

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

DOTTORATO DI RICERCA IN
INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

Ciclo XXVI

Settore Concorsuale di afferenza: 08/A4

Settore Scientifico disciplinare: ICAR/06

**MAPPATURA DELL'*IMPERVIOUS* E CONSUMO DI SUOLO TRAMITE
ANALISI DI *CHANGE DETECTION* IN TELERILEVAMENTO**

Presentata da: Rossella Casciere

Coordinatore Dottorato

Prof. Alberto Lamberti

Relatori

Prof. Gabriele Bitelli

Prof. Luca Vittuari

Esame finale anno 2015

SOMMARIO

<i>Riassunto</i>	1
<i>Abstract</i>	3
1. INTRODUZIONE	5
2. IL CONSUMO DI SUOLO	9
2.1 <i>IL SUOLO E LA SUA IMPORTANZA</i>	9
2.1.1 2015 Anno Internazionale dei Suoli	9
2.1.2 Il suolo: definizioni	10
2.1.3 Il suolo e gli ecosistemi	10
2.2 <i>IL CONSUMO DI SUOLO</i>	13
2.2.1 Il consumo di suolo: definizioni	13
2.2.2 Il consumo di suolo su scala mondiale	15
2.2.3 Il consumo di suolo su scala europea	18
2.2.4 L'Italia ed il consumo di suolo	25
2.3 <i>IMPATTI DEL CONSUMO DI SUOLO</i>	34
2.3.1 Frammentazione degli habitat	34
2.3.2 Rischio idraulico	35
2.3.3 Sicurezza alimentare	37
2.4 <i>LA MISURA DEL CONSUMO DI SUOLO</i>	42
2.4.1 Mappare il consumo di suolo	42
2.4.2 La mappatura dell'impermeabilizzato tramite telerilevamento	43
2.4.3 Principali tecniche utilizzate	47
3. CASO STUDIO: LA PROVINCIA DI BOLOGNA	50
3.1 <i>AREA DI STUDIO</i>	50
3.1.1 Inquadramento territoriale	50
3.1.2 Dati disponibili	54
3.2 <i>MATERIALI E METODI</i>	60
3.2.1 Acquisizione delle immagini	60
3.2.2 Pre-processamento delle immagini	61
3.2.3 Classificazione	66
3.2.4 Validazione	76

3.2.5	Analisi di <i>change detection</i> : come cambia il territorio	84
3.2.6	Validazione della matrice di <i>change detection</i>	91
4.	ANALISI DEI RISULTATI.....	97
4.1	CONFRONTO CON I DATI DISPONIBILI	97
4.2	ANALISI DELLA DISTRIBUZIONE DELLE SUPERFICI IMPERMEABILIZZATE	104
5.	CONCLUSIONI.....	110
	BIBLIOGRAFIA	113

Riassunto

Il telerilevamento rappresenta un efficace strumento per il monitoraggio dell'ambiente e del territorio, grazie alla disponibilità di sensori che riprendono con cadenza temporale fissa porzioni della superficie terrestre. Le immagini multi/iperspettrali acquisite sono in grado di fornire informazioni per differenti campi di applicazione. In questo studio è stato affrontato il tema del consumo di suolo che rappresenta un'importante sfida per una corretta gestione del territorio, poiché direttamente connesso con i fenomeni del runoff urbano, della frammentazione ecosistemica e con la sottrazione di importanti territori agricoli. Ancora non esiste una definizione unica, ed anche una metodologia di misura, del consumo di suolo; in questo studio è stato definito come tale quello che provoca impermeabilizzazione del terreno. L'area scelta è quella della Provincia di Bologna che si estende per 3.702 km² ed è caratterizzata a nord dalla Pianura Padana e a sud dalla catena appenninica; secondo i dati forniti dall'ISTAT, nel periodo 2001-2011 è stata la quarta provincia in Italia con più consumo di suolo. Tramite classificazione pixel-based è stata fatta una mappatura del fenomeno per cinque immagini Landsat. Anche se a media risoluzione, e quindi non in grado di mappare tutti i dettagli, esse sono particolarmente idonee per aree estese come quella scelta ed inoltre garantiscono una più ampia copertura temporale. Il periodo considerato va dal 1987 al 2013 e, tramite procedure di change detection applicate alle mappe prodotte, si è cercato di quantificare il fenomeno, confrontarlo con i dati esistenti e analizzare la sua distribuzione spaziale.

Parole chiavi: *telerilevamento; consumo di suolo; pixel-based; Landsat; change detection; Provincia di Bologna.*

Abstract

Remote sensing is an effective tool for environmental monitoring, due to sensors that regularly acquire large areas of Earth's surface. Multi/hyperspectral images are able to provide information about different topics. This study focuses on soil sealing: this subject is highly relevant, given its impact on phenomena such as urban runoff, habitat fragmentation and agricultural land take. A unique definition about soil sealing, and a unique method for its measure, does not still exist; the study proposed in this thesis deals with everything that involves soil removing. The area of study is the Province of Bologna that covers 3,702 km² and is characterized by the Po Valley on the north and the Apennines chain on the south. According to data provided by ISTAT for Italian Provinces, Bologna had the fourth higher soil sealing value between 2001 and 2011. In order to map the phenomenon, five Landsat images have been classified with a pixel-based technique. Even if they have a medium spatial resolution, and thus they are not able to map small objects, they are suitable for large areas; furthermore they provide the opportunity for longer time series. The analyzed period goes from 1987 to 2013 and, through change detection procedures applied to the produced maps, this study has tried to quantify the phenomenon, also comparing it with existing data, in order to understand its spatial distribution.

Key words: *remote sensing; soil sealing; pixel-based; Landsat; change detection; BolognaProvince.*

1. INTRODUZIONE

Il telerilevamento rappresenta un efficace strumento per il monitoraggio dell'ambiente e del territorio, grazie alla disponibilità di sensori che riprendono periodicamente porzioni della superficie terrestre. Questo determina la possibilità di compiere analisi multitemporali volte al controllo sistematico di un determinato fenomeno o ad una prima mappatura dei danni provocati da catastrofi come alluvioni (van der Sande, de Jong, and de Roo 2003) ed incendi (Smith and Woodgate 1985). Grazie infatti alle informazioni contenute nelle immagini multi e iperspettrali, possono essere studiati e localizzati oggetti differenti legati all'uso o alla copertura del suolo (Green, Kempka, and Lackey 1994), primo fra tutti la vegetazione il cui stato di salute spesso funziona come parametro di qualità ambientale (Zhang et al. 2003). Altre applicazioni riguardano le acque, sia marine (Johnson and Harriss 1980) che continentali (Gitelson et al. 1993), specie sotto il profilo degli eventuali inquinanti presenti. L'avvento dei sensori ad alta risoluzione spaziale ha dato un ulteriore impulso alle applicazioni del telerilevamento, poiché ha aperto le porte a studi molto più dettagliati anche per piccole aree.

In questo contesto le immagini Landsat continuano a rappresentare un valido supporto per l'analisi di diversi fenomeni, specie su larga scala. Rimane soprattutto insostituibile la copertura temporale accumulata dall'inizio della missione (1972, lancio del sensore MSS) che, resa accessibile gratuitamente dall'USGS nel 2011, costituisce un patrimonio di informazioni sul territorio che continua ad essere la base per molti studi. Infatti, se si vuole condurre un'indagine sullo sviluppo di un evento, specie nel caso non si tratti di qualcosa di immediato ma a lenta evoluzione, può risultare determinante avere a disposizione immagini per un ampio spettro temporale. Se a ciò si aggiunge che dal 1984 la risoluzione spaziale delle immagini Landsat è salita a 30 m, rispetto agli 80 iniziali, e le bande sono diventate sei nel multispettrale ed una nel termico, si intuisce la competitività che queste scene

ancora mantengono, nonostante le evoluzioni dell'alta risoluzione e dell'iperspettrale.

Nel corrente studio si è deciso di sfruttare le potenzialità delle immagini Landsat per studiare l'andamento nel tempo del fenomeno indicato come "consumo di suolo". Con questa espressione ci si riferisce genericamente all'incremento del tessuto urbano e alla nascita di nuove superfici artificiali disperse sul territorio; essendo un tema trasversale a molte discipline, nonché con implicazioni politiche, non esiste ancora una sua definizione precisa. Per molti urbanisti esso viene inteso come sottrazione di suolo da destinare agli spazi urbani, indipendentemente dal tipo di superficie creata; il problema però della misura del consumo di suolo è nato come emergenza derivante dagli allagamenti nelle città e quindi collegato all'impermeabilizzazione delle aree. In questo studio, così come definito dalla Comunità Europea e da ISPRA, si farà riferimento a tutto ciò che comporta appunto l'impermeabilizzazione del territorio. I maggiori problemi legati a questo fenomeno sono:

- aumento dello scorrimento superficiale delle acque in ambito urbano: l'acqua piovana non riesce ad infiltrarsi e, in presenza di eventi meteorologici particolarmente abbondanti, può dare origine ad allagamenti spesso disastrosi;
- aumento della frammentazione degli habitat: le impermeabilizzazioni che coinvolgono spazi naturali/rurali possono determinare impatti negativi sugli ecosistemi, distruggendo aree di importante valenza ecologica;
- sottrazione di suolo agricolo: i dati derivanti dal *CORINE Land Cover*, seppur da leggere con le opportune approssimazioni, mostrano come nel periodo 1990-2006 sia andata persa, a causa dell'urbanizzazione, una superficie coltivata che avrebbe garantito l'equivalente della produzione totale di grano della Spagna o della Romania per il 2006.

Il telerilevamento si presta bene alla mappatura dell'impermeabilizzato, grazie alla capacità di distinguere in modo netto la vegetazione dall'artificiale: questo concetto diventa fondamentale per separare in città l'*impervious* dalle superfici permeabili.

La difficoltà principale rimane la risoluzione spaziale, poiché spesso gli spazi da rilevare sono molto piccoli. Da questo punto di vista, le immagini ad alta risoluzione risolvono il problema, anche se, con un pixel molto dettagliato, subentra la confusione spettrale tra i vari materiali presenti in ambito urbano. Inoltre resta la difficoltà nel descrivere grandi aree, per le quali viene preferita ancora la media risoluzione, pur con i limiti legati ad una mappatura dettagliata.

L'area di studio scelta è quella della Provincia di Bologna (3.702 km²), ormai diventata Città Metropolitana. Il suo territorio è diviso idealmente in due dal tracciato della vecchia strada romana Emilia, che separa la parte nord occupata dalla Pianura Padana da quella a sud caratterizzata dalla zona collinare – montuosa degli Appennini. Grazie alla sua posizione geografica, quest'area rappresenta un importante snodo viario e ferroviario, poiché collega la linea adriatica e quella tirrenica all'Italia settentrionale e viceversa. Negli anni questo ha determinato una costante crescita delle superfici impermeabili, nello specifico rappresentate soprattutto da zone industriali o commerciali maggiormente concentrate lungo gli assi principali individuati dalle infrastrutture di trasporto. I dati esistenti provengono da diverse fonti e mostrano delle percentuali a volte in contrasto tra di loro, sottolineando ulteriormente quanto possa variare il concetto di consumo di suolo e come la sua misura dipenda molto anche dalla risoluzione spaziale adottata. La metodologia qui utilizzata ha previsto la classificazione *pixel-based* di cinque immagini Landsat, per un periodo compreso tra il 1987 e il 2013. I risultati ottenuti e validati sono stati confrontati tramite procedura di *change detection* per quantificare il tasso di consumo annuo e analizzare la distribuzione spaziale del fenomeno. I dati sono stati integrati con quelli demografici, per vedere se i ritmi di crescita nel tempo sono stati simili oppure differenti. Infine è stato fatto un confronto con gli studi già esistenti al fine di valutarne la qualità.

La struttura del presente elaborato si compone quindi di una parte iniziale (capitolo 2) nella quale viene definito il consumo di suolo ed il suo andamento su scala globale, europea ed italiana. Vengono affrontate le problematiche derivanti dall'impermeabilizzazione e si analizza più dettagliatamente la quantificazione del fenomeno alla luce delle tecniche e degli studi esistenti, relativamente al

telerilevamento. Nel capitolo 3 si parla dell'area oggetto di studio e dei dati per essa disponibili, dopodiché si illustrano le fasi di *pre-processing*, classificazione, validazione e *change detection* delle immagini acquisite. Infine, nel capitolo 4, i dati ottenuti sono stati raffrontati con quelli disponibili ed è stata tracciata una valutazione sull'andamento del consumo di suolo in rapporto alla popolazione e ad ogni singolo comune.

Parte di questo lavoro ha visto il confronto con importanti istituzioni, quindi un ringraziamento particolare va al Dott. Michele Munafò di ISPRA per il materiale fornito e la disponibilità a chiarire dubbi emersi durante la ricerca. Un altro sentito ringraziamento va al dott. Stefano Corticelli della Regione Emilia-Romagna per i chiarimenti e le preziose indicazioni sulle dinamiche del territorio in oggetto.

2. IL CONSUMO DI SUOLO

2.1 IL SUOLO E LA SUA IMPORTANZA

2.1.1 2015 Anno Internazionale dei Suoli

L'Assemblea Generale dell'ONU ha proclamato il 5 dicembre come la Giornata Mondiale del Suolo ed il 2015 come l'Anno Internazionale dei Suoli, *"noting that soils constitute the foundation for agricultural development, essential ecosystem functions and food security and hence are key to sustaining life on Earth"* (Risoluzione dell'Assemblea Generale dell'ONU del 20 dicembre 2013 n. A/RES/68/232). In questo modo si è voluto riconoscere e porre l'accento sull'importanza per l'essere umano e per gli ecosistemi di una risorsa unica e, purtroppo, limitata. Al pari dell'acqua e dell'aria, infatti, il suolo può essere compromesso dall'attività antropica, arrivando a provocare anche danni estremamente seri, visto che il 95% del cibo deriva, direttamente o indirettamente, dal suolo (Food and Agriculture Organization of the United Nations 2009).

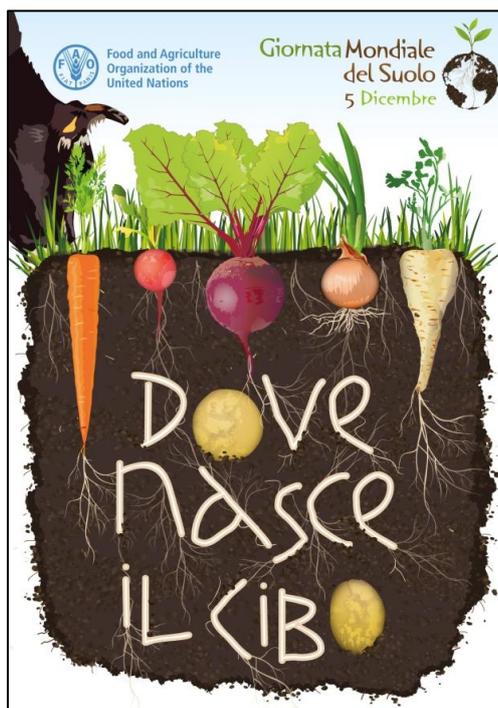


Figura 2.1 Poster realizzato dalla FAO per la celebrazione della Giornata Mondiale del Suolo.

L'istituzione di un anno internazionale dedicato da parte dell'ONU dovrebbe contribuire ad una maggiore consapevolezza da parte dell'opinione pubblica della rilevanza di questa risorsa. Nella comune percezione, infatti, e spesso anche a livello istituzionale, il suolo è visto come un bene illimitato; purtroppo non è così, se si considera che la formazione di un suo centimetro può richiedere anche 1.000 anni.

2.1.2 Il suolo: definizioni

Questa scarsa conoscenza si riflette anche nelle differenti definizioni che vengono date alla parola "suolo" in base al contesto in cui ci si trova. La Comunità Europea lo definisce come "lo strato superiore della crosta terrestre, costituito da componenti minerali, organici, acqua, aria e organismi viventi. Rappresenta l'interfaccia tra terra, aria e acqua e ospita gran parte della biosfera" (Comunicazione COM(2006)231 definitivo della Commissione, del 22 settembre 2006), mentre la *Soil Conservation Society of America* (1986) ricorda che "...capace di sostenere la vita delle piante, è caratterizzato da una flora e fauna propria e da una particolare economia dell'acqua. Si suddivide in orizzonti aventi caratteristiche fisiche, chimiche e biologiche proprie".

In Italia la definizione di suolo riconosciuta per legge è quella contenuta all'interno del Testo unico ambientale (D. Lgs 3 aprile 2006, n.152), che lo definisce come "lo strato più superficiale della crosta terrestre situato tra il substrato roccioso e la superficie", comprendendo "il territorio, il sottosuolo, gli abitati e le opere infrastrutturali" nella normativa inerente alla sua difesa. Il legislatore con questa dicitura ha voluto sottolineare l'importanza della risorsa suolo relativamente al dissesto idrogeologico, ma in qualche modo, associandola all'abitato e alle infrastrutture, riconosce la sua salvaguardia solo come subordinata alla tutela del cittadino, sorvolando quindi sulle sue funzioni ecosistemiche.

2.1.3 Il suolo e gli ecosistemi

In tutti gli ecosistemi terrestri il suolo garantisce il funzionamento dei cicli biogeochimici necessari per il mantenimento degli esseri viventi. Grazie ai continui processi biologici che avvengono al suo interno, infatti, esso funziona da riserva delle sostanze nutritive che entrano in gioco in tutti i cicli caratterizzanti i principali

elementi, come l'azoto, il fosforo ed il carbonio. In quest'ultimo, in particolare, assume un ruolo importante se visto nell'ottica dei cambiamenti climatici. La sostanza organica presente nel suolo, infatti, rappresenta un cospicuo serbatoio di carbonio, inferiore a quello trattenuto dagli oceani, ma più influenzabile direttamente dall'azione umana. Di conseguenza, delle opportune strategie di conservazione dei suoli potrebbero contribuire allo sfruttamento della loro capacità di immagazzinamento del carbonio, andando ad incidere sulle emissioni dei gas serra.

Tutti i cicli biogeochimici sono resi possibili dall'estrema varietà di organismi presenti nel suolo, pari a circa un quarto della biodiversità mondiale. In un grammo di terra, infatti, si possono rinvenire fino ad un miliardo di organismi collegati tra di loro da una fitta rete di scambi biologici che portano alla continua decomposizione della materia organica ed al successivo riciclo dei nutrienti. In questa complessa catena alimentare entrano in gioco anche le piante per le quali il suolo rappresenta il substrato sul quale crescere.

Da ciò si evince come il suolo sia una risorsa in continua evoluzione; questa dinamicità si riflette però anche in un'estrema fragilità degli equilibri, che possono essere facilmente compromessi dall'attività umana. Erosione, contaminazioni, salinizzazione, compattazione e loro consumo sono processi che possono portare al degrado dei suoli e, in ultima istanza, alla loro distruzione.

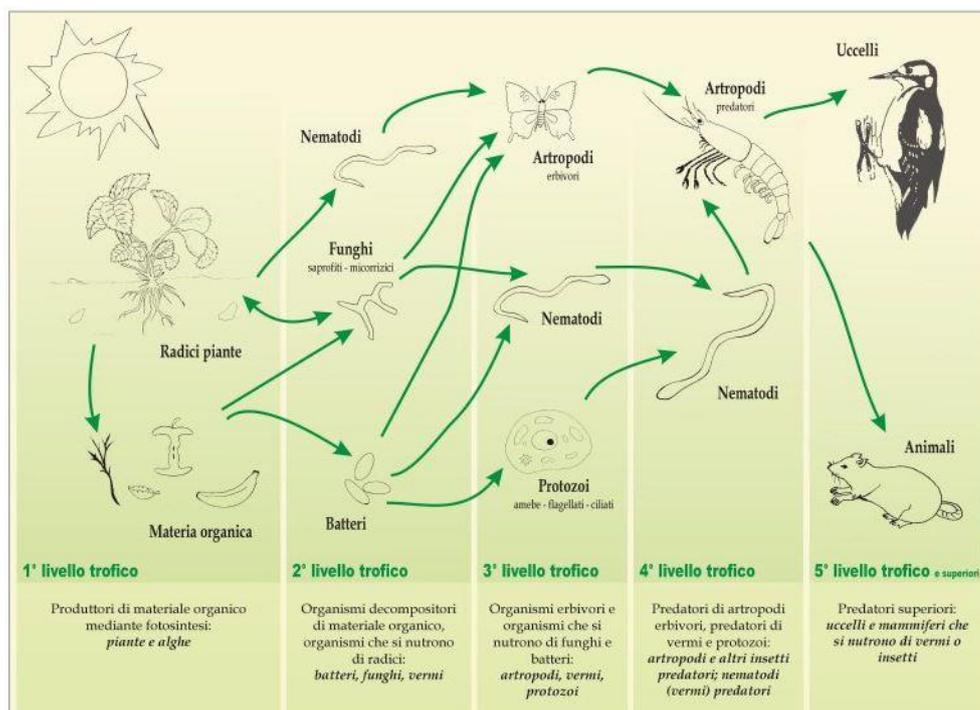


Figura 2.2 Rete alimentare del suolo (Fonte: United States Department of Agriculture).

2.2 IL CONSUMO DI SUOLO

2.2.1 Il consumo di suolo: definizioni

Negli ultimi anni l'attenzione verso il tema del consumo di suolo è andata aumentando: gli articoli dedicati alla materia sono passati da 19 nel 1990 a più di 350 nel 2013 (Gardi et al. 2015). Inoltre l'interesse nei suoi confronti ha investito diversi ambiti, uscendo dal contesto degli studi sul territorio in cui si era andato sviluppando. Una crescente sensibilità da parte dell'opinione pubblica ha fatto sì che nell'attuale Legislatura, al 18 Marzo 2014 (<http://www.camera.it/temiap/t/news/post-OCD150009414>), risultassero depositate in Parlamento 10 proposte di legge che si abbinano ad un Decreto Legge del Governo Letta.

Questo accresciuto interesse ha portato d'altro canto ad una generale confusione sui termini "consumo di suolo", "impermeabilizzazione" e "urbanizzazione": essi spesso vengono utilizzati indistintamente, ma denotano processi ben distinti tra di loro. Analogamente avviene a livello europeo con i concetti di "land take", "soil sealing" e "urban sprawl". Per fare chiarezza su questi ultimi, vengono riportate di seguito le definizioni prese dal "Report on best practices for limiting soil sealing and mitigating its effects" della Direzione Generale per l'Ambiente della Commissione Europea (Prokop, Jobstmann, and Schonbauer 2011).

Artificial surfaces: *the term is used in the CORINE Land Cover nomenclature and refers to "continuous and discontinuous urban fabric (housing areas), industrial, commercial and transport units, road and rail networks, dump sites and extraction sites, but also green urban areas.*

Soil sealing: *destruction or covering of soils by buildings, constructions and layers of completely or partly impermeable artificial material (asphalt, concrete, etc.). It is the most intense form of land take and is essentially an irreversible process.*

Land take: *also known as "urbanisation", "increase of artificial surfaces", represents an increase of settlement areas (or artificial surfaces) over time, usually at the expense of rural areas.*

Urban sprawl: *the physical pattern of low-density expansion of large urban areas, under market conditions, mainly into the surrounding agricultural areas. Development is patchy, scattered and strung out, with a tendency for discontinuity.*

Relativamente alla situazione italiana, si può far riferimento a quanto riportato da ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) nel rapporto “Il consumo di suolo in Italia” (Munafò and Tombolini 2014).

Impermeabilizzazione: copertura permanente con materiali artificiali (quali asfalto o calcestruzzo) per la costruzione, ad esempio, di edifici e strade; riguarda solo una parte dell’area di insediamento, poiché altre componenti di tale area, come i giardini, i parchi urbani e altri spazi verdi non rappresentano una superficie impermeabile.

Consumo di suolo: fenomeno associato alla perdita di una risorsa ambientale fondamentale, dovuta all’occupazione di superficie originariamente agricola, naturale o seminaturale che comporta un incremento della copertura artificiale di terreno, legato alle dinamiche insediative. Deve quindi essere definito come una variazione da una copertura non artificiale (suolo non consumato) a una copertura artificiale del suolo (suolo consumato). La rappresentazione più tipica del consumo di suolo è, quindi, data dal crescente insieme di aree coperte da edifici, capannoni, strade asfaltate o sterrate, aree estrattive, discariche, cantieri, cortili, piazzali e altre aree pavimentate o in terra battuta, serre e altre coperture permanenti, aeroporti e porti, aree e campi sportivi impermeabili, ferrovie ed altre infrastrutture, pannelli fotovoltaici e tutte le altre aree impermeabilizzate, non necessariamente urbane. Tale definizione si estende, pertanto, anche in ambiti rurali e naturali ed esclude, invece, le aree aperte naturali e seminaturali in ambito urbano.

In base alle precedenti definizioni si può quindi affermare che i concetti di impermeabilizzazione e consumo di suolo sono ben diversi da quello di urbanizzazione. Quest’ultima porta con sé necessariamente distruzione di suolo, ma, come definito dall’Enciclopedia Treccani (<http://www.treccani.it/enciclopedia/>), è un “processo attraverso cui, dalla concentrazione urbana, si transita alla diffusione dell’insediamento e delle funzioni

urbane sul territorio”. Di conseguenza, non è considerato urbanizzazione l’abitato in ambito rurale, mentre vengono inclusi gli spazi seminaturali e le aree di verde urbano.



Figura 2.3 Differenza tra urbanizzazione (a sinistra) e impermeabilizzazione (a destra) (Fonte: Umweltbundesamt).

2.2.2 Il consumo di suolo su scala mondiale

Il 2007 ha segnato un passaggio quasi epocale nella storia dell’umanità: in tale anno infatti, per la prima volta, gli abitanti residenti negli agglomerati urbani hanno superato in numero quelli in ambito rurale (Figura 2.4). Ad oggi le persone che vivono in città rappresentano il 54% della popolazione mondiale (United Nations Department of Economic and Social Affairs 2014) e sono in costante crescita, tanto che, secondo le proiezioni dello stesso studio, nel 2050 si arriverà ad un 66% contro un 34%.

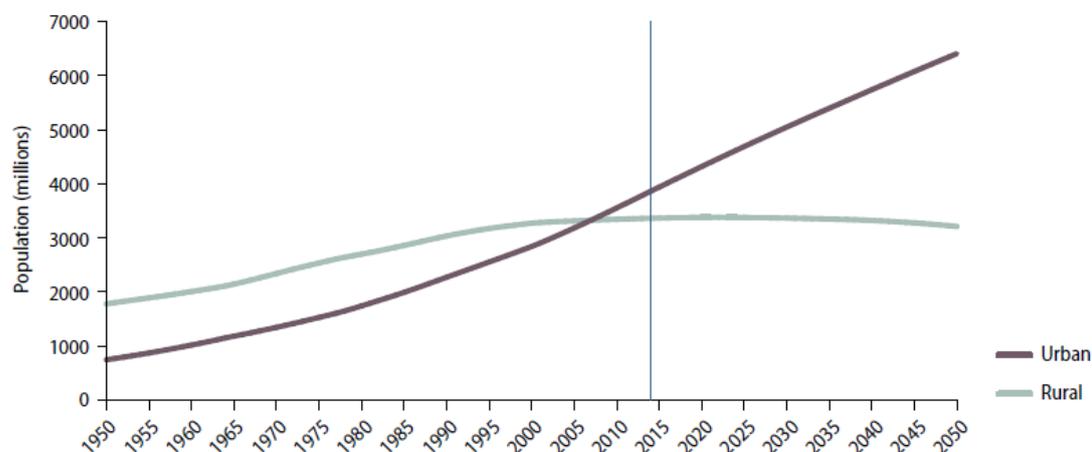


Figura 2.4 Andamento e proiezione della popolazione mondiale urbana e rurale (United Nations Department of Economic and Social Affairs 2014).

I numeri variano in base alle realtà socio-geografiche considerate: il Nord America, l'America Latina e l'Europa hanno una percentuale di popolazione urbana molto maggiore alla media (rispettivamente 82%, 80% e 73%), mentre Africa ed Asia si attestano al 40% e 48%. Queste ultime però, essendo delle economie emergenti, sono quelle in cui l'urbanizzazione sta procedendo a rapidi passi tanto che, nel 2050, dovrebbero passare al 56% e 64%. Inoltre sono questi due continenti ad avere il maggior numero di città con più di 5.000.000 di abitanti e, soprattutto, come mostrato nella Figura 2.5, il maggior tasso di crescita annuo.

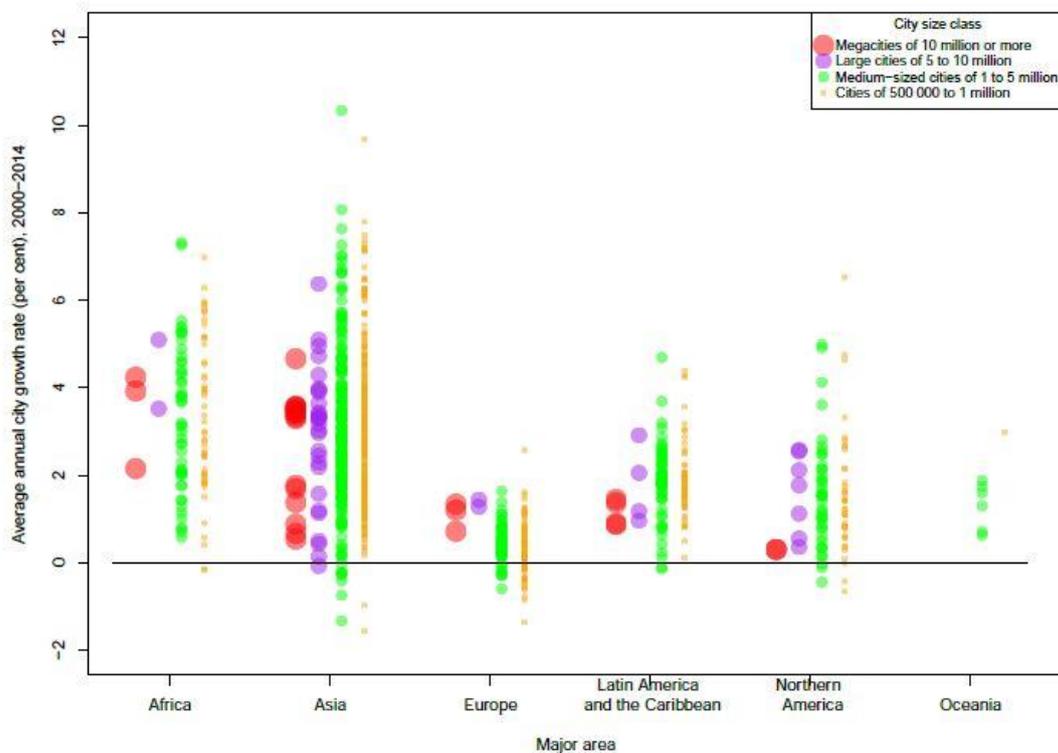


Figura 2.5 Tasso di crescita della popolazione per le città con più di 500.000 abitanti ripartite per area geografica (United Nations Department of Economic and Social Affairs 2014).

La naturale conseguenza di queste cifre è l'aumento delle superfici urbanizzate ed impermeabilizzate che però raramente risulta avere lo stesso ritmo di crescita della popolazione. Una città che si espande, infatti, richiede nuove infrastrutture di trasporto, centri logistici, spazi di aggregazione e sistemi per lo smaltimento dei rifiuti, ai quali, purtroppo, spesso si accompagnano fenomeni di speculazione edilizia, specie in quei Paesi che non hanno una tradizione di pianificazione territoriale. Tutto ciò è stato analizzato anche da uno studio (Marshall 2007) nel

quale l'area occupata da un agglomerato urbano (A) risulta essere proporzionale alla sua popolazione (P) tramite la seguente relazione:

$$A \propto P^n$$

Nella maggior parte dei casi analizzati, n risulta essere pari a 2, anche se non si è in grado di stabilire un legame preciso con i fenomeni prima elencati. Ad ogni modo il risultato è che, mediamente, i nuovi abitanti di una città tendono a consumare il doppio della superficie urbanizzata a disposizione dei precedenti.

Stimare il valore globale di consumo di suolo è abbastanza difficile; un recente lavoro (Seto et al. 2011) ha provato ad analizzare i dati derivati da 326 studi sull'argomento, portati avanti tramite tecniche di telerilevamento. Le conclusioni sono che tra il 1970 ed il 2000 sarebbero stati impermeabilizzati circa 58.000 km² di suolo sparsi in tutto il mondo, superficie equivalente a 1,3 volte la Danimarca. Ritmi e quantità variano in rapporto alla geografia, come si può osservare nella Figura 2.6.

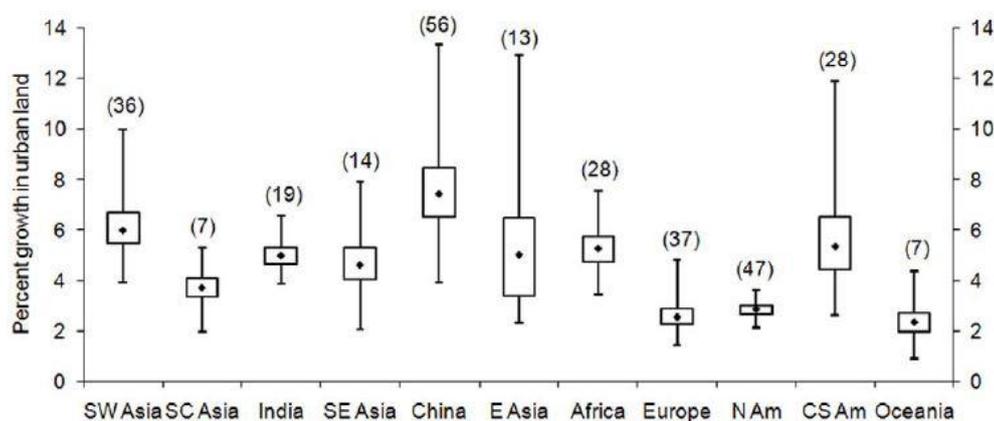


Figura 2.6 Tassi annuali di espansione urbana nelle aree geografiche per il periodo 1970-2000 (Seto et al. 2011).

Cina e Asia Sud Occidentale hanno le percentuali medie più alte, anche se localmente i tassi variano in funzione delle condizioni fisiche e socio-economiche della regione considerata. Ad esempio il ritmo maggiore per l'espansione urbana in Cina è osservato in corrispondenza delle aree di costa (13,3%), mentre nella parte Ovest si ha un consumo di suolo molto più basso (3,9%). Diversa è invece la situazione del Nord America, dove il tasso di urbanizzazione è più basso, ma distribuito equamente su tutto il territorio. Ad ogni modo Asia e Africa risultano essere i continenti con più alto consumo di suolo nel periodo considerato.

2.2.3 Il consumo di suolo su scala europea

Per l'Unione Europea è possibile condurre un'analisi più approfondita, grazie ai dati forniti dall'Agenzia Europea dell'Ambiente tramite il *CORINE Land Cover* (<http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>) e il *Soil sealing map* (<http://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers/imperviousness/view>) ed elaborati nel "Report on best practices for limiting soil sealing and mitigating its effects" (Prokop et al. 2011).

Il progetto CORINE (*COoRdination of INformation on the Environment*) è stato varato dalla Comunità Europea nel 1985, al fine di monitorare quattro importanti componenti dell'ambiente: biotopi, acqua, aria e uso del suolo. Per quest'ultimo è stata prevista la realizzazione per diversi anni (1990, 2000 e 2006) di una relativa cartografia a scala 1:100.000 che coprisse il territorio di tutti i Paesi membri. Tramite fotointerpretazione si è così arrivati ad una classificazione gerarchica, composta da 3 livelli e 44 classi; l'unità minima cartografabile è di 25 ettari, mentre i cambiamenti nei successivi aggiornamenti sono stati mappati se superiori ai 5 ettari. I principali usi del suolo sono individuati dalle cinque categorie del primo livello: superfici artificiali, aree agricole, aree forestali e semi-naturali, aree umide e corpi idrici. I limiti di questa cartografia riguardo alla misura del consumo di suolo sono rappresentati sia dall'unità minima cartografabile, troppo elevata per descrivere in modo preciso l'andamento del fenomeno, sia dalla legenda, che sotto la dicitura 'aree artificiali' include anche superfici permeabili (ad esempio parchi e giardini) che si possono trovare in città. Pur con queste carenze, il quadro tratteggiato dal *CORINE Land Cover* sicuramente offre un andamento abbastanza verosimile del fenomeno, almeno per grandi aree.

Mirato alla misura dell'impermeabilizzato è invece il prodotto *Soil sealing map*, sviluppato all'interno del progetto Copernicus. Quest'ultimo è nato sempre all'interno della Comunità Europea con l'obiettivo di monitorare la superficie terrestre attraverso sei aree tematiche: terra, mare, atmosfera, cambiamenti climatici, gestione dell'emergenza e sicurezza. Tra le iniziative portate avanti nell'ambito del monitoraggio terra, c'è appunto la realizzazione di mappe di impermeabilizzazione del suolo riferite agli anni 2006, 2009 e 2012, ottenute

tramite telerilevamento. In questo modo viene superato il problema dell'inclusione di aree urbane permeabili come suolo consumato e, soprattutto, c'è un netto miglioramento della risoluzione spaziale, poiché il pixel prodotto è di 20x20 m, per cui teoricamente un'area impermeabilizzata di 400 m² viene rilevata.

In base a queste considerazioni e al fatto che, a livello di calcolo nazionale, pesa soprattutto quello che avviene negli agglomerati urbani di una certa entità, il valore fornito dal CORINE relativamente all'urbanizzazione è sempre più alto di quello derivato dal Copernicus. Questo è evidenziato dal confronto dei dati relativi al 2006, riportati nella Figura 2.7, e dai quali si evince che, su un totale di 27 Paesi appartenenti alla Comunità Europea, il territorio impermeabilizzato risultava essere il 2,3%, valore mentre quello urbanizzato il 4,4%. Guardando le singole realtà, si vede che, nella maggior parte dei casi, il rapporto per cui le superfici artificiali sono più o meno il doppio di quelle impermeabili rimane valido; ci sono solo alcune eccezioni, come il Portogallo, dove i due valori restano simili.

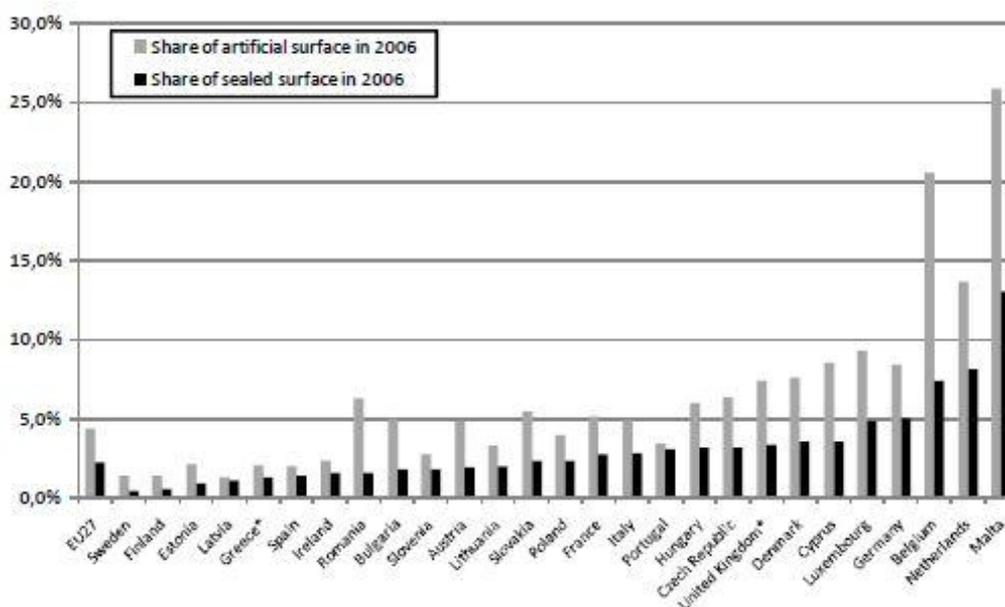


Figura 2.7 Percentuale di superficie artificiale (in grigio, fonte: CORINE Land Cover) e impermeabilizzata (in nero, fonte: Soil Sealing Map Copernicus) al 2006 per i Paesi EU27 (Prokop et al. 2011).

