Un'approccio ibrido per la mappatura dell'evoluzione urbana in provincia di Milano

Paolo Villa (*,**), Mirco Boschetti (*), Fabio Bianchini (***), Francesca Cella (***)

(*) CNR-Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente (IREA), via Bassini 15, 20133, Milano, tel: 02.23699456, fax: 02.23699300, email: villa.p@irea.cnr.it
(**) Imaginair – Remote Sensing Solutions, c/o LTDA-DISAT, Università di Milano Bicocca
(***) Centro Studi PIM, via D. Manin 2, 20121, Milano, tel: 02.6311901, fax: 02.653954, www.pim.mi.it

Riassunto
Le tecniche di telerilevamento si sono dimostrate, soprattutto nell'ultimo decennio, uno strumento efficace per lo studio delle aree urbane, al punto che l'integrazione di tali metodi e tecniche con altri dati, cartografici e tematici, è ormai di grande aiuto nella gestione dell'ambiente urbano, soprattutto per gli amministratori e i pianificatori territoriali. Questo lavoro è incentrato sulla mappatura del suolo occupato da superfici artificiali in provincia di Milano, tramite l'uso di dati satellitari a media risoluzione, nel periodo dal 1989 al 2008 (dati SPOT4 HRVIR e Landsat5 TM). La metodologia applicata si basa su un approccio ibrido ed è suddivisa in tre passi. Il primo sfrutta la classificazione pixel-based tramite albero binario supervisionato che, partendo dal dato spettrale e da indici normalizzati, suddivide il territorio in dieci classi di copertura. Il secondo passo filtra i risultati della classificazione pixel-based con la mascheratura dei terreni agricoli (vegetati e non) realizzata a oggetti. Il terzo passo raggruppa le classi in due macro-classi, suddividendo il territorio provinciale in suolo occupato e suolo non occupato, e comprende anche un filtraggio dei risultati tramite post-classificazione e rifinitura da esperto, per giungere alle mappe finali per le tre date analizzate: 1989, 1998 e 2008. Le mappe tematiche risultanti sono infine state validate, dimostrando una buona accuratezza, superiore all'87% per il prodotto realizzato in modo automatico e al 93% per il prodotto rifinito tramite fotointerpretazione.

Abstract
Remotely sensed data and related processing techniques have proven an effective tool for urban areas study, so that the integration of such products with other cartographic and thematic mapping products can help the management of the urban environment and ease the work of policy makers in city planning and administration. The focus of this work is on the topic of urban areas mapping over province administrative unit of Milan, Italy, using mid-resolution remote sensing data covering the years from 1989 to 2008 (SPOT4 HRVIR and Landsat5 TM data). The methodology applied consisted of three main steps; the first step exploits a pixel-based binary cascade thresholding of spectral bands and spectral indexes, which resulted in a 10 classes land cover map comprising both urban and non urban features. The second step filters the pixel-based urban maps using an object-base approach to map agricultural cover features as vegetated and bare fields. The third step involves the joining of land cover classes into two main classes: urbanized and non urbanized surfaces, and a final polishing of results made with expert knowledge visual interpretation of both satellite images and ancillary vector data, resulting in the final urban maps for the three years investigated: 1989, 1998, 2008. Final derived urban maps have been validated and demonstrated to provide good accuracy, with Overall Accuracy higher than 87% for automatically derived products and higher than 93% for expert refined products.

Introduzione

Il tema del consumo di suolo è oggi di grande attualità. L'avvento di un nuovo modello di sviluppo della città e del territorio ha aumentato in modo sensibile la quantità di suolo utilizzato, cioè, trasformato artificialmente, per usi insediativi, residenziali e non. Si tratta di un fenomeno presente in molte aree europee, il cosiddetto urban sprawl, che tende a saldare aree urbane e metropolitane con aree di diffusione insediativa già presenti e oggi in ulteriore dilatazione.

