

Elaborazione di immagini satellitari ad alta risoluzione per l'analisi multiscalare e multitemporale delle dinamiche di uso del suolo: integrazione in ambiente GIS con le metriche del paesaggio

Carmelo Riccardo Fichera (*), Giuseppe Modica (*),
Maurizio Pollino (**), Antonio Bruno Della Rocca (**)

(*) Università degli Studi "Mediterranea" di Reggio Calabria, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Forestali ed Ambientali (DiSTAFa), Loc. Feo di Vito, 89122 Reggio Calabria
cr.fichera@unirc.it, giuseppe.modica@unirc.it

(**) ENEA, Laboratorio Analisi e Osservazione del sistema Terra (UTMEA-TER), C.R. Casaccia
Via Anguillarese 301, 00123 Roma, maurizio.pollino@enea.it, antonio.dellarocca@enea.it

Riassunto

L'utilizzo congiunto delle tecniche di Telerilevamento e GIS è fondamentale nell'affrontare una vasta gamma di problematiche ambientali e territoriali. Uno degli aspetti in cui tale sinergia si mostra particolarmente efficace è quello connesso alla mappatura della copertura e dell'uso del suolo (*Land Cover/Land Use*, LULC) ed all'analisi multiscalare e multitemporale dei cambiamenti occorsi. In questo contesto, viene descritto il caso di studio relativo all'area della Conca di Avellino, nel corso del quale è stata realizzata una analisi spazio-temporale delle dinamiche di uso del suolo, basata sulle suddette tecnologie in combinazione con l'utilizzo di metriche del paesaggio (*landscape metrics*). Per l'area in esame era già disponibile un *dataset* multitemporale di immagini aeree e satellitari (Landsat) elaborato, interpretato e classificato nell'ambito di precedenti attività di ricerca. Partendo da tali risultati, è stata avviata una nuova linea di attività di ricerca - descritta nel presente lavoro - finalizzata al proseguimento ed approfondimento delle suddette analisi ad una scala di maggior dettaglio. A tal fine, sono state elaborate immagini satellitari ad alta risoluzione geometrica e spettrale: una scena QuickBird (ris. 0,60-2,80 m, 4 bande, Maggio 2005) ed una scena WorldView-2 (ris. 0,50-2,00 m, 8 bande, Giugno 2010), da cui sono state prodotte mappe di LULC dettagliate ed aggiornate. I risultati sono stati integrati, in ambiente GIS, al calcolo di specifiche metriche del paesaggio. La caratterizzazione e la distribuzione spaziale degli elementi del paesaggio, condotta con tale approccio multi scalare e multitemporale, consente di comprendere ulteriormente le dinamiche dei cambiamenti, antropici e naturali, in quella particolare zona di transizione costituita dalle aree di frangia urbano-rurale. In particolare, è possibile analizzare e interpretare gli effetti sulla sua configurazione derivanti dagli strumenti urbanistici varati in seguito al terremoto dell'Irpinia dell'80. Tali strumenti hanno difatti inciso fortemente sulle modifiche intervenute, specie nelle aree di transizione tra il sistema agricolo e il sistema urbano.

Introduzione

Le problematiche di carattere ambientale e territoriale, data la loro complessità, per essere affrontate e studiate necessitano di un grande numero di informazioni specifiche alle diverse scale spaziali e temporali che devono poi essere sintetizzate opportunamente e rese fruibili per la comprensione dei fenomeni e dei processi nonché per le conseguenti azioni di intervento sul territorio stesso. In questo contesto generale, avere informazioni dettagliate ed aggiornate circa i cambiamenti nell'uso e nella copertura del suolo (*Land Use/Land Cover*, LULC) riveste una fondamentale importanza qualora si vogliano analizzare e comprendere le relazioni reciproche che intercorrono tra le attività antropiche e l'ambiente naturale. Questo tipo di informazioni può essere ottenuto attraverso

l'adozione di sistemi di indagine che utilizzino - congiuntamente - le tecnologie aerospaziali di Telerilevamento (TLR) e quelle connesse ai Sistemi Informativi Territoriali (GIS). In particolare, le tecniche di TLR rappresentano la principale e più importante sorgente di dati ed informazioni per lo studio del LULC e dei suoi cambiamenti nel corso del tempo. Infatti, utilizzando *dataset* multi-temporali di immagini telerilevate, è possibile identificare e mappare i cambiamenti nel paesaggio, fornendo un valido supporto alle attività di pianificazione e monitoraggio del territorio (Dewan et al., 2009), così come è stato fatto per l'area di interesse oggetto del presente studio. Come mostrato da Antrop (2000 e 2004), lo sviluppo delle aree urbane è in grado di incidere fortemente sul paesaggio, provocando la trasformazione di aree rurali in urbanizzate e producendo sostanziali mutamenti funzionali, sia da un punto di vista morfologico sia strutturale. Del resto, storicamente, l'espansione urbana e le attività agricole sono in competizione per le medesime aree. Accade così che, sotto la spinta dell'aumento della popolazione, nuovi agglomerati urbani prendono il posto di aree precedentemente adibite ad uso agricolo. Ad esempio, l'ammontare del suolo consumato in Europa per effetto dell'espansione urbana (e delle infrastrutture ad essa associate) è stato, tra il 1990 ed il 2000, pari a circa 800 km²·anno⁻¹ (EEA, 2006). In particolare, nel caso dell'Italia è possibile osservare nel corso degli anni un incremento della pressione verso le aree rurali, a causa dei costi più bassi dei terreni nonché allo spostamento verso le aree periferiche e suburbane di funzioni tipiche delle centralità urbane (Murgante & Danese, 2011). La conseguenza è un *trend* demografico inverso rispetto a ciò che si verificò nel secondo dopoguerra: si assiste, in altre parole, ad uno spostamento della popolazione dalle città alle campagne e, quindi, a nuovi processi urbanizzativi non sempre pianificati.

L'area di studio

L'area di studio è localizzata nella Provincia di Avellino. Essa è caratterizzata da molti centri abitati di piccole e medie dimensioni sparsi nel territorio della Provincia, il cui capoluogo Avellino (348 m s.l.m., distante circa 60 km da Napoli, 56.368 abitanti nel 2010) è situato al centro di una pianura denominata "Conca di Avellino", circondata a NO dai monti del Massiccio del Partenio (Monti di Avella, Montevergine e Pizzo d'Alvano) e a SE dai Monti Picentini.

