



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Sede Amministrativa del Dottorato di Ricerca

XXII CICLO DEL DOTTORATO DI RICERCA IN
GEOSTORIA E GEOECONOMIA DELLE REGIONI DI CONFINE

***TRA URBAN SPRAWL E CRESCITA ORGANICA,
ANALISI STORICA E SIMULAZIONE DI SCENARI FUTURI.
L'AREA METROPOLITANA DI PORDENONE COME CASO
APPLICATIVO***

Settore scientifico-disciplinare M-GGR/01

DOTTORANDO
Dott. FEDERICO MARTELLOZZO

COORDINATORE DEL COLLEGIO DEI DOCENTI
Chiar.mo Prof. GIANFRANCO BATTISTI

RELATORE
Chiar.mo Prof. GIANFRANCO BATTISTI
Università degli Studi di Trieste

CORRELATORE
Chiar.mo Prof. KEITH C. CLARKE
University of California – Santa Barbara

TUTORE
Chiar.mo Prof. ANDREA FAVRETTO
Università degli Studi di Trieste

ANNO ACCADEMICO 2008/2009

INDICE

INTRODUZIONE	4
1.1 STORIA ED EVOLUZIONE DEL FENOMENO: DEFINIZIONI, CAUSE ED EFFETTI	7
1.2 L'IMPIEGO DEL TELERILEVAMENTO PER L'INDAGINE GEOGRAFICA IN AMBITO URBANO: STATO DELL'ARTE	13
1.3 PROBLEMATICHE RELATIVE ALL'USO DELLA FOTOGRAFIA SATELLITARE, OPPORTUNITÀ ED OSTACOLI ..	18
2. PRESENTAZIONE DELLA RICERCA.....	21
2.1 IL TELERILEVAMENTO COME STRUMENTO PER L'INDAGINE GEOGRAFICA IN AMBITO URBANO	21
2.2 IL CONTESTO SCIENTIFICO - BASI TEORICHE SU CUI SI FONDA LA RICERCA	27
2.2.1 <i>Two Phases Urban Growth Theory – Un tentativo di lettura dello sprawl</i>	28
2.2.2 <i>Sprawl up or Sprawl down – l'entropia come strumento di analisi</i>	31
3. AREA DI STUDIO	36
3.1 MOTIVAZIONI DELLA SCELTA	36
3.2 CENNI STORICI	37
4.1 ANALISI STORICA DEI CAMBIAMENTI DI USO DEL SUOLO: DATI E STRUMENTI UTILIZZATI	46
4.1.1 <i>Base di dati e cartografia di riferimento</i>	47
4.1.2 <i>Ricerca, selezione ed acquisizione del formato delle immagini satellitari grezze sulle quali verrà fatto lo studio</i>	49
4.1.3 <i>Pre-elaborazione dei dati: importazione dei formati grezzi, ritaglio preliminare delle zone allo studio, georeferenziazione e correzione delle scene, co-registrazione delle stesse</i>	50
4.1.4 <i>Classificazione delle immagini telerilevate: comparazione dei metodi e scelta delle classi</i>	54
4.1.5 <i>Classificazione Unsupervised</i>	57
4.1.6 <i>Classificazione Supervised</i>	59
4.1.7 <i>Classificazione Machine Learning</i>	60
4.1.8 <i>Confronto dei risultati delle 3 classificazioni</i>	62
4.1.9 <i>Classificazione delle immagini telerilevate: impiego della metodologia Machine Learning per la classificazione delle immagini della serie storica</i>	63
4.2 ANALISI ED INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI OTTENUTI MEDIANTE L'ANALISI STORICA.	64
4.2.1 <i>Analisi diacronica di controllo delle differenze - Change Detection</i>	65
4.2.2 <i>Interpretazione dei risultati: i cambiamenti territoriali denunciati dalle 4 carte tematiche di copertura del suolo</i>	73
4.3 I MODELLI DI SIMULAZIONE AUTOMATICA PER LA PREVISIONE DI SCENARI FUTURI.	80
4.3.1 <i>Il modello di simulazione SLEUTH per l'investigazione dello sprawl</i>	81
4.3.2 <i>Fondamenti teorici e funzionamento del modello</i>	84
4.3.3 <i>SLEUTH Sueded Calibration e Optimum Sleuth Metrics</i>	91
4.4 RISULTATI ED OSSERVAZIONI DERIVATE DALLA SIMULAZIONE SLEUTH	94
4.4.1 <i>Il concetto e le misure dell'Entropia</i>	95
4.4.2 <i>Risultati e proposta di un indice per l'analisi diacronica dello sprawl</i>	98
5. ANALISI DEI RISULTATI ED OSSERVAZIONI DI CARATTERE GENERALE	115
5.1 PRESENTAZIONE DELLE CARTE DI IPOTESI DI DIFFUSIONE URBANA	118
5.2 CAMBIAMENTI DI COPERTURA DEL SUOLO INTERESSATI	125
5.3 INQUADRAMENTO DEI FENOMENI OSSERVATI NEL CONTESTO SOCIO-ECONOMICO	127
CONCLUSIONI	133
BIBLIOGRAFIA	136

“In qualche momento, quest’anno, o forse il prossimo, l’umanità passerà ufficialmente dall’essere una civiltà rurale ad una civiltà urbana. Per la prima volta nella storia, la maggior parte della popolazione mondiale vivrà in città e in aree metropolitane e non più in aree contadine; le implicazioni sociali e le ripercussioni sull’ambiente di questa transizione verso un pianeta prevalentemente urbanizzato sono gravemente preoccupanti.”

David Satterthwaite – The Guardian

Mercoledì 17 gennaio 2007.

Desidero ringraziare tutti coloro i quali durante questo periodo di studi mi hanno supportato ispirato e guidato nello svolgimento di tale progetto, incentivato a sperimentare ambienti nuovi, criticato costruttivamente quando ero vicino e confortato nei momenti più duri quando ero lontano. Sinceramente grazie.

À bientôt

INTRODUZIONE

Una delle sfide più critiche del cambiamento globale riguarda la gestione dello sviluppo (o per meglio dire dell'espansione) disorganizzato delle città a scapito dell'ambiente circostante; nella fase attuale il territorio agricolo è quello che maggiormente risente dell'espansione urbana. Il fenomeno, definito con il termine anglofono *urban sprawl*¹, benché molto conosciuto, rimane tuttavia di controversa lettura, in quanto nel mondo accademico e nel panorama scientifico in generale non vi è una definizione universalmente condivisa riguardo alla sua eziologia, né riguardo alle cause ed agli effetti ad esso correlati. Una problematica sulla quale torneremo in seguito.

Principale obiettivo di questa ricerca è quello di elaborare una metodologia che consenta di osservare e di descrivere efficacemente il *trend* evolutivo di tale fenomeno nel tempo, se non esaustivamente almeno parzialmente, per giungere poi ad identificare una sorta di “firma diacronica dello *sprawl*”². Il lavoro di ricerca è composto da una fase più teorica che pone l'attenzione sugli strumenti conoscitivi e da una seconda parte che riguarda lo studio di un caso applicativo specifico. I risultati ottenuti tramite tale applicazione sono poi stati utilizzati per elaborare considerazioni oggettive sui fenomeni in atto nel particolare caso di studio, ma anche per proporre indicazioni generali a livello teorico concernenti lo studio di tale fenomeno. Le due parti del lavoro sono state sviluppate in maniera sinergica nel corso di una ricerca condotta in parte presso l'Università di Trieste e in parte presso l'Università della California a Santa Barbara.

¹ Diffusione urbana o, come spesso tale fenomeno viene descritto, “città diffusa”. (Dematteis 2003).

² In questo caso ci si riferisce alla possibilità di individuare caratteri distintivi a livello spaziale che possano fungere da marcatori del fenomeno, in maniera analoga al modo nel quale altri fenomeni vengono caratterizzati da una firma spettrale dei pixel contenuti in un'immagine.

Il caso applicativo oggetto di studio riguarda l'area metropolitana della provincia di Pordenone, che si trova al confine tra Friuli - Venezia Giulia e Veneto, e l'indagine esplorativa è divisa sostanzialmente in due fasi: l'osservazione del passato e la previsione dello sviluppo nel futuro. Per quanto riguarda il passato, la base di dati utilizzata è stata ottenuta mediante l'analisi di immagini telerilevate dal 1985 al 2005; tali immagini sono state elaborate con l'impiego di innovative tecniche di interpretazione e classificazione basate su una metodologia chiamata *Machine Learning*; per quanto riguarda le previsioni sul futuro e per analizzare un intervallo temporale più ampio si è reso necessario anche l'impiego di modelli automatici di simulazione, basati su algoritmi cellulari. Obiettivo finale, è l'elaborazione di una cartografia tematica in grado di rappresentare efficacemente previsioni di transizioni di copertura del suolo che descrivano possibili scenari futuri sino al 2050, a patto che non si verifichino brusche variazioni nel *trend* osservato all'interno della teorizzazione adottata (causate, per esempio, da eventi del tutto eccezionali o da fenomeni imprevedibili).

L'area del pordenonese è giudicata particolarmente interessante, tanto che nel 2002 e nel 2006 è stata identificata dall'Agenzia Ambientale Europea (EAA 2006) come uno dei casi più esemplificativi di *sprawl* urbano in Europa. Il fatto che una piccola città come Pordenone costituisca una sorta di paradigma di un'espansione urbana disomogenea, ovvero uno *sprawl*, è alquanto singolare; infatti si è soliti collegare la diffusione urbana a estese aree metropolitane del Nord America come Los Angeles, San Diego, o a grandi città europee come Londra, Parigi o Milano. Di qui la scelta di quest'area come oggetto di indagine conoscitiva.

In questo contesto lo studio si prefigge anche di osservare la transizione da un *Sistema Metropolitano* ad una *Struttura di Rete Regionale* (Dematteis 1997), usando la

prospettiva ed i concetti descritti dalla *Teoria della Crescita Urbana a Cicli*³ (Dietzel et al., 2005a) mediante l'analisi di *pattern* spazio-temporali associati al fenomeno di *sprawl* urbano.

Il trend dell'espansione urbana, in termini esclusivamente geometrici, per l'area considerata, è stato analizzato mediante il concetto di *Entropia Spaziale Generale*⁴; il fenomeno rappresenta una variabile, per alcuni aspetti indipendente dalla scala di osservazione, ma soprattutto sintetizza l'unica caratteristica, o quasi, universalmente condivisa riguardante lo *sprawl* urbano. In questo contesto si è focalizzata l'attenzione anche sulle relazioni reciproche fra tempo e spazio nei momenti di *sprawl* (Batty 2002). Capire o essere in grado di prevedere come avvengono le modificazioni del tessuto urbano a livello spaziale nel tempo è di cruciale importanza per tutti coloro che si interessano di pianificazione territoriale ed ambientale. La conoscenza delle transizioni di uso del suolo permette di calibrare e di applicare politiche sociali, ambientali e manovre di pianificazione efficaci, aiuta a controllare tali cambiamenti, ad organizzare risposte adeguate a nuovi bisogni della popolazione ed anche a prevenire i rischi ed i costi correlati ad una crescita spaziale disorganizzata ed incontrollata del tessuto urbano, ovvero allo *sprawl*.

³ *Two Phase Urban Growth Theory*, elaborate da Dietzel.

⁴ Tale concetto verrà spiegato più approfonditamente nel paragrafo 4.4; per una trattazione completa dell'argomento si rimanda *Advanced Computational Methods fo Spatial Information Extraction*, Hikman et al 1995, pag. 153-173.

1. COSA SI INTENDE PER *URBAN SPRAWL*, EVOLUZIONE E PROBLEMATICHE

1.1 Storia ed evoluzione del fenomeno: definizioni, cause ed effetti

L'*urban sprawl*, o diffusione urbana, è un fenomeno che ha incominciato a manifestarsi circa alla metà del secolo scorso e si è poi sviluppato molto velocemente senza soluzione di continuità, tanto che solo recentemente il legislatore ha iniziato ad interessarsi al fenomeno ed ha tentato di proporre delle soluzioni accettabili per arginare le problematiche ad esso connesse (Donnay, Barnsley e Longley 2001).

Quasi ovunque nel mondo industrializzato, altrimenti definito sviluppato, la popolazione è gradualmente, o a grandi ondate, migrata dalle campagne verso le aree metropolitane (Dematteis 1997). Esempio lampante è quello delle città americane dove la maggior parte degli statunitensi ha lasciato in massa le aree agricole per stabilirsi in quelle in rapida crescita attorno alle città (Dreier 2005, Rusk 1993); si pensi ad un dato esemplificativo eclatante: la densità di popolazione negli Stati Uniti, nelle zone rurali, è diminuita del 50% dal 1950 al 1990⁵. Altro esempio a noi più vicino, è costituito dal massiccio afflusso di manodopera dal sud del Paese verso Roma, in concomitanza con la caotica e massiccia speculazione edilizia degli anni sessanta; una ondata che ha provocato l'abnorme espansione delle periferie con fenomeni di degrado ai quali sarà poi difficile porre rimedio. In misura diversa, il fenomeno è comunque osservabile in quasi tutti i paesi maggiormente industrializzati (J. R. Meredith 2003).

Le agglomerazioni periferiche si sono pertanto sviluppate molto rapidamente occupando chilometri e chilometri quadrati di suolo, dando vita ad una urbanizzazione selvaggia e

⁵Fonte: *United States Census Bureau*. 29 Settembre, 2006.

disorganizzata che ha riguardato non solo edifici adibiti ad alloggi, ma anche grandi aree destinate a centri commerciali o al commercio al dettaglio. Gli effetti negativi della diffusione urbana, stanno diventando particolarmente articolati e complessi ed acquisiscono una rilevanza sempre maggiore ma non sono di facile lettura; lo *sprawl* infatti sfugge ad una precisa definizione e non si adatta ad una chiara ed univoca proposta risolutiva. Una delle principali fonti di ambiguità è costituita dal fatto che lo *sprawl* dovrebbe poter essere distinto dal più comune fenomeno di crescita suburbana. Infatti alcune fasi di espansione delle periferie delle città accompagnano inevitabilmente il crescere della popolazione. Alcuni studiosi hanno abbracciato l'idea che, seppur non ben definito, lo *sprawl* sia facilmente riconoscibile qualora lo si osservi (Dowling 2000). Un'altra parte del mondo accademico, di gran lunga la più numerosa, ha tentato un approccio molto più scientifico alla definizione di *sprawl*. Questi studiosi usualmente definiscono lo *sprawl* alla luce dei problemi ad esso correlati.

Generalmente per definire lo *sprawl* si tende ad usare una, o più d'una allo stesso tempo, delle sei caratteristiche raccolte e sintetizzate da W. Burchell e N. A. Shad nel 1998.

- Lo *sprawl* è caratterizzato da una densità relativamente bassa⁶, sia di popolazione che di edifici o di servizi.
- E' costituito da una crescita a macchia di leopardo⁷ non ben delimitata e da un'assenza di contiguità spaziale fra un'area e l'altra (in zone residenziali il paesaggio è caratterizzato per esempio da villette a schiera occupate da una o due famiglie).

⁶ Naturalmente ci si riferisce a densità relative; infatti è comprensibile come aree facenti parte di contesti molto diversi possano avere densità simili in valori assoluti pur manifestando tipologie di crescita molto differenti. Per una trattazione esaustiva dell'argomento si rimanda a: *Sprawl and the New Urbanist Solution*, J. R. Meredith; in 'Virginia Law Review' vol. 89 n.2, 2003.

⁷ Nella letteratura anglosassone viene definita come *Leapfrog Development*, letteralmente: sviluppo a salto di rana.

- In condizioni di accentuata diffusione urbana, tipi di uso del suolo differenti si presentano in maniera frammentata; solitamente in queste aree i piani regolatori tendono a permettere un uso individuale del suolo diverso per ogni distretto.
- Lo *sprawl* consuma grandi quantità di suolo agricolo o naturale.
- Le persone che abitano in aree caratterizzate da diffusione urbana molto spesso basano la loro mobilità solamente sull'uso dell'automobile.
- Secondo alcuni studiosi, è importante sottolineare infine come anche la mancanza di una politica di pianificazione per un uso integrato del suolo sia una caratteristica dell'*urban sprawl*.

A supporto di quest'ultima tesi, si afferma che lo *sprawl* affligge aree nelle quali l'organizzazione dell'uso del suolo è stata frammentata fra una molteplicità di municipalità e attori sociali (Burchell e Shad 1998), considerando come attore privilegiato il territorio stesso (Faggi 2006). Se da un lato il legislatore ha profuso molti sforzi al fine di elaborare politiche adeguate per combattere lo *sprawl*, anche i pianificatori, gli architetti e coloro i quali si occupano di sviluppo urbano hanno formulato le loro proprie alternative, tra cui forse la più famosa ed interessante è quella del *New Urbanism*⁸. Questa linea di pensiero risponde alle problematiche relative allo *sprawl* proponendo, fra l'altro, la creazione di aree residenziali distinte ed interconnesse che consentano di ridurre al minimo l'uso dell'automobile e di incentivare l'uso del mezzo pubblico. Questa filosofia cerca in primo luogo di dare risposte spaziali all'*urban sprawl* ad un livello regionale e di quartiere. Attraverso i paradigmi del Nuovo Urbanesimo i sostenitori di tale movimento propongono di incentivare la differenziazione delle comunità, di pensare le città anche in funzione dei

⁸ Il Nuovo Urbanesimo fiorisce all'inizio degli anni '80 negli Stati Uniti e, continua ancor oggi, ad influenzare molti aspetti dello sviluppo del settore immobiliare e della pianificazione urbana. Questa linea di pensiero è fortemente legata all'ambientalismo, alla sostenibilità ed alla bioarchitettura.

mezzi pubblici e delle aree pedonali, di creare spazi pubblici accessibili universalmente e di definire principi architettonici che abbiano linee comuni e siano applicabili a livello locale. Nonostante le buone intenzioni la filosofia del *New Urbanism* non ha saputo tradurre in pratica i principi espressi perché non è riuscita a delineare tutte le cause dello *sprawl*. Sebbene i “Nuovi Urbanisti” abbiano proposto linee guida dettagliate su come combattere la diffusione urbana, essi hanno fallito in quanto non hanno saputo articolare un piano efficace a livello regionale, ovvero hanno trascurato il contesto in cui vive l’organismo urbano. Con il risultato è che anche nuovi centri urbani progettati secondo le linee di pensiero del *New Urbanism* soffrono dei problemi relativi al tradizionale sviluppo caratterizzato da *sprawl*. Come detto in precedenza, molto spesso l’ambiente accademico ha tentato di definire lo *sprawl* in funzione degli effetti da esso scatenati, partendo quindi dalle conseguenze e non dalle sue caratteristiche. A tal proposito gli ambientalisti sono stati fra i più forti oppositori della diffusione urbana; ma molte definizioni di *sprawl* sono state sviluppate in seguito allo studio degli effetti negativi a livello economico, sociale e non solo ambientale. Per fare qualche esempio, è da molti condivisa l’opinione che in aree soggette a *sprawl* il costo dei servizi sia molto più elevato rispetto a comunità caratterizzate da una maggiore densità di popolazione (TCRP 2000). Allo stesso tempo, vi è chi obietta che anche l’organizzazione di comunità con densità molto elevate può non essere una alternativa migliore (Ladd 1992).

Insieme alle problematiche economiche, ve ne sono altre di carattere sociale, spesso utilizzate per definire lo *sprawl*. La diffusione urbana consolida la relazione fra stratificazione sociale e aree-ghetto. Inoltre la natura dispersiva dello *sprawl* inibisce il senso di comunità fra la popolazione; ne sono conseguenze dirette l’emarginazione sociale, un aumento dell’individualismo e l’impoverimento culturale e materiale.

Nonostante l'esistenza di problematiche sociali ed economiche relative allo *sprawl*, il rapporto diretto tra rischi ambientali e diffusione urbana è più facile da osservare. Infatti a causa del rapido consumo di suolo lo *sprawl* non solamente ha un impatto diretto pesante sull'ambiente in quanto frammenta e distrugge habitat naturali ed ecosistemi talvolta molto fragili, ma è anche la causa di molti effetti indiretti. La frammentazione del suolo non urbanizzato è un effetto che chiaramente raffigura i danni ambientali direttamente causati dallo *sprawl*: le aree rurali, boschive e soprattutto le zone agricole sono infatti fragili e particolarmente a rischio in quanto da un lato sono quelle che solitamente hanno un prezzo accessibile e dall'altro presentano caratteristiche appetibili per l'urbanizzazione.

Come detto, agli effetti diretti se ne aggiungono altri che non sono direttamente imputabili allo *sprawl* ma sono comunque da esso aggravati, quali ad esempio l'aumento dell'inquinamento di aria ed acqua, l'erosione dei suoli e l'aumento del consumo di energia; infatti è stato osservato come lo *sprawl* sia intrinsecamente legato all'utilizzo dell'automobile e ad un incremento dei tempi di percorrenza e delle distanze, fattori che contribuiscono ad ognuna di queste problematiche ambientali (Karkkainen 1997). Un altro approccio per definire lo *sprawl* è quello di partire dall'analisi delle cause. Questo fenomeno si propaga in maniera capillare e spinge i singoli nuclei familiari o le singole persone a trasferirsi in aree suburbane o peri-urbane⁹. Quando questo fenomeno raggiunge a livello aggregato una dimensione significativa e pertanto diventa osservabile, si manifesta come *urban sprawl* (J. R. Meredith 2003). Fondamentalmente possiamo raggruppare le cause che spingono gli individui verso aree suburbane in tre macro categorie: economiche, sociali e politiche.

⁹ Per un approfondimento dell'analisi di tale fenomeno si rimanda a: KIPAR A., La produzione di valori ambientali nelle aree periurbane: verde agricolo, verde naturale, verde attrezzato. In Flavio Boscacci e Roberto Camagni (a cura di) «Tra città e campagna: periurbanizzazione e politiche territoriali», Il Mulino, Bologna 1994, pp.395-406

Le scelte economiche sono determinate dalla convinzione che le aree decentrate offrano servizi migliori e a prezzi più adeguati, non influenzati dal mercato della grande città. Le preferenze sociali includono il desiderio di sentirsi più sicuri sia per il fatto di essere circondati da persone che hanno fatto la stessa scelta, sia perché si ha la sensazione di scappare dal caos che domina l'ambiente metropolitano. Infine le motivazioni politiche possono consistere nel fatto che si percepiscono le aree suburbane come luoghi che offrono opportunità migliori di esercitare la funzione politica individuale e di influire maggiormente sulle scelte, in quanto si vive in comunità più piccole (Poindexter 1997). Nonostante ciò, i concetti espressi sinora prendono in considerazione, seppure a ragion veduta, cause ed effetti dello *sprawl*, ma non le sue caratteristiche oggettive. Nell'ambiente accademico, come abbiamo accennato all'inizio, non c'è una definizione di *sprawl* universalmente condivisa ed accettata ed anche riguardo al suo manifestarsi vi sono molte differenziazioni e distinzioni nella lettura ed interpretazione del fenomeno. Uno degli elementi su cui vi è tuttavia la più larga condivisione è forse quello che ne considera la dimensione spaziale, dunque la variabile più strettamente geografica.

Lo *sprawl* può essere dunque descritto come la diffusione e l'espansione disorganizzata ed incontrollata delle aree urbane a scapito degli ambienti naturali circostanti¹⁰ (Peiser 1989); pertanto la ricerca in questione seguirà prevalentemente le indicazioni fornite da tale definizione. Attraverso un'analisi particolareggiata della variabile spaziale si è qui cercato di incrementare la conoscenza del territorio alla luce del fenomeno di *sprawl* ed al tempo stesso di elaborare uno strumento semplice, efficace e scientificamente robusto che possa facilitarne l'osservazione.

¹⁰ Le definizioni per diffusione urbana sono molteplici; si ricorda anche quella elaborata da Clawson (1962): lo *sprawl* è una mancanza di continuità spaziale nel processo di espansione urbana.

In questo lavoro si è fatto largo uso del telerilevamento e di analisi tramite modelli sintetici; tuttavia, anche se tali strumenti si sono rivelati molto importanti per il raggiungimento di interessanti risultati, preme sottolineare, qualora ve ne fosse bisogno, che questi sono solamente alcuni degli strumenti propri dell'indagine geografica. Sebbene essi rivestano un ruolo essenziale nell'osservazione e nella rappresentazione del fenomeno, per offrirne una lettura organica e completa non si può prescindere da altri strumenti, quali l'analisi storica dell'evoluzione del fenomeno, l'osservazione del *trend* attuale, l'inquadramento e la contestualizzazione geografica.

1.2 L'impiego del telerilevamento per l'indagine geografica in ambito urbano: stato dell'arte

La fotografia satellitare è da tempo utilizzata come valido strumento per la ricerca geografica in ambito urbano (Jensen, 1996). Il telerilevamento nel campo di indagine dell'ambiente urbano è ancor oggi largamente praticato anche grazie alle innovazioni delle tecniche di analisi delle immagini telerilevate che sono state ottenute in seguito alla rapida crescita della domanda di tali strumenti. D'altronde l'ampia disponibilità, la frequenza di aggiornamenti ed i costi sempre più contenuti hanno fatto sì che l'analisi sulle aree urbane tramite telerilevamento si focalizzasse sempre più sull'uso di immagini multi-spettrali, in particolare quelle acquisite da sensori montati a bordo di satelliti eliosincroni. Questo trend è iniziato con l'avvento di ciò che può essere descritto come la "prima generazione" di sensori, in particolare il Landsat MSS (*Multispectral Scanning System*); in questa direzione la ricerca ha tratto ulteriore impeto dai sensori di seconda generazione come il Landsat TM (*Thematic Mapper*) e lo SPOT HRV (*High Resolution Visible*). I dati del primo sono stati inizialmente utilizzati per l'analisi di sistemi urbani regionali e per investigazioni

preliminari di alcune delle più grandi città del Nord America (Forster 1980, Jackson et al. 1980, Jensen 1981).

La disponibilità di immagini con una risoluzione spaziale sempre maggiore (ad esempio le immagini SPOT) ha permesso di approfondire il dettaglio di studi effettuati con immagini più vecchie, ad esempio l'analisi di aree urbane più compatte, caratteristiche dell'Europa (Welch 1982, Forster 1983, Baudot 1993). L'avvento negli ultimi anni di una terza generazione di sensori con una risoluzione spaziale molto elevata (inferiore a 5 metri) ha stimolato ancora di più lo sviluppo di queste tecniche di osservazione tanto che, soprattutto in ambito anglosassone, si parla di *Urban Remote Sensing* (Donnay, Barnsley e Longley 2001) come di una disciplina a sé stante e non come uno dei tanti campi di indagine della ricerca geografica in generale (Aplin et al. 1997, Fritz 1999). I dati prodotti con questi sistemi dovrebbero facilitare la discriminazione degli oggetti che popolano ambienti molto densi ed eterogenei, quali ad esempio gli antichi nuclei urbani, che caratterizzano le città europee (Ridley et al. 1997), ma dovrebbero altresì aiutare a districare il tessuto urbano degli agglomerati in rapida espansione e delle *edge cities* (Garreau 1991) di molti paesi sviluppati.

Il grande numero di ricerche in ambito urbano mediante telerilevamento effettuate sin dal lancio del primo satellite SPOT nel 1986, sta a significare che tale strumento si è dimostrato di grande utilità applicativa; una considerazione che va estesa *de facto* anche ai sensori Landsat e Aster (Weber 1995). Un esempio fra tutti è il fatto che nel 1995 è stata organizzata dall'Agenzia Europea di Statistica (Eurostat) la prima iniziativa internazionale sul tema, ovvero il convegno chiamato "Telerilevamento e statistica urbana" (Eurostat 1995). Ma nonostante i positivi sviluppi ottenuti in questa disciplina non mancano delle perplessità riguardo alle reali potenzialità del telerilevamento in rapporto allo studio di casi

applicativi particolari e riguardo all'osservazione e alla mappatura delle aree urbane (Ehlers 1995, Donnay 1999); la maggior parte dei dubbi e delle perplessità riguardano la robustezza e l'affidabilità dei risultati ottenuti. In effetti, molti dei risultati riportati dalle letterature scientifiche a riguardo sono di rilevanza talvolta solo marginale per la pratica quotidiana di pianificatori ambientali e urbani o statistici, che restano in larga parte ancor oggi diffidenti verso tali strumenti. Altresì si deve dire che negli ultimi anni i distributori ed i produttori di strumenti per l'analisi delle immagini telerilevate hanno molto investito sull'impiego e sullo sviluppo di nuove tecnologie specificatamente progettate per la ricerca in ambito urbano¹¹.

Un'altra problematica riguarda la richiesta di dati con una risoluzione spaziale sempre maggiore. Abbiamo notato in precedenza come la disponibilità di una maggiore definizione e dettaglio implicino sia maggiori potenzialità che maggiori ostacoli; le informazioni sono sempre più numerose e precise, ma di conseguenza aumenta anche la difficoltà nella discriminazione degli oggetti osservati (Battisti, Favretto, Mauro 2002). Lo stesso accade con internet: l'infinita disponibilità di notizie, informazioni, dati, unita alla pluralità delle fonti che le mettono a disposizione (talvolta interessate e dunque poco oggettive), rende davvero difficile orientarsi e discernere. Si rischia non più di guidare un processo di apprendimento ma di essere travolti dal circuito mediatico di internet. A meno che non si abbiano una robusta cultura di base e spiccate capacità di critica e di sintesi, si diventa inevitabilmente soggetti solo passivi.

Sebbene sia già stato sottolineato come il maggiore impulso a questa disciplina sia stato dato dall'impiego dei sensori di seconda generazione, con una risoluzione spaziale tra 10

¹¹ Basti pensare per esempio al software sviluppato dalla Overwatch e rilasciato nel 2006 che si chiama specificatamente *Urban Analyst*, questo è stato progettato per essere compatibile con i più diffusi software di analisi per i Sistemi Informativi Geografici.

metri e 30metri, è stato suggerito che il tema più importante del telerilevamento in ambito urbano sia quello di ottenere una maggiore risoluzione spaziale delle immagini (Welch 1982). Dobbiamo notare come ad oggi vi sono sensori in grado di registrare immagini con risoluzione spaziale al di sotto di 0,5 metri¹²; una risoluzione spaziale di 20 cm corrisponde ad un fattore di scala di 1:1.000¹³, una scala di rappresentazione di gran lunga più dettagliata della cartografia convenzionalmente utilizzata per ritrarre gli ambienti urbani (Longley et al. 2001). Al contrario una risoluzione spaziale fra 15 metri e 5 metri corrisponde ad un fattore di scala compreso fra 1:75.000 e 1:25.000; sebbene la maggior parte delle tavole che ritraggono ambiti urbani nella nostra cartografia ufficiale abbia una risoluzione di 1:10.000¹⁴, possiamo notare che per analisi urbane che tengano conto non solo del nucleo metropolitano ma anche di un contesto più ampio, immagini con una risoluzione di 15 metri possono rappresentare una base dati soddisfacentemente dettagliata e robusta (Longley et al. 2001)¹⁵. Pare dunque ragionevole ipotizzare che più che una maggiore risoluzione spaziale siano necessarie una maggiore accuratezza della metodologia applicata ed una maggiore affidabilità (Battisti 2004); Le immagini satellitari permettono ormai una copertura quasi continua nel tempo dell'area oggetto di studio e le tecniche di elaborazione dei dati trasmessi consentono il monitoraggio su scala puntuale di una estesa serie di fenomeni di interesse territoriale. Questi vanno dall'identificazione della tipologia della copertura vegetale, sia naturale che artificiale (stato e tipologia delle colture), dell'edificato, della presenza di cave, di inquinanti sversati, della qualità dell'aria, ecc.; quindi se da un lato gli strumenti permettono un'osservazione accurata ed affidabile, al fine di operare una corretta pianificazione territoriale ed ambientale si dovranno predisporre

¹² Per esempio le immagini distribuite da *Geoeye* hanno una risoluzione di 40 cm, ma per scopi commerciali vengono distribuite con una risoluzione di solo 50 cm.

¹³ Passare dalla risoluzione spaziale di un'immagine alla sua corrispondente riduzione di scala può essere fatto mediante la seguente formula: risoluzione spaziale = errore di graficismo moltiplicato per il fattore di scala. (Favretto 2006).

¹⁴ Come per esempio la Cartografia Tecnica Regionale o le ortofotocarte dell'Istituto Geografico.

¹⁵ Si sottolinea come gran parte della bibliografia al riguardo sia basata su analisi di immagini Landsat con 30 metri di risoluzione geometrica.

metodologie di analisi dei fenomeni osservati, di inferenza e di intervento parimenti accurate ed efficaci (Battisti 2004). L'uso di immagini con elevata o molto elevata risoluzione spaziale d'altronde porta alla luce altre problematiche: in primo luogo la maggior parte dei sensori con più elevata risoluzione registra immagini solo in modalità pancromatica; secondariamente l'incremento di risoluzione corrisponde ad un più che proporzionale incremento dell'informazione e quindi crea difficoltà in termini di gestione: salvataggio, scambio, condivisione e tempo di elaborazione, ecc.

Un'altra questione metodologica da prendere in considerazione riguarda il processo di classificazione dell'uso del suolo; generalmente parlando questo problema non è ristretto solamente alle analisi in ambito urbano: il telerilevamento è fondamentalmente una scienza basata sull'inferenza ma nonostante ciò poche proprietà della superficie terrestre possono essere misurate direttamente ed i dati telerilevati sono considerati generalmente come surrogati della realtà oggetto di studio (Longley 2003). Nei sistemi non urbani è generalmente possibile derivare in maniera piuttosto semplice le relazioni tra copertura del suolo e uso del suolo mediante l'analisi della risposta spettrale dei due più importanti elementi dell'ecosistema terrestre, cioè l'acqua e la vegetazione. Al contrario l'ambiente urbano pone a tal proposito grandi problemi; infatti in esso a valori di riflettanza¹⁶ spettrale identici possono corrispondere differenti usi del suolo (per esempio il suolo nudo o la ghiaia hanno una risposta spettrale molto simile ai tetti piatti degli edifici e dunque creano oggettive difficoltà interpretative). In conclusione le difficoltà che caratterizzano la ricerca mediante telerilevamento in ambito urbano sono sostanzialmente due:

- La qualità delle classificazioni urbane è tipicamente più povera di quelle che si possono ottenere per riprese di ambienti non urbani (sia in termini del numero di

¹⁶ Possiamo considerare la riflettanza come la quantità di energia dello spettro elettromagnetico che viene riflessa dalla superficie terrestre e successivamente registrata dal sensore; ad ogni pixel di una immagine corrisponderà uno specifico valore di riflettanza, attraverso il quale si può risalire alla copertura del suolo relativa al pixel in questione.

singole classi che possono essere riconosciute, sia in funzione dell'accuratezza con cui queste ultime vengono identificate.

- Le tipologie di uso del suolo che possono essere derivate attraverso la “firma spettrale” possono essere differenti dalla nomenclatura funzionale utilizzata in ambito urbano, ovvero valori di riflettanza spettrale differenti potrebbero essere associati alla medesima classe di uso del suolo.

1.3 Problematiche relative all'uso della fotografia satellitare, opportunità ed ostacoli

Nella pianificazione urbana le carte di uso del suolo generate attraverso la classificazione tematica di immagini satellitari non possono essere considerate in sé stesse come un prodotto finale, in quanto costituiscono un documento che mostra la situazione prevalente prima di qualsiasi azione di pianificazione (Longley 2002). D'altronde esse possono anche essere considerate come un punto di partenza per ulteriori analisi ed approfondimenti e pertanto gli sviluppi derivanti dalla classificazione diffondono sia le qualità che gli errori contenuti nella classificazione stessa. Per limitare al minimo la propagazione dell'errore o l'eccessiva astrazione nelle conclusioni, è fondamentale un'analisi storica il più accurata possibile; dunque la classificazione è al tempo stesso risultato dell'analisi storica e input per l'applicazione di modelli teorici e per le simulazioni, come nella ricerca che qui ci si presta ad illustrare. Il tema dell'accuratezza della classificazione investe un'importanza ed un interesse particolari in ambito accademico; un approccio comune è quello di un'analisi delle relazioni spaziali fra le varie categorie di uso del suolo, specialmente quelle residenziali, che avviene in una fase post-classificazione. Questo tipo di analisi morfologica può portare ad immediati risultati pratici, come la delimitazione spaziale delle forme acquisite dagli agglomerati urbani; allo stesso tempo essa non è funzionale solamente al

raggiungimento di questi risultati, ma costituisce uno strumento per modellare lo spazio urbano e per comprenderne lo sviluppo (Bianchin e Pesaresi, 1992; Batty e Longley, 1994).

Spesso l'approccio basato sull'applicazione dei modelli utilizza un nuovo processo di inferenza nel quale le categorie d'uso del suolo sono messe in relazione a variabili caratterizzanti l'ambito urbano che molto spesso riguardano direttamente la popolazione umana. Dato il rinnovato interesse dimostrato da alcuni settori della pianificazione ed alla luce dei recenti sviluppi in termini di sensori, metodologie di analisi e strumenti di calcolo, vi è una rivalutazione positiva del telerilevamento come strumento per il monitoraggio e l'osservazione delle aree urbane (Donnay et al. 2001). Dal punto di vista delle tecniche e delle metodologie, il telerilevamento per l'indagine in ambito urbano mostra un indiscutibile dinamismo e sembra essere in grado di poter trarre vantaggio da ogni innovazione tecnica e metodologica che avviene in questo campo. In primo luogo, tuttavia, il potenziale operativo del telerilevamento dipende soprattutto dalla capacità di rispondere alla domanda di applicabilità concreta da parte di coloro i quali si occupano di pianificazione e dalla capacità del geografo di manipolare la tecnologia per adattarla al contesto esaminato. Secondariamente il futuro del telerilevamento come strumento di indagine si basa anche sulla rapidità dei ricercatori nell'integrare dati telerilevati, dati censuari e teorie geografiche di sviluppo nella loro attività di ogni giorno. Ne consegue che ricerche o studi che hanno un periodo di gestazione eccessivamente lungo, in questo contesto, rischiano di fornire dati ed indicazioni su una situazione che è profondamente mutata dall'inizio dello studio. Il telerilevamento in ambito urbano deve pertanto essere in grado di fornire ai pianificatori, in tempi utili (ad esempio prima che un piano regolatore pluriennale sia impostato) determinati set di dati e informazioni relativi alle aree urbane oggetto di studio. Dati ed informazioni che possiamo elencare ricalcando le indicazioni

fornite dalla classificazione di J. P. Donnay, M J. Barnsley e P. A. Longley (Donnay et al. 2001):

- Localizzazione ed estensione delle aree urbane.
- Natura o distribuzione spaziale della molteplicità di categorie di uso del suolo che interpretano l'ambito urbano.
- Rete di trasporti principali e relative infrastrutture.
- Struttura tridimensionale delle aree urbane (molto importante in ambiti come le telecomunicazioni e gli studi di impatto ambientale).
- Capacità di osservare i cambiamenti diacronici nell'area oggetto di studio.