Gli stati con maggiore urbanizzazione ed impermeabilizzazione sono Malta, i Paesi Bassi ed il Belgio; dal punto di vista visivo, questi dati vengono resi bene dalla Figura

2.8, dove sono riportati i valori di percentuale di impermeabilizzazione secondo la terza classe delle unità territoriali NUTS¹.

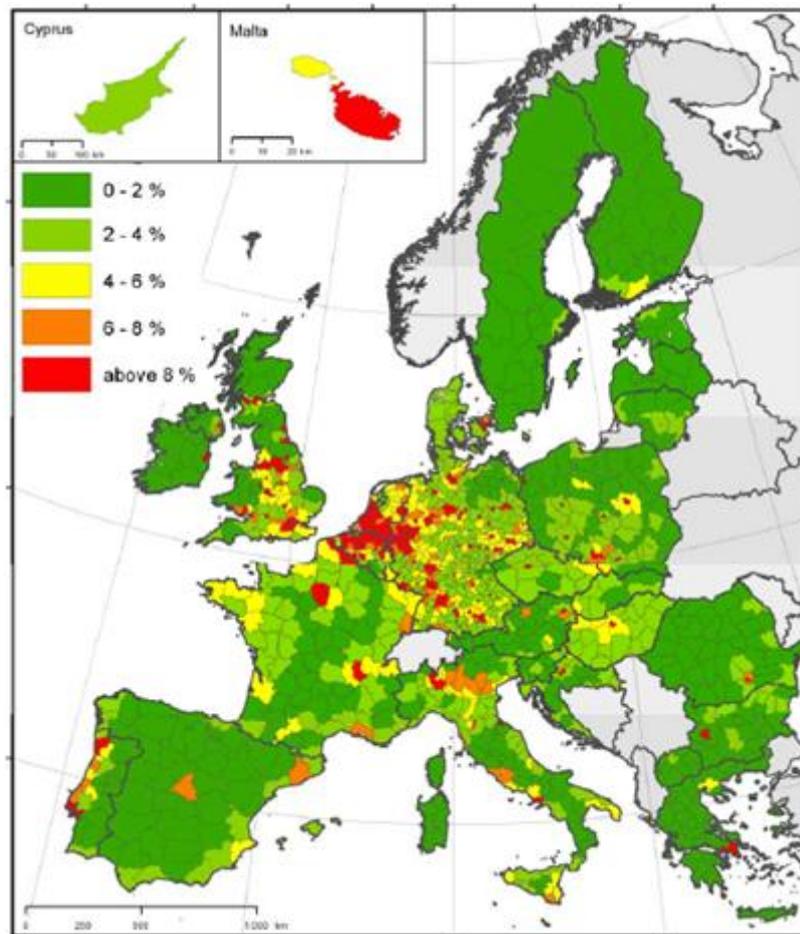


Figura 2.8 Percentuale di suolo impermeabilizzato nel 2006 per i Paesi EU27 in base alla terza classe NUTS (Fonte: Soil Sealing Map Copernicus) (Prokop et al. 2011).

Gli stessi numeri possono essere rielaborati con i dati sulla popolazione, offrendo la possibilità di analizzarli in base alle densità (Figura 2.9). Sotto questo punto di vista, la media europea è di 389 m² per persona di urbanizzato e di 200 m² di impermeabilizzato, con Cipro, Finlandia, Bulgaria, Estonia, Romania, Svezia e Lituania che risultano essere i Paesi con più copertura artificiale, mentre se si guarda all'effettivo suolo consumato, allora il primato spetta a Cipro, Lituania, Finlandia, Lettonia, Estonia ed Ungheria.

¹ Le NUTS (*Nomenclature des Unités Territoriales Statistiques*) sono state introdotte da Eurostat per avere una ripartizione del territorio che si basasse sulle unità amministrative locali e sulla popolazione (la terza classe comprende quelle unità amministrative con popolazione superiore ai 150.000 abitanti ed inferiore agli 800.000; nel caso dell'Italia equivale alle province).

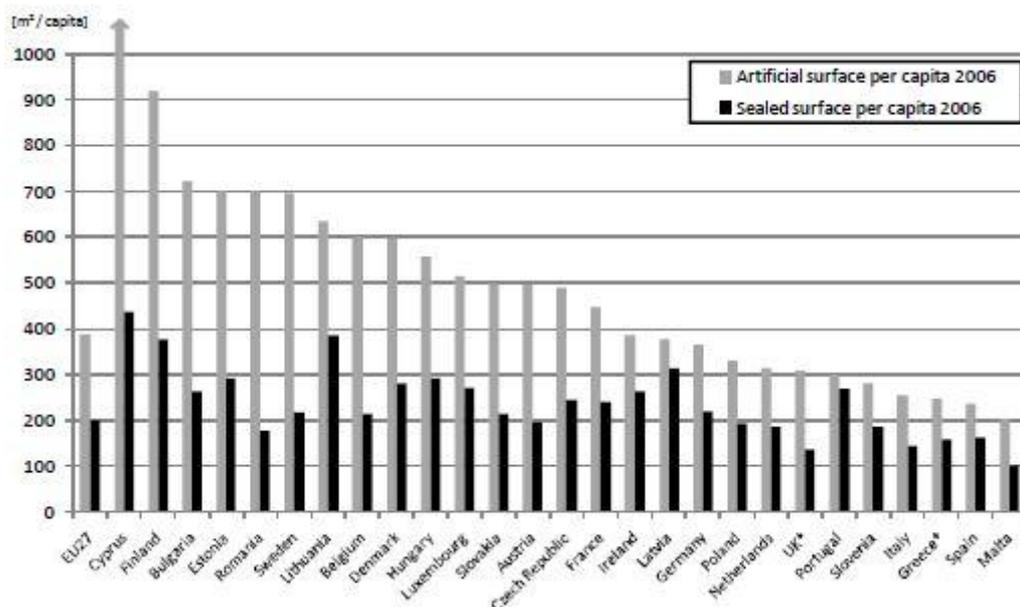


Figura 2.9 Superficie artificiale per persona (in grigio, fonte: CORINE Land Cover) e superficie impermeabilizzata per persona (in nero, fonte: Soil Sealing Map Copernicus) nel 2006 per i paesi EU27 (Prokop et al. 2011).

Predominano i Paesi dell’Est perché in genere alti valori di densità di urbanizzato indicano una dispersione dell’edificato, fenomeno molto diffuso in questi posti; Cipro invece presenta numeri elevati vista la cospicua affluenza di turisti in rapporto alla popolazione residente. Di contro, dall’altra parte del grafico sono presenti quelle realtà nelle quali la gran parte delle persone vive in città, come Malta, Spagna, Grecia ed Italia.

Volendo invece ricostruire l’andamento del fenomeno nel tempo, si possono confrontare le densità di urbanizzazione in rapporto alla popolazione derivate dal CORINE per gli anni 1990, 2000 e 2006 (Figura 2.10). Si osserva un generale aumento di esse, ma è opportuno notare che i Paesi dell’Est, come Romania, Bulgaria ed Estonia, vedono incrementare la densità di urbanizzato anche per un aumento dell’emigrazione; al contrario Spagna, Portogallo, Irlanda e Paesi Bassi sono stati protagonisti di bolle economiche che hanno portato ad un’intensificazione dell’attività edilizia. Ci sono infine nazioni come Francia, Austria e Lussemburgo che hanno visto decrescere i valori, grazie ad opportune politiche di controllo del territorio che sono riuscite a contenere l’occupazione di nuovi spazi nonostante l’aumento di popolazione.

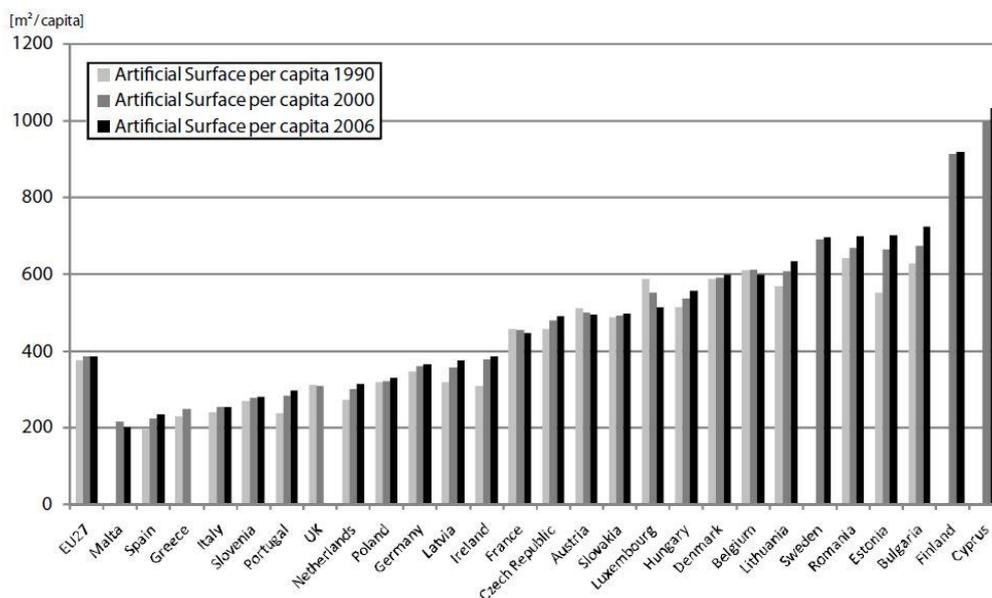


Figura 2.10 Densità di urbanizzazione per gli anni 1990, 2000 e 2006 per i Paesi EU27 (fonte: CORINE Land Cover) (Prokop et al. 2011).

I ritmi di crescita dell'urbanizzazione, assoluta e relativa agli abitanti, sono mostrati nella Figura 2.11 e nella Figura 2.12, dove vengono riportati i dati medi annui relativi al periodo 1990-2000 e 2000-2006. Il valore medio europeo è di 100.640 ha/anno per la prima decade e 92.016 ha/anno per la seconda; in termini di densità si passa dai 2,1 a 1,9 m² pro capite.

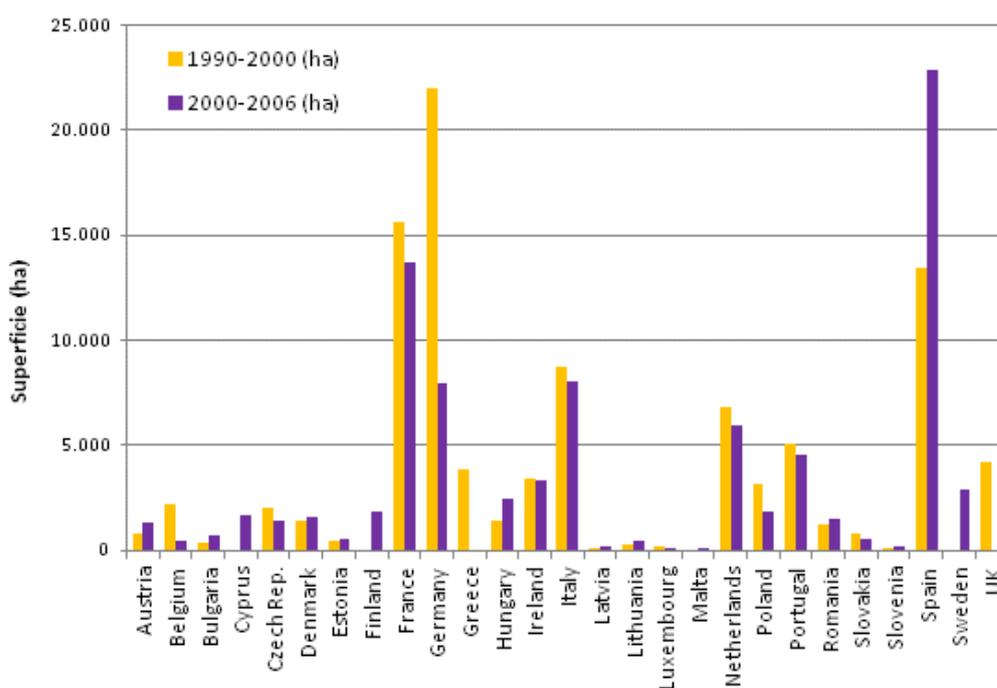


Figura 2.11 Aumento annuale delle superfici artificiali per i periodi 1990-2000 e 2000-2006 per i Paesi EU27 (fonte: CORINE Land Cover).

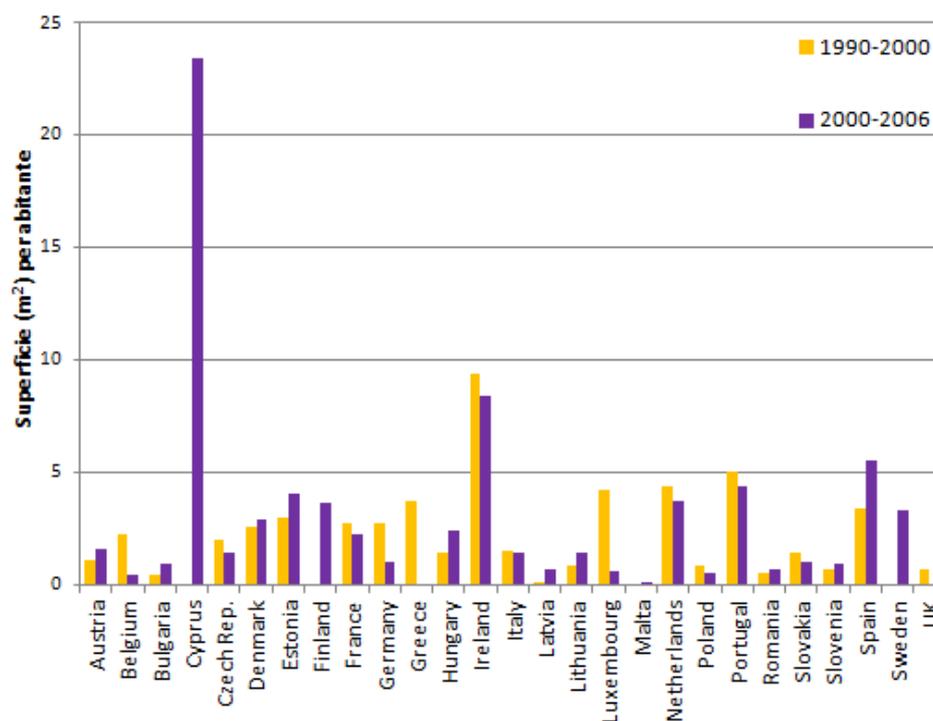


Figura 2.12 Aumento annuale delle superfici artificiali per abitante per i periodi 1990-2000 e 2000-2006 per i Paesi EU27 (fonte: CORINE Land Cover).

Analizzando le singole situazioni, si vede che tra il 1990 ed il 2000 Germania, Francia e Spagna hanno i valori più alti in termini di nuovo suolo occupato, mentre come densità per abitante il primato spetta ad Irlanda, Portogallo e Paesi Bassi. Nel periodo 2000-2006, i rispettivi ruoli passano a Spagna, Francia ed Italia per valori assoluti, e a Cipro, Irlanda e Spagna per densità. La Spagna tra l'altro è l'unico Paese "occidentale" (se si esclude la Danimarca) ad aumentare i valori dal primo periodo al secondo, a riprova dal suo boom edilizio, sfociato poi nella crisi economica del 2008; al contrario, Belgio, Repubblica Ceca, Germania, Lussemburgo, Polonia e Slovacchia hanno avuto un mercato decremento.

Per lo stesso periodo (2000-2006) sono disponibili anche i dati in percentuale rispetto alla superficie iniziale del 2000. Questi valori sono riportati nella Figura 2.13, affiancati a quelli riguardanti la variazione di popolazione, per mettere in risalto come nella maggior parte dei casi l'aumento dell'edificato sia sempre superiore in proporzione a quello del numero degli abitanti.

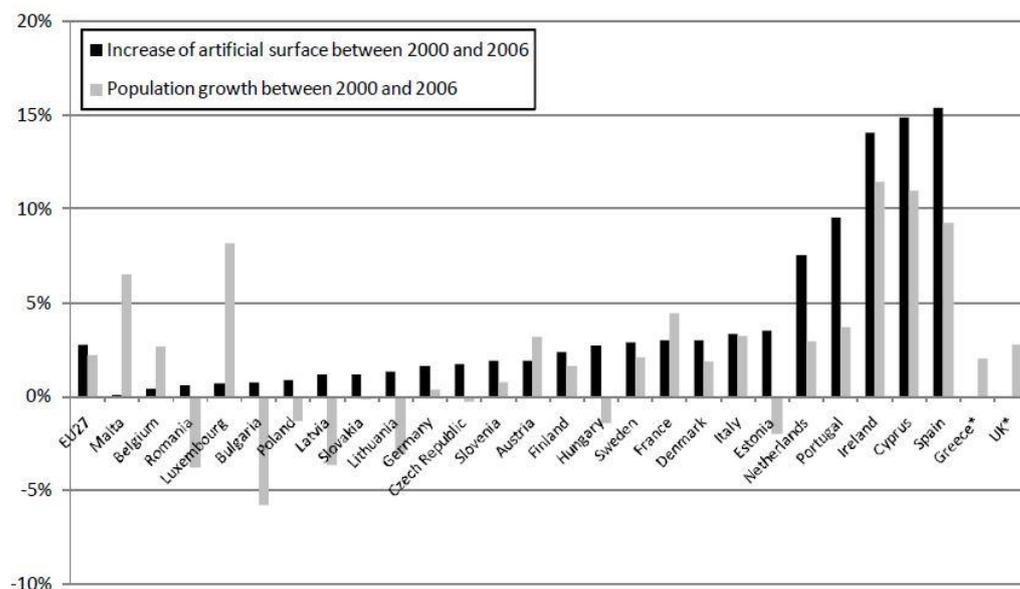


Figura 2.13 Confronto tra crescita percentuale delle superfici artificiali (in nero, fonte: CORINE Land Cover) e crescita percentuale della popolazione (in grigio, fonte: EUROSTAT) nel periodo 2000-2006 (Prokop et al. 2011).

Anche da questo diagramma Spagna, Cipro e Irlanda risultano essere i Paesi che hanno aumentato la superficie urbanizzata non solo come quantità assoluta, ma anche come percentuale del proprio territorio già artificiale; il fenomeno è reso in maniera più visibile nella Figura 2.14, dove sono riportate in rosso le aree che hanno conosciuto un maggior grado di urbanizzazione rispetto alla superficie esistente.

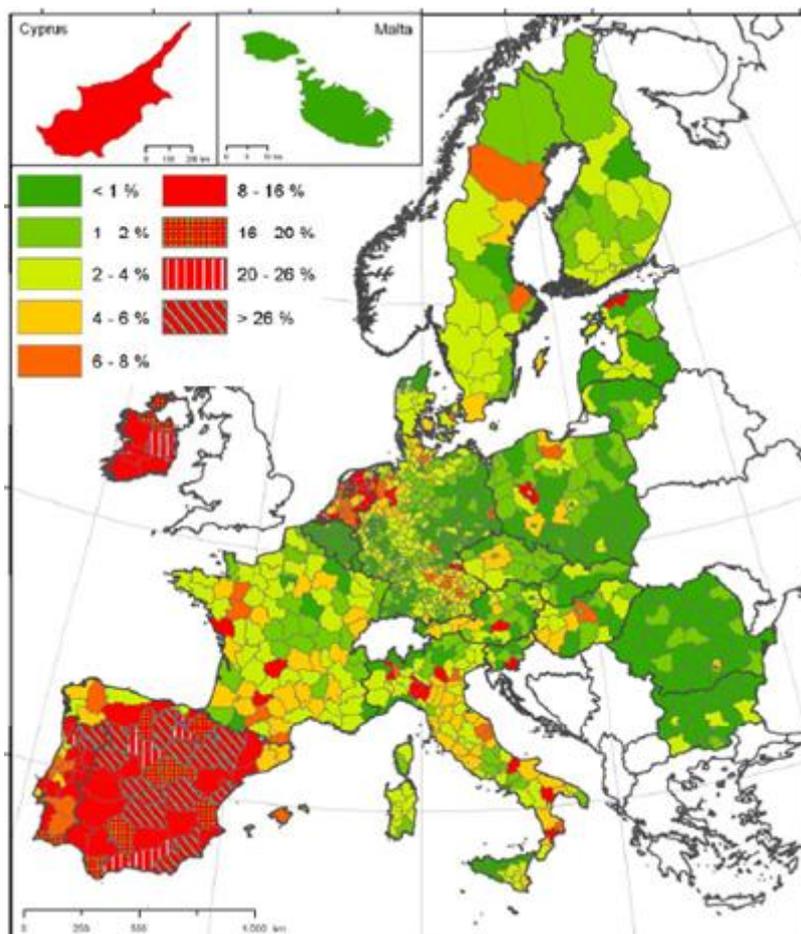


Figura 2.14 Aumento in percentuale delle superfici artificiali tra il 2000 ed il 2006 per i Paesi EU27 in base alla terza classe NUTS (Fonte: CORINE Land Cover) (Prokop et al. 2011).

2.2.4 L'Italia ed il consumo di suolo

I dati sul consumo di suolo in Italia risentono della conformazione fisica che la caratterizza e che va ad incidere soprattutto sulla distribuzione spaziale del territorio urbanizzato. Esso infatti si concentra maggiormente nelle zone della Pianura Padana e lungo le coste.

Per quel che riguarda le fonti numeriche, si può far riferimento ai dati già sopra descritti, inerenti il CORINE *Land Cover* ed il *Soil sealing map* del progetto Copernicus, a cui si aggiungono quelli dell'ISPRA, pubblicati nel rapporto "Il consumo di suolo in Italia" (Munafò and Tombolini 2014).

Nell'anno 2006, secondo l'Agencia Europea dell'Ambiente, la percentuale di superfici artificiali presenti era pari al 5%, mentre quelle impermeabilizzate al 2,8%, valori entrambi leggermente superiori alla media europea. La Figura 2.15 ci permette di entrare più nel dettaglio, poiché riporta la distribuzione

dell'impermeabilizzato in base alle province (dato del Copernicus per la terza classe delle NUTS).

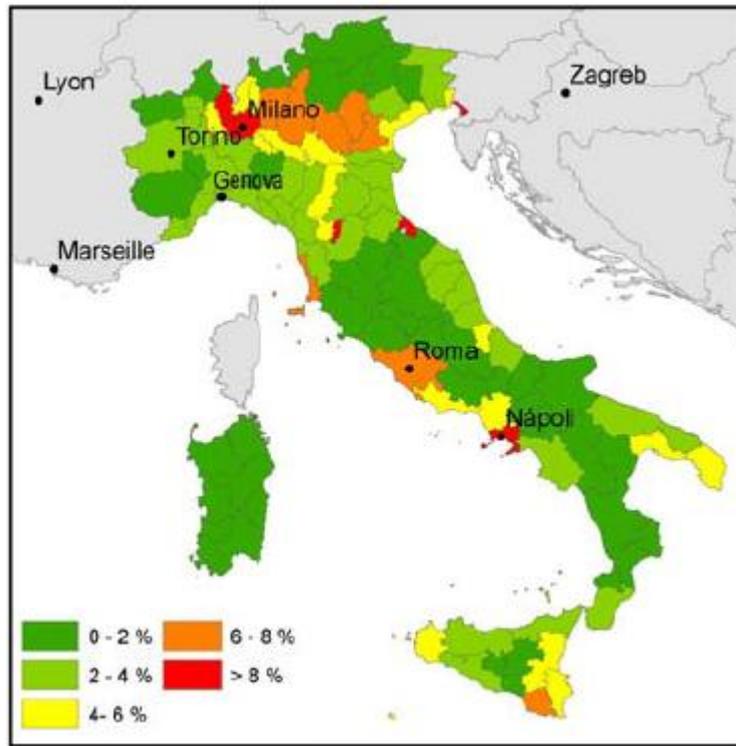


Figura 2.15 Percentuale di superfici impermeabili per il 2006 in base alla terza classe delle NUTS (Fonte: Soil Sealing Map Copernicus) (Prokop et al. 2011).

Le situazioni peggiori, con una superficie consumata maggiore dell'8%, sono quelle delle province di Milano, Trieste, Prato, Rimini e Napoli; in generale, si osservano valori abbastanza alti nella zona compresa tra Veneto e Lombardia e nella fascia tra Roma e Napoli. Questo avviene perché la distribuzione della popolazione italiana è maggiormente concentrata negli agglomerati urbani (oltre il 60%) e circa un terzo risiede in città con più di 50.000 abitanti.

L'andamento dell'urbanizzazione offerto dal CORINE *Land Cover* mostra una crescita di circa 80.000 ettari tra il 1990 ed il 2000 (equivalente a più del 6%) e di 50.000 ettari tra il 2000 ed il 2006 (poco più del 3%); la maggior parte di tutte queste trasformazioni si è concentrata in Piemonte, Lombardia, Veneto, Emilia-Romagna, Toscana e Sardegna.

Un'analisi più dettagliata è sicuramente quella offerta dallo studio svolto dall'ISPRA (Munafò and Tombolini 2014) che si è basato su una rete di circa 150.000 punti sparsi su tutto il territorio e stratificati su tre livelli: nazionale, regionale e comunale.

Essi sono stati fotointerpretati, dando un valore binario (0: suolo non impermeabilizzato, 1: suolo impermeabilizzato), in base alla cartografia dell'IGM e ad alcune ortofoto disponibili per vari periodi (anni '50, 1989, 1996, 1998, 2006, 2009, 2012). Questi dati ci dicono che, a partire dagli anni '50, la superficie impermeabilizzata nazionale è passata da 8.700 km² (2,9%) a 21.890 km² (7,3%) nel 2012, con un consumo di suolo medio di 70 ettari al giorno. Il grafico della Figura 2.16 riporta l'andamento nazionale confrontato con le macroaree geografiche italiane e mette in risalto gli elevati valori del Nord-Ovest (sede dello storico triangolo industriale Milano – Torino – Genova), ai quali però, a partire dagli anni '90, si sono andate avvicinando anche le regioni del Nord-Est, dove è concentrata la maggior parte del territorio della Pianura Padana.

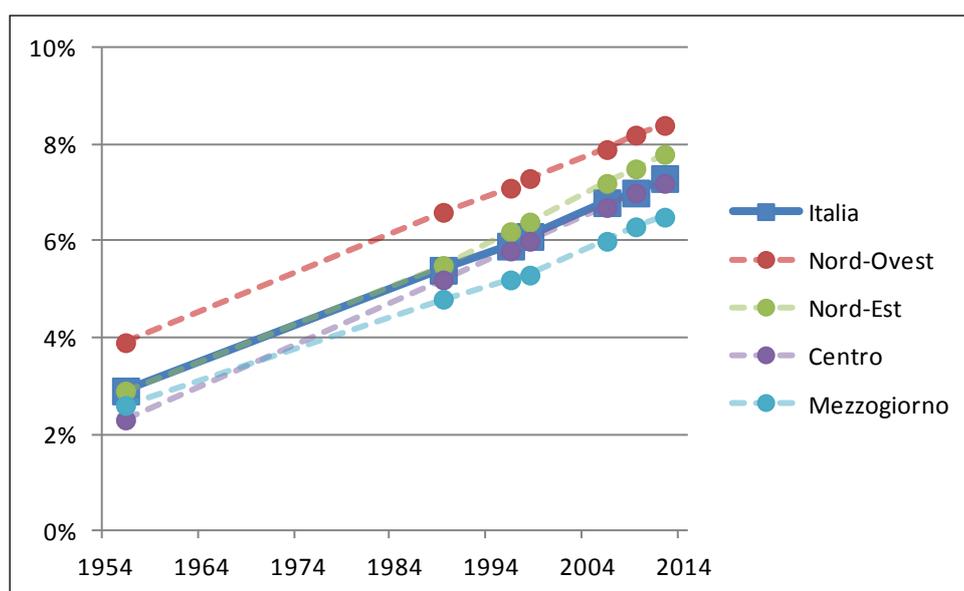


Figura 2.16 Andamento della percentuale di superfici impermeabilizzate per l'Italia e per le quattro macroaree geografiche (fonte: ISPRA).

Spostando l'attenzione sulle singole regioni, Lombardia e Veneto detengono il primato di territori maggiormente cementificati (10,6% e 10,5% rispettivamente) nel 2012, seguite da Campania (9,15%), Lazio (8,8%), Emilia-Romagna (8,55%), Puglia e Sicilia (entrambe 8,5%). Queste percentuali vengono confrontate con quelle riguardanti gli anni '50 nella Figura 2.17.

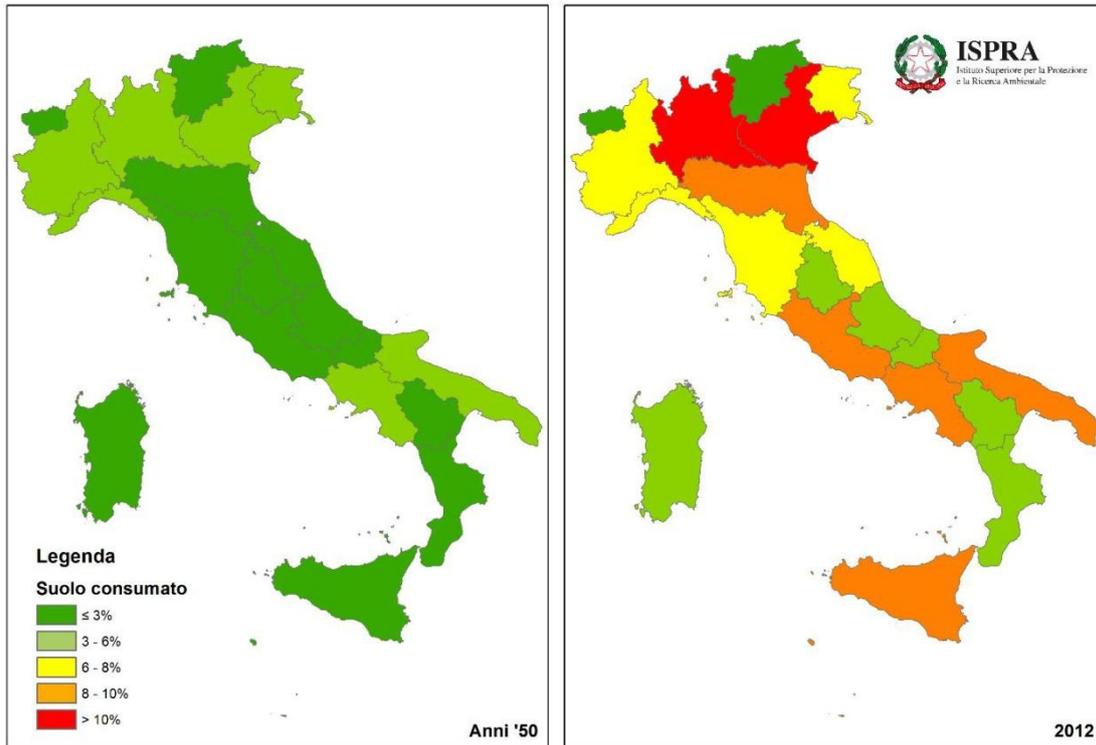


Figura 2.17 Percentuale di superfici impermeabilizzate a livello regionale negli anni '50 e nel 2012 (Munafò and Tombolini 2014).

Il medesimo studio dell'ISPRA ha previsto una raccolta di dati anche a livello dei principali comuni italiani, infittendo la rete di punti per il monitoraggio. I risultati sono mostrati nella Figura 2.18, dove si osservano percentuali molto più alte di quelle descritte a livello regionale, dovute alla natura pienamente urbana degli ambiti territoriali considerati. Le città con la peggiore situazione sono Torino, Milano, Pescara e Napoli, giacché più della metà della loro superficie è impermeabilizzata; la situazione cambierebbe se si prendessero i dati in termini assoluti, riportando quindi l'estensione totale dell'*impervious* e non come percentuale del territorio comunale. In questo caso la prima posizione spetterebbe a Roma, con i suoi 34.068 ettari misurati nel 2007, seguita da Milano e Ravenna.

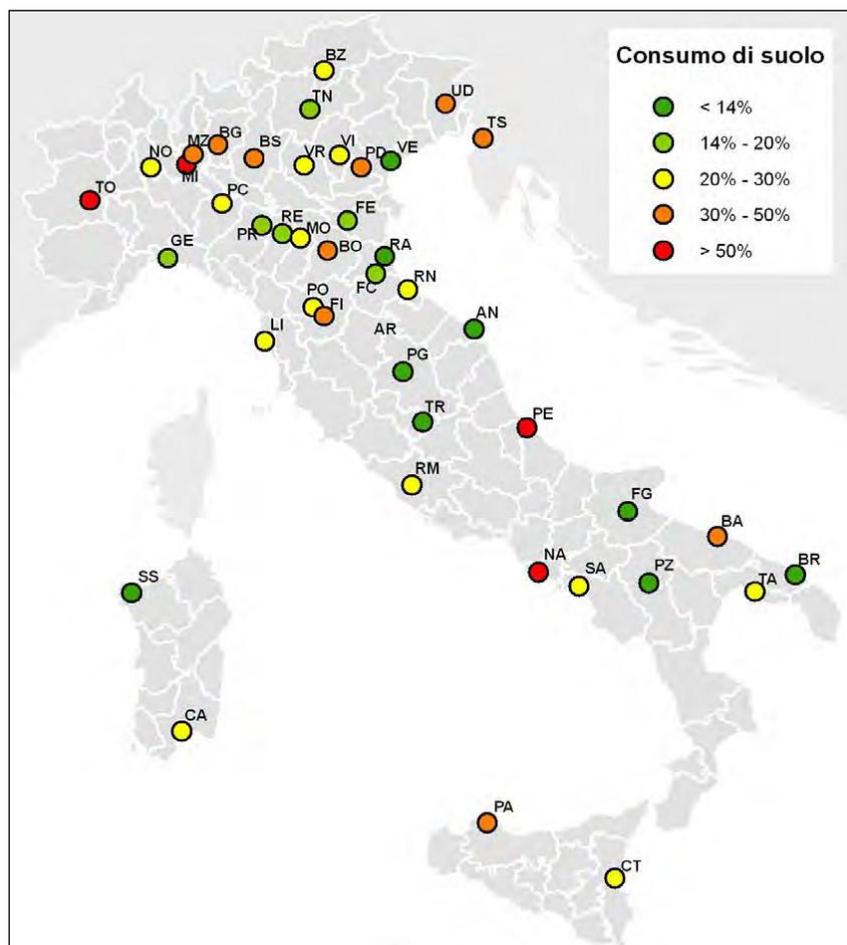


Figura 2.18 Percentuale di superfici impermeabilizzate per i principali comuni nel 2012 (fonte: ISPRA).

Più dettagliata appare un'altra mappa prodotta da ISPRA (Figura 2.19), realizzata sulla base dell'impermeabilizzato del Copernicus per il 2009 rielaborato su base comunale. Il risultato è un quadro più dettagliato rispetto al dato regionale e che permette di evidenziare in modo più efficace la distribuzione spaziale del fenomeno.

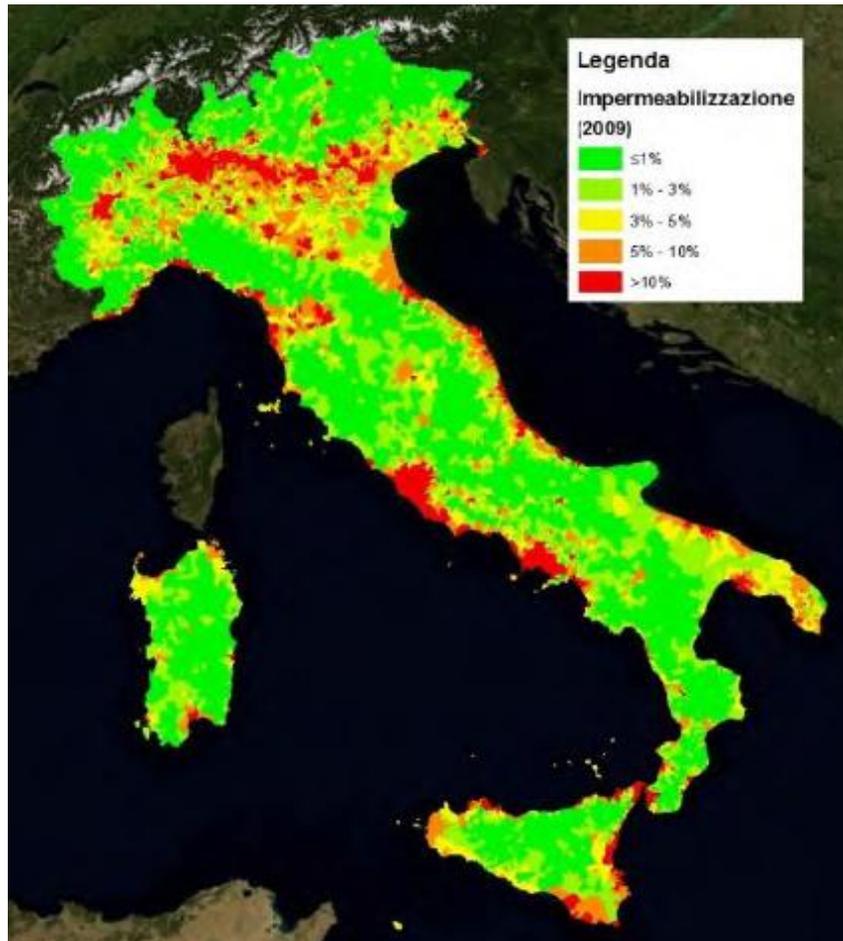


Figura 2.19 Percentuale di impermeabilizzazione del suolo su base comunale per il 2009 (Fonte: Soil Sealing Map Copernicus; Elaborazione: ISPRA).

Innanzitutto viene evidenziata la situazione della Pianura Padana, dove si osservano valori di *impervious* medio - alti, maggiormente concentrati intorno a Milano e più bassi nella zona attorno al delta del Po. L'altro punto "caldo" è sicuramente la fascia compresa tra Roma e Napoli, visto l'elevato numero di residenti delle due città (insieme hanno quasi 4.000.000 di abitanti) e le zone densamente abitate del loro *hinterland*. La terza preoccupante situazione è quella delle coste, in particolar modo quella adriatica. Se si esclude la zona del Gargano, per via della sua conformazione rocciosa, da Ravenna fino a Taranto c'è una sorta di urbanizzato diffuso dove si fa fatica a trovare spazi naturali, specie nella parte che dall'Emilia-Romagna scende giù fino a Pescara. Questo fenomeno è reso evidente anche dal grafico della Figura 2.20, dove viene riportato l'andamento del consumo di suolo in funzione dell'altitudine sul mare: si vede come a quote più basse le percentuali sono molto più alte di quelle dai 1000 metri in su. Ciò giustifica anche il fatto che, in

corrispondenza di Alpi ed Appennini, l'estensione dell'impermeabilizzato rimanga limitata.

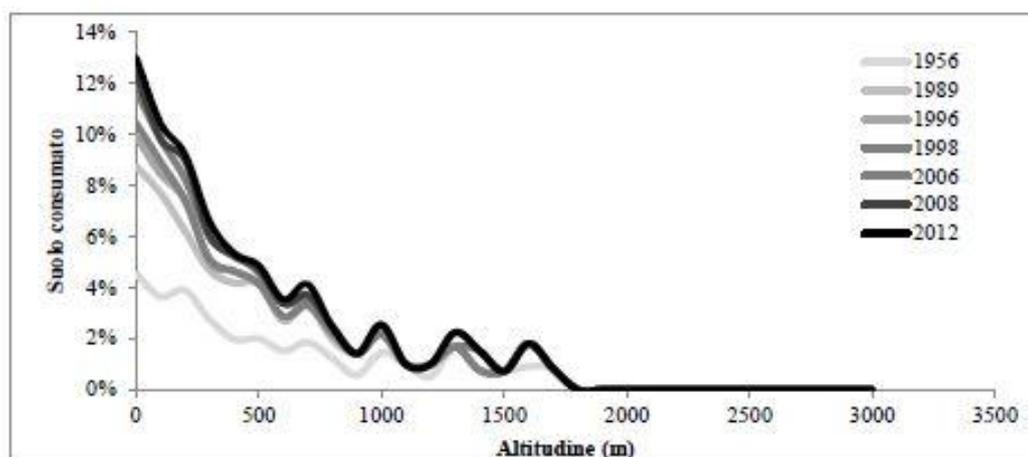


Figura 2.20 Andamento del consumo di suolo negli anni in base all'altitudine (Munafò and Tombolini 2014).