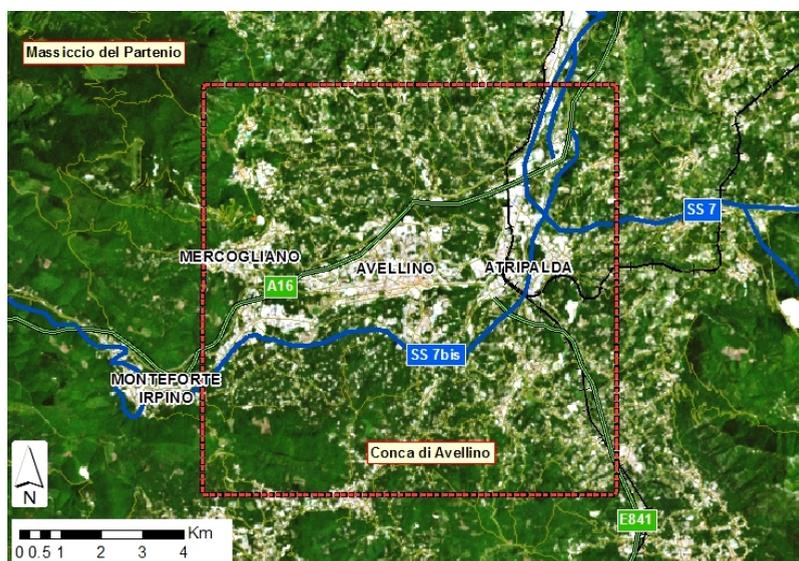


Figura 1 – Area di studio.

La zona di Avellino fu duramente colpita dal disastroso terremoto dell'Irpinia del 23 novembre 1980 (intensità pari a 6,9 nella scala Richter), che provocò quasi 3.000 vittime, più di 80.000 feriti e lasciò 280.000 persone senzatetto. Per la ricostruzione delle aree distrutte o danneggiate dal sisma lo Stato Italiano ha speso negli ultimi trent'anni circa 30 miliardi di Euro. Inoltre, al fine di governare la ricostruzione, sono stati emanati numerosi strumenti legislativi (leggi, decreti, ordinanze): tra questi va menzionata la Legge n. 219/81, che assegnò a ciascun Comune terremotato la gestione degli strumenti urbanistici, sotto il coordinamento della Regione Campania. Dal 2006, la pianificazione territoriale di Avellino e dei Comuni limitrofi è regolata da due strumenti urbanistici: il P.I.C.A. (Progetto Integrato Città di Avellino) ed il P.U.C. (Piano Urbanistico Comunale). In questo contesto generale, le analisi descritte nel presente articolo riguardano l'area del Comune di Avellino (Figura 1), al centro dell'omonima Conca, stante la sua particolare collocazione e conformazione: un'area urbanizzata (nella zona centrale) circondata dalle due aree naturali protette del Parco Regionale del Partenio (14.870 ha) e del Parco Regionale dei Monti Picentini (62.200 ha).

La classificazione della copertura del suolo e l'analisi dei cambiamenti

Per l'area in esame era già disponibile un *dataset* multitemporale di immagini aeree e satellitari (Landsat). Utilizzato per la classificazione e l'analisi del LULC nell'arco del cinquantennio 1954÷2004 nell'ambito di precedenti attività di ricerca (Fichera et al., 2010), tale *dataset* è così costituito:

- Foto aeree: 1954 (digitale), 1974 (analogico, poi scansionato) e 1990 (digitale) [fonte: Istituto Geografico Militare Italiano, IGMI];
- Immagini Landsat: MSS 1975, TM 1985, TM 1993 and ETM+ 2004 [fonte: Global Land Cover Facility, GLCF, <http://glcf.umd.edu>];
- Ortofoto aeree digitali: 1994 e 2006 [accessibili tramite servizio WMS presso il sito del Portale Cartografico Nazionale, PCN, <http://www.pcn.minambiente.it>].

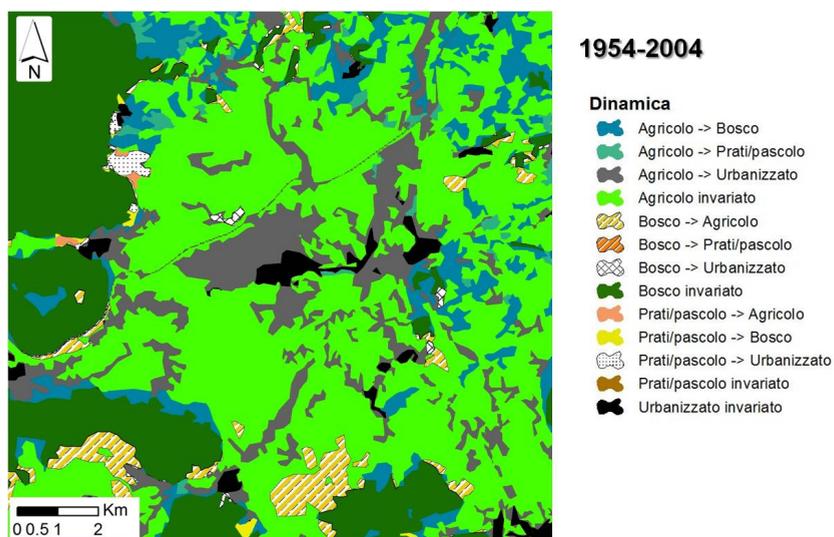


Figura 2 – Mappa dei cambiamenti nel LULC nel corso del primo periodo di analisi 1954-2004.