Al fine di soddisfare tali requisiti, si devono prima risolvere alcune ambiguità riguardanti l'identificazione e l'analisi delle forme urbane mediante telerilevamento. Pertanto è necessaria una stretta collaborazione fra chi si occupa di pianificazione territoriale e gli analisti di telerilevamento; non secondaria è anche la necessità di uno scambio continuo di informazioni tra coloro che applicano tali metodologie e strumenti e coloro che sono preposti al loro sviluppo ed innovazione. Solo attraverso tale prassi si può realizzare un tentativo di dare ordine a quel fenomeno che viene spesso definito "città diffusa" (Dematteis 2003) e quindi alla pianificazione strategica che può diventare strumento di governo della territorialità nel suo complesso. Un tentativo di uso del telerilevamento per la pianificazione del territorio è stato fatto nel progetto Interreg IIIA Italia-Slovenia "Gorizia-Nova Modelplan"¹⁷. Nella ricerca qui presentata si è fatto uso di alcune metodologie di indagine esperite proprio nello svolgimento del progetto comunitario transfrontaliero Modelplan.

¹⁷ Per una trattazione approfondita dell'argomento si rimanda a : Battisti G. 2004. *Gorizia Nova Model Plan. Modelli per lo sviluppo sostenibile nell'area di confine*. Ricerca a regia Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia nell'ambito del programma di iniziativa comunitaria "Interreg IIIA Italia-Slovenia 2000-2006", Rapporto preliminare, Dipartimento di Scienze Geografiche e Storiche, Università di Trieste, 2004. Coordinatore Battisti G.

2. PRESENTAZIONE DELLA RICERCA

2.1 Il telerilevamento come strumento per l'indagine geografica in ambito urbano

L'applicazione del telerilevamento allo studio degli insediamenti umani, forse più che in ogni altra applicazione, si fonda sulla disponibilità di dati tabellari ed accessori (*ancillary*)¹⁸ nonché sulle avanzate funzioni di analisi spaziale comunemente associate ai GIS. Pertanto il telerilevamento costituisce un valido aiuto nell'investigare con buona approssimazione le caratteristiche fisiche delle aree urbane (grandezza, forma, tasso di crescita, ecc.). Ma se ci dà indicazioni dettagliate dei tipi di copertura del suolo associate alle aree urbane, il suo supporto diventa insignificante qualora si vogliano descrivere le attività economiche o le condizioni socio-economiche che caratterizzano le aree in questione, a meno che i dati raccolti con il telerilevamento non vengano integrati con insiemi di dati esterni (tabelle, statistiche, dati censuari, relazioni tecniche e programmatiche, ecc.). Uno sguardo dall'alto può darci la dimensione e la collocazione degli oggetti ma per capire la relazione fra di essi, e quindi fra attività antropiche e ambiente, necessariamente si deve far ricorso a tutto l'insieme degli strumenti propri dell'indagine geografica nel senso più ampio del termine. Le nuove tecnologie come GIS e telerilevamento, seppur strumenti indispensabili per una indagine scientificamente robusta ed accurata, pertanto credibile ed utilizzabile nella programmazione di un uso cosciente e responsabile del territorio, restano tuttavia subordinati all'osservazione umana, in quanto essa soltanto ha la capacità di operare una sintesi degli elementi raccolti e di offrire un quadro di insieme completo e dettagliato, consentendo così di interpretare la realtà nella sua complessità e nel suo continuo mutare (De Vecchis e Staluppi 2006).

¹⁸ Il termine inglese *ancillary data*, talvolta abbreviato con ANC, in italiano è reso spesso con la traduzione "dati ausiliari" ed indica, nel contesto delle osservazioni mediante telerilevamento, l'integrazione di dati non grafici (per esempio dati censuari ISTAT) con dati telerilevati.

Per quanto riguarda le immagini, vi è una continua richiesta di sviluppare tecniche sempre più avanzate di analisi delle immagini tele rilevate, allo scopo di poter disporre di informazioni sempre più dettagliate, accurate e coerenti sulle strutture fisiche e sulla composizione delle aree urbane. La ricerca in questo campo deve dunque confrontarsi continuamente con le innovazioni delle tecnologie di acquisizione di immagini satellitari. Se da un lato ciò offre nuove possibilità, dall'altro pone anche nuovi problemi, costringendo la ricerca a continue correzioni di rotta. Vi è infatti il pericolo che gli specialisti del telerilevamento investano grandi energie nel perfezionamento e nello sviluppo di nuove tecnologie piuttosto che nel cercare soluzioni operative che migliorino l'affidabilità dei sistemi esistenti o la loro applicazione. Si avverte pertanto la necessità di andare oltre la semplice mappatura delle forme fisiche delle aree urbane e di dedicare un maggior interesse alle relazioni sociali e alle condizioni economiche che le caratterizzano. Compito del geografo in sostanza è quello di passare dalla semplice osservazione all'interpretazione ed alla comprensione di un processo nella sua dimensione diacronica. Infatti molte proprietà funzionali che interessano la pianificazione urbana, ma più in generale la ricerca geografica di aree antropizzate (ad esempio uso del suolo, densità di popolazione, tasso di sviluppo, qualità della vita) non possono essere osservate direttamente con sistemi di telerilevamento. Dunque si rende necessaria una più complessa catena di inferenze, tale da consentire di incorporare dati spaziali e ausiliari e di esaminare le proprietà spaziali, le relazioni e la struttura delle aree urbane rappresentate da una immagine digitale, andando pertanto oltre le loro caratteristiche spettrali. Di qui la necessità di nuovi modelli e strumenti di analisi spaziale, che integrino l'analisi di immagini satellitari e dati socioeconomici.

Altro punto focale è la necessità di una migliore sinergia fra gli attori coinvolti nell'osservazione, nello studio e nella pianificazione del territorio. Infatti la comunicazione

fra chi si occupa dello studio del territorio, gli specialisti dei sistemi di telerilevamento e il pianificatore ambientale deve migliorare; è necessario che i primi comprendano appieno le performanti potenzialità e i limiti che caratterizzano i sistemi di telerilevamento, mentre i secondi devono sviluppare sistemi di sensori e tecniche di elaborazione in grado di soddisfare i reali bisogni di chi userà tali strumenti per integrare ed approfondire le osservazioni del territorio; per i terzi il discorso si fonda sulla necessità di riporre maggior fiducia in coloro che si occupano dello studio del territorio.

La ricerca qui presentata è stata sviluppata partendo da tali considerazioni; uno degli aspetti fondamentali di questo studio è l'interesse per le relazioni spaziali e per la struttura delle aree urbane in un contesto più ampio, ovvero quello dei rischi connessi ad una gestione del territorio che non tenga conto degli effetti delle attività antropiche con l'ambiente. I cambiamenti di uso del suolo e la diffusione disorganica del tessuto urbano sono fra le più importanti cause antropiche di molte delle sfide ambientali che interessano la società moderna (Jacobs 1961).

Nel contestualizzare le osservazioni pratiche e gli studi sui cambiamenti di uso del suolo con le osservazioni teoriche, la geografia urbana ha visto in passato un passaggio dal modello urbano semplificato della scuola di Chicago all'Urbanesimo Postmoderno e all'*Edge City*¹⁹; tale passaggio è stato altresì accompagnato da avvertimenti e studi che mettevano in guardia dai rischi ambientali e dai negativi effetti sociali che sarebbero stati generati da un'espansione urbana disorganizzata (Dear et al. 1998). Sotto molti punti di vista le caratteristiche della moderna urbanizzazione sono considerate insostenibili; d'altro

¹⁹ Termine americano usato per aree dove vi è una concentrazione di attività commerciali, al dettaglio e non, di attività ricreative e servizi al pubblico, che si trovano al di fuori delle aree urbane tradizionali, in quelle che sono state definite aree suburbane o semi rurali (Garreau 1991).

canto sono disponibili oggi alcuni modelli che propongono una crescita urbana sostenibile e che, nelle intenzioni, dovrebbero mitigare i rischi correlati allo *sprawl* (Ewing 1994).

Alla fine del XX secolo, a cavallo fra gli anni '70 ed '80 circa, negli Stati Uniti sono nate, e si sono affermate, alcune scuole di pensiero nella pianificazione urbana che si proponevano di analizzare l'organizzazione delle città partendo dai modelli teorici ispirati dalla "città europea" proposta dall'architetto Leon Krier e dal *pattern language* di Christopher Alexander. Le origini di tale pensiero sono da ricondursi agli elementi caratterizzanti la Città Europea intesa come soluzione ai problemi di *sprawl* delle grandi città nordamericane. Curiosamente, invece, il caso di studio oggetto di questa ricerca concerne un'area sita nel nord est della nostra penisola che viene considerata dalla Comunità Europea come uno dei più significativi esempi di moderno *sprawl* urbano in Europa, nonostante non si tratti di una grande metropoli.

La filosofia di pianificazione alla quale abbiamo accennato, che in seguito avrebbe assunto il nome di *New Urbanism*, si è sviluppata ed è cresciuta dall'inizio degli anni '80 come un tentativo di combattere gli effetti e le conseguenze negative dello *sprawl* urbano sia sul piano sociale che ambientale. L'obiettivo principale era quello di sviluppare, seguendo principi architettonici e di pianificazione sostenibile, comunità a misura d'uomo con piste ciclabili e pedonali. La visione della pianificazione propria del Nuovo Urbanesimo si focalizza pertanto su tematiche centrali per una crescita urbana, come lo sviluppo sostenibile, la riduzione della congestione del traffico, l'incremento del trasporto pubblico, il facile accesso ad aree verdi e parchi, in netta contrapposizione al continuo espandersi verso l'esterno delle aree urbane; un processo che per il Nuovo Urbanesimo implica un sempre maggior volume di automobili ed una crescente richiesta di capacità di trasporto

con mezzi privati. Al contrario, nella filosofia del Nuovo Urbanesimo ha un'importanza centrale la qualità della vita.

Ma torniamo ad occuparci del concetto di *sprawl*, sul quale, come abbiamo accennato, non vi è unanimità fra gli studiosi in quanto ancor oggi non vi è una definizione condivisa su ciò che comunemente si intende con questo termine. Ciò è dovuto in parte al fatto che la maggior parte degli studi sul fenomeno riguarda per lo più gli effetti dell'urbanizzazione sugli stili di vita e sulla pianificazione territoriale (Hasse e Lathrop 2003). Per dovere di completezza bisogna comunque dire che anche alcuni studi, per altro poco numerosi, affermano che gli effetti negativi dello *sprawl* urbano sono stati sovrastimati (Glaeser and Kahn 2003) e che vi è una esagerata preoccupazione riguardo a tale fenomeno. Le implicazioni negative di una espansione urbana disorganizzata sono invece condivise dalla maggior parte degli ambienti accademici interessati a tale problematica; per fare alcuni esempi, le tematiche più diffuse associate al fenomeno sono la relazione fra espansione urbana e perdita di terreno coltivabile, la crescita disorganizzata ed a macchia di leopardo delle aree urbane e delle città, l'aumento dei costi in termini di spostamento e congestione del traffico e la mancanza di coesione e contiguità spaziale del tessuto urbano. La maggior parte di tali conseguenze è di natura spaziale, pertanto la prospettiva dalla quale si è voluto osservare il fenomeno dello *sprawl*, nello studio qui presentato, è prettamente spaziale.

Le tematiche negative associate allo *sprawl* sono comunque ben visibili e di facile identificazione; se si fa un comparazione semplicistica dello stile di vita delle comunità che vivono in città coese con quello delle comunità che vivono in aree urbane disperse o in aree suburbane, possiamo notare come generalmente le seconde siano caratterizzate dal fatto che le persone vivono in proprietà più grandi, in case più grandi, in aree nelle quali il tasso di utilizzo dell'automobile, espresso come il rapporto fra la distanza percorsa ed il numero

di persone, è nettamente di gran lunga maggiore. Una delle più importanti critiche allo stile di vita delle aree suburbane disperse è che tale modello di sviluppo causa necessariamente incremento del traffico, perdita di tempo, spostamenti più lunghi, peggioramento della qualità dell'aria, perdita delle zone agricole, riduzione di parchi e zone verdi, ma soprattutto incrementa i costi di gestione e manutenzione.

Alla luce di quanto detto sinora pare evidente come sia di capitale importanza che quanti si occupano di pianificazione territoriale ed urbana possano essere in grado non solo di analizzare l'andamento passato di tale sviluppo ma anche di poterne, con buona approssimazione, identificare un possibile andamento nel futuro. Solo così può contribuire all'elaborazione ed all'attuazione di politiche di contenimento che possano rispondere a bisogni specifici della popolazione ed aiutare a prevenire i rischi correlati all'espansione disorganizzata delle aree urbane. Il monitoraggio delle transizioni di uso del suolo in relazione all'espansione urbana nel tempo è di norma funzionale alla quantificazione ed alla localizzazione di tali transizioni ai fini della pianificazione territoriale; ciononostante, la capacità di capire in anticipo quale indice di espansione urbana o trend di crescita acquisirà un'area specifica metterebbe a disposizione della pianificazione un utile strumento per la comprensione degli impatti dello *sprawl* nel lungo periodo su di una regione e consentirebbe anche di prevenirne o contrastarne gli effetti negativi. Numerosi studi in passato hanno posto al centro dell'attenzione la misurazione ed il monitoraggio della crescita urbana, ma hanno generalmente incontrato difficoltà ed ostacoli nell'elaborare delle generalizzazioni sulle caratteristiche dello *sprawl* urbano.

Principale obiettivo di questa ricerca è pertanto quello di individuare evidenze scientifiche che permettano di descrivere l'andamento della espansione urbana e dello *sprawl* mediante l'utilizzo di metodi di classificazione, di immagini telerilevate e di analisi dei cambiamenti

di uso del suolo e, contestualmente, di elaborare carte tematiche della possibile crescita o de-crescita urbana per il futuro, attraverso l'applicazione di strumenti di modellizzazione cellulare automatica.

Grazie alla correlazione temporale che caratterizza le attività umane, quale ad esempio l'espansione urbana (Batty 2002), in questa ricerca si è cercato di descrivere l'evoluzione delle geometrie spaziali assunte dalla *sprawl* nel tempo, al fine di definire una sorta di "firma spaziale"²⁰ del trend evolutivo assunto dall'espansione urbana per la regione oggetto di studio, analogamente a quanto già espresso dal concetto di DNA urbano teorizzato da Silva (Silva e Clarke 2005). Questo lavoro è imprescindibilmente influenzato dai concetti generali espressi da Dietzel (Dietzel et al. 2005, Silva e Clarke 2005) attraverso i quali si descrive come lo *sprawl* urbano sia un fenomeno strettamente correlato alla variabile temporale, all'espansione delle aree urbane e sia al tempo stesso influenzato da due componenti: la concentrazione e la dispersione. La crescita naturale delle città dunque attraversa ed alterna fasi in cui vi è una prevalenza di continuità spaziale o coesione a fasi in cui il fattore caratterizzante è costituito da un elevato grado di dispersione e disorganizzazione spaziale, quindi da ciò che nella letteratura italiana viene definito come diffusione urbana.

2.2 Il contesto scientifico - basi teoriche su cui si fonda la ricerca

Si può sottolineare come sia l'ambiente naturale che il sistema sociale siano ambedue influenzati dall'espansione urbana e dallo *sprawl* ad ogni scala di osservazione, dai sistemi

²⁰ Tale concetto è qui usato analogamente al concetto di *spectral signature* nell'ambito del telerilevamento, dove i sensori hanno la capacità di registrare l'energia riflessa ed associare un apticolare valore di questa ad uno oggetto specifico.

urbani locali alle reti urbane globali (Dietzel et al., 2005). Studiosi di diverse discipline, come la geografia urbana, l'ecologia umana o l'economia del territorio, hanno tentato, talvolta con grande successo, di sintetizzare concetti e di elaborare modelli in grado di descrivere questi fenomeni e di poter così astrarre delle generalizzazioni (e.g. Burgess, 1925; Harris e Ullman, 1945); è altresì vero, però, che la maggior parte di questi studi e modelli sono stati elaborati a partire dall'analisi di variabili di natura socio-economica; dunque, in queste, le variabili tempo e spazio hanno assunto un ruolo ed un'importanza minori (Batty, 2002).

2.2.1 Two Phases Urban Growth Theory – Un tentativo di lettura dello sprawl

Lo studio qui presentato è un tentativo di investigare il fenomeno di *sprawl* mediante l'osservazione e l'analisi delle geometrie spaziali assunte dall'espansione urbana contestualmente all'evoluzione temporale di tali forme, al fine di poter meglio comprendere e descrivere lo stesso processo di crescita e diffusione urbana (Herold et al., 2002). Dunque l'obiettivo è quello di analizzare l'andamento dell'espansione urbana nel tempo facendo ricorso anche al concetto di entropia spaziale e generale, al fine di trovare validi argomenti a supporto della teoria dell'evoluzione spaziale in due fasi di sviluppo delle aree urbane (Dietzel et al. 2005). Queste misure sono state scelte perché la letteratura sull'argomento le considera non dipendenti dalla scala d'osservazione del fenomeno; sarebbe dunque possibile applicare e generalizzare eventuali conclusioni a città ed aree urbane di qualsiasi dimensione; inoltre, l'entropia, che può essere tradotta come il grado di disorganizzazione di un sistema, è l'unico concetto quasi universalmente condiviso riguardo alle proprietà spaziali assunte dal fenomeno dello *sprawl* urbano.

Come detto in precedenza, lo *sprawl* urbano è stato esaminato e studiato sotto molte differenti prospettive (Lowry 1990) e sono stati effettuati molti tentativi di definire forme generali e archetipi della diffusione urbana; da un certo punto di vista l'uso di archetipi al fine di ritrarre tale fenomeno è di grande aiuto perché permette di identificare gli elementi unificanti e le caratteristiche comuni attribuite al fenomeno da diversi autori; d'altro canto però ciò implica anche una produzione molto voluminosa che produce definizioni diverse ed a volte discordanti (Ewing 1994). Una definizione di *sprawl* unica ed universalmente condivisa non è ancora stata trovata: "... La letteratura riguardo allo *sprawl* è, con una punta d'ironia, largamente dispersa e con molte differenti sfaccettature." (Hasse 2003, pag. 160).

La maggior parte della ricerca scientifica si è focalizzata sul come definire e categorizzare lo *sprawl* urbano (Hasse e Lathrop 2003) e vi sono molti tentativi di mettere in relazione gli effetti di tale fenomeno con variabili socio-economiche (Ewing 2003, Henry 2001). Questo carattere disorganico dell'espansione urbana è stato più volte associato al naturale sviluppo spaziale delle aree urbane o metropolitane, contestualmente ad una crescita della popolazione in termini numerici (Brueckner 2002, Lowry 1990), con minor riguardo o interesse per le forme geometriche che il fenomeno può assumere sul territorio, dunque per la sua geografia. Ed invece l'aspetto centrale della presente ricerca è proprio quello di analizzare e trattare specificatamente in modo isolato la variabilità spaziale delle forme assunte dallo *sprawl* nel tempo e nello spazio.

Frequentemente lo *sprawl* è stato associato ad una crescita urbana inefficiente e disorganizzata; a tal proposito è ormai in uso una specifica terminologia che comprende

termini come: sviluppo sparso, crescita a macchie di leopardo (*leap frog development*)²¹, espansione a chiazze o a strisce, crescita al limitare della città o sviluppo continuo a bassa densità (Ewing 1994). Nonostante il più comune archetipo sia quello della crescita sparsa, teoricamente qualsiasi forma che rifletta una crescita o un'espansione urbana disomogenea potrebbe essere descritta dalle molteplici definizioni date allo *sprawl*. Il processo di espansione urbana o lo *sprawl*, contribuiscono entrambi alla riduzione delle aree agricole e degli spazi aperti; infatti è evidente come le aree adatte per le coltivazioni siano al tempo stesso quelle maggiormente appetibili o adeguate all'urbanizzazione (Ewing 2002). A tal proposito evidenze geostatistiche, in merito al caso di studio analizzato e la contestuale stretta correlazione fra urbanizzazione e perdita di zone agricole, verranno discusse in seguito nella parte conclusiva della ricerca. Anche se la spiegazione di questo processo risiede nel fatto che lo *sprawl* necessita di un territorio maggiormente esteso e quindi di superfici utilizzabili più ampie di quelle richieste da un'espansione urbana compatta ed organica, la transizione di uso del suolo di molte aree da zone agricole o naturali ad aree urbane o suburbane, è al tempo stesso causa ed effetto dell'aumento del livello di frammentazione del territorio e dell'incremento dell'entropia spaziale della regione considerata. La frammentazione massimizza le aree di contatto tra l'ambiente rurale e quello urbano ed in tal modo aumenta la pressione dell'urbanizzazione sulle aree utilizzate da comunità agricole o coperte da vegetazione spontanea. Gli studi ed il monitoraggio dei fenomeni di *sprawl* molto spesso si sono concentrati sull'individuazione delle aree di transizione di uso del suolo influenzate da tali trasformazioni attraverso l'analisi delle immagini telerilevate, il calcolo di misure ad hoc e l'impiego di modelli statistici (Hasse e Lathrop 2003); questi studi, seppur utilizzando approcci e metodologie differenti per l'osservazione degli effetti e del fenomeno *tout court*, partono da un unico concetto largamente condiviso collegato allo *sprawl*, ovvero dal fatto che esso riflette una

²¹ Vedi nota n. 7 pag. 9.

condizione di espansione di aree urbane casuale e disorganizzata a scapito degli ambienti naturale ed agricolo circostanti.

Alcune ricerche sono state dedicate alla misurazione delle forme urbane, ma hanno incontrato difficoltà nel catturare e descrivere la varietà delle loro caratteristiche; molte fra queste appartengono al campo dell'analisi di immagini o alla teoria dei frattali (Batty e Longley 1994) ed utilizzano il concetto di entropia e la sua forma spaziale per l'analisi dell'espansione urbana nel tempo e nello spazio.

2.2.2 Sprawl up or Sprawl down – l'entropia come strumento di analisi

Il concetto di entropia, teorizzato nella teoria dell'informazione, si è dimostrato di grande aiuto ed efficacia per il monitoraggio della complessità delle forme e delle modificazioni proprie dello *sprawl* in relazione alle variabili tempo e spazio (Yeh e Li, 2001). Le origini del concetto di entropia risalgono alla sua prima applicazione nel campo della termodinamica (Clausius 1864), ma l'entropia è generalmente intesa come il livello di disorganizzazione di un sistema, dunque essa è il riflesso del quantitativo di energia necessario per organizzare il sistema stesso²². Sin dalla formalizzazione di Shannon come teoria dell'informazione (1948), l'entropia è stata utilizzata in molteplici campi di applicazione come la fisica, il telerilevamento, la teoria dell'informazione, la matematica e la stessa geografia.

²² Si pensi di far cadere una gocciolina d'inchiostro in un bicchiere d'acqua; quello che si osserva immediatamente è che, invece di restare una goccia più o meno separata dal resto dell'ambiente (che sarebbe uno stato completamente ordinato), l'inchiostro inizia a diffondere e, in un certo tempo, si ottiene una miscela uniforme (stato completamente disordinato). È esperienza comune che, mentre questo processo avviene spontaneamente, il processo inverso (separare l'acqua e l'inchiostro) richiederebbe energia esterna (fonte: www.wikipedia.org).

Le misure dell'entropia, per quel che riguarda l'analisi della distribuzione spaziale di un qualsiasi fenomeno, sono state messe in relazione ai concetti di distanza e densità grazie alla natura spaziale del fenomeno considerato (Novelli e Occelli, 1999). Uno dei più efficaci indici sintetici che permettono di descrivere l'entropia è la formula elaborata da Shannon: si tratta di una funzione logaritmica già spesso impiegata in geografia urbana (per esempio: Sheppard 1975, Medvedkov 1990) in quanto è considerata una misurazione robusta per quantificare il grado di dispersione o compattezza dell'estensione urbana quando la si applica alle misure di densità del fenomeno (Yeh e Li, 2001; Peiser, 1989).

Il concetto di entropia ha beneficiato di molte implementazioni e correzioni che lo rendono maggiormente applicabile al campo dell'inferenza geografica, in quanto concentra maggiormente l'attenzione sulla dimensione spaziale della distribuzione del fenomeno oggetto di studio; Batty ad esempio ha definito il concetto di entropia spaziale argomentando circa l'importanza di un coerente sistema di zonizzazione²³ dell'area considerata, al fine di meglio identificare e descrivere le caratteristiche della distribuzione spaziale, o dell'entropia nello spazio (Batty 1974). Inoltre l'entropia è un concetto interessante al di là della sua applicazione per la determinazione della dispersione dello spazio di un dato fenomeno ed è stata recentemente applicata anche per l'affinamento di modelli e tecniche di classificazione (Li e Huang, 2002) da un punto di vista più teorico. Alcuni studi suggeriscono che la formula necessita di correzioni e aggiustamenti, che variano a seconda dei casi, per ottenere uno strumento più affidabile ed utile quando si intenda effettuare una comparazione dei livelli di dispersione o compattezza di una distribuzione nel tempo e nello spazio (Heikkila e Hu, 2006). Al fine di meglio osservare il fenomeno di *sprawl*, si deve considerare il fenomeno stesso come una problematica di

²³ Suddivisione della regione oggetto di studio in un numero di n zone che abbiano una grandezza compatibile adeguata per l'osservazione del fenomeno investigato (Batty 1974).

grado o quoziente; si pensi, per esempio, che ciò che viene definito con archetipi come sviluppo sparso e policentrico o sviluppo urbano multi-nucleato²⁴, in realtà descrive situazioni molto simili fra loro; dunque la separazione fra questi due differenti trend di espansione urbana risulta difficile ed elusiva; quindi pare normale considerare lo *sprawl* come una problematica di risoluzione o di scala (Batty 2008). “A quale numero di centri il policentrismo cessa per dar luogo allo *sprawl* non è per nulla trasparente” (Gordon e Wong, 1985). Lo *sprawl* può anche essere osservato tramite le analisi di altre sue dimensioni come: la densità, l’uso del suolo ed il tempo (Pesier, 1989, Ewing, 1994); inoltre le metodologie impiegate per la misurazione del fenomeno, dovrebbero, in un certo qual modo, permettere il confronto e l’analisi comparata fra città diverse, in maniera tale da consentire l’impiego di dati molto specifici, talvolta di difficile reperimento ed elaborazione, o operazioni di riduzione, come, ad esempio, regressioni multiple (Frenkel e Ashkenazi 2008)

L’entropia viene spesso considerata una variabile fondamentale per lo studio delle geometrie spaziali, in quanto rappresenta un utile strumento d’investigazione specialmente per la diffusione, in senso spaziale, di un fenomeno; essa è direttamente influenzata dal carattere oscillatorio dell’espansione urbana fra coalescenza e diffusione sparsa; si può dire dunque che è indicatrice del livello, o quoziente, di densità o compattezza del fenomeno geometricamente distribuito. A maggior ragione vi sono altre due caratteristiche che rafforzano l’utilità del calcolo dell’entropia per lo studio della teoria della crescita urbana in due fasi (Dietzel et al., 2005): il fatto che essa può essere considerata sia nella sua forma assoluta che relativa ed il fatto che tale formula può essere affinata riducendo gli errori introdotti dalla scala di osservazione e dal sistema di zonizzazione del territorio utilizzato.

²⁴ Per parte della bibliografia tale distinguo non è opportuno, perché, secondo alcuni, le due definizioni individuano lo stesso fenomeno, solo a scale di osservazione differente (Clarke 2000).

La diffusione urbana, o *sprawl*, identifica un processo per il quale aree con una elevata densità sono responsabili della nascita di cluster isolati o dispersi in aree caratterizzate da una minore densità; al contrario, la coalescenza tende a mostrare un fenomeno per il quale molti piccoli cluster si raggruppano, venendo a formare una sola entità spaziale più grande.

Gli scenari che ritraggono l'espansione urbana non ammettono il reale spostamento di *cluster*²⁵; più precisamente, una volta che un'area cede all'urbanizzazione, tende a rimanere urbanizzata; infatti fenomeni di decrescita²⁶ spaziale sono abbastanza rari; quindi riveste un'importanza particolare l'osservazione del trend di distribuzione di nuovi *cluster* nel tempo (Dietzel et al., 2005a). La dispersione dovuta all'ulteriore espansione di aree già interessate in precedenza da *sprawl*, sovente avviene in un arco di tempo relativamente lungo; quindi si è qui cercato di analizzare un intervallo temporale sufficientemente ampio assemblando ed omogeneizzando dati storici e possibili scenari futuri ottenuti dall'applicazione di modelli sintetici. Le dinamiche di cambiamento e di transizione di uso del suolo sono particolarmente rilevanti quando si intende descrivere il sistema urbano moderno in Italia. Per fare riferimento all'oggetto della nostra ricerca, Pordenone può essere considerata come un Sistema Specializzato Aperto; da un punto di vista più generale l'intera regione del Nord Est italiano può essere descritta come un'area caratterizzata da una densa rete di insediamenti (Dematteis, 1997).

In Italia, come in molti Paesi Europei, il concetto di area metropolitana assume un significato specifico (De Spuches, Guarrasi, Picone, 2002)²⁷ e “si riferisce più alla

²⁵ Nell'ambito scientifico si suole definire un *cluster* come un gruppo composto da unità elementari simili, vicine tra loro o per la posizione o per la composizione. In questo contesto identifica gruppi di *pixel* omogenei che spazialmente formano un'unità più grande.

²⁶ La decrescita urbana, in termini di estensione spaziale, è fenomeno solitamente inusuale, più verosimilmente si verifica un arresto nel processo di espansione, mentre molto più raro è la transizione di aree a copertura urbana in aree agricole, naturali o con coperture di suolo differenti.

²⁷ Cfr. De Spuches, Guarrasi, Picone, 2002; Dematteis, 1993 pag. 66-68.

concentrazione urbana degli anni '60 che non alla contemporanea fase di polarizzazione selettiva, più alle vecchie forme di agglomerazione e sub-urbanizzazione che al nuovo concetto di rete di strutture regionali, non più basato sulla continua espansione degli insediamenti” (Dematteis, 1997, pag. 337).

3. AREA DI STUDIO

3.1 Motivazioni della scelta

Nel 2002 e nel 2006 l'Agencia Ambientale Europea ha preso la città e l'area di Pordenone come uno dei più significativi esempi di aree urbane soggette a *sprawl* nell'Europa centrale ed orientale, suggerendo così la comparazione del sistema urbano italiano (Dematteis, 1997) con le argomentazioni del AAE del 2006, focalizzando l'attenzione sulla variabilità spazio-temporale alla luce delle considerazioni espresse dalla teoria della crescita urbana in due fasi (Dietzel et al., 2005b).

La scelta della AAE è basata sulle rapide trasformazioni subite dal territorio preso in esame negli ultimi decenni, in modo particolare le osservazioni dell'Agencia Ambientale Europea si basano sui risultati ottenuti dal progetto Moland²⁸. Merita qui accennare appena, anche se questo argomento verrà trattato più diffusamente in seguito, al forte sviluppo industriale e tecnologico che negli ultimi decenni ha visto insediarsi nell'area della provincia industrie di rilevanza mondiale (ad esempio la Zanussi), e lo sviluppo diffuso di piccole e medie industrie, al punto che il pordenonese, anche dal punto di vista dell'innovazione tecnologica, ha acquisito importanza rilevante nel contesto regionale. Ma la vocazione manifatturiera nelle aree intorno al Livorno, torneremo anche su questo, ha una tradizione antica.

²⁸ La documentazione completa è disponibile on-line: http://moland.jrc.ec.europa.eu/the_project.htm.

3.2 Cenni storici

Tracce di insediamenti nel territorio risalgono al 10.000 a.C. ma il nome della città ha origini romane e la presenza romana nell'area è testimoniata da numerosi resti e reperti. I segni più importanti vanno cercati soprattutto nella fascia delle risorgive, tra la periferia est di Pordenone e l'abitato di Cordenons. Secondo Valentino Tinti, nella sua "Storia di Pordenone" pubblicata nel 1837 e ripubblicata nel 1987, Pordenone era citata sin dal 452, nella storia di Aquileia al tempo di Attila e ... "si pretende che il fondatore sia stato un certo Naone, condottiero di gente romana". Tinti cita a conferma un epigramma dell'umanista marcantonio Amalteo (1475-1558): "*dat patriam Portus quem quondam Naonis Condidit*". Una traduzione scarsamente condivisa; quella comunemente accettata è invece: "la riva destra del Noncello, molto tempo fa, fece nascere Porto". Poi, sino intorno al mille, di Pordenone non si hanno quasi notizie se non che il territorio fu dominato volta a volta dai patriarchi di Aquileia, dai duchi di Stiria, Carinzia ed Austria.

Il nome Pordenone (in latino *Portus Naonis*) è citato per la prima volta nel 1204 nel *Diario di Viaggio* di Wolger di Passau, futuro Patriarca di Aquileia. Ed il territorio attorno al fiume Noncello, tra il 900 e il 1200, si estendeva per circa 200 Km quadrati. Vi erano inclusi anche gli abitati che oggi corrispondono a Cordenons, Porcia, Vallenoncello, Torre, Corva, Villanova, Fiume Veneto e, più in là, Zoppola, San Foca e San Quirino, territori che costituiscono sostanzialmente, l'area della nostra ricerca. Nel 1282 Pordenone divenne patrimonio personale di Casa d'Austria rappresentando *de facto* un'enclave dell'Arciducato d'Austria nel territorio del Patriarcato di Aquileia.

Nel corso del XIII secolo si costruirono anche i primi importanti e significativi edifici ancora esistenti: il Duomo con il Campanile e il Palazzo del Comune, protetti da una prima

cerchia di mura. Nella seconda metà del secolo dai governanti austriaci fu edificato il castello di Torre, su un preesistente edificio romano di circa duemila anni fa. Il maniero è isolato su di un'altura prospiciente il fiume e la città divenne rapidamente punto di transito di una via che collegava i territori veneziani (tramite i fiumi Livenza, Meduna e Noncello) con le regioni transalpine del Nord (attraverso i centri di Cordenons, Spilimbergo, Gemona, Pontebba) e la pieve di Torre sarà per lungo tempo il centro della vita ecclesiale di tutta l'area. Pordenone, visse un periodo abbastanza lungo di tranquillità ed ebbe uno sviluppo sia edilizio, sia come realtà politica ed amministrativa. Nel Castello, rappresentante il potere militare, risiedevano i capitani imperiali. La città rimase proprietà dell'Austria sino al 1508. Poi Pordenone divenne dominio della Serenissima, vincitrice nel conflitto con l'Austria; Venezia concesse la città in feudo al generale Bartolomeo d'Alviano (1455 – 1515) ed i d'Alviano rimasero i signori di Pordenone sino al 1537, anno che segnò il passaggio definitivo sotto il dominio diretto di Venezia, che riconfermò la validità degli antichi statuti e privilegi d'autonomia, codificati sin dal XIII secolo.

Iniziò così un nuovo periodo che coincise con momenti di grande sviluppo economico e demografico. Nei primi anni del XVI secolo gli abitanti ammontavano ad oltre 1500; a metà dello stesso secolo i residenti erano 2700. Nel 1588 gli abitanti, nonostante una grave epidemia di peste avvenuta nel 1576, salirono a 7000 unità, tanto che la parrocchia di San Marco venne scissa in due, con la costituzione della parrocchia di San Giorgio, sita nel Borgo superiore.

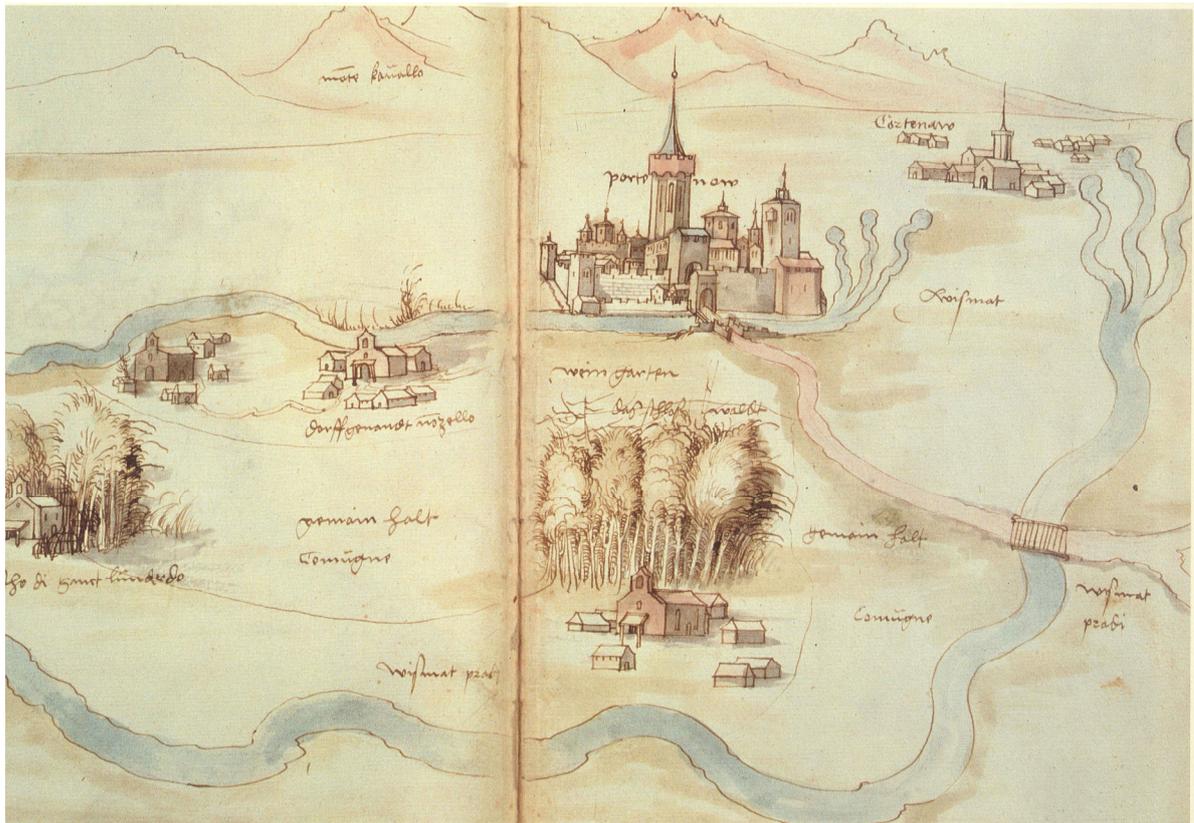


Figura 1: Jorg Kolderer– *Mappa di Pordenone e sue ville, 1509*. Vienna, Biblioteca Nazionale, cod. 2585.

Il 1500 è un secolo d'oro per la città. La vita culturale raggiunse il massimo splendore: sorsero Accademie e Cenacoli, vennero costruiti o ampliati i maggiori palazzi del centro storico, tuttora esistenti e nel contempo le famiglie nobili (Ricchieri, Mantica, Rorario) fecero a gara per contendersi l'ospitalità di pittori, umanisti, letterati e poeti. Pordenone sino al 1797 rimase, insieme al resto del Friuli e del Veneto, sotto il dominio di Venezia. Caduta la Serenissima Repubblica, si susseguirono alternativamente al potere esponenti degli opposti schieramenti franco-italiani ed austro-russi. L'importanza delle attività economiche pordenonesi è da ricondurre, come abbiamo accennato, alle tradizioni artigianali e commerciali già documentate alla fine del Medioevo. Le acque del fiume Noncello (Naonis) e delle numerosissime rogge secondarie furono all'origine del progressivo sviluppo artigianale e manifatturiero della città, a partire dal XVI secolo. A proposito del vivace ed articolato tessuto industriale del quale esistono ancor oggi

numerose testimonianze, si presentano qui solo alcuni esempi particolarmente significativi: la fabbrica siderurgica della Vallona. (risalente alla metà del 1500), la Galvani, nata all'inizio del diciannovesimo secolo (attiva nelle cartiere, nella ceramica e nella lavorazione del cotone) ed il cotonificio Amman-Wepfer, sorto nel 1875. La fabbrica della Vallona, nata nel 1553, specializzatasi successivamente nella fusione del rame e del bronzo per la realizzazione di enormi caldaie, utilizzava, per modellare il metallo fuso, un maglio enorme, collegato ad una ruota dentata mossa dall'acqua. Le commesse per queste caldaie, destinate soprattutto alle raffinerie, venivano “ ...dall'Albania, da Costantinopoli e dai paesi lontani...”. (Tinti 1837).