Dal punto di vista demografico, si può dire che anche in Italia, come nella maggior parte dei Paesi europei, il consumo di suolo, in proporzione, è aumentato molto di più rispetto alla crescita della popolazione. Più in dettaglio, si è passati dai 178 m²/abitante degli anni '50 ai 369 del 2012; il raddoppio della cifra è dovuto al fatto che, come già scritto in precedenza, l'aumento di residenti non implica solo una maggior richiesta di alloggi, ma anche di tutti i servizi e le infrastrutture relative. In tal senso è interessante analizzare anche quali sono le costruzioni che pesano di più sul consumo di suolo, con edifici e capannoni che costituiscono il primo contributo e coprono il 30% del totale, ma subito dopo, con il 28%, ci sono strade asfaltate e ferrovie che quindi danno l'idea del contributo delle infrastrutture all'impermeabilizzazione del suolo (Munafò and Tombolini 2014). Se si aggiungesse il 19% dovuto a strade sterrate ed altre strutture viarie, allora le reti di trasporto diverrebbero la prima voce in assoluto.

Assodati quindi i diversi ritmi di crescita di urbanizzato e popolazione, restano però da fare alcune considerazioni di respiro più ampio sulle dinamiche che hanno portato alla cementificazione, in alcuni casi selvaggia, dell'Italia. Molto è frutto del boom economico degli anni '60, che portò molte persone a trasferirsi dalla campagna alla città, con una crescita della domanda abitativa che sfociò nell'intensificazione dell'attività edilizia. Inoltre nello stesso periodo iniziò la

costruzione di tutta quella rete infrastrutturale che potesse essere in grado di garantire un adeguato sviluppo industriale. Bisogna rilevare come in quel periodo le conoscenze della pianificazione territoriale erano ovviamente relative ed in più mancava la coscienza ambientale che iniziò a manifestarsi dalla fine degli anni '70 in poi.

Cambiamenti di tipologia di domanda abitativa sono invece alla base dell'attività edile degli ultimi decenni. L'innalzamento dei prezzi degli immobili nelle grandi città, unito alla congestione del traffico cittadino e al desiderio di vivere in ambiti meno inquinati e più funzionali, ha portato molte famiglie a spostarsi nell'immediato *hinterland* dei principali centri urbani (Gardi, Dall'Olio, and Salata 2013). A questo bisogna aggiungere anche il cambiamento nella tipologia dei nuclei familiari, nel senso che si è abbassato il numero medio di persone che la compongono, portando ad esigenze diverse in termini di spazi abitativi. Contemporaneamente molti piccoli centri, in cerca di uno sviluppo più fiorente, sono andati a dotarsi della propria zona industriale, riempiendo il territorio di capannoni che ad oggi risultano inutilizzati, complice anche l'attuale crisi economica. Infine il proliferare di centri commerciali, con annessa viabilità per essere raggiunti facilmente da qualsiasi punto, ha contribuito, assieme a tutto il resto, al fenomeno dell'*urban sprawl*, per cui quegli spazi tra un centro abitato e l'altro sono andati via via riempiendosi, pur mantenendo un tessuto non troppo denso. È questo il triste quadro che si è andato a delineare nelle zone di pianura di Lombardia, Veneto ed Emilia-Romagna, nonché lungo tutto l'asse che collega Roma a Napoli, andando a sostituire paesaggi storici, come ad esempio quello dell'Agro romano (Settis 2012), con costruzioni completamente al di fuori del contesto.



Figura 2.21 Tratto della campagna dell'Agro Romano.

In questo discorso si inseriscono le colpe della politica, che ha contribuito a creare un sistema in cui ogni Comune fa pianificazione territoriale senza avere l'obbligo di confrontarsi con i comuni vicini. In aggiunta, il meccanismo degli oneri di urbanizzazione ha fatto precipitare ancora di più la situazione. Dal 2001, infatti, i contributi di chi costruiva nuovi edifici, previsti dalla legge Bucalossi (L. 10/1977), e che dovevano essere versati nelle casse comunali solo per affrontare le spese e i servizi inerenti la nuova urbanizzazione, sono diventati disponibili anche per le spese correnti (D.P.R. 380/2001). Di conseguenza tali oneri offrono ad ogni Comune l'opportunità di "fare cassa", lasciando sul territorio ferite non sempre realmente necessarie. Lo stesso risultato è quello creato dal cambio d'uso dei terreni, per cui, con delle varianti sul PRG vigente, un appezzamento agricolo può essere dichiarato edificabile. Il Comune ottiene il suo guadagno con gli oneri di urbanizzazione, il privato che invece decide di acquistare tale terreno e di edificarlo può poi rivenderlo ad un prezzo nettamente superiore, generando vera e propria speculazione edilizia.

2.3 IMPATTI DEL CONSUMO DI SUOLO

2.3.1 Frammentazione degli habitat

La maggior parte delle nuove urbanizzazioni avviene a discapito dei territori agricoli; nel caso in cui ci si trovi in contesti di un'agricoltura non eccessivamente intensiva, questo può riflettersi sulla modifica di eventuali habitat e reti ecologiche esistenti (Cushman 2006).

Per rete ecologica s'intende un "sistema interconnesso di habitat, di cui salvaguardare la biodiversità, ponendo quindi attenzione alle specie animali e vegetali potenzialmente minacciate" (www.isprambiente.gov.it). Essa si compone di diversi elementi interconnessi tra di loro:

- aree centrali (*core areas*): aree ad alta naturalità che sono già, o possono diventare, soggette a regime di protezione
- fasce di protezione (*buffer zones*): zone cuscinetto, o zone di transizione, collocate attorno alle aree ad alta naturalità al fine di garantire l'indispensabile gradualità degli habitat
- fasce di connessione (corridoi ecologici): strutture lineari e continue del paesaggio, di varie forme e dimensioni, che connettono tra di loro le aree ad alta naturalità e rappresentano l'elemento chiave delle reti ecologiche poiché consentono la mobilità delle specie e l'interscambio genetico, fenomeno indispensabile al mantenimento della biodiversità
- aree puntiformi o "sparse" (*stepping stones*): aree di piccola superficie che, per la loro posizione strategica o per la loro composizione, rappresentano elementi importanti del paesaggio per sostenere specie in transito su un territorio oppure ospitare particolari microambienti in situazioni di habitat critici.

Nel caso del paesaggio agrario, gli elementi maggiormente presenti sono macchie arboree e piccole aree umide che possono essere considerate delle *stepping stones*, spesso collegate da corridoi come fasce ripariali o siepi arbustive. Questi lembi di naturalità riescono ad essere estremamente importanti per alcune specie animali, soprattutto a livello di micro mammiferi, ma sono gravemente minacciati dalle

nuove urbanizzazioni. Il pericolo più grande viene dalla realizzazione di infrastrutture viarie che possono compromettere i loro equilibri, creando frammentazione degli habitat o, nel peggiore dei casi, distruzione degli stessi (Trombulak and Frissell 2000).



Figura 2.22 Frammentazione creata da ferrovia, TAV e autostrada (Romano, Ciabò, and Fabrizio 2009).

L'alterazione degli habitat spesso si ripercuote anche sull'aspetto paesaggistico del territorio: oltre ad eliminare preziosi frammenti di naturalità, infatti, l'urbanizzazione, se non supportata da un'adeguata pianificazione, determina veri e propri scempi, specie in quei luoghi ricchi di bellezze storico-artistiche e naturali di cui l'Italia abbonda.

2.3.2 Rischio idraulico

L'impatto più immediato e tangibile dell'impermeabilizzazione è sicuramente quello sul ciclo idrogeologico: in ambito urbano, infatti, le superfici artificiali vanno ad alterare le quantità delle varie componenti degli scambi idrici. Normalmente l'acqua piovana che giunge a terra dà origine a tre fenomeni differenti, vale a dire l'evapotraspirazione (congiuntamente alle piante), l'infiltrazione ed il deflusso

superficiale. In questi processi il suolo gioca un ruolo fondamentale nel regolare nel modo migliore le diverse distribuzioni, ma con la sua impermeabilizzazione vengono meno le proprietà fisiche, chimiche e biologiche che lo caratterizzano e questo si riflette in un'alterazione dei vari scambi. L'acqua infatti, non riuscendo più a infiltrarsi, tende a scorrere in superficie, aumentando quindi la componente del deflusso superficiale a spese dell'infiltrazione nel sottosuolo (McCarron and Livingston 1992); l'effetto è tanto più marcato quanto maggiore è il grado di impermeabilizzazione (Figura 2.23). La conseguenza più disastrosa di queste alterazioni è rappresentata dai numerosi e spesso tragici allagamenti che avvengono in città in corrispondenza di piogge abbondanti o particolarmente violente. I sistemi di drenaggio urbano non riescono a far defluire tutta la quantità di acqua che cade e i danni provocati sono ingenti.

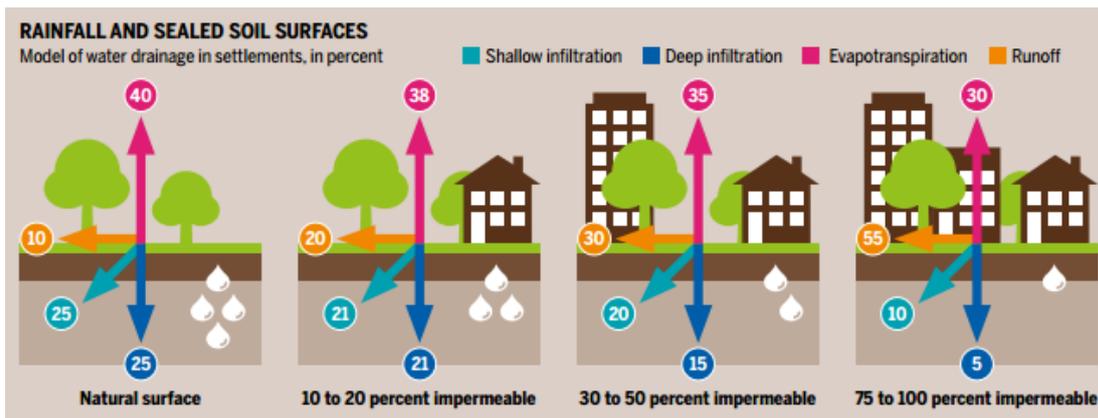


Figura 2.23 Influenza delle superfici impermeabili sul ciclo idrogeologico (Alexandratos and Bruinsma 2012) (elaborazione: Soil Atlas, 2015).

Inoltre, l'aumento dello scorrimento superficiale fa sì che il flusso idrico tenda a portare con sé materiali di origine diversa, come particelle organiche e sedimenti, ma anche metalli pesanti. Essi, non potendo essere trattiene nel terreno o decomposti dai microrganismi, al termine del loro percorso andranno a riversarsi in fiumi, laghi e habitat acquatici, peggiorandone la qualità (Xian, Crane, and Su 2007). Considerando invece l'elemento dell'infiltrazione, bisogna sottolineare come un minor apporto di acqua nel sottosuolo si rifletta in un abbassamento della capacità di ricarica della falda idrica (Brun and Band 2000), già spesso in sofferenza in ambito

urbano. Inoltre, in una situazione di limitata funzionalità del suolo, anch'essa può essere raggiunta più facilmente da inquinanti di vario tipo.

Infine la riduzione dell'evapotraspirazione va a contribuire al problema delle "isole di calore": con questa terminologia ci si riferisce alla temperatura mediamente più alta che si registra in città e che genera un microclima più caldo (Weng and Lu 2008; Xian 2008). Le cause di questo fenomeno sono il maggior assorbimento di energia dal sole dovuto alle superfici scure asfaltate o in calcestruzzo, ai tetti e alle pietre, insieme al calore prodotto dal condizionamento e raffreddamento dell'aria, oltre a quello di origine veicolare. A tutto questo si somma anche la minor presenza di vegetazione che, con un più basso tasso di evapotraspirazione, fa mancare il suo effetto mitigatore sulla temperatura.

2.3.3 Sicurezza alimentare

Come già scritto prima, la maggior parte delle nuove urbanizzazioni avviene a discapito di terreni agricoli, sottraendoli alla produzione alimentare; tale cambio d'uso del suolo a livello locale può sembrare un effetto di poca importanza, ma, se considerato nell'ottica delle dinamiche socio-demografiche mondiali, s'inserisce in alcune problematiche cruciali per la società globale.

Secondo le proiezioni del "Millennium Ecosystem Assessment" (Nelson et al. 2006), uno studio promosso dall'ONU per studiare l'impatto dei cambiamenti degli ecosistemi sul benessere umano, nel 2050 la popolazione mondiale passerà dai sette miliardi attuali ai nove miliardi di individui. L'incremento demografico, congiuntamente alla crescita economica, porterà ad un aumento della domanda alimentare compreso tra il 70% e l'85%, maggiormente concentrato in Cina ed India. Proprio il miglioramento del benessere (si stima che il PIL, sempre per il 2050, diventerà fra tre e sei volte superiore all'odierno), oltre a far salire la richiesta del cibo, determinerà per le popolazioni delle economie emergenti dei cambiamenti a livello di dieta, favorendo la frazione proteica animale (Tabella 2.1). Essendo però l'efficienza di conversione dalle proteine vegetali a quelle animali pari a circa il 10% (Godfray et al. 2010), questo si tradurrà in una richiesta di suolo agricolo, in proporzione, maggiore dell'attuale.

	Unit	1961/1963	2005/2007	2030	2050
World					
Population#	million persons	3 133	6 569	8 276	9 111
Daily energy supply (DES)	kcal/person/day	2 231	2 772	2 960	3 070
Total production*	index (2005/2007 = 100)	37	100	138	160
Cereals**	million tonnes	843	2 068	2 720	3 009
Meat production	million tonnes	72	258	374	455
Developing countries					
Population	million persons	2 140	5 218	6 839	7 671
Daily energy supply (DES)	kcal/person/day	1 884	2 619	2 860	3 000
Total production	index (2005/2007 = 100)	24	100	147	177
Cereals	million tonnes	353	1 164	1 572	1 812
Meat production	million tonnes	20	149	243	317
Developed countries					
Population	million persons	1 012	1 351	1 437	1 439
Daily energy supply (DES)	kcal/person/day	2 983	3 360	3 430	3 490
Total production	index (2005/2007 = 100)	64	100	118	124
Cereals	million tonnes	500	904	1 148	1 197
Meat production	million tonnes	52	109	130	138

UN 2008 Assessment (Medium-fertility variant); the countries included in this study cover in 2005/2007 99.7% of the world population.

* In value terms (2004/06 International Commodity Prices).

** Including rice in milled form.

Tabella 2.1 Aumento della popolazione, del fabbisogno di calorie e della produzione agricola (Alexandratos and Bruinsma 2012).

Questa domanda di cibo, assieme ad altre considerazioni, ha fatto sì che negli ultimi anni sia iniziato il meccanismo del cosiddetto *land grabbing*, traducibile in italiano con l'espressione "accaparramento delle terre". Poiché la disponibilità di terreni negli Stati più ricchi è infatti sempre più limitata, c'è la tendenza ad acquisire suolo in quei Paesi dove, complici dei governi spesso corrotti, la terra viene venduta ad un prezzo sicuramente più competitivo rispetto a quelli di mercato. Il fenomeno riguarda soprattutto l'Africa, ma anche nazioni dell'Est Europa hanno colto la possibilità di guadagno: ad esempio in Romania negli ultimi 10 anni il valore della terra è aumentato del 40% (Nolte and Ostermeier 2015). Il risultato è rappresentato da circa 45 milioni di ettari, una superficie di poco inferiore alla Spagna, acquisito in tutto il mondo dal 2007 ad oggi (<http://www.farmlandgrab.org/>) (Figura 2.24), secondo quanto documentato dall'ONG Grain, che però ha tenuto conto solo di tutti i contratti regolarmente registrati.

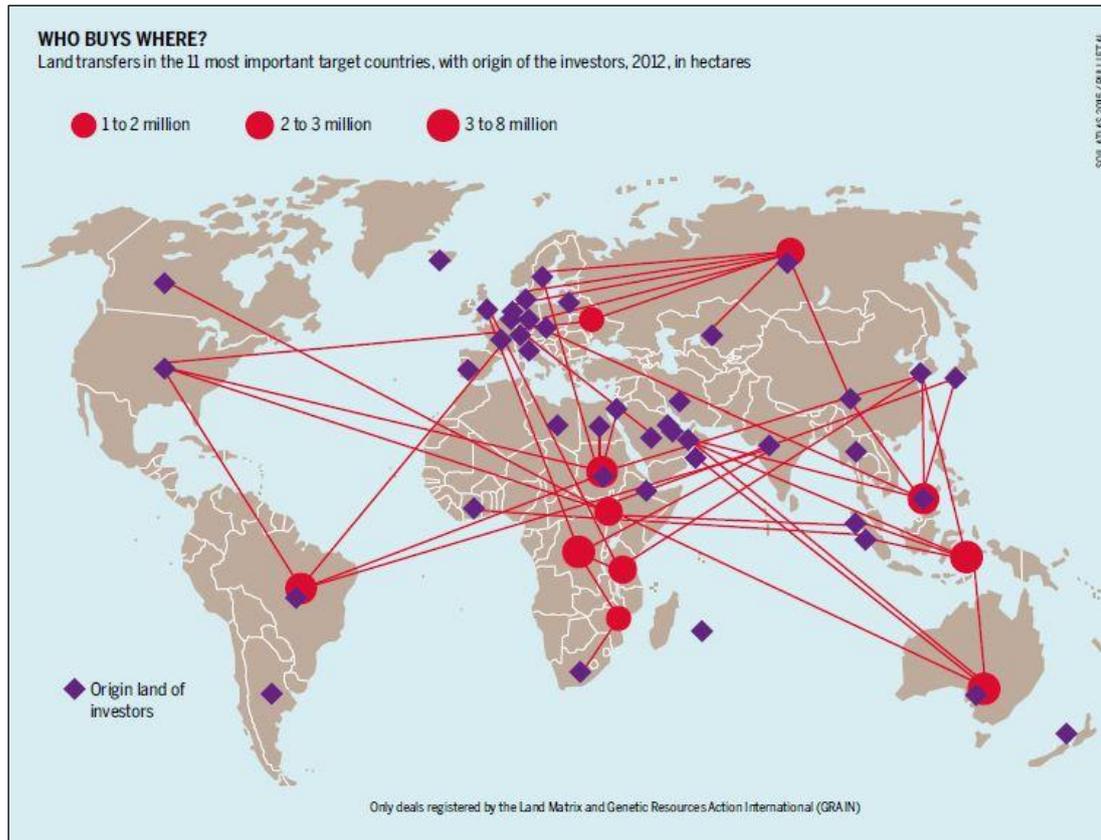


Figura 2.24 Land grabbing: Paesi di origine degli investitori e Paesi di investimento (<http://www.farmlandgrab.org/>) (elaborazione: Soil Atlas 2015).

Oltre alla necessità alimentare, l'altra spinta preponderante per queste acquisizioni arriva dalla richiesta dei biocarburanti, e quindi da tutte quelle colture, principalmente canna da zucchero e mais, che serviranno per produrli. La stessa Commissione Europea si è posta l'obiettivo, per il 2020, di arrivare ad un consumo di biocarburanti equivalente a 40 milioni di tonnellate di petrolio (Direttiva 2003/30/CE). Purtroppo tale scopo, in mancanza di terreni da coltivare *ad hoc*, ha rappresentato la maggiore spinta per l'acquisto in tutto il mondo, tra il 2002 ed il 2012, di terreni per una superficie totale di 17 milioni di ettari (<http://www.grain.org/article/entries/4653-land-grabbing-for-biofuels-must-stop>).

Ironicamente, grazie al Protocollo di Kyoto e ai meccanismi dei *carbon credit*, molte società comprano terre per i biocarburanti, ma al tempo stesso cercano di farsele certificare come progetti di riduzione delle emissioni (Liberti 2011).

Se i Paesi appartenenti alla Comunità Europea cercano di comprare terre altrove, è perché trovare nuovo suolo coltivabile "in casa" risulta abbastanza difficile; in più,

negli ultimi decenni, le superfici agricole sono notevolmente diminuite, proprio per la crescente urbanizzazione. Un recente studio ha provato a quantificare l'entità di tale perdita all'interno dei Paesi della Comunità Europea (Gardi et al. 2015): partendo dai dati del CORINE *Land Cover*, sono state prese tutte le superfici agricole che dal 1990 al 2000 e dal 2000 al 2006 sono diventate urbanizzate. Una volta quantificati questi cambiamenti e sommate le aree dei due diversi periodi, si è calcolata la perdita totale di produttività tra il 1990 ed il 2006, riferendosi alle diverse rese locali del grano. Il risultato è una perdita per i 21 Paesi considerati di circa 206 ha/giorno per il primo periodo e di 199 ha/giorno per il secondo; in termini di produttività questa sottrazione di terra equivale a circa sei milioni di tonnellate di grano in meno, vale a dire il 6% di tutto il prodotto. Per rendere bene l'idea di tale quantità, è come se fosse stata persa l'intera produzione di grano del 2006 della Spagna o della Romania. I Paesi in cui si è rilevata la perdita maggiore (Figura 2.25) sono la Germania (circa 1.700.000 tonnellate), la Francia (circa 1.200.000 tonnellate), i Paesi Bassi (circa 900.000 tonnellate) e la Spagna (circa 550.000 tonnellate); l'Italia figura subito dopo con quasi 500.000 tonnellate.

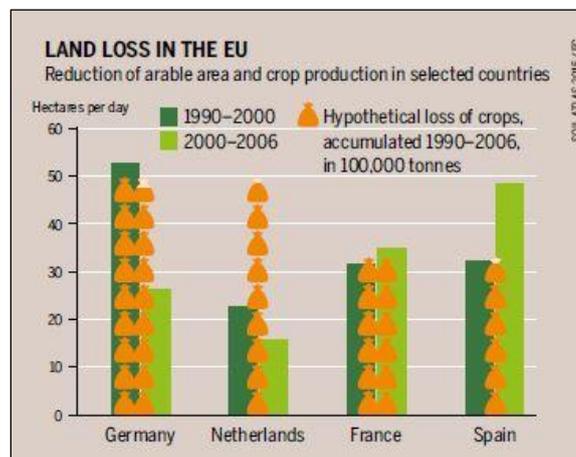


Figura 2.25 Perdita di terreno agricolo e della relativa produzione per Germania, Paesi Bassi, Francia e Spagna tra il 1990 ed il 2006 (Gardi et al. 2015) (elaborazione: Soil Atlas 2015).

Gli stessi dati sono stati elaborati in base alla seconda classe delle NUTS e vengono riportati nella Figura 2.26, dove è possibile osservare una concentrazione dei valori più alti in corrispondenza della zona tra Paesi Bassi e Germania.

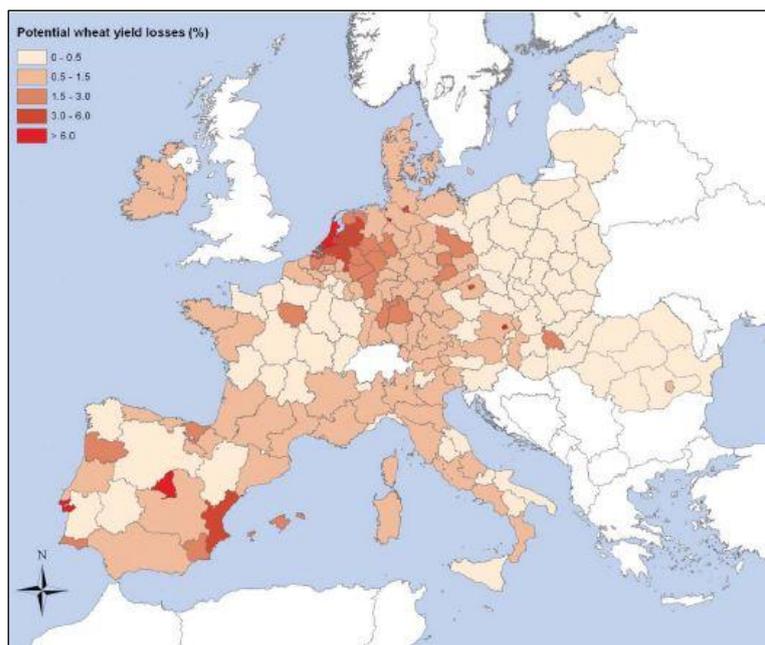


Figura 2.26 Perdita potenziale in percentuale della produzione di grano tra il 1990 ed il 2006 in base alla seconda classe NUTS (Gardi et al. 2015).

Bisogna però sottolineare come questi numeri siano molto approssimativi, sempre per il problema di unità minima cartografabile del CORINE *Land Cover*, e rappresentino probabilmente una sottostima del fenomeno, in quanto nella classe che racchiude le superfici agricole molto spesso l'impermeabilizzato risulta essere stato omesso, e quindi alcuni cambiamenti da seminativo a urbanizzato potrebbero non essere stati registrati (Munafò, Salvati, and Zitti 2013).

In questo quadro generale sul problema della sicurezza alimentare, e quindi sull'importanza di preservare quanto più possibile il suolo coltivato dall'impermeabilizzazione, è opportuno ricordare anche che, a differenza dei decenni passati, la tecnologia probabilmente non riuscirà a dare grossi contributi al miglioramento della produttività. Inoltre, il calo della disponibilità petrolifera andrà ad impattare sulla produzione dei fertilizzanti tradizionali, rendendoli meno disponibili.

2.4 LA MISURA DEL CONSUMO DI SUOLO

2.4.1 Mappare il consumo di suolo

L'analisi di tutte le problematiche derivanti dall'impermeabilizzazione del territorio mette in luce l'importanza e la necessità di avere adeguate mappe che diano informazioni circa la quantità e la distribuzione spaziale del fenomeno. Inoltre, per avere un quadro completo sulla sua evoluzione, la disponibilità di dati per diversi anni assume una rilevanza strategica. Purtroppo non è stata ancora individuata una metodologia precisa per compiere queste misure, probabilmente perché il consumo di suolo, essendo un tema divenuto importante solo recentemente, non rientra nei tradizionali indicatori ambientali. Già i metodi utilizzati a livello europeo di cui si è scritto prima, CORINE *Land Cover* e il *Soil Sealing Map* del Copernicus, dimostrano la varietà di procedure che si possono portare avanti.

Provando a fare una panoramica sulle diverse tecniche usate, si può partire dicendo che i primi studi che avevano come obiettivo la misura dell'impermeabilizzato afferivano essenzialmente alla categoria dell'idrologia urbana (Brabec, Schulte, and Richards 2002); il periodo è quello degli anni '70 ed '80 e la creazione di superfici artificiali era inquadrata come una problematica soprattutto per l'aumentare dello scorrimento superficiale delle acque e del conseguente inquinamento dei corpi idrici (Klein 1979). Venivano individuate delle metodologie per lo più collegate all'utilizzo di foto aeree, anche se la complessità del loro uso, specie per aree estese (Zhou and Wang 2008), aveva già portato a qualche tentativo fatto col telerilevamento (Ragan and Jackson 1975). È proprio questa ultima tecnica che diventa la più usata a partire dal 2000 in poi, probabilmente grazie all'avvento delle immagini ad alta risoluzione spaziale e al miglioramento del processamento delle immagini (Weng 2012). Questo lo si può osservare anche cercando su Scopus (www.scopus.com) gli articoli che riportano la combinazione delle parole "impervious", "surfaces" e "mapping": il risultato è un aumento, a partire dal 2001, degli studi con questo oggetto, tutti svolti attraverso il telerilevamento (Figura 2.27). La costante crescita negli anni della relativa bibliografia mostra in parallelo un continuo avanzamento dell'interesse per il soggetto trattato.

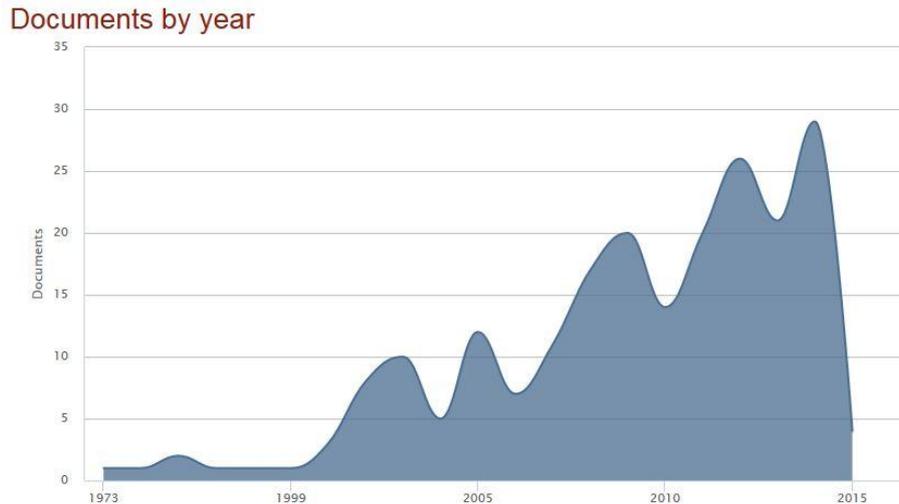


Figura 2.27 Numero di articoli ottenuti su www.scopus.it con le chiavi di ricerca “impervious”, “surfaces” e “mapping”.

2.4.2 La mappatura dell'impermeabilizzato tramite telerilevamento

Le esperienze di mappatura dell'impermeabilizzato tramite telerilevamento svolte sinora hanno messo in luce alcune problematiche, in parte comuni con altri oggetti d'indagine, in parte più specifici per quest'argomento, di cui è opportuno tenere conto.

Innanzitutto bisogna parlare della risoluzione spaziale: si è scritto prima di come, a partire dal 2000, l'avvento delle immagini ad alta risoluzione come IKONOS e QuickBird, entrambe con pixel inferiore ai 5 m, abbia rappresentato un importante impulso per questo filone di ricerca (Goetz et al. 2003; Lu and Weng 2009). Uno dei problemi principali del telerilevamento è, infatti, il rapporto tra le dimensioni dell'oggetto più piccolo che interessa rilevare e la possibilità di riuscire a farlo tramite le immagini scelte, opportunità direttamente correlata con la risoluzione spaziale. Normalmente, gli elementi mappabili sono quelli più grandi della dimensione del pixel, seppure può accadere che vengano rilevati anche quelli minori se c'è un oggetto la cui riflettenza è preponderante rispetto alle altre entità presenti (Weng 2012). Tornando alla misura dell'impermeabilizzazione, essa implica che vengano riconosciuti edifici e viabilità; con una risoluzione compresa tra 0,25 m e 0,50 m si riesce ad ottenere un dettaglio utile anche per condurre specifiche misure come possono essere quelle catastali, ma rimanendo tra 1 m e 30 m (la

risoluzione media delle immagini Landsat), in aree con copertura arborea non troppo elevata, si possono comunque rilevare le strade (Jensen and Cowen 1999). Oltre alla dimensione degli oggetti, bisogna tener conto anche della scala geografica dell'area di studio (Goodchild and Quattrochi 1997), per cui per studi su scala continentale o globale è più opportuno utilizzare immagini a bassa risoluzione (>100 m) come le AVHRR o MODIS: otto importanti lavori sull'estensione totale dell'urbanizzato hanno una risoluzione spaziale di 1-2 km (Gamba and Herold 2009). Ovviamente in questo tipo di immagini, così come per quelle a media risoluzione (ad esempio Landsat e SPOT), c'è il problema del pixel misto, ovvero l'esistenza all'interno della stessa cella di più oggetti con diverse firme spettrali (Figura 2.28). Ai fini dello studio dell'impermeabilizzato questo può rappresentare un consistente ostacolo, specie per la presenza di vegetazione in aree urbane.

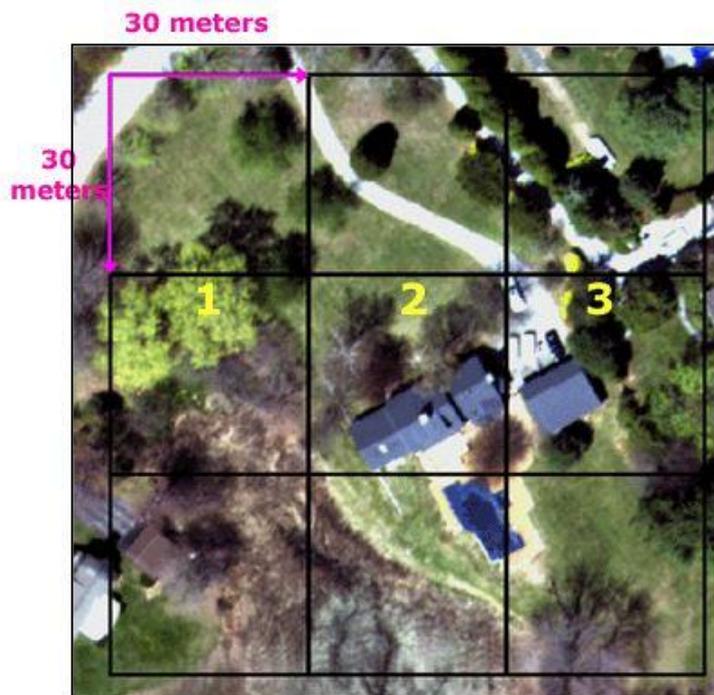


Figura 2.28 Immagine aerea ad alta risoluzione con sovrapposta griglia di 30 m. Pixel 1: prevalenza di vegetazione; pixel 2: prevalenza di edificato; pixel 3: vegetazione ed edificato in egual proporzione (Fonte: <http://clear.uconn.edu/index.htm>).

D'altro canto una risoluzione spaziale alta garantisce una drastica diminuzione dei pixel misti, ma genera altre fonti di errore come la presenza di ombre dovuta alla topografia, agli edifici alti e agli alberi (Dare 2005) che rende difficile una corretta

classificazione e molto spesso porta ad una confusione dell'edificato con l'acqua (Hodgson et al. 2003) (Figura 2.29).

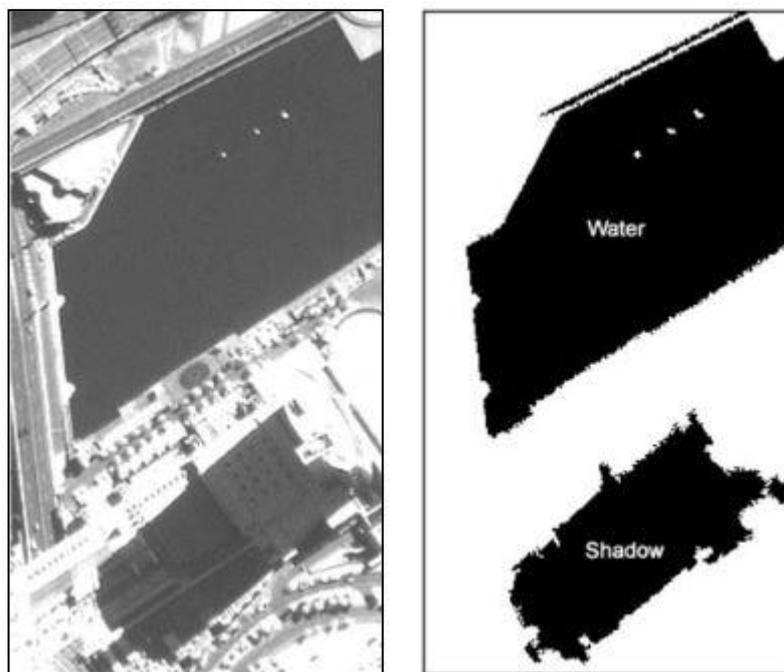


Figura 2.29 Immagine pancromatica IKONOS con presenza di acqua e ombre (a sinistra) con la relativa classificazione (a destra): acqua e ombre sono classificate come uno stesso oggetto (Dare 2005).

Negli ultimi anni molte analisi sono state condotte anche attraverso l'uso della tecnologia LiDAR, grazie alla sua capacità di estrazione delle geometrie, essenziale per studi in ambito urbano (Clode et al. 2007; Forlani et al. 2006; Franci, Lambertini, and Bitelli 2014).

Un'altra caratteristica di cui occorre tener conto è la risoluzione spettrale delle immagini, direttamente connessa con la composizione degli oggetti che si intende mappare. Nel caso specifico, si può dire che l'impermeabilizzato è una classe di copertura del suolo che però raggruppa alcuni elementi caratterizzati da materiali diversi che possono avere quindi firme spettrali differenti; di conseguenza è opportuno partire da questi oggetti per ottenere poi il prodotto finale. Queste relazioni sono mostrate nella Figura 2.30, dove viene sottolineata anche l'importanza della struttura della superficie urbana, che spesso va ad influenzare la classificazione (Gong and Howarth 1990). Inoltre, la copertura del suolo viene messa in relazione con l'uso del suolo, ma è importante ricordare le differenze che intercorrono tra i due concetti.

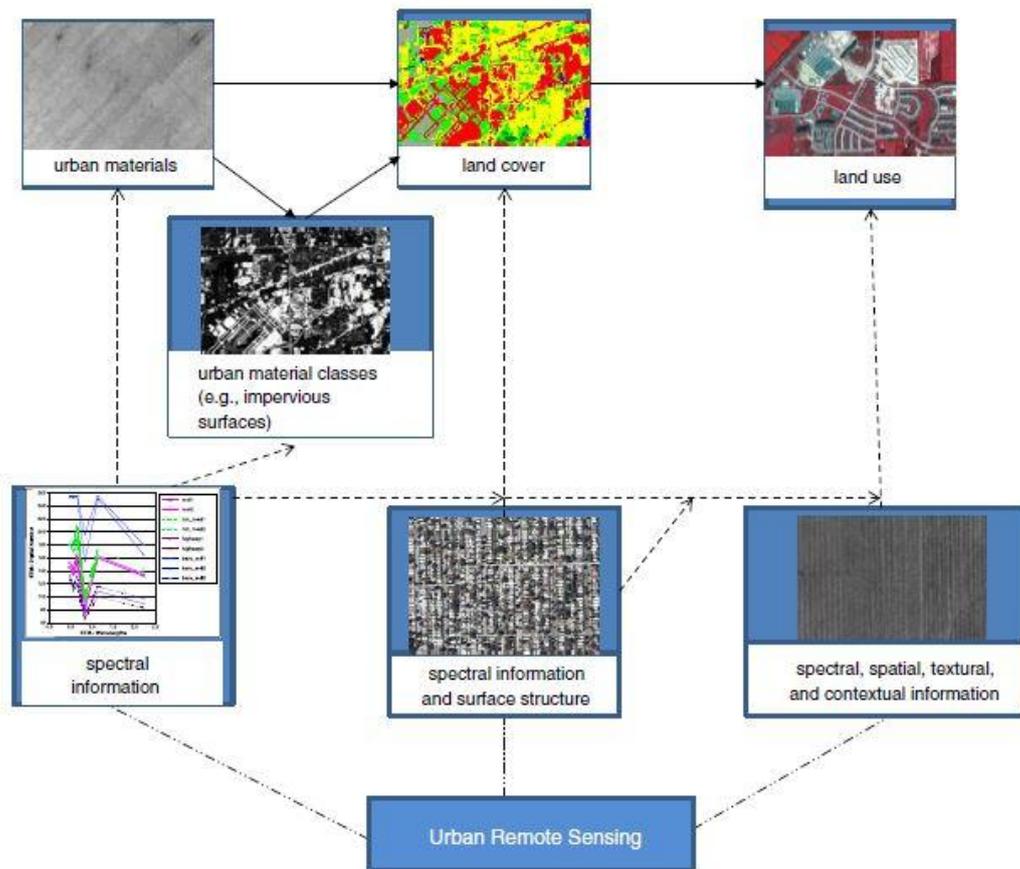


Figura 2.30 Relazioni tra il telerilevamento dei materiali urbani, la copertura del suolo e l'uso del suolo (Weng 2012).

Per copertura del suolo s'intende lo stato biofisico della superficie terrestre e dell'immediato sottosuolo, includendo il biota, il suolo, la topografia, le acque di superficie e quelle sotterranee, e le strutture antropiche (Turner et al. 1995). L'uso del suolo invece rappresenta come l'uomo utilizza le diverse coperture ed è pressoché impossibile ottenere questo tipo di dato dal telerilevamento, a meno che non si aggiunga una serie di informazioni spaziali e relative alla *texture* che possano permettere di passare dalla copertura all'uso del suolo (Stuckens, Coppin, and Bauer 2000).