Da questo *dataset* sono state prodotte cinque distinte mappe di LULC (1954, 1975, 1985, 1993 e 2004), integrate in ambiente GIS (Petit & Lambin, 2001) per le successive operazioni di analisi spaziale, finalizzate all'individuazione ed all'analisi dei cambiamenti (Change Detection) nel LULC

(Singh, 1989). Ricorrendo ad un approccio integrato di tipo GIS, è stato possibile integrare le informazioni spaziali di base (area, perimetro, localizzazione, ecc.) di ciascuna classe di LULC, con quelle riguardanti la quantità totale, l'estensione e la dinamica del cambiamento. In tal modo, sono state prodotte le mappe della dinamica dei cambiamenti avvenuti nel corso del primo periodo analizzato (1954÷2004, Figura 2). Per i dettagli relativi ai pacchetti software, utilizzati, al *pre-processing* ed alla classificazione dei dati, alle verifiche di accuratezza geometrica e tematica, alla produzione delle mappe di LULC ed alle procedure GIS si rimanda a Fichera et al. (2011).

I suddetti risultati hanno costituito la base per una serie di sviluppi nell'ambito di tale attività di ricerca, il cui obiettivo è il proseguimento e l'approfondimento delle analisi già svolte per il periodo 1954÷2004, lavorando ad una scala di maggior dettaglio ed ampliando l'intervallo temporale. A tal fine, sono state elaborate due nuove immagini satellitari ad alta risoluzione geometrica e spettrale: una scena QuickBird (Maggio 2005) ed una scena WorldView-2 (Giugno 2010), le cui caratteristiche principali sono riportate nella Tabella 1.

Satellite	Data acquisizione	Risoluzione geometrica	Informazioni
QuickBird	01/05/2005	2,40 m (Mul.)	Multispettrale 4 bande (R, G, B, NIR) - Level 2A
WorldView-2	29/06/2010	2,0 m (Mul.)	Multispettrale 8 bande (Coastal, B, G, Y, R, Red Edge, NIR1, NIR2) - Level 3D

Tabella 1 – Caratteristiche principali delle immagini ad alta risoluzione utilizzate.

Di particolare rilievo è l'utilizzo di dati acquisiti dal satellite Worldview-2. Lanciato nell'ottobre 2009, esso acquisisce immagini multispettrali ad 8 bande con risoluzione di 1,8 m ed immagini pancromatiche con risoluzione di 46 cm (commercializzate con la risoluzione di 50 cm nel pancromatico e 2 m nel multispettrale). La particolarità di WorldView-2 (Updike & Comp, 2010) sta nell'essere il primo satellite commerciale ad alta risoluzione in grado di acquisire, oltre alle quattro tipiche bande Blu, Verde, Rosso ed Infrarosso Vicino (B,G,R,NIR), altre quattro bande multispettrali: la *Coastal Band* (400 - 450 nm), la *Yellow Band* (585 - 625 nm), la *Red Edge Band* (705 - 745 nm) ed una ulteriore *Near Infrared Band* (NIR2, 860 - 1040 nm) (Figura 3).

Dalla classificazione delle immagini QuickBird e WorldView-2 (approccio *supervised*, algoritmo *Maximum Likelihood*) sono state prodotte due mappe di LULC più dettagliate ed aggiornate (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), nelle quali si è - in seguito - provveduto ad una sintesi delle classi di copertura del suolo, in modo da renderle comparabili con le analoghe mappe prodotte per l'intervallo 1954÷2004 e, soprattutto, per focalizzarsi sulla analisi dell'espansione dell'urbanizzato nell'area di studio.

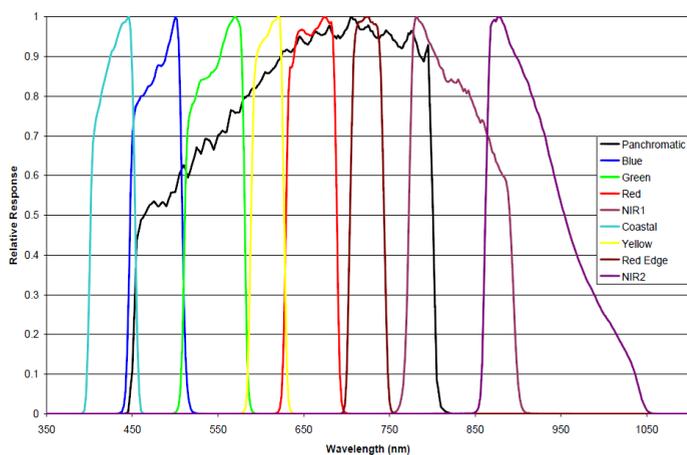


Figura 3 – Risposta spettrale (nm) delle bande del Satellite WorldView-2 (Fonte: DigitalGlobe).

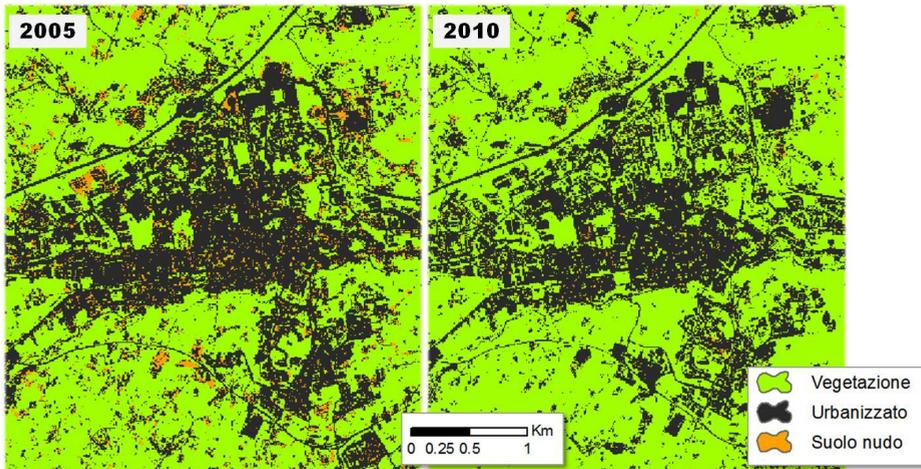


Figura 4 –Mappe sintetiche di LULC per il 2005 (a sinistra) ed il 2010 (a destra).