Il Centro Studi per la Programmazione Intercomunale dell'area Metropolitana (PIM), nell'ambito di ricerche per la Provincia di Milano, ha rilevato come la dinamica storica dell'occupazione di suolo e dei principali indicatori socio-economici mostra il progressivo processo di saturazione dell'area centrale e la successiva diffusione della crescita. Tale crescita si è svolta dapprima lungo le fasce di periferia e le direttrici storiche di comunicazione, per poi allargarsi a cerchi concentrici, sempre più radi quanto a densità insediativa, ingoiando così gli spazi aperti circostanti e determinando la frammentazione di quelli più distanti. Questa tendenza è confermata dalla diminuzione di popolazione residente e addetti all'industria e dal progressivo rafforzamento terziario dell'area centrale, seguita dalla crescente urbanizzazione di nuove aree lungo le principali direttrici di trasporto (Centro Studi PIM, 2009).

Con l'inizio del nuovo secolo, la crescita delle aree urbanizzate ha registrato un significativo rallentamento, mentre all'interno del territorio già urbanizzato si sono progressivamente ampliati i processi di recupero e le potenzialità d'intervento connesse ai fenomeni di dismissione, alle quali inizia a corrispondere una sempre maggior pressione e un conseguente ulteriore consumo di suolo negli ambiti esterni al limite meridionale della provincia, quasi a compensare la carenza di aree libere del nord Milano e le continue richieste di modifiche del perimetro del Parco Regionale Sud Milano, spostando così il conflitto ai margini del territorio provinciale.

Alla luce della sempre maggior dilatazione dello spazio urbano è ragionevolmente prevedibile che l'area metropolitana si troverà a dover fare i conti, per un periodo non certo breve, con il permanere del fenomeno di crescita urbana e quindi col perdurare di una situazione di conflittualità ambientale, per effetto di maggiori carichi insediativi e di un più intenso consumo di risorse naturali, in una realtà che appare oggi già fortemente compromessa. Con un ulteriore incremento della componente urbanizzata, oggi al 35% ma passibile di un aumento fino al 42%, si rischierebbe di perdere le residue qualità ambientali del territorio provinciale. In tale scenario, ci si troverebbe in presenza di un paesaggio urbano ulteriormente omologato, un territorio di flussi a doppia velocità, ben connesso alle reti del trasporto globale (alta velocità, aeroporti), ma gravemente congestionato al suo interno,; un territorio caratterizzato da elevati tassi di inquinamento e poco attrattivo, in cui abitare non rappresenta una scelta, ma unicamente una necessità.

Se il consumo di suolo è un concetto relativamente nuovo nella nostra cultura, molti degli strumenti che si stanno affermando come risposta al problema sono quelli storici dell'urbanistica tradizionale e della tutela/progettazione del paesaggio: una efficiente organizzazione urbana e infrastrutturale, un rapporto equilibrato fra uso di tecnologie innovative e strutture e spazi preesistenti, un approccio complesso che tenga in conto non solo le questioni puntuali (l'abitazione, i trasporti, la produzione, l'economia ecc.), ma anche del loro comporsi in una serie di comportamenti sociali che possono condurre a consumare sempre maggiori quantità di spazio.

Nel territorio milanese, il calcolo del consumo di suolo è stato praticato con tecniche che si sono profondamente evolute dagli anni '60, quando è stato istituito il primo Piano Intercomunale Milanese, ad oggi. Si è passati in pochi decenni da tecniche manuali, imprecise e soggette a frequenti errori accidentali, a tecniche automatizzate caratterizzate da una sistematica accuratezza. Nelle prime stime del consumo di suolo il metodo di attribuzione delle quantità di urbanizzazione era basato, attraverso un sistema di coordinate, su una griglia di suddivisione del territorio in celle di un chilometro di lato, che permetteva la misurazione manuale dell'area di una figura piana disegnata in scala.