Figura 2: La città di Pordenone (particolare), prima metà dell'Ottocento (dal Catasto Austriaco).

Archivio di Stato.

Vi lavoravano 440 persone e fu, quasi certamente, il maglio della Vallona ad ospitare la zecca di Pordenone; nella città infatti si battevano monete che portavano in una delle facce il volto di Bartolomeo d'Alviano. La zecca coniava ducati pordenonesi di identico valore rispetto a quelli di Venezia (Comin, 2008).

Il 1° giugno 1811 Giuseppe Galvani fondò una "Fabbrica di Terraglia" presso l'ex convento di S. Antonio, acquistato grazie al piano di dismissione della Repubblica Veneta. Nel 1836 la gestione passò al giovane Andrea (1799-1855), uomo di scienza e geniale inventore che adottò tutta una serie di misure atte ad alzare la qualità e migliorare il prodotto. Negli anni '70 dell'Ottocento, durante la gestione di Giuseppe (1831-1888) e Giorgio (1832-1916), la Ceramica, che nel frattempo aveva costituito all'interno una Scuola d'Arte, ottenne riconoscimenti all'Esposizione di Vienna. Le fabbriche Galvani raggiunsero in quel periodo un'espansione tale da diventare meta ambita per gli emigranti.

Una menzione particolare merita il cotonificio Amman-Wepfer. Fondato nel 1875 da Alberto Amman ed Emilio Wepfer, l'attività si sviluppò rapidamente e nei numerosi stabilimenti sorti negli anni successivi, trovarono lavoro quasi 12.000 operai (su circa 25.000 abitanti!). Il cotonificio di Borgomeduna ha cambiato il volto della città trasformandone l'economia, incidendo sul tessuto sociale e contribuendo alla crescita politica delle organizzazioni dei lavoratori. Successivamente tutta la provincia fu caratterizzata da un autentico decollo industriale nei settori del tessile, della ceramica e della carta, grazie anche all'avvento dell'energia idroelettrica utilizzata a Pordenone già dal 1888. Sfruttando anche i diversi laghetti artificiali e non, Pordenone fu la prima città in Italia a dotarsi di illuminazione pubblica corrente ed il cotonificio Amman fu il primo in

Italia a dotarsi di una turbina per la produzione di corrente elettrica alternata; Pordenone si meritò allora l'appellativo di "Piccola Manchester"²⁹.

Un'altra fase importante si apre già dai primi decenni del 1900, quando la città conobbe un notevole sviluppo economico ed industriale soprattutto nelle lavorazioni metalmeccaniche, siderurgiche, chimiche e del legno. Basti citare per la meccanica, aziende come Savio e Zanussi. La Zanussi nacque nel 1916 grazie ad Antonio Zanussi, giovanissimo operaio riparatore di stufe e cucine a legna in una piccola ditta artigiana di Pordenone, in piena guerra mondiale. In pochi anni il laboratorio di trenta metri quadri con 3 dipendenti, riuscì ad ampliare la propria struttura e produzione andando ad occupare nel '36 una superficie di 3000 metri quadri, dando lavoro a 100 persone. Nel periodo del miracolo economico la Zanussi si impose nel mercato delle tv e subito dopo l'azienda si lanciò nel settore dei frigoriferi. In epoca recente il colosso del settore Electrolux ha acquisito la Zanussi. La Savio nacque nel 1911. Si trattava di una piccola impresa artigiana che si specializzò nella produzione di componenti per l'industria tessile locale conquistando rapidamente un ruolo di primo piano nel settore delle macchine tessili. Negli anni del miracolo economico, anche la Savio si impose sul mercato con grandi volumi di produzione e creò generazioni di tecnici altamente specializzati.

3.3 Inquadramento geografico

Il territorio della provincia di Pordenone, dal punto di vista amministrativo, è stato disegnato definitivamente nel 1968 quando, all'interno della regione storica friulana e più specificatamente della vasta provincia di Udine, fu riconosciuta l'autonomia del cosiddetto

²⁹ Alla fine dell'ottocento Manchester era considerata la capitale mondiale della produzione tessile.

Friuli Occidentale o Destra Tagliamento. I limiti geografici sono facilmente individuabili, segnati dalla natura stessa del territorio: un compatto rettangolo tra i fiumi Tagliamento e Livenza, che marcano lunghi tratti di confine con le province contermini di Udine e di Treviso. Solo il confine con la provincia di Venezia, a sud, tracciato nel 1818 dal governo austriaco del Regno Lombardo-Veneto, allorché si scorporò dal Friuli il distretto di Portogruaro, risulta quasi artificiale, non caratterizzato dalla morfologia del territorio. Tale confine non è neppure fondato su motivazioni storiche le quali, semmai, porterebbero a cancellarlo.

Dal punto di vista orografico, la lettura del territorio è assai semplice nelle sue linee generali: un'ampia zona montana (che fu battezzata 'Prealpi Carniche', ma che deve essere chiamata 'Prealpi Pordenonesi, dato che con la Carnia mai nulla ebbe a che fare); una ristretta fascia collinare; una lunga pianura in fuga verso il mare. Durante l'ultimo periodo postglaciale, i fiumi Cellina, Colvera, Meduna, Cosa, Arzino e Tagliamento portarono a valle enormi quantità di materiali, tra i quali (a parte il Tagliamento) hanno finito per perdersi: questi depositi fluviogiaciali, sciolti o cementati, formano l'alta pianura (chiamata anche impropriamente 'pedemorenica') che si estende dal Pedemonte alla 'linea delle risorgive'. La cosiddetta "linea delle risorgive", che in realtà è una fascia abbastanza larga, contraddistingue la zona nella quale le acque dei fiumi prealpini, percolate nel materasso ghiaioso dell'alta pianura per centinaia di metri, sono costrette a riemergere: centinaia di sorgenti, polle, rigagnoli, prati umidi, torbiere, paludi, canneti, macchie silvestri. Il fenomeno assume dimensioni e caratteristiche molto interessanti in alcune zone della linea tra Polcenigo, Sacile e Fontanafredda, e tra Porcia, Pordenone, Cordenons e Zoppola: comuni, questi, ormai coinvolti nella realizzazione del Parco fluviale del Livenza (comprendente il già esistente Parco regionale di Villa Varda, in comune di Brugnera) e del Parco fluviale del Cellina-Meduna-Noncello (comprendenti anzitutto la zona delle

risorgive, caratterizzata da una grande ricchezza in ittio-avi-fauna e da notevoli avanzi dell'antica foresta planiziale). La presentazione del contesto geografico si conclude con la bassa pianura sabbioso-argillosa, dove il problema è sempre stato semmai l'eccesso d'acqua con le sue periodiche inondazioni (Fig. 3); dove comunque la terra è molto fertile e l'agricoltura, assai progredita, riesce a coesistere abbastanza armonicamente con i segni evidenti dell'industrializzazione diffusa.



Figura 3: Veduta aerea dell'inondazione di Pordenone nel 2002 – Fonte: elaborazione personale su immagine della Protezione Civile FVG.

Sul piano antropico la zona fu intensamente abitata, come detto, fin dalla preistoria, in quanto proprio la ricchezza d'acqua (e quindi di materie prime, di forza motrice e di traffici fluviali) ha consentito, nel corso del XIX secolo, l'avvio della rivoluzione industriale.

È zona disseminata di paesi: con un fitto reticolo di strade insistenti sulle tracce dell'antica "centuriazione" attuata dai coloni della romana Concordia nel I secolo a.C.; con frequenti relitti dell'antica foresta e interessanti fenomeni geomorfologici di bassura, come il Palù di Barco, situato tra i comuni di Pravisdomini, Azzano e Pasiano, luogo di osservazioni ed escursioni naturalistiche.

4. CASO APPLICATIVO, DALL'ANALISI STORICA ALLA SIMULAZIONE

La parte applicativa di questa ricerca si divide sostanzialmente in due fasi: la prima concerne l'osservazione delle transizioni di copertura del suolo che modellano il paesaggio, con particolare riguardo per l'espansione del tessuto urbano e di quei fenomeni che con essa interagiscono più direttamente; la seconda, invece, concerne la previsione dello suo sviluppo futuro, ovvero la simulazione di scenari futuribili; l'investigazione è stata condotta soprattutto in direzione dell'osservazione del *trend* di crescita assunto dal fenomeno di espansione urbana, che alterna fasi a prevalenza di *sprawl* a fasi di crescita organica, e dei metodi analitici atti a descriverlo. La base di dati utilizzata è stata ottenuta mediante l'analisi di immagini telerilevate dal 1985 al 2005; queste sono state elaborate con l'impiego di innovative tecniche di interpretazione e classificazione basate su una metodologia chiamata *Machine Learning*; per analizzare un intervallo temporale più ampio si è reso necessario l'impiego di modelli di simulazione automatica; obiettivo finale è elaborare delle previsioni di transizioni di copertura del suolo, che mostrano i possibili scenari futuri sino al 2050.

4.1 Analisi storica dei cambiamenti di uso del suolo: dati e strumenti utilizzati

Il presente lavoro è volto al controllo dell'evoluzione urbana nei Comuni di Pordenone, Cordenons, Porcia, Roveredo in Piano, San Quirino e Fontanafredda. Tale evoluzione è stata delineata mediante l'acquisizione e l'elaborazione di alcune immagini satellitari a media risoluzione spaziale del territorio oggetto di esame, riprese in periodi diversi (dal 1985 al 2005). L'area, come detto, è situata nella pianura occidentale compresa tra i fiumi Meduna e Livenza. Di quest'area sono state selezionate e pre-elaborate quattro immagini

satellitari per il periodo su indicato, riprese dai sensori TM di Landsat 5, ETM+ di Landsat 7 e ASTER di Terra. Le quattro immagini sono state poi classificate in una serie di classi di copertura del suolo (edificato, suolo nudo, prati, cespugli, boschi, strade, ecc.). Infine, attraverso una procedura automatica di controllo delle differenze, sono state poste in luce le principali variazioni nelle classi durante il periodo considerato³⁰. Le classificazioni realizzate sulle scene satellitari hanno visto l'impiego di tecniche innovative del tipo *Machine Learning* (ML). Le tecnologie di tipo ML sono particolarmente indicate per risolvere i problemi di classificazione. Recenti ed innovativi sistemi d'estrazione di tematismi da scene telerilevate in ambiente GIS sono stati infatti sviluppati sulla base di tali tecnologie, implementati da algoritmi che funzionano in modo gerarchico e imparano da un insieme di regole ed esempi stabiliti dall'analista (ANN - *Artificial Neural Network*). I risultati delle analisi realizzate per i due periodi hanno prodotto una serie di 4 carte tematiche, relative alla copertura del suolo nei periodi considerati. Inoltre è stata prodotta una seconda serie di carte tematiche con l'indicazione della localizzazione dei 2 principali fenomeni osservati, ovvero la perdita di vegetazione e l'aumento della superficie costruita, nei tre intervalli temporali individuati dalle 4 immagini satellitari (6 carte; 3 per ognuno dei due fenomeni indagati, relative ai periodi: 1985-1992; 1992-2001; 2001-2005, vedi paragrafo 4.2).

4.1.1 Base di dati e cartografia di riferimento

Nella presente studio sono state utilizzate immagini satellitari, integrate dall'ausilio di dati cartografici relativi alla copertura del suolo (Corine, Landcover 2000), della Carta Regionale Numerica CRN della regione Friuli Venezia Giulia (scala 1:25.000), di

³⁰ Tale lavoro è stato sviluppato come parte di un progetto di ricerca in convenzione con il Comune di Pordenone coordinato dal Prof. Andrea Favretto nel 2007.

campionamenti fatti sul luogo e di una ortofotocarta (volo del 2003). La serie storica delle immagini satellitari prende in considerazione il periodo dal 1985 al 2005; dato il trascorrere del tempo, si può facilmente intuire come i sensori che hanno fornito le immagini siano diversi (Landsat TM, Landsat ETM+, ASTER). Ciò rende dunque molteplici le problematiche relative alla comparazione di dati a risoluzione geometrica e radiometrica differente. L'area oggetto di studio è compresa sostanzialmente fra i punti riportati nella Tab. 1, e sono evidenziati dal quadrilatero giallo nella Fig. 4 (che riporta una visualizzazione a falsi colori dell'immagine del sensore ASTER ripresa nel 2005). L'area interessata ricade nei Comuni di: Fontanafredda, Roveredo in Piano, San Quirino, Porcia, Pordenone, Cordenons.

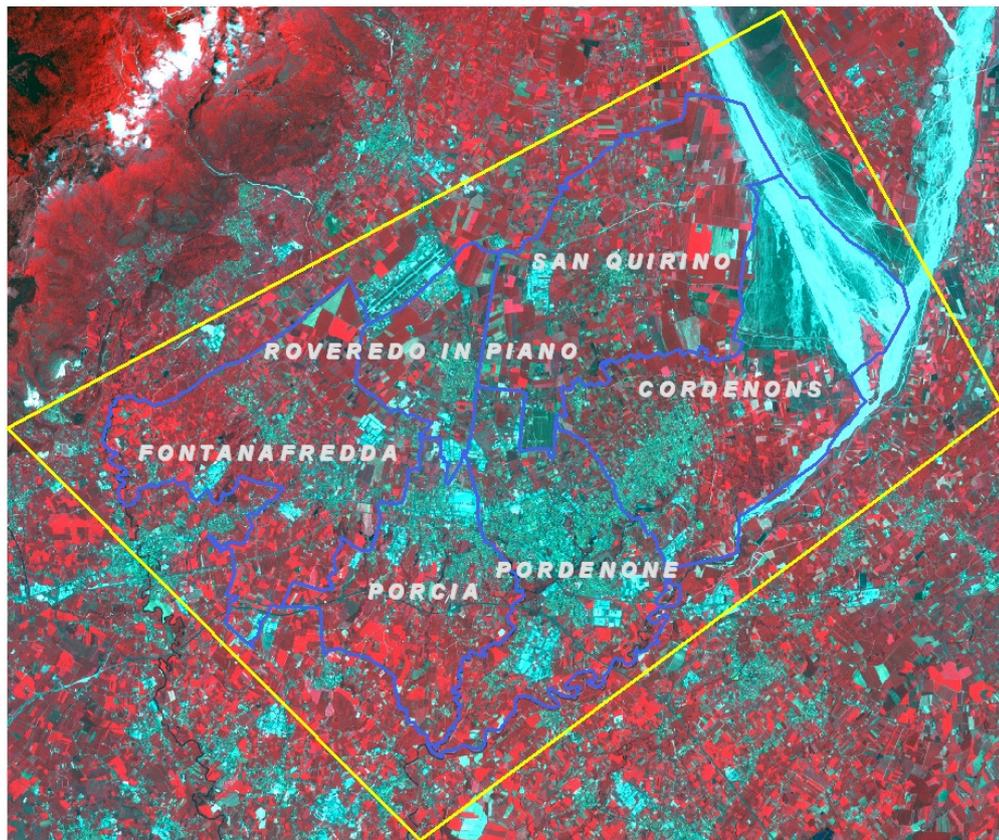


Figura 4: l'area oggetto di studio nell'immagine a falsi colori ripresa dal sensore ASTER il 29/07/05.

ID	LAT.	LONG.
a	46° 06' 40" N	12° 44' 40" E
b	46° 00' 06" N	12° 49' 50" E
c	45° 52' 43" N	12° 36' 33" E
d	45° 59' 16" N	12° 26' 32" E

Tabella 1. Coordinate geografiche relativa all'area oggetto di studio di cui a Fig. 1.

4.1.2 Ricerca, selezione ed acquisizione del formato delle immagini satellitari grezze sulle quali verrà fatto lo studio

Tale attività comprende la scelta del sensore prescelto in base alla risoluzione spaziale e spettrale delle immagini; la ricerca delle immagini satellitari dal fornitore americano o dal distributore europeo; la selezione delle immagini disponibili, in base a criteri quali l'assenza di nubi, la stagione voluta, la nitidezza dell'immagine, ecc.; l'acquisizione del formato grezzo del dato in formato digitale. La scelta delle immagini satellitari è stata condizionata da due fattori principali. Per prima cosa dall'assenza di nuvole e dalla visibilità (al fine di ridurre al minimo distorsioni ed errori dovuti a fenomeni di diffusione della luce). In secondo luogo si è cercato, per quanto possibile, di acquisire immagini relative al periodo tra fine luglio ed inizio settembre; il mese di agosto, nella fattispecie, è un periodo nel quale la raccolta della maggior parte delle colture agricole è quasi al termine e dunque la loro attività fotosintetica è relativamente bassa; al contrario, la vegetazione arborea è ancora attiva, sia quella stagionale, come la vegetazione ripariale, sia quella delle aree boschive caratterizzate dalla presenza di conifere. Queste caratteristiche permettono di facilitare la distinzione tra tali differenti coperture vegetali, grazie alla loro diversa risposta spettrale; il tentativo di collezionare una serie temporale di immagini che risalgono (con

buona approssimazione) allo stesso periodo dell'anno è definito in letteratura *anniversary images acquisition* (Longley 2001).

Le immagini selezionate e successivamente utilizzate sono:

- Immagine del sensore ASTER (satellite Terra), del 29/07/05. La risoluzione spaziale del sensore ASTER è di 15 metri (1 *pixel* dell'immagine = una cella di 15x15 metri sul terreno), nelle bande del visibile (verde e rosso) e del vicino infrarosso.
- Immagine del sensore ETM+ (satellite Landsat 7) del 03/08/2001. La risoluzione spaziale del sensore ETM+ è di 30 metri (1 *pixel* dell'immagine = una cella di 30x30 metri sul terreno), nelle bande del visibile (verde e rosso), vicino infrarosso e medio infrarosso.
- Immagine del sensore TM (satellite Landsat 5) del 18/08/1992. La risoluzione spaziale del sensore TM è di 30 metri (1 *pixel* dell'immagine = una cella di 30x30 metri sul terreno), nelle bande del visibile (verde e rosso), vicino infrarosso e medio infrarosso.
- Immagine del sensore TM (satellite Landsat 5) del 18/10/1985. La risoluzione spaziale del sensore TM è di 30 metri (1 *pixel* dell'immagine = una cella di 30x30 metri sul terreno), nelle bande del visibile (verde e rosso), vicino infrarosso e medio infrarosso.

4.1.3 Pre-elaborazione dei dati: importazione dei formati grezzi, ritaglio preliminare delle zone allo studio, georeferenziazione e correzione delle scene, co-registrazione delle stesse

Si sono importati i dati grezzi relativi alle varie bande dei sensori, e quelle utili sono state compresse in un unico strato (*layer*), cosiddetto composito. Prima dell'analisi vera e propria, le immagini composite devono essere pre-elaborate; ovvero sono necessarie alcune operazioni che le rendano il più omogenee possibile al fine di facilitare il lavoro di confronto e classificazione. A tal proposito l'immagine deve essere inizialmente ritagliata per isolare dalla scena generale l'area oggetto di studio. Il risultato deve essere georiferito in un sistema di coordinate, identificando a tal fine dei punti di controllo comuni (*Ground Control Point – GCP*) e rettificando la posizione di tutti i *pixel* delle immagini in base ad un'equazione polinomiale di primo grado o superiore (Lillesand e Kiefer 1987). Nel caso si lavori con immagini di sensori diversi, oltre a georiferire tutte le immagini nello stesso sistema di coordinate, si dovrà provvedere a trasformare la griglia delle immagini a risoluzione spaziale minore in modo da renderle omogenee con quelle a risoluzione spaziale maggiore (nella fattispecie, da 30 metri a 15 metri). Le correzioni geometriche sono necessarie quando si vogliono effettuare analisi spaziali tipiche in ambiente GIS in quanto servono per eliminare eventuali deformazioni introdotte dal sistema satellitare. Le distorsioni geometriche presenti nelle immagini grezze sono attribuibili a variazioni di altitudine e velocità del satellite che, modificando il campo visivo istantaneo di ripresa (IFOV³¹), modificano conseguentemente la geometria dell'immagine in corso di acquisizione. L'immagine acquisita del sensore ASTER del 2005 (29/07/05), è un'immagine ortorettificata dai gestori del sensore, con sistema di coordinate WGS84 UTM33, che è stata trasformata nel sistema di coordinate nazionale (Roma40, Gauss-Boaga) e, data la precisione della georeferenziazione garantita dal procedimento di ortorettificazione, è stata utilizzata come base di riferimento sulla quale effettuare le correzioni geometriche delle altre immagini; il processo di orto rettifica è necessario quando si vogliono produrre carte geometricamente corrette impiegando come sorgente

³¹ *Istantaneous Field of View*

d'informazione foto aeree o satellitari. Questo tipo di correzione è particolarmente necessario quando si è in presenza di un rilievo collinare o montuoso (quindi non nel nostro caso, anche se un'immagine ortorettificata è sempre meglio di una che non è stata geometricamente corretta). La deformazione conica creata dall'obiettivo della camera in fase di acquisizione è molto più importante nel caso di foto aeree a bassa quota, mentre diventa man mano meno importante quanto più ci si sposta a quote elevate. Nel caso di immagini satellitari la deformazione conica risulta attenuata mentre una maggiore influenza sulla deformazione geometrica è data dalla presenza di forme di rilievo.

Le immagini TM ed ETM+, precedenti il 2005, sono state in primo luogo³² georiferite con metodo polinomiale e poi sottoposte ad un ritaglio spaziale e spettrale, al fine di ottenere una base dati omogenea, con risoluzione spaziale a 15 metri (la stessa dell'immagine ASTER) ed una risoluzione spettrale di 6 bande, escludendo la banda termica dei sensori TM ed ETM+; l'immagine ASTER è stata sottoposta ad una riduzione spettrale da 14 a 9 bande, escludendo anche in questo caso le bande termiche. La georeferenziazione delle immagini TM ed ETM+ è stata effettuata, in via preliminare, con algoritmo *nearest neighbour*, al fine di mantenere invariati i valori dei *pixel*. Il risultato delle operazioni è stato successivamente perfezionato attraverso l'utilizzo del pacchetto *Autosync* di Erdas Imagine, *software* in grado di operare orto-rettificazioni di grande precisione. *Autosync* genera automaticamente e con elevata accuratezza un grande numero di cosiddetti *tie points*³³, ovvero punti di collegamento fra le immagini. Il metodo utilizzato dal *software* può essere impiegato per migliorare la co-registrazione di immagini già geo-riferite. Il perfezionamento della co-registrazione delle immagini con *Autosync* ha sostituito l'orto-rettificazione delle immagini TM ed ETM+, in quanto l'area in esame è in larga parte

³² La prima vera e propria operazione è stato in realtà un ritaglio grossolano della superficie delle immagini al fine di poter operare con file di ridotte dimensioni per poter beneficiare di una maggiore velocità di computazione per le operazioni successive.

³³ Punti simili a GCP che vengono processati ed utilizzati da *Autosync* per la co-registrazione.

pianeggiante; dunque è stato sufficiente calibrare il modello con una costante di elevazione pari a 2 metri anziché utilizzare un modello digitale del terreno. Il *software*, per poter calibrare il modello di co-registrazione, oltre ad una risoluzione spaziale omogenea per tutte le immagini, richiede vengano immessi il tipo di sensore di ciascuna immagine e la porzione dello spettro³⁴ che si intende utilizzare come base per la co-registrazione. La scelta è stata rappresentata dal vicino infrarosso, porzione dello spettro ove la banda 4 di Landsat (TM ed ETM+) e la banda 3 di ASTER hanno una buona sovrapposizione (Landsat NIR 0.76-0.90 μm ; ASTER NIR 0.78-0.86 μm – cfr. Fig. 5).

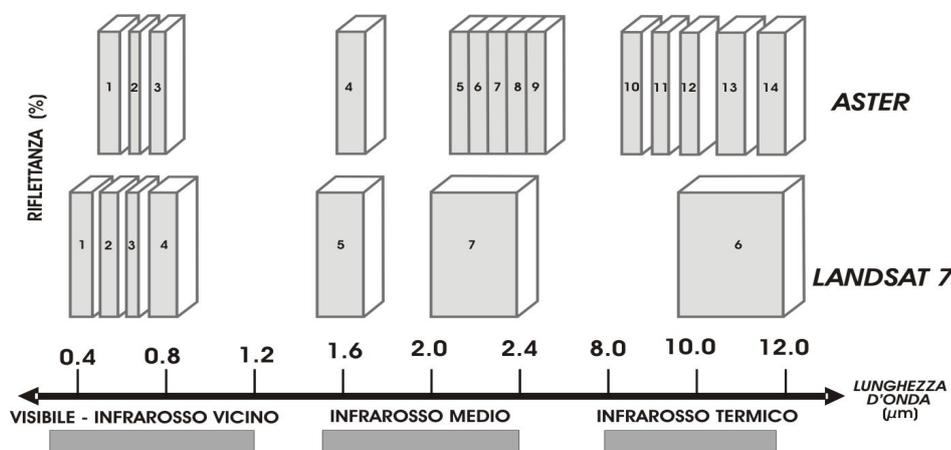


Figura 5. Confronto fra le caratteristiche spettrali dei sensori ASTER e ETM+.

Ai risultati delle elaborazioni descritte in precedenza è stato sovrapposto un *layer* in formato vettoriale (Fig. 6 a sinistra), riportante i limiti dei comuni interessati, al fine di poter effettuare un'ulteriore riduzione dell'area di lavoro. Attorno ai limiti dei sei comuni è stato tracciato un quadrilatero che è servito (dopo essere stato trasformato in formato *raster*³⁵), come maschera per poter ritagliare le immagini satellitari co-registrate, ottenendo in tal modo una serie di immagini dalla medesima risoluzione geometrica e copertura areale, che compongono la base di dati (Fig. 6, a destra).

³⁴ Si deve specificare quale coppia di bande si vuole utilizzare per prendere i *tie points*; in generale, più la porzione di spettro coperta dalle bande scelte è simile, maggiormente sarà precisa la sincronizzazione degli risultati.

³⁵ In computer-grafica il termine *raster* indica un'immagine la cui struttura dati è rappresentata mediante una griglia rettangolare di *pixel*, ognuno dei quali avrà uno specifico valore.

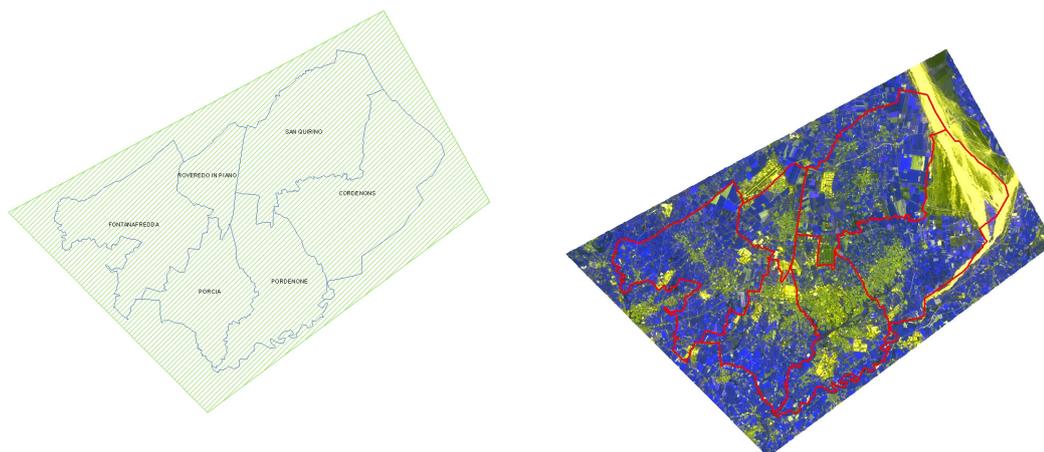


Figura 6: Sulla sinistra il *Layer* vettoriale riportante i comuni interessati dallo studio. Sulla destra il risultato della procedura di mascheramento con l'area di interesse per l'immagine ASTER del 2005.

4.1.4 Classificazione delle immagini telerilevate: comparazione dei metodi e scelta delle classi

Le immagini raccolte, dopo esser state rese omogenee (cfr. i paragrafi precedenti), sono state classificate. La scelta del metodo di classificazione più opportuno è stata fatta tramite il confronto della stima di accuratezza globale dei singoli metodi di classificazione operati su una medesima immagine (si è scelta, a tal riguardo, l'immagine del sensore ETM+ - satellite Landsat 7, del 03/08/2001). Classificare un'immagine satellitare significa applicare ad essa una procedura automatica che suddivide in categorie omogenee i *pixel* dell'immagine, in modo da definire la copertura del suolo o la distribuzione spaziale di un singolo fenomeno rilevato dal sensore. Il metodo di classificazione prescelto dipende dal modo di considerare il *pixel* che compone l'immagine. Se si considera il *pixel* un elemento isolato ed omogeneo, la classificazione è realizzata esclusivamente sulla base delle caratteristiche spettrali del *pixel*, ed è denominata "classificazione per *pixel*". Le tecniche tradizionali di classificazione per *pixel* si suddividono in due categorie: *unsupervised*

ovvero senza controlli da parte dell'analista, e *supervised* che prevede il controllo da parte dell'analista.

Nel presente lavoro, si sono impiegati i due metodi di classificazione sopra citati ed i loro risultati sono stati confrontati con quelli derivati da un altro, innovativo metodo di classificazione, che impiega degli algoritmi di tipo *machine learning*; in questo caso ogni singolo *pixel* viene classificato non solo in base alle sue caratteristiche spettrali ma anche considerando il suo contesto di relazione posizionale con gli altri *pixel*. Come detto, si è scelto di utilizzare come base per il confronto dell'accuratezza delle classificazioni l'immagine del satellite Landsat 7 del 2001 e l'immagine è stata classificata con i tre metodi differenti: per *pixel supervised*, per *pixel unsupervised* e *machine learning*.

Per procedere alla classificazione, è stato in primo luogo necessario individuare la tipologia delle classi più utili per l'osservazione di alcuni fenomeni di rilevante interesse, come la copertura di vegetazione alta e la copertura del tessuto urbano. Si è optato per una tematizzazione in sette classi, scelta operata da una riduzione in 7 classi della nomenclatura della classificazione Corine Land Cover (CLC) 2000. In Tabella. 2 viene riportata la Classe di riferimento di CLC, la relativa descrizione della sottoclasse e la ricodifica operata nelle 7 classi; mentre in Tabella 3 viene invece riportata legenda dei tematismi attribuiti a ciascuna delle 7 classi.

<i>Classe Corine Land Cover</i>	<i>Descrizione Sottoclasse</i>	<i>Destinazione</i>
1. Superfici artificiali	1.1 Zone urbanizzate di tipo residenziale	Classe 7
	1.2 Zone commerciali, industriali ed infrastrutturali	Classe 6
	1.3 Zone estrattive, cantieri, discariche e terreni artefatti ed abbandonati	Classe 6
	1.4 Zone verdi artificiali non agricole	Classe 3
2. Superfici agricole utilizzate	2.1 Seminativi	Classe 4
	2.2 Colture permanenti	Classe 4
	2.3 Prati stabili, foraggiere permanenti	Classe 4
	2.4 Zone agricole eterogenee	Classe 4
3. Territori boscati ed ambienti seminaturali	3.1 Zone boscate	Classe 2
	3.2 Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea	Classe 3
	3.3 Zone aperte con vegetazione rada o assente	Classe 5
4. Zone umide	4.1 Zone umide interne	Classe 2
	4.2 Zone umide marittime	n/d
5. Corpi idrici	5.1 Acque continentali	Classe 1
	5.2 Acque marittime	n/d

Tabella 2: Legenda della riduzione delle classi dallo schema Corine Land Cover 2000 alle 7 classi adottate.

<i>Nome</i>	<i>Colore</i>	<i>Descrizione</i>
Classe 1		Acqua
Classe 2		Vegetazione alta/alberi ripariali
Classe 3		Vegetazione arbustizia/magredi fluviali
Classe 4		Coltivi
Classe 5		Suolo nudo/ghiaioni/cave
Classe 6		Suburbano/strade
Classe 7		Urbano

Tabella 3: legenda dei tematismi attribuiti a ciascuna delle 7 classi.

4.1.5 Classificazione Unsupervised

Questa tecnica di classificazione può risultare appropriata come analisi esplorativa, in quanto permette di valutare quante classi possono essere evidenziate e quale separabilità spettrale sussista fra le stesse. Essa è particolarmente utile ogni qualvolta non si abbiano soddisfacenti informazioni inerenti la copertura del suolo dell'immagine da classificare. Tale metodologia prescinde dalla conoscenza e designazione di aree campione (*training area*) al suolo. Dopo aver sottoposto l'immagine a classificazione *unsupervised*, si ottiene un'immagine tematizzata in un numero di classi deciso dall'utente; successivamente lo stesso utente dovrà decidere la destinazione di ciascuna classe ad ogni tematismo. Invero, questo tipo di procedura è stata più volte utilizzata in via esplorativa antecedentemente alla vera e propria classificazione, al fine di operare una pertinente riduzione delle classi CLC 2000 ed una corretta scelta delle classi da utilizzare. Una volta stabilito il numero delle classi utili (ovvero le 7 classi descritte in Tab. 3), la procedura di classificazione non supervisionata è stata effettuata sull'immagine. L'algoritmo utilizzato per la classificazione *unsupervised* è ISODATA (*Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique*). Si è potuto così ottenere un'immagine tematizzata in sette classi.

La fase successiva alla procedura di classificazione *unsupervised* è stata la stima dell'accuratezza dell'immagine tematizzata, attraverso la costruzione di un *accuracy assessment*; tale procedura permette di verificare e quantificare l'effettiva coerenza del tematismo con la realtà sul territorio. In questa fase si confrontano i valori di alcuni *pixel* dell'immagine classificata con valori dei medesimi provenienti da altre fonti, da campionamenti in loco, da immagini con più alta risoluzione spaziale, ecc. Maggiore sarà il numero di punti utilizzati per la stima dell'accuratezza, maggiore sarà la precisione della procedura. A partire da un elevato numero di punti di controllo si è creata una matrice di

confusione (*error matrix*), con i valori dell'immagine classificata ed i valori dei medesimi punti, presi tramite analisi visiva, relativi ad una ortofoto carta del 2003 (*reference map*). Nel caso specifico, la stima dell'accuratezza della classificazione di tipo non supervisionato dell'immagine Landsat 7 del 2001 è stata effettuata utilizzando un'immagine composita come *reference map*. Questa è stata ottenuta mediante un mosaico di una ortofoto, carta del 2003 (che non copre totalmente l'area oggetto di studio), insieme con la stessa immagine Landsat 7 che ha prodotto la classificazione, in modo da avere così coperto l'intero territorio classificato con una *reference map*. Un altro indicatore utile per la stima dell'accuratezza della procedura impiegata è il coefficiente Kappa, denominato *Kappa Statistics Index*. Il valore del coefficiente Kappa può oscillare tra i valori 0 e 1; valori bassi indicano una rispondenza nulla fra i dati sicuri e quelli classificati, al contrario valori alti descrivono una corrispondenza buona fra i dati sicuri e quelli classificati. Generalmente si considerano valori superiori o pari a 0.75 da eccellenti a buoni, mentre risultati minori o pari a 0.4 vengono considerati scarsi. Il *Kappa Index* è sovente usato per confrontare i risultati di classificazioni esperite con algoritmi e metodologie differenti; per un confronto affidabile è tuttavia opportuno comparare classificazioni con classi omogenee, come nel nostro caso. I risultati della procedura di controllo della classificazione si possono vedere in Tab. 4, ove risulta che l'accuratezza totale della classificazione *unsupervised* è stata del 60%, mentre il valore dell'indice Kappa è risultato essere 0.5277.

Reference map	Image	Classification	Overall Classification Accuracy	Kappa Index
Ortofoto 2003 + Landsat 2002	Landsat 7 2001	unsupervised ISODATA	60.00%	0.5277

Tabella 4: Accuracy assessment per la classificazione *unsupervised* dell'immagine Landsat 7 del 2001.

4.1.6 Classificazione Supervised

Il secondo metodo di classificazione applicato è stata la classificazione supervisionata. Tale metodo risulta utile ogni qual volta si abbiano soddisfacenti informazioni inerenti la copertura del suolo dell'immagine da classificare. L'analista, in una prima fase identifica, spazialmente, l'immagine telerilevata, delle aree campione (*aree training*), costituite da *pixel* che rappresentano la stessa copertura del suolo. Tali *training aree* (il più possibile omogenee e rappresentative di tutte le classi di copertura), verranno impiegate dall'algoritmo di classificazione come modello spettrale per classi corrispondenti a coperture del suolo omogenee. Successivamente, nella fase di classificazione in senso stretto, l'algoritmo di classificazione scelto viene applicato a tutti i *pixel* dell'immagine. La procedura *supervised* implica che è compito dell'analista definire a priori le categorie informative, o classi, delle quali in un secondo momento verrà verificata la separabilità spaziale.

Il risultato restituito dalla classificazione è una cartografia tematica discreta, dove le classi informative sono rappresentate ognuna da un tematismo. Nel caso specifico, l'algoritmo utilizzato per la classificazione *supervised* è stato il *Maximum Likelihood*, ovvero l'algoritmo di massima verosimiglianza; tale procedura di classificazione statistica permette di assegnare un *pixel* ad una determinata classe in base ad un certo valore di possibile appartenenza alla medesima classe in base alle sue caratteristiche spettrali. L'immagine sottoposta a classificazione supervisionata è la medesima impiegata nella procedura *unsupervised*, ovvero l'immagine Landsat 7 del 2001. Si è così ottenuta una carta tematica con 7 classi di discrezione. Come per i risultati della classificazione *unsupervised*, anche i risultati della classificazione supervisionata sono stati sottoposti ad una procedura di stima dell'accuratezza. Per questa procedura sono stati utilizzati la

metodologia precedentemente descritta e gli stessi strumenti di supporto. I risultati della procedura di controllo della classificazione si possono vedere in Tab.5, dove risulta che l'accuratezza totale della classificazione *unsupervised* è stata del 63.33%, mentre il valore dell'indice Kappa è risultato essere 0.5706.

Reference map	Image	Classification	Overall Classification Accuracy	Kappa Index
Ortofoto 2003 + Landsat 2002	Landsat 2001	supervised Maximum Likelihood	63.33%	0.5706

Tabella 5: Accuracy assessment per la classificazione supervised dell'immagine Landsat 7 del 2001.