Successivamente, sempre per le scene ad alta risoluzione del 2005 ed il 2010 è stato calcolato l'indice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) [1] (Rouse et al., 1973):

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad [1]$$

Tra i vari indici utilizzati per avere informazioni riguardanti la distribuzione spaziale della vegetazione ed il suo monitoraggio, l'NDVI è quello più comunemente usato. Non secondariamente per le sue caratteristiche di stabilità, al fine di condurre confronti temporali, sia stagionali sia annuali, sulla fenologia della vegetazione. Uno dei suoi punti di forza, comune peraltro a tutti gli indici derivati in modo analogo, è proprio legato alla procedura di calcolo attraverso il rapporto tra bande che comporta la riduzione di alcune componenti peggiorative del segnale con effetto moltiplicativo (differenza di illuminazione dei versanti, ombre dovute alla nuvolosità, attenuazione atmosferica, ecc.) presenti in molteplici bande (Huete et al., 2002).

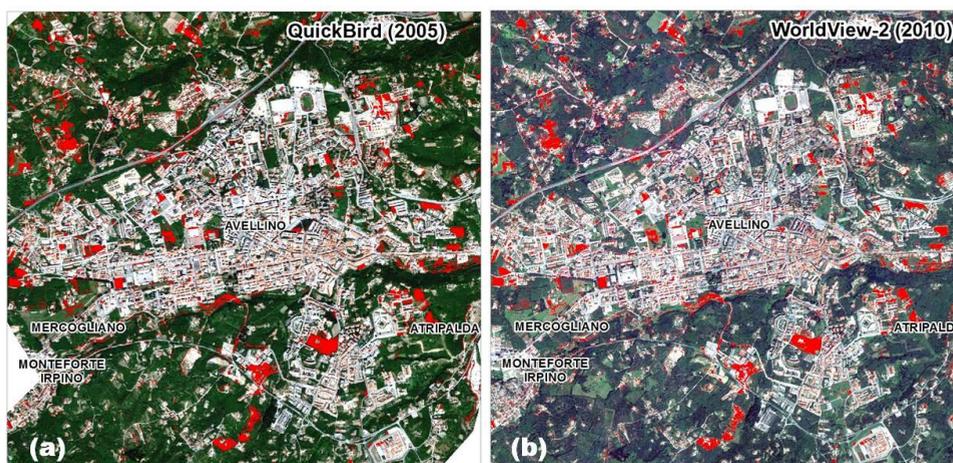


Figura 5 – Variazione dell'NDVI tra il 2005 ed il 2010 (in rosso) sovrapposta alle immagini utilizzate. La variazione indica la trasformazione da copertura vegetata a urbanizzato o suolo nudo. Per la discriminazione successiva della copertura vegetale e dell'impronta dell'urbanizzato, è stata, pertanto, implementata una procedura (Borel, 2010) basata sul confronto dei valori di NDVI relativi alle scene satellitari del 2005 e del 2010 e sull'integrazione di questi ultimi con i risultati della classificazione delle immagini di riferimento. Questa analisi ha permesso di evidenziare le zone rurali nei dintorni dell'area urbana che, negli ultimi anni, hanno subito una trasformazione: si tratta, per lo più, delle cosiddette aree urbanizzate di "frangia", di interfaccia tra lo spazio urbano e rurale (Antrop, 2000; Vizzari, 2011) o a porzioni intercluse in coperture urbane già esistenti (Figura 5). Infine, per analizzare l'impatto dello sviluppo urbano nei confronti delle aree naturali e coltivate presenti nell'intorno del centro abitato di Avellino, è stata utilizzato l'applicativo "Urban Landscape Analysis Tool" (ULAT, <http://clear.uconn.edu/tools/ugat/index.htm>), disponibile come estensione di ESRI ArcGIS. L'applicativo ULAT (Parent, 2009), prendendo in input le summenzionate Mappe di LULC multitemporali, ha consentito di classificare l'area urbanizzata in esame in base allo sviluppo temporale nonché ad altre metriche come la densità e l'aggregazione delle classi di copertura del suolo ottenute dalla classificazione delle immagini satellitari ad alta risoluzione.

Le metriche del paesaggio (*Landscape Metrics*)

Il paesaggio, in accordo con la Convenzione Europea sul Paesaggio (COE, 2000) è una entità viva e dinamica ed una delle maggiori sfide per chi voglia studiarlo ed analizzarlo sta nel quantificarne e comprenderne le dinamiche spaziali e temporali nonché le tendenze che esso mostra. A tal fine, le metriche del paesaggio (*Landscape Metrics*) rappresentano un valido strumento a supporto delle attività di pianificazione e monitoraggio del territorio (Cushman & McGarigal, 2008). In tal senso, il paesaggio è considerato da un punto di vista spaziale come un insieme composto di elementi superficiali (*patch*) categorizzati in base alla tipologia di LULC. La *patch* rappresenta, pertanto, l'unità spaziale fondamentale con cui è possibile descrivere la struttura e la composizione (*pattern*) del paesaggio, nonché valutare l'omogeneità o la diversità tra *patch* limitrofe (Forman, 1995).

Al fine di valutare e comprendere le dinamiche spazio-temporali dei LULC, si sono utilizzate le mappe tematiche prodotte mediante le procedure precedentemente descritte (risoluzione spaziale di 30 m per le mappe di LULC dal 1954 al 2004; 2,40 m per quelle del 2005 e 2010). Per come già analizzate per i precedenti periodi temporali (Fichera et al., 2011-b e 2011-c), facendo ricorso al pacchetto software FRAGSTATS 3.3 (McGarigal et al., 2002), sono state selezionate e calcolate le seguenti metriche: *Patch Density* (PD); *Largest Patch Index* (LPI); *Contagion* (CONTAG); *Simpson Diversity Index* (SIDI). Ricorrendo all'approccio di tipo "Landscape-level", le metriche in FRAGSTATS sono calcolate ed integrate su tutti i tipi di *patch* o classi e sulla intera estensione del

paesaggio. Queste metriche possono essere interpretate, in senso più ampio, come indici di eterogeneità del paesaggio, perché misurano la sua struttura complessiva.