Le proprietà spettrali dei materiali tipici degli ambienti urbani sono state studiate assieme alla risoluzione spettrale ideale per separarli e si è notato che, almeno per il multispettrale, il buon esito della classificazione continua a dipendere dalla risoluzione spaziale (Jensen and Cowen 1999). Nel caso si passi invece all'iperspettrale, molto più efficace nel separare i vari materiali, si è visto che le bande più importanti sono quelle nell'infrarosso medio che permettono di

distinguere le superfici con bassa albedo (Weng, Hu, and Lu 2008) che spesso rappresentano il maggiore ostacolo per una corretta classificazione dell'impermeabilizzato.

Infine è opportuno considerare anche la risoluzione temporale delle immagini, specie se messa in relazione con la presenza della vegetazione negli agglomerati urbani. Si è visto che si ottiene una migliore mappatura dell'*impervious* se si lavora con immagini estive piuttosto che con quelle primaverili o autunnali, in quanto in questa stagione la vegetazione contrasta di più con l'impermeabilizzato (Weng, Hu, and Liu 2009).

2.4.3 Principali tecniche utilizzate

Molti degli studi portati avanti in materia di mappatura dell'impermeabilizzazione si basano sulla relazione inversa che esiste tra vegetazione ed *impervious* in ambiente urbano, per cui molto spesso le analisi vengono condotte utilizzando l'indice NDVI (Gangkofner et al. 2009; Lu, Moran, and Hetrick 2011) oppure la *greenness* della trasformazione *tasseled cap* (Bauer, Loeffelholz, and Wilson 2005). Queste due grandezze risultano particolarmente utili quando si ha a che fare con immagini a media o bassa risoluzione spaziale, in quanto, come risposta al problema del pixel misto, permettono di calcolare l'impermeabilizzato come una frazione complementare, all'interno del singolo pixel, della vegetazione presente. La problematica connessa con questa metodologia rimane quella della stagione di acquisizione delle immagini, poiché nel periodo di quiescenza delle piante l'*impervious* tende ad essere sovrastimato, mentre si ha una sottostima nella fase di sviluppo vegetativo (Weng 2012).

Un altro approccio molto utilizzato è rappresentato dalla tecnica della *linear spectral mixture analysis* (LSMA), un modello di tipo fisico in cui si assume che la risposta spettrale di un pixel sia la combinazione lineare delle firme spettrali delle classi che lo compongono (Brivio, Lechi, and Zilioli 2006). Proprio per questa capacità di risolvere il problema del pixel misto, esso è stato ampiamente usato (Powell et al. 2007; Wu and Murray 2003). Anche questa tecnica, però, presenta alcune criticità, riconducibili alla similarità spettrale tra alcuni elementi dell'impermeabilizzato ed il suolo nudo. Questo problema rimane anche con

l'utilizzo di immagini ad alta risoluzione, a causa della loro limitata informazione spettrale (Hester et al. 2008).

Molti studi si basano sul metodo della classificazione supervisionata (Dougherty et al. 2004), ma i risultati spesso non sono soddisfacenti, specie con immagini a media risoluzione per le quali può risultare difficoltosa la selezione dei *training sites*. L'eterogeneità dell'ambiente urbano, infatti, determina un problema di pixel misto che questo tipo di classificazione non sempre riesce a risolvere (Cracknell 1998); sotto questo punto di vista risultati migliori sono stati ottenuti con le immagini ad alta risoluzione (Hsieh, Lee, and Chen 2001).

È per questo motivo che altre sperimentazioni sono state condotte con i cosiddetti classificatori "soft", chiamati così perché, a differenza di quelli più tradizionali denominati "hard", essi non assegnano rigidamente un pixel ad una sola classe, ma, in base alla logica *fuzzy*, generano una serie di mappe, tante quante le categorie individuate, ed in ognuna di esse viene mostrato il grado di appartenenza del pixel alla classe presa in considerazione (Hu and Weng 2011).

Con l'avvento delle immagini ad alta risoluzione, si è avuto il progressivo sviluppo ed utilizzo di un altro tipo di classificazione che è quella *object-based*; essa prende in considerazione non solo le caratteristiche spettrali, ma anche le proprietà degli elementi legate alla forma, alla tessitura ed al contesto. Diversi studi sono stati condotti anche in ambito urbano (Van de Voorde et al. 2004; Zhou and Troy 2008), molti dei quali comparando i risultati ottenuti con quelli derivanti da classificatori come il *maximum likelihood*; in genere l'accuratezza sembra aumentare con l'*object-based* (Yuan and Bauer 2006). Tuttavia è stato anche notato come le tecniche di segmentazione non siano abbastanza robuste per ambienti complessi dal punto di vista spettrale, come accade negli agglomerati urbani (Pal and Pal 1993).

Nuove interessanti prospettive sembrano venire dalle tecniche di *data and image fusion* che possono essere applicate per differenti sensori, risoluzioni spettrali, spaziali e temporali. Ad esempio le immagini Landsat sono state integrate con dati radar, ottenendo un miglioramento della classificazione (Haack et al. 2002); in un altro studio le mappe di temperatura dell'acqua e della vegetazione sono state

usate per mascherare quattro immagini ASTER di stagioni differenti, aumentando l'accuratezza nella stima dell'impermeabilizzato (Weng et al. 2009).

Un altro modo di operare attraverso l'integrazione dei dati per avere migliori risultati è quello rappresentato dai sistemi GIS: essi consentono di rielaborare le informazioni ottenute dal telerilevamento attraverso dei dati ancillari che possono dare un prezioso contributo o raffinare i risultati ottenuti. Questa metodologia può essere estremamente importante in ambito urbano, dove si ha una considerevole quantità e varietà di materiale a disposizione. Ad esempio, le densità di alloggi, popolazione o strade possono essere utilizzate per distinguere meglio in una classificazione le zone residenziali da quelle industriali o i parchi urbani da campi agricoli o incolti (Lu and Weng 2006).

3. CASO STUDIO: LA PROVINCIA DI BOLOGNA

3.1 AREA DI STUDIO

3.1.1 Inquadramento territoriale

L'area scelta come oggetto di indagine è quella tradizionalmente conosciuta come Provincia di Bologna, avente superficie pari a 3.702 km² e situata all'interno della regione Emilia-Romagna; essa è compresa tra le coordinate 10°48'15"E - 11°50'20"E e 44°3'47"N - 44°48'16"N.

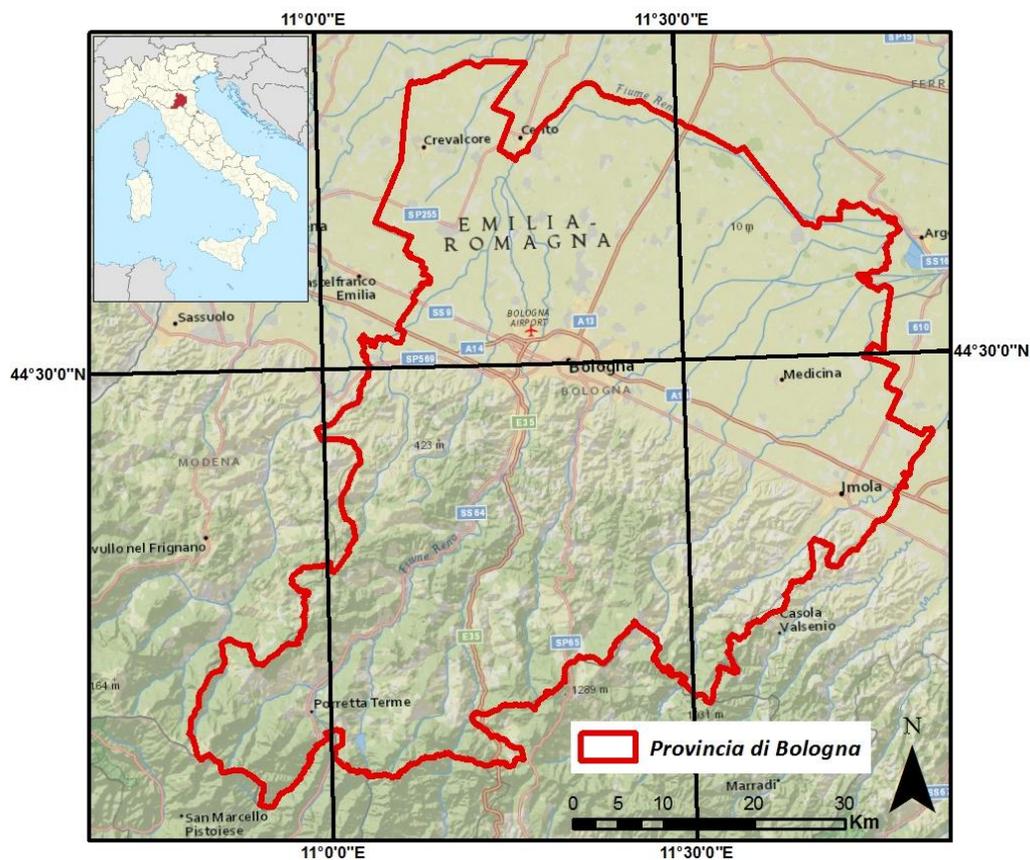


Figura 3.1 Inquadramento territoriale dell'area di studio.

Dal punto di vista amministrativo, con la legge n. 56 del 7 aprile 2014, il territorio individuato non è più gestito come Provincia, ma come Città Metropolitana di

Bologna, poiché appartiene a quelle realtà nazionali oggettivamente più complesse e quindi richiedenti precisi interventi sullo sviluppo economico, sulla pianificazione territoriale e sul flusso di persone e merci. Infatti, oltre ad ospitare Bologna, la settima città italiana con più abitanti, la posizione geografica rende questo territorio un punto strategico per la viabilità nazionale: è proprio qui che vi è lo snodo di congiunzione tra le autostrade A1, A13 ed A14, per cui è tappa obbligata per chi da Firenze o dal tratto adriatico va verso Milano, il Brennero o Padova e viceversa. Altrettanto accade per la tratta ferroviaria, in quanto a Bologna convergono sia la linea Napoli – Roma – Firenze che quella adriatica e, con un flusso giornaliero di circa 700 treni, la relativa stazione è seconda solo a Roma Termini (www.grandistazioni.it). Nel 2013 è stata attivata anche la linea Alta Velocità che contribuisce ulteriormente ai volumi di traffico ferroviario.

La direttiva principale di questi flussi è quella che si sviluppa parallela alla SS 9 che ricalca il percorso dell'antica Via Emilia, che congiungeva Rimini con Piacenza. Questa importante arteria stradale fa anche da confine tra i due ambienti principali che caratterizzano la Provincia di Bologna: a nord la Pianura Padana e a sud la catena appenninica, comprendente sia la fascia collinare sia quella montuosa; la quota più alta è quella del Corno alle Scale (1.945 m). A questi due diversi ambienti, sono associati altrettanti differenti contesti economici e, di conseguenza, anche paesaggistici. La parte della pianura si presenta, infatti, come una distesa di terreni agricoli intensamente coltivati, principalmente con colture cerealicole, ma anche con coltivazioni industriali (barbabietola da zucchero e biocarburanti). Tutti questi appezzamenti sono intervallati più o meno regolarmente, secondo la rete viaria, da centri urbani di estensione variabile e da molte aree industriali o commerciali. Le maggiori concentrazioni si hanno lungo la Via Emilia e anche nella parte nord di Bologna, in corrispondenza della linea ferroviaria per Padova.



Figura 3.2 *Paesaggio tipico della Pianura Padana.*

Spostandosi invece verso gli Appennini, il paesaggio cambia e assume dapprima l'aspetto della collina modellata dall'uomo dove persiste l'attività agricola, anche se sicuramente meno intensiva rispetto a quella della pianura. Salendo invece di quota, gli elementi più prettamente naturali come i boschi diventano sempre più persistenti, anche se intervallati da pascoli e coltivi destinati alla produzione di foraggiere. L'abitato si fa più rado, anche se nelle principali valli, soprattutto in quella del Reno e del Savena, c'è un'importante concentrazione di superfici artificiali, anche di tipo industriale.



Figura 3.3 *Media valle del Reno.*

Le caratteristiche appena descritte hanno reso la Provincia di Bologna un territorio con un certo grado di dinamicità dal punto di vista delle trasformazioni urbane, specie nella parte di pianura. Nel tempo sono state operate varie espansioni dell'abitato già presente, nonché diverse realizzazioni di aree industriali e commerciali. Anche la viabilità ha dato il suo contributo con costruzioni di varie opere più o meno importanti; basti pensare, ad esempio, all'Alta Velocità ferroviaria o alla Variante di Valico dell'A1. Negli anni più recenti questi processi sembrano aver subito una battuta d'arresto, complice la crisi economica del 2008 che ha rallentato in parte l'attività edilizia. Rimane però il dubbio su quanto questa frenata possa offrire lo spunto per analizzare e pianificare in modo più sostenibile il territorio o se rappresenti soltanto un momento di quiescenza dovuto alla poca disponibilità di fondi. Le recenti dichiarazioni² a livello regionale favorevoli al Passante Nord³, ad esempio, nonostante le perplessità espresse dalla stessa società Autostrade per l'Italia⁴, fanno purtroppo pensare ad una scarsa volontà da parte di chi ha potere decisionale di "ripensare" in modo più serio l'utilizzo del territorio e di non restare legato alle solite dinamiche dell'edilizia. Anche i dati elaborati in un lavoro recente sulla provincia di Bologna (Bonora 2013) non sono meno confortanti: sono stati analizzati tutti i PSC dei vari Comuni e, tra nuovi edifici e lasciti da vecchi PRG, ci sarebbero oltre 85.000 alloggi da edificare su tutto il territorio (Figura 3.4).

² http://bologna.repubblica.it/cronaca/2015/02/09/news/il_passante_nord_si_far-106897748/

³ Tratto autostradale a doppia carreggiata con tre corsie, lungo 42 km, che collegherà l'autostrada A1 all'A14 e all'A13, consentendo di oltrepassare il nodo di Bologna.

⁴ http://bologna.repubblica.it/cronaca/2014/01/26/news/passante_nord_ecco_i_dubbi_di_autostra_de_benefici_alla_viabilit_minori_del_previsto-76927369/

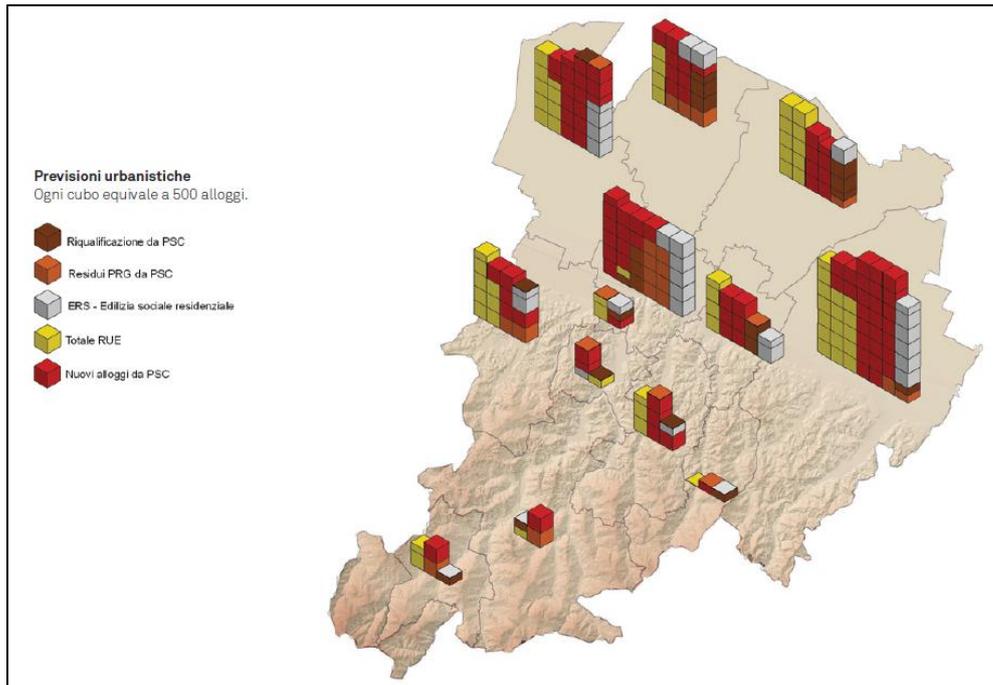


Figura 3.4 Previsioni urbanistiche (Bonora 2013) (Fonte: Bilancio PTCP 2012; Elaborazione: www.sis-ter.it).

3.1.2 Dati disponibili

Esistono diverse analisi che hanno tentato di calcolare quale sia la reale misura del suolo consumato nella Provincia di Bologna. Prima di esaminare le differenti fonti, è opportuno ricordare che, purtroppo, non essendoci una definizione univoca di questa grandezza, i numeri dati tendono a differire tra di loro, a volte anche di molto. La causa di tali incongruenze è da ricercare nella molteplicità degli aspetti che il consumo di suolo va a toccare: i vari settori coinvolti tendono a darne un'interpretazione diversa secondo le loro esigenze. Inoltre resta il problema delle diverse unità cartografabili, che può incidere in modo significativo sul dato fornito: ad esempio, passando da un'area minima di 1,56 ha ad una di 0,2 ha, si è visto che la misura dei territori artificiali può aumentare del 31% (Corticelli, Mariani, and Masi 2013).

Il libro "Atlante del consumo di suolo per un progetto di città metropolitana" curato da Paola Bonora nel 2013 ha provato a fare il punto sulla situazione della Provincia di Bologna, riportando dati ottenuti da diversi studi. Tra di essi, sicuramente molto importante è quello svolto dall'ISTAT sulle basi territoriali derivanti dai censimenti 2001 e 2011 (<http://www.istat.it/it/archivio/104317>). Partendo dalla vettorializzazione dei dati inerenti alle località abitate (suddivise in centri abitati,

nuclei abitati e località produttive), si è giunti a misurare una superficie di suolo occupato per il 2011 pari a 328 km² corrispondente all'8,9% dell'area di studio. Il confronto con l'analogo valore del 2001 ha portato a calcolare un consumo di suolo pari a 1,17 ha/giorno nel decennio considerato. È opportuno sottolineare come questo studio non tenga presente l'abitato sparso, mentre include tutte le superfici permeabili urbane; ha però l'importanza di rendere possibile un confronto tra tutte le Regioni e Province italiane, poiché offre dati ottenuti con la stessa metodologia. In questo senso il valore di 1,17 ha/giorno è abbastanza preoccupante, in quanto colloca la Città Metropolitana di Bologna come quarta in assoluto tra tutte le ex Province, subito dopo Roma, Torino e Brescia.

Gli altri dati elencati sono quelli elaborati dal Centro di Ricerca sui Consumi di Suolo (CRCS⁵) sulla base della cartografia dell'uso del suolo prodotta dalla Regione Emilia-Romagna per il 1976, 1994, 2003 e 2008 (<http://geoportale.regione.emilia-romagna.it/it/database-uso-del-suolo>). Le relative legende tematiche ripetono la struttura del CORINE *Land Cover*, per cui per ogni anno sono state selezionate le voci afferenti alla classe "1-Territori modellati artificialmente" in modo da ottenere le superfici relative al suolo urbanizzato. Tale valore per il 2008 è uguale a 389 km², ovvero il 10,5% della Provincia di Bologna; il consumo di suolo è stato quantificato pari a 1,57 ha/giorno per il periodo 2003-2008. Bisogna però porre l'accento sul fatto che per le cartografie analizzate l'unità minima cartografabile è di 1,56 ha per le nuove aree e di 0,2 ha per i cambiamenti. Inoltre, come visibile nella Figura 3.5, nella classe considerata sono comprese molte voci che prevedono l'esistenza di superfici permeabili.

⁵ Il Centro di Ricerca sui Consumi di Suolo è un'associazione di secondo livello, operativa dal 2009 e istituita formalmente nel 2014, per la promozione di studi sulle trasformazioni del suolo, fondata dal Dipartimento di Architettura e Studi Urbani del Politecnico di Milano, dall'Istituto Nazionale di Urbanistica e da Legambiente ONLUS (<http://consumosuolo.org/>).

Legenda			
1111 Ec	Tessuto residenziale compatto e denso	1311 Qa	Aree estrattive attive
1112 Er	Tessuto residenziale rado	1312 Qi	Aree estrattive inattive
1120 Ed	Tessuto residenziale discontinuo	1321 Qq	Discariche e depositi di cave, miniere e industrie
1211 Ia	Insedimenti produttivi	1322 Qu	Discariche di rifiuti solidi urbani
1212 Ic	Insedimenti commerciali	1323 Qr	Depositi di rottami
1213 Is	Insedimenti di servizi	1331 Qc	Cantieri e scavi
1214 Io	Insedimenti ospedalieri	1332 Qs	Suoli rimaneggiati e artefatti
1215 It	Impianti tecnologici	1411 Vp	Parchi e ville
1221 Rs	Reti stradali	1412 Vx	Aree incolte urbane
1222 Rf	Reti ferroviarie	1421 Vt	Campeggi e strutture turistico-ricettive
1223 Rm	Impianti di smistamento merci	1422 Vs	Aree sportive
1224 Rt	Impianti delle telecomunicazioni	1423 Vd	Parchi di divertimento
1225 Re	Reti per la distribuzione e produzione dell'energia	1424 Vq	Campi da golf
1226 Ri	Reti per la distribuzione idrica	1425 Vi	Ippodromi
1231 Nc	Aree portuali commerciali	1426 Va	Autodromi
1232 Nd	Aree portuali da diporto	1427 Vr	Aree archeologiche
1233 Np	Aree portuali per la pesca	1428 Vb	Stabilimenti balneari
1241 Fc	Aeroporti commerciali	1430 Vm	Cimiteri
1242 Fs	Aeroporti per volo sportivo e eliporti		
1243 Fm	Aeroporti militari		

Figura 3.5 Legenda della Carta dell'Uso del Suolo del 2008 della Regione Emilia-Romagna per la classe "1-Territori modellati artificialmente".

Un altro dato a cui si fa riferimento è quello relativo al territorio consumato nel 2011 fornito dalla Città Metropolitana di Bologna, (<http://cst.provincia.bologna.it/catalogo/>), ex Provincia. In questo caso viene dato un valore di suolo consumato pari a 408 km² (l'11,3% del totale), ottenuto dall'integrazione della Carta dell'Uso del Suolo della Regione Emilia-Romagna per il 2011 ed il Database Topografico Regionale dello stesso anno. Per la conseguente analisi il consumo di suolo è stato considerato come il risultato di tre processi, ovvero l'impermeabilizzazione, la dispersione dell'urbanizzato e la frammentazione del paesaggio (Alampi, Delpiano, and Savino 2012). Anche in questo caso sono stati compresi i parchi urbani ed inoltre sono stati integrati, all'interno dei centri urbani, tutti i lotti interclusi di dimensione inferiore ai due ettari.

Oltre al materiale appena elencato e pubblicato nel libro "Atlante del consumo di suolo per un progetto di città metropolitana", vale la pena richiamare quello di altri studi, anche perché, vista l'estrema attualità del tema trattato, c'è un continuo aggiornamento dei dati disponibili.

Innanzitutto sono stati analizzati i valori del CORINE *Land Cover* disponibili per gli anni 1990, 2000 e 2006; a tal proposito si ricorda che l'unità minima rilevabile di

questo progetto è 25 ha e che nel calcolare le superfici artificiali si è tenuto conto anche degli spazi permeabili in ambito urbano. I numeri ottenuti raggruppando tutti i poligoni compresi nella classe “1–Territori modellati artificialmente” danno un suolo artificializzato pari a 17.846 ha (4,8%) per il 1990, 20.661 ha (5,6%) per il 2000 e 21.693 ha (5,9%) per il 2006. I relativi tassi di consumo di suolo sono 0,77 ha/giorno tra il 1990 ed il 2000 e 0,28 ha/giorno tra il 2000 ed il 2006.

In modo analogo sono stati presi in considerazione i dati del *Soil sealing map* Copernicus, gentilmente messi a disposizione in formato raster da ISPRA, per gli anni 2009 e 2012. I valori di impermeabilizzato ottenuti sono 17.391 ha (4,7%) per il 2009 e 23.117 ha (6,2%) per il 2012. A proposito di questi numeri, si rileva una marcata differenza se si considera che tra i due intercorrono solo tre anni, tanto che se si andasse a calcolare il consumo di suolo, si avrebbe un dato di poco superiore ai 5 ha/giorno, molto più elevato di tutti quelli visti sinora. Anche se volti entrambi alla misura dell'*impervious* ed ottenuti tramite telerilevamento, il notevole scostamento tra i due valori deriva principalmente dalle immagini utilizzate. Per il 2009 sono state usate le SPOT e le IRS-P6, con pixel pari a 20 m (Gangkofner et al. 2009), per il 2012 le SPOT-5 (risoluzione 2,5 m), le IRS AwIFS (56 m), le IRS LISS-3 (20 m) e le RapidEye (5m) (Lefebvre et al. 2013). Di conseguenza, nel passaggio dal 2009 al 2012 c'è stato un netto miglioramento della risoluzione spaziale, con immagini molto più di dettaglio. In più tra i due periodi è cambiata anche la metodologia, poiché nel primo caso si è proceduto con l'individuazione dell'impermeabilizzato come frazione complementare della vegetazione ottenuta tramite NDVI; nel 2012 invece sono state fatte delle classificazioni separate per ogni immagine che sono state poi integrate tra di loro con una procedura di *data fusion*.

ISPRA ha gentilmente messo a disposizione anche lo *shapefile* della rete di monitoraggio del consumo di suolo da loro realizzata. Come scritto precedentemente, si tratta di una serie di punti stratificati su tre livelli (nazionale, regionale e comunale) sparsi sul territorio ai quali è stato associato il valore “suolo consumato” o “suolo non consumato” in base al periodo di riferimento. Nello specifico, è stato considerato il dato relativo al campionamento regionale, tagliato secondo i confini provinciali; la percentuale di impermeabilizzato è stata ottenuta

come percentuale di punti “suolo consumato” sul totale dei punti presenti. I risultati per i vari anni sono riportati nella Tabella 3.1; non sono stati considerati i valori per gli anni 2008 e 2011 perché non completamente fotointerpretati.

	Anni '50	1989	1996	1998	2007	2008	2011
<i>Suolo impermeabilizzato</i>	4,8%	8,5%	9%	9,6%	9,6%	n.d.	n.d.

Tabella 3.1 Andamento nel tempo dell'impermeabilizzato per la Provincia di Bologna secondo i dati ISPRA.

Per un'analisi completa dei dati ISPRA bisogna aggiungere che, per dare valenza statistica ai valori ottenuti, i tre livelli di campionamento (nazionale, regionale e comunale) sono stati integrati tra loro per stimare gli intervalli di confidenza (Baiocco et al. 2013; Munafò and Tombolini 2014); il calcolo per la Provincia di Bologna, però, ha tenuto conto solo della rete regionale. Inoltre, i valori calcolati sembrano essere un po' alti rispetto a quelli del Copernicus, che è l'unico studio di quelli elencati che misura l'impermeabilizzato; questo avviene principalmente per la differenza di risoluzione geometrica (Munafò and Tombolini 2014). Nella Figura 3.6 è possibile osservare un confronto fatto tra i due dati su tutto il territorio nazionale e si può vedere come ci sia un'ottima corrispondenza per valori di impermeabilizzato superiori al 40%.

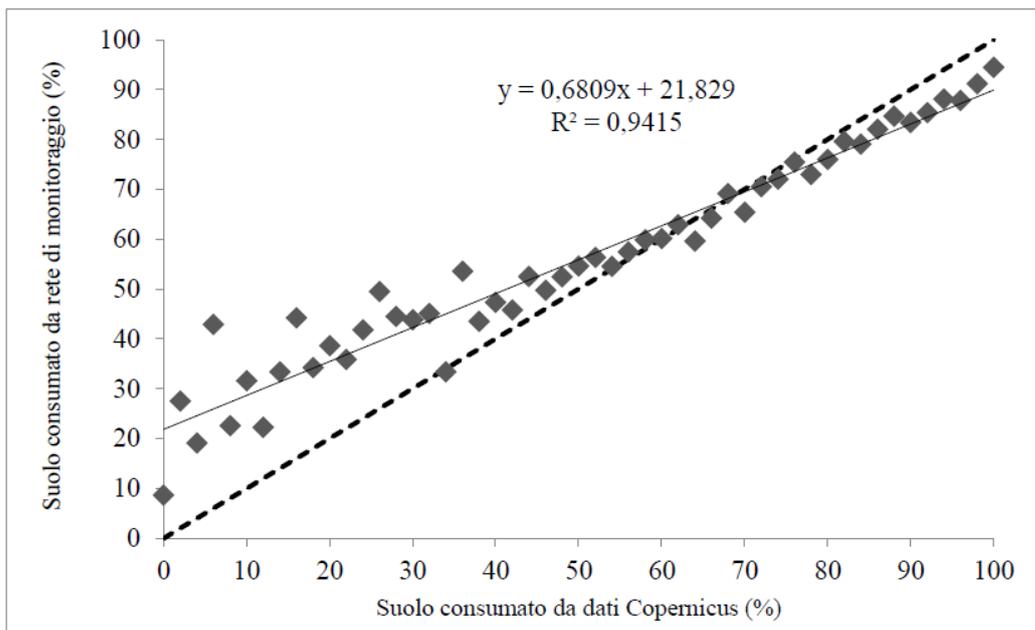


Figura 3.6 Confronto tra Soil Sealing Map Copernicus e rete di monitoraggio ISPRA (Munafò and Tombolini 2014).

La Tabella 3.2 presenta un riassunto dei dati sin qui esaminati per l'area di studio in oggetto, riportando i valori più vicini a livello temporale; nel caso in cui si avessero dati per più anni, è stato considerato quello più coerente con gli altri. I numeri presentati vanno letti tenendo sempre ben presenti le problematiche legate all'unità minima cartografabile e alla differenza tra suolo impermeabilizzato e artificiale.

FONTE	ANNO	SUOLO OCCUPATO (%)
ISTAT	2011	8,9
CRCS	2008	10,5
CITTÀ METROPOLITANA DI BOLOGNA	2011	11,3
CORINE LAND COVER	2006	5,9
SOIL SEALING MAP COPERNICUS	2009	4,7
ISPRA	2007	9,6

Tabella 3.2 Percentuale di suolo occupato nell'area di studio secondo le fonti citate.

3.2 MATERIALI E METODI

3.2.1 Acquisizione delle immagini

Ai fini dell'analisi da compiere, sono state acquisite dal portale dell'USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) cinque immagini Landsat relative all'area di studio (*path* 192, *row* 029). Esse sono state fornite secondo il livello di processamento 1T che garantisce la correttezza geometrica, poiché prevede l'uso di punti di controllo a terra e di un modello digitale del terreno; il sistema di riferimento è il WGS-84, fuso 32N (http://landsat.usgs.gov/Landsat_Processing_Details.php). Nella Tabella 3.3 sono riportati le date di acquisizione, i sensori di riferimento, il numero di bande e la risoluzione spaziale per ogni immagine.

IMMAGINE	DATA	SENSORE	NUMERO DI BANDE	RISOLUZIONE SPAZIALE (m)*
Landsat 5	25 giugno 1987	TM	7 (6 MS + 1 TIR)	30
Landsat 5	30 luglio 1991	TM	7 (6 MS + 1 TIR)	30
Landsat 7	20 giugno 2000	ETM+	8 (6 MS + 1 TIR + 1 PAN)	28,5
Landsat 5	7 luglio 2003	TM	7 (6 MS + 1 TIR)	30
Landsat 8	16 giugno 2013	OLI TIRS	11 (8 MS + 2 TIR + 1 PAN)	30

Tabella 3.3 Immagini acquisite e loro caratteristiche (MS = multispettrale, TIR = termico, PAN = pancromatico, *=escluso il pancromatico).

Partendo dal 1987 e arrivando al 2013, si riesce a coprire un arco temporale abbastanza ampio da permettere una valida analisi delle dinamiche territoriali, visto che il periodo prescelto corrisponde ad una fase di notevoli trasformazioni urbanistiche. Le tappe intermedie, ovvero il 1991, il 2000 ed il 2003, offrono un'ulteriore informazione circa l'evoluzione del fenomeno e danno la possibilità di controllare e migliorare i risultati delle classificazioni dello stato iniziale (1987) e finale (2013).

Si è preferito scegliere immagini acquisite durante la stagione estiva perché, come scritto in precedenza, il maggior sviluppo della vegetazione garantisce una migliore

separabilità della copertura artificiale, che altrimenti tenderebbe ad essere confusa col suolo nudo. Le scene sono state selezionate anche in base al basso grado di copertura nuvolosa sulla zona indagata.

3.2.2 Pre-processamento delle immagini

Le immagini sono state sottoposte ad una serie di operazioni al fine di prepararle per la classificazione. Sia questa fase che quella del processamento sono state eseguite grazie al software ENVI 5.

Innanzitutto si è proceduto alla calibrazione radiometrica delle immagini, al fine di passare, per ogni pixel, dal *digital number* alla riflettanza *top of atmosphere*. Questa operazione risulta essenziale per riuscire ad avere dei valori che siano il più possibile indipendenti da variabili come, ad esempio, il tipo di sensore usato. Non è stata applicata invece la correzione atmosferica poiché la *change detection* finale è stata fatta tra classificazioni e non tra immagini (Song et al. 2001).

Ogni scena è stata poi tagliata in base ai confini della provincia di Bologna, poiché un'immagine Landsat ricopre una superficie molto più ampia, circa 31.450 km².

Dopo le prime sperimentazioni, all'interno delle zone artificiali, specie nel caso delle aree industriali, si è riscontrata una certa confusione con la classe "Affioramenti rocciosi", per via delle firme spettrali simili (Figura 3.7). Di conseguenza, si è cercato di risolvere il problema, considerando congiuntamente le bande del multispettrale e quella relativa al termico (TIR). Questa banda, infatti, può risultare molto importante in ambito urbano (Warner and Nerry 2009) vista l'informazione che fornisce relativamente alla temperatura, mediamente più alta in questo contesto: ad esempio, rispetto al suolo nudo, l'impermeabilizzato può contenere meno acqua e quindi, durante il giorno, questo può determinare un grado di calore più elevato (Mohapatra and Wu 2010).

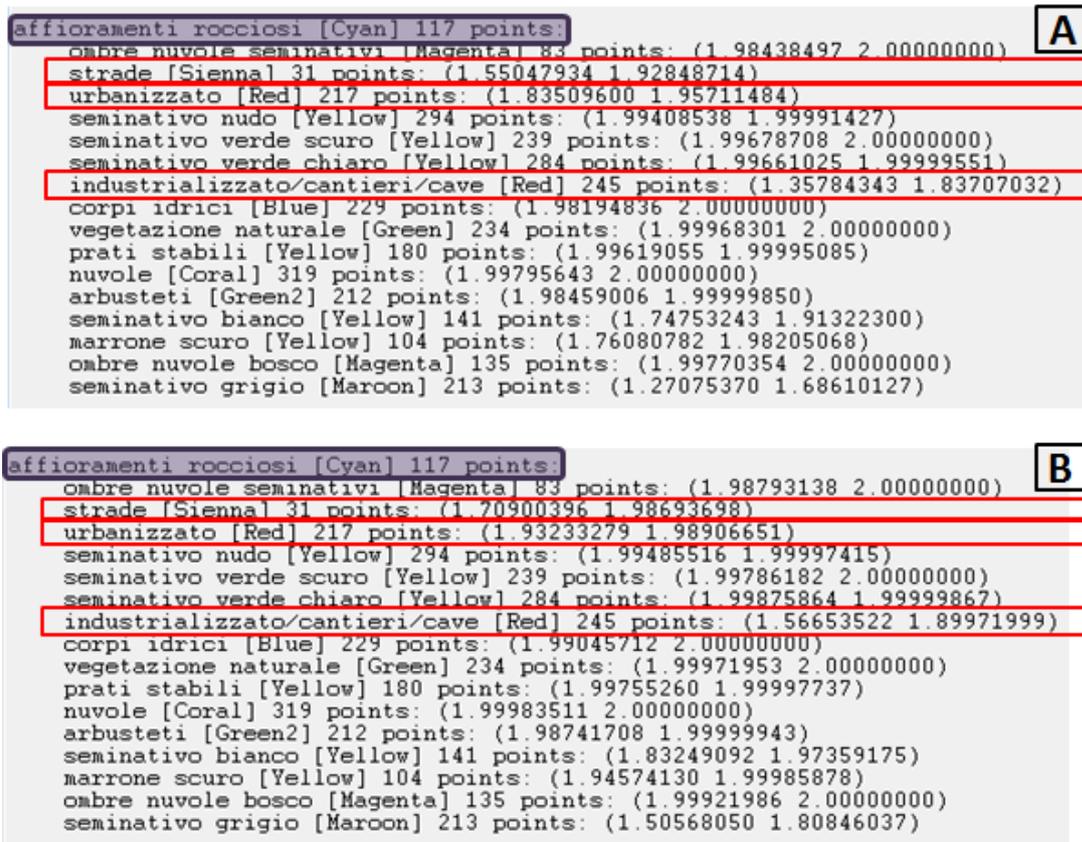


Figura 3.7 Indici di separabilità spettrale (Jeffries-Matusita, Divergenza trasformata) della classe “Affioramenti rocciosi” con le tre sottoclassi delle superfici impermeabilizzate (strade, urbanizzato, industrializzato): A) immagine multispettrale, B) immagine multispettrale + termico.

Anche se la banda del termico viene acquisita dal sensore con una risoluzione spaziale inferiore a quella del multispettrale (120 m per il TM, 60 m per l’ETM+ e 100 m per il TIRS), essa, nella maggior parte dei casi, viene resa disponibile dall’USGS già ricampionata a 30 m come il resto delle bande. Per ogni scena, quindi, la banda del termico è stata normalizzata rispetto al suo valore massimo e, attraverso un *layer stacking*, è stata aggiunta alle bande del multispettrale per generare una nuova immagine. Le conseguenti nuove classificazioni mostrano un netto miglioramento in ambito urbano nel risolvere il problema di confusione tra le classi “Impervious” e “Affioramenti rocciosi” (Figura 3.8).

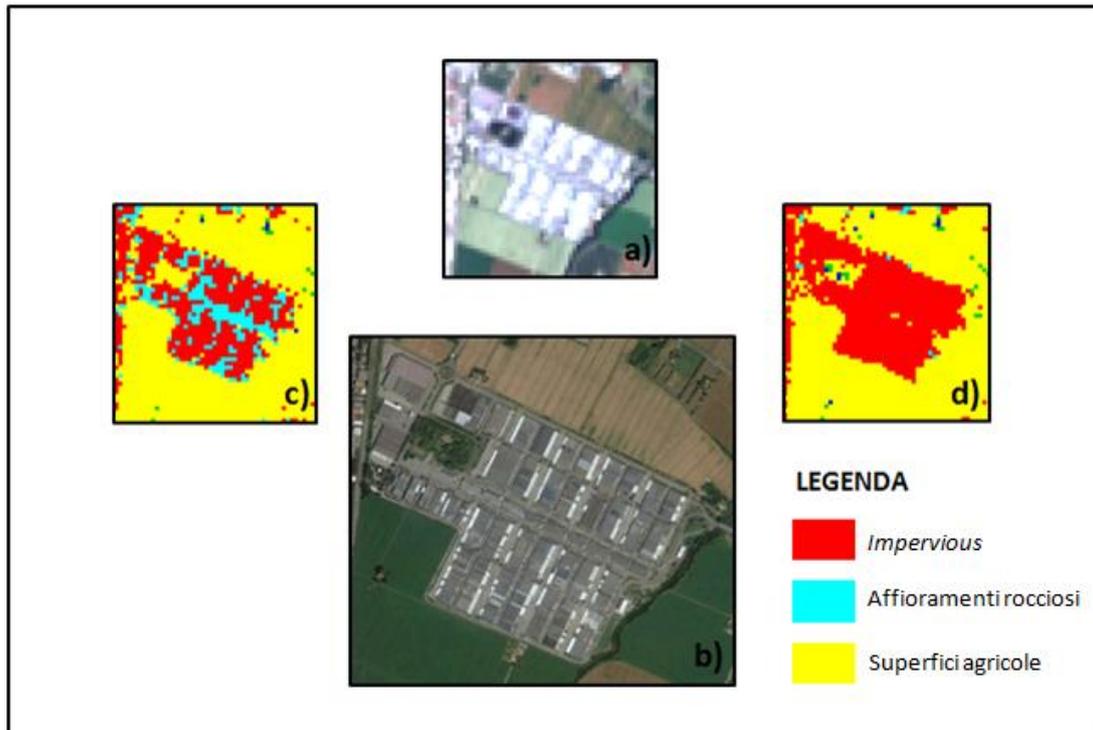


Figura 3.8 a) Particolare dell'immagine Landsat-8 16 giugno 2013; b) la stessa area mostrata su Google Earth; c) classificazione immagine MS; d) classificazione immagine MS+TIR.

