.595$  Mha); mentre per lo scenario *conservation* la previsione si ferma ad un aumento di  $\sim 70\%$  (vale a dire  $\sim 2.470$  Mha) (figg. 3 e 4).

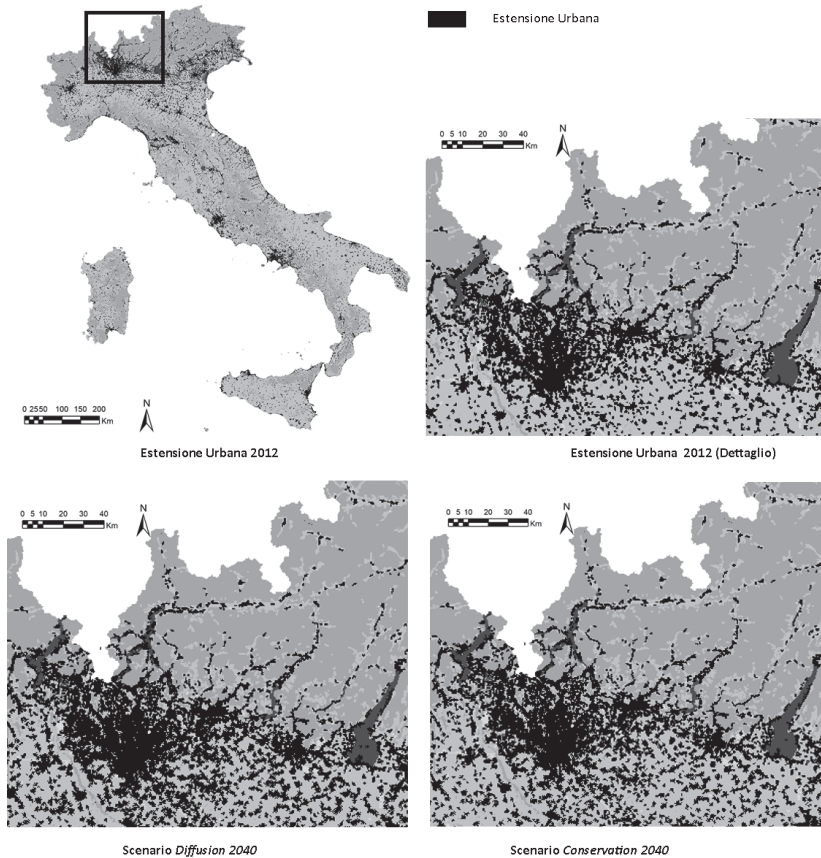


Fig. 4 – Uso del suolo nel 2012 (dati CLC), e proiezione dell'uso del suolo in funzione dei due scenari considerati al 2040  
Fonte: elaborazione ad opera degli autori

Guardando invece alle dinamiche di transizione che caratterizzano i LUCC è possibile osservare che, come per il passato, entrambi gli scenari identificano nei terreni agricoli la classe maggiormente vulnerabile e soggetta al processo di urbanizzazione (figg. 5 e 6).

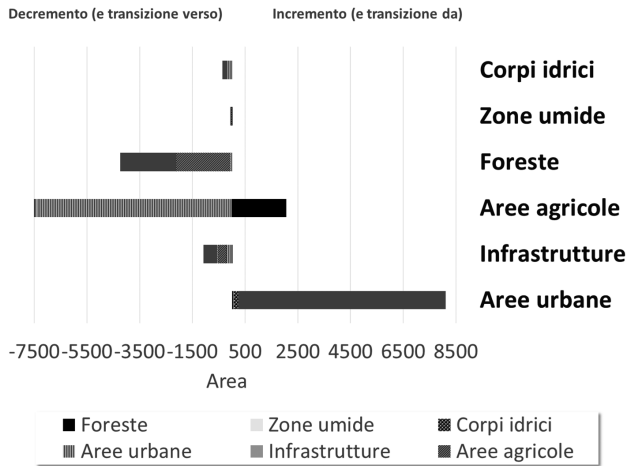


Fig. 5 – Dinamiche di transizione alla base di LUCC tra il 2012 e il 2030 nello scenario BAU/Diffusion  
 Fonte: elaborazione ad opera degli autori

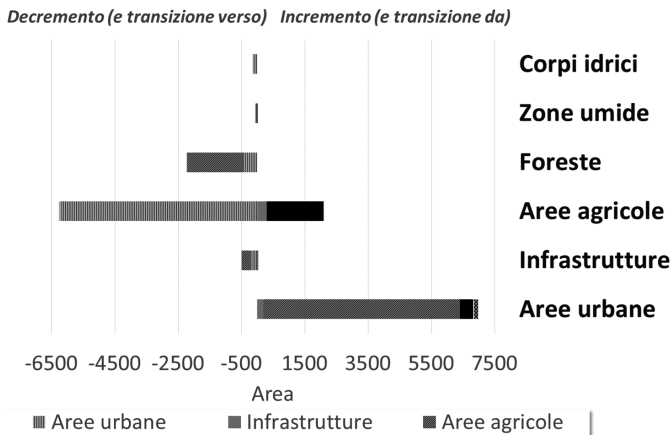


Fig. 6 – Dinamiche di transizione alla base di LUCC tra il 2012 e il 2030 nello scenario Conservation  
 Fonte: elaborazione ad opera degli autori