La metrica PD fornisce una misura estensiva della suddivisione o della frammentazione delle tipologie di *patch*. In particolare, dall'analisi di PD [2] è possibile avere informazioni circa l'interazione tra lo sviluppo delle aree urbane (*urban sprawl*) e la frammentazione delle aree rurali. Essa consente di mettere in evidenza i processi di frammentazione del territorio (Botequilha Leitão et al., 2006) e viene utilizzata quando si effettuano confronti tra le caratteristiche del paesaggio in periodi temporali differenti:

$$PD = \frac{n_i}{A} \cdot 10000 \cdot 100 \quad [2]$$

dove:

n_i = numero di patch per ciascuna classe i ;

A = Area di analisi.

La metrica LPI [3], invece, fornisce una misura della preponderanza di una certa tipologia di LULC e viene utilizzata per una analisi congiunta con la precedente PD:

$$LPI = \frac{\max(a_{ij})}{A} \cdot 100 \quad [3]$$

dove:

a_{ij} = area in m² della patch ij .

CONTAG [4] fornisce una misura del grado di distribuzione spaziale di ciascuna tipologia di classe, tenendo conto se le *patch* si presentano raggruppate o disperse in parecchi frammenti di piccole dimensioni. Inoltre, descrivendo la "tessitura" del territorio analizzato, questo indice è utilizzato per confrontare da un punto di vista spazio-temporale le dinamiche del territorio nei periodi considerati (McGarigal & Marks, 1995; Botequilha Leitão et al., 2006):

$$CONTAG = \left[1 + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \left[P_i \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right] \cdot \left[\ln(P_i) \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right]}{2 \ln(m)} \right] \cdot 100 \quad [4]$$

dove:

P_i = porzione di territorio occupata dalla classe i -esima;

g_{ik} = numero di contiguità tra pixel delle classi i e k ;

m = numero di classi presenti nell'area di analisi.

Infine, la metrica SIDI [5] (Simpson, 1949) è spesso utilizzata in analisi di questo tipo per fornire una descrizione della eterogeneità di *patch* presenti nel paesaggio esaminato, a seguito di cambiamenti spazio-temporali nella distribuzione delle classi di LULC:

$$SIDI = 1 - \sum_{i=1}^m P_i^2 \quad [5]$$

dove:

m = numero di classi di copertura del suolo;

P_i = porzione di territorio occupata dalla i -esima tipologia di classe.

Per il calcolo delle metriche sull'intera area di interesse, si è fatto ricorso all'approccio a "finestre mobili" (*Moving Window Analysis*, MWA): in ogni finestra viene calcolato il valore di ciascuna metrica ed assegnato al pixel centrale. Le mappe così ottenute mostrano la distribuzione spaziale della struttura e della tessitura delle patch in cui è suddiviso il territorio (Berry, 2001). Di seguito sono riportate le mappe delle metriche CONTAG (Figura 6) e SIDI (Figura 7) calcolate per l'area di studio, mediante il suddetto approccio utilizzando finestre di forma e di dimensioni pari a 10 pixel.

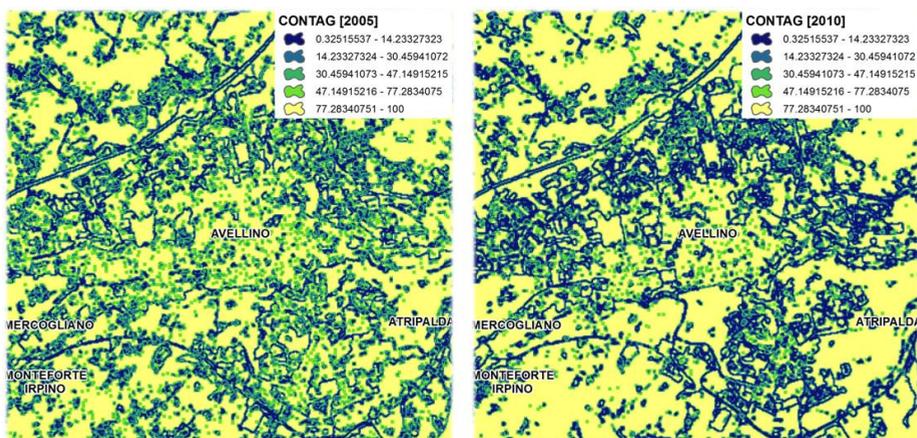


Figura 6 – Metrica CONTAG calcolata con MWA per l'area di interesse.

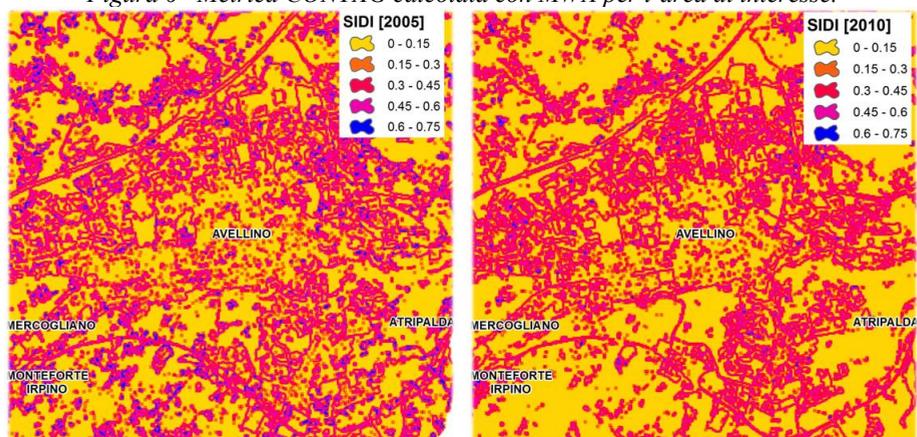


Figura 7 – Metrica SIDI calcolata con MWA per l'area di interesse.

Risultati e discussione

I risultati ottenuti mediante le elaborazioni precedentemente descritte indicano che il processo di urbanizzazione ha sostanzialmente modificato l'uso del suolo nell'area di studio, con una significativa trasformazione nelle tipologie di copertura tra il 1954 ed il 2004, come precedentemente illustrato in Figura 2. La classificazione delle immagini più recenti (2005 e 2010) integrata con l'analisi mediante *landscape metrics* ha, invece, evidenziato una fase di relativa stasi e consolidamento nelle trasformazioni nel LULC. In Figura 8 è riportata la Mappa dei cambiamenti nel LULC avvenuti nel corso del secondo periodo di analisi (2005-2010).