Dalla fine degli anni '80 sono comparsi i Sistemi Informativi Territoriali, che rappresentano ancora oggi un strumento di riferimento per le Amministrazioni Comunali e per i professionisti per la pianificazione. Il MISURC, Mosaicatura Informatizzata degli Strumenti Urbanistici Comunali, realiz-

zato dal Centro Studi PIM mettendo a punto proprie metodologie e procedure è oggi divenuto standard regionale. Il MISURC rappresenta in forma omogenea i contenuti dei differenti Piani Regolatori Generali, divenuti poi Piani di Governo del Territorio, per mezzo di una legenda sintetica e unificata, che raggruppa azzonamenti e vincoli riportati dai singoli piani comunali. L'utilizzo di questi sistemi ha permesso di effettuare numerose elaborazioni, fra cui il calcolo di superfici dei diversi azzonamenti da PRG/PGT del territorio.
Con questa ricerca, in sinergia con le tradizionali analisi effettuate su dati MISURC, è stata avviata un'attività di mappatura del suolo urbanizzato fornendo prodotti che prescindono dalle tradizionali destinazioni funzionali, proprie degli strumenti urbanistici comunali. Il risultato dell'analisi è la produzione in maniera semiatuomatica e speditiva di tre cartografie digitali descriventi il Suolo Occupato da superfici artificiali per la Provincia di Milano per gli anni 1989, 1998 e 2008, tramite l'utilizzo di dati satellitari a media risoluzione geometrica e tecniche di trattamento di dati telerilevati. In questo studio per "Suolo Occupato" si intende la parte di territorio caratterizzata dalla copertura di superfici artificiali (strade, edifici, capannoni, etc.) e aree in trasformazione (cantieri), che impegnino l'area corrispondente al pixel nell'immagine satellitare in modo totale o parziale. In questo senso, il concetto di suolo occupato va a sovrapporsi a quelli di impermeabilizzazione e di consumo di suolo urbano, fornendo – come già indicato - un'indicazione preziosa per lo studio dell'urbanizzazione in Provincia di Milano.

Dataset e pre-processamento
Per la realizzazione di questo studio sono state identificate le seguenti fonti di dati: Immagini del sensore Landsat TM5 per la mappatura di fine anni 80, immagini SPOT 4 per l'analisi degli step temporali relativi alla fine anni '90 e alla situazione attuale. Il dataset è così composto da 1 immagine satellitare Landsat 5 TM per 1989, di 2 immagini satellitari SPOT 4 HRVIR per il 1998 e di 4 immagini satellitari SPOT 4 HRVIR per il 2008; come dati di appoggio sono stati inoltre utilizzati il prodotto di cartografia tematica regionale denominato DUSAF 2000 (elaborato da foto aeree degli anni 1998-99), oltre a un'immagine supplementare del sensore Landsat TM5 per l'analisi di un'area provinciale coperta da alcune piccole nubi nella scena del 1989.

Satellite E Sensore (level)	Anno 1989-90 (scena – data)	Anno 1998 (scena – data)	Anno 2008 (scena – data)
Landsat5 TM (level 1A)	SCENE 1: 194-28 – 31/08/1989 SCENE 2: 194-28 – 12/04/1990 (*)		
SPOT4 HRVIR (level 2A)		SCENE 3: 056-258 – 10/05/1998 SCENE 4: 057-259 – 10/05/1998	SCENE 5: 056-259 – 01/04/2008 SCENE 6: 057-258 – 24/08/2008 SCENE 7: 056-258/2 - 01/04/2008 SCENE 8: 057-259 – 19/08/2008

(*) I dati del 1990 sono stati utilizzati solo in corrispondenza di copertura nuvolosa sul dato del 1989

Figura 1 – Tabella descrittiva dei dati satellitari utilizzati nello studio

Il processamento preliminare dei dati satellitari ha compreso la georeferenziazione delle immagini nel sistema di riferimento Gauss-Boaga, la calibrazione radiometrica e la correzione dell'effetto atmosferico, la normalizzazione radiometrica e la mosaicatura delle scene SPOT 4 HRVIR. La georeferenziazione dei dati satellitari è stata realizzata prendendo come riferimento cartografico la base DUSAF 2000 (RMSE<0,5 pixel). Il modello atmosferico utilizzato per correzione e conversione dei dati è il MODTRAN-4, che implementa la modellazione teorica delle condizioni troposferiche e stagionali e dell'effetto di adiacenza (Berk *et al.*, 1999).
Sul dato atmosfericamente corretto, al fine di uniformare in modo più efficace possibile dati con stagionalità e caratteristiche di acquisizione differenti, sono state applicate tecniche di normalizzazione radiometrica relativa con selezione manuale degli invarianti radiometrici e regressione lineare sul dato dell'immagine di riferimento (SPOT 056-258/2 del 01/04/2008)

Per i dati SPOT del 1998 e del 2008, che coprono il territorio provinciale in più di un taglio, è stato necessario provvedere alla mosaicatura dei dati normalizzati per i 2 tagli relativi al 1998 e di quella per i 4 tagli relativi al 2008.