Per via della differente risoluzione spaziale, pari a 28,5 m, l'immagine Landsat 7 del 20 giugno 2000 è stata ricampionata. Tramite la procedura di ricampionamento con il metodo del *nearest neighbour*, la dimensione del pixel è stata portata a 30 m, in modo che la classificazione relativa a questa scena potesse essere confrontata con quella delle altre immagini.

Le figure sotto riportate mostrano le immagini utilizzate per la successiva fase di classificazione.

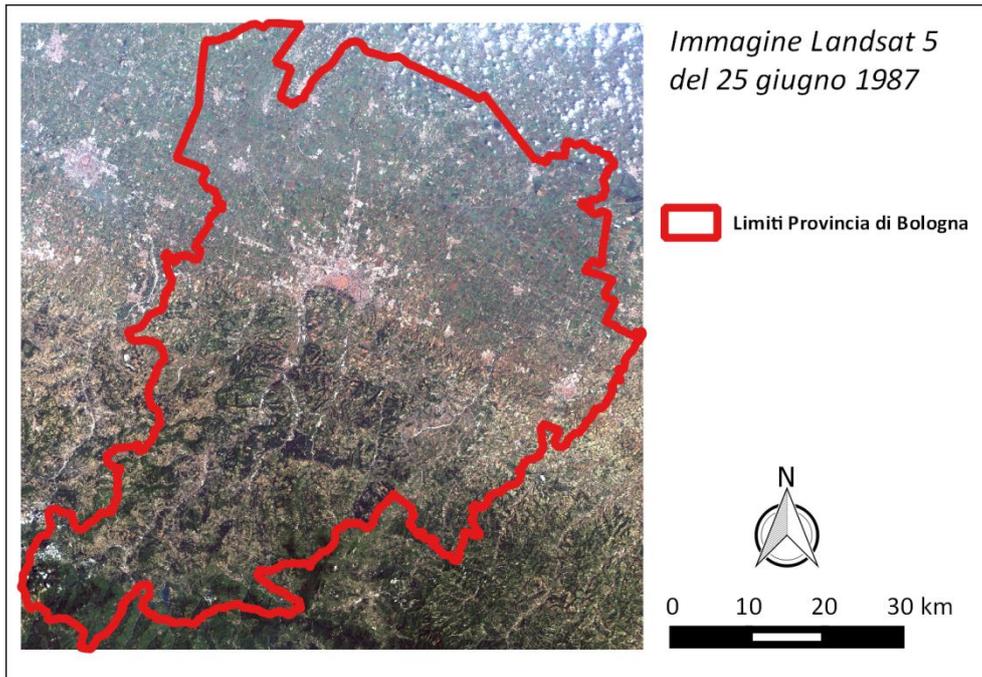


Figura 3.9 Immagine Landsat-5 25 giugno 1987 visualizzata in colori naturali.

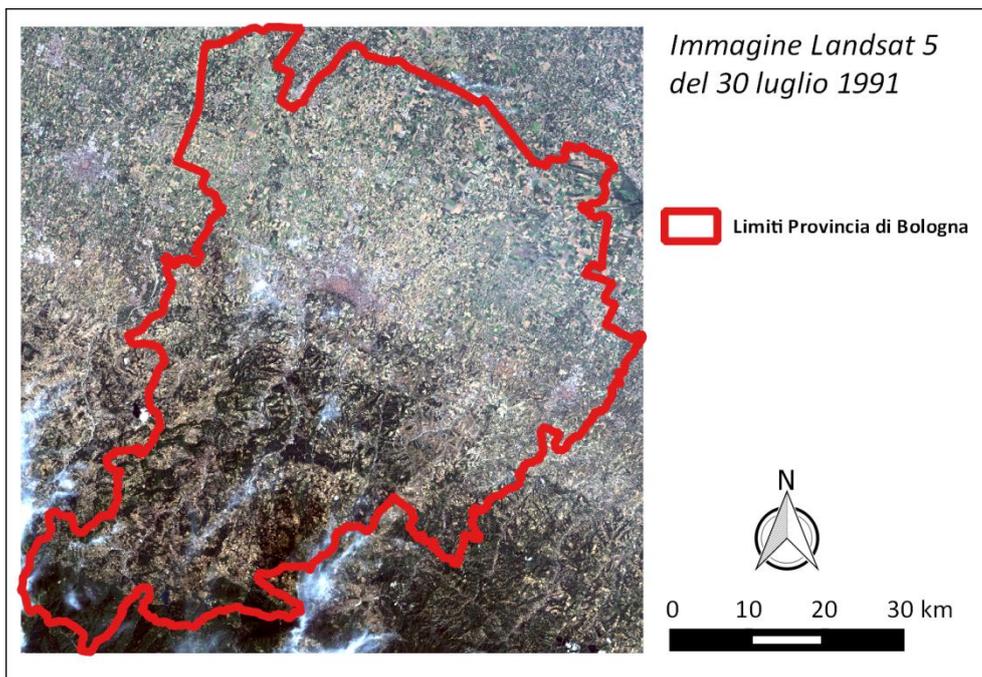


Figura 3.10 Immagine Landsat-5 30 luglio 1991 visualizzata in colori naturali.

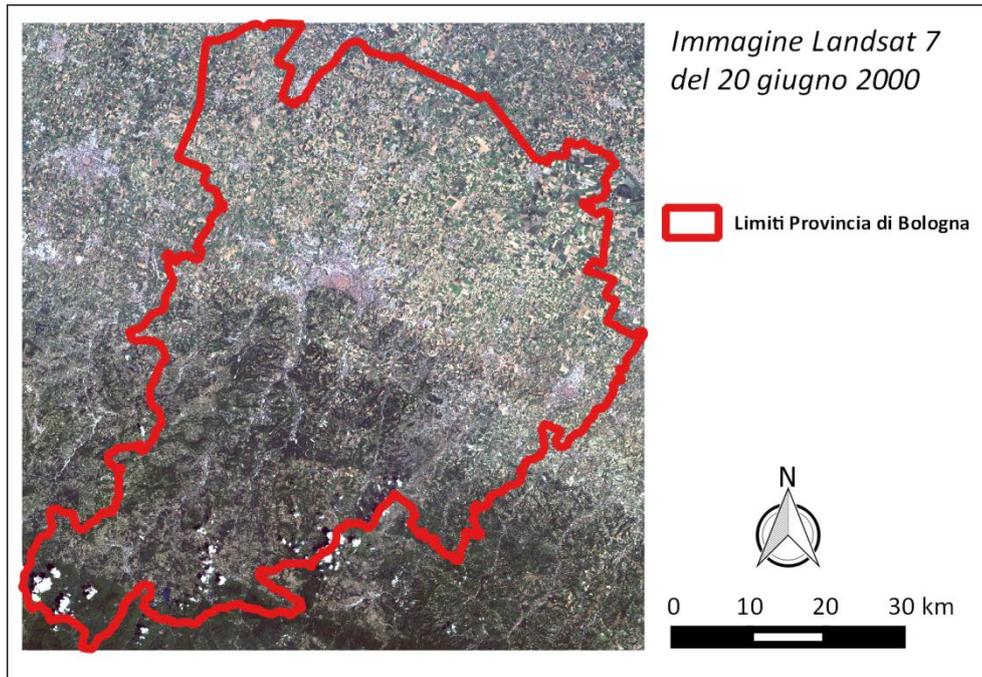


Figura 3.11 Immagine Landsat-7 20 giugno 2000 visualizzata in colori naturali.

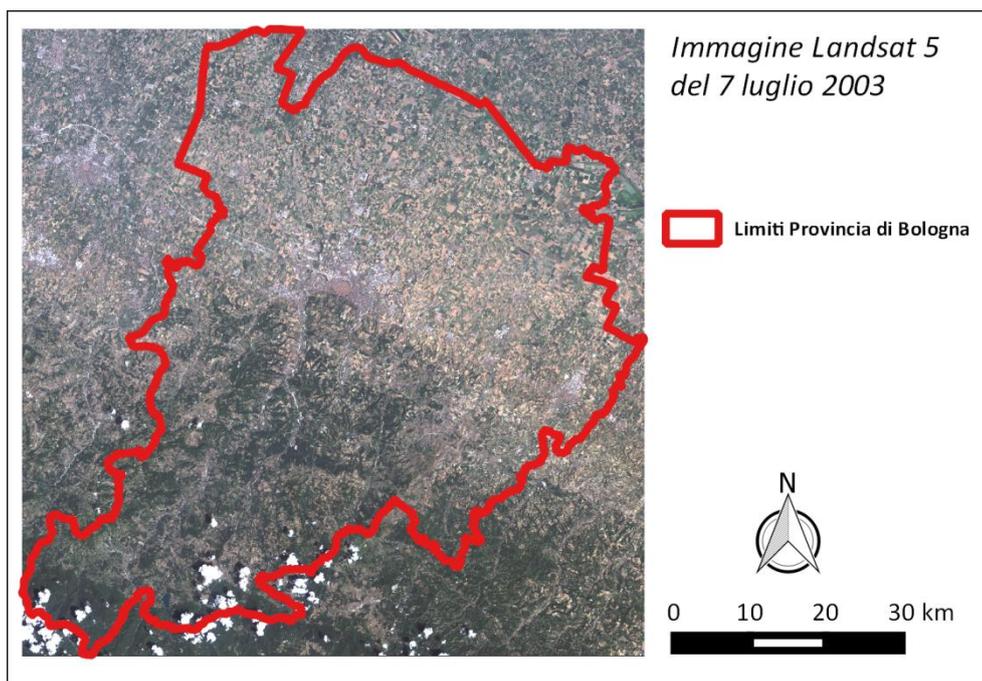


Figura 3.12 Immagine Landsat-5 7 luglio 2003 visualizzata in colori naturali.

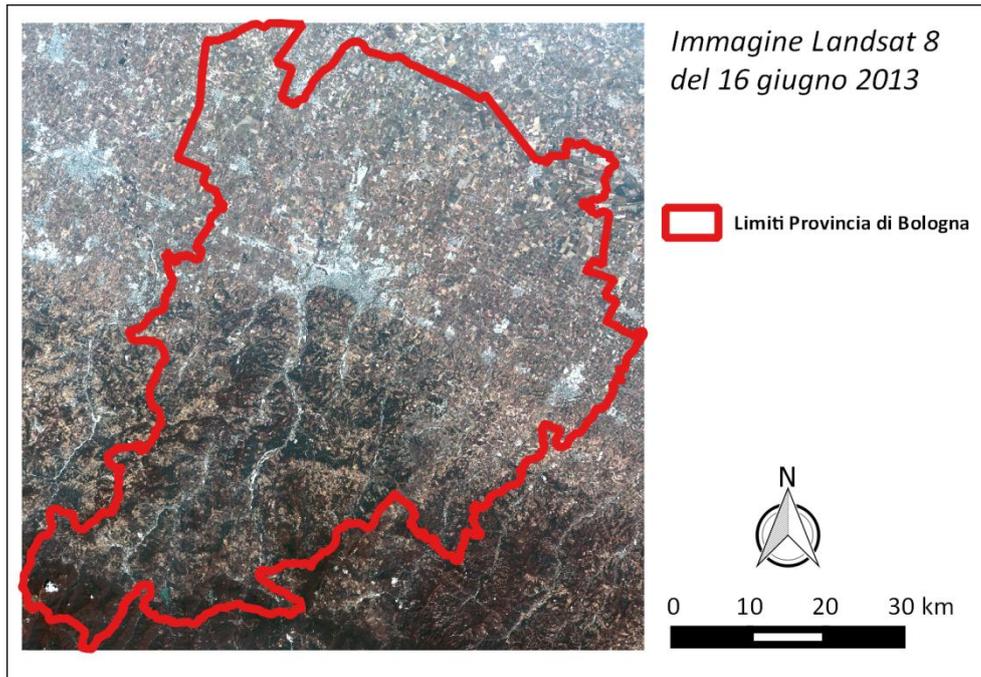


Figura 3.13 Immagine Landsat-8 16 giugno 2013 visualizzata in colori naturali.

3.2.3 Classificazione

Per la classificazione delle immagini a disposizione si è scelta la metodologia *pixel-based*, facendo riferimento quindi a quell'insieme di tecniche che si basano sulle caratteristiche spettrali di ogni singolo pixel. Come già esposto nella parte relativa allo stato dell'arte sull'argomento, infatti, per le immagini a media risoluzione è preferibile operare questo tipo di scelta, anziché, ad esempio, quella denominata *object-based*, che invece fornisce risultati migliori con le immagini ad alta risoluzione.

Vista l'estensione dell'area e la complessità dei paesaggi presenti, si è deciso di usare direttamente un metodo guidato, in quanto il tentativo fatto con un approccio automatico aveva già messo in luce un alto grado di confusione tra *impervious* e non *impervious*. Si è proceduto quindi alla definizione delle classi di interesse, tenendo come riferimento il primo livello della legenda del CORINE Land Cover, ma riadattandolo alle esigenze della mappatura dell'oggetto di studio. Di conseguenza, si è pervenuti all'identificazione di sei categorie, di seguito descritte:

- **Impervious:** raggruppa tutte le superfici impermeabili, sia in ambito urbano che non; contiene anche cave e cantieri, che, seppur essendo

aree per lo più permeabili, rappresentano oggetti che, almeno nel momento temporale preso in considerazione, implicano un consumo di territorio;

- **Superfici agricole:** identificano tutte le aree oggetto di colture agricole, compresi i terreni a riposo, l'arboricoltura e i prati da sfalcio;
- **Superfici naturali:** sono costituite da tutti gli elementi naturali del territorio con presenza di vegetazione, quali boschi, arbusteti, prati d'alta montagna e formazioni caratterizzanti le aree umide; comprendono anche le aree verdi, attrezzate e no, in ambito urbano;
- **Affioramenti rocciosi:** nelle classificazioni di tipo CORINE sono considerate superfici naturali, ma in questo caso, vista la vicinanza spettrale con le aree industriali e con le strade, si è preferito fare una classe a parte;
- **Corpi idrici:** comprendono tutti gli elementi con presenza di acqua, e quindi laghi, fiumi, bacini artificiali di varia dimensione ed aree umide;
- **Unclassified:** individua quei pixel rimasti non classificati o coperti dalle nuvole e dalle relative ombre.

Al fine di ottenere un'efficace classificazione, le informazioni di tipo tematico contenute in queste sei categorie sono state integrate con le caratteristiche spettrali degli elementi che le compongono. Pertanto le classi sono state scomposte in più sottogruppi, rappresentanti oggetti che, oltre al dato relativo alla copertura del suolo, avessero in comune anche la firma spettrale. Nella Figura 3.14, ad esempio, sono riportate le sottocategorie che, in una fase successiva alla classificazione, sono state raggruppate sotto la dicitura "*Impervious*".

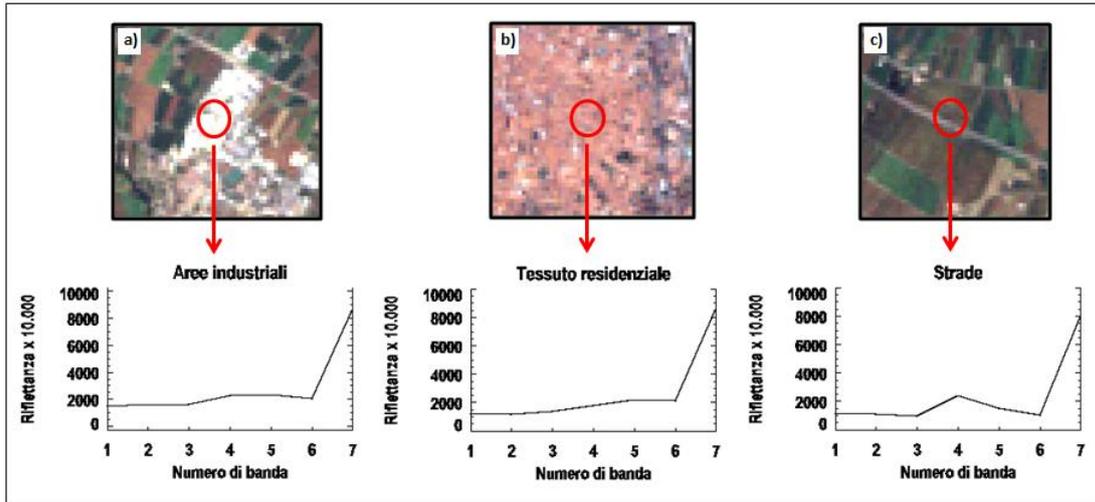


Figura 3.14 Firme spettrali delle sottoclassi componenti la categoria “Impervious”: a) aree industriali, b) strade, c) tessuto residenziale.

Mediamente per ogni immagine sono state individuate 15 sottoclassi rappresentative del territorio; la maggior parte di esse è stata creata per la categoria “Superfici agricole” che è quella che presenta maggiore variabilità spettrale (Figura 3.15).

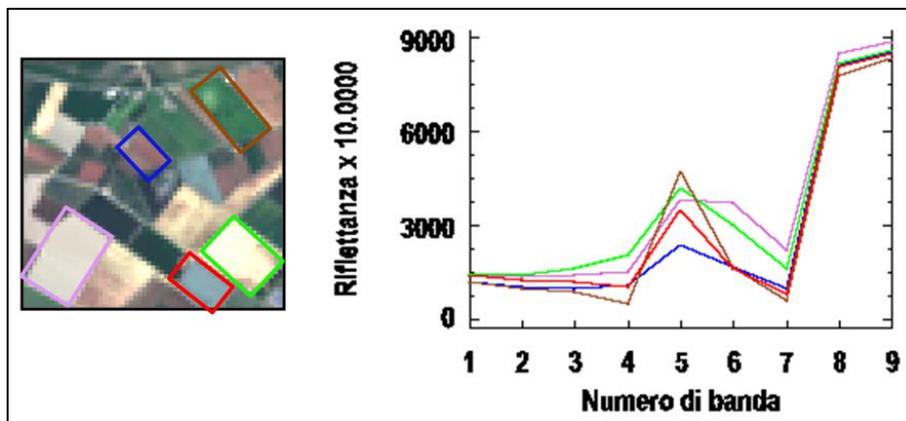


Figura 3.15 Estratto rappresentante la classe “Superfici agricole” con le firme spettrali di alcune sottoclassi.

Per ciascuna sottoclasse sono stati individuati su ogni immagine i pixel campione (*training sites*) necessari per addestrare il classificatore; essi sono stati distribuiti su tutto il territorio d’interesse, compatibilmente con la loro dislocazione. Ad esempio, la categoria “Affioramenti rocciosi” è presente soprattutto nella fascia collinare-montana, così come quella delle “Superfici naturali”, con qualche eccezione per quest’ultima, rappresentata da alcune aree umide in pianura o parchi urbani particolarmente estesi. In generale, il numero di pixel per ogni sottocategoria è

compreso tra i 200 ed i 300; solo per le strade sono stati individuati meno elementi, poiché, a causa della risoluzione spaziale, sono risultate distinguibili solo quelle più larghe, in genere le autostrade. La fase di determinazione dei vari *training sites* è stata supportata dall'utilizzo di Google Earth; in particolare, per la zona interessata, sono a disposizione su questa piattaforma immagini a colore naturale del 2003, 2012 e 2014, che sono state un ottimo riferimento per le immagini Landsat del 2003 e 2013. Per il 1987, 1991 e 2000 si è cercato di distribuire le aree campione scegliendo elementi che verosimilmente non dovrebbero essere cambiati nel tempo.

Terminata questa onerosa fase di addestramento tramite definizione e riconoscimento dei *training sites*, si è proceduto alla classificazione, operata attraverso l'algoritmo di massima verosimiglianza; il prodotto di questo tipo di classificatore è una mappa nella quale le classi sono assegnate in modo da minimizzare la probabilità di errore, che è stata impostata al 95%. La rappresentazione così ottenuta è quella secondo le sottoclassi; in una fase successiva esse sono state raggruppate secondo le sei categorie individuate come legenda finale. Per le immagini del 1991, 2000 e 2003, essendo tappe intermedie dell'intero periodo analizzato, si è scelto di operare un'ulteriore sintesi, unendo le classi "Superfici agricole" e "Superfici naturali". A causa della presenza di vegetazione in entrambe, infatti, può generarsi un errore di confusione tra le due categorie e, per gli anni indicati, avendo preferito una maggiore accuratezza relativa solo all'impermeabilizzato, tale misclassificazione è stata abbastanza frequente.

I risultati così ottenuti sono stati migliorati attraverso un meccanismo di applicazione di maschere per correggere eventuali errori e la presenza di copertura nuvolosa. Quest'ultima è stata in parte ridotta prendendo la classificazione ottenuta per ogni anno e confrontandola con quelle degli altri quattro periodi: se tutti i pixel classificati come "Copertura nuvolosa" nella mappa analizzata erano stati assegnati ad un'altra categoria, uguale per le altre quattro immagini, allora si è provveduto a sostituire il valore iniziale con quello uguale alle classificazioni di confronto. Analogamente si è proceduto con le correzioni inerenti la classe "*Impervious*": in questo caso si è dovuto tener conto delle implicazioni relative alla categoria

considerata per quanto concerne lo stato iniziale e finale del periodo temporale analizzato. Di conseguenza, se un pixel nel 1987 non era stato classificato come impermeabilizzato, ma negli anni successivi lo era, esso non è stato modificato, poiché poteva trattarsi di un'area interessata da nuove urbanizzazioni posteriori al 1987. In modo simile si è fatto per il 2013, dove sono rimasti invariati i pixel assegnati all'*impervious*, anche se nei periodi precedenti erano stati mappati in un'altra categoria; è stata creata solo una maschera spaziale sulle zone calanchive per correggere la confusione con questa classe. Inoltre, per questo stesso anno, si è scelto di non sostituire i pixel classificati come non impermeabilizzati ma mappati come *impervious* nei quattro anni precedenti. Infatti, nel momento in cui si è generata la maschera che sarebbe servita per modificare i valori e la si è andata a sovrapporre su Google Earth per avere conferma della validità dell'operazione, si è visto che venivano evidenziate delle aree per le quali, facendo il confronto con le immagini disponibili del 2003, c'era stato un effettivo passaggio da impermeabilizzato a suolo nudo o vegetato. Si tratta prevalentemente di superfici come edifici smantellati o cave dismesse, come mostrato in Figura 3.16, per le quali il cambio di classificazione non sarebbe stato corretto. Chiaramente questa scelta implica anche una non correzione di pixel classificati in modo sbagliato, ma considerando che il contributo totale di questa maschera alla classe "Impervious" sarebbe stato dello 0,05%, si è deciso di lasciare i valori iniziali.



Figura 3.16 Sovrapposizione della maschera "Impervious 1987-1991-2000-2003/Superfici agricole 2013" su Google Earth e confronto tra le relative immagini 2003-2013.

La Figura 3.17 riporta lo schema delle correzioni applicate alle classificazioni ottenute, secondo quanto appena esposto. Questo tipo di correzione è servito soprattutto per risolvere, almeno parzialmente, alcuni errori maggiormente presenti nelle classificazioni degli anni 2000 e 2003: si tratta di determinati tipi di suoli coltivati che inizialmente sono stati confusi con l'urbanizzato, così come alcuni calanchi lo sono stati con le strade (Figura 3.18).

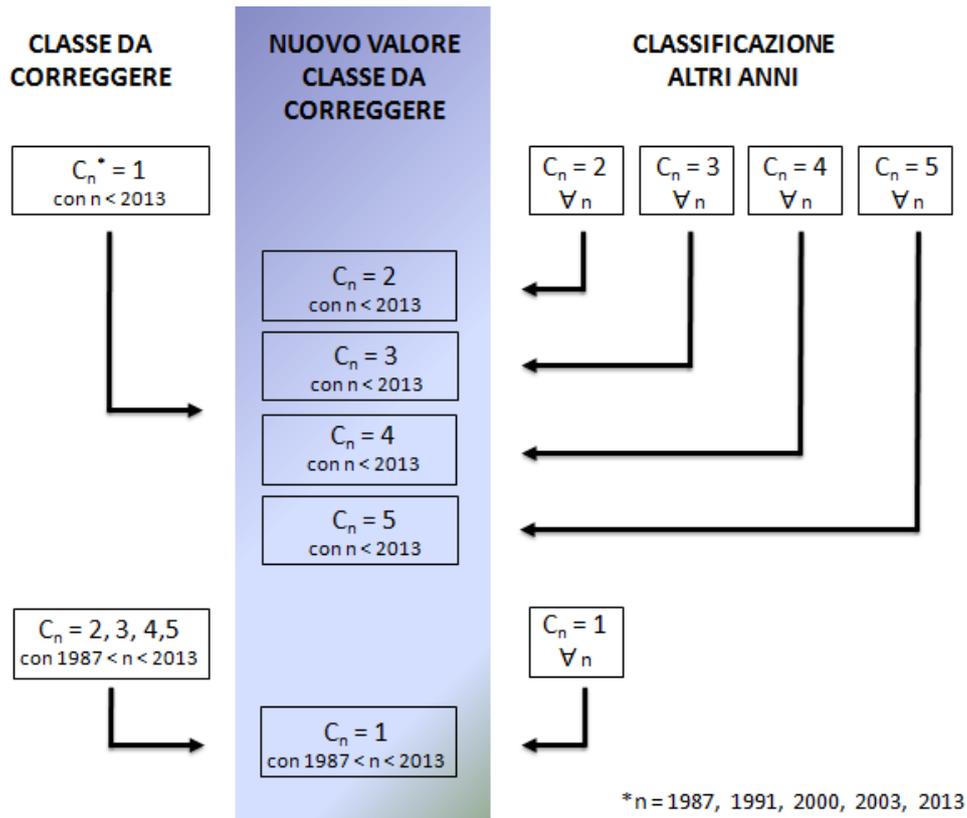


Figura 3.17 Schema illustrante la procedura di correzione degli errori di classificazione per la classe "Impervious"; i valori assegnati a C rappresentano: 1 = Impervious, 2 = Superfici agricole, 3 = Superfici naturali, 4 = Affioramenti rocciosi, 5 = Corpi idrici.

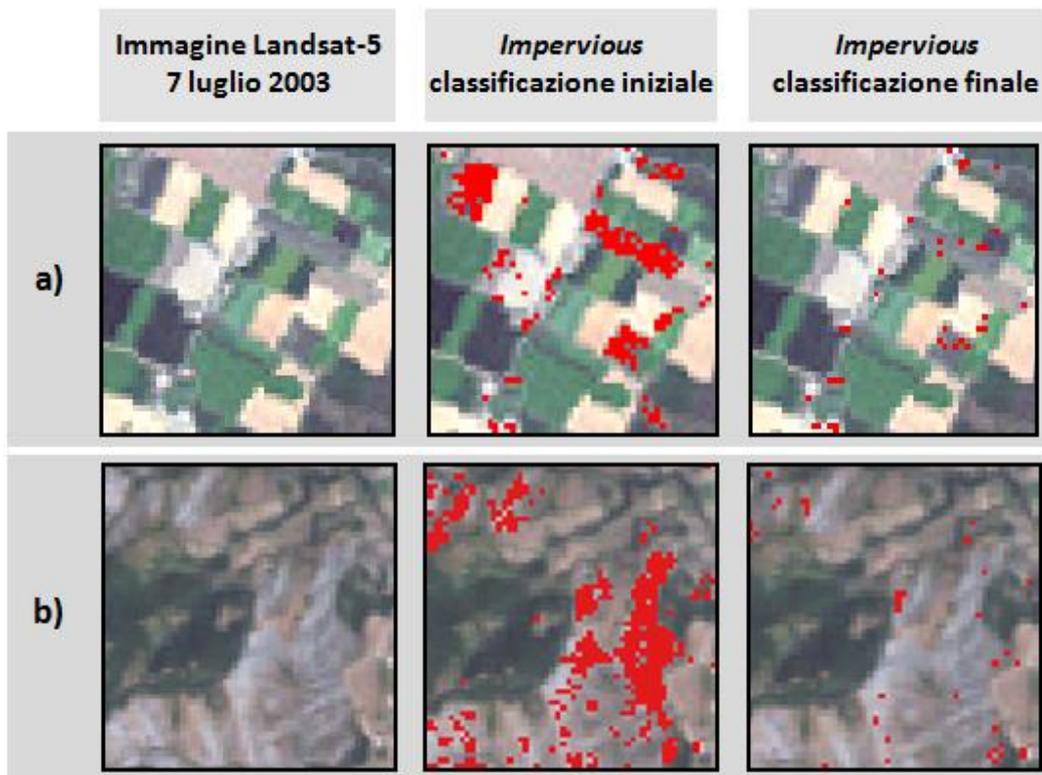


Figura 3.18 Esempi di correzione della classe "Impervious" tramite applicazione di maschere: a) terreni agricoli classificati come impervious; b) calanchi classificati come impervious.

Lo stesso tipo di approccio non è stato usato rispetto alle altre classi della legenda, in quanto si è preferito agire solo sull'oggetto obiettivo dello studio. Quindi, ad esempio, se un pixel è stato classificato come "Affioramenti rocciosi" nel 1991, ma in tutti gli altri anni ha valore "Territori agricoli", esso è stato lasciato al valore iniziale. Da questa scelta deriva la presenza nelle mappe finali del "rumore" costituito da pixel singoli sparsi nelle matrici principali. Spesso, ad esempio, all'interno del tessuto agricolo si possono riscontrare dei pixel classificati come "Affioramenti rocciosi" che indicano per lo più sterrati e cavedagne; altrettanto succede nelle aree urbane, dove essi rappresentano delle misclassificazioni con zone di cantiere o aree industriali (Figura 3.19).

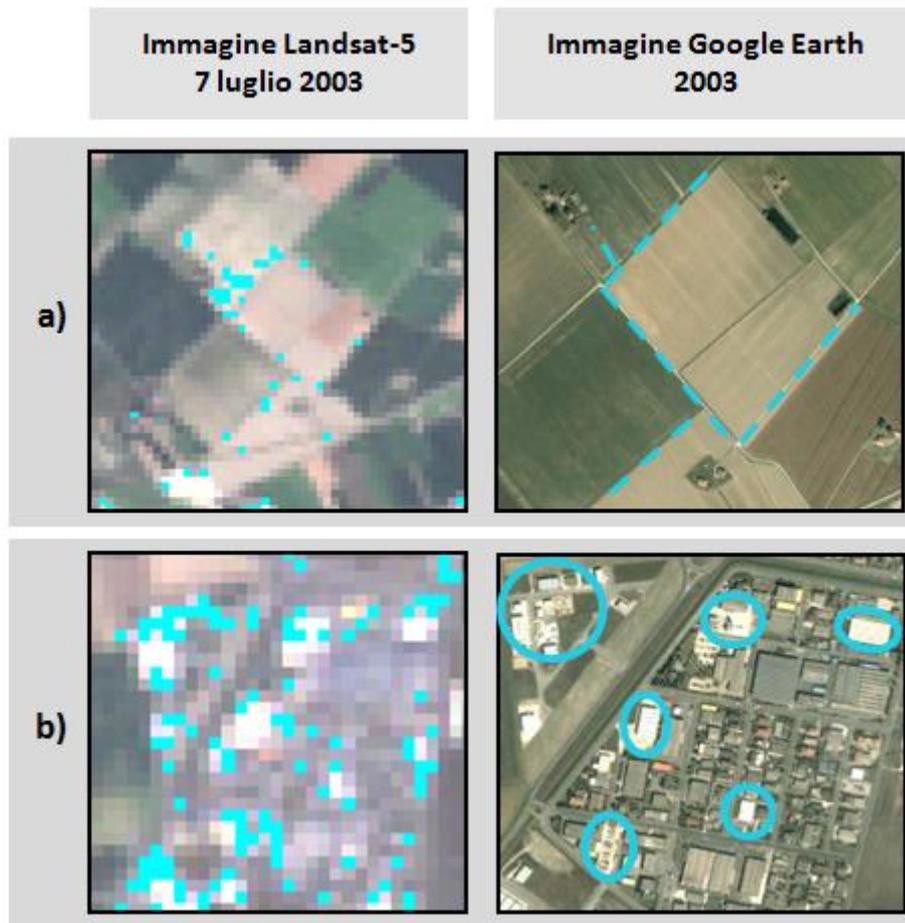


Figura 3.19 Pixel della classe "Affioramenti rocciosi" (in celeste) classificati come: a) superfici agricole, b) impervious; nell'immagine di Google Earth le zone corrispondenti sono evidenziate con lo stesso colore.

Di seguito sono riportate dapprima le percentuali delle classi per ogni anno (Tabella 3.4) e poi le classificazioni finali ottenute; si ricorda che per il 1991, 2000 e 2003 le categorie “Superfici agricole” e “Superfici naturali” sono state unite.

ANNO	IMPERVIOUS	SUPERFICI AGRICOLE	SUPERFICI NATURALI	AFFIORAMENTI ROCCIOSI	CORPI IDRICI	Unclassified
1987	2,8	73,6	21,7	1,5	0,3	0,1
1991	3,0	94,5		2,0	0,2	0,3
2000	3,8	92,5		2,7	0,4	0,6
2003	4	93,5		1,3	0,4	0,8
2013	4,9	63,7	28,2	2,1	1,0	0,1

Tabella 3.4 Percentuali delle classi finali per ogni immagine.

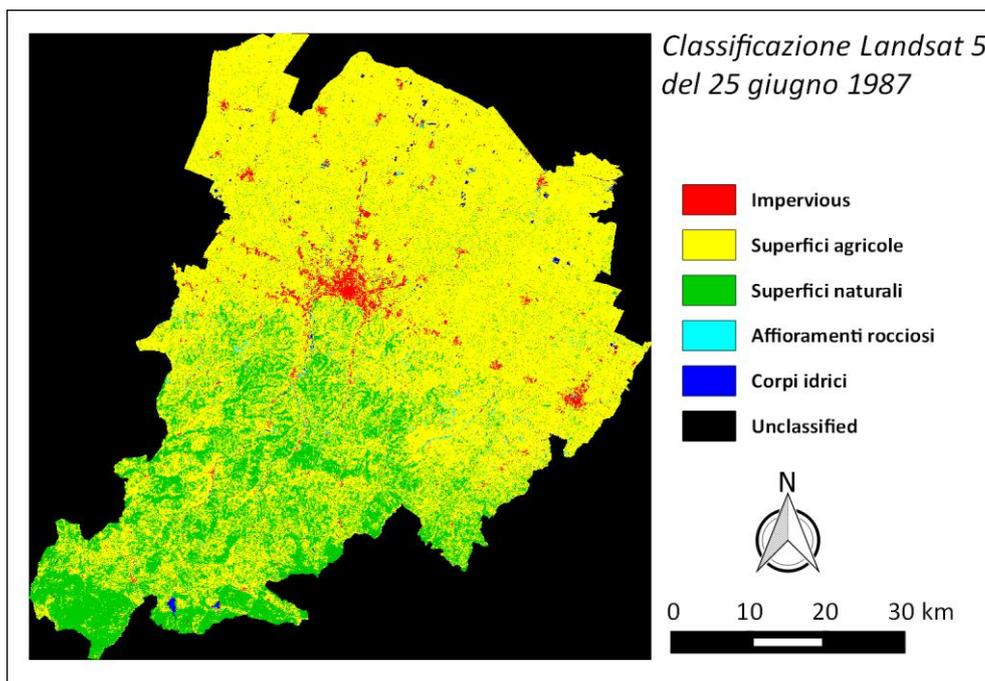


Figura 3.20 Classificazione finale dell'immagine Landsat-5 25 giugno 1987.

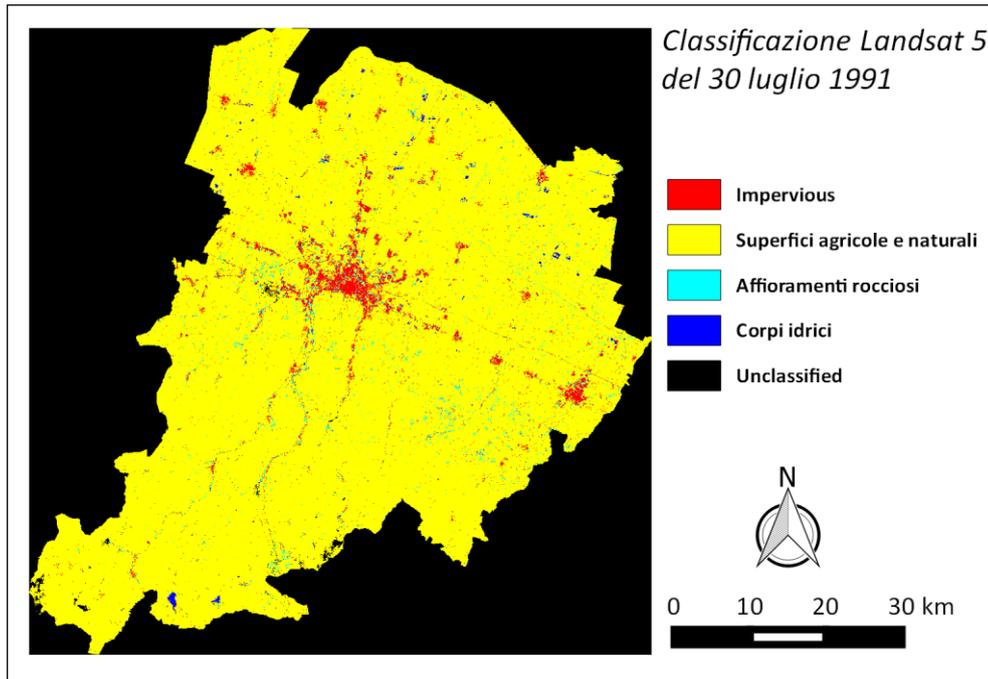


Figura 3.21 Classificazione finale dell'immagine Landsat-5 30 luglio 1991.

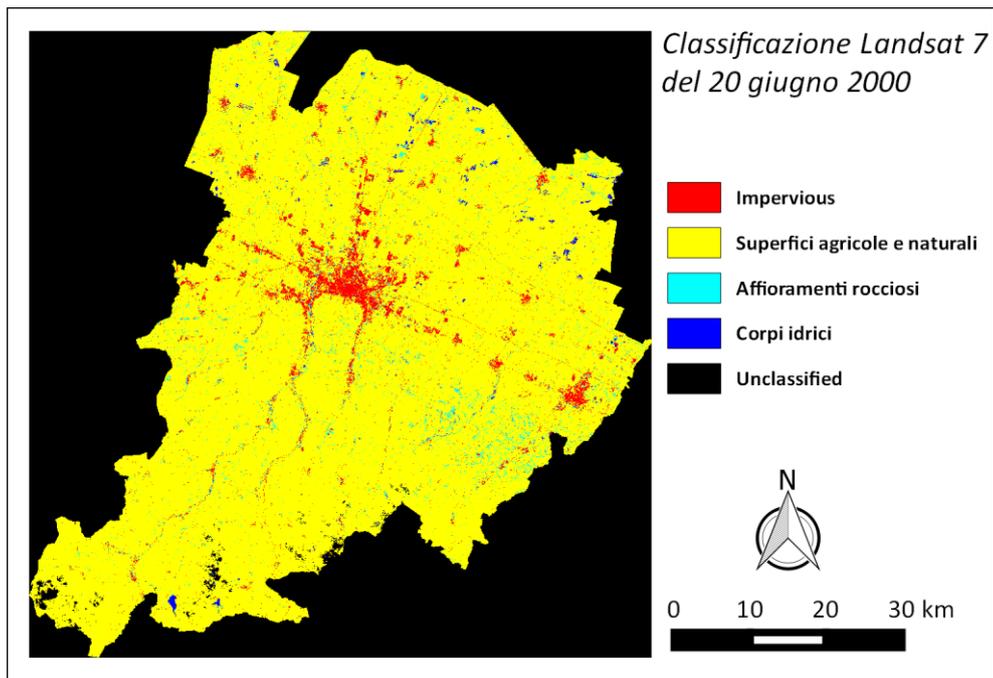


Figura 3.22 Classificazione finale dell'immagine Landsat-7 20 giugno 2000.