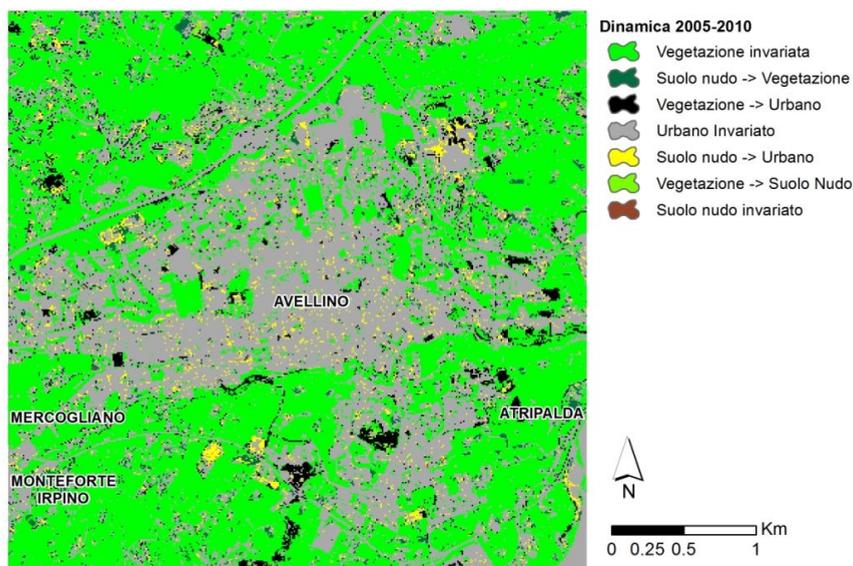


Figura 8 – Mappa dei cambiamenti nel LULC nel corso del periodo 2005-2010.

Considerando tutti i risultati ottenuti, il periodo dal 1985 ad oggi è stato caratterizzato soprattutto da una significativa diffusione dell'urbanizzato in aree periferiche rispetto all'insediamento principale di Avellino, per effetto della realizzazione post-sisma di nuovi quartieri residenziali e della nuova area industriale a NE della città. Questo fenomeno ha prodotto ulteriore "attrito" (*attrition*) tra le aree urbanizzate in espansione e le residue zone agricole intorno alla città, con un ulteriore consumo di suolo a discapito delle aree rurali. Queste ultime rappresentavano un tempo la classe di LULC più ampia, con una maggiore concentrazione nell'area pianeggiante al centro della Conca di Avellino e non poche compenetrazioni nelle aree urbane della zona. Una conferma di questa perdita di suolo agricolo si può ricavare indirettamente anche dai dati contenuti nei Censimenti Generali dell'Agricoltura dell'ISTAT (1990 e 2000): le coltivazioni permanenti ed i seminativi hanno registrato nel decennio un decremento pari al 13% ed al 55%, rispettivamente (Figura 9).

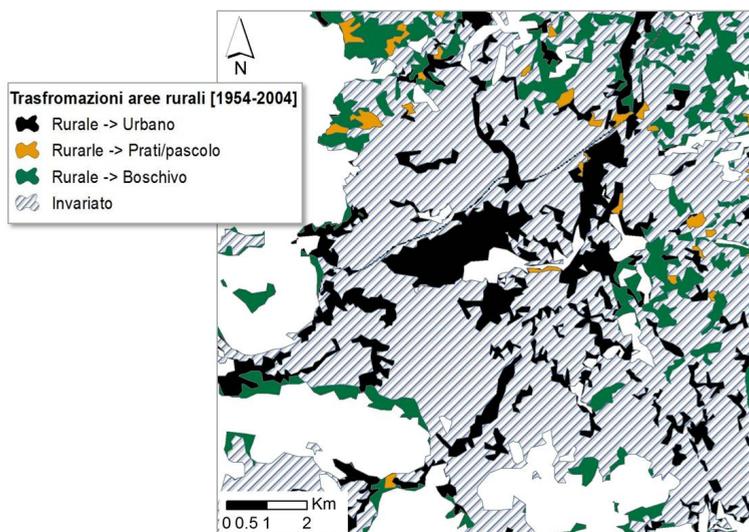


Figura 9 – Dinamiche di trasformazione delle aree rurali nel cinquantennio 1954-2004.

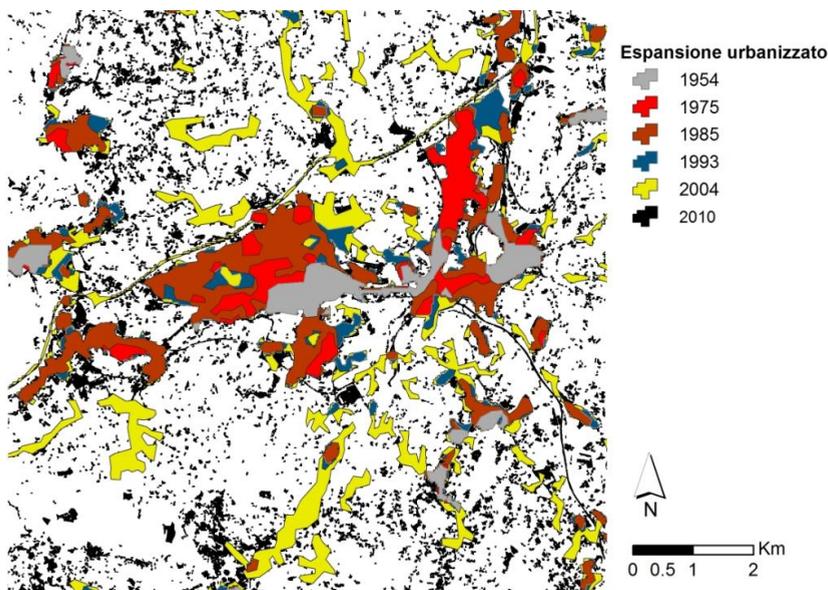


Figura 10 – Espansione dell'urbanizzato nella Conca di Avellino nel periodo 1954÷2010.