Lo scenario *conservation* prefigura una condizione per la quale vi è minore consumo di suolo a causa di urbanizzazione in generale, e anche che tale consumo avvenga con una percentuale minore a scapito di aree vegetate. Tuttavia, entrambi gli scenari prevedono una perdita rilevante in termini assoluti di territorio coperto da vegetazione naturale (~ 229.000 ettari nello scenario *conservation*, e 255.000 ettari nello scenario BAU/*diffusion*); ed in entrambi i casi la perdita è imputabile per la maggior parte alla sostituzione con terreni agricoli. Da notare che nello scenario *conservation* la classe delle foreste è meno vulnerabile nei confronti dell'agricoltura. Questo rafforza l'ipotesi per la quale in un territorio caratterizzato da dinamiche di urbanizzazione forti, anche le

altre dinamiche di degradazione ecologica del paesaggio sono forti. Al contrario, in un paesaggio caratterizzato da elementi che limitano e contengono il consumo di suolo, anche altre dinamiche degradanti degli ambienti naturali risultano essere più deboli. Va comunque notato che i due scenari implementati rappresentano un parere riguardo il peso relativo dei vincoli presi in considerazione nel caratterizzare LUCC, e come tale soggettivo. Se da un lato lo scenario *diffusion* rappresenta ciò che l'expert panel considera abbia influenzato i passati LUCC, e quindi una valutazione *ex post*, lo scenario *conservation* è una valutazione *ex ante*, in quanto rappresenta il parere dell'expert panel senza aver potuto prima vedere i risultati. Ne consegue che l'ipotetica implementazione del presente apparato metodologico in un processo di pianificazione dovrebbe poter prevedere la reiterazione della modellizzazione previa analisi dei risultati al fine di elaborare scenari *policy-oriented* maggiormente efficaci.

*Discussione.* – I risultati riportati nella sezione precedente sono di grande interesse non solo per il caso di studio italiano, ma anche per una riflessione più ampia sull'impatto che le dinamiche di LUCC locali possono avere sul cambiamento climatico-ambientale globale (Chappell, Baldock, e Sanderman, 2015; van Oosterzee, Dale, e Preece, 2013; van Vuuren *et al.*, 2015). Infatti, è ampiamente dimostrato come la copertura del suolo abbia un rilevante impatto sul cambiamento climatico, in virtù del fatto che può fungere sia da *sink* che da *source* biosferico. Quindi adeguate dinamiche di LUCC possono essere utilizzate per mitigare il cambiamento climatico (Dilling e Failey, 2013; Lim *et al.*, 2005). Nondimeno, il recente accordo di Parigi del COP21 ha stabilito che per mantenere l'aumento della temperatura al di sotto di due gradi Celsius, sono necessari notevoli cambiamenti riguardo l'uso del suolo e le politiche che regolamentano l'uso del suolo (United Nation – FCCC 2015).

Ad oggi, le strategie di pianificazione urbana ed economica a lungo termine sono ancora considerate tra gli strumenti potenzialmente più efficaci ed attualmente disponibili per favorire modelli di sviluppo più sostenibili. Inoltre, molti autorevoli soggetti della scena politica internazionale sembrano pronti ad adottare cambiamenti significativi nelle loro politiche, soprattutto dopo che alcune ricerche hanno oramai dimostrato come dalla crisi economica del 2008 le emissioni di carbonio non sono affatto rallentate, ma sono aumentate ancora più velocemente, insieme con il tasso di disoccupazione, disuguaglianze sociali e costi energetici (Huber e Knutti, 2011; Peters *et al.*, 2011). Questi risultati hanno reso ancor più evidente l'inadeguatezza delle politiche socio-economiche e spaziali adottate fino ad ora nel raggiungere gli obiettivi imposti dalle Nazioni Unite con i *Sustainable development goals*.

Quindi appare evidente, al fine del raggiungimento dei suddetti obiettivi di sviluppo sostenibile, come sia necessaria l'adozione di nuovi paradigmi per il *policy making* e la pianificazione, che siano capaci di comprendere che talvolta gli interessi loco-regionali possono essere subordinati a interessi più generali. Auspicabile sarebbe la capacità di attuare sinergie fra i vari livelli di policy e planning (da quello locale a quello sovra-nazionale) capaci di integrare strategie di conservazione e protezione ecologica ad un livello macro con uno sviluppo economico equo e sostenibile a livello micro. Non a caso, gli obiettivi inclusi dalle Nazioni Unite sotto il concetto di sostenibilità (SDGs) interessano molteplici aspetti legati allo sviluppo umano, tra cui l'energia, i trasporti, le costruzioni,

l'agricoltura, la gestione di acqua e rifiuti (Johnstone, Hašič, e Popp, 2010), per i quali i corrispondenti fattori economici, sociali, politici, ambientali e istituzionali hanno dimostrato avere un'importanza notevole, ove correttamente calibrati, nel caratterizzare politiche di pianificazione in modo sostenibile. Tuttavia, le Nazioni Unite stimano che il passaggio verso un'economia «verde» potrebbe costare ~1,9 miliardi di dollari all'anno per i prossimi quarant'anni (United Nations 2011); ne consegue che non tutti i paesi sono ora pronti a fare fronte ad una spesa del genere. È per questo motivo che risulta più importante avviare la transizione in quei paesi che sono in qualche modo in grado di sostenere interventi che vanno in questa direzione, in quanto questo appare l'unico modo per garantire un adattamento rapido ed efficace ai cambiamenti climatici. Questo lavoro si inserisce in tale contesto e vuole proporre uno strumento supplementivo a sostegno delle politiche di pianificazione grazie a funzionalità previsionali. Analogamente, è necessario sottolineare che l'insieme dei vincoli considerati per l'elaborazione degli scenari non vuole essere esaustivo; infatti, soprattutto a livello locale, vi sono molteplici regole e vincoli che dovrebbero essere presi in considerazione in maniera sistematica al fine di elaborare scenari e risultati maggiormente aderenti alla realtà.