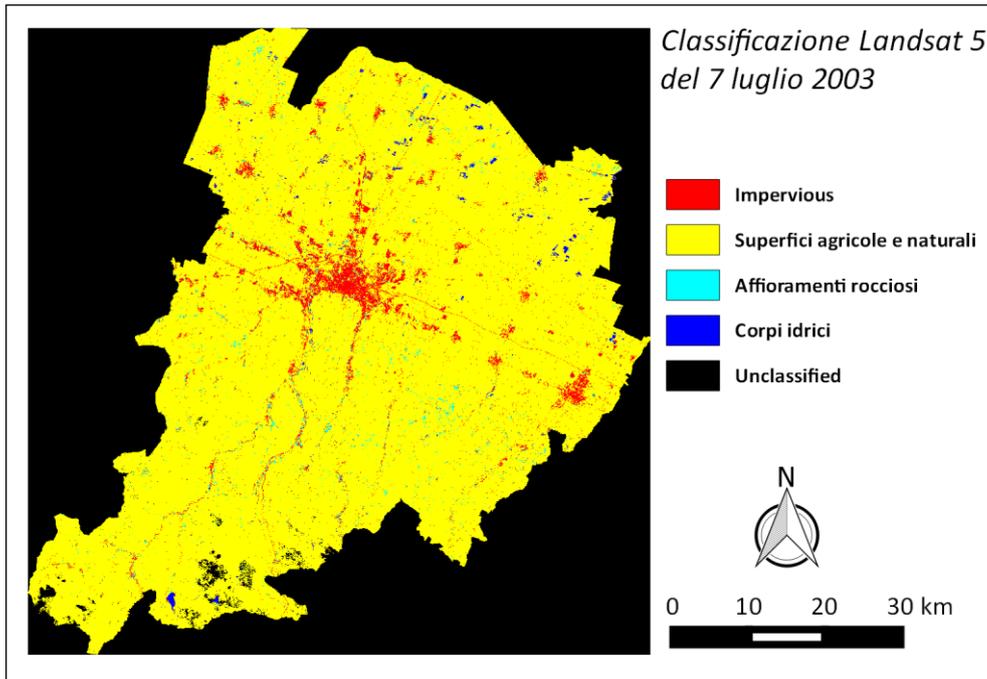


Figura 3.23 Classificazione finale dell'immagine Landsat-5 7 luglio 2003.

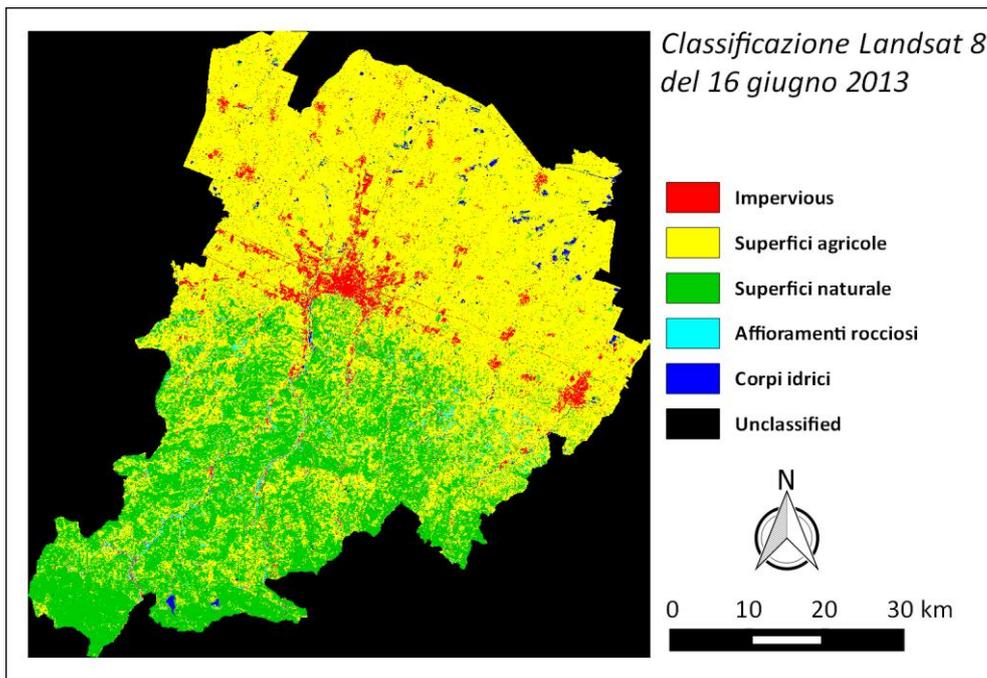


Figura 3.24 Classificazione finale dell'immagine Landsat-8 16 giugno 2013.

3.2.4 Validazione

Tutte le classificazioni prodotte sono state validate attraverso dei punti di verità (*Ground Truth Points*) presi sulle immagini. Come per i *training sites*, anche qui si è fatto riferimento a Google Earth per le immagini relative al 2003 e 2013, mentre per gli altri anni i pixel di controllo sono stati posti su aree verosimilmente stabili dal

punto di vista della copertura. La validazione è stata fatta rispetto alle classi finali della legenda e, per ognuna di esse, sono stati collezionati circa 60 punti, sempre compatibilmente con la loro distribuzione spaziale e rappresentatività. Si è cercato comunque di individuare pixel per tutte le sottocategorie riportate nei *training sites*. Di seguito sono riportate le matrici di errori per tutte le classificazioni prodotte assieme ai valori di accuratezza, che variano tra l'86% (1987) ed il 92% (2000), relativamente all'accuratezza globale, e tra 0,85 (1987-2013) e 0,89 (2000) per il coefficiente K. Questi valori risentono delle differenti categorie tra 1987-2013 e 1991-2000-2003; se anche nello stato iniziale e finale del periodo analizzato le classi "Superfici agricole" e "Superfici naturali" fossero state accorpate, allora si sarebbe avuta un'accuratezza globale pari al 91% e $K = 0,88$ per il 1987, 93% e $K = 0,9$ per il 2013.

CLASSE	DATI DI RIFERIMENTO (pixel)					TOTALE
	<i>Impervious</i>	Superfici agricole	Superfici naturali	Affioramenti rocciosi	Corpi idrici	
<i>Unclassified</i>	0	0	0	0	3	3
<i>Impervious</i>	62	0	0	4	1	67
Superfici agricole	5	71	19	3	3	101
Superfici naturali	0	2	42	1	0	45
Affioramenti rocciosi	2	0	0	38	0	40
Corpi idrici	0	0	0	0	44	44
TOTALE	69	73	61	46	51	300

ACCURATEZZA GLOBALE = 85,7 % (257/300)	COEFFICIENTE K = 0,82
----------------------------------------	-----------------------

CLASSE	ERRORE DI COMMISSIONE (%)	ERRORE DI OMISSIONE (%)	ACCURATEZZA PRODUTTORE (%)	ACCURATEZZA UTENTE (%)
<i>Impervious</i>	7,5	10,1	89,9	92,5
Superfici agricole	29,7	2,7	97,3	70,3
Superfici naturali	6,7	31,2	68,9	93,3
Affioramenti rocciosi	5,0	17,4	82,6	95,0
Corpi idrici	0,0	13,7	86,3	100,0

Tabella 3.5 Matrice di errore e misure di accuratezza per la classificazione dell'immagine Landsat 5 del 25 giugno 1987.

CLASSE	DATI DI RIFERIMENTO (pixel)				
	<i>Impervious</i>	Superfici agricole e naturali	Affioramenti rocciosi	Corpi idrici	TOTALE
<i>Unclassified</i>	1	0	0	0	1
<i>Impervious</i>	60	0	4	0	64
Superfici agricole e naturali	7	74	7	4	92
Affioramenti rocciosi	1	1	34	2	38
Corpi idrici	0	0	0	45	45
TOTALE	69	75	45	51	240

ACCURATEZZA GLOBALE = 88,7 % (213/240)

COEFFICIENTE K = 0,85

CLASSE	ERRORE DI COMMISSIONE (%)	ERRORE DI OMISSIONE (%)	ACCURATEZZA PRODUTTORE (%)	ACCURATEZZA UTENTE (%)
<i>Impervious</i>	6,3	13,0	87,0	93,8
Superfici agricole e naturali	19,6	1,3	98,7	80,4
Affioramenti rocciosi	10,5	24,4	75,6	89,5
Corpi idrici	0,0	11,8	88,2	100,0

Tabella 3.6 Matrice di errore e misure di accuratezza per la classificazione dell'immagine Landsat 5 del 30 luglio 1991.

CLASSE	DATI DI RIFERIMENTO (pixel)				
	<i>Impervious</i>	Superfici agricole e naturali	Affioramenti rocciosi	Corpi idrici	TOTALE
<i>Unclassified</i>	0	0	0	3	3
<i>Impervious</i>	63	0	3	1	67
Superfici agricole e naturali	6	74	1	0	81
Affioramenti rocciosi	0	1	40	4	45
Corpi idrici	0	0	0	42	42
TOTALE	69	75	44	50	238

ACCURATEZZA GLOBALE = 92 % (219/238)

COEFFICIENTE K = 0,89

CLASSE	ERRORE DI COMMISSIONE (%)	ERRORE DI OMISSIONE (%)	ACCURATEZZA PRODUTTORE (%)	ACCURATEZZA UTENTE (%)
<i>Impervious</i>	6,0	8,7	91,3	94,0
Superfici agricole e naturali	8,6	1,3	98,7	91,4
Affioramenti rocciosi	11,1	9,1	90,9	88,9
Corpi idrici	0,0	16,0	84,0	100,0

Tabella 3.7 Matrice di errore e misure di accuratezza per la classificazione dell'immagine Landsat 7 del 20 giugno 2000.

CLASSE	DATI DI RIFERIMENTO (pixel)				
	<i>Impervious</i>	Superfici agricole e naturali	Affioramenti rocciosi	Corpi idrici	TOTALE
<i>Unclassified</i>	0	0	0	1	1
<i>Impervious</i>	59	0	3	0	62
Superfici agricole e naturali	6	75	6	2	89
Affioramenti rocciosi	3	0	35	3	41
Corpi idrici	1	0	0	44	45
TOTALE	69	75	44	50	238

ACCURATEZZA GLOBALE = 89,5 % (213/238)

COEFFICIENTE K = 0,86

CLASSE	ERRORE DI COMMISSIONE (%)	ERRORE DI OMISSIONE (%)	ACCURATEZZA PRODUTTORE (%)	ACCURATEZZA UTENTE (%)
<i>Impervious</i>	4,8	14,5	85,5	95,2
Superfici agricole e naturali	15,7	0,0	100,0	84,3
Affioramenti rocciosi	14,6	20,5	79,6	85,7
Corpi idrici	2,2	12,0	88,0	97,8

Tabella 3.8 Matrice di errore e misure di accuratezza per la classificazione dell'immagine Landsat 5 del 7 luglio 2003.

CLASSE	DATI DI RIFERIMENTO (pixel)					
	<i>Impervious</i>	Superfici agricole	Superfici naturali	Affioramenti rocciosi	Corpi idrici	TOTALE
<i>Unclassified</i>	1	0	0	0	0	1
<i>Impervious</i>	60	1	0	3	0	64
Superfici agricole	8	67	12	3	0	90
Superfici naturali	0	3	46	1	0	50
Affioramenti rocciosi	0	2	0	37	1	40
Corpi idrici	0	0	1	0	49	50
TOTALE	69	73	59	44	50	295

ACCURATEZZA GLOBALE = 87,8 % (259/295)

COEFFICIENTE K = 0,85

CLASSE	ERRORE DI COMMISSIONE (%)	ERRORE DI OMISSIONE (%)	ACCURATEZZA PRODUTTORE (%)	ACCURATEZZA UTENTE (%)
<i>Impervious</i>	6,3	13,0	87,0	93,8
Superfici agricole	25,6	8,2	91,8	74,4
Superfici naturali	8,0	22,0	78,0	92,0
Affioramenti rocciosi	7,5	15,9	84,1	92,5
Corpi idrici	2,0	2,0	98,0	98,0

Tabella 3.9 Matrice di errore e misure di accuratezza per la classificazione dell'immagine Landsat 8 del 30 giugno 2013.

In base ai dati derivanti dalle matrici di errore e dalle accuratezze, è possibile fare diverse considerazioni sulle classi rappresentate.

Partendo dall'*impervious*, si nota come esso, per tutti e cinque gli anni, presenti un errore di omissione maggiore rispetto alla commissione, determinato in prevalenza dalla confusione con la classe delle superfici agricole. Questo accade per il problema già esposto in precedenza della firma spettrale simile tra le due categorie, nello specifico con riferimento ai suoli nudi (Weng 2012) (Figura 3.25), ma anche per la risoluzione spaziale delle immagini. Infatti parte dell'urbanizzato è costituita da piccoli agglomerati sparsi in pianura o anche nella zona collinare - montana; di conseguenza può accadere che i relativi pixel, costituendo piccoli gruppi di pochi elementi, spesso non siano rilevati. Inoltre non bisogna dimenticare il problema delle strade che, per via della larghezza, non sempre sono state classificate; in generale si ha una buona rappresentazione solo dei tratti autostradali.

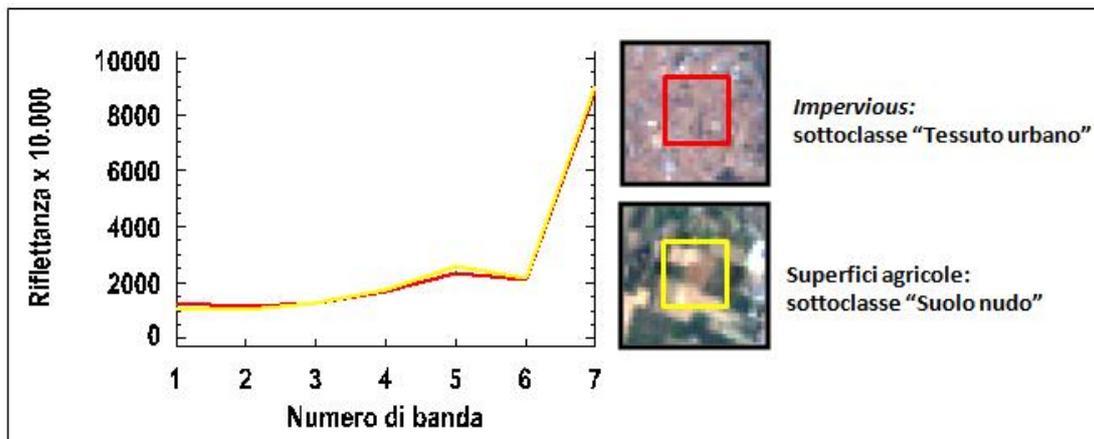


Figura 3.25 Confronto tra le firme spettrali delle classi "Impervious" e "Superfici agricole".

Una piccola parte di *impervious* viene omessa a favore degli affioramenti rocciosi, come mostrato in Figura 3.19, anche in questo caso per un problema relativo alle firme spettrali (Figura 3.26).

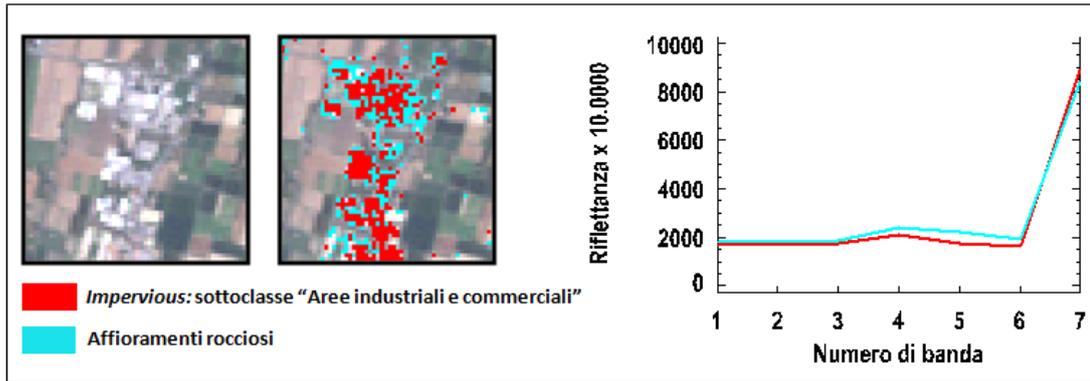


Figura 3.26 Confronto tra le firme spettrali delle classi "Impervious" e "Affioramenti rocciosi".

La classe "Superfici agricole" è invece caratterizzata da un errore di commissione, più alto nel caso la si consideri come singola categoria (1987-2013), più basso quando raggruppata con le "Superfici naturali" (1991-2000-2003). Questo avviene perché, tenendo le due voci separate, le aree a vegetazione naturale sono spesso omesse a favore dell'agricolo, nello specifico molto di più nel 1987 che nel 2013. In particolar modo, la confusione è maggiore in ambito collinare - montano, dove arbusteti stabili o in evoluzione possono essere scambiati, dal punto di vista spettrale, con i prati da sfalcio.

Passando ai "Corpi idrici", si osserva sempre un errore di omissione che diventa quasi nullo solo nel 2013. Anche per questa categoria esiste un problema di rilevamento dovuto alla risoluzione spaziale, perché comprende, tra gli altri, piccoli bacini e corsi d'acqua la cui larghezza può rappresentare una criticità. Nella classificazione del 2013 si è osservato un netto miglioramento della mappatura di questa categoria, tanto che la confusione con le altre voci di legenda è diventata quasi nulla. Ad esempio, sia i corsi idrici sia alcuni canali larghi circa 20 m sono stati rilevati più nettamente, mentre nelle altre classificazioni permane un problema di confusione (Figura 3.27).

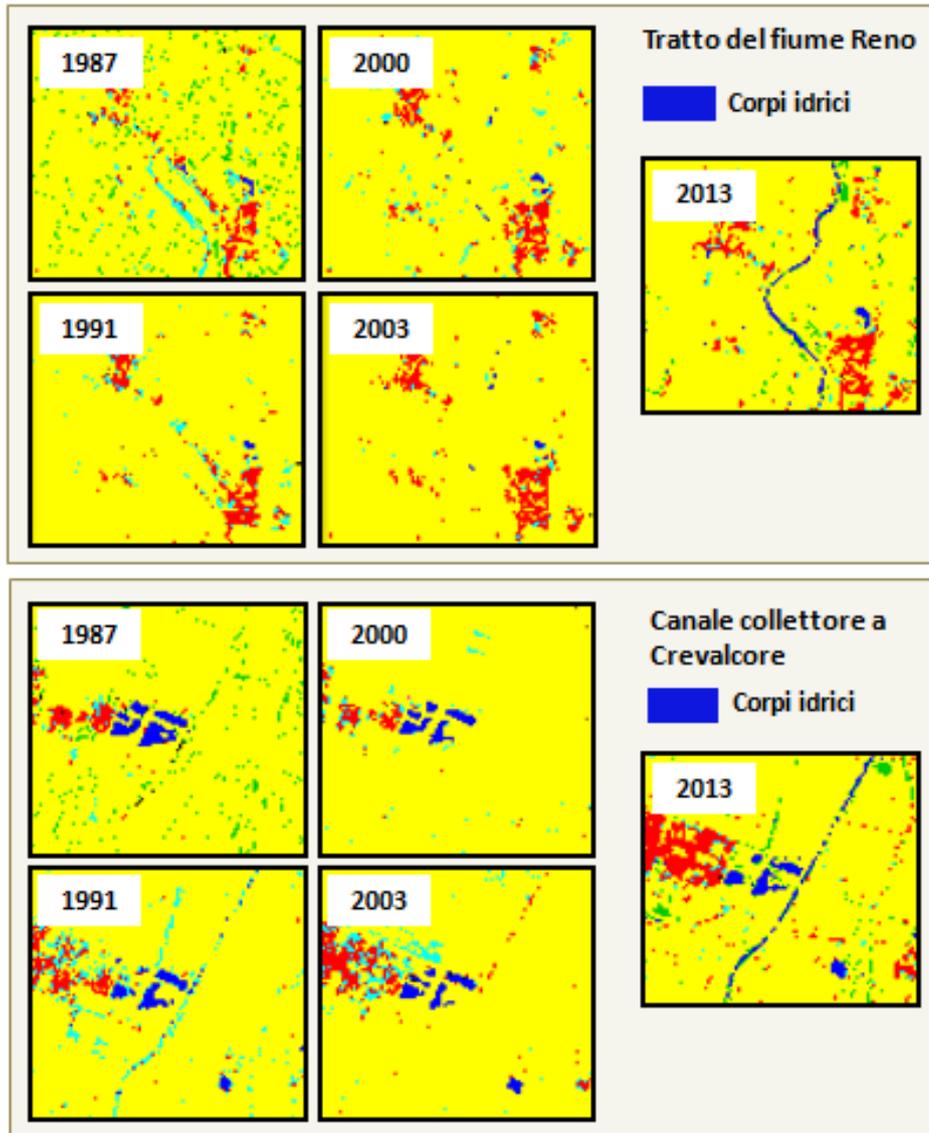


Figura 3.27 Miglioramento nella classificazione dei corpi idrici nell'immagine Landsat-8 16 giugno 2013.

Infine c'è la classe "Affioramenti rocciosi" che, come già anticipato in precedenza con alcune problematiche, ha rappresentato una rilevante fonte di errore, soprattutto per le sue caratteristiche spettrali, tanto che nei cinque anni considerati i suoi valori sono cambiati anche di molto, specie se si tiene conto che questa dovrebbe essere una categoria con poche variazioni sul territorio. Se si esclude il 2000, per il quale è maggiore l'errore di commissione, c'è stata sempre più omissione, determinata per lo più dalla confusione con le superfici agricole e naturali. Questa avviene soprattutto in corrispondenza dei calanchi, dove la presenza di vegetazione erbacea/arbustiva determina una risposta spettrale simile a quella di alcuni campi coltivati. A questo problema si aggiunge l'ulteriore errore

della classificazione nella classe strade delle zone calanchive. Come si può osservare in Figura 3.28, c'è una quasi completa sovrapposizione delle firme spettrali degli affioramenti rocciosi con le strade, che nella maggior parte dei casi ha determinato una commissione dell'*impervious*, parzialmente corretta con l'applicazione delle maschere precedentemente descritte. La terza firma è di una tipologia di seminativi che va invece a generare l'errore di omissione degli affioramenti rocciosi. Il risultato quindi è un'estrema variabilità delle classi in questione nei cinque anni analizzati (Figura 3.29).

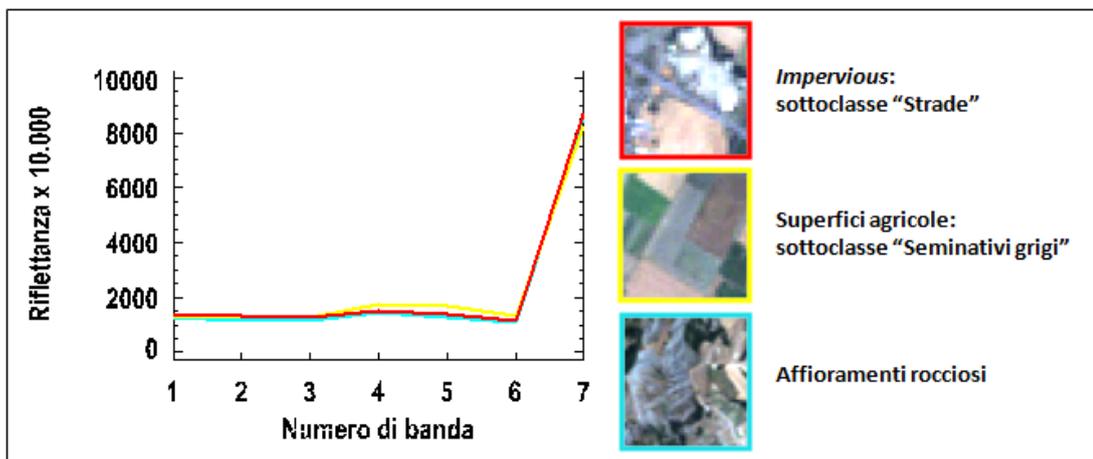


Figura 3.28 Confronto tra firme spettrali delle strade, di una sottoclasse delle superfici agricole e dei calanchi.

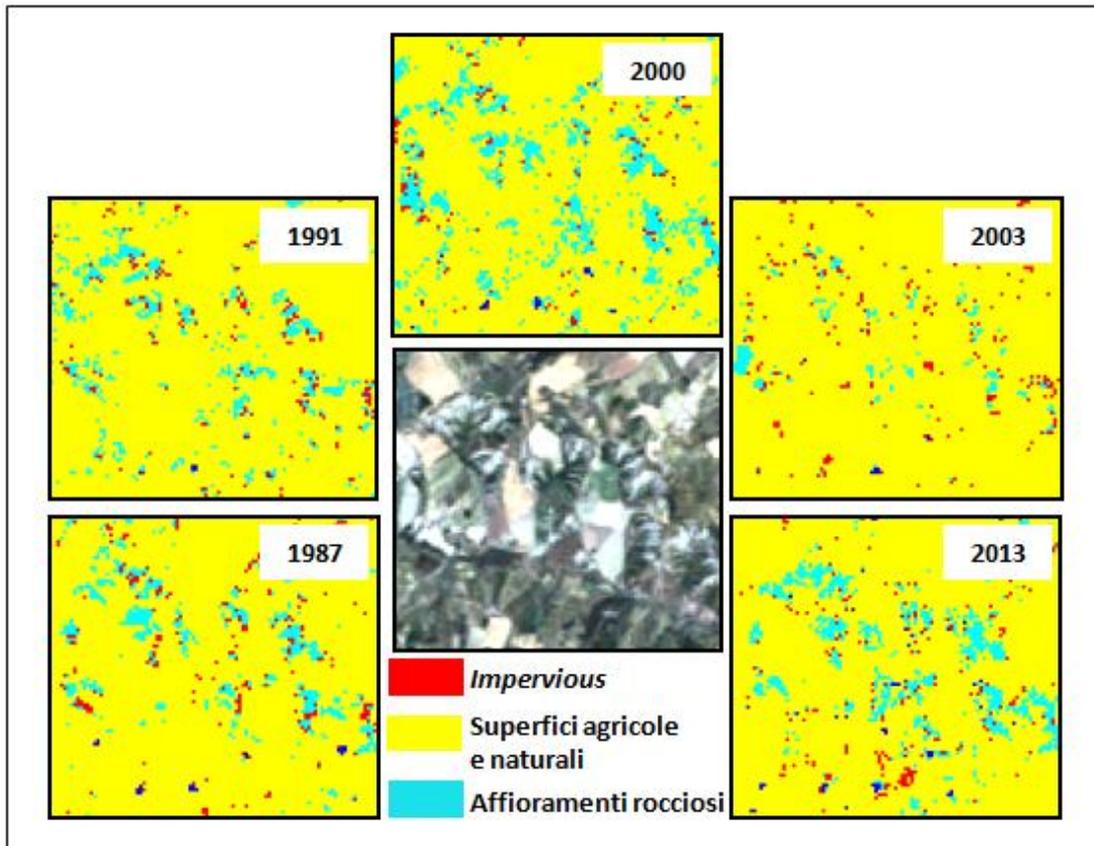


Figura 3.29 Confronto tra le cinque classificazioni su un'area calanchiva.

3.2.5 Analisi di *change detection*: come cambia il territorio

Ai fini di una completa analisi delle dinamiche territoriali, l'operazione di *change detection* tra le classificazioni delle immagini degli anni selezionati assume un ruolo chiave. In particolare, il fenomeno del consumo di suolo risulta più evidente sia in termini quantitativi che "qualitativi" (riferendosi con questo aggettivo alla distribuzione spaziale) se valutato su un arco temporale comprendente almeno due anni.

Nel caso specifico si è scelto di fare dei confronti intermedi tra i due anni più vicini, e quindi 1987-1991 (Tabella 3.10), 1991-2000 (Tabella 3.11), 2000-2003 (Tabella 3.12) e 2003-2013 (Tabella 3.13), ed uno tra il 1987 ed il 2013 (Tabella 3.14) per avere un quadro più chiaro su tutto il periodo analizzato.

		1987 (ha)						
		IMPERVIOUS	SUPERFICI AGRICOLE E NATURALI	AFFIORAMENTI ROCCIOSI	CORPI IDRICI	Unclassified	TOTALE DI CLASSE	
1	—	IMPERVIOUS	6619	3599	697	22	24	10960
	h	SUPERFICI AGRICOLE E NATURALI						
9	a	AFFIORAMENTI ROCCIOSI	2140	343883	3445	258	139	349864
	—	CORPI IDRICI	1376	4633	1298	123	31	7461
		Unclassified	26	171	34	629	33	893
		TOTALE DI CLASSE	118	967	49	21	9	1164
		TOTALE DI CLASSE	10279	353252	5523	1053	235	
		CAMBI DI CLASSE	3660	9369	4225	423	226	
		DIFFERENZA IMMAGINI	681	-3388	1938	-160	928	

Tabella 3.10 Matrice di change detection 1987-1991.

		1991 (ha)						
		IMPERVIOUS	SUPERFICI AGRICOLE E NATURALI	AFFIORAMENTI ROCCIOSI	CORPI IDRICI	Unclassified	TOTALE DI CLASSE	
2	—	IMPERVIOUS	7897	4345	1618	30	158	14053
	h	SUPERFICI AGRICOLE E NATURALI	2234	335300	4348	268	516	342665
0	a	AFFIORAMENTI ROCCIOSI	776	7725	1353	65	48	9973
	—	CORPI IDRICI	29	842	129	525	17	1542
		Unclassified	24	1652	13	5	425	2116
		TOTALE DI CLASSE	10960	349864	7461	893	1164	
		CAMBI DI CLASSE	3063	14564	6108	368	739	
		DIFFERENZA IMMAGINI	3093	-7199	2512	649	952	

Tabella 3.11 Matrice di change detection 1991-2000.

		2000 (ha)						
		IMPERVIOUS	SUPERFICI AGRICOLE E NATURALI	AFFIORAMENTI ROCCIOSI	CORPI IDRICI	Unclassified	TOTALE DI CLASSE	
2	—	IMPERVIOUS	9427	3825	1344	76	66	14735
	h	SUPERFICI AGRICOLE E NATURALI	3401	334359	7236	448	947	346372
0	a	AFFIORAMENTI ROCCIOSI	1031	2495	1166	92	16	4793
	—	CORPI IDRICI	74	494	157	894	8	1628
		Unclassified	120	1492	70	32	1079	2813
		TOTALE DI CLASSE	14053	342665	9973	1542	2116	
		CAMBI DI CLASSE	4626	8306	8807	648	1037	
		DIFFERENZA IMMAGINI	682	3707	-5180	86	698	

Tabella 3.12 Matrice di change detection 2000-2003.

		2003 (ha)					
		IMPERVIOUS	SUPERFICI AGRICOLE E NATURALI	AFFIORAMENTI ROCCIOSI	CORPI IDRICI	Unclassified	TOTALE DI CLASSE
2 0 1 3	IMPERVIOUS	9887	6924	1071	25	82	14735
	SUPERFICI AGRICOLE E NATURALI	3262	332268	2138	369	2540	346372
	AFFIORAMENTI ROCCIOSI	1270	4855	1437	45	119	4793
	CORPI IDRICI	273	2123	140	1187	65	1628
	Unclassified	43	203	7	1	7	2813
	TOTALE DI CLASSE	14735	346372	4793	1627	2813	
	CAMBI DI CLASSE	4848	14104	3356	441	2807	
DIFFERENZA IMMAGINI		3254	-5795	2934	2159	-2553	

Tabella 3.13 Matrice di change detection 2003-2013.

		1987 (ha)					
		IMPERVIOUS	SUPERFICI AGRICOLE E NATURALI	AFFIORAMENTI ROCCIOSI	CORPI IDRICI	Unclassified	TOTALE DI CLASSE
2 0 1 3	IMPERVIOUS	7035	10011	899	28	16	17989
	SUPERFICI AGRICOLE E NATURALI	2118	334887	3105	325	142	340578
	AFFIORAMENTI ROCCIOSI	940	5329	1400	50	9	7727
	CORPI IDRICI	154	2805	112	649	67	3787
	Unclassified	32	220	6	1	2	261
	TOTALE DI CLASSE	10279	353252	5523	1053	235	
	CAMBI DI CLASSE	3244	18365	4123	404	233	
DIFFERENZA IMMAGINI		7710	-12674	2204	2734	25	

Tabella 3.14 Matrice di change detection 1987-2013.

I dati di queste cinque tabelle, osservati alla luce dell'analisi del consumo di suolo legato alle variazioni della copertura artificiale, mostrano come ci sia stato un costante incremento dell'impermeabilizzato, che passa da 10.279 ha nel 1987 a 17.989 ha nel 2013, con un incremento quindi del 75% rispetto al valore iniziale. I 7710 ettari di differenza sono comparabili ad una superficie che supera di poco la metà dell'intero comune di Bologna ed equivalgono ad un consumo annuo di 296 ettari, ovvero 0,8 ha/giorno. Tale valore è rimasto più o meno costante nel tempo: infatti, considerando i periodi 1987-2000 e 2000-2013, i relativi tassi sono pari a 0,79 ha/giorno e 0,82 ha/giorno.

Il suolo sottratto è quello della classe "Superfici agricole e naturali"; più precisamente, se si considerano le classificazioni del 1987 e 2013 nelle quali c'è la separazione tra le due categorie, si è visto che le aree coltivate "pesano" per il 93% su tutta la superficie consumata, mentre la vegetazione naturale per il 7%.

Visualizzando la mappa relativa ai cambiamenti delle superfici agricole e naturali dal 1987 al 2013, emergono alcune aree consumate di dimensioni considerevoli. Ad esempio, nella Figura 3.30 sono riportati i casi dell'Interporto di Bologna, localizzato nel territorio di Bentivoglio, e l'outlet di Castel Guelfo di Bologna, situato nell'omonimo comune; entrambi nel 1987 erano pressoché inesistenti, mentre attualmente coprono un'area di circa 190 ettari ciascuno.

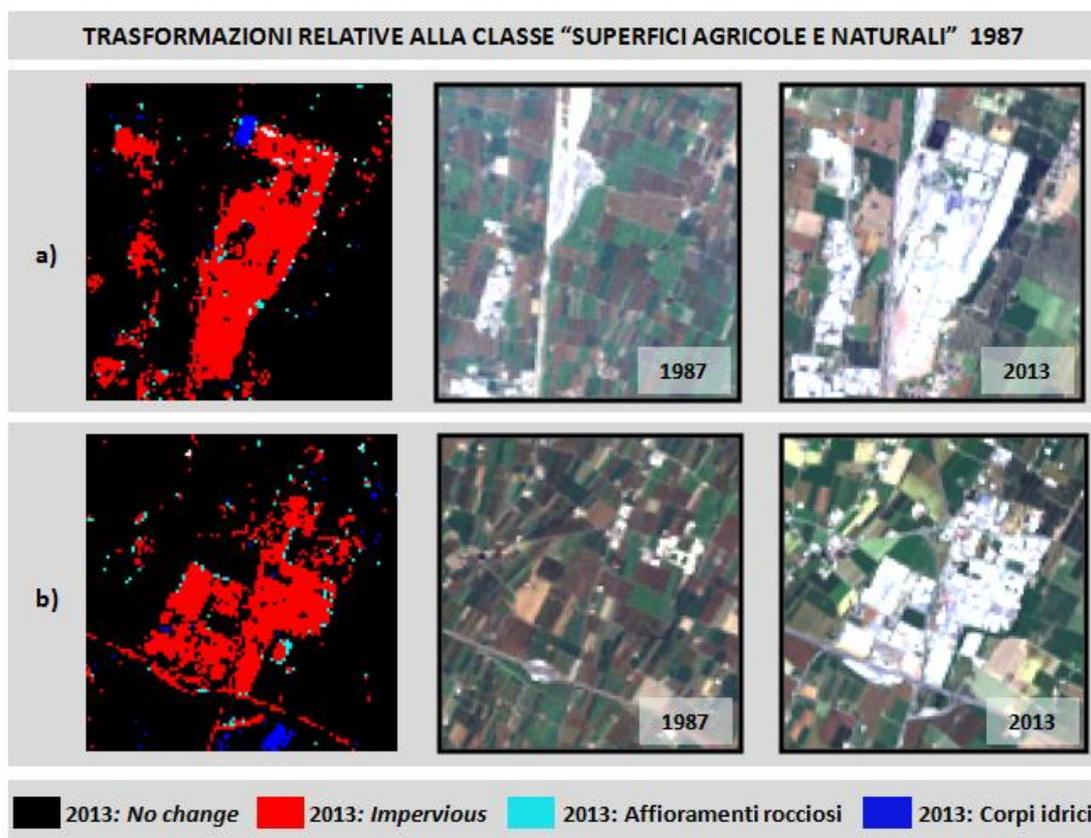


Figura 3.30 Esempi di passaggio da superfici agricole ad impervious: a) Interporto di Bologna; b) Outlet di Castel Guelfo di Bologna.

Questi due esempi sono abbastanza rappresentativi di quello che è successo su tutta la Provincia di Bologna. Tralasciando le espansioni urbane, che comunque sono state consistenti (Figura 3.31), il consumo di suolo ha principalmente interessato zone di pianura, con costruzione ed espansione di aree industriali/commerciali, preferibilmente lungo le direttive segnate dalle infrastrutture di trasporto, portando anche alla realizzazione di nuova viabilità (nell'immagine relativa all'outlet di Castelguelfo si può osservare anche la costruzione di uno svincolo autostradale apposito per l'area).

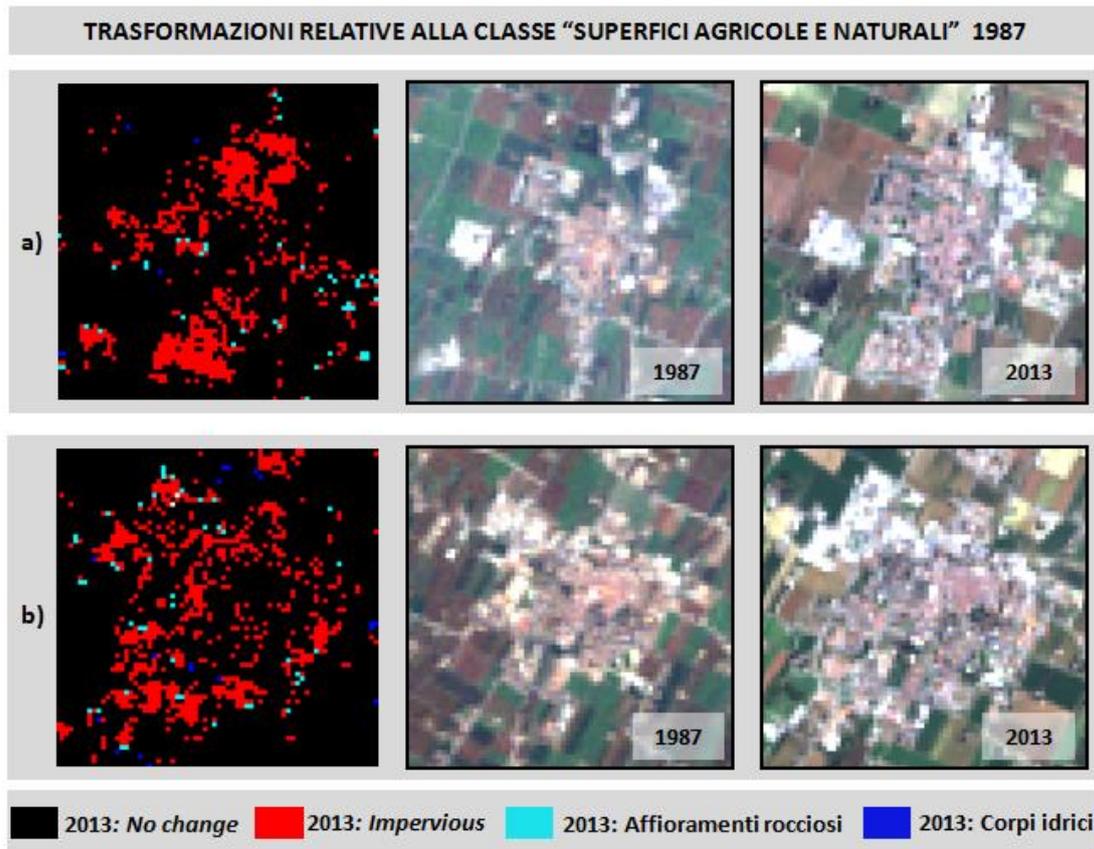


Figura 3.31 Esempi di espansione urbana (tra parentesi la percentuale di aumento di impermeabilizzato dal 1987 al 2013): a) San Giorgio di Piano (+100%), b) Medicina (+75%).