L'urbanizzato rappresenta, invece, la tipologia di LULC col maggior tasso di crescita nell'ultimo cinquantennio (Figura 10): in particolare, il maggior incremento si è registrato proprio nel periodo successivo al 1985, in coincidenza col processo di ricostruzione avviato dopo il terremoto. Più in dettaglio, questo tipo di trasformazioni può essere spiegato osservando che la vicinanza di Avellino ad altri centri abitati di medie dimensioni (soprattutto Atripalda, Mercogliano e Monteforte Irpino, cittadine con più di 10.000 abitanti) ha di fatto dato luogo ad un continuum urbano tra il capoluogo e gli insediamenti limitrofi.

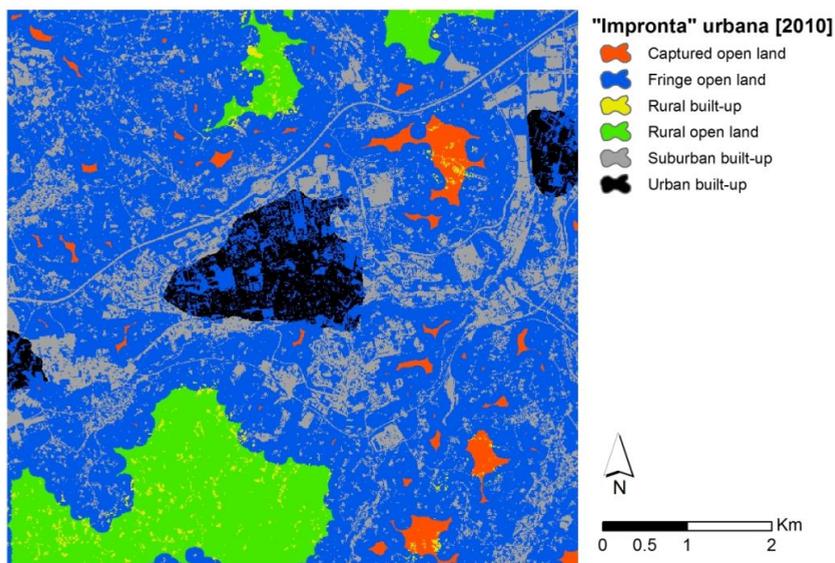


Figura 11 – Struttura dell'urbanizzato nell'area di studio (2010).

Questa interazione, favorita dalla presenza di importanti arterie di comunicazione (A16 e S.S.7bis) ha contribuito al processo di *urban sprawl* che ha interessato l'area e i cui effetti sono stati evidenziati dall'analisi condotta mediante le metriche del paesaggio e le analisi spaziali di tipo GIS. In particolare, analizzando le mappe tematiche prodotte mediante l'applicativo ULAT per il periodo 2005-2010 (Figura 11) è possibile riscontrare la frammentazione del territorio naturale (*open land*) per effetto della recente edificazione in area suburbane (*suburban built-up*). Questo processo espansivo, si è verificato ovviamente a spese delle aree naturali o coltivate, come precedentemente evidenziato.

Un altro fattore che influisce sull'espansione urbana è la dinamica demografica (Bhatta, 2009). È possibile confrontare l'estensione superficiale delle aree urbane con i dati statistici della popolazione, individuando una relazione tra l'espansione spaziale delle città e le dinamiche di incremento e decremento degli abitanti. Considerando, pertanto, i dati ISTAT l'intera area della Conca di Avellino, si osserva un incremento della popolazione del 14% tra il 1971 ed il 2001 (ultimo Censimento ISTAT al momento disponibile), mentre la copertura del suolo urbanizzato ha registrato un incremento del 75% tra il 1975 ed il 2004 (periodo di analisi tramite mappe di LULC più prossimo al dato censuario summenzionato). Se, invece, si restringe tale analisi alla sola area circostante Avellino, la spinta della crescita della popolazione è più evidente: gli abitanti erano 36.965 nel 1951, 41.825 nel 1961, 52.382 nel 1971, 56.862 nel 1981. Poi, tra il 1981 ed il 2001 si osserva un trend discendente (55.662 abitanti nel 1991 e 52.703 nel 2001), dovuto al trasferimento di molte persone dal capoluogo ai comuni limitrofi, i quali hanno registrato un incremento della popolazione: ad esempio, Mercogliano e Monteforte Irpino hanno avuto negli ultimi anni tassi di crescita maggiori rispetto ad Avellino.

L'espansione delle aree urbane è anche connessa alla crescita economica (Almeida et al., 2005), dal momento che è possibile mettere in relazione l'espansione delle aree urbane con il numero totale delle persone che lavorano in una zona (dal cui incremento discende la richiesta di nuove abitazioni e quindi la trasformazione di aree). Incrociando il dato dei lavoratori (ricavato dai Censimenti ISTAT dell'Industria e dei Servizi 1971, 1981, 1991 e - ultimo disponibile - 2001) con lo strato informativo dell'espansione urbana, emerge come i due fenomeni abbiano manifestato tassi di crescita simili. In questo quadro complessivo di trasformazioni, non è certamente estranea la

spinta fornita dalle leggi varate dopo il sisma dell'80, che hanno rappresentato la cornice normativa all'interno della quale sono stati prodotti gli strumenti urbanistici del P.I.C.A. e del P.U.C. Questi hanno fornito le indicazioni sulle nuove aree da destinare ad uso residenziale, artigianale o industriale.

Conclusioni e sviluppi futuri

Il presente articolo fornisce la descrizione di una parte specifica di una più ampia linea di ricerca, riguardante l'analisi e la comprensione dei fenomeni di trasformazione del territorio nelle aree di frangia urbano-rurale. I risultati qui ottenuti confermano la capacità delle tecniche di TLR di fornire strumenti utili ed efficaci per comprendere le dinamiche del cambiamento nell'uso del suolo, mediante dettagliate analisi spazio-temporali. Inoltre, il ricorso alle metriche del paesaggio ha consentito di mettere in evidenza determinati processi di trasformazione del territorio. In questo senso, il ricorso integrato alle suddette tecniche si dimostra di fondamentale importanza nel fornire supporto alle politiche di pianificazione, gestione e monitoraggio del territorio, specie quando si voglia tener conto di uno sviluppo sostenibile dello stesso (Zhang & Guindon, 2006). Infine, la tecnologia GIS ha permesso di gestire in modo integrato le informazioni spaziali dell'area di interesse, costituendo altresì la base per strumenti di verifica dell'efficacia delle politiche di pianificazione nonché per la previsione dei trend futuri di trasformazione (Hardin et al., 2007).