*Implicazioni sulle politiche di adattamento ai cambiamenti climatici.* – Come già anticipato, la società moderna si trova ad affrontare la necessità di ridurre drasticamente le emissioni di gas serra per il prossimo futuro al fine di mantenere l'innalzamento della temperatura globale entro i 2 gradi centigradi (van Vuuren *et al.*, 2011). Il ruolo svolto dai LUC in questa sfida è tutt'altro che secondario. Infatti, da un lato le aree urbane sono fra i maggiori responsabili dell'emissione di CO<sub>2</sub> globale, mentre dall'altro il suolo naturale (nudo o vegetato) deve essere considerato come il principale serbatoio del carbonio (R. Lal, 2004). Pertanto, l'urbanizzazione non solo ha come effetto quello di ampliare le aree maggiormente responsabili per le emissioni di gas serra, ma anche di ridurre le superfici in grado di fungere da *carbon sink* (4). Inoltre, recenti studi hanno teorizzato come questo fenomeno possa avere conseguenze ancora più gravi in termini di capacità dei suoli di sequestrare carbonio, a causa di un sistema di *feedback* climatico sinora sconosciuto. Ovvero, un meccanismo per il quale, in conseguenza dell'innalzamento della temperatura, i microrganismi che vivono nel suolo si adattano aumentando il loro tasso di traspirazione, aumentando dunque il volume di CO<sub>2</sub> rilasciata in atmosfera; la preoccupante – e ironica – conseguenza è quella di stimolare ancor più il riscaldamento del pianeta (Crowther *et al.*, 2016; Davidson, 2016; Melillo *et al.*, 2017).

Inoltre, i risultati presentati in questo studio permettono di confermare l'ipotesi secondo la quale vi è una relazione fra le differenti dinamiche depauperative di LUC, il che è ancora più preoccupante visto e considerato che circa il 35% delle emissioni di CO<sub>2</sub> di origine antropica è direttamente imputabile alle attività di uso del suolo (Houghton e Hackler, 2001). Infatti, l'espansione urbana non solo di per sé è responsabile per la porzione di suolo direttamente consumato, ma esercitando una pressione sulle aree agricole influenza quest'ultime a sostituire il terreno naturale e vegetato; di conseguenza, l'agri-

---

(4) Un *carbon sink*, o *sink* biosferico è una riserva di anidride carbonica assorbita e immagazzinata da determinati compartimenti naturali o antropici. Un *carbon source*, o sorgente biosferica, è il suo contrario, ovvero una fonte di anidride carbonica. Il suolo, in funzione della sua copertura, può agire sia da *source* che da *sink*, e per questo ha un ruolo determinate all'interno del ciclo del carbonio (ciclo biogeochimico di circolazione del carbonio fra geosfera, idrosfera, biosfera, e atmosfera della Terra).

coltura si trova a doversi spostare solitamente su terreni di qualità/idoneità inferiore e a dover diminuire la proporzione di suolo naturale coperto. Quindi, anche se questo non è l'oggetto di questo studio, si può ragionevolmente ipotizzare che questa interazione fra le dinamiche di LUCC hanno un impatto rilevante sulla capacità di sequestro della  $CO_2$  da parte di suolo e vegetazione (Li *et al.*, 2016), sebbene valutare la grandezza di questo effetto e le sue conseguenze non sia affatto cosa semplice.

*Implicazioni per le politiche agricole.* – I risultati presentati in questo lavoro dimostrano come le proiezioni di LUCC possono essere utilizzate per indagare anche le potenziali ripercussioni sull'economia del settore agricolo.

L'urbanizzazione a scapito dei terreni agricoli rappresenta un problema preoccupante a prescindere dallo scenario preso in considerazione. Le ripercussioni che tale fenomeno potrebbe avere sul corrispondente settore agricolo, ed in generale per l'economia italiana, potrebbero essere di una grandezza non trascurabile. Ciò appare ancora più evidente se si considera che la sostituzione dei suoli agricoli con suolo urbanizzato è una dinamica difficilmente reversibile. Infatti, una volta che il suolo viene impermeabilizzato perde le sue funzionalità ecologiche, e la sua riconversione in uno stato ecologico funzionante è molto improbabile o richiede un processo estremamente lento. Il potenziale di produttività agricola di un suolo dipende da molteplici input (la qualità del suolo, l'idoneità, i sistemi di concimazione, irrigazione, il grado di meccanizzazione, la forza lavoro impiegata, ecc.) e l'area a disposizione è uno di questi. Quindi, ad una diminuzione di uno di questi input corrisponde, in linea di massima, una perdita del potenziale di produttività. Di conseguenza, se il volume di produzione agricola diminuisce a seguito della diminuzione delle aree agricole totali, questo probabilmente avrà delle ripercussioni anche sul settore economico. A tal proposito, in fig. 7a osserviamo come il trend di evoluzione della superficie agricola disponibile nel tempo possa essere considerato un buon *proxy* per stimare il volume di produzione agricola corrispondente (5). In funzione di questa ipotesi, le serie storiche inerenti la superficie agricola disponibile (fig. 7b), costituite da dati censiti e dai risultati degli scenari previsionali, sono state utilizzate per stimare le corrispondenti curve di produzione agricola (fig. 7c) tramite semplice regressione lineare (con metodo *ordinary least squares*). I risultati mostrano che la futuribile perdita di suolo agricolo può comportare una potenziale riduzione della produttività agricola tra il 27% (dello scenario *diffusion*) e il 23% (dello scenario BAU/*conservation*); il che corrisponde ad una perdita fra le ~50 e le ~5

(5) Le serie temporali di entrambe le variabili sono state ottenute da statistiche dell'UE Eurostat dal 2000 al 2013. La correlazione polinomiale tra le due variabili ha un coefficiente  $r^2 > 0,75$  (fig. 8A).