4.1.7 Classificazione Machine Learning

L'ultimo metodo di classificazione ha utilizzato la metodologia di classificazione *Machine Learning* (ML), detta anche automatica o con rinforzo. Tale metodologia si basa su di una filosofia di programmazione che punta a realizzare algoritmi in grado di apprendere e adattarsi alle mutazioni dell'ambiente (R O. Duda, P. E. Hart, D. G. Stork, 2001) (Favretto 2006). Questa tecnica di programmazione è fondata sul presupposto di poter ricevere degli stimoli dall'esterno, conseguentemente ai risultati parziali forniti dall'algoritmo. Quindi una scelta corretta comporterà un premio, mentre una scelta non corretta porterà ad una penalizzazione del sistema. Mediante l'utilizzo di procedure *Machine Learning* la macchina, o per maggior correttezza l'algoritmo, impara ogni volta che, sottoposta a stimoli esterni, cambia la sua struttura, un suo programma o i suoi dati, in modo da migliorare potenzialmente le sue prestazioni future. Le tecnologie di tipo ML sono particolarmente indicate per risolvere problemi di classificazione. Tali sistemi

implementano l'informazione intrinseca della scena, in un processo a fasi nel quale l'obiettivo finale viene raggiunto attraverso successivi affinamenti della classificazione. Ogni affinamento dell'*output* è conseguente ad un'implementazione nell'addestramento della procedura, che impara le sue successive azioni da stimoli esterni messi in opera dall'analista. Gli algoritmi utilizzati in tali procedure funzionano spesso in modo gerarchico; partono da istruzioni preliminari ed esempi (*training set*, *training area* formati da *pixel* omogenei) da cui "imparano", e pertanto si modificano per poter istruire tutti gli altri *pixel* dell'immagine. Tali procedure possono essere molto dispendiose in termini di tempo e risorse ed inoltre producono un'ingente quantità di dati, dei quali solo il risultato finale è utile, insieme al metodo registrato per giungere ad esso; ma portano generalmente a risultati sensibilmente migliori rispetto alle altre metodologie di classificazione sin qui descritte.

Nel presente lavoro, la procedura *Machine Learning* è stata applicata all'Immagine Landsat 7 del 2001; sulla cartografia tematica ottenuta è stata successivamente replicata la metodologia di *accuracy assessment*, effettuata anche per i risultati delle classificazioni *supervised* e *unsupervised*. I risultati della procedura di controllo della classificazione sono riportati in Tabella 6, ove risulta che l'accuratezza totale della classificazione ML è stata del 76.67%, mentre il valore dell'indice Kappa è risultato essere 0.7246.

Reference map	Image	Classification	Overall Classification Accuracy	Kappa Index
Ortofoto 2003 + Landsat 2002	Landsat 2001	Machine Learning	76.67%	0.7246

Tabella 6: Accuracy assessment per la classificazione Machine Learning dell'immagine Landsat 7 del 2001.

4.1.8 Confronto dei risultati delle 3 classificazioni

I valori degli *accuracy assessment* sono, come già detto, molto utili per valutare l'effettiva bontà ed accuratezza dell'immagine classificata e poterne così dare un valore quantitativo. Il valore di accuratezza più elevato, fra i tre metodi di classificazione esperiti per la medesima immagine, è indubbiamente quello relativo al metodo di classificazione *Machine Learning*, che si è rivelato particolarmente efficace per il territorio esaminato. Le stime dell'accuratezza rivelano che i risultati della classificazione ML sono stati, in questo caso, di gran lunga superiori (di quasi il 20%) a quelli relativi ai metodi *supervised* e *unsupervised* ed offrono un *range* di precisione caratterizzato da una forchetta molto piccola e valori elevati (74 % – 76.67 %). I risultati della classificazione ML sono visibili anche ad occhio nudo, perché la separazione degli oggetti, rappresentata nelle varie classi, è più definita (Fig. 7).

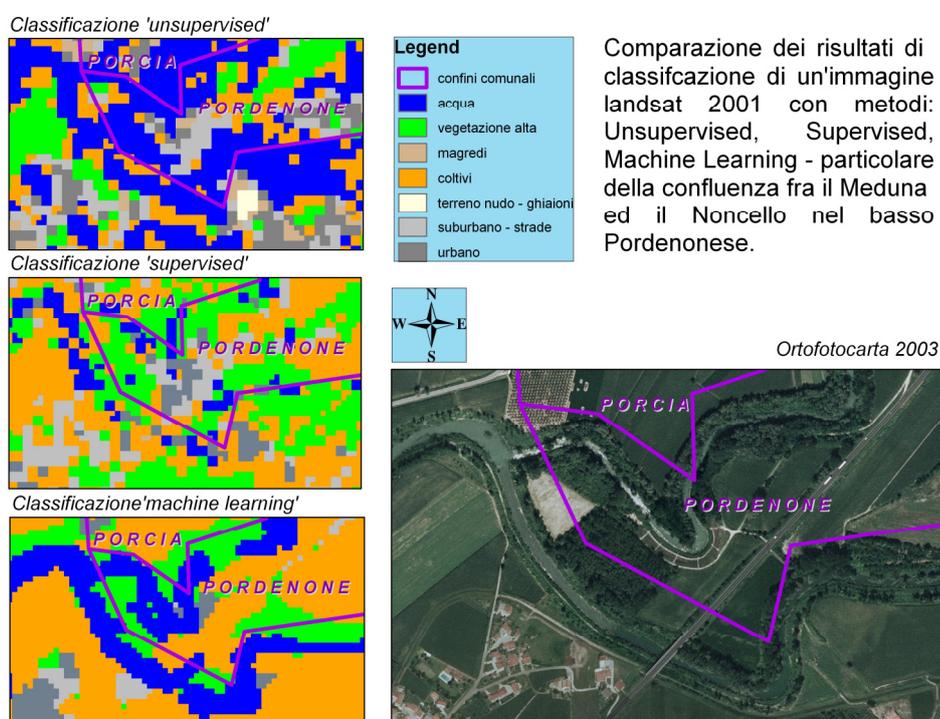


Figura 7: Dettaglio significativo delle tre classificazioni dell'immagine Landsat 7 del 2001, accompagnate dalla Ortofotocarta del 2003 usata come immagine di confronto per il calcolo dell'*accuracy assessment*.

4.1.9 Classificazione delle immagini telerilevate: impiego della metodologia *Machine Learning* per la classificazione delle immagini della serie storica.

L'estrazione delle informazioni territoriali è generalmente un procedimento che richiede una fase di elaborazione intensa sulle immagini telerilevate. La metodologia *Machine Learning* è, come descritto in precedenza, quella che ha permesso di ottenere, in termini di accuratezza, i risultati migliori; dunque tale metodologia è stata impiegata anche per l'estrazione dei 7 tematismi (Tab. 3), adottati in questo studio, dalle immagini che compongono la serie storica, ovvero:

- ASTER del 29/07/05
- Landsat ETM+ del 3/08/01
- Landsat TM del 18/08/92
- Landsat TM del 18/10/85

Dopo aver trattato le 4 immagini telerilevate con la metodologia descritta sopra, si sono ottenute 4 immagini classificate, che adottano i 7 tematismi elencati in precedenza; per ognuna delle immagini classificate sono stati calcolati l'accuratezza globale ed il valore del coefficiente *Kappa*. Per le immagini che compongono la serie storica, l'immagine di riferimento utilizzata nell'*accuracy assessment* è stata, per ognuna, l'immagine stessa. Non si è usata l'ortofoto in quanto troppo distante temporalmente dalla data di ripresa delle altre immagini, inoltre si è fatta attenzione a non sovrapporre le *aree training* utilizzate per la classificazione ai punti di controllo utilizzati per la stima dell'accuratezza, al fine di non distorcere i risultati. I risultati delle procedure di controllo delle classificazioni sono riportati nelle Tabelle 7, 8, 9.

Reference map	Image	Classification	Overall Classification Accuracy	Kappa Index
Aster 2005	Aster 2005	Machine Learning	78.00%	0.7408

Tabella 7: Accuracy assessment della classificazione *Machine Learning* dell'immagine ASTER del 2005.

Reference map	Image	Classification	Overall Classification Accuracy	Kappa Index
Landsat 1992	Landsat 1992	Machine Learning	78.57%	0.7500

Tabella 8: Accuracy assessment della classificazione *Machine Learning* dell'immagine Landsat del 1992.

Reference map	Image	Classification	Overall Classification Accuracy	Kappa Index
Landsat 1985	Landsat 1985	Machine Learning	77.14%	0.7284

Tabella 9: Accuracy assessment della classificazione *Machine Learning* dell'immagine Landsat del 1985.

4.2 Analisi ed interpretazione dei risultati ottenuti mediante l'analisi storica.

Le quattro carte tematiche, relative alla copertura del suolo nei tre anni allo studio, sono state analizzate ed elaborate, in modo da estrarre da ognuna di esse la quantità di ettari relativa ad ogni classe nei quattro momenti diversi ed anche di interpretare le modificazioni avvenute a livello di copertura del suolo, ovvero di quantificare le transizioni da un tipo di

classe ad un'altra sia sotto l'aspetto quantitativo sia qualitativo. Ciò è stato possibile attraverso delle tecniche di interpretazione che vanno sotto il nome di *Change Detection*, che saranno sinteticamente illustrate nel paragrafo successivo.

4.2.1 Analisi diacronica di controllo delle differenze - Change Detection

L'utilizzo di immagini satellitari a medio-alta risoluzione spaziale e dei tematismi derivati dalla loro classificazione si rivela particolarmente utile per l'analisi diacronica del territorio, più in particolare per l'analisi delle dinamiche di sviluppo e di trasformazione – sia di origine antropica che di origine naturale – del territorio stesso. L'utilizzo di dati telerilevati permette inoltre un aggiornamento continuo delle fonti cartografiche e statistico- bibliografiche ufficiali (Baiocchi, Lelo, 2003). L'utilizzo dell'analisi diacronica di controllo delle differenze assume un'importanza rilevante sia ai fini della valutazione quali-quantitativa della situazione di un territorio, sia come strumento di monitoraggio temporale e di pianificazione nel tempo. Il paesaggio è infatti costituito da un mosaico di differenti tipi di copertura del suolo, può dunque essere inteso come un insieme finito di *patch*, tessere, collegate tra loro, la cui disposizione spaziale risponde a motivi di natura ecologica, contestualizzabili all'interno di una struttura (*pattern*) spaziale (Smiraglia et al. 2002). Un'analisi multitemporale contribuisce dunque ad una visione olistica del territorio, fornendo strumenti ed elementi utili per una corretta lettura delle origini del paesaggio attuale e delle sue vicissitudini. Lo studio dei rapporti che l'uomo ha instaurato nel tempo con le risorse produttive naturali presenti in un dato territorio, permette di individuare quei fattori che mantengono un'influenza significativa e che costituiscono gli elementi determinanti di un paesaggio. Tutto questo permette di comprendere le dinamiche in atto in un dato territorio, consentendo interpretazioni utili alla pianificazione territoriale. Il

cambiamento delle attività antropiche genera infatti trasformazioni temporali nell'assetto di un territorio. L'analisi di controllo delle differenze, ovvero il confronto di immagini multi temporali è quindi, sinteticamente, il processo attraverso il quale vengono comparate informazioni di periodi diversi per determinare la localizzazione e la natura dei cambiamenti nel tempo (Carranza et al. 2002) (Favretto 2006), e, ove possibile, procedere con la lettura e l'interpretazione delle cause del fenomeno di transizione (Battisti, Favretto e Mauro 2002). Le differenti tecniche di *change detection* rientrano nel più vasto campo delle trasformazioni multispettrali delle immagini satellitari, nello specifico fra quelle inerenti due o più immagini della stessa area acquisite in periodi temporali differenti. In generale le trasformazioni di immagini da due o più fonti producono una nuova immagine che pone in evidenza particolari aspetti o proprietà, altrimenti non enfatizzabili, dalle due o più fonti, considerate singolarmente.

Un'accurata analisi multi temporale dei cambiamenti di copertura del suolo è estremamente importante in quanto permette di comprendere la natura qualitativa e quantitativa delle interazioni fra le attività umane e i fenomeni naturali; tale lettura è altresì funzionale ad una corretta ed efficace pianificazione territoriale; le informazioni che derivano da una corretta lettura dei fenomeni relativi all'interazione tra uomo e ambiente naturale permettono infatti di programmare l'utilizzo di strumenti e risorse. I dati tele- rilevati sono la principale fonte usata in maniera estensiva per l'analisi dei cambiamenti avvenuti negli ultimi decenni (D. Lu., P.Mauser, E. Brondizio e E.Moran 2004) e vi sono moltissime tecniche differenti per l'analisi dei cambiamenti, ognuna delle quali presenta punti di forza e di debolezza. La *change detection* è un processo mediante il quale si identificano e si osservano le differenze o i cambiamenti di stato di un oggetto o di un fenomeno nella sua evoluzione diacronica (Longley et al. 2001). Grazie all'importanza del monitoraggio della superficie terrestre, la ricerca sulle tecniche di *change detection* è un argomento più che mai attuale e nuove

tecniche vengono costantemente sviluppate, quali ad esempio *l'integration of multi-source data* (Petit e Lambin 2002). Come linea di principio generale un'adeguata tecnica di *change detection* dovrebbe fornire le seguenti informazioni:

- Area oggetto del cambiamento e tasso di cambiamento
- Distribuzione spaziale delle tipologie di cambiamento
- Trend delle transizioni delle classi di copertura del suolo
- Stima dell'accuratezza dei risultati della *change detection*

Qualora si debba effettuare un'analisi dei cambiamenti, l'accuratezza dei risultati ottenuti mediante *change detection* dipende da una molteplicità di fattori:

1. Una precisa sovrapposizione geometrica delle differenti immagini multi temporali
2. La calibrazione o normalizzazione tra queste immagini
3. La disponibilità di dati qualitativi rilevati in campo
4. La complessità del paesaggio nell'area di studio
5. L'adeguatezza dei metodi di *change detection* o degli algoritmi usati
6. L'adeguatezza e l'accuratezza delle procedure di classificazione
7. La familiarità e la conoscenza del territorio oggetto di studio
8. Le restrizioni date da tempo e costi

Data la complessità e l'influsso che la molteplicità dei fattori ha sulla scelta di una determinata tecnica di *change detection* da utilizzare, gli autori sono spesso giunti a conclusioni diverse, e qualche volta contraddittorie, su quale sia la più efficace metodologia di analisi dei cambiamenti da seguire. In pratica non è affatto facile stabilire quale sia il metodo di *change detection* adeguato per l'analisi dei cambiamenti di un dato fenomeno. L'obiettivo dell'applicazione della tecnica della *change detection* è di

comparare le rappresentazioni spaziali dei medesimi punti acquisite in due tempi differenti, attraverso il controllo di tutte le variazioni causate da differenze in variabili che non sono di interesse ed attraverso la misura dei cambiamenti causati invece da differenze nelle variabili oggetto di studio (Green et al. 1994); in altre parole isolare e quantificare i cambiamenti dovuti a fenomeni di interesse e eliminare invece i cambiamenti che sono dovuti a errori di varia natura. Di norma le tecniche di *change detection* vengono suddivise in due macrocategorie: *pre-classification comparison* e *post-classification comparison*, anche se la bibliografia più specifica tende a suddividerle in sei categorie: algebriche, di trasformazione, di classificazione, modelli avanzati, approcci GIS, analisi visiva. Le procedure che prevedono la comparazione delle fonti cartografiche prima della loro classificazione (*pre - classification comparison*), sono costituite da analisi simultanee di dati telerilevati multitemporali non classificati (*image-to-image*). L'analista deve conoscere a priori il criterio con cui interpretare e successivamente elaborare i differenti dati sorgente. Una tecnica di *change detection* appartenente alla categoria delle *pre-classification comparison* è la cosiddetta *image subtraction* (Jensen 1996) e si basa su operazioni aritmetiche di dati telerilevati. Immagini precedentemente coregistrate³⁶ vengono utilizzate sottraendo i valori di riflettanza dei pixel di una di esse ai valori di riflettanza dell'altra e, in via opzionale, aggiungendo un valore costante; il risultato sarà dato da un'immagine-differenza. In tale immagine i pixel – dunque le aree da questi identificate – dove non ci sarà stata differenza assumeranno un valore pari a 0 o a quello della costante, a significare che in tali aree non vi è stata alcun cambiamento nei valori di riflettanza delle due immagini e quindi nessun tipo di cambiamento di copertura del suolo. Le aree invece dove è avvenuto una qualche sorta di cambiamento assumeranno nell'immagine- differenza valori diversi da quello della costante

³⁶ La coregistrazione prevede che le immagini che compongono la serie storica abbiano le stesse distorsioni geometriche, cosicché da poter essere sovrapposte correttamente e dunque rendere efficace lo studio dei fenomeni di interesse.

$$(1). ER_{id} = ER_{(t1)} - ER_{(t0)} + K$$

dove la riflettanza di un determinato pixel dell'immagine differenza (ER_{id}) è dato dalla differenza aritmetica fra la riflettanza del pixel corrispondente nell'immagine posteriore ($ER_{(t1)}$) e quella del pixel corrispondente nell'immagine anteriore ($ER_{(t0)}$), più eventualmente un valore costante (K). Lo svantaggio di tale approccio risiede nella difficoltà di stabilire a priori un valore costante di riflettanza che funga da soglia del cambiamento, per porre in evidenza il cambiamento stesso.

Le procedure che ricadono nella definizione di *post-classification comparison* sono invece costituite da analisi comparative di classificazioni prodotte indipendentemente e ricavate da differenti dati telerilevati multitemporali (*map-to-map*), in quanto oggetto di questo tipo di analisi sono dati discreti; per esempio nel caso applicativo in questione, si sono prese in considerazione delle carte tematiche derivate da classificazione di immagini satellitari acquisite con sensori differenti. Uno degli svantaggi di tale approccio, però, risiede nel fatto che l'affidabilità delle osservazioni derivanti da tale analisi è strettamente collegata all'accuratezza con cui è stata condotta la classificazione dell'immagine satellitare o all'estrazione dell'informazione di input dalle fonti cartografiche; proprio in virtù di tali difficoltà si è provveduto ad elaborare ed applicare una metodologia di estrazione di tematismi accurata e robusta. Per contro tale metodo, usando dati discreti, è utilizzabile sia con immagini rilevate da qualsiasi sensore che con quelle derivate da altre fonti cartografiche o accessorie. Il risultato sarà un'immagine o un tematismo nel quale viene enfatizzato il cambiamento; ovvero se il cambiamento sarà presente verranno restituiti dei valori mentre si avrà valore nullo in corrispondenza dei pixel che sono rimasti invariati (Hellevik e Ottar 1988)³⁷.

³⁷ Per una trattazione esaustiva si rimanda a: Hellevik, Ottar (1988). Introduction to causal analysis : Exploring survey data by cross-tabulation. Second edition. NY: Oxford University Press. Contemporary social research series, 9

La scelta del metodo di analisi dei cambiamenti è di rilevante importanza al fine di ottenere risultati pertinenti e significativi; infatti alcune tecniche danno come risultato solamente informazioni della distribuzione spaziale delle zone nelle quali sono avvenuti i cambiamenti e non delle classi di copertura del suolo interessate dal cambiamento (Jensen 2006, Weber 2001), dunque non forniscono informazioni qualitative del fenomeno che li ha provocati (per esempio l'*image differencing* che ricade nella categoria delle tecniche algebriche). Il metodo di analisi delle differenze utilizzato in questa ricerca fa parte delle *post-classification comparison* e più precisamente della categoria delle tecniche basate su classificazione di immagini satellitari; questa tecnica prevede l'elaborazione di una *change detection matrix* per ognuno degli intervalli temporali considerati, ovvero di una matrice che riassume le transizioni delle coperture del suolo avvenute nell'intervallo temporale, rappresentata dalle due immagini impiegate per la sua elaborazione.

Il punto di forza della metodologia adottata non è costituito soltanto dalla possibilità di 'fotografare' l'estensione quantitativa delle aree soggette a cambiamento, ma anche da quella di identificare da un punto di vista qualitativo quelli che sono i trend di transizione delle coperture del suolo. Attraverso le matrici di cambiamento è dunque possibile ridurre eventuali errori indotti da cambiamenti atmosferici o delle condizioni ambientali relative al tempo durante il quale sono state acquisite le immagini satellitari di partenza. Per dovere di completezza si sottolinea comunque che il limite delle matrici è rappresentato dal fatto che l'accuratezza dei risultati ottenuti mediante la loro elaborazione dipende solamente dall'accuratezza della classificazione e dall'adeguatezza dello schema di classificazione utilizzato; inoltre è uno dei metodi che richiedono più tempo per l'elaborazione.

La *change detection matrix* si costruisce a partire da una coppia di immagini tematiche accuratamente coregistrate che hanno uno stesso metodo di classificazione (Fig. 8), ovvero

le medesime n classi (in questo caso le classificazioni delle immagini satellitari); la matrice opera un confronto *pixel per pixel* della distribuzione spaziale di ciascuna classe nell'immagine acquisita in precedenza ($t1$) con la distribuzione spaziale della classificazione dell'immagine posteriore ($t2$), analizza dunque per ogni *pixel* la sua classe di provenienza e la sua classe di destinazione attribuendogli un nuovo valore. Il prodotto sarà un nuovo tematismo costituito da n^2 classi, ciascuna delle quali contiene tutti i *pixel* che sono migrati da una specifica classe ad un'altra; naturalmente per ogni classe del metodo di classificazione iniziale vi sarà una classe che rappresenta quei pixel per i quali non è avvenuta alcuna variazione; in questo caso la migrazione è solamente fittizia (Favretto Martellozzo 2008) in quanto classe di provenienza e classe di destinazione coincidono (per esempio le classi 1, 5 e 9 dell'immagine differenza di figura 9).

Come detto in precedenza tale metodo rappresenta in maniera chiara ed ottimale la natura delle transizioni di copertura del suolo ed analogamente consente anche di analizzare l'aspetto quantitativo; infatti la risoluzione spaziale delle immagini di partenza è nota (nel nostro caso 15 metri) e la matrice fornisce automaticamente il numero dei pixel che popolano ciascuna classe, dunque l'estensione spaziale di ogni classe è così derivabile:

$$(2). \quad A_i(t+1) = n_i \cdot R_s$$

dove A_i indica l'estensione della classe i -esima, n_i indica il numero dei pixel per la classe i -esima e, R_s invece è la risoluzione spaziale dell'immagine satellitare da cui è stato estratto il tematismo.

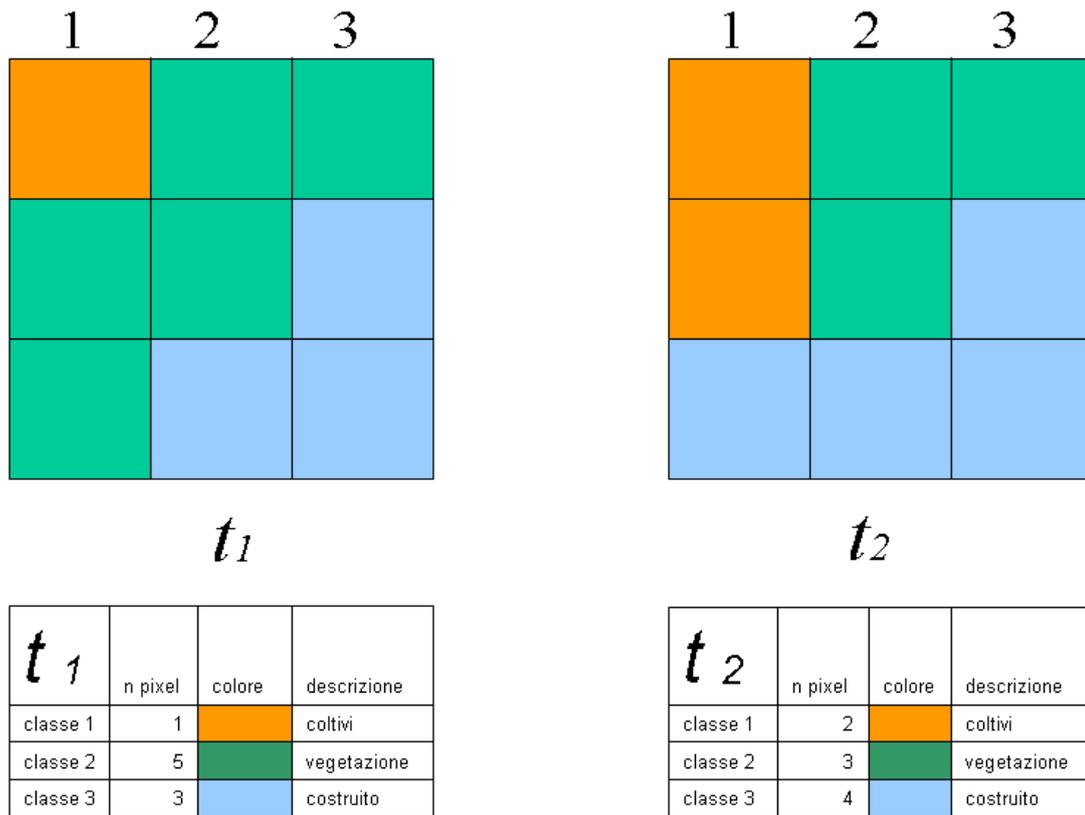


Figura 8: Esempio concettuale dell'applicazione del medesimo schema di classificazione ad una coppia di immagini relative a periodi differenti.

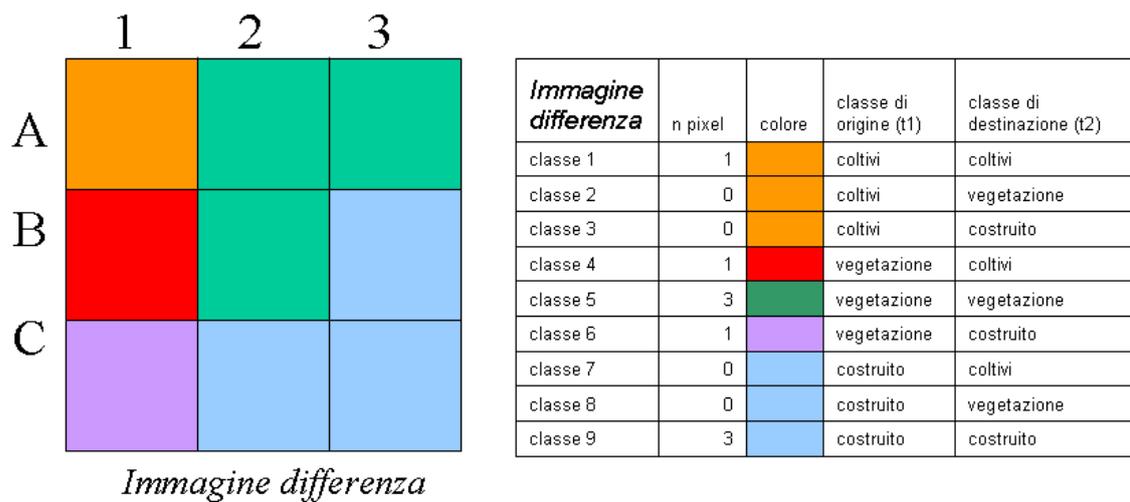


Figura 9: Immagine differenza, relativa alla costruzione di una matrice dei cambiamenti

4.2.2 Interpretazione dei risultati: i cambiamenti territoriali denunciati dalle 4 carte tematiche di copertura del suolo

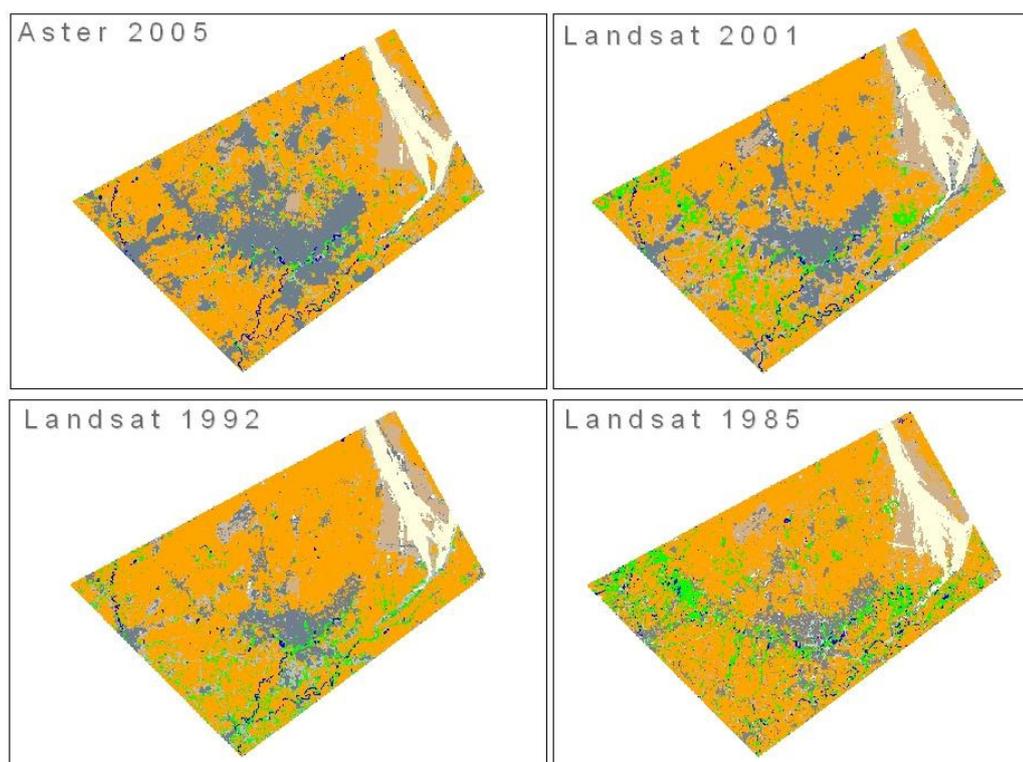


Figura 10: Carte tematiche relative alla copertura del suolo risultata dalla classificazione *Machine*

Learning: ASTER 2005, Landsat 2001, Landsat 1992, Landsat 1985.

Le quattro carte tematiche, relative alla copertura del suolo negli anni esaminati (Fig. 10), sono state analizzate ed elaborate in modo da estrarre da ognuna di esse la quantità di ettari relativa ad ogni classe nei quattro momenti diversi (ciò è possibile trasformando il numero dei *pixel* omogenei in ettari, attraverso la conoscenza della risoluzione spaziale di ciascun *pixel*). Tale elaborazione ha prodotto la Tab. 10 ed il grafico di Fig. 11, rispettivamente la consistenza in ettari delle 7 classi ai vari anni di studio e l'andamento grafico delle singole classi nel periodo considerato, disegnato su un diagramma che riporta in ascissa gli anni e in ordinata la consistenza in ettari. Si noti che si è deciso di aggiungere una classe, costituita dalla somma delle classi 6 e 7, ovvero suburbano e urbano, in quanto si è notato che queste due classi si possono confondere in ambito urbano, poiché il suburbano,

contenente anche le strade, può risultare uguale all'urbano, in termini di risposta spettrale. Da un'analisi di Tab. 10 e Fig. 11, si può constatare la decisa crescita delle classi 6 e 7 aggregate (l'effetto cumulato è dovuto ad una crescita maggiore dell'urbano, e, per quanto riguarda il suburbano, ad una minor crescita, fino al 2001, seguita da una leggera decrescita, nel 2005); è evidente anche la diminuzione dei coltivi, in crescita fino al 1992; la classe acqua è stata ragionevolmente costante; la vegetazione ripariale in leggero calo mentre il suolo nudo in leggero aumento.

Si sono identificati due fenomeni di particolare interesse, per quanto riguarda le variazioni territoriali nel periodo considerato: la perdita di vegetazione e l'aumento della superficie costruita. Il primo risulta calcolabile verificando le variazioni riscontrate da classe 2 a qualsiasi altra classe, il secondo verificando le variazioni da qualsiasi classe alle classi 6 e 7 raggruppate. Le figure dalla 12 alla 17 riportano rispettivamente la perdita di vegetazione nei tre periodi considerati (tre cartogrammi) e l'aumento della superficie costruita nei tre periodi (tre cartogrammi). Da un'analisi visiva delle figure appare evidente che perdita di vegetazione e incremento del costruito hanno seguito entrambe le linee di crescita dell'agglomerato urbano di Pordenone e dintorni sotto forma, approssimativamente, di una parabola i cui rami si estendono rispettivamente verso Nord Est e verso Nord Ovest, nella quale il ramo destro è leggermente più basso del sinistro per lasciare posto ai magredi del sistema fluviale Cellina-Meduna. La perdita di vegetazione segue idealmente lo sviluppo urbano ed è sensibile, fra il 2001 e 2005, lungo il corso del Noncello. L'incremento del costruito si sviluppa in parte riempiendo progressivamente le zone interstiziali fra le varie aree costruite ed in parte seguendo la direzione parabolica della perdita della vegetazione. Da notare che la perdita della vegetazione può indicare la perdita di estensione della classe 2 anche a favore di classi diverse dalla 6 e 7 (ovvero coltivi, terreno nudo, ecc); inoltre va considerato con una certa cautela l'incremento del costruito riscontrato nella zona del

sistema Cellina-Meduna fra il 1992 e il 2001, in quanto le risposte spettrali del costruito e delle rocce del letto dei fiumi sono molto simili, e conseguentemente possono avere determinato una sovrastima dell'incremento del costruito a scapito dei magredi del Cellina.

Un'analisi maggiormente approfondita dei cambiamenti territoriali riscontrati può essere fatta tramite le tecniche di sovrapposizione di *layer* in ambito Web GIS, che possono evidenziare con maggior precisione, mediante la parziale riduzione o l'aumento della trasparenza dello strato, le variazioni fra le classi.

		Serie temporale			
Classificazione		2005	2001	1992	1985
	classe1 acqua	446,107	352,845	352,845	567,247
	classe2 ripariali	982,822	1774,1	2068,47	3411
	classe3 magredi	2268,56	2051,53	1789,61	3287,07
	classe4 coltivi	19691,1	20793	23416	21661,2
	classe5 terreno nudo	2066,53	2286,38	1903,27	2424,13
	classe6 suburbano	2082,04	3343,12	2895,32	1023,26
	classe7 urbano	8535,1	5471,32	3646,78	3698,39
	totale ettari	36072,259	36072,295	36072,295	36072,297
	Σ classi 6 et 7	10617,14	8814,44	6542,1	4721,65

Tabella 10. Consistenza in ettari delle 7 classi ai vari anni di studio

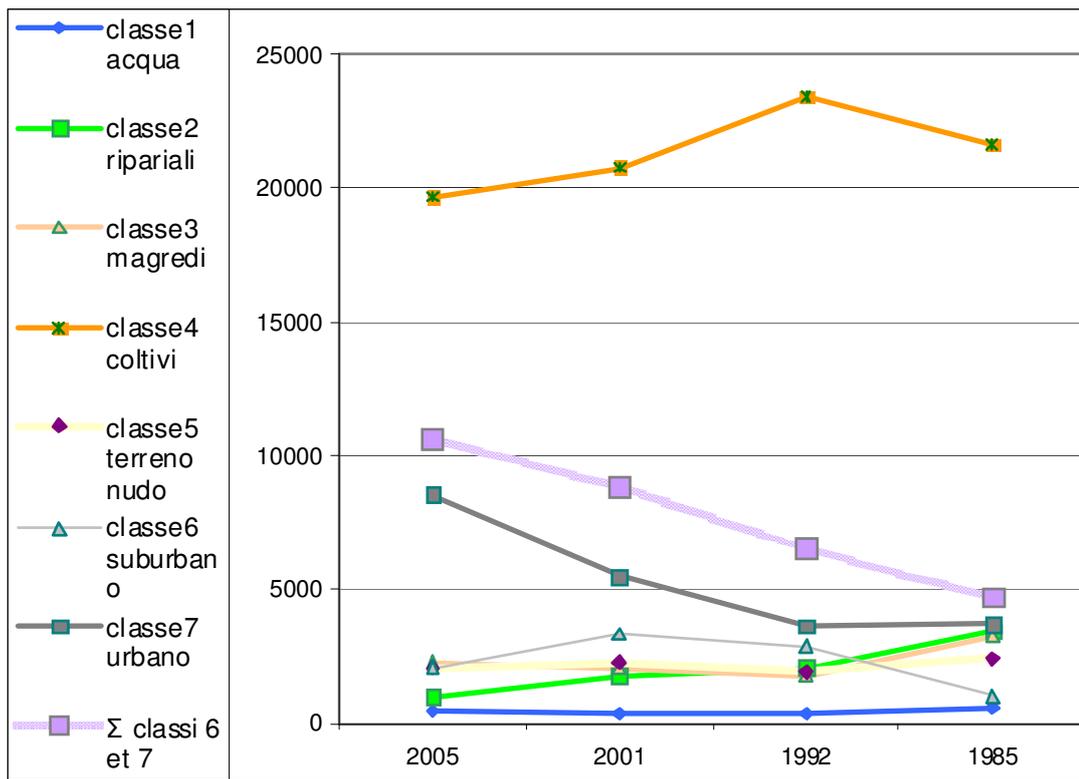
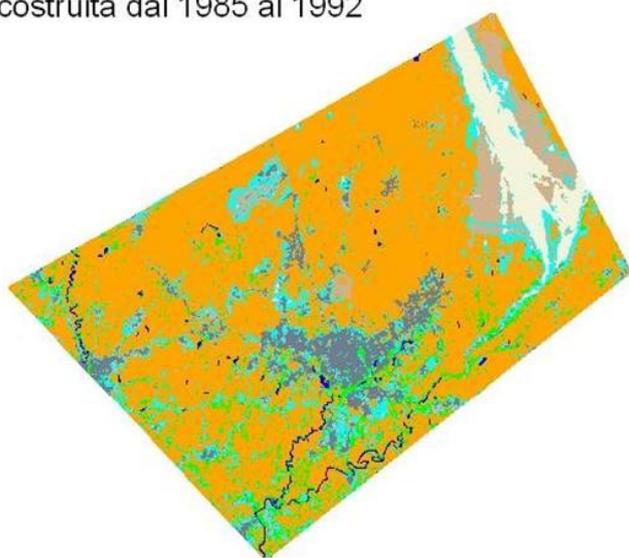


Figura 11. Andamento grafico delle singole classi nel periodo considerato.

Nelle immagini presentate qui di seguito si può vedere l'estensione delle due transizioni di copertura del suolo considerate, ovvero la riduzione di superficie boscata (o con vegetazione alta) ed il corrispondente aumento della superficie edificata.

Classificazione del 1992
con evidenza dell'aumento di superficie
costruita dal 1985 al 1992

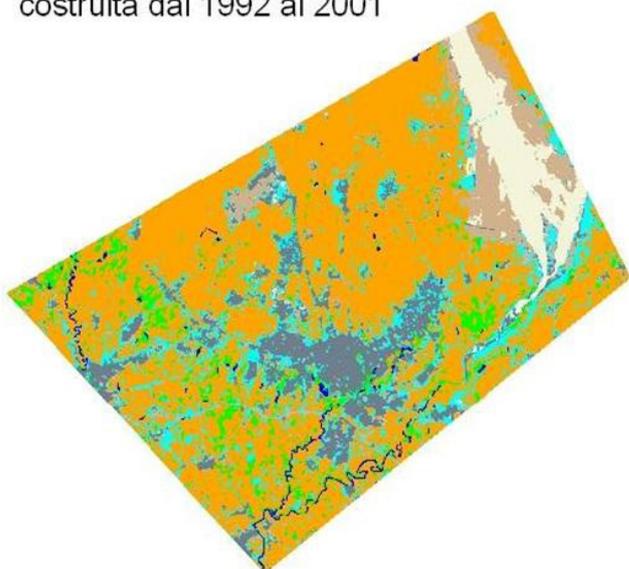


Legenda:

-  Non classificato
-  Acqua
-  Vegetazione alta/alberi ripariali
-  vegetazione arbustizia/magredi
-  coltivi/terreni agricoli
-  suolo nudo/ghiaioni
-  suburbano/strade
-  urbano
-  aumento sup. costruita

Figura 12: Carta tematica dell'espansione del tessuto urbano dal 1985 al 1992.