Ringraziamenti

Si ringrazia la DigitalGlobe Inc. (<http://www.digitalglobe.com>) per aver gentilmente fornito nell'ambito dell'iniziativa "DigitalGlobe 8-Band Research Challenge" la scena WorldView-2 di Avellino utilizzata nel corso delle attività di ricerca qui descritte.

Bibliografia e riferimenti

- Almeida, C.M., Monteiro, A.M.V., Mara, G., Soares-Filho, B.S., Cerquera, G.C., Pennachin, C.S.L. & Batty, M. (2005) GIS and remote sensing as tools for the simulation of urban land-use change. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 759-774.
- Antrop, M. (2002), Changing patterns in the urbanized countryside of Western Europe, *Landscape Ecology*, 15(3), 257-270.
- Antrop, M. (2004), Landscape change and the urbanization process in Europe, *Landscape and Urban Planning*, 67, 9-26.
- Berry, J.K. (2001), Map analysis. Procedures and applications in GIS modelling. <http://www.innovativegis.com/basis/MapAnalysis/Topic9/Topic9.htm>,
- Bhatta, B. (2009), Analysis of urban growth pattern using remote sensing and GIS: a case study of Kolkata, India. *International Journal of Remote Sensing*, 30:18, 4733-4746.
- Borel C.C. (2010), Vegetative canopy parameter retrieval using 8-band data. *DigitalGlobe 8-Band Research Challenge*
- Botequilha Leitão, A., Miller, J., Ahern, J. & McGarigal, K. (2006), Measuring Landscapes: A Planner's Handbook. Island Press, Washington DC
- Council of Europe (COE) (2000), European Landscape Convention., Florence, 20.X.2000. (<http://conventions.coe.int/Treaty/EN/Treaties/Html/176.htm>).
- Cushman, S.A. & K. McGarigal, M.C. Neel (2008), Parsimony in landscape metrics: Strength, universality, and consistency, *Ecological Indicators*, 8, 691-703.
- Dewan, A. M. & Yamaguchi, Y. (2009), Using remote sensing and GIS to detect and monitor land use and land cover change in Dhaka Metropolitan of Bangladesh during 1960-2005, *Environ. Monit. Assess.* 150, 237-249.
- EEA (European Environment Agency) (2006), Urban sprawl in Europe: The ignored challenge. *EEA Report No. 10/2006*, Copenhagen, Denmark,
- Fichera C. R., Modica, G. & Pollino, M. (2010), Characterizing land cover change using multi-temporal remote sensed imagery and landscape metrics. In: Las Casas, G., Pontrandolfi, P.,

- Murgante, B. (Eds.), *Informatica e Pianificazione Urbana e Territoriale - Atti della Sesta Conferenza Nazionale INPUT 2010*, Potenza, 2010.
- Fichera C. R., Modica, G. & Pollino, M. (2011-a), GIS and Remote Sensing to Study Urban-Rural Transformation During a Fifty-Year Period. In: B. Murgante *et al.* (Eds.), *ICCSA 2011, Part I, LNCS 6782*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 237-252.
- Fichera C. R., Modica, G. & Pollino, M. (2011-b), Integration of satellite Remote Sensing techniques and landscape metrics to characterize land cover change and dynamics. In (eds. G. Borruso, S. Bertazzon, A. Favretto, B. Murgante & C. M. Torre) "Geographic Information Analysis for Sustainable Development and Economic Planning: New Technologies", IGI Global, *in press*
- Fichera C. R., Modica, G. & Pollino, M. (2011-c), Land Cover classification and change-detection analysis using multi-temporal remote sensed imagery and landscape metrics, *Italian Journal of Remote Sensing*, *in press*
- Forman, R.T.T. (1995) *Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions*. Cambridge University Press, Cambridge, UK
- Hardin, P.J., Jackson, M.W. & Otterstrom, S.M. (2007), Mapping, Measuring, and Modeling Urban Growth. In: Jensen, R.R., Gatrell, J.D., McLean, D. (eds.) *Geo-Spatial Technologies in Urban Environments*. Springer Berlin Heidelberg
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X., & Ferreira, L.G. (2002), Overview of the Radiometric and Biophysical Performance of the MODIS Vegetation Indices. *Remote Sensing of Environment*, 83: 195-213
- McGarigal, K. & Marks, B.J. (1995), FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. USDA, Forest Service, Pacific Northwest Research Station
- McGarigal, K., S.A. Cushman, M.C. Neel & Ene, E. (2002), FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for categorical maps. *Computer software program produced by the authors* [<http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>]
- Murgante, B. & M. Danese (2001), Urban versus Rural: the decrease of agricultural areas and the development of urban zones analyzed with spatial statistics. *International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems*, 2 (2): 16-28
- Parent J.R. (2009), Urban Landscape Analysis Tool. <http://clear.uconn.edu/tools/ugat/index.htm>
- Petit, C. C. & Lambin, E. F. (2001) Integration of multi-source remote sensing data for land cover change detection. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, 15: 8, 785-803.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., & Deering D.W. (1973), Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of the Third ERTS Symposium (1973)*. Washington D.C., NASA SP-351: 309-317
- Simpson, E.H. (1949), Measurement of diversity. *Nature*, 163-688
- Singh, A. (1989), Digital Change Detection Techniques using Remotely Sensed Data. *Int. J. Remote Sens.*, 10, 989-1003.
- Updike T., Comp C. (2010), Radiometric use of WorldView-2 imagery. Technical Note, DigitalGlobe Inc.
- Vizzari, M. (2011), Spatial modelling of potential landscape quality. *Appl. Geogr.* 31 (1), 108-118
- Zhang, Y. & Guindon, B. (2006) Using satellite remote sensing to survey transport-related urban sustainability: Part 1: Methodologies for indicator quantification. *Int. J. Appl. Earth Obs.* 2006, 8(3), 149-164.