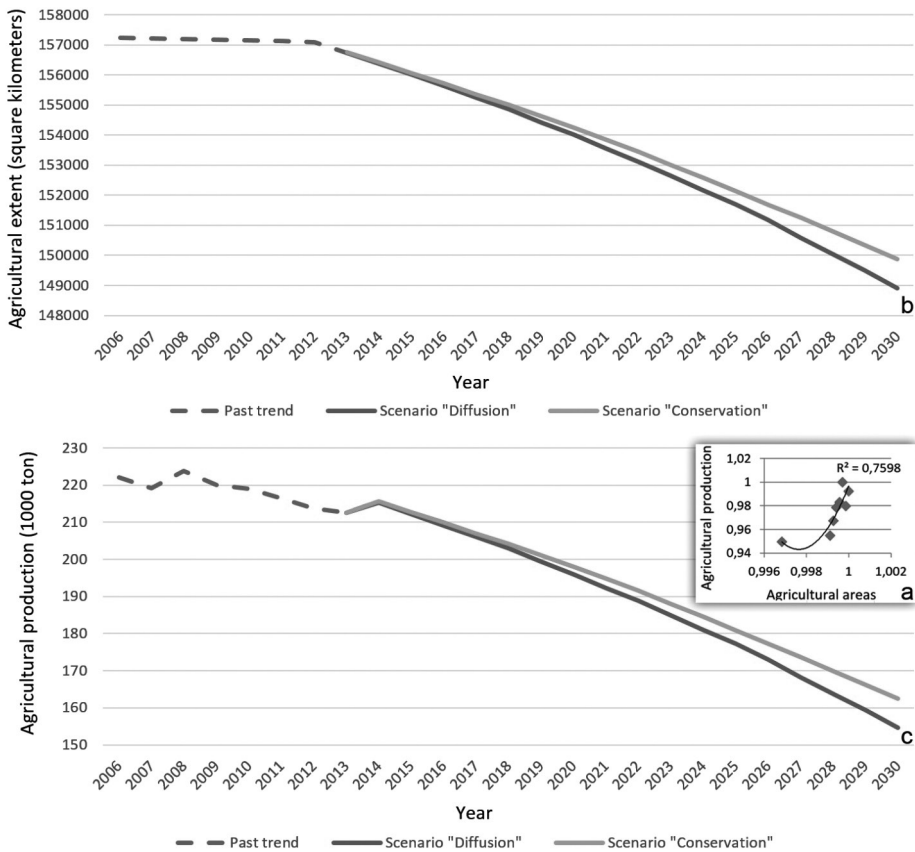


Fig. 7 – Correlazione polinomiale tra estensione aree agricole e produzione agricola (a); evoluzione dell'area agricola disponibile (b), e della produzione agricola (c).

Fonte: elaborazione ad opera degli autori.

Tuttavia, stimare con precisione il potenziale volume di produzione agricola corrispondente ad una determinata disponibilità in termini di superficie agricola è un lavoro che richiede ben più di una semplice regressione lineare. L'esercizio proposto in fig. 7 vuole soltanto offrire uno spunto di riflessione ulteriore in tal senso, ed indicare un potenziale futuro sviluppo della ricerca in questione, ma non ha affatto la pretesa di essere esaustivo.

*Implicazioni in materia di tutela dell'ambiente e del paesaggio.* – I risultati di entrambe le simulazioni condotte in questo studio confermano una tendenza dei LUCO osservabile negli ultimi quaranta anni in tutto il bacino del Mediterraneo, ed in particolare nei paesi europei. Ovvero quello di una rilevante diffusione urbana in zone costiere e pianeggianti, e di lento ma progressivo abbandono delle aree interne che vengono così gradualmente ricoperte da vegetazione naturale (García-Ruiz *et al.*, 1996; Debussche, Lepart, e Dervieux, 1999; MacDonald *et al.*, 2000). Inoltre, la perdita di aree vegetate

naturali in conseguenza dell'espansione delle aree agricole e urbane ha gravi ripercussioni anche sulla qualità e quantità di servizi ecosistemici di fondamentale importanza, e sul patrimonio di biodiversità ecologica in generale (al. Hajdu *et al.*, 2016). Per esempio, l'aumento della temperatura di aria, terra e acqua provoca una riduzione degli habitat idonei per la riproduzione degli insetti impollinatori, riducendone così il numero. Nondimeno, molti studi (Amato *et al.*, 2016a; Amato *et al.*, 2016b; Martellozzo e Clarke, 2011; Munafò *et al.*, 2013; Travisi *et al.*, 2010; Vaz e Nijkamp, 2015), hanno evidenziato come sovente l'espansione urbana in Italia non avviene in maniera organica ma tende ad assumere maggiormente caratteristiche dispersive (*sprawl*). La *sprawlizzazione* delle aree urbane influenza anche altre coperture del suolo (soprattutto quella naturale) nell'assumere una distribuzione più frammentata e composta da *patch* di dimensioni minori; conseguentemente, ciò comporta una riduzione nella proporzione degli ambienti naturali che possono fornire un habitat idoneo per determinate specie, e quindi implica una perdita di biodiversità (Hobbs *et al.*, 2008).