Classificazione del 2001
con evidenza dell'aumento di superficie
costruita dal 1992 al 2001



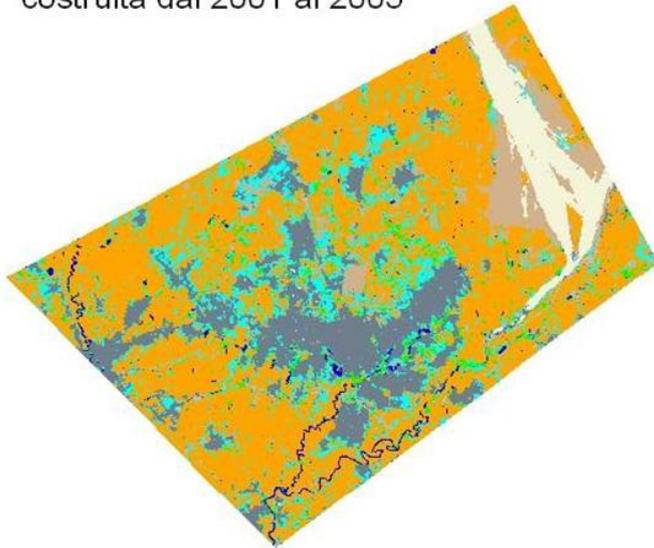
Legenda:

-  Non classificato
-  Acqua
-  Vegetazione alta/alberi ripariali
-  vegetazione arbustizia/magredi
-  coltivi/terreni agricoli
-  suolo nudo/ghiaioni
-  suburbano/strade
-  urbano
-  aumento sup. costruita

Figura 13: Carta tematica dell'espansione del tessuto urbano dal 1992 al 2001.

Classificazione del 2005

con evidenza dell'aumento di superficie costruita dal 2001 al 2005



Legenda:

-  Non classificato
-  Acqua
-  Vegetazione alta/alberi ripariali
-  vegetazione arbustizia/magredi
-  coltivi/terreni agricoli
-  suolo nudo/ghiaioni
-  suburbano/strade
-  urbano
-  aumento sup. costruita

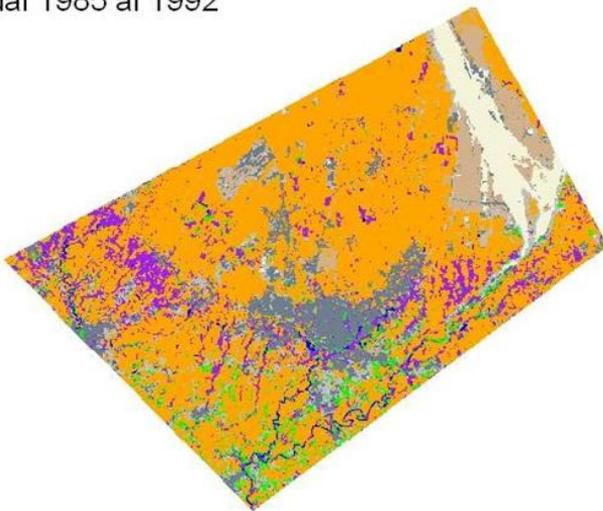
0 5 10 20
Kilometri



Figura 14: Carta tematica dell'espansione del tessuto urbano dal 2001 al 2005

Classificazione del 1992

con evidenza della perdita di vegetazione dal 1985 al 1992



Legenda:

-  Non classificato
-  Acqua
-  Vegetazione alta/alberi ripariali
-  vegetazione arbustizia/magredi
-  coltivi/terreni agricoli
-  suolo nudo/ghiaioni
-  suburbano/strade
-  urbano
-  perdita di vegetazione

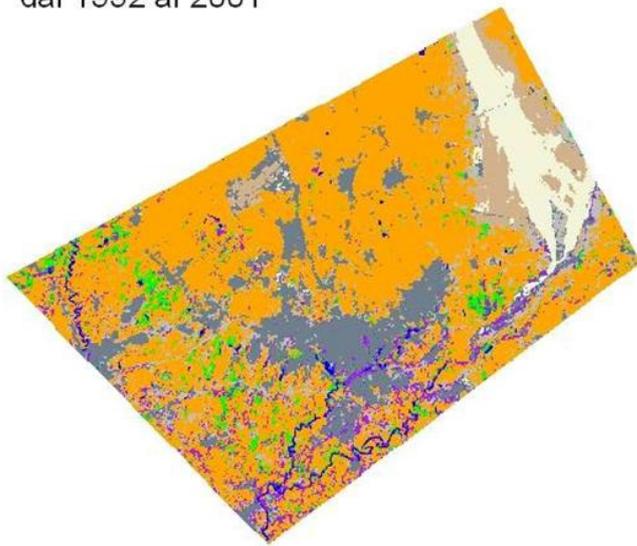
20
Kilometri



Figura 15: Carta tematica della perdita di vegetazione dal 1985 al 1992.

Classificazione del 2001

con evidenza della perdita di vegetazione dal 1992 al 2001



Legenda:

-  Non classificato
-  Acqua
-  Vegetazione alta/alberi ripariali
-  vegetazione arbustizia/magredi
-  coltivi/terreni agricoli
-  suolo nudo/ghiaioni
-  suburbano/strade
-  urbano
-  perdita di vegetazione

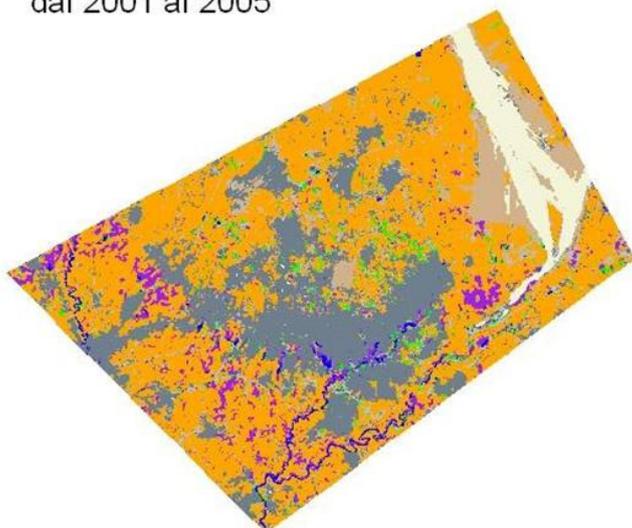
0 5 10 20
Kilometri



Figura 16: Carta tematica della perdita di vegetazione dal 1992 al 2001.

Classificazione del 2005

con evidenza della perdita di vegetazione dal 2001 al 2005



Legenda:

-  Non classificato
-  Acqua
-  Vegetazione alta/alberi ripariali
-  vegetazione arbustizia/magredi
-  coltivi/terreni agricoli
-  suolo nudo/ghiaioni
-  suburbano/strade
-  urbano
-  perdita di vegetazione

0 5 10 20
Kilometri



Figura 17: Carta tematica della perdita di vegetazione dal 2001 al 2005.

4.3 I modelli di simulazione automatica per la previsione di scenari futuri.

I dati e le carte di copertura del suolo, ottenute dall'analisi storica e dalla classificazione delle immagini satellitari della serie multi- temporale descritte nei paragrafi 4.1 e 4.2, sono stati adeguatamente trattati per poter essere utilizzati come dati di input per il modello di simulazione che è alla base dell'elaborazione di scenari futuribili delle transizioni di uso del suolo. A tal proposito è doveroso precisare come, nella ricerca in questione, seppur si siano analizzati ed osservati vari fenomeni di modificazioni di copertura del suolo e dunque del territorio in generali, si è posto prevalentemente l'accento su osservazioni concernenti l'evoluzione del tessuto urbano, con particolare riguardo per il fenomeno di *sprawl*, oggetto principale di questa ricerca. In questo capitolo viene descritta la metodologia elaborata per avviare ed ottenere la simulazione.

Come detto in precedenza tale studio si basa sull'integrazione di immagini satellitari con dati cartografici della copertura del suolo (Corine Land Cover 2000), carte topografiche con scala di riduzione 1:25000 della Regione Friuli Venezia Giulia (CRN), dati raccolti *in situ* e immagini ortofoto del 2003. L'applicazione di modelli gioca un ruolo fondamentale nell'investigazione delle dinamiche di transizione spazio-temporale che sottendono all'espansione urbana ed ai cambiamenti di uso del suolo (Petrov et al., 2009). Bisogna però precisare che seppur un particolare modello è stato applicato con successo in una precisa area geografica e si sono potuti ottenere tramite la sua applicazione risultati accurati e soddisfacenti, questo non implica automaticamente che esso possa essere applicato con profitto anche in un'altra regione o ambiente; detto ciò si vuole qui precisare che obiettivo di questo studio è l'analisi e lo studio di forme e dinamiche dell'urbanizzazione che possano essere largamente applicate ed usate alla luce di principi espressi da una teoria più generale.

4.3.1 Il modello di simulazione SLEUTH per l'investigazione dello sprawl

Le carte tematiche ottenute tramite l'elaborazione delle immagini telerilevate costituiscono una base di dati sufficientemente ampia ed accurata per l'elaborazione di ulteriori carte che ritraggano possibili scenari futuri dell'espansione urbana per l'area considerata. Il modello scelto per la predizione e l'elaborazione di tali scenari è il modello SLEUTH; questo modello si è dimostrato come uno dei più efficienti nel produrre risultati realistici, validi e statisticamente robusti ed è stato inoltre applicato estensivamente per la pianificazione dell'espansione urbana in più di un centinaio di casi in tutto il mondo (Clarke et al., 2006; Dietzel e Clarke 2007).

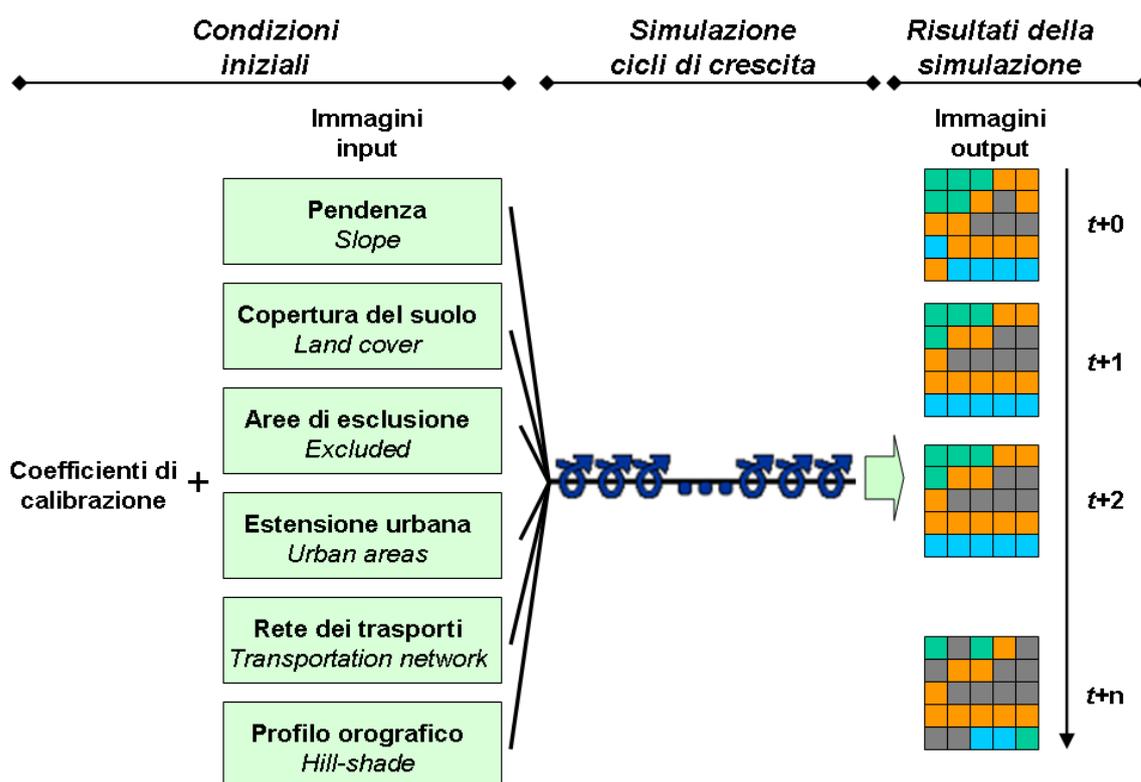


Figura 18: Rappresentazione concettuale del funzionamento e degli *input* del modello SLEUTH.

Molti studi sviluppati in passato danno un'accurata descrizione delle prestazioni, della struttura e del funzionamento del modello SLEUTH e parimenti ricerche più recenti si sono

concentrate maggiormente sull'applicazione del modello a particolari teorie e complesse forme di crescita urbana (Dietzel et al., 2005b; Silva 2002; Candau 2000). SLEUTH opera in virtù di quattro differenti comportamenti di espansione urbana per la predizione delle transizioni di uso del suolo e di crescita del tessuto metropolitano. Il modello deve il suo nome agli input richiesti dal sistema per l'applicazione della procedura, infatti è l'acronimo dei sei strati tematici che esso richiede: *Slope, Land cover, Exclusion, Urban extent, Transportation Network e Hill-shaded background* (Pendenza, Copertura del suolo, Aree di esclusione, Estensione urbana, Rete dei trasporti e Profilo orografico) (Fig. 18).

Le carte tematiche di input necessarie al sistema riguardo alla pendenza ed al profilo orografico, sono richieste sotto forma di un valore percentuale; la seconda non influisce sul funzionamento della procedura e sul comportamento del modello, ma serve solamente da sfondo per una più comprensibile ed immediata visualizzazione dell'animazione dei risultati. Il modello, per funzionare correttamente ed elaborare risultati soddisfacenti, richiede una classificazione di uso del suolo coerente e robusta che si riferisca ad almeno due periodi differenti, che verrà utilizzata dal modello nella fase di calibrazione per poter implementare le funzionalità proprie del sottomodello di cambiamento di uso del suolo (*Deltatron*), che fa parte del modello principale.

Lo strato raffigurante le aree di esclusione è funzionale all'introduzione di limitazioni spaziali alle elaborazioni di espansione del modello; esso esclude a priori delle aree che non possono essere soggette al fenomeno di urbanizzazione, per esempio specchi d'acqua. L'analista può in questo caso decidere di utilizzare uno strato classificato dove ogni singola classe rappresenta un grado diverso di resistenza al processo urbanizzante, per esempio i corsi d'acqua potrebbero avere un valore pari a 100, ovvero massima resistenza, e aree soggette ad un piano regolatore particolareggiato o protette, o ancora aree coperte da paludi

un valore di 50, il che rappresenta un grado di resistenza minore perché in tali aree è altamente improbabile che vi possa essere urbanizzazione ma non impossibile (Clarke 2008); dunque è uno strumento per limitare, ridurre o modificare il tasso di espansione³⁸ urbana in virtù di restrizioni legali, zonizzazione o differente idoneità.

Se nel modello SLEUTH uno degli strati informativi dovesse rivestire un'importanza privilegiata, questo sarebbe senza dubbio lo strato raffigurante l'estensione urbana; per una adeguata raffigurazione sono necessarie almeno quattro differenti immagini temporali del tessuto urbano. Queste carte sono funzionali al controllo dei parametri di calibrazione del modello ed alla calibrazione stessa; grazie a queste è possibile determinare dei coefficienti di accuratezza per ognuno dei parametri necessari nella fase di calibrazione. Ma riveste una rilevante utilità anche lo strato riguardante la rete dei trasporti, infatti uno dei principali vettori di crescita urbana è proprio l'infrastruttura che permette la mobilità (Silva e Clarke, 2002). Grazie al fatto che differenti tipi di strade, o vettori, attraggono ed influenzano il processo di urbanizzazione in modi differenti, il modello accetta che la rete infrastrutturale dei trasporti possa essere classificata e pesata in modo analogo a quanto descritto per lo strato informativo *Exclusion*; dunque in accordo con il grado di influenza delle varie tipologie di arterie di comunicazione sul processo di urbanizzazione verrà costruita una scala gerarchica. Ovvero, più nello specifico, un elevato grado nella scala gerarchica è rappresentato dalle parti dell'infrastruttura che assimilano un uso maggiore e più frequente in termini di volumi, ad esempio super strade ed autostrade. Detto ciò, si può comunque sottolineare che il metodo di gerarchizzazione dell'infrastruttura dei trasporti è strettamente collegata alla natura del territorio preso in esame ed all'area dove la simulazione è in atto; per esempio le aree urbane europee possono necessitare di uno schema di classificazione della rete di comunicazione differente da quelle asiatiche, e SLEUTH è in grado di

³⁸ *Growth Rate*: letteralmente tasso di crescita; il modello considera il tasso di crescita percentuale in $t+1$ rispettivamente a $t+0$.

modificare il suo comportamento grazie ad una elasticità nella calibrazione che gli permette dunque di essere potenzialmente adattabile a qualsiasi area del pianeta (Silva e Clarke, 2002). Tutti i dati di input del modello devono essere forniti sotto forma di immagini GIF perché sia possibile calibrare il sistema e dar inizio alla simulazione.

4.3.2 Fondamenti teorici e funzionamento del modello

SLEUTH è basato sulla stretta combinazione delle congiunte capacità di calcolo di due modelli automatici cellulari: il Modello di Espansione Urbana (*Urban Growth Model*) e il Modello di Cambiamento di Uso del Suolo Deltatron (Clarke, 2008). La procedura base che simula l'espansione in SLEUTH è un automatismo cellulare in cui la crescita dell'estensione urbana è stabilita all'interno di una griglia bidimensionale. Le attività di questa procedura automatica sono controllate da cinque parametri di controllo: Diffusione (*Diffusion*), Capacità di Generazione (*Breed*), Distribuzione³⁹ (*Spread*), Pendenza (*Slope*⁴⁰) e Influenza della Rete dei Trasporti (*Road-dependency*); a tali parametri, sia nella fase di calibrazione che in quella di simulazione, vengono assegnati dei coefficienti che ne stabiliscono l'influenza sul processo di urbanizzazione e questi gestiscono il comportamento del modello che in base al loro valore permette di leggere quattro tipi differenti di espansione urbana: spontanea, a diffusione, crescita organica, dipendente dalle vie di comunicazione (Clarke, 2008).

³⁹ Il coefficiente definito con il termine *Spread* andrebbe tradotto con coefficiente di sparpagliamento, infatti esso controlla la probabilità di ogni pixel che sia un centro di sparpagliamento di generare un altro pixel urbanizzato fra quelli ad esso contigui.

⁴⁰ Di *default* il valore massimo per lo *slope* è del 21%, se tale valore viene superato lo *slope coefficient* determina la probabilità con cui il *pixel* può diventare urbanizzato.

Durante la simulazione il modello è in grado di modificare i propri parametri di controllo in funzione di un insieme di regole attraverso le quali esso controlla i parametri di crescita quando il tasso di espansione viene superato; in questo modo il comportamento del modello viene analizzato e restituisce dei riscontri (*feedback*) che vengono utilizzati dall'analista per affinare i parametri e rendere più performante ed accurato il processo di calibrazione e conseguentemente la simulazione (Clarke et al., 1997). Il modello è perciò disegnato in modo da simulare l'espansione urbana ed è inoltre indipendente dalla scala di riduzione o dalla risoluzione spaziale, fatto che lo rende virtualmente applicabile in via universale. Si tiene qui a precisare che la dipendenza temporale e la sensibilità di SLEUTH sono state studiate in modo accurato (Candau, 2000) e che i risultati di tali studi mostrano come il modello ottenga delle prestazioni migliori qualora lo si applichi con dati recenti per simulazioni a breve termine, mentre l'utilizzo di dati di molto antecedenti la data di inizio della simulazione, sia per simulazioni a breve termine che a lungo termine, genera risultati considerati meno soddisfacenti. La nostra simulazione, dunque, si fonda su una base di dati storici che si riferiscono ad un intervallo di tempo ristretto a 20 anni (1985-2005) per una predizione sino al 2050⁴¹. Per la calibrazione del modello è necessario applicare metodi, cosiddetti di forza bruta (Silva e Clarke, 2003).

Come detto, il modello SLEUTH è un modello cellulare basato sull'iterazione della procedura detta Monte Carlo⁴² che simula il comportamento di crescita di un'area urbana all'interno di una scena più complessa per classi di copertura del suolo, dove sono

⁴¹ Con una serie storica di dati che copre un intervallo di circa vent'anni, si possono effettuare in teoria simulazioni con un alto gradiente di probabilità per un arco di tempo nel futuro pari a quello della serie storica. Tuttavia (ne sarà fatta precisazione anche in seguito) abbiamo notato dal confronto fra set di dati differenti come i risultati ottenuti siano accurati sino a circa il 2035-240, mentre dopo questa data l'accuratezza è piuttosto grossolana.

⁴² Il metodo Monte Carlo è un metodo inferenza statistica. Il metodo è usato per trarre stime attraverso simulazioni; la simulazione Monte Carlo calcola una serie di realizzazioni possibili del fenomeno in esame, con il peso proprio della probabilità di tale evenienza, cercando di esplorare in modo denso tutto lo spazio dei parametri del fenomeno. Ovvero l'algoritmo Monte Carlo è un metodo numerico che viene utilizzato per trovare le soluzioni di problemi matematici, che possono avere molte variabili e che non possono essere risolti facilmente

esplicitate le estensioni spaziali delle altre coperture del suolo che interagiscono con il fenomeno investigato. L'unità minima del modello SLEUTH è il singolo ciclo di crescita. Si inizia con l'assegnazione di un unico valore per ognuno dei coefficienti impiegati per la sua esecuzione, successivamente tutte le regole di crescita vengono applicate e ne viene studiato l'effetto. Se il tasso di crescita per ognuno dei coefficienti rimane al di sotto del limite minimo o eccede il limite massimo stabilito per quel coefficiente, il modello modifica autonomamente di conseguenza le proprie impostazioni, cosicché nel ciclo successivo i parametri utilizzati saranno leggermente differenti. Tale leggera auto-modificazione, che il modello attua in automatico, è funzionale alla simulazione di comportamenti di crescita depressa o accelerata che contraddistinguono le aree urbane (Fig. 19).

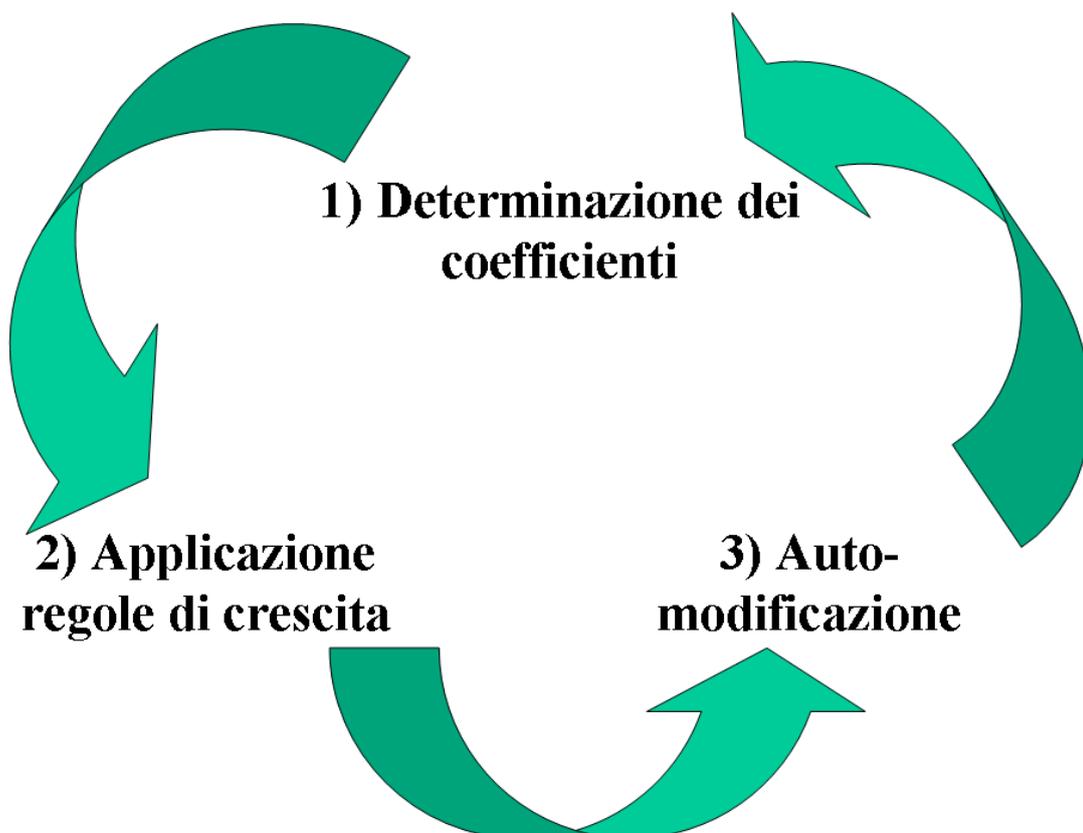


Figura 19: Descrizione di un singolo ciclo di simulazione del modello SLEUTH

Nella fase iniziale l'analista deve fare in modo che l'intero intervallo di variabilità del pacchetto dei parametri di controllo, costituito dalle cinque dimensioni sopra elencate, sia investigato anche in maniera molto sbrigativa ed approssimativa. Idealmente l'obiettivo della fase in cui il sistema viene calibrato è quello di incrementare l'accuratezza di ognuno dei cinque parametri (*Diffusion, Breed, Spread, Slope, Road*), riducendo l'intervallo di variabilità di ciascuno ed il passo con cui tale intervallo viene investigato (*step value*, l'ottimo sarebbe il valore 1) al fine di isolare un singolo valore da assegnare come coefficiente ad ognuno dei cinque parametri che verranno riutilizzati nel processo di simulazione.

Una volta identificati tali parametri (questa fase viene descritta approfonditamente nel paragrafo 4.3.3) si immettono nel sistema e la simulazione può avere inizio; le dinamiche di espansione urbana implementate nel modello sono descritte come quattro differenti tipi di crescita e le loro condizioni vengono testate in ogni ciclo⁴³.

Spontaneous Growth: La crescita spontanea definisce la componente casuale di urbanizzazione di un'area. Nell'organizzazione concettuale del modello cellulare questo sta a significare che ogni pixel non urbano della griglia ha una certa probabilità (di norma molto basso) di diventare urbano in un qualsiasi momento indipendentemente da fattori esterni (Fig. 20). Quindi, laddove il fenomeno per il quale una determinata cella della griglia U (pixel) con coordinate x,y al tempo t diventerà urbano al tempo $t+1$ può essere espresso come segue:

$$(3) U(x,y,t+1) = f1[dispersion_coefficient , slope_coefficient , U(x,y,t+0), random]$$

Il parametro *dispersion_coefficient* (chiamato anche *diffusion_coefficient* nella letteratura meno recente (Clarke, Hoppen, Gaydos 1996)) determina la probabilità globale spontanea,

⁴³ Per convenzione si fa corrispondere ogni ciclo di computazione ad un anno di tempo e si calibrano i coefficienti dei parametri di controllo di conseguenza.

che come detto è molto bassa, per una cella⁴⁴ di essere soggetta a urbanizzazione e lo *slope_coefficient* determina una resistenza pesata a tale processo. Se la cella è già ‘urbano’ o appartiene alle celle escluse a priori dalla simulazione (*excluded areas*) il suo valore non cambierà, in aggiunta la sua probabilità di essere soggetta a tale fenomeno dipende anche dall’attuale valore assegnato alla cella in questione (ovvero dalla classe di copertura del suolo di appartenenza).

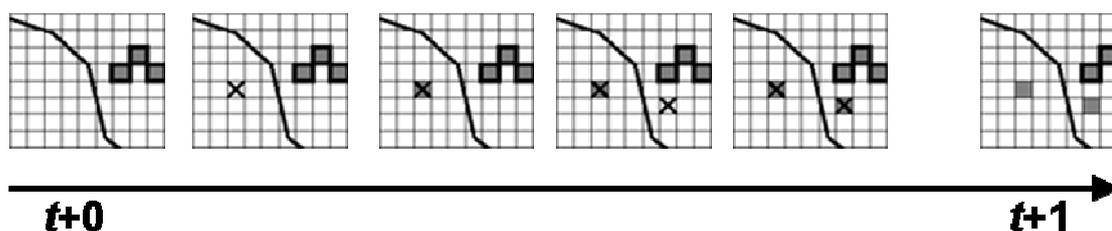


Figura 20: Schema diacronico dell’applicazione della regola di crescita descritta nella formula (3).

New Spreading Center Growth: lo *step* successivo della simulazione è basato sull’individuazione di quei *pixel* che rappresentano la nascita di nuovi centri di dispersione. Come indicato dallo stesso nome, questa fase determina per ogni *pixel* urbanizzato nella fase precedente quali siano quelli in grado di generare un cambiamento nei *pixel* contigui (*nearest neighbour*) e quindi di diventare nuovi centri di crescita (Fig. 21). Il parametro *breed_coefficient* definisce la probabilità per ogni nuova cella urbanizzata $U(x,y,t)$ di diventare appunto un centro di diffusione in $U(x,y,t+1)$, posto che almeno una coppia di celle contigue sia disponibile per l’urbanizzazione, ovvero:

$$(4) U'(x,y,t+1) = f2[\textit{breed-coefficient}, U(x,y,t+1), \textit{random}]$$

dove $U(x,y)$ sono le celle contigue alla cella in questione $U'(x,y)$. Dunque perché una cella possa essere considerata un nuovo centro di diffusione urbana, almeno una coppia di celle adiacenti deve essere urbanizzata. Quindi un centro di diffusione urbana è considerato

⁴⁴ Il modello simula la crescita urbana all’interno di un griglia bidimensionale dove ogni cella corrisponde ad un *pixel*; i due termini dunque sono usati in questa sezione come sinonimi.

come un luogo dove vi siano almeno tre o più celle contigue urbanizzate. L'attualizzazione di questa fase dipende dalla resistenza esercitata dal coefficiente *slope* e dalla reale possibilità che alcune celle adiacenti possano manifestare la transizione.

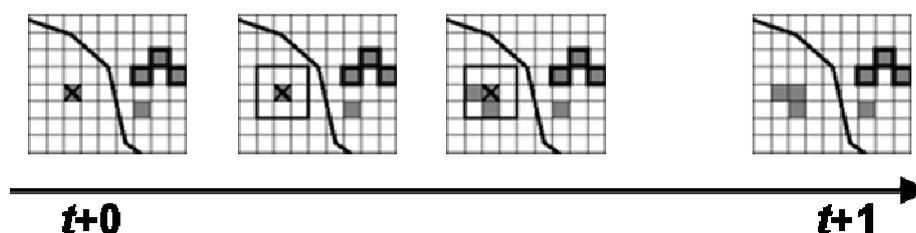


Figura 21: Schema diacronico dell'applicazione della regola di crescita descritta nella formula (4).

Edge Growth (crescita organica): la dinamica di espansione descritta da questa fase determina la transizione di *pixel* generata dai *pixel* già considerati come centri di diffusione urbana (*spreading center*). Questo tipo di espansione si propaga sia dai *pixel* urbanizzati nella fase 2 sia dai centri di diffusione urbana rilevati in tempi precedenti. Quindi, se una cella non urbana ha almeno tre celle adiacenti che sono urbane, essa ha una determinata probabilità globale di essere anch'essa soggetta al fenomeno di urbanizzazione, stabilita in funzione del parametro *spread_coefficient*, sempre ammesso che sia possibile costruire sull'area di tale cella (ciò è subordinato allo *slope_coefficient* e, come già implicitamente ammesso, dalla non appartenenza di tale cella alle aree escluse dalla computazione) (Fig. 22). Allora questa terza fase può essere espressa come:

$$(5) U(x,y,t+1) = f3[\textit{spread_coefficient}, \textit{slope_coefficient}, U(x,y,t), U(k,l), \textit{random}]$$

Dove $U(k,l)$ appartiene all'insieme delle celle adiacenti a $U(x,y)$.

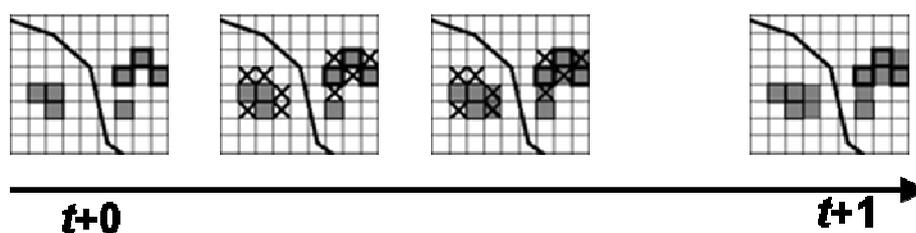


Figura 22: Schema diacronico dell'applicazione della regola di crescita descritta nella formula (5).

Road Influenced Growth: l'ultimo tipo di crescita ammesso, è quello influenzato dalla presenza di infrastrutture di trasporto e di comunicazione, e anche dalle tipologie di crescita descritte nelle fasi precedenti. Attraverso la probabilità determinata dal *breed_coefficient*, le nuove celle urbanizzate (in t+1) vengono selezionate, e viene ricercata la presenza di una via di comunicazione che intersechi una delle sue celle contigue in un determinato raggio. Tale distanza massima dalla cella è determinata tramite il *road_gravity_coefficient*. Se tale intersezione si manifesta, viene posizionato momentaneamente un *pixel* urbanizzato. Successivamente dalla cella momentaneamente urbanizzata si simula un percorso (spostamento) lungo la direttrice della via di comunicazione per un numero di passi (celle contigue) determinato dal *dispersion_coefficient*. Il posizionamento finale del *pixel* momentaneamente urbanizzato viene considerato come un possibile nuovo nucleo di dispersione urbana. Se è possibile che anche una singola cella, adiacente al nucleo di dispersione urbana identificato momentaneamente sulla direttrice della via di trasporto, venga urbanizzata allora lo sarà (viene operata una scelta casuale fra le celle che soddisfano le condizione base); se invece vi è la possibilità che due celle siano urbanizzate, allora anche in questo caso verranno considerate urbanizzate. Quindi la creazione del *pixel* temporaneamente urbanizzato all'intersezione con il ramo di comunicazione può essere espresso come:

$$(6.1) U'(k,l,t+1) = f4.1[U(x,y,t+1), road_gravity_coefficient, R(m,n), random]$$

Dove (x,y); (k,l); e (m,n) sono coordinate di *pixel* e R(m,n) definisce la cella all'intersezione con la via di trasporto.

Il percorso casuale lungo tale direttrice può invece essere espresso come:

$$(6.2) U''(x,y,t+1) = f4.2[U'(k,l,t+1), dispersion_coefficient, R(m,n), random]$$

Dove (x,y) sono le coordinate delle celle adiacenti ai *pixel* che intersecano la via di comunicazione, le cui coordinate sono espresse con (k,l). Se si definiscono con (p,q) le coordinate della cella momentaneamente urbanizzata che risiede sulla via di comunicazione

al termine della simulazione dello spostamento, allora la cella che identifica un nuovo centro di dispersione urbana può essere definito come:

$$(6.3) U'''(x,y,t+1) = f4.3[U'''(p,q,t+1), R(m,n), slope_coefficient, random]$$

Nel caso in cui invece siano due le celle disponibili per cedere al fenomeno di urbanizzazione, allora saranno espresse come

$$(6.4) U''''(x,y,t+1) = f4.4[U'''(p,q,t+1), slope_coefficient, random]$$

Dove (x,y) e (k,l) sono coordinate che appartengono alle celle adiacenti il pixel considerato come nucleo temporaneo di *sprawl* in (p,q). I quattro passaggi sopra descritti sono usualmente definiti come *road trip* (percorso). Ogni tentativo di individuare un nuovo *pixel* urbanizzato in relazione ad uno spostamento lungo una direttrice di comunicazione, costituisce un nuovo *road trip*; il numero di *road trip* che è possibile effettuare per ogni ciclo di simulazione dell'intero modello è stabilito dal *breed_coefficient*.

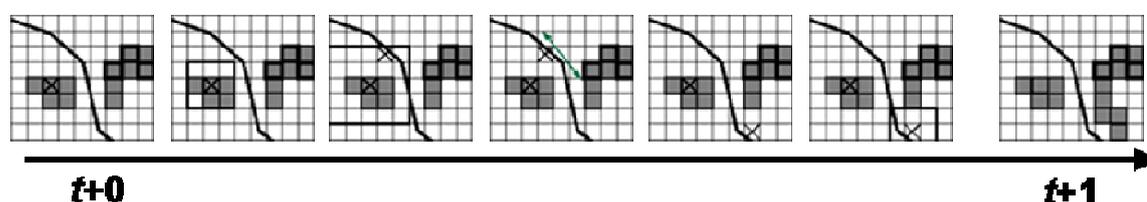


Figura 23: Schema diacronico dell'applicazione della regola di crescita descritta nelle formule (6.1; 6.2; 6.3; 6.4).

4.3.3 SLEUTH Sueded Calibration e Optimum Sleuth Metrics

Come restringere e affinare al meglio l'intervallo di variabilità dei coefficienti di calibrazione è un argomento che è stato studiato ed investigato largamente ed intensivamente in passato. Ad oggi vi è una molteplicità di approcci differenti che vengono suggeriti per la calibrazione di SLEUTH e un'altrettanto ampia serie di regole è stata proposta al fine di ovviare ai problemi di trattabilità dei coefficienti; ciononostante molti

dei metodi suggeriti hanno lacune funzionali o ancora non prendono in considerazione una parte delle combinazioni possibili dei parametri utilizzati nel processo di calibrazione (Dietzel e Clarke, 2007). In questo studio, al fine di ottenere una calibrazione il più accurata possibile, si è impiegata una metodologia combinata basata su una tecnica detta Computazione a Cucitura (*Sueded Calibration*) e su di un sistema esperito e descritto da Dietzel (Dietzel 2007) chiamato *Optimum Sleuth Metric* (OSM) per la calibrazione di SLEUTH. Il sistema di misura OSM prende in considerazione le varie combinazioni di sette misurazioni che vengono utilizzate da SLEUTH, otto se si considera anche l'analisi statistica della transizione di uso del suolo; questo è il metodo raccomandato per ottenere una calibrazione accurata del modello SLEUTH e, dunque, risultati più realistici, dai curatori del progetto di cui il modello fa parte. Inoltre è da qualche tempo consigliato l'utilizzo di tale sistema al fine di eliminare, seppur parzialmente, errori introdotti da differenti metodologie di calibrazione per poter più facilmente e correttamente comparare simulazioni ottenute tramite SLEUTH applicate ad aree differenti (Dietzel e Clarke, 2007).

Il processo di calibrazione è un passo molto delicato nell'applicazione del modello SLEUTH, infatti più la calibrazione viene effettuata correttamente, più è probabile che i risultati della simulazione siano verosimili. Tale processo consiste in una serie di *step* successivi che richiedono molto tempo (in termini di ore-macchina); nel caso in questione ci si è trovati a lavorare con 15 computer⁴⁵ simultaneamente per un monte ore, al netto di ritardi dovute a procedure errore, di circa 1000 ore macchina. Alla fine di ogni parziale calibrazione è necessario l'intervento dell'analista che deve studiare ed elaborare i risultati ottenuti per avviare la porzione di calibrazione successiva. Il processo di calibrazione prevede che i 5 coefficienti che controllano SLEUTH siano investigati lungo l'intero

⁴⁵ Macchine con sistema operativo Windows XP Pro-Edition con 2Gb di RAM e processore da 1.5 GHz. Il modello lavora in ambiente UNIX quindi è stato necessario installare l'emulatore CygWin 1.5.

intervallo di variabilità, essi possono variare da 0 a 100; il fine è quello di identificare un unico valore per ognuno, la cui combinazione è quella che ottiene L'OSM più elevato.