Mappatura delle aree urbanizzate

La metodologia adottata per la mappatura delle aree urbanizzate usando dati satellitari a media risoluzione e la loro validazione segue uno schema in tre passi, seguito dalla fase di valutazione dell'accuratezza, come mostra la Figura 2.

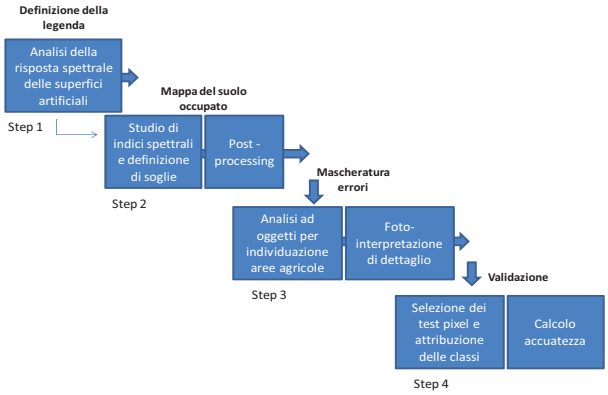


Figura 2 - Diagramma illustrativo della metodologia di mappatura delle aree urbane, suddiviso nei diversi passi descritti nel testo

Il primo passo della metodologia applicata per la mappatura del Suolo Occuapto ha implicato la scelta di aree campione contraddistinte da caratteristiche di copertura del suolo note per un gruppo di 10 classi, suddivise tra classi a copertura naturale (Vegetazione e Suolo nudo) e classi a copertura artificiale, oltre alle aree coperte da Specchi d'acqua. Tale suddivisione è quella spesso adottata come standard nelle analisi di classificazione da telerilevamento in ambito urbano (Huete, Jackson, 1987), ed è stata qui utilizzata come primo approccio nello studio dell'occupazione di suolo sulla provincia di Milano. Nel dettaglio, le 10 classi considerate sono:

1. **Vegetazione**
   - 1.1. Vegetazione altamente riflettente
   - 1.2. Vegetazione poco riflettente
2. **Suolo nudo**
   - 2.1. Suolo nudo altamente riflettente
   - 2.2. Suolo nudo poco riflettente
   - 2.3. Suolo umido
3. **Coperture artificiali**
   - 3.1. Coperture industriali altamente riflettenti
   - 3.2. Coperture industriali poco riflettenti
   - 3.3. Urbanizzato denso
   - 3.4. Urbanizzato residenziale sparso
4. **Specchi d'acqua**

Dall'analisi delle caratteristiche statistiche della risposta delle differenti superfici sono state ricavate le soglie di separabilità per le 10 classi di copertura, quindi raggruppate nelle tre fondamentali nell'interesse dello studio: Suolo Occupato (Classi 1.1-2.3), Suolo Non Occupato (Classi 3.1-3.4) e Specchi d'Acqua (Classe 4).

L'approccio alla classificazione e alla realizzazione della mappa di Suolo Occupato ha utilizzato una metodologia ad albero decisionale binario, illustrata in Figura 3, che sfrutta – oltre alle caratteristiche spettrali (risposta nella banda del medio infrarosso SWIR) - anche un indice di vegetazione (NDVI), un indice di permeabilità (SVI), la riflettività media (ALB) e il gradiente di risposta radiometrica nelle bande del rosso e del verde (RI).