A proposito della rete di trasporto, la *change detection* ha evidenziato la realizzazione della linea TAV verso Milano e, sotto forma di zone di cantiere classificate come "Affioramenti rocciosi", la Variante di Valico dell'A1 e la Variante della S.S. 64 "Porrettana" (Figura 3.32). Queste trasformazioni mettono in luce il fatto che parte dei passaggi da superfici agricole/naturali ad affioramenti rocciosi nascondono delle nuove artificializzazioni e che quindi non sono degli errori di confusione tra le due classi.

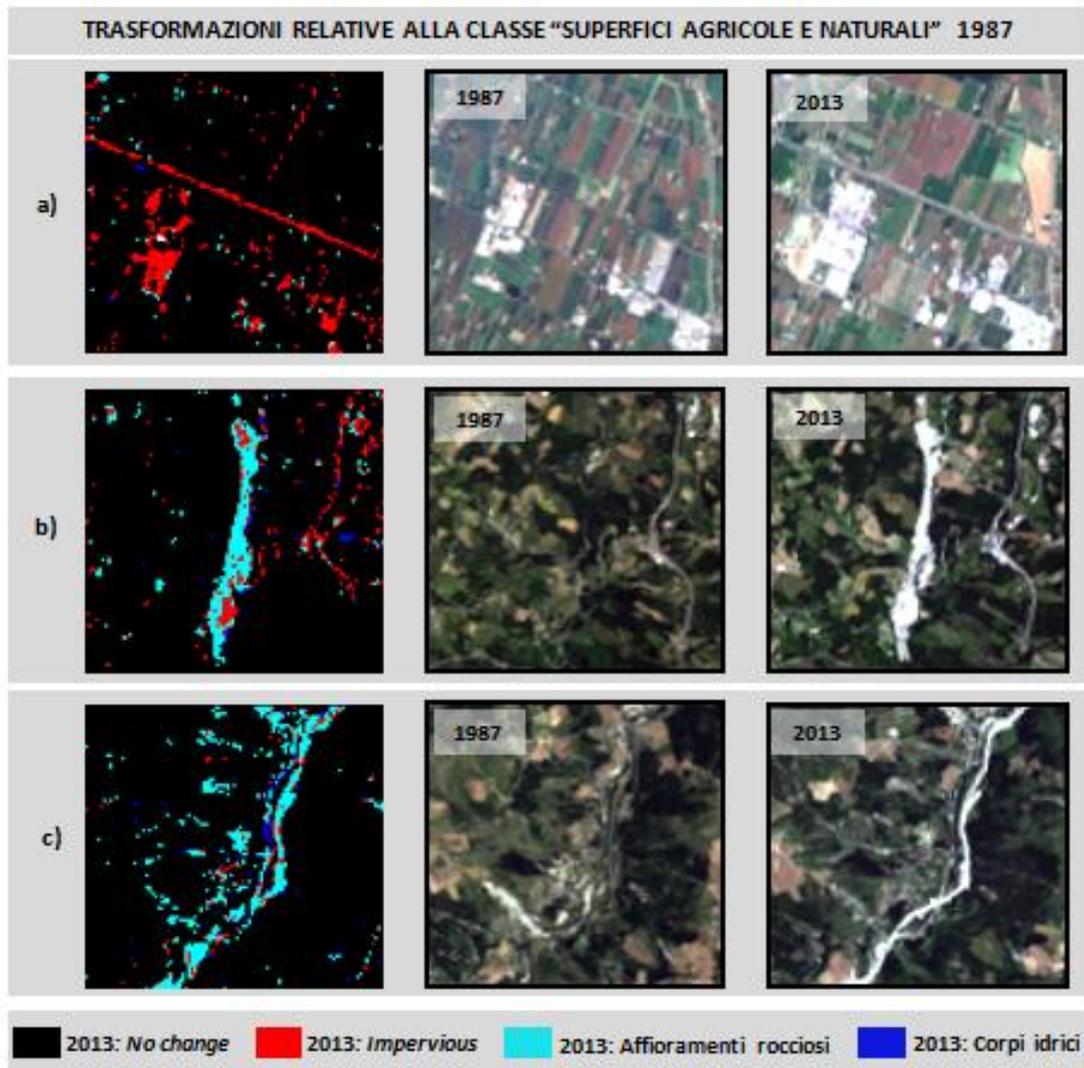


Figura 3.32 Esempi di realizzazione di nuova viabilità: a) Linea TAV Bologna – Milano, b) Variante di Valico (Variante A1), c) Variante SS 64 “Porrettana”.

Considerando sempre le trasformazioni della classe “Superfici agricole e naturali” del 1987, un altro dato interessante viene dal rilevamento di aree umide nella parte nord-est della Provincia di Bologna. Esse sono state realizzate dalla Regione Emilia-Romagna a partire dagli anni '90 con delle misure agre ambientali comunitarie volte al ritiro dei seminativi per creare ambienti per flora e fauna selvatica. Il totale della superficie rinaturalizzata è stato di circa 1900 ettari (<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/parchi-natura2000/rete-natura-2000/siti/siti-per-provincia/bologna>), che sono quindi una consistente porzione della trasformazione messa in luce dalla *change detection*. Queste aree sono

diventate in seguito parte di tre diversi SIC-ZPS⁶: SIC-ZPS IT4050022 “Biotopi e ripristini ambientali di Medicina e Molinella”, SIC-ZPS IT4050023 “Biotopi e ripristini ambientali di Budrio e Minerbio” e SIC-ZPS IT4050024 “Biotopi e ripristini ambientali di Bentivoglio, San Pietro in Casale, Malalbergo e Baricella” (Figura 3.33).

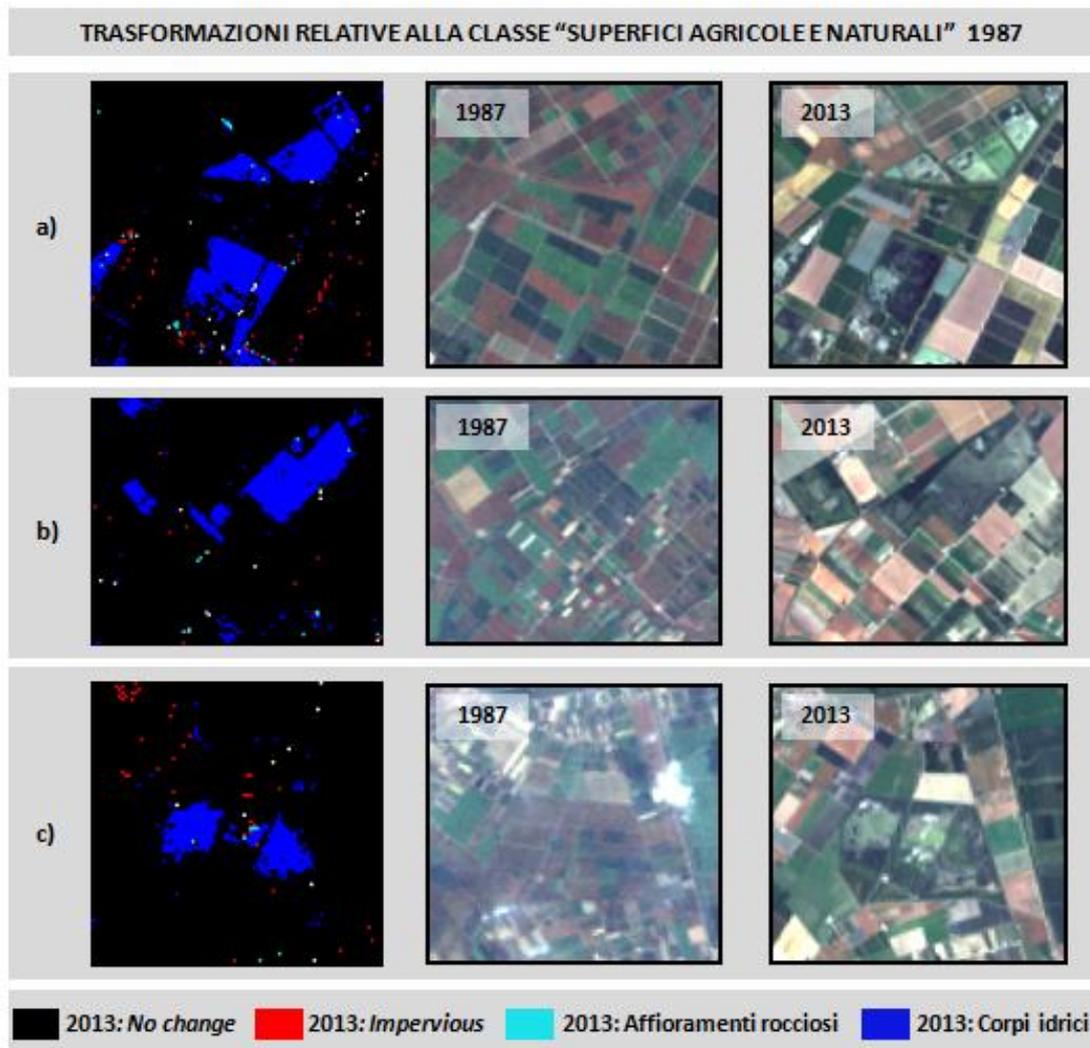


Figura 3.33 Realizzazione di aree umide da ex-risaie: a) SIC-ZPS IT4050022 “Biotopi e ripristini ambientali di Medicina e Molinella”, b) SIC-ZPS IT4050023 “Biotopi e ripristini ambientali di Budrio e Minerbio”, c) SIC-ZPS IT4050024 “Biotopi e ripristini ambientali di Bentivoglio, San Pietro in Casale, Malalbergo e Baricella”.

È importante porre l’accento, però, anche su alcuni valori incongruenti derivanti da errori di classificazione. Innanzitutto, osservando le matrici intermedie, si nota una rilevante fluttuazione per quel che riguarda la classe “Affioramenti rocciosi” e i relativi passaggi con l’*impervious* e le superfici agricole/naturali. Le cifre più alte si

⁶ I Siti d’Interesse Comunitario (SIC) e le Zone di Protezione Speciale (ZPS) sono aree facenti parte della Rete Natura 2000, istituita dalla Direttiva 92/43 “Habitat”, che raccoglie tutti quei siti di particolare pregio ambientale (SIC) e importanti per l’avifauna (ZPS).

hanno nelle transizioni da e per quest'ultima classe, a riprova del fatto che la confusione con l'impermeabilizzato è stata in parte risolta col meccanismo delle maschere, mentre restano i problemi con la vegetazione. Le quantità coinvolte variano in base alla percentuale degli affioramenti negli anni considerati: ad esempio si ha un massimo di 7.725 ha di superfici agricole/naturali che dal 1991 diventano affioramento nel 2000, generato dall'errore di classificazione sui calanchi che determina quindi, per l'anno in questione, il valore più alto di questa classe. Analogamente, nel successivo passaggio 2000-2003, si hanno 7.236 ettari di affioramenti che tornano ad essere seminativi, evidenziando quindi l'errore di sovrastima che c'era stato nel 2000.

Un'altra anomalia, osservando la matrice finale, è costituita dai 2.118 ettari che da *impervious* nel 1987 sono diventati superfici agricole e naturali nel 2013. In questo valore sono comprese quelle aree che, come visto in precedenza, sono tornate ad essere permeabili, almeno per il momento; tuttavia, c'è sicuramente una parte di errore di classificazione di cui si deve tener conto. Si è visto, ad esempio, che nel 2013, in corrispondenza di tessuti urbani discontinui, parte dell'impermeabilizzato non è stato classificato, anche se effettivamente presente.

3.2.6 Validazione della matrice di *change detection*

Al fine di valutare l'analisi del cambiamento territoriale avvenuto tra il 1987 ed il 2013, è stata fatta una validazione sulla relativa matrice di *change detection*. Vista la crescente importanza degli studi sui cambiamenti dell'uso o della copertura del suolo, cercare di capire quanto siano affidabili i risultati ottenuti, specie di quelli derivanti da procedure di telerilevamento, rappresenta un ulteriore modo per valutare le variazioni avvenute. Anche se questa operazione non sempre viene compiuta, sicuramente rappresenta un'opportunità per indagare la tipologia degli errori messi in evidenza. Normalmente tale validazione viene fatta rispetto ai cambiamenti nelle classi, e quindi calcolando l'accuratezza della *change detection* nel rilevare le modifiche (Chen et al. 2003; Lunetta et al. 2004). Viene quindi prodotta una matrice 2x2 composta dalle classi "*Change*" e "*No change*"; questo tipo di approccio, però, rischia di non tener conto di alcuni errori legati alle classificazioni degli anni analizzati che vanno a riflettersi sui passaggi che

determinano i cambiamenti (van Oort 2007). Ad esempio, se nell'immagine iniziale e finale un pixel è stato classificato come appartenente ad una categoria A, ma nella realtà la classe corretta per entrambi i periodi è la B, allora nella *change detection* sia il valore test sia quello di riferimento sarà un *no change* che contribuirà ad aumentare l'accuratezza, ma, ai fini di quest'ultima, sarebbe più corretto valutarlo come un errore di classificazione che quindi non andrebbe conteggiato. Sotto questo punto di vista, di conseguenza, appare più adeguata la matrice dell'errore di transizione (Biging, Colby, and Congalton 1998) mostrata nella Figura 3.34 (*condensed transition error matrix*).

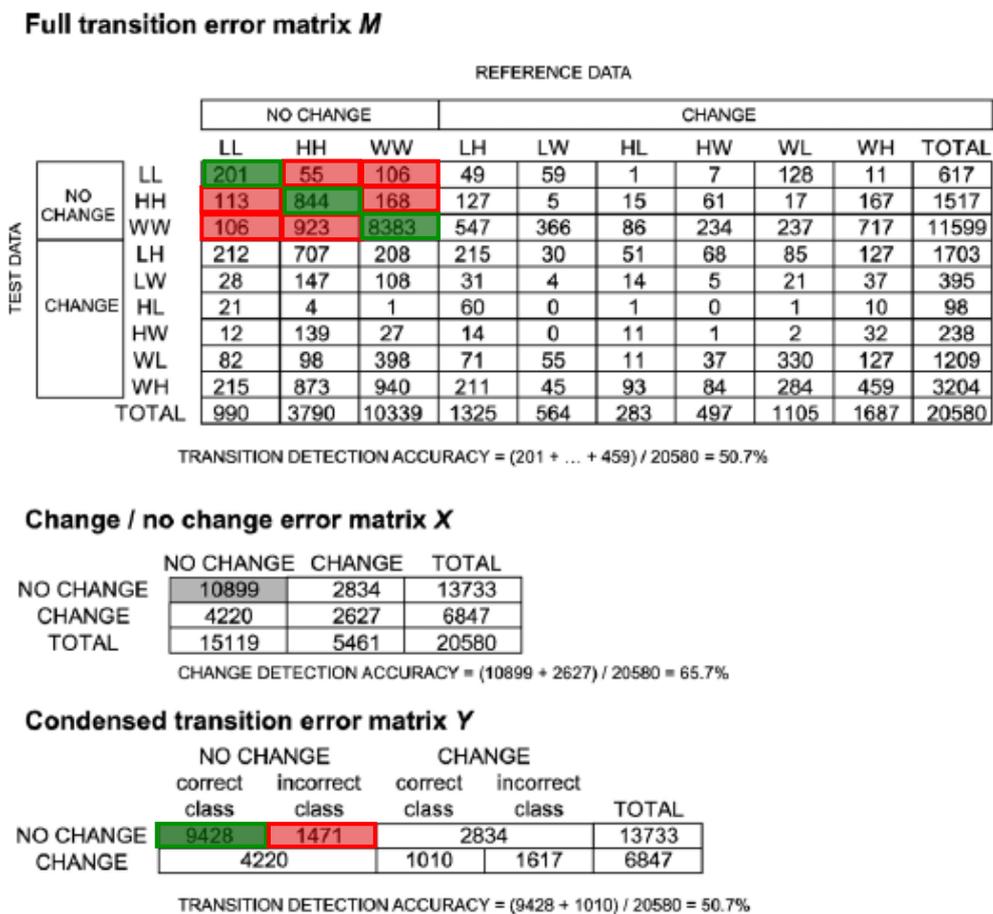


Figura 3.34 Confronto tra matrice di errore change/no change X e matrice di errore di transizione Y (van Oort 2007).

Questo tipo di matrice viene utilizzato proprio per valutare in modo più preciso l'accuratezza delle transizioni: infatti, come visibile nella Figura 3.34, facendo riferimento alla matrice completa M, quella di cambiamento X prende in

considerazione anche quei valori di *no change* (in rosso) che però sono diversi dai dati di riferimento; analogamente avviene per la classe "*Change*". La matrice di transizione Y invece considera solo gli elementi in verde, generando un'accuratezza minore rispetto a quella di cambiamento, ma sicuramente più verosimile.

Tenendo presente quindi quanto appena scritto, le classi delle mappe ottenute per il 1987 ed il 2013 sono state raggruppate in due grandi categorie: *Impervious* e *No impervious*, quest'ultima comprendente "*Superfici agricole*", "*Superfici naturali*", "*Affioramenti rocciosi*" e "*Corpi idrici*". Nella *change detection*, di conseguenza, sono state generate quattro classi, sia come test sia come valori di riferimento, di seguito elencate:

- *Impervious – Impervious*: comprende tutto quello classificato come impermeabilizzato sia nel 1987 sia nel 2013;
- *No impervious – No impervious*: comprende tutto quello classificato come non impermeabilizzato sia nel 1987 sia nel 2013;
- *Impervious – No impervious*: comprende tutto quello che è passato da impermeabilizzato nel 1987 a non impermeabilizzato nel 2013;
- *No impervious – Impervious*: comprende tutto quello che è passato da non impermeabilizzato nel 1987 a impermeabilizzato nel 2013.

Nella Tabella 3.15 è riportata la matrice completa dei dati considerati e le due matrici derivate, insieme alle relative misure di accuratezza. L'analisi dei valori ottenuti evidenzia come le due misure di accuratezza siano molto simili (84% per la matrice di transizione, 85% per quella *change/no change*); si può affermare quindi che, all'interno dei gruppi "*Change*" e "*No change*", le singole classi sono state ben individuate, nel senso che non c'è confusione tra di esse. Ad esempio, solo un punto dei 65 di riferimento per la categoria "*Impervious – Impervious*" è stato classificato come "*No impervious – No impervious*".

CLASSE		DATI DI RIFERIMENTO (pixel)				TOTALE
		NO CHANGE		CHANGE		
		<i>Impervious - Impervious</i>	<i>No impervious - No impervious</i>	<i>Impervious - No impervious</i>	<i>No impervious - Impervious</i>	
NO CHANGE	<i>Impervious - Impervious</i>	55	1	0	0	56
	<i>No impervious - No impervious</i>	1	44	1	2	48
CHANGE	<i>Impervious - No impervious</i>	7	9	17	0	33
	<i>No impervious - Impervious</i>	2	10	0	60	72
TOTALE		65	64	18	62	209

MATRICE CHANGE/NO CHANGE				MATRICE DELLE TRANSIZIONI				
	NO CHANGE	CHANGE	TOTALE	NO CHANGE		CHANGE		TOTALE
				<i>correct class</i>	<i>incorrect class</i>	<i>correct class</i>	<i>incorrect class</i>	
NO CHANGE	101	3	104	99	2	3		104
CHANGE	28	77	105			28		
TOTALE	129	80	209					105
ACCURATEZZA = 85% (178/209)				ACCURATEZZA = 84% (176/209)				

CLASSE	ERRORE DI COMMISSIONE (%)	ERRORE DI OMISSIONE (%)	ACCURATEZZA PRODUTTORE (%)	ACCURATEZZA UTENTE (%)
<i>Impervious - Impervious</i>	1,8	15,4	84,6	98,2
<i>No impervious - No impervious</i>	8,3	31,3	68,7	91,7
<i>Impervious - No impervious</i>	48,5	5,6	94,4	51,5
<i>No impervious - Impervious</i>	16,7	3,2	96,8	83,3
NO CHANGE	2,9	21,7	78,3	97,1
CHANGE	26,7	3,9	96,1	73,3

Tabella 3.15 Matrici di riferimento, di change/no change e delle transizioni e misure di accuratezza per la change detection 1987-2013.

Osservando invece gli errori delle singole classi, si vede che quelle associate al non cambiamento vengono omesse (considerando la macroclasse “No change”, l’omissione è pari al 21,7%), mentre quelle che denotano delle modifiche sono commesse (commissione “Change” = 26,7%). In particolare si ha un alto errore di commissione per la classe “Impervious – No impervious” (48,5%), dovuto al fatto che per essa sono stati collezionati solo 18 punti di riferimento, poiché poco rappresentata sul territorio: sono poche infatti le aree che da impermeabilizzate sono tornate ad essere suolo (Figura 3.16). Di conseguenza gli errori presenti pesano maggiormente rispetto a quelli valutati per le altre classi per le quali i pixel di riferimento sono più numerosi.

L’errore di omissione della classe “No impervious – No impervious” incrocia le commissioni del “Impervious – No impervious” e del “No impervious – Impervious”

(Figura 3.35). Questo significa che, nel primo caso, nel 1987 elementi non impermeabilizzati sono stati classificati come impermeabilizzati e la stessa tipologia di errore è avvenuta anche nel secondo, questa volta per il 2013.

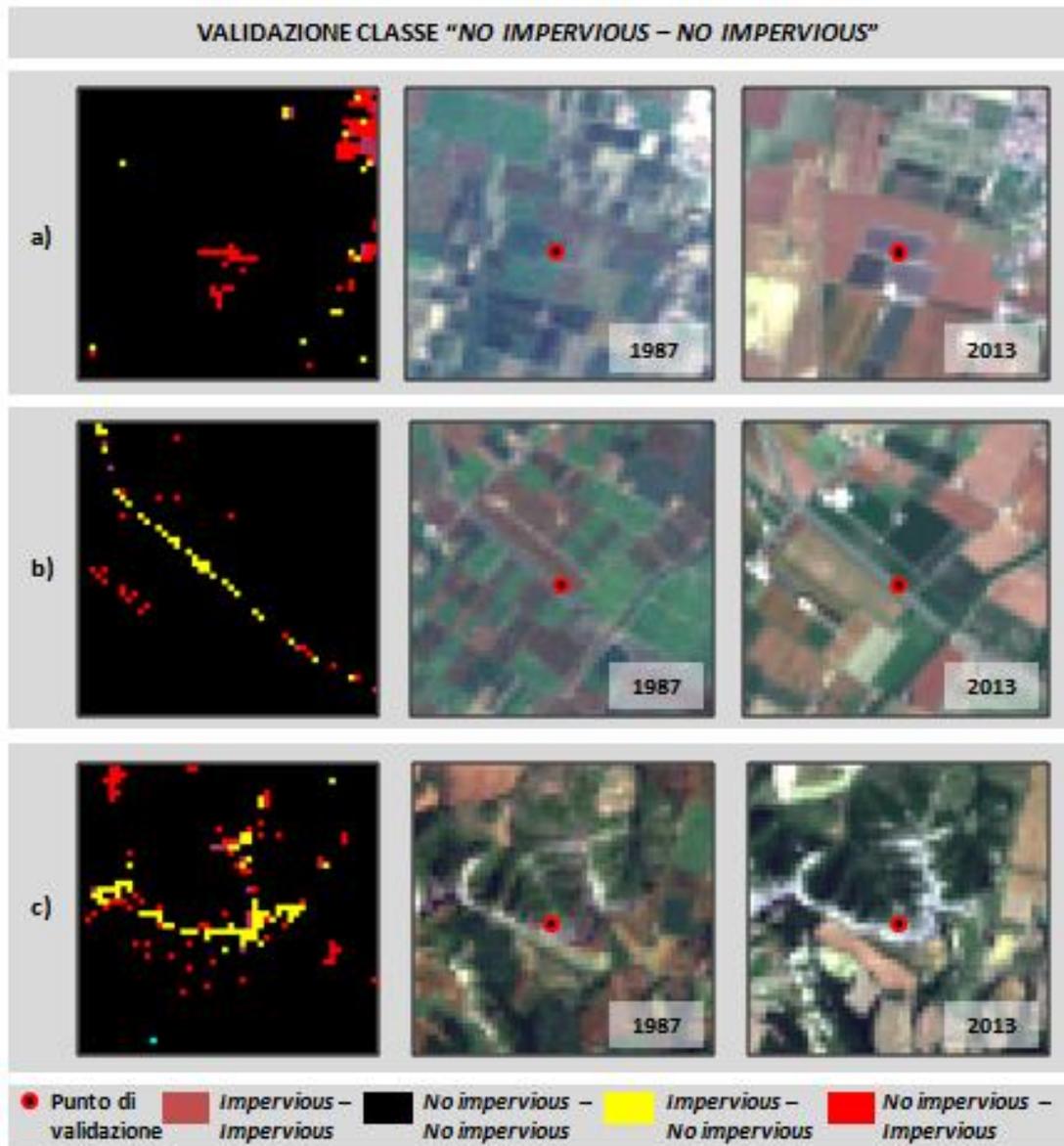


Figura 3.35 Validazione della classe "No impervious – No impervious": a) seminativo 2013 classificato come impervious, b) canale 1987 classificato come impervious, c) affioramento roccioso 1987 classificato come impervious.

In entrambi i casi si tratta di errori già visti in fase di classificazione; più dettagliatamente, si fa riferimento ad alcuni campi agricoli confusi con il tessuto urbano o ad affioramenti rocciosi mappati come coperture industriali. Altre fonti di misclassificazione sono causate dalla risoluzione spaziale, come osservato per alcuni elementi lineari. I canali, ad esempio, quando individuati, alcune volte sono stati

riconosciuti come corpi idrici (soprattutto nel 2013), mentre in altri casi sono stati classificati come impermeabilizzati, probabilmente anche a causa di un livello basso delle acque presenti.

L'errore di omissione della classe "Impervious – Impervious" dipende maggiormente dalla commissione del passaggio "Impervious – No impervious"; in questo caso lo sbaglio deriva dalla classificazione del 2013, dove dell'impermeabilizzato non è stato riconosciuto come tale (Figura 3.36).

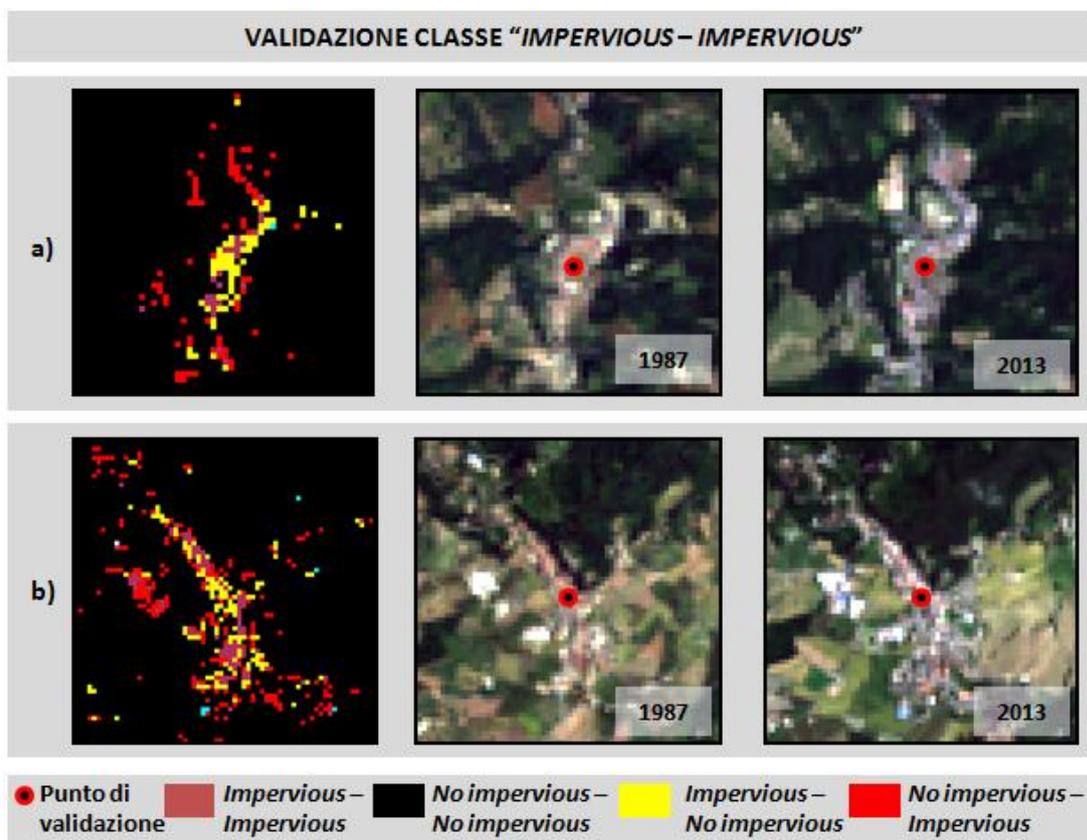


Figura 3.36 Validazione della classe "Impervious – Impervious": a) urbanizzato 2013 classificato come no impervious, b) urbanizzato 2013 classificato come no impervious.

L'errore riguarda soprattutto i piccoli centri abitati, particolarmente quelli di montagna, per i quali il tessuto dell'edificato è meno denso e quindi tende a generare il problema del pixel misto più frequentemente che in città.

4. ANALISI DEI RISULTATI

4.1 CONFRONTO CON I DATI DISPONIBILI

Al fine di una valutazione dei risultati ottenuti e di quelli esistenti, il dato di copertura impermeabilizzata derivante dall'immagine Landsat del 16 giugno 2013 viene ripreso e confrontato all'interno della Tabella 4.1 con i valori già disponibili ed analizzati nel paragrafo 3.1.2.

FONTE	ANNO	SUOLO OCCUPATO (%)
ISTAT	2011	8,9
CRCS	2008	10,5
CITTÀ METROPOLITANA DI BOLOGNA	2011	11,3
CORINE LAND COVER	2006	5,9
SOIL SEALING MAP COPERNICUS	2009	4,7
ISPRA	2007	9,6
CLASSIFICAZIONE IMMAGINE LANDSAT-8 16 giugno 2013	2013	4,9

Tabella 4.1 Confronto tra le percentuali di suolo occupato derivanti dalle fonti citate ed il dato della classificazione dell'immagine Landsat-8 16 giugno 2013.

Si può osservare che le diverse fonti tendono a differire tra di loro, a volte anche di molto, e questi scostamenti non sempre possono essere imputabili ai diversi anni esaminati. Si è già spiegata l'origine di tutti questi dati, per cui incrociando le diverse interpretazioni del concetto di consumo di suolo e le rispettive risoluzioni spaziali, si intuisce come possano essere presenti queste ampie fluttuazioni.

Di seguito vengono mostrate le sovrapposizioni fatte su immagini Bing del 2011 con l'*impervious* ottenuto dalla classificazione dell'immagine Landsat del 2013 e con i *layer* delle altre fonti, per illustrarne i rapporti e le differenze esistenti.

FONTE ISTAT



Figura 4.1 Confronto tra la classificazione dell'immagine Landsat-8 16 giugno 2013 e le località abitate del 2011 derivate dalle basi territoriali ISTAT (<http://www.istat.it/it/archivio/104317>).

Questo confronto mette in risalto come le località abitative rilevate dall'ISTAT non solo includono gli spazi verdi all'interno del tessuto urbano, aree industriali comprese, ma considerano anche dei campi coltivati, localizzati nella parte in basso dell'immagine.

FONTE CRCS



Figura 4.2 Confronto tra la classificazione dell'immagine Landsat-8 16 giugno 2013 e la copertura artificiale del 2008 derivata da CRCS dall'uso del suolo della Regione Emilia-Romagna (<http://geoportale.regione.emilia-romagna.it/it/database-uso-del-suolo>).

In questo caso, il confronto con il dato elaborato dal CRCS sulle basi vettoriali dell'uso del suolo della Regione Emilia-Romagna mostra una maggiore precisione nel delineare le aree artificiali rispetto al dato dell'ISTAT, ma restano incluse le aree verdi e parte dell'abitato sparso non viene considerato per via dell'unità minima cartografabile (1,56 ha).

FONTE CITTÀ METROPOLITANA DI BOLOGNA



Figura 4.3 Confronto tra la classificazione dell'immagine Landsat-8 16 giugno 2013 e il territorio consumato per il 2011 fornito dalla Città Metropolitana di Bologna (ex Provincia) (<http://cst.provincia.bologna.it/catalogo/>).

Il dato fornito dalla Provincia di Bologna come territorio consumato per il 2011 è molto simile a quello dell'uso del suolo del 2008, però aggiunge la parte relativa alla viabilità, derivandola dal Database Topografico Regionale.

FONTE CORINE LAND COVER



Figura 4.4 Confronto tra la classificazione dell'immagine Landsat-8 16 giugno 2013 e la copertura artificiale del progetto CORINE Land Cover relativa all'anno 2006 (<http://www.eea.europa.eu/publications/CORO-landcover>).

Dal progetto CORINE *Land Cover* deriva una copertura artificiale che comprende gli spazi verdi e che non considera l'abitato sparso, avendo un'area minima pari a 25 ha; le abitazioni presenti nella parte centrale dell'immagine non sono state rilevate perché non presenti nel 2006.

FONTE COPERNICUS



Figura 4.5 Confronto tra la classificazione dell'immagine Landsat-8 16 giugno 2013 ed il Soil Sealing Map per il 2009 del progetto Copernicus (<http://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers/imperviousness/view>).

Il dato del *Soil Sealing Map* del progetto Copernicus relativo al 2009 è sicuramente quello più simile alla classificazione prodotta per il 2013. Questo era in parte prevedibile, vista la comune definizione data del consumo di suolo, intendendo come tale quello impermeabilizzato. Dal punto di vista della risoluzione spaziale, il *Soil Sealing Map* ha un pixel più piccolo, pari a 20 m, che garantisce un livello maggiore di dettaglio, ma che comunque non riesce ad intercettare tutto l'abitato sparso e la viabilità, ad eccezione delle autostrade.

FONTE ISPRA

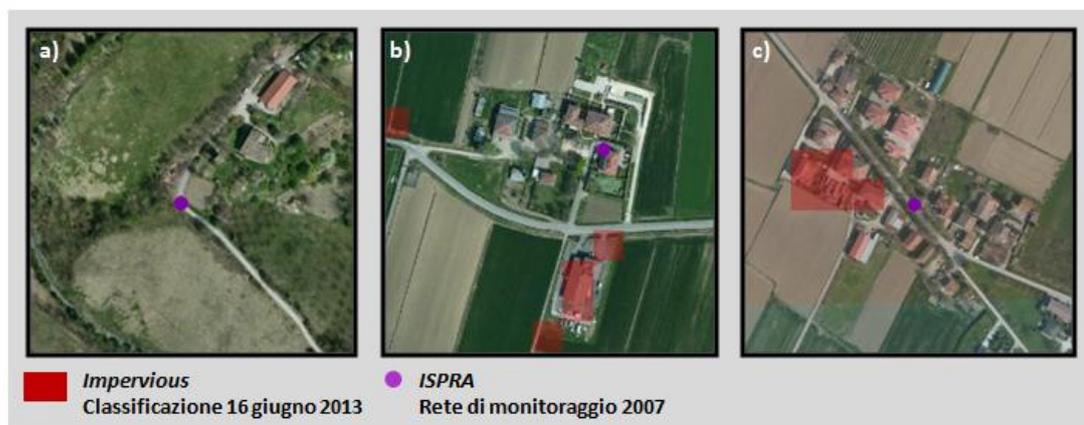


Figura 4.6 Esempi di punti della rete di monitoraggio ISPRA non rilevati dalla classificazione dell'immagine Landsat-8 16 giugno 2013: a) tracciato sterrato, b) abitato sparso, c) strada in asfalto.

Infine, l'ultimo confronto è stato fatto con la rete di monitoraggio puntuale di ISPRA relativa al 2007. In questo caso, poiché i punti non permettono di visualizzare spazialmente il fenomeno del consumo di suolo, sono stati selezionati in ambiente GIS tutti quegli elementi della rete che coincidono con i pixel del 2013 classificati come "Impervious". Quelli che combaciano sono solo 11 su un totale di 353, ma in quest'ultima cifra sono compresi anche quei 319 elementi che indicano un non consumo di suolo; di conseguenza si può dire che la classificazione del 2013 sicuramente non aggiunge dell'impermeabilizzato. Dei 34 punti ISPRA che invece attestano un consumo di suolo, 23 non sono stati riconosciuti come tali dalla mappatura del 2013; andando a visualizzarli sull'immagine Bing, si è osservato che 9 individuano case isolate, 6 sentieri sterrati, 5 strade, 1 un campo da calcio non sintetico, 1 un seminativo ed 1 un centro abitato. Di conseguenza, in 20 casi (case isolate, sentieri sterrati e strade) si tratta di elementi che la risoluzione spaziale del pixel delle immagini Landsat rende difficile rilevare (Figura 4.6). Il campo da calcio non sintetico nel presente studio viene considerato come permeabile, mentre il seminativo è probabilmente un errore di assegnazione di valore da parte dell'ISPRA. Rimane quindi un unico punto in corrispondenza di un centro abitato che la classificazione del 2013 ha erroneamente assegnato al non impermeabilizzato.

4.2 ANALISI DELLA DISTRIBUZIONE DELLE SUPERFICI IMPERMEABILIZZATE

Dall'analisi di *change detection* si è osservato come la classe "Impervious" sia costantemente cresciuta nel periodo analizzato, passando dai 10.279 ha del 1987 ai 17.989 ha del 2013, con un consumo di suolo pari a 0,8 ha/giorno (Figura 4.7).

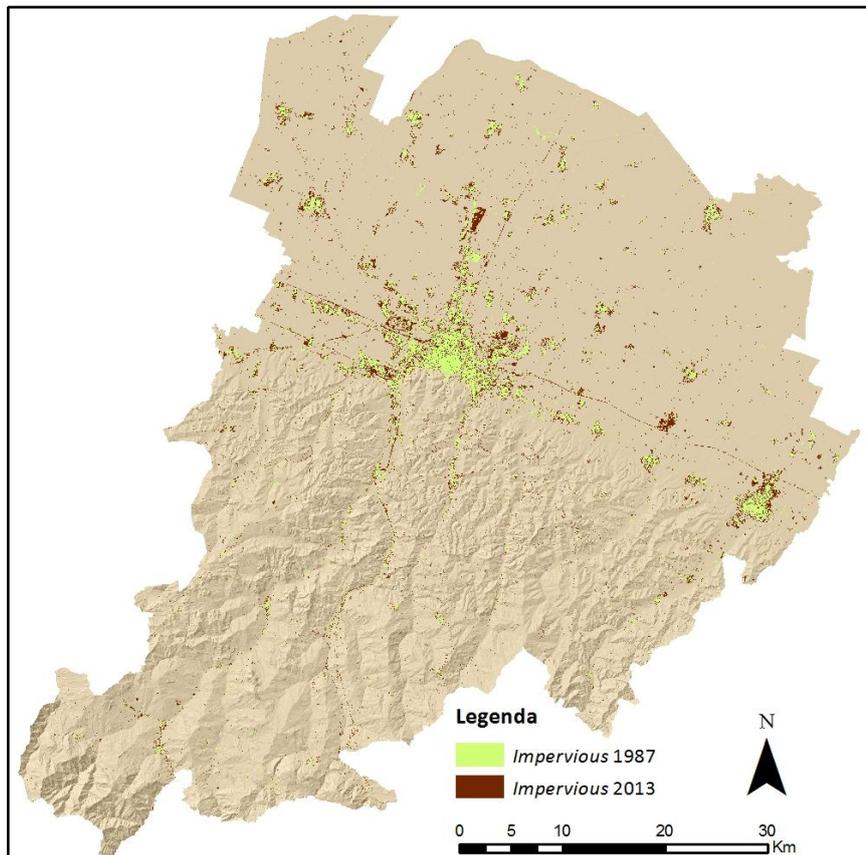


Figura 4.7 Visualizzazione congiunta della classi "Impervious" 1987 e "Impervious" 2013.

I dati ottenuti per i cinque anni possono essere confrontati con quelli relativi alla popolazione residente forniti dall'ISTAT (<http://www.istat.it/it/popolazione>), al fine di valutare un eventuale rapporto tra aumento dell'impermeabilizzato e crescita demografica (Tabella 4.2).

	1987	1991	2000	2003	2013
IMPERVIOUS (HA)	10.279	10.960	14.053	14.735	17.989
POPOLAZIONE RESIDENTE	913.051	906.980	907.414	926.637	990.681
IMPERVIOUS (m²/abitante)	113	121	155	159	182

Tabella 4.2 Superficie di impermeabilizzato per abitante per la Provincia di Bologna (Fonte dati popolazione: ISTAT).