Nella *sueded calibration*, le macchine vengono “forzate” a lavorare in parallelo, nel senso che esse analizzano ognuna una parte diversa dell'intervallo di variabilità dei coefficienti; più precisamente si occupano simultaneamente del medesimo coefficiente, ma di una porzione del suo intervallo differente. Infatti la calibrazione non analizza una ad una le 100 alla quinta combinazioni (cosa che richiederebbe ancora più tempo); ma nell'intervallo assegnato ad ogni macchina, l'attenzione si concentra sull'intervallo del singolo coefficiente assegnato con un certo gradiente di precisione (*step value*) che andrà via via aumentando man mano che l'intervallo di variabilità viene ristretto. Per esempio (Fig. 24), dato un intervallo d'investigazione da 0 a 100 del primo coefficiente e avendo a disposizione 4 macchine si può procedere come segue: ogni macchina investigherà un intervallo di 25 con uno *step value*⁴⁶ di 5, ovvero ognuna analizzerà i numeri del proprio intervallo saltando di 5 in 5, dunque la prima macchina non testerà tutti numeri da 0 a 25 ma solo i numeri 0, 5, 10, 15, 20 e 25. La seconda investigherà solo i valori 25, 30, 35, 40, 45 e 50; di conseguenza tutte le altre. Al termine del primo ciclo l'analista applicando le misurazioni dell'OSM, prenderà i valori che hanno ottenuto i risultati migliori (per esempio da 30 a 40) e suddividerà di nuovo il lavoro di computazione ma solo su questo intervallo (Fig. 24).

⁴⁶ Lo *step value* determina la precisione con cui l'intervallo di variabilità viene investigato.

1° Ciclo - Impostazioni			2° Ciclo - Impostazioni			Valore finale		
	Valori	OSM		Valori	OSM			
	Start → 0	0	1.1	↗	Start → 30	30	4.2	
		5	0.9		Stop → 33	31	4.2	
	Stop → 25	10	0.8		Step → 1	32	4.3	
		15	0.9			33	4.2	
	Step → 5	20	0.6					
	25	2.3						
	Start → 0	25	2.3	Start → 33	33	4.2		
		30	4.2	Stop → 35	34	4.3		
	Stop → 25	35	4.5	Step → 1	35	4.5		
		40	4.3					
	Step → 50	45	2.2					
	50	1.9						
	Start → 0	50	1.9	Start → 35	35	4.5		
		55	1.2	Stop → 38	36	5.1		
	Stop → 50	60	1.7	Step → 1	37	5.3		
		65	0.8		38	4.9		
	Step → 75	70	0.9					
	75	0.7						
	Start → 0	75	0.7	Start → 38	38	4.9		
		80	0.5	Stop → 40	39	3.2		
	Stop → 75	85	0.3	Step → 1	40	4.3		
		90	0.3					
	Step → 100	95	0.5					
	100	0.4						

Figura 24: Funzionamento per raffinazione a step successivi esperito con la *sueded calibration*.

4.4 Risultati ed osservazioni derivate dalla simulazione SLEUTH

In seguito alle operazioni sin qui descritte, SLEUTH è stato applicato ai dati ottenuti mediante l'analisi storica ed è stata effettuata la simulazione che ha dato come risultato le carte dei possibili scenari di estensione urbana sino al 2050; queste carte sono state poi utilizzate ed analizzate congiuntamente alle immagini satellitari classificate per investigare il comportamento dell'entropia e delle geometrie spaziali dell'espansione urbana per un intervallo di tempo di oltre mezzo secolo (1985-2050).

4.4.1 Il concetto e le misure dell'Entropia

Molti studi in geografia, economia o in altre scienze sociali hanno usato il concetto di entropia per descrivere la dispersione e la diffusione di attività o fenomeni in un contesto spaziale (Heikkilä e Hu, 2006). Dire che una relazione o un fenomeno dimostrano una variabilità spaziale, implica che le osservazioni dell'oggetto di studio non sono statiche, dal punto di vista spaziale, nel tempo (Novelli et al. 1999), quindi l'analisi spazio-temporale dello *sprawl* urbano è giustificata. Un modo per guardare al fenomeno di *sprawl* è anche quello di considerare l'estensione urbana come un fenomeno spazialmente distribuito e disperso nel territorio o nel contesto areale considerato. La densità delle aree urbane rispetto al totale della superficie virtualmente disponibile per l'urbanizzazione è a tal proposito una misura fondamentale (Heikkilä e Hu, 2006). In questa sezione sono state confrontate differenti funzioni per descrivere l'andamento dell'entropia della densità urbana nel tempo per l'area oggetto di studio. Più in particolare l'entropia è stata calcolata sulla base di tutte le carte disponibili dal 1985 al 2005 ottenute tramite classificazione delle immagini satellitari e, per tutti gli anni fino al 2050, sulla base degli scenari di estensione urbana risultato della simulazione con SLEUTH. L'entropia calcolata con la funzione di Shannon è stata elaborata sia nella sua forma assoluta che relativa; la forma assoluta (H ; equazione 7) e relativa (H^* ; equazione 8) delle misure di entropia possono essere utilizzate per determinare il livello di concentrazione spaziale o dispersione del fenomeno geografico (Yeh e Li, 2001); si precisa che la forma relativa ammette valori in un range che va da 0 ad 1 ed è generalmente considerata più accurata della formulazione assoluta, quando si vuole effettuare un confronto ed una comparazione di aree con caratteristiche molto differenti o distanti fra loro (Novelli, 1999).

$$(7) \quad H = - \sum_i^K f_i \text{Log} f_i$$

$$(8) \quad H^* = \frac{H}{\text{Log} K}$$

Se come detto f_i è la funzione descrittiva della densità urbana utile per descrivere lo *sprawl*, essa può essere espressa come (formula9):

$$(9) \quad f_i = \frac{\text{DEN } i}{\sum_i^K \text{DEN } i}$$

DEN i è la densità del fenomeno antropico che si vuole considerare, dunque è uguale alla superficie totale del tessuto urbano diviso per il totale della superficie disponibile, nella zona i esima su un totale di k zone; dunque non vengono prese in considerazione le porzioni di territorio occupate da corsi d'acqua o da aree non convertibili e non già urbane.

Generalmente si crede che la formula dell'entropia di Shannon abbia qualche limitazione (ricordiamo che la sua formulazione era contestuale al campo della teoria dell'informazione) in quanto potrebbe introdurre degli errori quando la si consideri per un periodo di tempo relativamente lungo o per aree differenti. D'altro canto, seppure l'intervallo di tempo considerato sia abbastanza esteso, questo studio si focalizza solamente su di una singola area; ciononostante si è provveduto anche a calcolare l'entropia nella formulazione suggerita da Batty perché è considerata orientata maggiormente verso l'aspetto spaziale della misurazione "... infatti Batty aveva chiaramente in mente la sua

dimensione spaziale quando introdusse tale formula ..” (equazione 10) (Hekkila e Hu, 2006, pag. 853)

$$(10) \quad H = - \sum_i^K f_i \text{Log} \left(\frac{f_i}{\Delta_i} \right)$$

dove Δ_i rappresenta l'estensione discreta del fenomeno considerato per i esima categoria e, come prima, f_i rappresenta la densità urbana.

Dato per assunto che l'entropia possa essere fruttuosamente impiegata per investigare la dispersione spaziale di fenomeni geografici, si è voluto osservare la differenza di entropia in tempi differenti ($\Delta H = H(t+1) - H_t$), in quanto tale differenza può essere considerata indicativa del cambiamento del grado di dispersione del fenomeno considerato (diffusione urbana o *sprawl*) (Yeh e Li, 2001). Quando si intende prendere in considerazione l'entropia, la scelta di un sistema di divisione in zone dell'area considerata è di fondamentale importanza; il numero delle zone non deve essere troppo numeroso perché ciò potrebbe influenzare negativamente il calcolo generale e quindi portare ad una sovrastima dell'entropia stessa (Hekkila e Hu, 2006); altresì l'entropia dovrebbe essere sufficientemente accurata per fornire le informazioni necessarie allo studio del fenomeno su cui questa ricerca si focalizza, ovvero lo *sprawl*. Il sistema di zonizzazione utilizzato per dividere la porzione del territorio pordenonese considerata, ricalca i confini municipali della provincia di Pordenone ed in tal modo si è divisa l'area metropolitana in sei zone (Fig. 25).

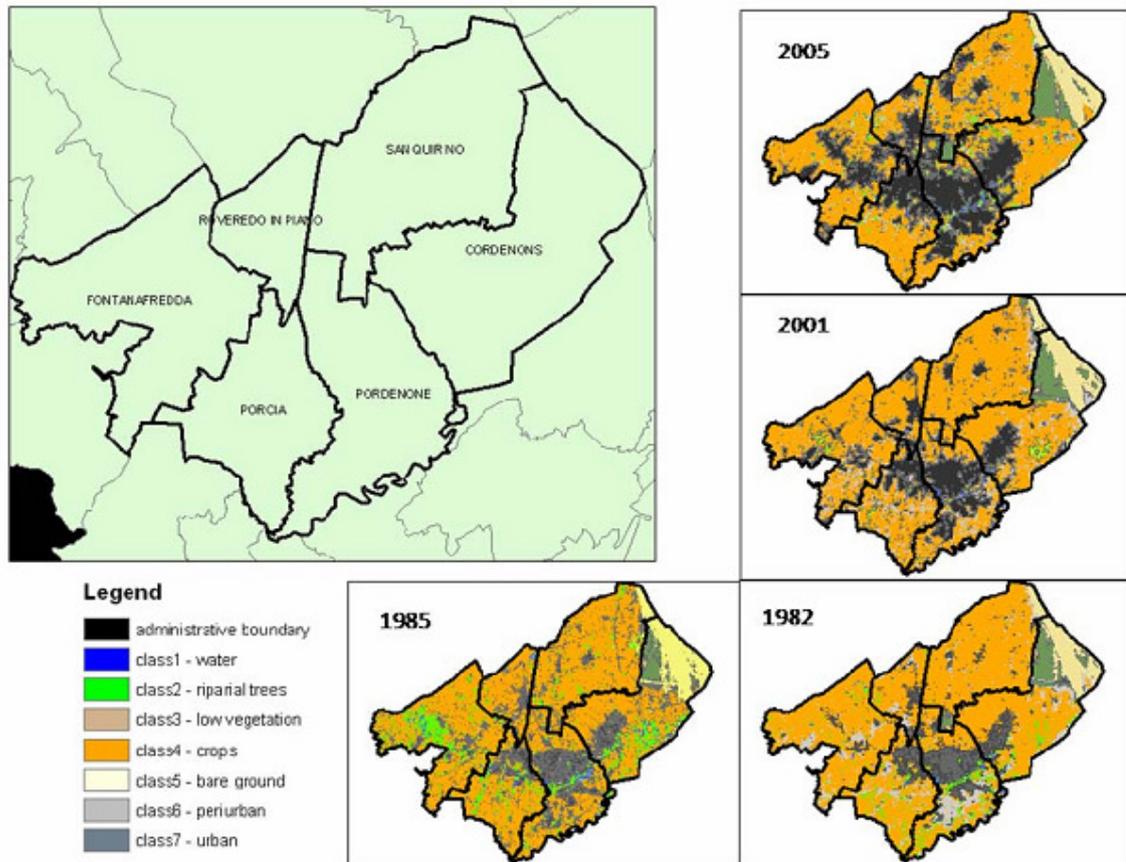


Figura 25: Quadro d'insieme delle 6 municipalit  analizzate con le 4 carte tematiche derivate dalla classificazione *Machine Learning*.

4.4.2 Risultati e proposta di un indice per l'analisi diacronica dello sprawl

La simulazione ottenuta tramite l'applicazione del modello SLEUTH   servita per ottenere dati dell'espansione urbana e delle transizioni di uso del suolo sino al 2050. Probabilmente il periodo preso in esame   troppo lungo, perch  ben si sa che il modello   in grado di restituire risultati accurati ed affidabili quando l'intervallo di previsione   ampio tanto quanto, o inferiore, all'intervallo di tempo cui fanno riferimento i dati storici utilizzati per calibrare il modello stesso (Dietzel e Clarke, 2007). Tuttavia la fase di calibrazione   stata effettuata in maniera molto affinata ed i valori di accuratezza calcolati con l'OSM hanno

raggiunto valori superiori allo 0.3. Come detto la misura OSM è una misurazione composta di otto indicatori di accuratezza differenti, che varia in un *range* da 0 a 1; nel panorama delle precedenti applicazioni di SLEUTH i valori ottenuti con la calibrazione effettuata in questa ricerca sono considerati generalmente molto buoni; i valori dei coefficienti usati per calibrare il sistema ed i relativi valori di OSM sono rappresentati in tabella 11. Questi valori sono stati impiegati poi al termine della calibrazione per derivare i coefficienti sulla base dei quali è stata effettuata la simulazione (Tab: 12).

<i>OSM</i>	<i>Diff</i>	<i>Brd</i>	<i>Sprd</i>	<i>Slp</i>	<i>Road</i>
0.30	10	83	86	44	55
0.28	8	83	86	44	57
0.27	11	83	86	42	54
0.27	11	83	86	44	57
0.27	11	83	86	44	57
0.26	10	83	86	44	54
0.26	11	83	86	44	53
0.26	11	83	86	42	57
0.26	11	83	86	43	55

Tabella 11: Coefficienti derivati dal processo di calibrazione e relativo valore dell’OSM.

<i>year</i>	<i>diffus</i>	<i>spread</i>	<i>breed</i>	<i>slp_res</i>	<i>rd_grav</i>
1992	10.62	91.29	88.11	35.75	55.83
2001	11.61	99.84	96.36	15.29	57.87
2005	12.08	100	100	4.77	58.92

Tabella 12: Valori dei coefficienti impiegati per la simulazione.

La descrizione dell’espansione urbana sino al 2050 ottenuta tramite i risultati della simulazione SLEUTH sino al 2050 è risultata sovrastimata; ciò può essere dovuto al fatto che alcuni errori sono stati introdotti dal fattore temporale, in quanto la simulazione ha interessato un intervallo di tempo troppo ampio; pertanto sono stati modificati i coefficienti di calibrazione responsabili della lettura dell’espansione urbana. Nello specifico hanno

subito un decremento, in modo da influenzare in maniera leggermente inferiore il fenomeno di *sprawl* e da ottenere dei risultati più veritieri e plausibili (*dataset b*); tale riduzione è stata effettuata in maniera soggettiva sulla base di un confronto incrociato con i valori utilizzati dalle altre applicazioni del modello SLEUTH operate per regioni differenti. Congiuntamente a ciò al modello è stata aggiunta un'altra leggera implementazione; generalmente le simulazioni SLEUTH precedentemente operate hanno assunto che tutte le aree oggetto di urbanizzazione nel 90% delle iterazioni Monte Carlo sono da considerarsi urbane al termine della simulazione. Tale livello di accuratezza (*confidency* – ovvero probabilità di essere realmente ‘urbano’ al termine della simulazione) è stato modificato al fine di descrivere le aree urbanizzate con maggior precisione ed è stato incrementato a 99%. Dal confronto fra le due simulazioni effettuate sui due *dataset* (a e b) ai quali è stato assegnato un livello di confidenza differente, si è potuto notare, sia tramite interpretazione visiva che con analisi geo-statistica, che i risultati di estensione urbana e cambiamento di uso del suolo sono praticamente identici fino al 2037, ma essi mostrano marcate differenze quando tale data viene sorpassata (Fig. 26). Tale osservazione permette quindi di osservare 2 cose: come la riduzione oggettiva dei coefficienti abbia realmente implementato l'accuratezza della simulazione e come il modello reagisca veramente in maniera ottimale se l'intervallo di dati nel passato ha circa la stessa ampiezza temporale della previsione per il futuro.

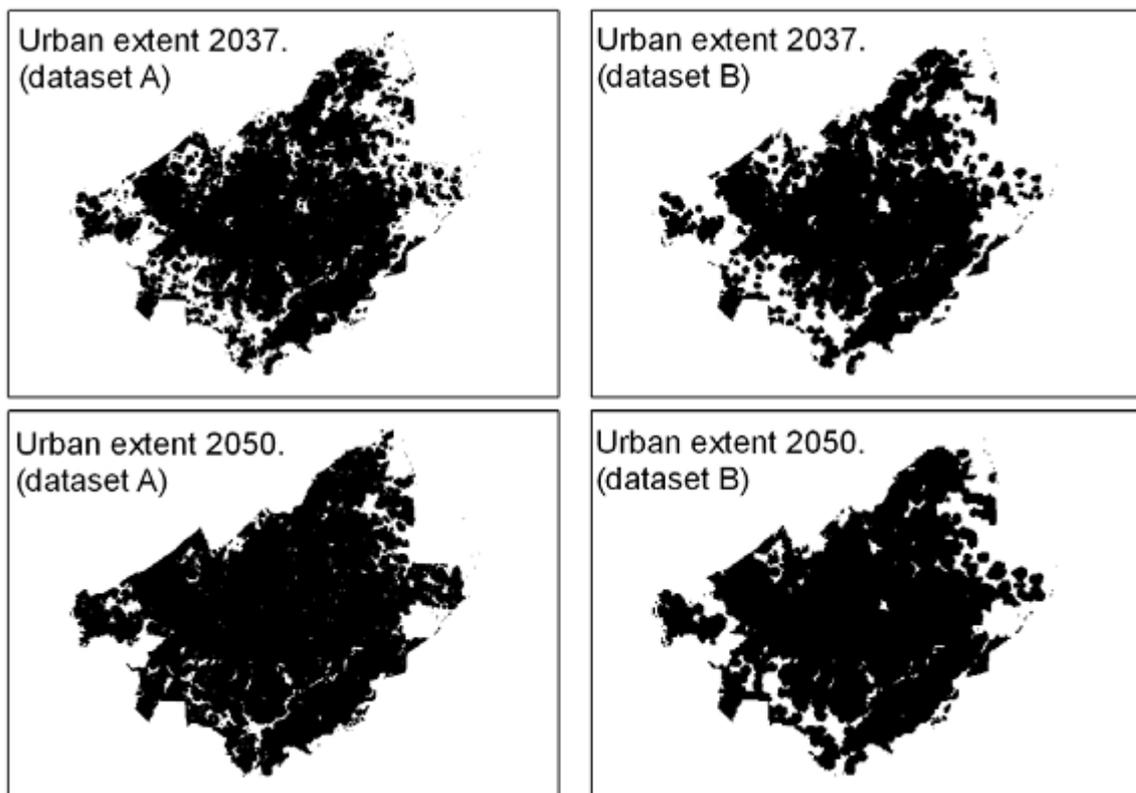


Figura 26: Confronto tra i risultati ottenuti mediante due *dataset* di *input* differenti (a e b) per il 2037 ed il 2050

I risultati della simulazione proposti rivelano che l'area considerata dovrebbe subire l'effetto di un processo di consistente urbanizzazione e nel 2050 il tessuto urbano dovrebbe essere aumentato in estensione di circa il 90% se comparato a quello del 2005. Ciò implica che il lasso di tempo necessario all'urbanizzazione per raddoppiare la superficie ad uso urbano dovrebbe essere circa di mezzo secolo (Fig. 27); da questo punto in avanti tutti i risultati e le carte che verranno mostrati saranno riferiti esclusivamente alla simulazione effettuata con un livello di confidenza del 99% delle iterazioni Monte Carlo (*dataset b*).

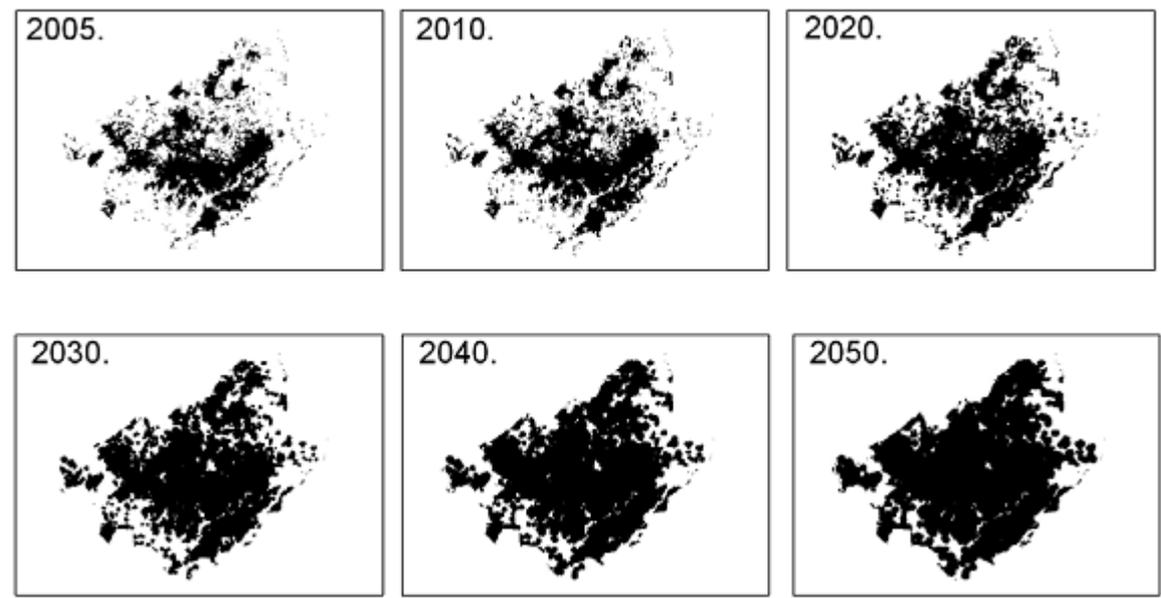


Figura 27: Ipotesi di scenari di estensione del tessuto urbano ottenute con SLEUTH.

Tramite analisi geo-statistica e tramite interpretazione visiva, è possibile osservare come il periodo compreso fra il 2005 ed il 2020 è quello in cui la maggior parte di nuovi cluster urbani viene generata, mentre dal 2020 in avanti si rileva una predominanza degli effetti dovuti alla crescita urbana organica, che porta conseguentemente alla maggior coalescenza fra gli stessi cluster. Dunque si può ipotizzare che la funzione dell'entropia dovrebbe mostrare un significativo incremento sino al 2010 per giungere ad una stabilizzazione ed ad un progressivo decremento sino al 2050 (Fig. 28).

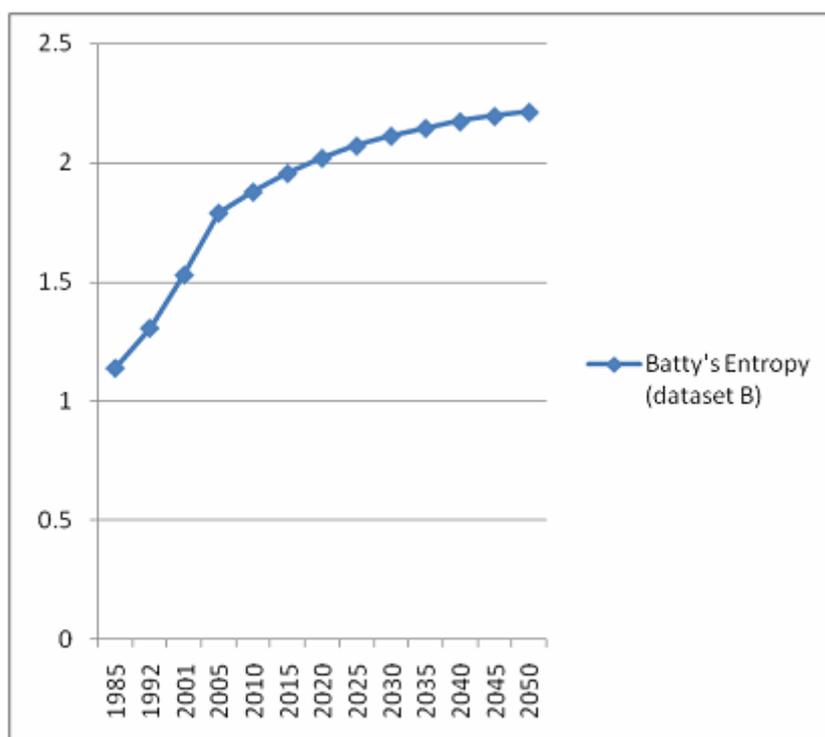


Figura 28: Curva della funzione dell'entropia per l'intervallo temporale esaminato.

Analizzando la curva che descrive l'andamento dell'entropia spaziale calcolata con la formulazione di Batty, si nota come il progressivo incremento sia dimostrato e, come intorno al 2009, vi sia un drammatico cambiamento nella pendenza di tale curva; questo in parte convalida le ipotesi di partenza, anche se il progressivo decremento previsto non è così incisivo come dovrebbe essere. Il periodo compreso fra il 2005 ed il 2010 è altresì il momento in cui l'analisi fondata sull'osservazione dei dati satellitari cede il passo alla simulazione vera e propria, quindi potrebbe essere che il cambiamento reale sia più improvviso e brusco di quello ottenuto tramite modellizzazione; varrebbe a dire che il graduale e lento rallentamento in realtà è solo apparente. Tali osservazioni devono però essere interpretate anche alla luce del fatto che l'entropia spaziale è intrinsecamente legata all'ammontare totale della superficie disponibile per i cambiamenti di uso del suolo ed al sistema di divisione in zone applicato; o altresì che l'entropia spaziale, qualora sia applicata a dati spazialmente distribuiti, possa in qualche modo essere indipendente da come in realtà

il fenomeno analizzato è realmente distribuito ed organizzato nello spazio. Infatti "... la funzione dell'entropia può essere fruttuosamente applicata a dati geograficamente distribuiti, anche se talvolta è possibile che essa rifletta una situazione completamente indipendente dalla distribuzione spaziale..." (Karlstrom e Ceccato, 2000, pag. 5). Tuttavia da questa prospettiva, al fine di investigare la distribuzione spaziale del fenomeno di *sprawl*, si dovrebbe essere in grado di ottenere ed applicare una misurazione che sia informativamente significativa delle relazioni spaziali del fenomeno, dunque dovrebbe rappresentare la sua correlazione spaziale.

La correlazione spaziale è essenzialmente un confronto fra le caratteristiche simili di due insiemi o regioni; tali somiglianze possono appartenere sia al carattere dell'elemento geograficamente distribuito sia alla localizzazione spaziale stessa (Goodchild, 1986). Una misura della correlazione spaziale può essere intesa come un indice descrittivo che analizza le geometrie del fenomeno oggetto di studio e di come esso è spazialmente distribuito; si deve però precisare che "... allo stesso tempo la misura può essere un effetto causale, in grado di determinare il grado di influenza esercitato da un fattore o oggetto sugli elementi ad esso contigui o vicini..." (Karlstrom e Ceccato, 2000, pag. 6). Tuttavia, al di là della digressione teorica che può essere funzionale per una migliore comprensione delle problematiche legate all'analisi delle distribuzioni spaziali, va tenuto presente che obiettivo principale di questa ricerca è l'osservazione dell'evoluzione temporale del fenomeno di *sprawl* associato all'espansione urbana, mediante la formulazione di una metodologia più facilmente applicabile ed immediata di quelle sinora esperite. Si tenga presente dunque che l'unico, o quasi, concetto largamente condiviso riguardante *l'urban sprawl*, è il fatto che esso si manifesta attraverso un'espansione del tessuto urbano incontrollata, disorganizzata, caratterizzata da una non contiguità spaziale a scapito delle aree circostanti. Questo concetto è strettamente legato all'analisi geometrica dell'estensione urbana; infatti due

misure che si ritengono qui in grado di cogliere tale aspetto e, dunque, fondamentali per l'analisi del fenomeno in generale sono: il numero dei cluster e l'area media dei cluster. Le due misurazioni menzionate sono state effettuate per ogni singolo strato informativo dell'intero *dataset* e sono state successivamente normalizzate al fine di ottenere dei valori che fosse possibile confrontare (Fig. 29) e sui quali fondare le osservazioni proposte di seguito.

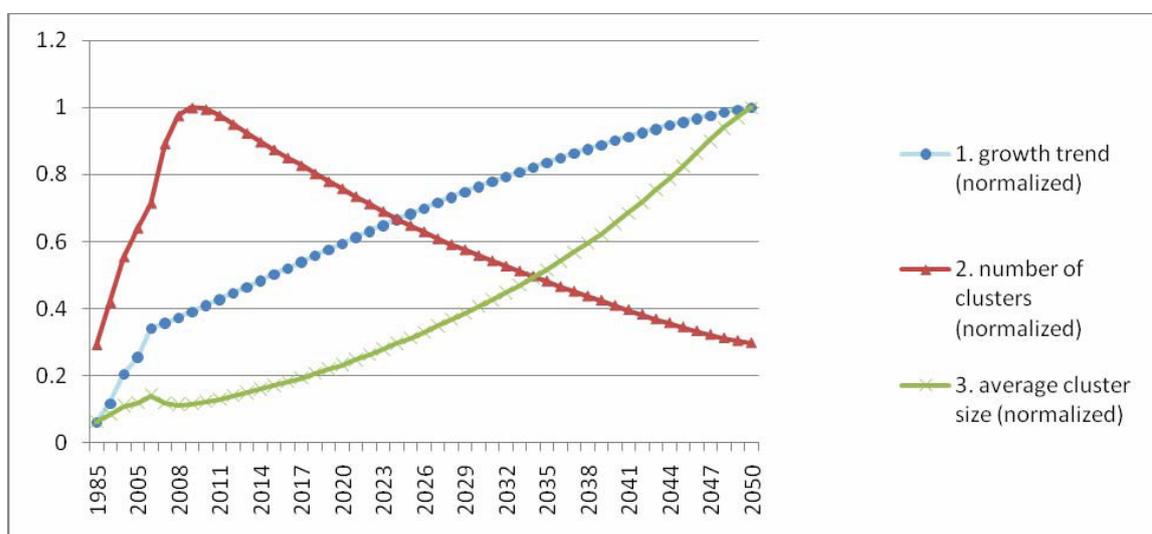


Figura 29: Curve dei *trend* normalizzati dell'espansione urbana (1), della numerosità dei *cluster* (2) e dell'area media dei *cluster* (3).

I dati ottenuti sono indicatori di una situazione in cui la crescita spaziale del tessuto urbano è continua e graduale nel tempo; contestualmente a ciò però si può osservare come, benché l'area media dei cluster, generalmente parlando, cresca gradualmente, la numerosità dei cluster, al contrario, inizialmente abbia una vertiginosa crescita che giunge ad un punto di massimo e poi decresce; quasi contemporaneamente la curva che descrive l'andamento dell'entropia di Batty mostra il significativo cambio di pendenza (Fig. 28), approssimativamente nel 2009. Questa osservazione induce perciò a credere che il momento in cui si registra (o si dovrebbe osservare) il massimo *sprawl* nell'area di Pordenone è quando la distanza fra le curve 2 e 3 (in Fig. 29) è massima; mentre quando

esse trovano un punto di incontro, circa nel 2034, è il momento in cui lo *sprawl* cede il passo ad un'espansione maggiormente influenzata dalla crescita organica, o coalescenza, dell'area urbana. Al fine di osservare con efficacia e quindi descrivere con cura l'espansione urbana di Pordenone, si è proceduto col sintetizzare e formulare un indice che possa essere esemplificativo dei risultati e delle dinamiche descritte dalla numerosità dei *cluster* e dall'area media dei *cluster*; tale formalizzazione è stata effettuata tenendo presente che l'indice sviluppato sia significativo ed in grado di sintetizzare le informazioni esplicitate dalle misure riguardanti i *cluster* urbani, ma sia altresì applicabile ed equivalente qualora sia applicato per l'analisi di altre aree urbane. Si crede dunque che il rapporto fra la differenza dei valori normalizzati di numerosità dei *cluster* e dei valori normalizzati dell'area media dei *cluster* (Formula 11) sia uno strumento utile e performante; qui descritto nella forma:

$$(11) \frac{[nc-na]}{[nc+na]}$$

dove *nc* è il valore normalizzato per l'intero intervallo di tempo della numerosità dei cluster che si riferisce ad un preciso momento (*Ti*); analogamente *na* è il valore normalizzato dell'area media dei cluster per il medesimo momento considerato (*Ti*) (Fig. 30).

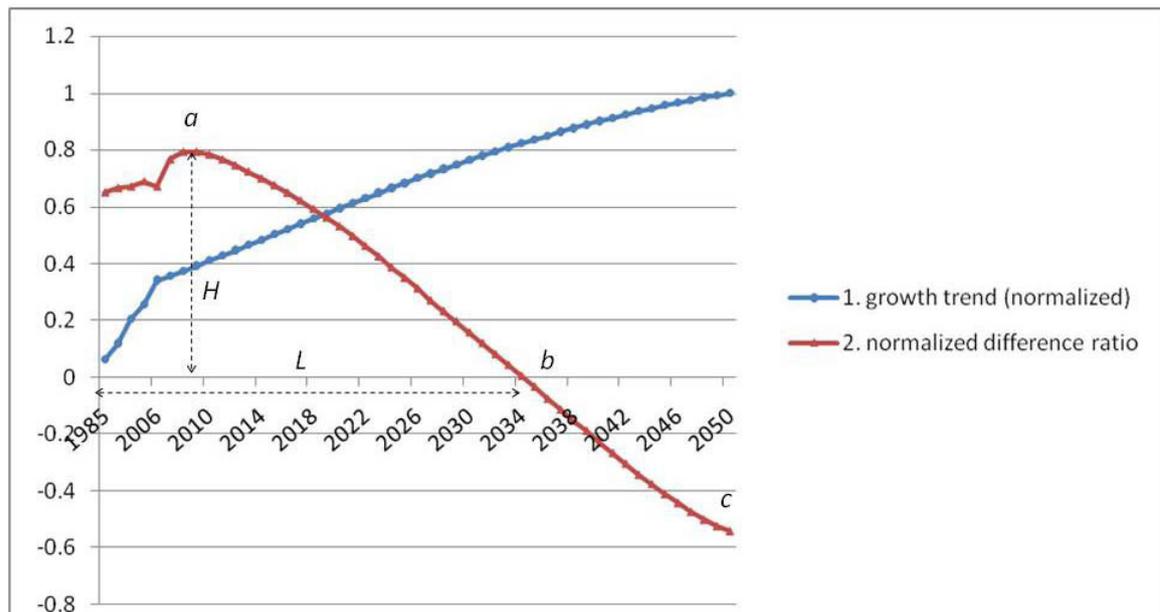
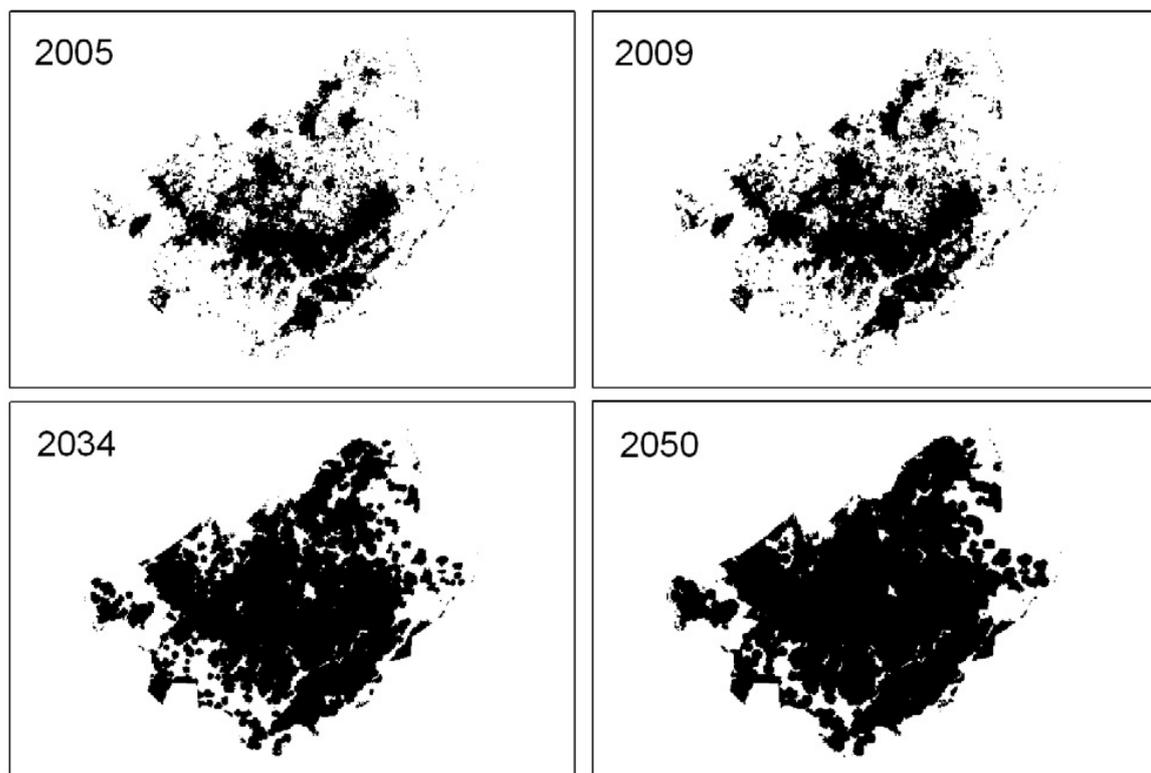


Figura 30: Curve che descrivono i *trend* di crescita normalizzata (1) e della funzione espressa dalla formula 11 (2) ovvero il rapporto fra la differenza e la somma dei valori normalizzati di numerosità dei *cluster* e area media dei *cluster*.

La curva qui proposta assume valori positivi quando l'influenza del parametro descritto da nc è maggiore rispetto a quella del parametro na ; quindi se la curva è sopra l'asse delle ascisse (x) l'espansione urbana è maggiormente influenzata dalla numerosità di cluster spazialmente non contigui e dispersi che non dalla loro area media. In altre parole valori positivi della curva sono indicativi di una crescita caratterizzata da *sprawl* piuttosto che da coalescenza.

Il momento di massimo *sprawl* è rappresentato dal punto di massima distanza fra la curva e l'asse delle x (nel nostro caso nel 2009), il che significa che in quel momento si ha il maggior numero di cluster urbanizzati non contigui per l'area oggetto di studio nell'intervallo di tempo preso in esame. In virtù del fatto che tale valore è in realtà il frutto di misurazioni relative e non assolute, tale indice è applicabile a qualsiasi città o regione. L'espansione urbana è un processo che visibilmente alterna periodi di coalescenza a periodi di *sprawl*, dunque il cambiamento da un tipo predominante di crescita all'altro è un

fenomeno graduale e non brusco (Dietzel et al., 2005a). Quando la curva disegnata dall'indice qui proposto intercetta l'asse delle x essa riflette il momento in cui la crescita è ugualmente influenzata da *sprawl* e da coalescenza (anno 2034) (Figg. 29 e 30). Dopo questo momento la simulazione mostra che l'andamento dell'espansione urbana è influenzato maggiormente dalla crescita organica ed esso continua nel futuro sino, ipoteticamente parlando, ad esaurire lo spazio disponibile per l'urbanizzazione; quando la curva mostra il suo punto di minimo, è il momento in cui l'espansione geografica dell'area urbana è massima (Fig. 30).