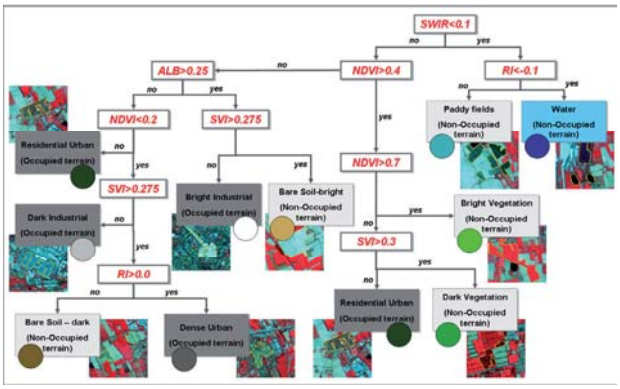


Figura 3 - Schema di classificazione ad albero binario utilizzato per la mappatura della copertura del suolo in ambito provinciale con l'uso del dato spettrale e di indici derivati.

La struttura ad albero decisionale suddivide le classi di copertura del suolo tramite sogliature binare applicate in cascata, effettuate a partire da indici e caratteristiche spettrali come:

- **SWIR** – Riflettività della superficie nelle lunghezze d'onda del medio infrarosso (1,55-1,75 μm, banda 4 SPOT e 5 TM), in grado di discriminare le superfici come l'acqua o le risaie, che hanno risposta molto bassa.
- **NDVI** – Normalized Difference Vegetation Index: un indice di vegetazione che sfrutta le caratteristiche di risposta spettrali tipiche delle superfici vegetate, in grado di distinguerle, per il valore alto dell'indice, dalle alte classi di copertura (Rouse *et al*., 1973).
- **ALB** – albedo parziale: la riflettività media sulle bande spettrali, utile nella distinzione tra classi di copertura in base alla loro riflettività globale.
- **SVI** – Soil and Vegetation Index: un indice di permeabilità utile per meglio discriminare superfici impermeabili da superfici permeabili (Villa, 2007).
- **RI** – gradiente di risposta nelle bande corrispondenti alla luce visibile nelle lunghezze d'onda del rosso (0.63-0.69 μm, banda 2 SPOT e 3 TM) e del verde (0.52-0.60 μm, banda 1 SPOT e 2 TM), impiegato per individuare le superfici con risposta spettrale composta anche parzialmente da vegetazione, come nel caso dei campi agricoli solo in minima parte vegetati o di zone ad urbanizzazione molto sparsa caratterizzare da abbondanza di pixel misti.

L'applicazione della metodologia di classificazione proposta ha avuto come risultato una prima mappatura dell'Occupazione del Suolo a livello provinciale relativa alle tre date. La mappa così ricavata è quella grezza, ed è stata dapprima raffinata tramite *Majority Analysis*, utile a ripulire la mappa da piccoli gruppi di pixel etichettati con una classe non corretta.
Il dato così filtrato (dato FILTERED) è stato quindi post-processato usando maschere che migliorassero in cascata l'accuratezza del risultato finale. E' stata dapprima realizzata un'analisi a oggetti che ha permesso l'identificazione di aree agricole vegetate e non vegetate sui dati SPOT 4 (1998 e 2008), che in alcuni casi generavano situazioni di confusione con le aree effettivamente urbanizzate, in particolar modo in corrispondenza di campi agricoli non vegetati, a volte non distinguibili in modo semplicemente spettrale dalle superfici artificiali (dato AGRI_MASKED).

La metodologia ad oggetti permette infatti di tenere in considerazione non solo le caratteristiche spettrali di una certa superficie, ma anche quelle spaziali, di omogeneità e di forma. I campi agricoli sono caratterizzati da forma e dimensioni medie che li distinguono da altre classi di copertura come, ad esempio, il tessuto urbano sparso (Willhauck, 2000).
Per un ulteriore raffinamento della mappatura del Suolo Occupato (AGRI_MASKED), l'ultimo passo di processamento ha implicato l'intervento dell'esperto allo scopo di eliminare alcune imprecisioni residue sulle aree classificate come non occupate, tramite fotointerpretazione e con l'utilizzo integrato della mappa tematica DUSAF2000 della regione Lombardia, realizzata per fotointerpretazione di ortofoto acquisite tra il 1998 e il 1999 (ERSAF, Regione Lombardia, 2002).
Il risultato di queste operazioni di post-processamento sono le mappe di Suolo Occupato finali (dato FINAL_MASKED) relativa agli anni 1989, 1998 e 2008, illustrate in Figura 4.