*Aspetti critici relativi all'utilizzo del modello SLEUTH.* – Il modello SLEUTH è stato ampiamente applicato in diversi contesti regionali, e ha dimostrato di rappresentare un efficiente strumento di analisi di LUCC, perché consente di formulare delle ipotesi di sviluppo territoriale e di prevederne gli effetti spaziali. In particolare, questa applicazione ha permesso di elaborare scenari in cui l'influenza di variabili socio-economiche è spazialmente esplicita. Quindi, ha permesso una comparazione non solo quantitativa, ma anche spaziale degli effetti ascrivibili a scenari ipoteticamente rispondenti ad indirizzi di *policy* differenti. Tuttavia, sebbene il modello sia di facile ed intuitiva applicazione, non è poi così flessibile quando si tratta di manipolare gli input di cui necessita. Infatti, nonostante siano state introdotte variabili socio-economiche all'interno del modello attraverso lo strato *exclusion*, quest'ultimo – pur essendo efficiente – è statico ed unico e potrebbe non essere sufficiente per cogliere la complessità delle dinamiche socio-economiche nel tempo. Al momento attuale è difficile immaginare come questa caratteristica possa essere aggiunta a SLEUTH, e questo rimane un campo d'indagine rilevante per il quale sono necessari ulteriori studi. Inoltre, lo strumento e la metodologia qui presentati possono non essere ritenuti universalmente di facile applicazione, il che rappresenta un'ostacolo non trascurabile per l'implementazione di tali strumenti nel processo di pianificazione. In aggiunta, si deve tenere presente che i processi di pianificazione non sono risolvibili esclusivamente mediante l'impiego di modelli analitico-funzionali come quello presentato, ma prevedono una mediazione fattuale fra molteplici attori che vivono e svolgono le proprie attività sul territorio oggetto di pianificazione. Dunque diventa necessario, accanto allo sviluppo di tali strumenti analitici, da un lato l'elaborazione di piattaforme per il loro utilizzo che siano intuitive, di facile utilizzo, e che prevedano un corredo esplicativo adeguato; dall'altro invece, devono prevedere un aspetto procedurale che sottenda la loro applicazione in maniera flessibile, partecipata, e dinamica. Va da sé che per questo tipo di lavoro, tutt'altro che semplice, si deve ricorrere ad un mix di competenze multidisciplinari che trascende la singola disciplina e l'ambito accademico *tout court*. Infine, va notato che i risultati del presente lavoro di modellizzazione si basano su un insieme di variabili che non ha la pretesa di essere esaustivo, e quindi – sebbene rappresentativo – è per definizione limitato. Quest'ultimo infatti è funzionale all'elaborazione della metodo-

logia proposta, ma, molto probabilmente, vi sono anche altre variabili che avrebbero potuto arricchire gli input di tale lavoro. Soprattutto a livello locale vi sono molteplici regole e vincoli che sarebbe bene poter prendere in considerazione in maniera sistematica al fine di elaborare scenari e risultati maggiormente aderenti alla realtà. Analogamente, nonostante il valido supporto rappresentato da modelli automatici come SLEUTH, non si deve ignorare come la pianificazione interessi un insieme complesso di attori in relazione fra loro, e che quindi non può essere caratterizzata e limitata all'uso di tali strumenti.

*Conclusioni.* – Questa ricerca ha presentato un'applicazione del modello SLEUTH al territorio nazionale italiano, al fine di valutare i LUCC passati e stimarne dei potenziali percorsi evolutivi. Ci si è soffermati sulle implicazioni che l'estensione di tali LUCC ha in differenti ambiti, e come i trend evolutivi osservati mettano in luce alcune criticità sia su scala loco-regionale che nazionale e sovranazionale. Inoltre, uno sguardo ulteriore alla tipologia delle dinamiche di LUCC suggerisce che il tipo di copertura vegetale perduta a causa di urbanizzazione e sostituzione con aree agricole è di grande valore in termini ecologici e di sostenibilità. Al contrario, le zone che vengono convertite in agricoltura sono rappresentate principalmente da suoli di qualità/idoneità molto inferiore per scopi agricoli. Questo lavoro ha evidenziato l'inadeguatezza delle politiche di pianificazione finora adottate nel garantire un adeguato livello di protezione ai paesaggi naturali, soprattutto a causa della loro frammentazione. Infine, con il lavoro di simulazione dei LUCC qui proposto si è voluto proporre un quadro metodologico ed uno strumento utili per valutare i possibili effetti riconducibili a determinate scelte di *policy*, così da facilitarne la stima dei corrispondenti costi/benefici. In conclusione, crediamo fondamentale in un'ottica di sviluppo equo e sostenibile l'introduzione sistematica nelle procedure di pianificazione territoriale di strumenti predittivi come quello descritto in questo studio, che possano permettere una valutazione *ex-ante* delle possibili ripercussioni potenzialmente ascrivibili all'implementazione di una particolare *policy*. Infatti, una corretta e adeguatamente calibrata pianificazione territoriale è quanto mai necessaria, perché è proprio mediante la riduzione del consumo di suolo e la tutela di servizi ecosistemici, il mantenimento della qualità dei suoli agricoli, l'aumento di capacità di mitigazione del cambiamento climatico ecc. che gli obiettivi specificati nelle recenti politiche delle Nazioni Unite possono essere raggiunti.

#### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- ALBIN P.S., *The Analysis of Complex Socioeconomic Systems*, Lexington (MA), D. C. Heath, 1975.
- AMATO F., MAIMONE B.A., MARTELLOZZO F., NOLÈ G. e MURGANTE B., *The Effects of Urban Policies on the Development of Urban Areas*, in «Sustainability», 2016a, 8, p. 297.
- AMATO F., MARTELLOZZO F., MURGANTE B. e NOLÈ G., *A Quantitative Prediction of Soil Consumption in Southern Italy*, in «Lecture Notes in Computer Science», 2015, pp. 798-812.
- AMATO F., MAIMONE B.A., MARTELLOZZO F., NOLÈ G. e MURGANTE B., *Preserving Cultural Heritage by Supporting Landscape Planning with Quantitative Predictions of Soil Consumption*, in «Journal of Cultural Heritage», 2016b, 23, pp. 44-54.
- BATTY M., *Cellular Automata and Urban Form: A Primer*, in «APA Journal», 1997, 63, pp. 266-274.
- BROWN D.G. et al., *Modelling Land Use and Land Cover Change*, in GUTMAN G. et al. (eds), *Land Change Science. Remote Sensing and Digital Image Processing*, Dordrecht, Springer, 2005, p. 6.

- CHAPPELL A., BALDOCK J. e SANDERMAN J., *The Global Significance of Omitting Soil Erosion from Soil Organic Carbon Cycling Models*, in «Nature Climate Change», 2015, October, pp. 1-5.
- CHAUDHURI G. e CLARKE K.C., *The SLEUTH Land Use Change Model: A Review*, in «The International Journal of Environmental Resources Research», 2013, 1, 1, p. 89.
- CHEN C.F., *Applying the Analytical Hierarchy Process (AHP) Approach to Convention Site Selection*, in «Journal of Travel Research», 2006, 45, 2, pp. 167-174.
- CLARKE K.C., *A Decade of Cellular Urban Modelling with SLEUTH: Unresolved Issues and Problems*, in «Planning Support Systems for Cities and Regions», 2008, pp. 47-60.
- CLARKE K.C., *Cellular Automata and Agent-Based Models*, in P.N.M.M. (a cura di), *Handbook of Regional Science*, Berlino-Heidelberg, Springer-Verlag, 2014, pp. 1217-1233.
- COBBINAH P.B. e ABOAGYE H.N., *A Ghanaian Twist to Urban Sprawl*, in «Land Use Policy», 2017, 61, pp. 231-241.
- CROWTHER T.W. *et al.*, *Quantifying Global Soil Carbon Losses in Response to Warming*, in «Nature», 2016, 540, 7631, pp. 104-108.
- DAVIDSON E.A., *Biogeochemistry: Projections of the Soil-Carbon Deficit*, in «Nature», 2016, 540, pp. 47-48.
- DEBUSSCHE M., LEPART J. e DERVIEUX A., *Mediterranean Landscape Changes: Evidence from Old Postcards*, in «Global Ecology and Biogeography», 1999, 8, 1, pp. 3-15.
- DIETZEL C. e CLARKE K.C., *Spatial Differences in Multi-Resolution Urban Automata Modelling*, in «Transactions in GIS», 2004, 8, 4, pp. 479-492.
- DIETZEL C. e CLARKE K.C., *Toward Optimal Calibration of the SLEUTH Land Use Change Model*, in «Transactions in GIS», 2007, 11, 1, pp. 29-45.
- DILLING L. e FAILEY E., *Managing Carbon in a Multiple Use World: The Implications of Land-Use Decision Context for Carbon Management*, in «Global Environmental Change», 2013, 23, 1, pp. 291-300.
- FIGUEIRA J.R., GRECO S. e EHRGOTT M., *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, New York, Springer Verlag, 2016.
- FOLEY J.A. *et al.*, *Global Consequences of Land Use*, in «Science», 2005, 309, 5734, pp. 570-574.
- FOLEY J.A. *et al.*, *Solutions for a Cultivated Planet*, in «Nature», 2011, 478, pp. 337-342.
- GARCÍA-RUIZ J.M. *et al.*, *Land-Use Changes and Sustainable Development in Mountain Areas: A Case Study in the Spanish Pyrenees*, in «Landscape Ecology», 1996, 11, 5, pp. 267-277.
- GLAESER E.L., GYOURKO J. e SAKS R.E., *Urban Growth and Housing Supply*, in «Journal of Economic Geography», 2006, 6, 1, pp. 71-89.
- HOUGHTON A.R. e HACKLER J.L., *Carbon Flux to the Atmosphere from Land-Use Changes: 1850 to 1990*, in «ORNL/CDIAC-131, NDP-050/R1», 2001.
- HUBER M. e KNUTTI R., *Anthropogenic and Natural Warming Inferred from Changes in Earth's Energy Balance*, in «Nature Geoscience», 2011, 5, 1, pp. 31-36.
- JANTZ C.A., GOETZ S.J., DONATO D. e CLAGGETT P., *Designing and Implementing a Regional Urban Modelling System Using the SLEUTH Cellular Urban Model*, in «Computers, Environment and Urban Systems», 2010, 34, pp. 1-16.
- JANTZ C.A., GOETZ S.J. e SHELLEY M.K., *Using the SLEUTH Urban Growth Model to Simulate the Impacts of Future Policy Scenarios on Urban Land Use in the Baltimore-Washington Metropolitan Area*, in «Environment and Planning B: Planning and Design», 2004, 30, pp. 251-271.
- JOHNSTONE N., HAŠČIĆ I. e POPP D., *Renewable Energy Policies and Technological Innovation: Evidence Based on Patent Counts*, in «Environmental and Resource Economics», 2010, 45, 1, pp. 133-155.
- LAL R., *Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security*, in «Science», 2004, 304, 5677, pp. 1623-1627 (on line su internet: doi: 10.1126/science.1097396).
- LAS CASAS G. e SCORZA F., *Sustainable Planning: A Methodological Toolkit*, in GERVASI O. *et*