In precedenza si è già spiegato, guardando la figura 30, come il momento di massimo *sprawl* sia rappresentato dal punto a , momento in cui la curva ha il suo punto di massimo in quanto influenzata dal momento di massima numerosità dei *cluster*; analogamente possiamo osservare e ipotizzare che l'intensità dello *sprawl* sia rappresentata dalla distanza (H) di a e l'asse delle x ; seguendo questo ragionamento allora possiamo considerare la

distanza (L) come rappresentativa dell'intervallo di tempo in cui avviene lo *sprawl*. Nel punto b si registra, nel nostro caso, l'inversione di tendenza nella modalità di crescita; da questo momento in avanti sarà la coalescenza, e non più lo *sprawl* la maggior responsabile dell'espansione urbana; quando la curva giunge in c (per quanto ne sappiamo, in quanto la simulazione termina con l'anno 2050) il punto di minimo della curva è significativo della massima estensione urbana raggiunta e della massima influenza della coalescenza sulla sua espansione nell'intervallo di tempo investigato.

I risultati sin qui esposti riguardano un caso di espansione influenzato da un graduale e progressivo aumento dell'estensione urbana; tuttavia si è qui interessati a trovare dei sistemi investigativi che possano essere largamente applicati, e non applicabili solo al caso di studio particolare; dunque si è anche interessati a scenari futuri che riflettano il caso in cui vi sia una transizione di uso del suolo a tendenza inversa, ovvero da urbano ad altre classi, dunque a ciò che viene comunemente definito come decrescita urbana; questo è un fenomeno le cui cause possono essere molteplici, per esempio esso può verificarsi in seguito a disastri naturali (New Orleans) o in seguito ad una forte crisi economica che colpisce un settore precisamente localizzato (Detroit) o ancora in seguito a spopolamento (si pensi per esempio all'antico insediamento romano di Aquileia, un tempo cittadina importante ed oggi piccolo villaggio). Abbiamo impiegato la misura sviluppata sulla differenza del rapporto normalizzato per investigare una base di dati non reale derivata da dati reali che fosse in grado di rappresentare il comportamento oscillatorio tra crescita e decrescita (figura 31). Questo *dataset* mostra l'andamento dell'espansione urbana di Pordenone dal 2050 al 2100 semplicemente ribaltando simmetricamente l'esperienza di crescita registrata tra il 1985 ed il 2005 e quella simulata tra il 2005 ed il 2050.

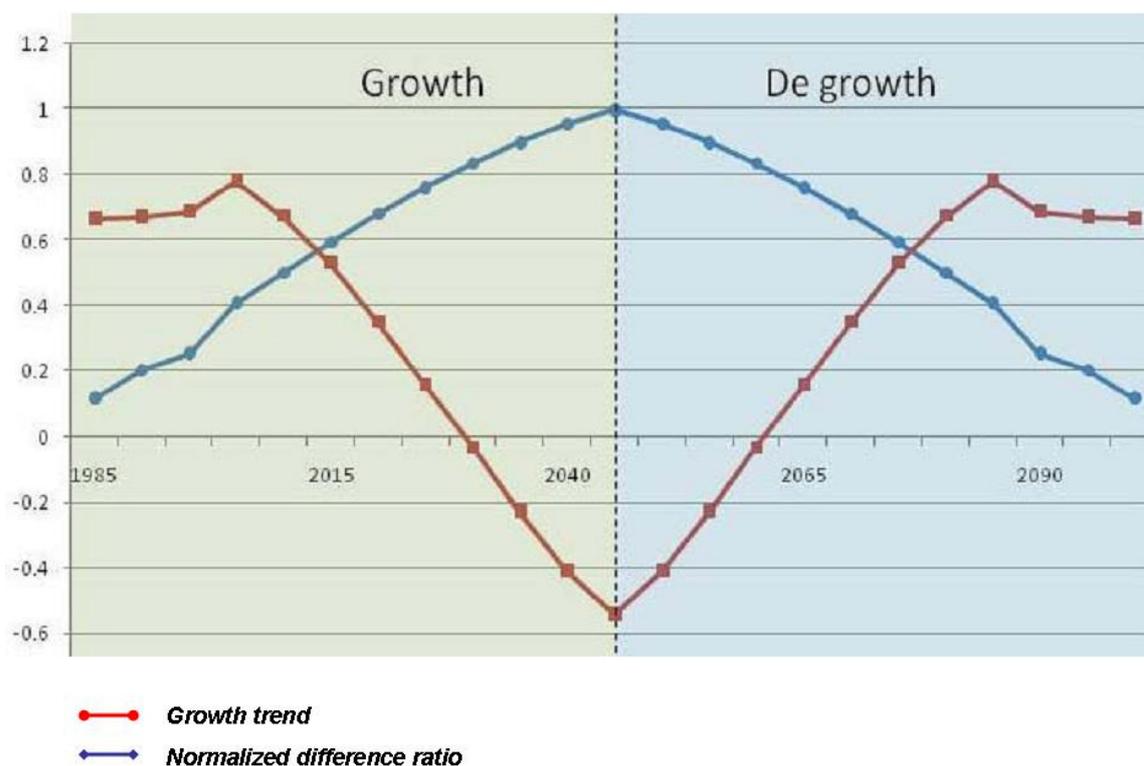


Figura 31: Applicazione della funzione espressa in formula 11 ad un *dataset* fittizio che comprende una fase di decrescita ed una di decrescita.

La figura 31 mostra come il comportamento della differenza del rapporto normalizzato convalida le nostre aspettative e le ipotesi di partenza della teoria della crescita urbana in due fasi. Infatti è ragionevole credere che la decrescita, se costante nel tempo, possa essere influenzata da *sprawl* e coalescenza allo stesso modo dell'espansione, in quanto i *cluster* urbani più lontani dal centro di maggior rilievo possono essere sistematicamente abbandonati in favore di *cluster* più centrali⁴⁷. Anche in questo caso i valori positivi mostrano una predominanza dell'influenza sul *trend* di espansione urbana dovuta al fenomeno di *sprawl* anziché alla compattezza, sia quando l'evoluzione attraversa la sua fase crescente che quella decrescente, ovvero in fase di decrescita. Dal punto di vista

⁴⁷ Questa parte della trattazione intende avere solo un valore teorico al fine della validazione dell'indice proposto (formula 10); si vuole però altresì precisare che pur restando l'andamento della curva di figura 31 non vi sono evidenze empiriche che la decrescita segua gli stessi ritmi o caratteristiche della crescita.

teorico, il rapporto normalizzato formulato in questa ricerca, dovrebbe tracciare una curva regolare, un'onda armonica, ma è facile intuire come ciò sia scarsamente probabile nel mondo reale (Fig. 32).

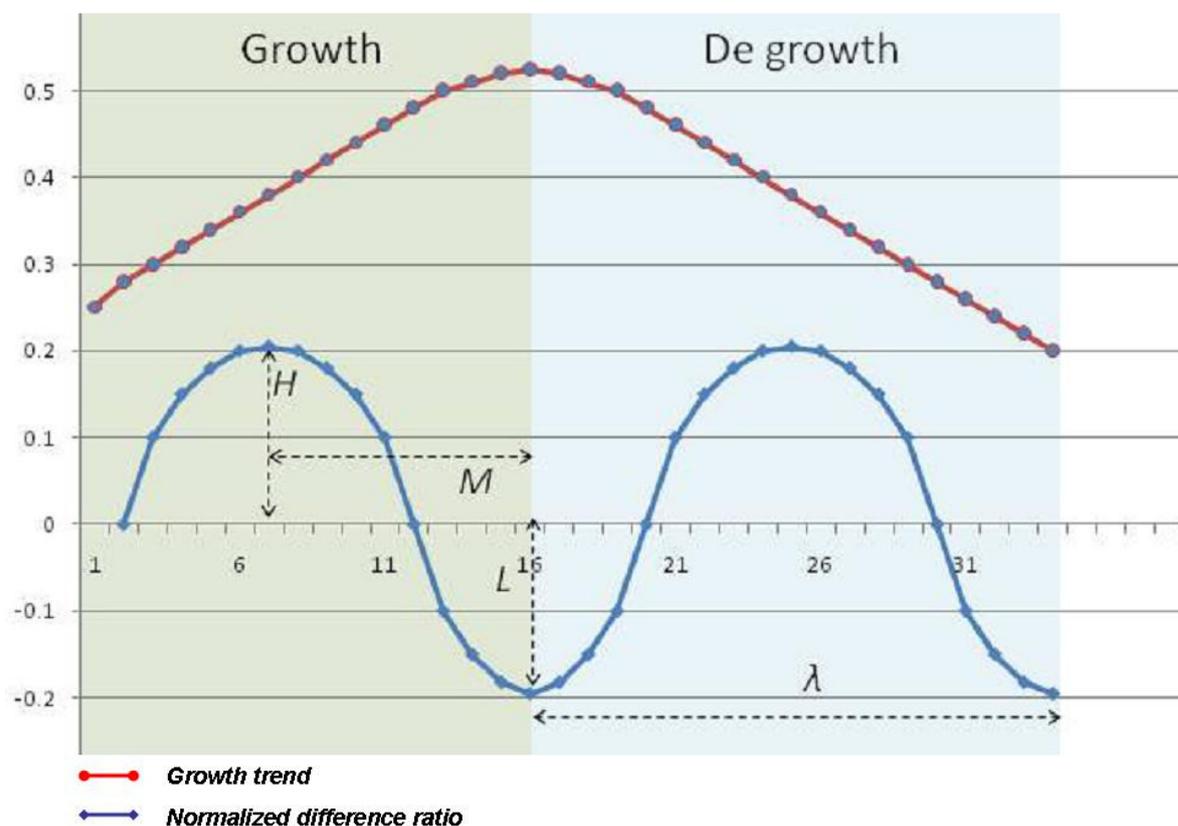


Figura 32: Concettualizzazione teorica dell'andamento della funzione (1) espressa in formula 11 (rapporto normalizzato fra numerosità e area media dei *cluster*) in una situazione ipotetica di crescita e decrescita costante (2).

Se si pone l'attenzione sul grafico di figura 32, possiamo dunque cercare di formulare alcuni concetti che possano essere applicati in via teorica a livello generale. La distanza a cui si riferisce H è indicativa dell'intensità del fenomeno di *sprawl*, L invece evidenzia l'intensità della fase di coalescenza; M , calcolata sull'asse delle x dove è rappresentata la variabile temporale, è il periodo che intercorre fra il momento di massima *sprawl* e la massima compattezza del sistema considerato; la misura che invece viene definita con λ , è

identificativa del periodo, o intervallo di tempo, in cui il sistema passa dalla minore estensione spaziale a quella massima.

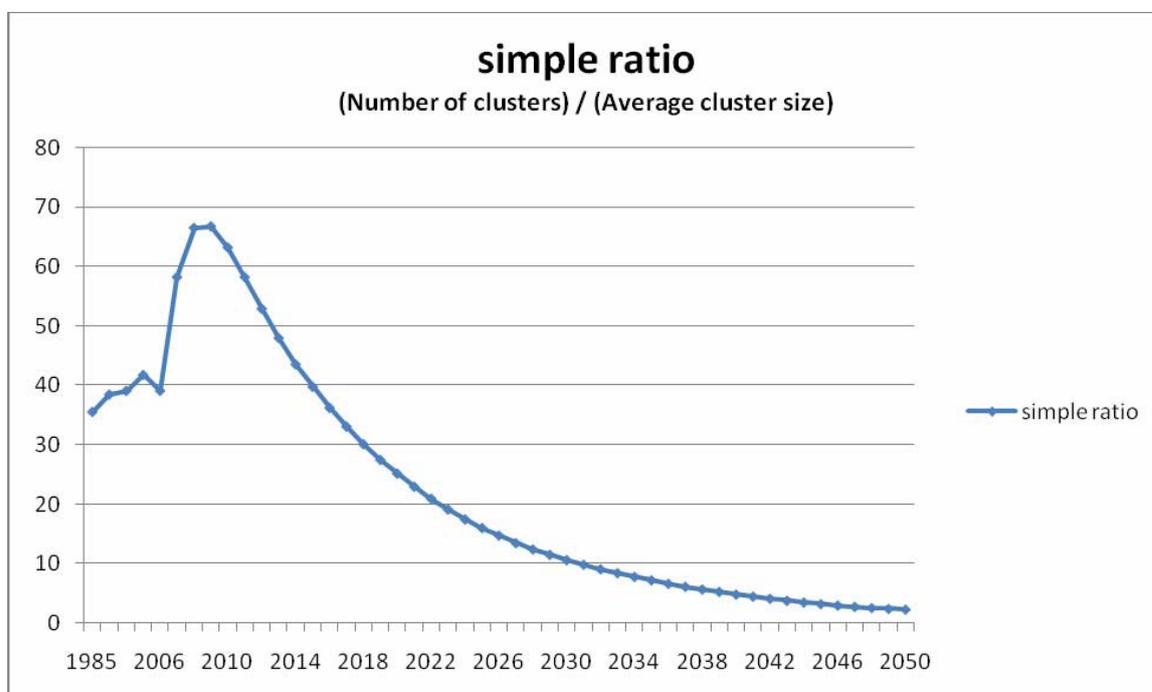


Figura 33: Curva dell'andamento del rapporto semplice fra numerosità dei *cluster* e area media dei *cluster*.

L'impiego delle generalizzazioni e dei risultati sin qui esposti, ci permette di ipotizzare il comportamento dell'espansione urbana nel tempo per l'area considerata e permette altresì di determinare se tale processo di crescita (o de-crescita) sia maggiormente condizionato dalla "sprawlizzazione", ovvero crescita disorganica, piuttosto che da coalescenza, ovvero crescita organica. Dunque sia la curva che rappresenta il *trend* evolutivo dell'espansione, sia l'indice normalizzato, sono entrambi funzionali alla classificazione del fenomeno di crescita spaziale del tessuto urbano nelle due fasi.

Per meglio definire e distinguere come e se il sistema considerato stia attraversando una fase di coalescenza o di *sprawl*, si è proceduto alla formulazione di un indice sintetico di

facile applicazione; tale è il rapporto semplice fra la numerosità dei cluster e la loro area media (Fig. 33). Dai risultati ottenuti mediante la simulazione con SLEUTH, osserviamo che l'area di Pordenone affronta adesso il periodo in cui si verifica il massimo *sprawl*, e gli effetti di tale fenomeno sono maggiormente visibili fra il 2005 ed il 2010 (probabilmente nel 2009), dopodiché il cambiamento da una crescita disorganicamente diffusa ad una coalescenza organica avviene circa nel 2034. Il rapporto semplice nel 2034 è di 7.81, il che suggerisce che ogni valore al di sotto di questo indica una situazione di crescita organica e coesa (spazialmente parlando), al contrario i valori che superano 7.81 riflettono una condizione di crescita affetta da *sprawl*. Queste ultime affermazioni devono, però, essere testate con valori storici conosciuti su un intervallo di tempo ragionevolmente ampio, in quanto i dati relativi a Pordenone, seppur significativi, non possono essere considerati esaustivi e non sono dunque in grado di chiarificare con completezza la relazione esistente fra la numerosità dei *cluster* e l'area media dei *cluster*.

In seguito ai risultati esposti sinora in questo studio si intende, in futuri lavori di ricerca, investigare tale relazione tramite un'analisi comparativa con aree urbane simili e differenti al fine di cercare analogie e differenze che possano convalidare il carattere di universalità delle misurazioni proposte. In questo modo, la geografia urbana potrebbe disporre di uno strumento in grado di osservare e quantificare oggettivamente quali città stiano attraversando una fase di *sprawl* e quali no, oppure quando ciò si è verificato nel passato e quando ciò potrebbe possibilmente accadere in futuro; inoltre tale strumento è in grado di supportare validamente studi e ricerche sulla comparazione di città e aree geografiche in maniera oggettiva. Se il fenomeno di *sprawl* potesse essere in qualche modo stimato o si potessero avere delle previsioni sul suo comportamento, sarebbe allora possibile anticiparne gli effetti sia da un punto di vista ambientale che sociale; altresì tale conoscenza

sarebbe in gran misura funzionale alla formulazione ed all'applicazione di politiche di pianificazione urbana maggiormente consapevoli e dunque maggiormente efficaci.

5. ANALISI DEI RISULTATI ED OSSERVAZIONI DI CARATTERE GENERALE

Il processo di globalizzazione, se da un lato favorisce l'intensificarsi della competizione fra città, dall'altro certamente favorisce l'accentramento ad un livello superiore e stimola la crescita e la diffusione urbana in pochi sistemi metropolitani (Sallez e Verot 1993). In molti casi, i più degni di nota delle cosiddette *global cities*, questi processi sembra diano adito ad una crescente separazione dei sistemi metropolitani dalle reti urbane regionali e nazionali di cui fanno parte. Questo tipo di frammentazione territoriale è percepita come una seria minaccia alla coesione spaziale e sociale sia dei singoli paesi che della stessa Unione Europea (*Comitè de developpement spatial*, 1996) e per contrastarla alcuni paesi suggeriscono la formazione di reti regionali costituite da città di piccola o media dimensione.

Questo indirizzo volontario, basato su relazioni di complementarità e prossimità, dovrebbe contribuire a rendere possibile la competizione dei sistemi urbani più deboli con quelli più forti, permettendo loro di agire sinergicamente come un singolo più grande sistema urbano (Camagni 1993). D'altro canto, in uno studio presentato da Bonavero e Dematteis nel 1997, si evidenzia come il processo di globalizzazione non necessariamente separi le città dalle reti urbane di appartenenza o dal contesto regionale a cui appartengono. Analogamente si obietta come difficilmente la coesione regionale possa essere ottenuta stimolando la competizione fra sistemi formati da città di piccole o media dimensione e sistemi metropolitani.

Un'ipotesi alternativa, ma verosimilmente più efficace e perseguibile, consiste nel favorire e supportare reti che includano i centri dei sistemi metropolitani a scala regionale e globale; ovvero si suggerisce la formazione di reti che abbiano almeno un centro metropolitano (o

uno potenziale) collegato con città di rango inferiore non solo da relazioni gerarchiche ma anche da funzioni complementari ed attività svolte in maniera sinergica. È possibile notare una persistente corrispondenza fra i valori che determinano la classificazione e quelli che definiscono la rete di interazione ad un livello sovra-regionale. Ciò suggerisce l'ipotesi che qualora un sistema urbano sia efficacemente integrato nella rete di appartenenza, esso partecipi attivamente ed in maniera sostanziale, assieme agli altri nodi componenti la rete, ad una molteplicità di attività e di suddivisione del lavoro che faciliti l'accesso alle reti globali. Si può considerare come probabile anche un effetto di causalità inversa, ovvero, che il sistema urbano che meglio interagisce con la rete regionale di riferimento, riceva e trasmetta impulsi all'area della rete regionale tali da rinforzare ed espandere il sistema urbano e la rete regionale stessa; in tal modo la sua importanza a livello globale aumenta e la rete regionale intensifica le relazioni con i sistemi metropolitani più importanti e con reti globali.

Se si applicano tali considerazioni al caso oggetto di studio vediamo che è possibile classificare Pordenone come un sistema urbano "specializzato" ed "aperto", ovvero caratterizzato da una popolazione al di sotto dei duecentomila abitanti ed al tempo stesso da una struttura produttiva specializzata maggiormente nel secondo e terzo settore; oltre a ciò gli *Open Specialized Systems* sono caratterizzati da sviluppate funzioni internazionali. Pordenone fa parte di una rete di sistemi urbani densa e caratterizzata da un articolato insieme di insediamenti (*Integrated Urban Systems*), ovvero partecipa ad un sistema regionale articolato che può essere parte di un sistema metropolitano; la città si trova pertanto in un'area periferica a reti di rango superiore per quanto riguarda sistemi metropolitani e para-metropolitani.

Essendo situata al confine tra Friuli Venezia-Giulia e Veneto, costituisce l'unico nodo di contatto tra due reti metropolitane i cui elementi centrali sono costituiti dal binomio Udine-Trieste e dalla coppia Venezia-Mestre, inoltre in tale rete è forte l'influsso del sistema transfrontaliero costituito da Gorizia e Nova Gorica. Le previsioni ottenute mediante la simulazione SLEUTH congiuntamente alle previsioni sull'aumento della popolazione derivate da dati ISTAT⁴⁸, mostrano *trend* di crescita piuttosto simili, al di là di ogni possibile inferenza sulla bontà e sull'accuratezza delle simulazioni effettuate. Ciò suggerisce la direzione secondo il contesto teorico proposto da Dematteis, nella quale il sistema urbano in questione dovrebbe mutare la sua struttura e gradualmente assurgere al rango di *Major* o *Major Dynamic Open System*, ovvero al rango di un sistema metropolitano caratterizzato da una produzione terziaria diversificata e completa e da un esaustivo ventaglio di funzioni internazionali. Tale ipotesi sembra dunque essere possibile, ed una possibile interpretazione di questo fenomeno potrebbe risiedere proprio nel fatto che Pordenone, più che situata spazialmente al confine tra due regioni, rappresenta l'unico nodo di interazione fra due reti metropolitane che operano in qualche modo distintamente ed è dunque un confine topologico più che fisico.

Come ampiamente osservato in precedenza, si può notare che l'espansione urbana di Pordenone è caratterizzata da una crescita con una doppia natura: a prevalenza di *sprawl* sino al 2009/2010; con una predominanza di coesione, o crescita organica, negli anni a seguire. Tali osservazioni possono in qualche misura suggerire una possibile interpretazione del fenomeno anche alla luce di ciò che viene descritto da Dematteis e Bonavero. L'integrazione e la partecipazione dei Sistemi Urbani Integrati con reti metropolitane ad un livello sovregionale (almeno per ciò che concerne la realtà del Sistema Urbano Italiano) passa attraverso un'espansione di centri grandi piuttosto che con

⁴⁸ L'argomento viene trattato più in dettaglio nel paragrafo 5.3.

la creazione forzata di una rete costituita da una molteplicità di realtà di media o piccola dimensione in competizione fra loro. La simulazione effettuata descrive un'accelerata espansione dell'area metropolitana Pordenonese; in un primo momento la spinta maggiore è data da una diffusione spaziale che ha come conseguenza la costituzione di una rete di maggiori dimensioni, secondariamente invece la crescita è condizionata, e funzionale, al rafforzamento della coesione territoriale; ciò pare ragionevole in quanto :”... un recente studio sull'integrazione Europea dei Sistemi Urbani Italiani mostra come i processi di globalizzazione non separino necessariamente le città dalle loro reti regionali. I più importanti e recenti, casi di sviluppo urbano in Italia sono accompagnati dalla formazione di reti regionali metropolitane, nelle quali un centro di rango superiore è collegato a centri di rango inferiore da relazioni gerarchiche, complementari e sinergiche.” (Dematteis 1997, pag. 331).

5.1 Presentazione delle carte di ipotesi di diffusione urbana

Le carte di previsione di scenari futuri generate mediante l'applicazione del modello *Sleuth* suggeriscono che il momento di massima diffusione urbana dovrebbe verificarsi contestualmente al periodo a cavallo fra il 2009 ed il 2010 per poi gradualmente lasciare il passo ad una maggiore coalescenza. Come detto in precedenza, il modello è sufficientemente accurato per un intervallo di tempo nel futuro, ampio tanto quanto l'intervallo temporale coperto dall'indagine storica; d'altronde abbiamo visto (vedi paragrafo 4.4) dal confronto effettuato con i risultati dei due *dataset* differenti, come i risultati della simulazione effettuata possano essere considerati efficaci circa sino alla metà dei futuri anni trenta (la simulazione è stata comunque condotta sino al 2050). Un'ulteriore validazione del processo di simulazione è stata effettuata con un *accuracy assessment* dello

scenario ipotizzato per l'anno 2010. La stima dell'accuratezza è stata effettuata creando un'immagine-differenza dell'estensione urbana classificata nel 2005 (dati storici) e confrontandola con l'estensione urbana ottenuta dalla simulazione per l'anno 2010 (dati previsionali); su questa è stata generata una serie di punti in maniera *random* che sono stati sovrapposti alle immagine ad alta risoluzione della copertura *Digital Globe* del 2009 offerta da *Google Earth*, al fine di verificarne la relativa corrispondenza (o la mancata corrispondenza) con l'edificato urbano.

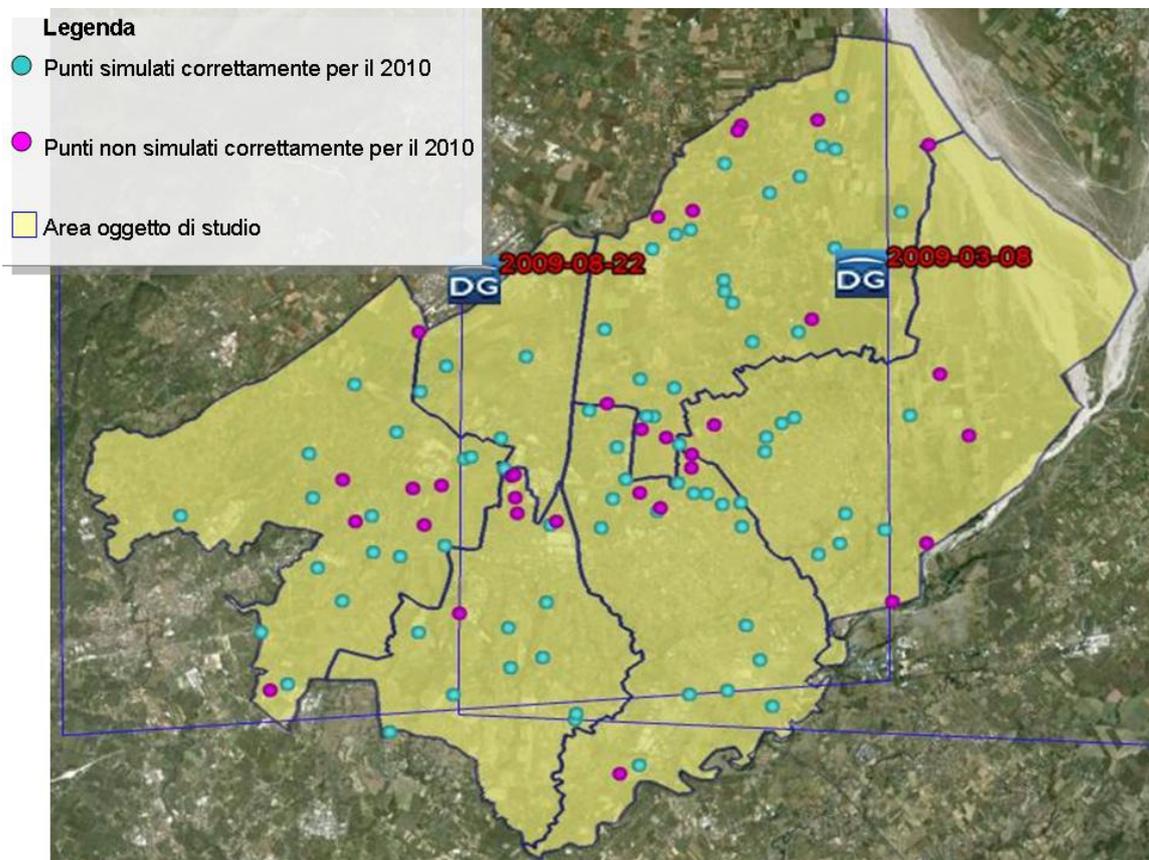


Figura 34: Insieme dei punti di controllo simulati correttamente e non, utilizzati per l'*accuracy assessment* della simulazione per l'anno 2010.

Su un totale di 112 punti solamente 33 non sono risultati simulati correttamente, quindi oltre il 70% dei punti investigati è risultato convalidare lo scenario previsto dalla simulazione. Gli scenari futuribili ottenuti mediante l'elaborazione previsionale mostrano il sensibile e costante aumento dell'estensione del tessuto urbano; basti notare come la

simulazione ipotizzata per l'area interessata un aumento della superficie urbana pari ad oltre il 90% entro il 2050 (Figure dalla 35 alla 43).

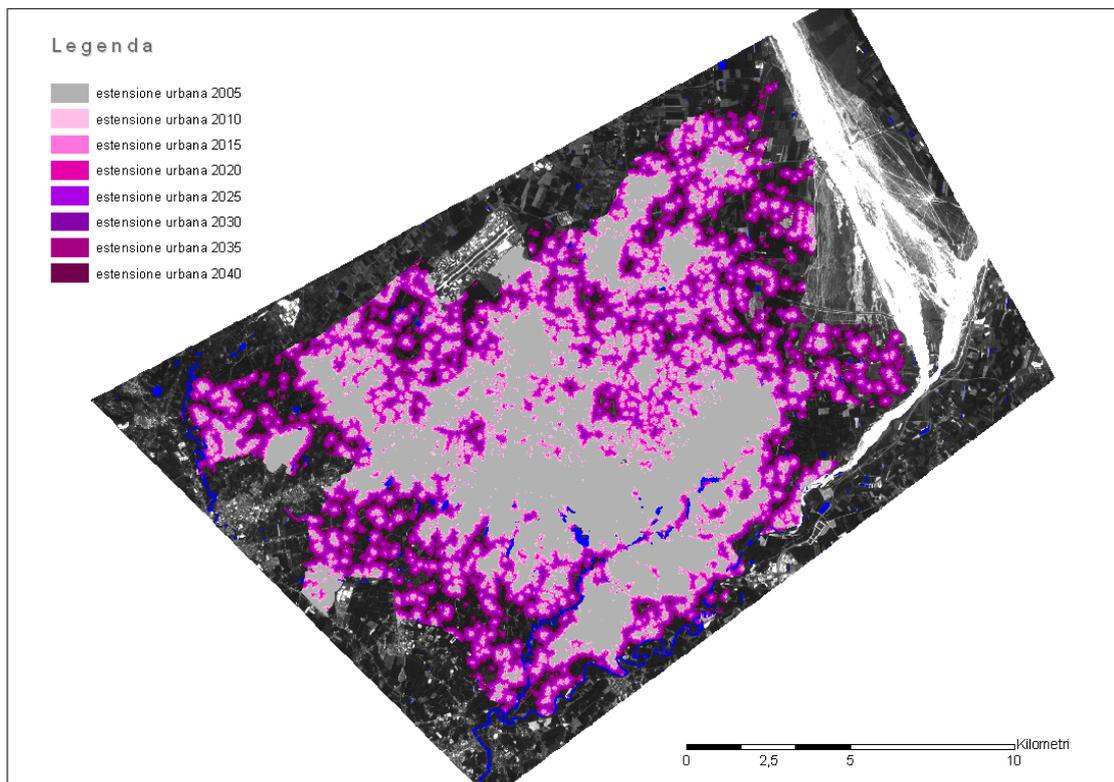


Figura 35: Carta tematica dell'espansione diacronica del tessuto urbano dal 2005 al 2040 ottenuta mediante simulazione SLEUTH.

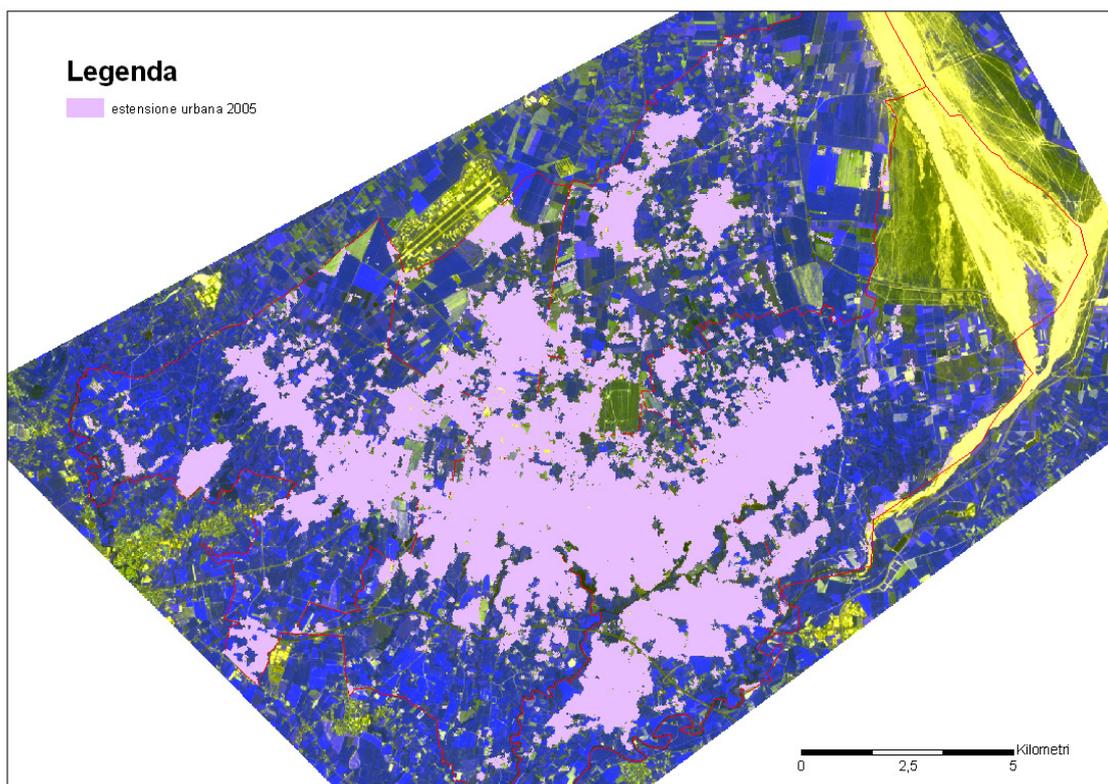


Figura 36: Estensione del tessuto urbano nel 2005 ottenuto tramite foto interpretazione.

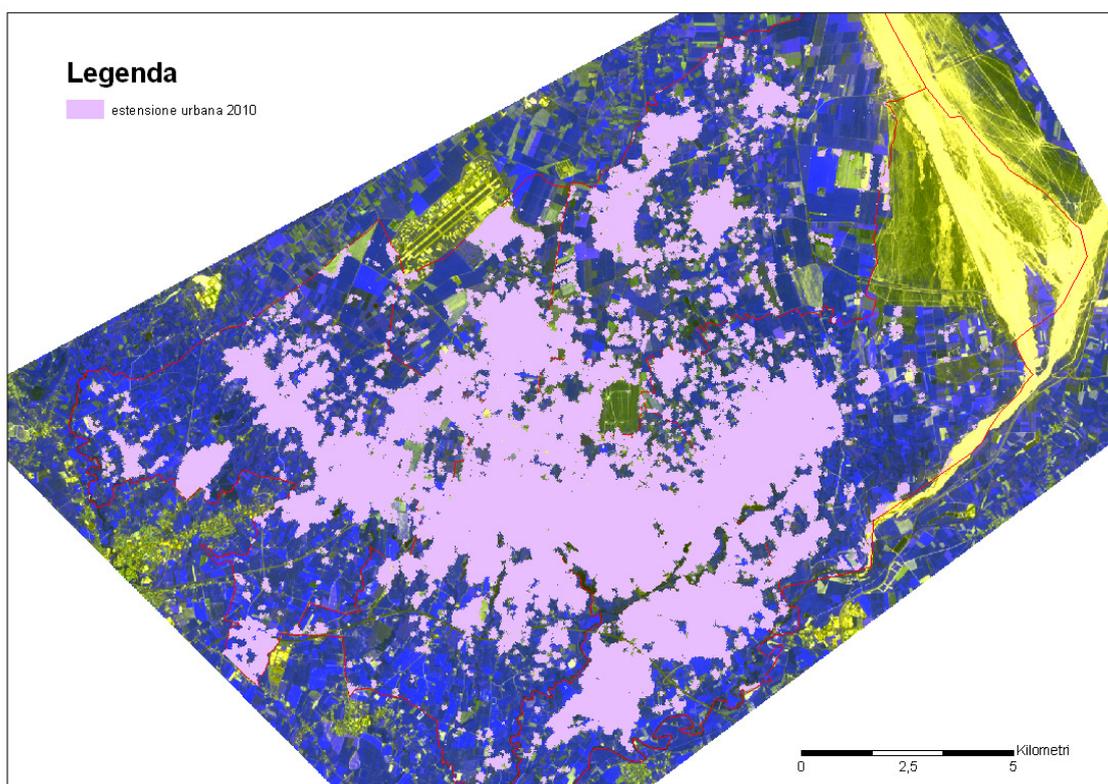


Figura 37: Estensione del tessuto urbano nel 2010 ottenuto mediante simulazione.

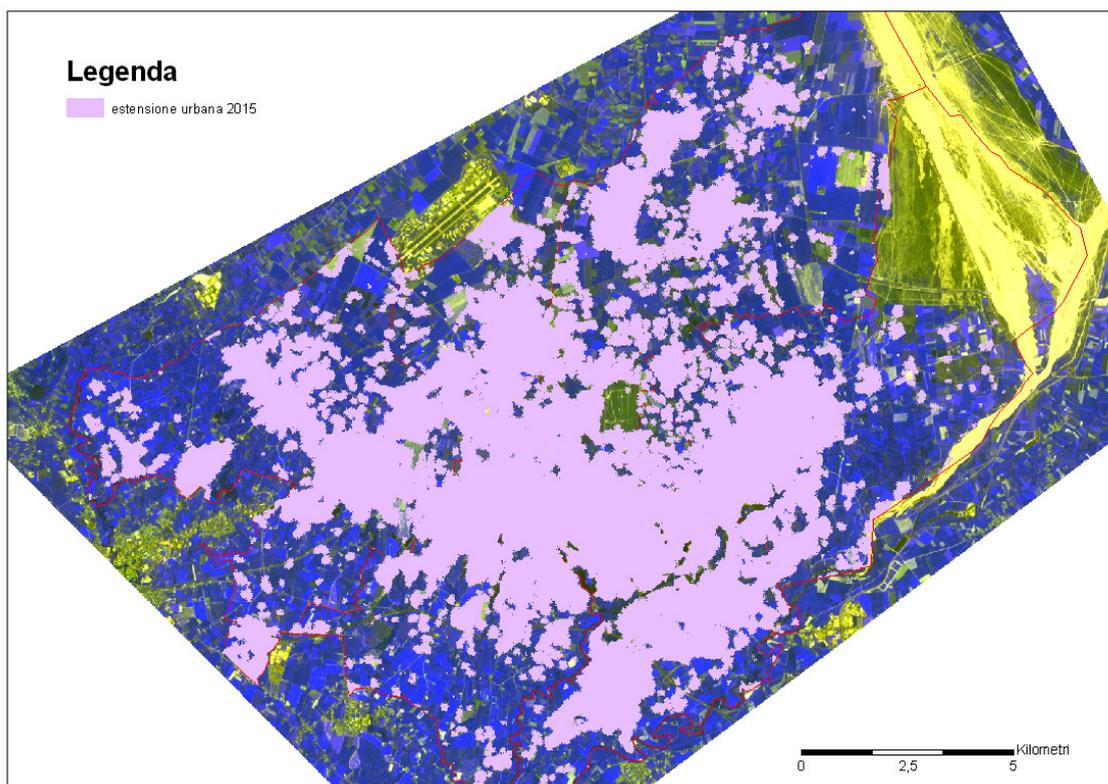


Figura 38: Estensione del tessuto urbano nel 2015 ottenuto mediante simulazione.