Il numero di abitanti nella Provincia di Bologna, nel periodo preso in considerazione, ha avuto dapprima un declino, diminuendo dal 1987 al 1991, poi però ha preso a crescere sempre più marcatamente. Altrettanto non si può dire per l'impermeabilizzato che, come rappresentato in Figura 4.8, è costantemente cresciuto nel periodo analizzato. I conseguenti valori di *impervious* per persona mostrano lo stesso andamento crescente, passando da 113 m² a 182 m², con un netto aumento tra il 1991 ed il 2000 il cui arco temporale è stato caratterizzato da una popolazione quasi costante, ma con l'impermeabilizzato che è comunque cresciuto. In generale si può affermare quindi che, anche in questo caso, come spiegato nel paragrafo 2.2.2, l'aumento di superfici artificiali risulta essere sempre maggiore rispetto a quello della popolazione.

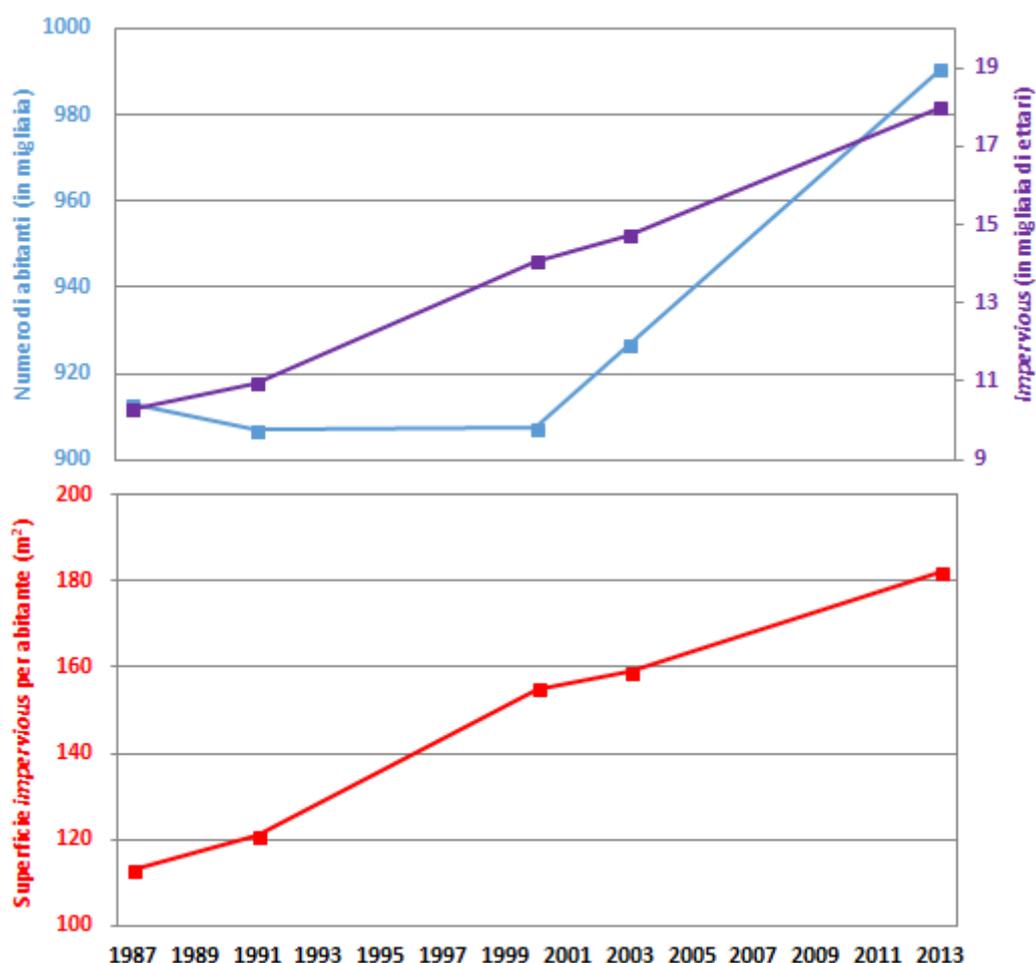


Figura 4.8 Confronto tra andamento della popolazione e dell'impervious per il periodo 1987-2013 per la Provincia di Bologna (in alto) e conseguente superficie d'impervious per abitante (in basso) (Fonte dati popolazione: ISTAT).

Un altro dato interessante viene dalla distribuzione spaziale dell'impermeabilizzato, che può essere ottenuta calcolando le percentuali dell'impervious per ogni Comune presente nel territorio analizzato, facendo riferimento al 1987 ed al 2013 (Figura 4.9).

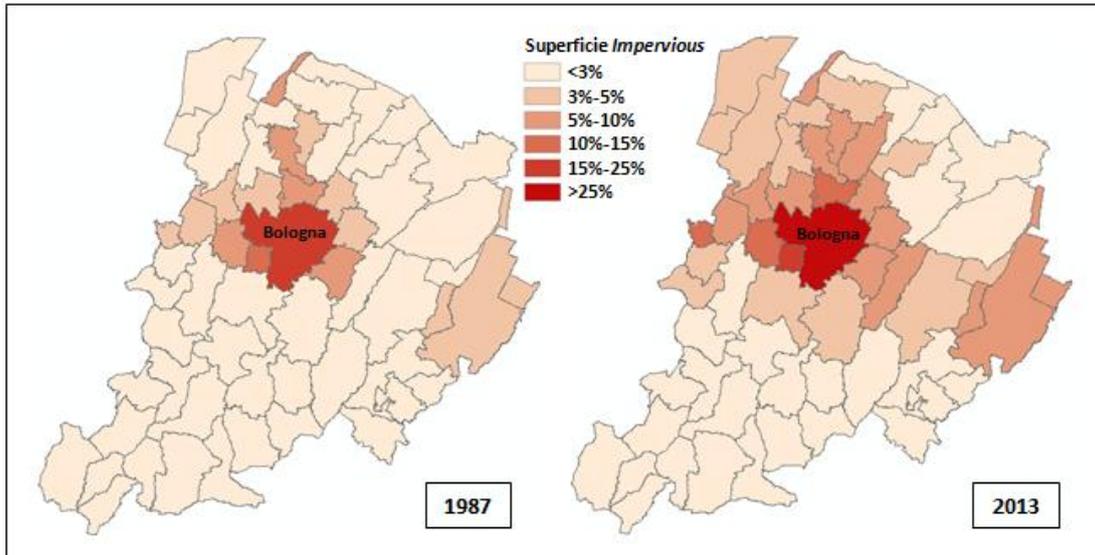


Figura 4.9 Percentuali di superficie di impermeabilizzato per Comune nel 1987 e nel 2013.

Il confronto tra le due mappe mette in luce come l'impermeabilizzato si concentri maggiormente nella zona di pianura e tenda ad intensificarsi intorno a Bologna; il capoluogo di provincia ha visto passare la percentuale di copertura artificiale dal 21% del 1987 al 30% del 2013. Inoltre, se si sovrappone a queste mappe il percorso della autostrade (Figura 4.10), si può vedere come, ad esclusione del tratto appenninico della A1, le percentuali maggiori di *impervious* seguano questi tratti viari.

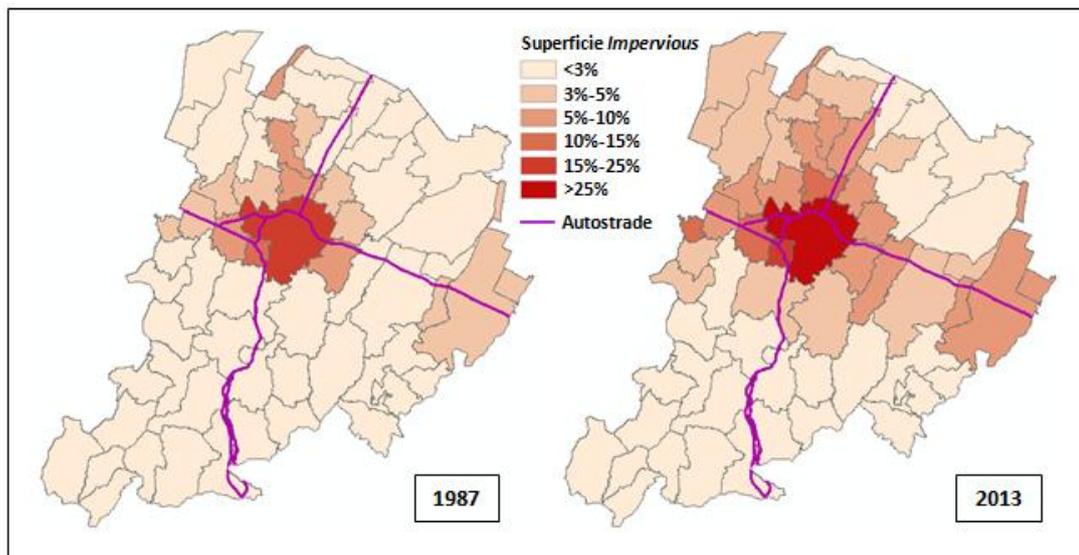


Figura 4.10 Sovrapposizione della rete autostradale sulle percentuali di superficie di impermeabilizzato per Comune nel 1987 e nel 2013.

I risultati sono simili anche se si considerano le superfici assolute di impermeabilizzato (Figura 4.11), con l'unica differenza che i Comuni con estensione territoriale maggiore, come ad esempio Imola, risultano più enfatizzati poiché nel dato relativo l'impervious viene distribuito su un più ampio valore di area totale.

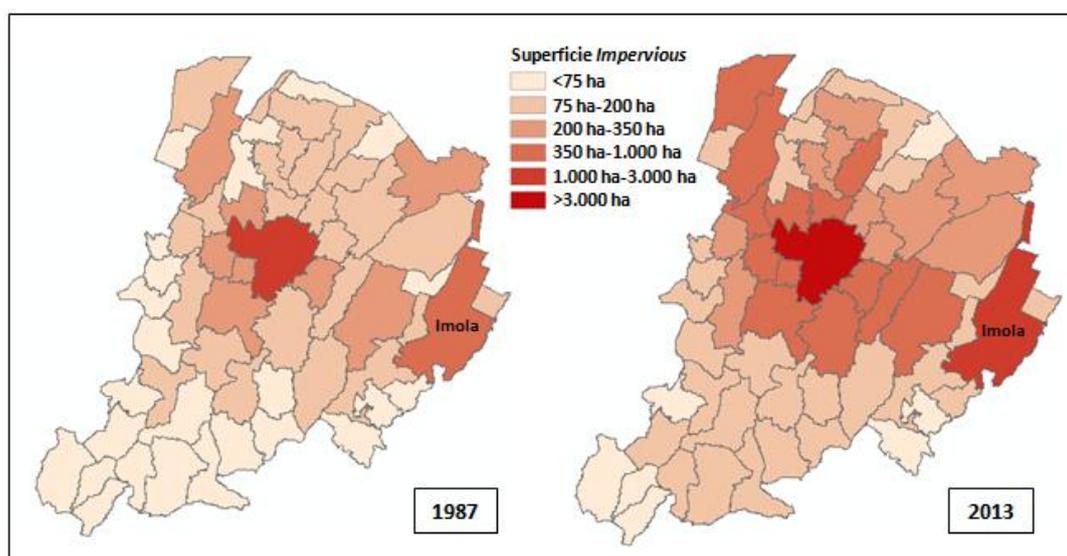


Figura 4.11 Superficie assoluta di impermeabilizzato per Comune nel 1987 e nel 2013.

Anche se i Comuni della parte appenninica, escludendo quelli della prima fascia collinare, hanno mantenuto una superficie di impermeabilizzato inferiore al 3%, in realtà dal 1987 al 2013 c'è stato comunque un consumo di suolo che in alcuni casi

ha visto anche raddoppiare la percentuale iniziale, come si può vedere nella Figura 4.12. I Comuni che hanno incrementato maggiormente l'estensione della copertura artificiale sono Bentivoglio e Castel Guelfo di Bologna, a causa dell'Interporto e dell'Outlet a cui si faceva riferimento nel paragrafo 3.2.5.

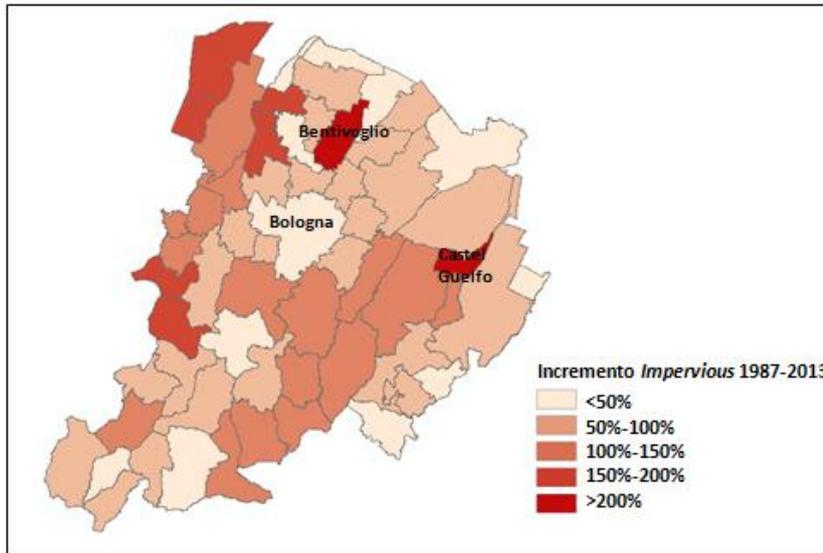


Figura 4.12 Percentuali di incremento della superficie di impermeabilizzato per Comune tra il 1987 ed il 2013.

Un'ulteriore analisi dei dati può essere fatta in base ai dati demografici dei singoli Comuni resi disponibili anche in questo caso dall'ISTAT. La Figura 4.13 evidenzia un generale aumento della popolazione nei Comuni intorno a Bologna, riflettendo la tendenza nazionale a spostarsi dalle città più grandi verso delle realtà più 'a misura d'uomo'. Questo influisce ovviamente sul dato del capoluogo, che ha visto diminuire i suoi abitanti dell'12% (la percentuale maggiore su tutto il territorio analizzato). Anche alcuni dei paesi situati nelle zone più montuose hanno avuto una flessione demografica, sebbene nel caso di Castiglione dei Pepoli ci sia stato comunque un aumento del 103% dell'impermeabilizzato, dovuto alla costruzione della Variante di Valico.

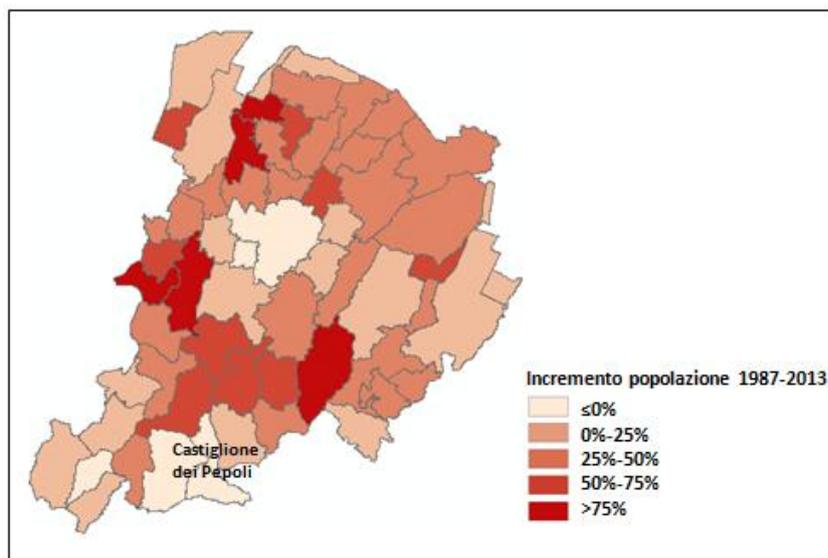


Figura 4.13 Aumento in percentuale della popolazione residente nei singoli Comuni tra il 1987 ed il 2013 (Fonte dati popolazione: ISTAT).

Infine nella Figura 4.14, i valori demografici vengono incrociati con quelli dell'impermeabile, generando due mappe di densità di impermeabilizzato per abitante. Il loro confronto mostra come i due valori più alti per il 1987, quelli di Casalfiumanese e Camugnano, siano rimasti tali anche nel 2013; le loro densità elevate derivano dall'aver pochi abitanti (entrambi inferiori a 2.500) ed un territorio abbastanza esteso rispetto ad altri piccoli centri. Si nota invece la crescita per Bentivoglio, sempre dovuta all'enorme superficie acquisita con la costruzione dell'Interporto, e di Savigno.

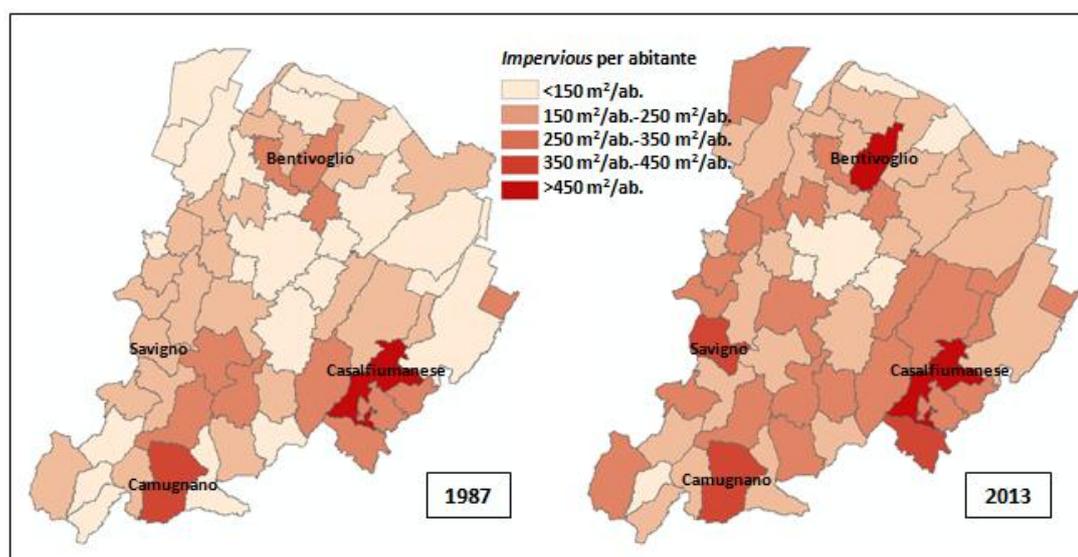


Figura 4.14 Densità di impermeabilizzato per abitante nel 1987 e nel 2013 per Comune (Fonte dati popolazione: ISTAT).

5. CONCLUSIONI

Il tema del consumo di suolo ha conosciuto negli ultimi anni un interesse crescente, poiché rappresenta un'importante sfida per una corretta gestione del territorio. Esso infatti è direttamente collegato con i fenomeni del *runoff* urbano, della frammentazione ecosistemica e con la sottrazione di importanti territori agricoli. Di conseguenza, in diversi Paesi sono state attivate, o sono in fase di discussione, politiche adeguate per la tutela di questa importante risorsa; la stessa Assemblea Generale dell'ONU ha dichiarato il 2015 come Anno Internazionale dei Suoli. Alla luce di tutto ciò appare evidente l'importanza di avere una mappatura adeguata del fenomeno, in modo da riuscire a rappresentare la situazione attuale e provare a evidenziare le zone critiche che, in base a fattori come il numero di residenti o la viabilità, possono essere oggetto di ulteriori urbanizzazioni. Altrettanto importante deve essere una definizione univoca del consumo di suolo dalla quale derivare una metodologia precisa per la sua individuazione.

In questo contesto, e alla luce di una analisi del problema e di come esso viene affrontato in ambito scientifico a livello nazionale ed internazionale - sovente in contesti multidisciplinari - si è deciso di effettuare una sperimentazione sulla mappatura dell'impermeabilizzato per la Provincia di Bologna: tale area di studio, infatti, per la sua posizione geografica, la sua conformazione fisica e lo sviluppo di interventi antropici importanti, è stata interessata da diversi cambiamenti riguardanti la copertura artificiale, così come rilevato da altri lavori svolti sulla materia.

La tecnica scelta è stata quella del telerilevamento, vista la sua capacità di separare l'*impervious* dalla vegetazione e di riuscire a mappare grandi aree in tempi relativamente brevi. Al fine di determinare il consumo di suolo, sono state selezionate ed acquisite cinque immagini Landsat, con risoluzione spaziale di 30 metri, per un periodo compreso tra il 1987 ed il 2013.

Le scene sono state classificate secondo la tecnica supervisionata *pixel-based*, individuando delle classi di copertura/uso del suolo che tenessero conto anche delle caratteristiche spettrali dei diversi oggetti esaminati. Esse sono state poi raggruppate, generando delle mappe che sono servite per ricavare l'impermeabilizzato per ogni anno. Tutta questa procedura è stata particolarmente complessa, richiedendo importanti interventi di fotointerpretazione per poter risolvere diverse problematiche legate sia al fenomeno esaminato sia alle caratteristiche delle immagini utilizzate. Essendo infatti l'impermeabilizzato composto da coperture a volte molto differenziate tra loro, si son dovuti creare diversi insiemi di *training sites* per caratterizzarlo; la mancanza di dati di riferimento per le immagini più datate e la risoluzione spaziale media hanno fortemente influenzato tutta l'operazione di classificazione.

Dopo la validazione, che ha messo in luce alcune tipologie di errore, si è eseguita un'analisi di *change detection* che ha rilevato un aumento di impermeabilizzato del 75% rispetto al 1987, passando quest'ultimo da 10.279 ha a 17.989 ha nel 2013, con un consumo di suolo pari a 0,8 ha/giorno. Anche su questa operazione di *change detection* è stata compiuta una validazione specifica che ha evidenziato come alcuni errori di confusione tra categorie, già rilevati in fase di classificazione, abbiano in parte pesato sui risultati finali.

Proprio per questo motivo, il dato del 2013 è stato confrontato con diversi studi esistenti, ed è emerso un buon riscontro in particolare con la mappatura del *Soil Sealing Map* del progetto Copernicus (l'unico lavoro peraltro ottenuto da dati telerilevati), per quanto quest'ultimo abbia una risoluzione spaziale leggermente maggiore. Va rilevato che gli altri studi disponibili, anche se spesso forniti come misure di consumo di suolo, fanno in generale riferimento alle superfici urbanizzate, comprendendo quindi anche spazi permeabili. Tali lavori derivano da rielaborazioni di mappe di uso del suolo ottenute da fotointerpretazione a diverse scale e forniscono, come prevedibile, valori numerici maggiori rispetto a quanto ottenuto in questo studio. Questo è direttamente connesso con la mancanza, già ricordata, di una definizione unica e condivisa del concetto di consumo di suolo. Per quanto riguarda la classificazione dell'immagine del 1987, non è stato possibile fare alcun

confronto con altri risultati, poiché i lavori citati si riferiscono ad un periodo successivo a tale data ed analizzano in generale intervalli più brevi di quello qui preso in considerazione.

Con questo studio è stato dunque possibile ricostruire l'evoluzione della copertura impermeabilizzata per un arco temporale molto importante dal punto di vista dei cambiamenti territoriali e non ancora analizzato in precedenza.

La scelta delle immagini Landsat, peraltro accessibili gratuitamente dal 2011, si è dimostrata idonea allo scopo, pur non potendo garantire una mappatura dettagliata come quella offerta dalle immagini ad alta risoluzione. La copertura Landsat offre infatti l'opportunità di analizzare aree estese per ampi periodi, riuscendo a fornire un ottimo livello di conoscenza delle dinamiche territoriali.

Tra gli sviluppi futuri della ricerca, potrebbe essere interessante la valutazione, eseguibile per esempio su una porzione della superficie considerata in questo studio, delle differenze nella classificazione che si potrebbero ottenere utilizzando immagini ad alta risoluzione, al fine di valutare quanto impermeabilizzato non viene rilevato a causa della risoluzione geometrica del sensore. Con riferimento a questo problema, potrebbe essere interessante anche integrare le classificazioni prodotte con i dati vettoriali sulla viabilità ottenibili dal Database Topografico della Regione Emilia-Romagna, ora disponibile solo per il 2008; la viabilità costituisce infatti, come rilevato anche dall'ISPRA, uno dei fattori di maggiore peso sulla quantificazione dell'impermeabilizzato.

BIBLIOGRAFIA

- Alampi, Bruno, Alessandro Delpiano, and Michelangelo Savino. 2012. "BILANCIO DEL PTCP DELLA PROVINCIA DI BOLOGNA Rapporto 2012."
- Alexandratos, Nikos and Jelle Bruinsma. 2012. "WORLD AGRICULTURE TOWARDS 2030 / 2050 The 2012 Revision." (ESA Working paper No. 12-03).
- Baiocco, Fabio, Nicoletta Gazzea, Ines Marinosci, Antonio Scaramella, and Michele Munafò. 2013. "Strumenti Del Sistema Nazionale per La Protezione Dell ' Ambiente per La Gestione Dei Dati Sul Consumo Di Suolo National Environmental Protection System Tools to Manage Soil Consumption Data." *Bollettino dell'Associazione Italiana di Cartografia* (149):15–25.
- Bauer, M., Brian Loeffelholz, and Bruce Wilson. 2005. "Estimation, Mapping and Change Analysis of Impervious Surface Area by Landsat Remote Sensing." in *Proceedings, Pecora 16 Global Priorities in Land Remote Sensing*.
- Biging, G. S., D. R. Colby, and R. G. Congalton. 1998. "Sampling Systems for Change Detection Accuracy Assessment." Pp. 281–308 in *Remote Sensing Change Detection: Enviromental Monitoring Methods and Applications*, edited by Ross S. Lunetta and C. D. Elvidge. Chelsea, Michigan: Ann Arbor Press.
- Bonora, Paola, ed. 2013. *ATLANTE DEL CONSUMO DI SUOLO per Un Progetto Di Città Metropolitana*. Bologna: Baskerville.
- Brabec, E., S. Schulte, and PL Richards. 2002. "Impervious Surfaces and Water Quality: A Review of Current Literature and Its Implications for Watershed Planning." *Journal of planning literature* 16:499–514.
- Brivio, Pietro Alessandro, Giovanni Lechi, and Eugenio Zilioli. 2006. *Principi E Metodi Di Telerilevamento*. Torino: CittàStudi Edizioni.
- Brun, S. E. and L. E. Band. 2000. "Simulating Runoff Behavior in an Urbanizing Watershed." *Computers, Environment and Urban Systems* 24:5–22.
- Chemnitz, Christine and Jes Weigelt, eds. 2015. *Soil Atlas: Facts and Figures about Earth, Land and Fields*. Heinrich Böll Stiftung, IASS.
- Chen, Jin, Peng Gong, Chunyang He, Ruiliang Pu, and Peijun Shi. 2003. "Land-Use / Land-Cover Change Detection Using Improved Change-Vector Analysis." *Photogrammetric Engineering Remote Sensing* 69(4):369–79.
- Clode, Simon, Franz Rottensteiner, Peter Kootsookos, and Emanuel Zelniker. 2007. "Detection and Vectorization of Roads from Lidar Data." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 73(5):517–35.

- Corticelli, Stefano, Maria Cristina Mariani, and Sara Masi. 2013. "Confronto Di Dati Dell'uso Del Suolo Ottenuti Con L'applicazione Di Aree Minime Diverse." Pp. 469–73 in *Atti 17a Conferenza Nazionale ASITA 2013*.
- Cracknell, A. P. 1998. "Synergy in Remote Sensing: What's in a Pixel?" *International Journal of Remote Sensing* 19:2025–47.
- Cushman, Samuel A. 2006. "Effects of Habitat Loss and Fragmentation on Amphibians: A Review and Prospectus." *Biological Conservation* 128(2):231–40.
- Dare, Paul M. 2005. "Shadow Analysis in High-Resolution Satellite Imagery of Urban Areas." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 71:169–77.
- Dougherty, Mark, Randel L. Dymond, Scott J. Goetz, Claire A. Jantz, and Normand Goulet. 2004. "Evaluation of Impervious Surface Estimates in a Rapidly Urbanizing Watershed." *Photogrammetric Engineering Remote Sensing* 70(11):1275–84.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2009. *FAO Statistical Yearbook 2007-2008*. Rome.
- Forlani, Gianfranco, Carla Nardinocchi, Marco Scaioni, and Primo Zingaretti. 2006. "Complete Classification of Raw LIDAR Data and 3D Reconstruction of Buildings." *Pattern Analysis and Applications* 8(4):357–74.
- Franci, Francesca, Alessandro Lambertini, and Gabriele Bitelli. 2014. "Integration of Different Geospatial Data in Urban Areas: A Case of Study." in *Second International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2014)*, edited by Diofantos G. Hadjimitsis, Kiriakos Themistocleous, Silas Michaelides, and Giorgios Papadavid.
- Gamba, Paolo and Martin Herold, eds. 2009. *Global Mapping of Human Settlements: Experiences, Datasets, and Prospects*. Boca Raton FL: CRC Press.
- Gangkofner, U. et al. 2009. "Update of the European High-Resolution Layer of Built-up Areas and Soil Sealing 2006 with Image2009 Data." in *30th EARSeL Symposium: Remote Sensing for Science, Education and Culture*.
- Gardi, Ciro, Nicola Dall'Olio, and Stefano Salata. 2013. *L'insostenibile Consumo Di Suolo*. Monfalcone (GO): EdicomEdizioni.
- Gardi, Ciro, Panos Panagos, Marc Van Liedekerke, Claudio Bosco, and Delphine De Brogniez. 2015. "Land Take and Food Security: Assessment of Land Take on the Agricultural Production in Europe." *Journal of Environmental Planning and Management* 58(5):898–912.
- Gitelson, A. et al. 1993. "Quantitative Remote Sensing Methods for Real-Time Monitoring of Inland Waters Quality." *International Journal of Remote Sensing* 14(7):1269–95.
- Godfray, H. Charles J. et al. 2010. "Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People." *Science* 327:812–18.

- Goetz, Scott J., Robb K. Wright, Andrew J. Smith, Elizabeth Zinecker, and Erika Schaub. 2003. "IKONOS Imagery for Resource Management: Tree Cover, Impervious Surfaces, and Riparian Buffer Analyses in the Mid-Atlantic Region." *Remote Sensing of Environment* 88:195–208.
- Gong, Peng and Philip J. Howarth. 1990. "The Use of Structural Information for Improving Land-Cover Classification Accuracies at the Rural-Urban Fringe." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 56(1):67–73.
- Goodchild, M. and D. A. Quattrochi. 1997. "Scale, Multiscaling, Remote Sensing, and GIS." Pp. 1–11 in *Scale in Remote Sensing and GIS*, vol. 2 .
- Green, K., D. Kempka, and L. Lackey. 1994. "Using Remote Sensing to Detect and Monitor Land-Cover and Land-Use Change." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 60(3):331–37.
- Haack, Barry N., Elizabeth K. Solomon, Matthew A. Bechdol, and Nathaniel D. Herold. 2002. "Radar and Optical Data Comparison/Integration for Urban Delineation: A Case Study." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 68:1289–96.
- Hester, David Barry, Halil I. Cakir, Stacy A. C. Nelson, and Siamak Khorram. 2008. "Per-Pixel Classification of High Spatial Resolution Satellite Imagery for Urban Land-Cover Mapping." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 74(4):463–71.
- Hodgson, Michael E., John R. Jensen, Jason A. Tullis, Kevin D. Riordan, and Clark M. Archer. 2003. "Synergistic Use of Lidar and Color Aerial Photography for Mapping Urban Parcel Imperviousness." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 69:973–80.
- Hsieh, Pi Fuei, Lou C. Lee, and Nai Yu Chen. 2001. "Effect of Spatial Resolution on Classification Errors of Pure and Mixed Pixels in Remote Sensing." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39(12):2657–63.
- Hu, Xuefei and Qihao Weng. 2011. "Estimating Impervious Surfaces from Medium Spatial Resolution Imagery: A Comparison between Fuzzy Classification and LSMA." *International Journal of Remote Sensing* 32:5645–63.
- Jensen, Jr and Dc Cowen. 1999. "Remote Sensing of Urban Suburban Infrastructure and Socio-Economic Attributes." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 65:611–22.
- Johnson, R. W. and R. C. Harriss. 1980. "Remote Sensing for Water Quality and Biological Measurements in Coastal Waters." *Photogramm. Eng. Remote Sensing* 46:77–85.
- Klein, R. D. 1979. "Urbanization and Stream Water Quality Impairment." *Water Resources Bulletin* 15(4):948–63.
- Lefebvre, Antoine, Nicolas Beaugendre, Alexandre Pennec, Cristophe Sannier, and Thomas Corpetti. 2013. "Using Data Fusion to Update Built-up Areas of the 2012 European High-Resolution Layer Imperviousness." in *33rd EARSeL Symposium*.

- Liberti, Stefano. 2011. *Land Grabbing*. Roma: Minimum Fax.
- Lu, Dengsheng, Emilio Moran, and Scott Hetrick. 2011. "Detection of Impervious Surface Change with Multitemporal Landsat Images in an Urban-Rural Frontier." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66:298–306.
- Lu, Dengsheng and Qihao Weng. 2006. "Use of Impervious Surface in Urban Land-Use Classification." *Remote Sensing of Environment* 102(1-2):146–60.
- Lu, Dengsheng and Qihao Weng. 2009. "Extraction of Urban Impervious Surfaces from an IKONOS Image." *International Journal of Remote Sensing* 30(5):1297–1311.
- Lunetta, Ross S., David M. Johnson, John G. Lyon, and Jill Crotwell. 2004. "Impacts of Imagery Temporal Frequency on Land-Cover Change Detection Monitoring." *Remote Sensing of Environment* 89(4):444–54.
- Marshall, Julian D. 2007. "Urban Land Area and Population Growth: A New Scaling Relationship for Metropolitan Expansion." *Urban Studies* 44(10):1889–1904.
- Mccarron, Ellen and Eric H. Livingston. 1992. "Stormwater Management: A Guide for Floridians."
- Mohapatra, R. P. and C. S. Wu. 2010. "High Resolution Impervious Surface Estimation: An Integration of Ikonos and Landsat-7 ETM+ Imagery." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 76(12):1329–41.
- Munafò, Michele, Luca Salvati, and Marco Zitti. 2013. "Estimating Soil Sealing Rate at National Level - Italy as a Case Study." *Ecological Indicators* 26:137–40.
- Munafò, Michele and Ilaria Tombolini. 2014. *Rapporto Consumo Di Suolo Italia 2014*.
- Nelson, Gerald C. et al. 2006. "Drivers of Change in Ecosystem Condition and Services." Pp. 175–222 in *Ecosystems and Human Well-Being: Scenarios - Volume 2*. Island Press.
- Van Oort, P. A. J. 2007. "Interpreting the Change Detection Error Matrix." *Remote Sensing of Environment* 108(1):1–8.
- Pal, Nikhil R. and Sankar K. Pal. 1993. "A Review on Image Segmentation Techniques." *Pattern Recognition* 26(9):1277–94.
- Powell, R. L., D. A. Roberts, P. E. Dennison, and L. L. Hess. 2007. "Sub-Pixel Mapping of Urban Land Cover Using Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis: Manaus, Brazil." *Remote Sensing of Environment* 106(2):253–67.
- Prokop, Gundula, Heide Jobstmann, and Arnulf Schonbauer. 2011. *Report on Best Practices for Limiting Soil Sealing and Mitigating Its Effects*.
- Ragan, Robert M. and Thomas J. Jackson. 1975. "Use of Satellite Data in Urban Hydrologic Models." *Journal of the Hydraulics Division* 101(12):1469–75.

- Romano, Bernardino, Serena Ciabò, and Mauro Fabrizio. 2009. "The Impact of Habitat Fragmentation: A Method for the Analysis of the Ecological Barriers Posed by Transport Infrastructures." *Estimo E Territorio*, 36–45.
- Van der Sande, C. J., S. M. de Jong, and A. P. J. de Roo. 2003. "A Segmentation and Classification Approach of IKONOS-2 Imagery for Land Cover Mapping to Assist Flood Risk and Flood Damage Assessment." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 4(3):217–29.
- Seto, Karen C., Michail Fragkias, Burak Güneralp, and Michael K. Reilly. 2011. "A Meta-Analysis of Global Urban Land Expansion." *PLoS ONE* 6.
- Settis, Salvatore. 2012. *Paesaggio Costituzione Cemento*. Torino: Einaudi.
- Smith, R. B. and W. Woodgate. 1985. "Appraisal of Fire Damage and Inventory for Timber Salvage by Remote Sensing in Mountain Ash Forests in Victoria." *Australian Forestry* 48(4):252–63.
- Song, Conghe, Curtis E. Woodcock, Karen C. Seto, Mary Pax Lenney, and Scott A. Macomber. 2001. "Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects?" *Remote Sensing of Environment* 75(2):230–44.
- Stuckens, J., P. R. Coppin, and M. E. Bauer. 2000. "Integrating Contextual Information with per-Pixel Classification for Improved Land Cover Classification." *Remote Sensing of Environment* 71:282–96.
- Trombulak, Stephen C. and Christopher A. Frissell. 2000. "Review of Ecological Effects of Roads on Terrestrial and Aquatic Communities." *Conservation Biology* 14(1):18–30.
- Turner, BL. et al. 1995. *Land-Use and Land-Cover Change. Science/Research Plan*.
- United Nations Department of Economic and Social Affairs. 2014. *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights*. United Nations.
- Van de Voorde, Tim et al. 2004. "Extraction of Land Use/land Cover Related Information from Very High Resolution Data in Urban and Suburban Areas." *Remote Sensing in Transition. Proceedings of the 23rd Symposium of the European Association of Remote Sensing Laboratories, edited by R. Goossens (Millpress, Rotterdam)* 237–44.
- Warner, Timothy A. and Françoise Nerry. 2009. "Does Single Broadband or Multispectral Thermal Data Add Information for Classification of Visible, near- and Shortwave Infrared Imagery of Urban Areas?" *International Journal of Remote Sensing* 30(9):2155–71.
- Weng, Qihao. 2012. "Remote Sensing of Impervious Surfaces in the Urban Areas: Requirements, Methods, and Trends." *Remote Sensing of Environment* 117:34–49.

- Weng, Qihao, Xuefei Hu, and Hua Liu. 2009. "Estimating Impervious Surfaces Using Linear Spectral Mixture Analysis with Multitemporal ASTER Images." *International Journal of Remote Sensing* 30:4807–30.
- Weng, Qihao, Xuefei Hu, and Dengsheng Lu. 2008. "Extracting Impervious Surfaces from Medium Spatial Resolution Multispectral and Hyperspectral Imagery: A Comparison." *International Journal of Remote Sensing* 29:3209–32.
- Weng, Qihao and Dengsheng Lu. 2008. "A Sub-Pixel Analysis of Urbanization Effect on Land Surface Temperature and Its Interplay with Impervious Surface and Vegetation Coverage in Indianapolis, United States." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 10(1):68–83.
- Wu, Changshan and Alan T. Murray. 2003. "Estimating Impervious Surface Distribution by Spectral Mixture Analysis." *Remote Sensing of Environment* 84:493–505.
- Xian, George. 2008. "Satellite Remotely-Sensed Land Surface Parameters and Their Climatic Effects for Three Metropolitan Regions." *Advances in Space Research* 41(11):1861–69.
- Xian, George, Mike Crane, and Junshan Su. 2007. "An Analysis of Urban Development and Its Environmental Impact on the Tampa Bay Watershed." *Journal of Environmental Management* 85(4):965–76.
- Yuan, Fei and Marvin E. Bauer. 2006. "Mapping Impervious Surface Area Using High Resolution Imagery: A Comparison of Object-Based and per Pixel Classification." in *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Annual Conference Proceedings 2006, Reno, Nevada*.
- Zhang, Xiaoyang et al. 2003. "Monitoring Vegetation Phenology Using MODIS." *Remote Sensing of Environment* 84(3):471–75.
- Zhou, W. and A. Troy. 2008. "An Object Oriented Approach for Analysing and Characterizing Urban Landscape at the Parcel Level." *International Journal of Remote Sensing* 29(11):3119–35.
- Zhou, Y. Y. and Y. Q. Wang. 2008. "Extraction of Impervious, Surface Areas from High Spatial Resolution Imagery by Multiple Agent Segmentation and Classification." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 74(7):857–68.