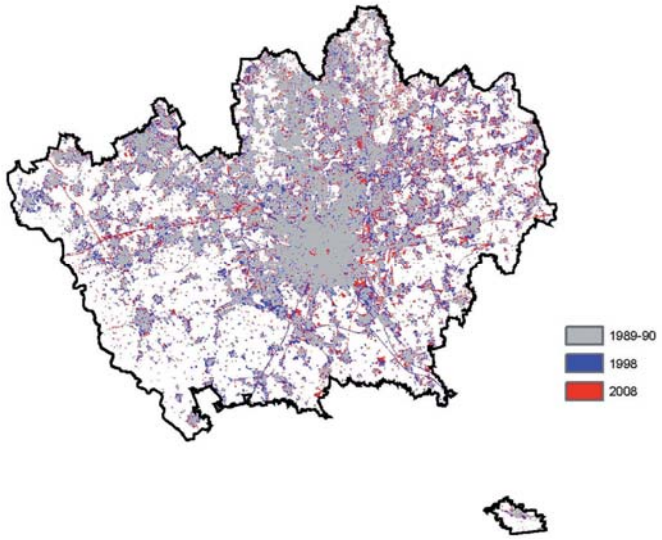


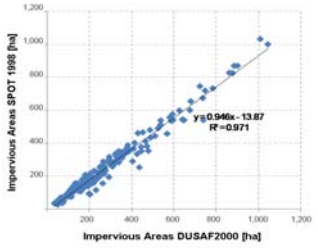
Figura 4 – Mappatura multi-temporale del suolo Occupato/Non Occupato della Provincia di Milano, derivata da immagini satellitari con techinche ibride: aree urbanizzate nel 1989-90 (in grigio), nel 1998 (in blu), nel 2008 (in rosso)

Risultati e discussione
Al fine di valutare l'accuratezza dei risultati raggiunti (Congalton, 1991), per le mappe di suolo occupato derivate dall'analisi sono state calcolate le percentuali di errore confrontando alcune zone campione scelte in maniera casuale (campione random stratificato di 352 pixel) con il risultato della fotointerpretazione eseguita in maniera indipendente dall'operatore. L'accuratezza è stata calcolata sia per il solo risultato dell'applicazione di metodi automatici (dato AGRI_MASKED) sia per il prodotto finale comprendente la rifinitura da esperto (dato FINAL_MASKED), come mostrato dalle statistiche di Figura 5.
L'accuratezza complessiva media dei prodotti di mappatura del Suolo Occupato a livello provinciale, oscilla tra l'87.78% e il 94.60% per le Mappe derivate con metodi esclusivamente automatici e tra il 93.18% e il 94.89% per le Mappe raffinate tramite fotointerpretazione. Le differenze di accuratezza tra le mappe automatiche realizzate per il 1989 e quelle per il 1998 e il 2008 sono principalmente dovute alla stagionalità del dato satellitare utilizzato (estivo il dato per il 1989, primaverile per la maggior estensione quello per il 1998-2008), che incide soprattutto sul contrasto tra suoli agricoli in gran parte vegetati nel periodo estivo e la componente urbanizzata del territorio, mentre l'abbondanza di suoli agricoli non vegetati in primavera porta a più frequenti errori nell'elaborazione delle date sul 1998 e 2008. In particolare i dati del 1998 sembrano leggermente

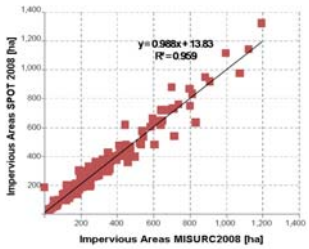
sottostimare le aree occupate mentre quelli del 2008 tendono a sovrastimarle. Ciò è dovuto alla presenza di maggior vigore vegetativo presente nei dati del 1998, relativi alla metà del mese di maggio, che determina per le classi intrinsecamente eterogenee una sottostima delle aree di suolo occupato.