- al. (a cura di), *Lecture Notes in Computer Science*, New York, Springer International Publishing, 2016, pp. 627-635.
- LI H. et al., *Effects of Shrub Encroachment on Soil Organic Carbon in Global Grasslands*, in «Scientific Reports», 2016, 6, 28974 (on line su internet: doi:10.1038/srep28974).
- LIBERATORE M.J. e NYDICK R.L., *The Analytic Hierarchy Process in Medical and Health Care Decision Making: A Literature Review*, in «European Journal of Operational Research», 2008, 189, 1, pp. 194-207.
- LIM Y. K., CAI M., KALNAY E. e ZHOU L., *Observational Evidence of Sensitivity of Surface Climate Changes to Land Types and Urbanization*, in «Geophysical Research Letters», 2005, 32.
- LOMBARDINI G. e SCORZA F., «Resilience and Smartness of Coastal Regions. A Tool for Spatial Evaluation», in GERVASI et al. 2016, pp. 530-541.
- MACDONALD D. et al., *Agricultural Abandonment in Mountain Areas of Europe: Environmental Consequences and Policy Response*, in «Journal of Environmental Management», 2000, 59, 1, pp. 47-69.
- MAGUIRE D.J. et al., *GIS, Spatial Analysis, and Modeling*, Redlands (CA), ESRI Press, 2005.
- MARIA DE ALMEIDA C. et al., *Empiricism and Stochastics in Cellular Automaton Modeling of Urban Land Use Dynamics*, 2002 (on line su internet: [http://www.casa.ucl.ac.uk/working\\_papers/paper42.pdf](http://www.casa.ucl.ac.uk/working_papers/paper42.pdf)).
- MARINOSCI I. et al., *L'Impiego Di Dati Copernicus Per La Derivazione Di Indicatori Sul Consumo Di Suolo E Sullo Sprawl Urbano*, in *Atti 17a Conferenza Nazionale ASITA 2013* (Riva del Garda, 5-7 novembre 2013), pp. 937-946.
- MARTELLOZZO F. e CLARKE K.C., *Measuring Urban Sprawl, Coalescence, and Dispersal: A Case Study of Pordenone, Italy*, in «Environment and Planning B: Planning and Design», 2011, 38, pp. 1085-1104.
- MAS J.F., *Monitoring Land-Cover Changes: A Comparison of Change Detection Techniques*, in «International Journal of Remote Sensing», 1999, 20, 1, pp. 139-152 (on line su internet: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/014311699213659>).
- Ontario Federation of Agriculture, *Farmland at Risk: Why Land-Use Planning Needs Improvements for a Healthy Agricultural Future in the Greater Golden Horseshoe*, 2015.
- MELILLO J.M. et al., *Long-term Pattern and Magnitude of Soil Carbon Feedback to the Climate System in a Warming World*, in «Science», 2017, 358, 6539, pp. 101-105.
- MUNAFÒ M. et al., *Estimating Soil Sealing Rate at National Level – Italy as a Case Study*, «Ecological Indicators», 2013, 26, pp. 137-140.
- VAN OOSTERZEE P., DALE A. e PREECE N.D., *Integrating Agriculture and Climate Change Mitigation at Landscape Scale: Implications from an Australian Case Study*, in «Global Environmental Change», 2013, 29, 0, pp. 306-317 (on line su internet: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.10.003>).
- DI PALMA F., AMATO F., NOLÈ G., MARTELLOZZO F. e MURGANTE B., *A SMAP Supervised Classification of Landsat Images for Urban Sprawl Evaluation*, in «ISPRS International Journal of Geo-Information», 2016, 5, 7, p. 109.
- PAN Y. et al., *A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests*, in «Science», 2011, 333, 6045, pp. 988-993 (on line su internet: doi: 10.1126/science.1201609).
- PETERS G.P. et al., *Rapid Growth in CO<sub>2</sub> Emissions after the 2008-2009 Global Financial Crisis*, in «Nature Climate Change», 2011, 2, 1, pp. 2-4.
- PONTIUS R.G. et al., *Comparing the Input, Output, and Validation Maps for Several Models of Land Change*, in «Annals of Regional Science», 2008, 42, pp. 11-37.
- RAMANKUTTY N., AMATO T.E., MONFREDA C., FOLEY J.A., *Farming the Planet: 1. Geographic Distribution of Global Agricultural Lands in the Year 2000*, in «Global Biogeochem. Cycles», 2008, 22 (on line su internet: doi: 10.1029/2007GB002952).
- ROCKSTRÖM J. et al., *Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity*, in