	Mappa - Prodotto	Accuratezza Complessiva	Coefficiente Kappa	Accuratezza Utente (suolo Occupato)	Accuratezza Utente (suolo Non Occupato)
1989	*Urban Map 1989_FILTERED (automatic)*	**94.60%**	*0.874*	91.28%	96.08%
	Urban Map 1989_FINAL_MASKED (semi-automatic)	**94.89%**	*0.879*	94.17%	95.18%
1998	*Urban Map 1998_AGRI_MASKED (automatic)*	**88.49%**	*0.734*	76.95%	95.09%
	Urban Map 1998_FINAL_MASKED (semi-automatic)	**93.89%**	*0.858*	89.29%	96.04%
2008	*Urban Map 2008_AGRI_MASKED (automatic)*	**87.78%**	*0.743*	82.14%	91.51%
	Urban Map 2008_FINAL_MASKED (semi-automatic)	**93.18%**	*0.855*	90.67%	94.72%

a)



b)



c)

Figura 5 – Tabella delle statistiche di accuratezza per i prodotti automatici (AGRI_MASKED e rifiniti da operatore (FINAL_MASKED) (a) e grafici di accordo tra le mappe e la cartografia tematica esistente (b): mappa ricavate per il 1998 confrontata con il DUSAF2000 (a sinistra) e mappa ricavata per il 2008 confrontata con il MISURC08 (a destra)

Un'accuratezza complessiva media delle mappe automatiche di suolo occupato risulta superiore all'87% e di quelle finali superiore al 93%, in considerazione del dato satellitare utilizzato e della speditività del metodo, è considerato un risultato molto soddisfacente.
Infine è stata condotta un'analisi statistica per valutare l'accordo tra le aree di suolo occupato rilevate in ogni comune della Provincia utilizzando cartografia esistente, nel dettaglio: il DUSAF2000 per il confronto con la mappatura del 1998 e il MISURC08 per il confronto con la mappatura del 2008.
La Figura 5 mostra gli scatterogrammi tra i valori di suolo occupato a livello comunale derivati dai due prodotti, dai quali sono stati esclusi i dati relativi alla città di Milano (circa 12,000 ha) e di Monza (circa 2,000 ha), per meglio apprezzare il comportamento nelle situazioni a minor estensione di urbanizzato. I due prodotti mostrano un ottimo accordo come descritto dal coefficiente di correlazione della retta interpolante ($R^2 > 0.96$). Il grafico mostra come i dati SPOT sottostimino leggermente le aree di suolo occupate come individuate dalla cartografia tematica di riferimento.

Conclusioni

La metodologia semiautomatica descritta e utilizzata per la mappatura del Suolo Occupato da dati satellitari multisorgente per gli anni 1989, 1998 e 2008 ha permesso di raggiungere un'accuratezza soddisfacente su tutto il territorio provinciale (> 93%). Si tratta di accuratezze in linea, se non al di sopra, dei risultati raggiunti e citati nella letteratura scientifica del settore. I risultati sono da considerare particolarmente apprezzabili in considerazione della tipologia e della data di acquisizione dei dati satellitari disponibili per i periodi di analisi e dell'eterogeneità del dato satellitare utilizzato. Gli errori residui sono dovuti ai limiti intrinseci del dato e delle tecniche automatiche impiegate. Bisogna sottolineare che la tipologia di errore è variabile in funzione delle caratteristiche di territorio e della complessità della matrice analizzata. Data la risoluzione spaziale (20 m per SPOT e 30 m per TM il dato originale, pur se ricampionato a 20 m per il confronto) in condizioni di forte eterogeneità delle superfici le performance della classificazione si riducono. I risultati ottenuti mostrano invece