- «Ecology and Society», 2009, 14, 2 (on line su internet: <https://doi.org/10.5751/ES-03180-140232>).
- ROMANO B. e ZULLO F., *The Urban Transformation of Italy's Adriatic Coastal Strip: Fifty Years of Unsustainability*, in «Land Use Policy», 2014, 38, pp. 26-36.
- ROMANO B. e ZULLO F., *Half a Century of Urbanization in Southern European Lowlands: A Study on the Po Valley (Northern Italy)*, in «Urban Research & Practices», 2015, 9, 2, pp. 109-130.
- RUSSO L., *Il Consumo Di Suolo Agricolo All'attenzione Del Legislatore*, in «Aestimum», 2013, 63, dicembre, pp. 163-174.
- SAATY T.L., *The Analytic Hierarchy Process*, New York, McGraw Hill, 1980.
- SAATY T.L., *What Is the Analytic Hierarchy Process?*, in *Mathematical Models for Decision Support*, Berlino-Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 1988, pp. 109-121.
- SAATY T.L., *How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process*, in «European Journal of Operational Research», 1990, 48, 1, pp. 9-26.
- SAATY T.L., *The Analytic Hierarchy and Analytic Network Processes for the Measurement of Intangible Criteria and for Decision-Making*, in *Multiple Criteria Decision Analysis*, New York, Springer, 2016, pp. 363-419.
- SCHMOLDT D.L., KANGAS J., MENDOZA G.A. e PESONEN M., *The Analytic Hierarchy Process in Natural Resource and Environmental Decision Making*, a cura di SCHMOLDT D.L., KANGAS J., MENDOZA G.A. e PESONEN M., Netherlands, Springer, 2001.
- SETO K.C., GÜNERALP B. e HUTYRA L.R., *Global Forecasts of Urban Expansion to 2030 and Direct Impacts on Biodiversity and Carbon Pools*, in «PNAS», 2012, 109, 40, pp. 16083-16088.
- SILVA E. e CLARKE K.C., *Calibration of the SLEUTH Urban Growth Model for Lisbon and Porto, Portugal*, in «Computers, Environment and Urban Systems», 2002, 26, 6, pp. 525-552.
- SUDHIRA H.S., RAMACHANDRA T.V. e JAGADISH K.S., *Urban Sprawl: Metrics, Dynamics and Modelling Using GIS*, in «International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation», 2004, 5, 1, pp. 29-39.
- SZUL P. e BEDNAR T., *Productivity Frameworks in Big Data Image Processing Computations – Creating Photographic Mosaics with Hadoop and Scalding*, in «Procedia Computer Science», 2014, 29, pp. 2306-2314.
- TESFAMARIAM S. e SADIQ R., *Risk-Based Environmental Decision-Making Using Fuzzy Analytic Hierarchy Process (F-AHP)*, in «Stochastic Environmental Research and Risk Assessment», 2006, 21, 1, pp. 35-50.
- TORRENS P.M. e ALBERTI M., *Measuring Sprawl*, in «Centre for Advanced Spatial Analysis», 2000, 27, pp. 1-34 (on line su internet: <http://eprints.ucl.ac.uk/1370/>).
- TRAVISI C.M. et al., *Impacts of urban Sprawl and Commuting: a Modelling Study for Italy*, in «Journal of Transport Geography», 2010, 18, 3, pp. 382-392.
- UNDESA, *SDGs & Topics: Sustainable Development Knowledge Platform*, in *United Nations Department of Economic and Social Affairs*, 2015 (on line su internet: <https://sustainabledevelopment.un.org/topics>).
- UNITED NATION, *The Great Green Technological Transformation*, United Nations publication, 2011.
- UNITED NATION – FCCC, *Adoption of the Paris Agreement. Proposal by the President*, 2015.
- VAN VUUREN D.P. et al., *The Use of Scenarios as the Basis for Combined Assessment of Climate Change Mitigation and Adaptation*, in «Global Environmental Change», 2011, 21, 2, pp. 575-591.
- VAN VUUREN D.P. et al., *Energy, Land-Use and Greenhouse Gas Emissions Trajectories under a Green Growth Paradigm*, in «Global Environmental Change», 2015 (on line su internet: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.008>).
- VAZ E. e NIJKAMP P., *Gravitational Forces in the Spatial Impacts of Urban Sprawl: An Investigation of the Region of Veneto, Italy*, in «Habitat International», 2015, 45, 2, pp. 99-105.

- YANG J. e LEE H., *An AHP Decision Model for Facility Location Selection*, in «Facilities», 1997, 15, pp. 241-254.
- ZULLO F., PAOLINELLI G., FIORDIGIGLI V. e ROMANO B., *Urban Development in Tuscany Land Uptake and Landscapes Changes*, in «TeMA – Journal of Land Use, Mobility and Environment», 2015, 2, pp. 183-202.

TO WHAT EXTENT IS SOIL CONSUMPTION SUSTAINABLE? A COMPARISON OF THE POTENTIAL REPERCUSSIONS OF POLICY ORIENTED SCENARIOS THOROUGH NUMERICAL SIMULATION AND MULTICRITERIA ANALYSIS. – It is well known that human activities are among the major causes for global environmental change. In particular, the developments of rural and natural land, together with the swelling of natural resources from urban population, exacerbate this environmental burden. The aims of this research are threefold: at first it wants to produce cartographical estimating potential future urbanization and land cover changes (LUCC) in Italy according to different and contrasting policy-oriented scenarios; secondly, by comparing observed and projected results, it aims to underline how landscape planning in Italy often favoured economic returns neglecting to consider sustainability drawbacks; third, this work wants to trigger the debate regarding the need to recalibrate regional planning priorities in order to achieve sustainability targets. This study couples spatial cellular automata modelling with spatial multi criteria analysis, and is the first attempt (to our best knowledge) to map and estimate possible consequences of future urban growth and LUCC under different scenarios for the whole Italy at once. It features the combination of loco-regional and national criteria, thus enabling – by comparison – the understanding of their relative importance in influencing LUCC for the future, and building on findings that are relevant at the local scale while drawing a larger picture at the national scale. We believe this a useful tool to help in elaborating national and local land development pathways for the future.

*Università di Roma, La Sapienza*  
*f.martellozzu@hotmail.com*

*Università della Basilicata*  
*federico.amato@unibas.it*

*Università della Basilicata*  
*beniamino.murgante@unibas.it*