come l'utilizzo periodico di dati SPOT possa essere inserito in un sistema di monitoraggio speditivo a scala provinciale, per l'analisi dei cambiamenti di copertura ed uso del suolo. Per la messa a punto di tale sistema di monitoraggio è importante però considerare alcune delle difficoltà incontrate in questo studio, principalmente connesse alla tipologia e alle caratteristiche del dato satellitare utilizzato, quali la stagionalità del dato satellitare (terreni agricoli non vegetati, i tempi di acquisizione), la tipologia del dato (risoluzione spaziale, spettrale) e i tempi di elaborazione.
Una miglior condizione per l'utilizzo procedurale dei dati da satellite al fine di monitorare lo sviluppo urbano richiederebbe l'acquisizione, programmata nel caso di SPOT, di immagini in almeno due periodi differenti (estate/inverno) al fine di massimizzare la diversità tra il tessuto naturale caratterizzato da una forte stagionalità e le superfici artificiali considerate invarianti. Acquisizioni multitemporali permettono inoltre un filtraggio e un controllo di ridondanza sulla classificazione della copertura del suolo, che si rivela utile a migliorare l'accuratezza dei prodotti tematici realizzati in maniera automatica.
L'utilizzo di dati a più alta risoluzione spaziale consentirebbe di migliorare le capacità diagnostiche per una più accurata distinzione del tessuto urbano. Tale analisi ha però due controindicazioni: una di natura economica, infatti dati ad alta risoluzione sono molto più costosi, e una legata all'elaborazione; dati ad alta risoluzione richiedono infatti analisi di dettaglio con forte supporto dell'operatore e maggior tempo di processamento. Infine, un sistema di monitoraggio operativo basato su immagini ad alta risoluzione deve prevedere la possibilità di utilizzo di dati provenienti da sorgenti diversi (aerei, satellitari, multi spettrali o in bianco e nero) in quanto non sempre può essere garantita la copertura dell'intera area di studio. Tale condizione determina anche la conseguente predisposizione di differenti sistemi di interpretazione difficilmente riproducibili in maniera sistematica.
In conclusione, con l'evoluzione tecnologica attesa nel prossimo futuro, le tecniche satellitari rappresentano, senza dubbio, la strada già tracciata per le prossime analisi sul consumo di suolo: infatti, nonostante i limiti sopra evidenziati, la metodologia utilizzata e i risultati di accuratezza raggiunti incoraggiano l'integrazione con altre fonti di dati e potranno svolgere nel futuro le attività di monitoraggio del consumo di suolo.

Riferimenti bibliografici

A. Berk , G. P. Anderson, L. S.Bernstein, P. K. Acharya, H. Dothe, M. W. Matthew, S. M. Adler-Golden, J. H. Chetwynd, Jr., S. C. Richtsmeier, B. Pukall, C. L. Allred, L. S. Jeong, and M. L. Hoke, "MODTRAN4 Radiative Transfer Modeling for Atmospheric Correction," *SPIE Proceedings, Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research III*, vol. 3756, pp.348-353, October 1999.

Centro Studi PIM, "Consumo di Suolo: Atlante della Provincia di Milano", *Quaderni del Piano Territoriale n. 28,* Provincia di Milano, marzo 2009, pp. 136

R.G. Congalton, "A Review of Assessing the Accuracy of Classification of Remotely Sensed Data", *Remote Sensing of Environment*, 1991, 37, pp. 35-46.

ERSAF, Regione Lombardia, "Destinazione d'Uso dei Suoli Agricoli e Forestali (DUSAF)", 2002, http://www.ersaf.lombardia.it/Upload/Luisa Gargano/Legenda_DUSAF.pdf

A.R. Huete, R.D. Jackson, "Suitability of Spectral Indices for Evaluating Vegetation Characteristics on Arid Rangelands", *Remote Sensing of Environment*, 1987, 23(2), pp. 213-232.

J.W. Rouse, R.H. Haas, J.A. Schell, D.W. Deering, "Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS", *Proceedings of the Third ERTS Symposium*, Washington D.C., NASA SP-351, 1973,pp. 309-317.

P. Villa, "Imperviousness Indexes Performance Evaluation for Mapping Urban Areas Using Remote Sensing Data", *Joint Urban Remote Sensing Event*, Paris 11-13 April, 2007, pp. 1-6.

G. Willhauck, "Comparison of Object-Oriented classification Tecniques and Standard Image Analysis for the Use of Change Detection Between SPOT Multispectral Satellite Images and Aerial Photos", *XIX Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS),* Amsterdam, 2000, pp. 214-221.