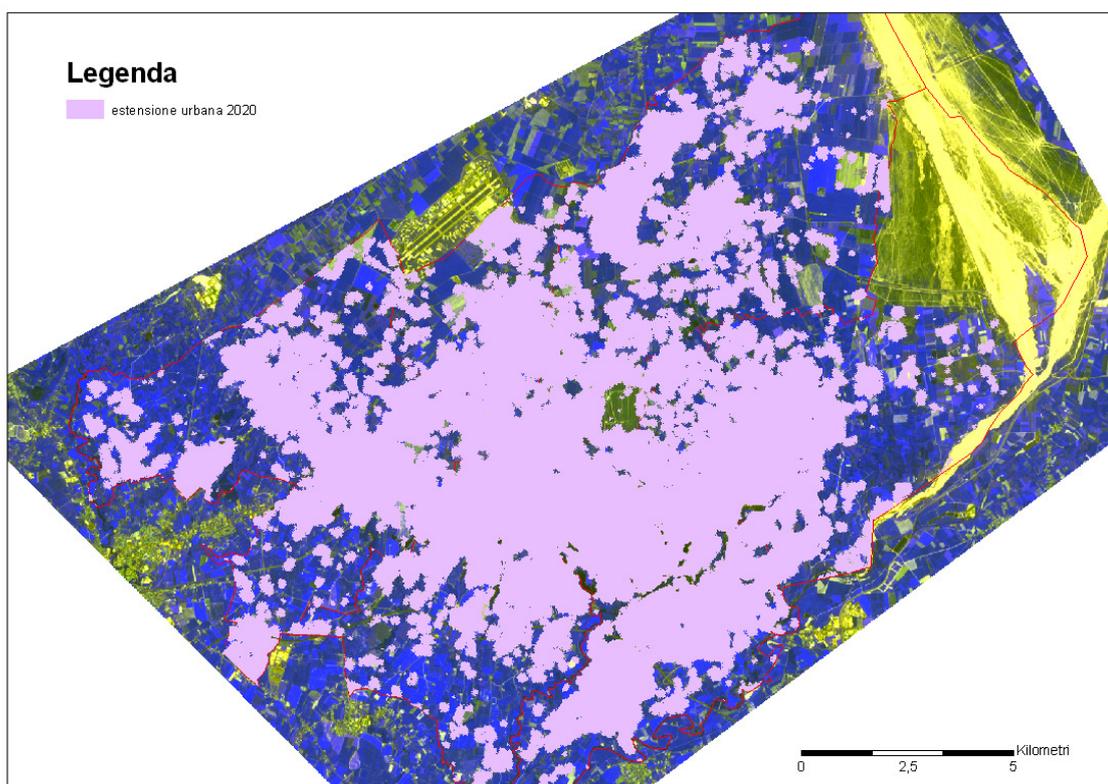


Figura 39: Estensione del tessuto urbano nel 2020 ottenuto mediante simulazione.

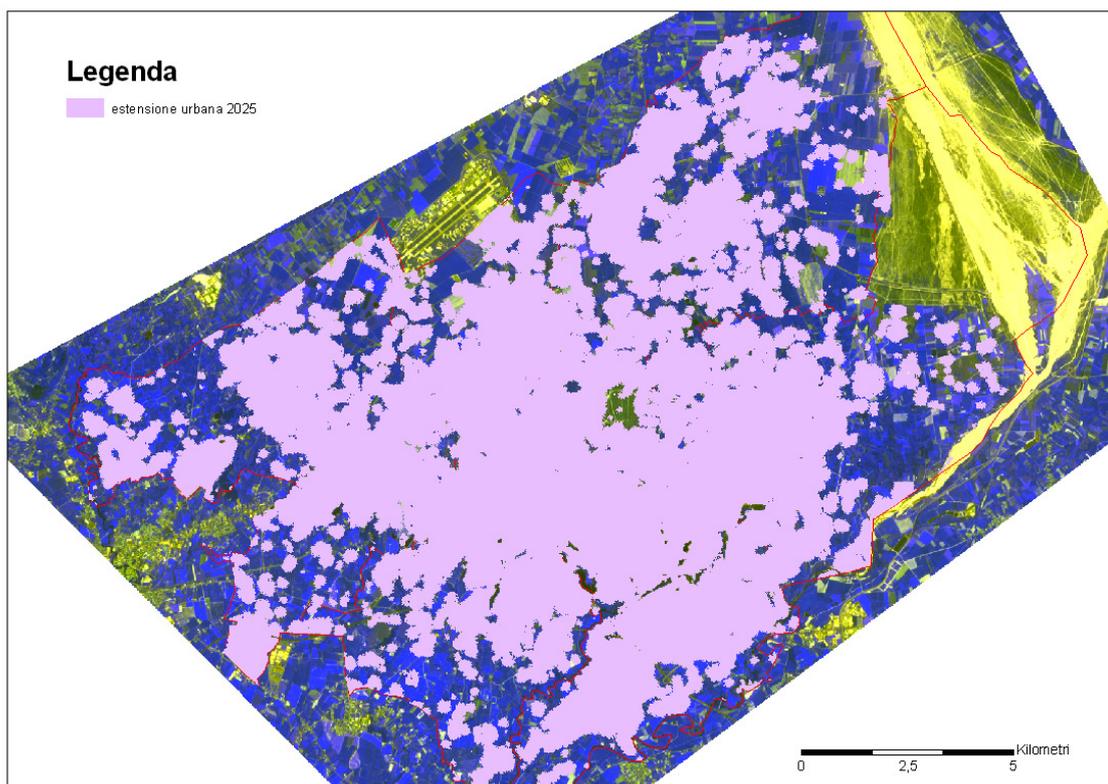


Figura 40: Estensione del tessuto urbano nel 2025 ottenuto mediante simulazione.

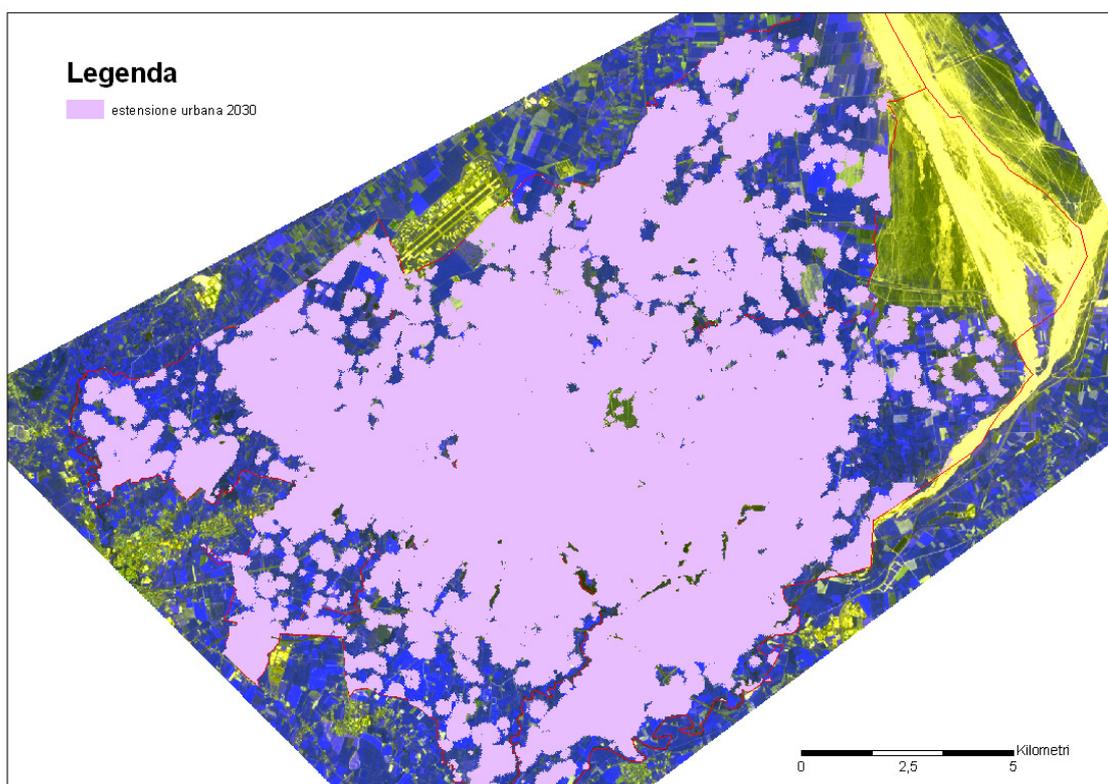


Figura 41: Estensione del tessuto urbano nel 2030 ottenuto mediante simulazione.

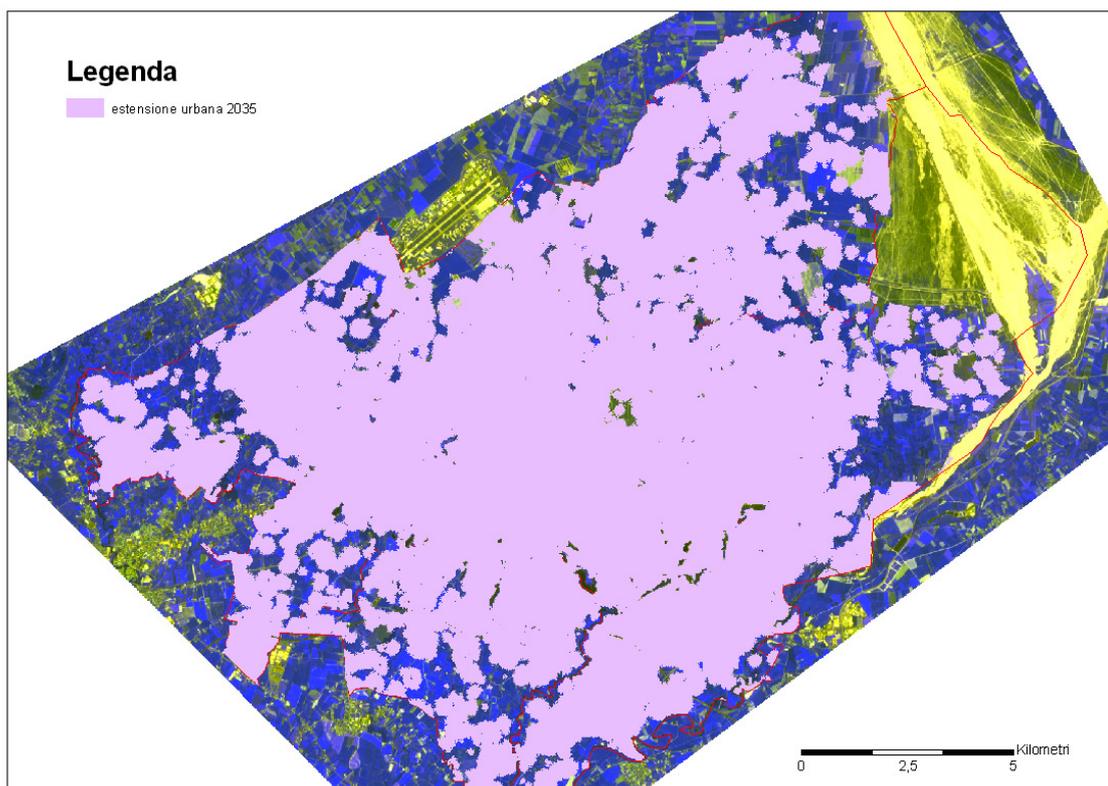


Figura 42: Estensione del tessuto urbano nel 2035 ottenuto mediante simulazione.

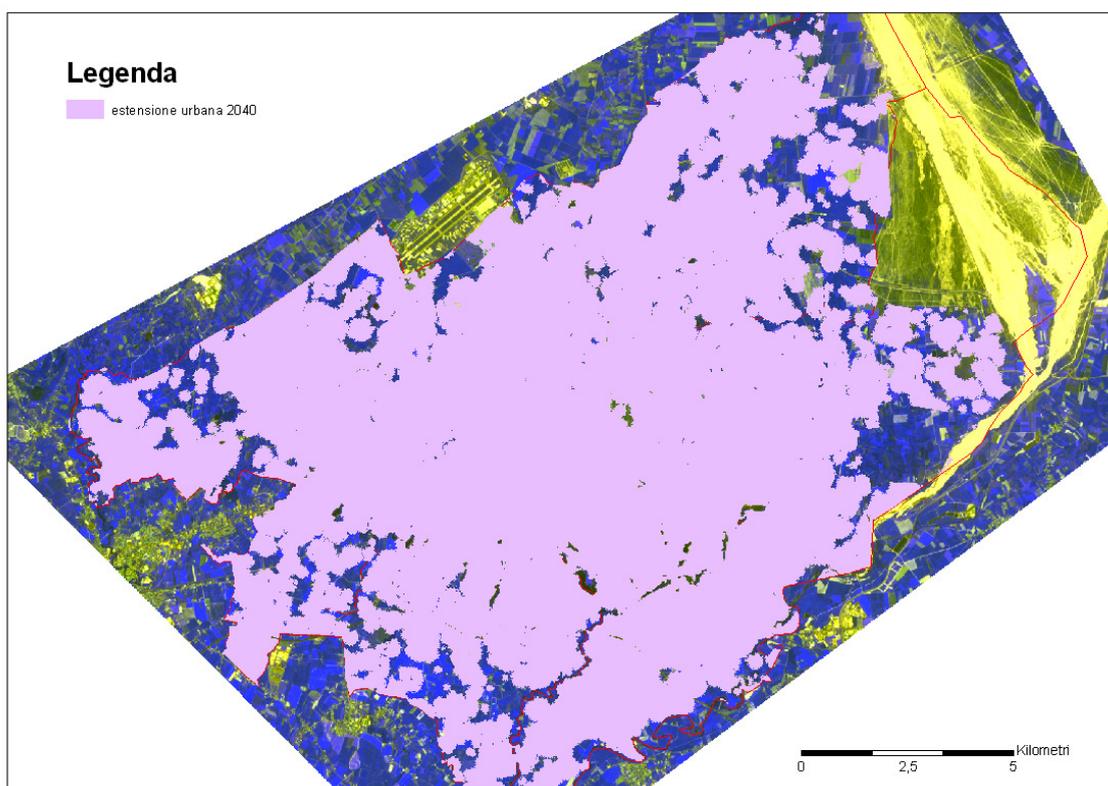


Figura 43: Estensione del tessuto urbano nel 2040 ottenuto mediante simulazione

5.2 Cambiamenti di copertura del suolo interessati

Per meglio comprendere e contestualizzare la natura delle modificazioni territoriali in atto in relazione al fenomeno della diffusione urbana, si devono dunque analizzare oltre che l'estensione del tessuto urbano le altre classi di copertura del suolo interessate da tali transizioni. Allo scopo si è proceduto con la costruzione di matrici, similmente a quanto già esposto per le carte concernenti l'analisi storica dei cambiamenti territoriali (paragrafo 4.2). Dall'analisi delle matrici di cambiamento si evince come l'espansione urbana avvenga ai danni di classi di copertura del suolo che presentano caratteristiche ottimali per la costruzione di nuovi edifici; molto spesso le coperture del suolo che subiscono di più la pressione urbana sono le aree agricole e quelle vegetate o boschive; infatti possiamo notare come la simulazione sottolinei il *trend*, evidenziato nell'analisi storica, di un'elevata correlazione fra l'espansione della classe 7 (urbano) e la contestuale riduzione delle classi 2 e 4 (aree boschive/ripariali e aree agricole). Nell'analisi delle transizioni di copertura del suolo la simulazione evidenzia inoltre una forte corrispondenza anche tra la classe *urbano* e quella che inizialmente è stata definita come *peri-urbano*; ciò è piuttosto ragionevole in quanto è facile supporre che le aree più prossime al tessuto urbano, ovvero quelle che già hanno iniziato a mostrare le conseguenze della pressione urbana, siano quelle che prima di altre cederanno il passo al processo di diffusione urbana.

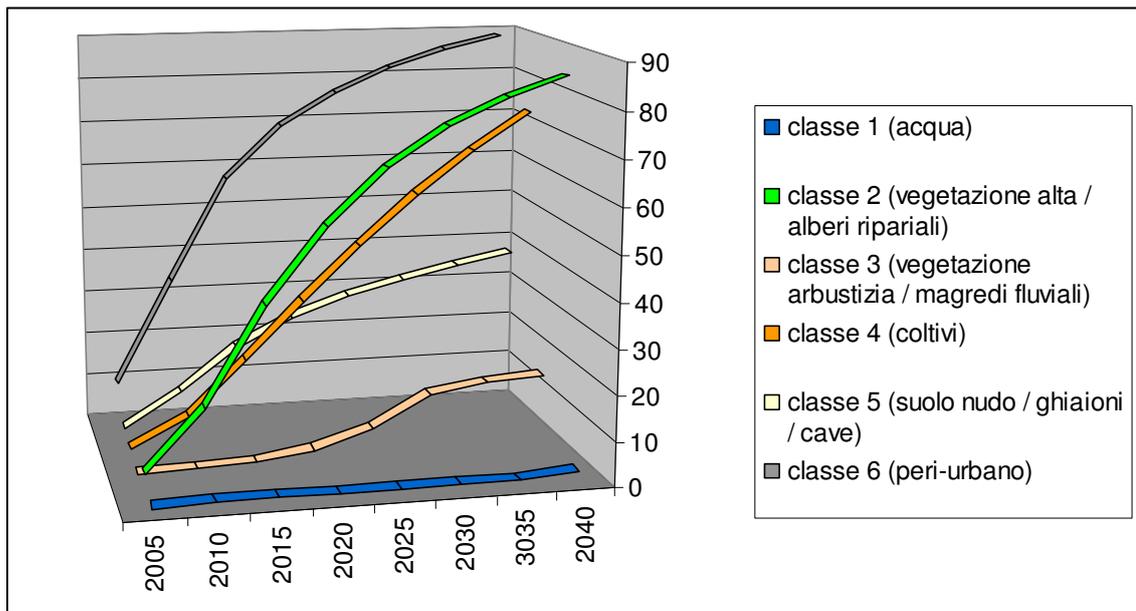


Figura 44: Grafico dell'espansione urbana ripartita per classe di copertura del suolo di provenienza; esso mostra quali sono le classi che maggiormente dovrebbero subire la pressione della crescita urbana.

Si può notare come i dati qui elaborati (Fig. 44) mostrino come l'espansione urbana, calcolata in percentuale rispetto alla sua estensione nel 2000, avvenga simultaneamente ad una riduzione di quasi il 90% della classe 2 e di oltre il 70% della classe 4. Altresì la corrispondenza fra aumento della superficie urbana e riduzione delle classi 1 e 3 (acqua e vegetazione arbustizia/magredi) è molto bassa, infatti queste classi sono per la maggior parte costituite dalle aree che si trovano in aree depresse o in corrispondenza di magredi fluviali; dunque è comprensibile come la pressione urbana su queste aree sia molto inferiore; confortante è vedere come il modello ne abbia tenuto conto durante la fase di simulazione.

5.3 Inquadramento dei fenomeni osservati nel contesto socio-economico

Della vocazione industriale ed artigianale del pordenonese sin dal medio evo, particolarmente dell'area intorno alla città, sia pure per rapidi accenni, abbiamo parlato in precedenza. Alcune grandi fabbriche, come pure la diffusione delle attività artigianali, hanno largamente influito, come abbiamo visto, sulla strutturazione del territorio. Ed una forte accelerazione alla trasformazione dell'uso del territorio ed allo sviluppo demografico si è avuta negli ultimi decenni. Vi hanno contribuito la natura del suolo, adatta alla creazione di grandi complessi, la ricchezza di fiumi e corsi d'acqua ed il fatto di essere a cavallo fra due regioni, Veneto e Friuli Venezia Giulia, dalle quali il pordenonese ha avuto impulsi importanti. A ciò si aggiunga la dinamicità di una provincia giovane (è nata nel 1968) che ha cercato una propria dimensione ed affermazione in tutti i campi (economico, culturale e dei servizi). E proprio nel pordenonese, come abbiamo detto in precedenza, si sono recentemente affermate alcune delle più importanti aziende italiane e non solo, come Savio e Zanussi. Importante è anche il rapporto fra ricerca e produzione, come dimostra il fatto che qui ha sede il Polo Tecnologico, un'area di ricerca affiliata all'*Area Science Park* di Trieste, dove molte aziende della zona svolgono attività di ricerca e sviluppo. Inoltre Pordenone avrebbe dovuto essere la prima città in Italia a offrire un collegamento internet gratuito, ma da gennaio 2009 il progetto è stato bloccato per mancanza di fondi.

La ricerca, lo abbiamo più volte ribadito, è basata sullo studio delle transizioni di copertura del suolo connesse all'espansione urbana da un punto di vista prevalentemente spaziale, ma per necessità di completezza e per cercare di contestualizzare i risultati ottenuti, si sono confrontati i valori della simulazione spaziale, con quelli della popolazione residente nell'area considerata. Le tabelle riassuntive proposte di seguito sono state elaborate sulla

base di dati ISTAT⁴⁹, sono state costruite combinando dati censuari e previsionali per coprire un intervallo temporale che potesse essere comparato con quello coperto dalla simulazione spaziale descritta nel paragrafo 4.3. Le previsioni demografiche dell'Istat sono usualmente realizzate in ragione di standard metodologici internazionalmente riconosciuti. In particolare, si ricorre al cosiddetto modello per componenti (*cohort component model*)⁵⁰. Il modello in questione è utilizzato per calcolare le variazioni numeriche della popolazione. Esso permette di classificare i cambiamenti tenendo conto di diversi indici, come: l'incremento naturale (nascite meno decessi), il tasso netto di migrazione (immigrazione meno emigrazione), ecc.. Questo quadro concettuale permette di spiegare mutazioni avvenute in passato o di effettuare ipotesi previsionali di cambiamenti futuri per una specifica area (Perlich 2003)⁵¹.

In base a tale metodo, la popolazione, tenuto conto del naturale processo di avanzamento dell'età, si modifica da un anno al successivo aggiungendo le nascite, sottraendo i decessi, aggiungendo i movimenti migratori in entrata e, infine, sottraendo quelli in uscita. Le previsioni vengono aggiornate periodicamente rivedendo e/o riformulando le ipotesi evolutive sottostanti la fecondità, la sopravvivenza e il tasso migratorio. Le previsioni demografiche vanno dal 1° gennaio 2007 al 1° gennaio 2051. Esse sono pertanto finalizzate al disegno dell'evoluzione demografica futura del Paese nel breve, medio e lungo termine. Pur tuttavia, similmente a quanto già descritto per le simulazioni ottenute tramite SLEUTH, i dati di lungo termine vanno trattati con estrema cautela, infatti le previsioni demografiche divengono tanto più incerte quanto più ci si allontana dalla base di partenza. Le previsioni sono articolate secondo tre distinti scenari. Con il primo di essi, lo scenario centrale, viene

⁴⁹ Fonte: <http://demo.istat.it/>.

⁵⁰ Per una trattazione esaustiva dell'argomento si rimanda a: *The right people, the right rates: making population estimates and forecasts with an interregional Cohort Component Model*. A.M. Isserman, Research Paper 9216, Economics and Geography Department of West Virginia University, 2002.

⁵¹ 2002 Population Estimates for Utah," *Utah Economic and Business Review*, Volume 63, Numbers 1 and 2, January/February 2003

fornito un set di stime puntuali ritenute “verosimili” che, costruite in base alle recenti tendenze demografiche, sono quelle verso il quale vengono principalmente orientati gli utilizzatori. Accanto allo scenario considerato più “probabile” sono stati costruiti due scenari alternativi che hanno il ruolo di disegnare il campo dell’incertezza futura. Tali due scenari, denominati rispettivamente scenario basso e scenario alto, sono impostati definendo una diversa evoluzione per ciascuna componente demografica rispetto allo scenario centrale. Le due varianti tracciano idealmente un percorso alternativo, dove ciascuna componente apporterà maggiore (scenario alto) o minore (scenario basso) consistenza alla popolazione. Per lo scenario alto ciò significa fecondità, sopravvivenza e flussi migratori (interni e con l’estero) più sostenuti, mentre vale esattamente l’opposto nello scenario basso. Tanto il primo quanto il secondo sono da intendersi soltanto come alternative “plausibili”. A nessuno dei due, infatti, può essere attribuito il significato di limite potenziale (superiore o inferiore) allo sviluppo della popolazione in futuro. Le previsioni sono disponibili per genere, anno di previsione, tipo di scenario (centrale, alto, basso), con dettaglio territoriale fino al livello di Provincia.

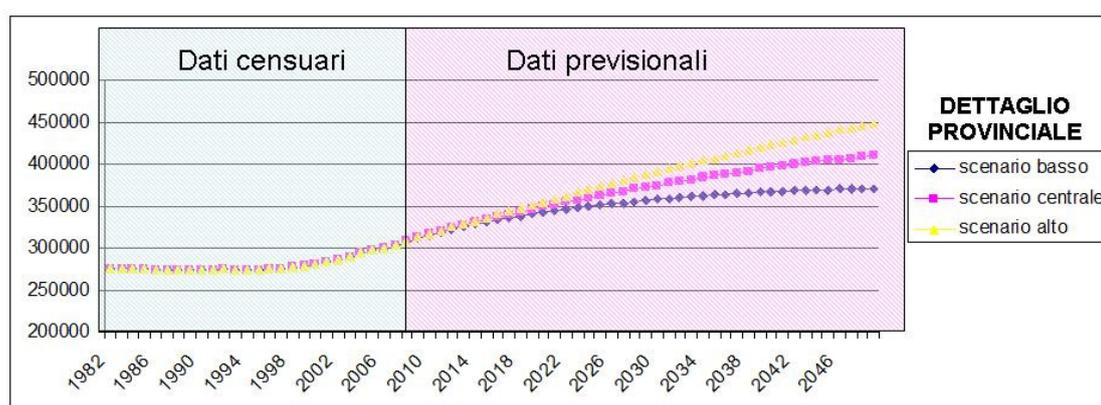


Figura 45: Grafico dell’andamento dei tre scenari di crescita della popolazione (alto, medio e basso) simulati dall’ISTAT per la Provincia di Pordenone. Fonte – elaborazione personale su dati ISTAT.

Il dettaglio maggiore distribuito dall’ISTAT è come detto quello provinciale, dunque per ottenere i valori previsionali concernenti solamente l’area oggetto di studio si sono dovute

effettuare alcune elaborazioni. L'area considerata è piuttosto esemplificativa della provincia di appartenenza, infatti il *trend* della popolazione fra il 1982 ed il 2007 è del tutto simile a quello dell'intero dettaglio provinciale per il medesimo periodo; esiste un rapporto di circa 1/3 tra il dettaglio "territoriale"⁵² e quello provinciale. Dunque, si può ipotizzare che sussista un rapporto di proporzionalità diretta, seppur mutevole nel tempo, fra la popolazione dell'area oggetto di studio ed il totale della Provincia di Pordenone. Come detto questa ipotesi, che seppur verificata resta sempre un'ipotesi, non la si può considerare come un rapporto di proporzionalità stabile, ma altresì mutevole, quindi dobbiamo derivare la numerosità della popolazione per il dettaglio "territoriale" a partire dal dettaglio provinciale tramite la relazione espressa dalla proporzione relativa alle inferenze descritte poc'anzi (formula 12):

$$(12) \quad PT_{t_{n+1}} = [PT_{t_n} \cdot PP_{t_{n+1}}] / PP_{t_n}$$

dove PT indica la popolazione per il dettaglio "territoriale" e PP per la Provincia di Pordenone, mentre i riferimenti temporali, di precedenza e successione, sono descritti rispettivamente dai riferimenti t_n e t_{n+1} . La relazione è stata reiterata ed applicata per tutti gli anni dal 1982 al 2050 (anno in cui termina la simulazione effettuata con SLEUTH) per tutti e tre gli scenari (basso, centrale, alto) distribuiti dall'ISTAT, in modo tale da ottenere il *trend* evolutivo della numerosità della popolazione per l'area considerata per il medesimo periodo (Fig. 46).

⁵² Viene qui definito come dettaglio "territoriale" quello riferito all'area oggetto di studio, ovvero quello della porzione di territorio interessata.

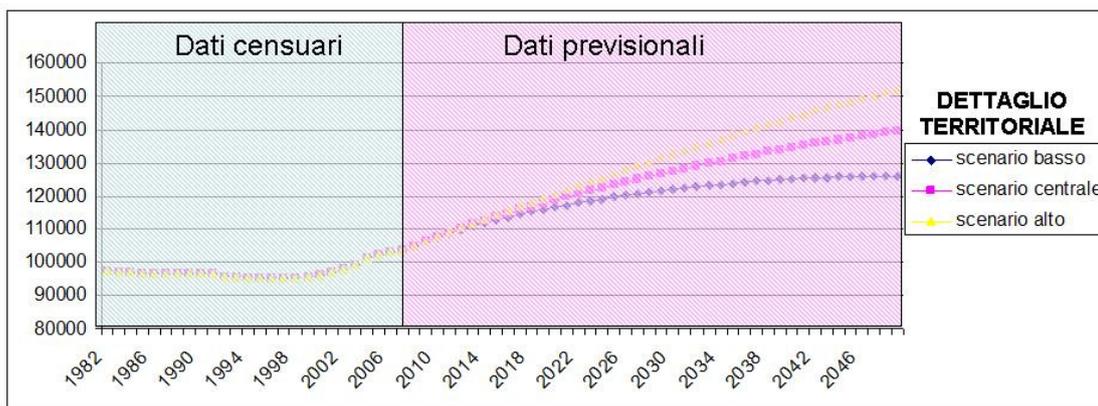


Figura 46: Grafico dell'andamento dei tre scenari di crescita della popolazione per l'are oggetto di studio.

I dati elaborati (sia i dati censuari che i dati previsionali) mostrano come per l'area considerata vi dovrebbe essere, ipoteticamente, un aumento costante della popolazione, il quale dovrebbe portare ad un numero quasi doppio di unità (secondo lo scenario alto) nell'arco di circa cinquant'anni (2000-2050); tali valori sono, come detto solo previsionali, tuttavia ricalcano la simulazione dell'evoluzione spaziale del tessuto urbano dell'area considerata descritta nel capitolo precedente. Per avere un'idea dell'andamento dello sviluppo demografico più generale, si propone anche la seguente figura, la quale mostra il rapido incremento a partire proprio dalla metà del 1900. Una crescita impetuosa che ha avuto una frenata all'inizio degli anni ottanta e poi una lieve diminuzioni a cavallo del 2000.

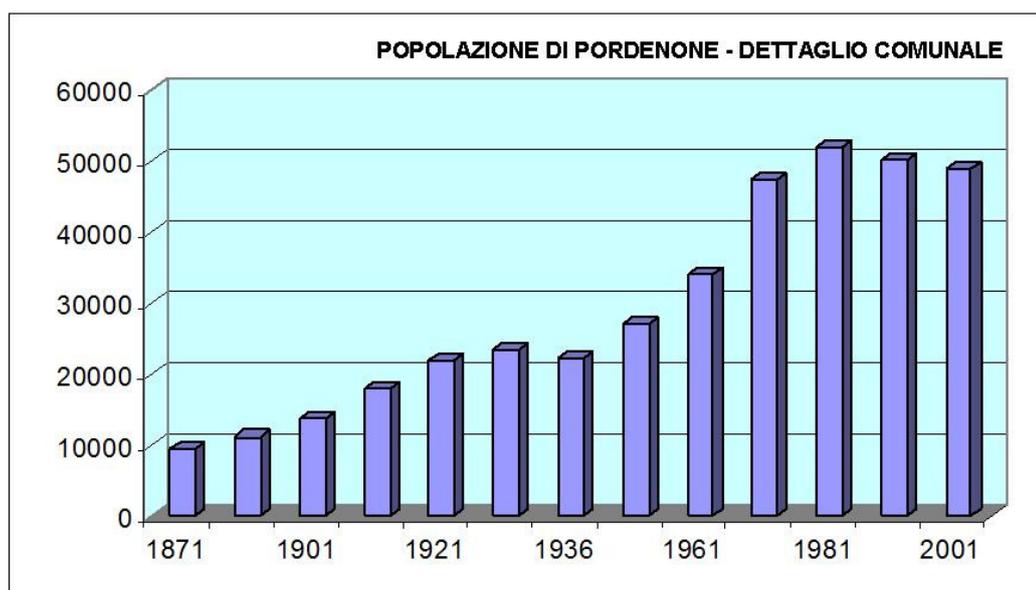


Figura 47: Grafico dell'andamento della crescita della popolazione per il Comune di Pordenone dal 1871 al 2001. Fonte – Elaborazione personale su dati ISTAT.

In questo contesto, giova ricordare che sino agli anni '50 ed oltre, tutto il Friuli Venezia Giulia, come del resto il vicino Veneto, erano terre di emigranti, in quanto terre poverissime; adesso invece si registra il fenomeno inverso, e l'intero nord est è terra di forte immigrazione. Anche se il fenomeno, causa soprattutto la crisi economica, sta subendo un rallentamento e nei confronti degli immigrati crescono un po' ovunque diffidenza e spesso ostilità.

2000. L'andamento del fenomeno della diffusione urbana è del resto ben rappresentato dalle tavole e figure presentate nel capitolo precedente e, le tavole riguardo alle previsioni della popolazione elaborate a partire da dati ISTAT possono essere considerate come una riprova, a posteriori, della bontà del metodo di analisi elaborato oltre che una valida premessa della sua affidabilità anche nell'elaborazione delle previsioni per il futuro prossimo e meno prossimo. Tenendo conto del fatto che ci troviamo davanti ad un metodo

complesso ma flessibile che può essere, dopo aver ottenuto dati sufficienti, ricalibrato in presenza di fenomeni imprevisti o eccezionali ed essere applicato ad ogni area oggetto di studio.

CONCLUSIONI

Nella ricerca qui presentata si è cercato di elaborare una metodologia che consentisse di approfondire le conoscenze riguardanti il fenomeno di *sprawl* urbano; il percorso metodologico sin qui strutturato non si prefigge certo come obiettivo un'illustrazione esaustiva e completa del fenomeno oggetto di studio, tuttavia intende offrire un contributo al campo dell'indagine spaziale in ambito urbano con il supporto di una adeguata bibliografia, ma anche proponendo in alcuni tratti elementi originali, frutto di una elaborazione e sviluppo personali delle tecniche di indagine. Uno dei tratti fondamentali di questo studio è la sinergica combinazione di indagine storica e inferenza previsionale, con l'obbiettivo di descrivere in maniera plausibile il fenomeno investigato in un arco temporale sufficientemente ampio.

L'applicazione della metodologia sin qui descritta ed applicata al caso studio dell'area metropolitana pordenonese ha la duplice intenzione di analizzare in primo luogo un caso di studio significativo e, dunque, di permettere un approfondimento della conoscenza geografica di tale territorio; in secondo luogo, contestualmente alle osservazioni rese possibile dai risultati ottenuti, la ricerca ha inteso, mediante il processo di induzione, investigare la natura stessa del fenomeno oggetto di studio, ovvero le forme della diffusione urbana *tout court*. Un'indagine esaustiva avrebbe dovuto tenere conto di una molteplicità di fattori, indici, relazioni e variabili di natura socio-economica e non solo spaziale, ma ci si è qui concentrati maggiormente su ciò che in ambito accademico viene

largamente condiviso ed associato all'*urban sprawl*, ovvero alle forme assunte dal fenomeno dal punto di vista geometrico. A tal proposito si è fatto un uso particolareggiato di metodologie di analisi spaziale proprie del campo di indagine del telerilevamento in ambito urbano, come: classificazione di immagine satellitari, applicazione di indici di disorganizzazione spaziale, tecniche di analisi dei cambiamenti, ecc.

La ricerca scientifica in questo campo con l'uso di questi strumenti viene del resto estensivamente applicata nel mondo anglosassone (statunitense soprattutto), come dimostrano l'ingente produzione bibliografica in merito ed il grande interesse e preoccupazione che tale fenomeno suscita nelle aree affette da diffusione urbana incontrollata; al contrario in ambito europeo, seppur vi siano importanti ricerche (in alcuni casi molto dettagliate ed efficienti), non vi è una così diffusa ed intensiva ricerca riguardo allo *sprawl* ed ai suoi effetti o cause. A tal proposito una delle più significative difficoltà incontrate riguarda proprio l'impossibilità di effettuare paragoni e valutazioni comparative con i risultati di altre ricerche; analogamente anche l'indagine previsionale presenta tratti che evidenziano difficoltà e suscitano perplessità; ad esempio il fatto che il modello ipotizzi scenari futuri basandosi esclusivamente (o quasi) su osservazioni di ciò che è avvenuto in passato e, dunque, non sia in grado di tener in considerazione o recepire eventi occasionali, isolati o imprevedibili che potrebbero influenzare profondamente il quadro definito e la sua possibile evoluzione; tuttavia le difficoltà incontrate offrono spunti di riflessione e danno origine ad ulteriori curiosità su tale tema.

Il quadro metodologico elaborato costituisce, a nostro avviso, uno strumento utile ed efficace (o almeno lo è potenzialmente); d'altronde si è coscienti del fatto che il contesto teorico necessita di approfondimenti ed ulteriori studi per poter integrare correttamente la *Two Phases Urban Growth Theory* con le osservazioni sui sistemi urbani europei condotte

dal Dematteis e dal Bonavero; l'utilità maggiore di tale ricerca è costituita dal fatto che la sua applicazione rende possibile un'osservazione dettagliata della realtà oggetto di studio. Quindi laddove correttamente applicata, permette potenzialmente di individuare in anticipo i rischi e di contenere i costi relativi ad una diffusione disorganica ed irrazionale del tessuto urbano e diventa pertanto uno strumento funzionale all'elaborazione di politiche di pianificazione territoriale mirate ed efficaci. Anche se analizzare, ma soprattutto stimare tramite modelli automatici le transizioni di uso del suolo in relazione all'espansione urbana, è un campo di indagine accidentato e pieno di ostacoli, a causa soprattutto della molteplicità delle forme che possono essere assunte dai sistemi urbani.

Per quanto nel panorama accademico vi sia un ampio ventaglio di modelli e metodologie operative, ognuna con i suoi paradigmi di partenza e criteri di semplificazione, non è ovviamente possibile effettuare stime che tengano conto di eventi esogeni difficilmente prevedibili, quali ad esempio la crisi economica mondiale che si manifesta attualmente su scala globale, il cambiamento nella base energetica, eventi catastrofici talvolta associati al cambiamento climatico globale. Tutto ciò pone le basi per un possibile sviluppo della ricerca qui presentata; ovvero fornisce la possibilità di investigare e testare l'accuratezza dell'applicazione combinata di più modelli, che considerino anche le variabili di natura ambientale, microeconomica, comportamentale oltre a quelle connaturate alla variabilità spaziale dei sistemi e delle reti urbane delle loro molteplici forme.

BIBLIOGRAFIA

- Aplin P. et al. 1997. Fine spatial resolution satellite sensors for the next decade. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 3873-3882.
- Baiocchi V., Lelo K., Cartografie storiche e immagini telerilevate a confronto per l'analisi diacronica del territorio, in *Atti della VII Conferenza Nazionale ASITA*, Verona, 2003.
- Battisti G. 2004. *Gorizia Nova Model Plan. Modelli per lo sviluppo sostenibile nell'area di confine*. Ricerca a regia Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia nell'ambito del programma di iniziativa comunitaria "Interreg IIIA Italia-Slovenia 2000-2006", Rapporto preliminare, Dipartimento di Scienze Geografiche e Storiche, Università di Trieste, 2004. Coordinatore Battisti G..
- Battisti G., Favretto A., Mauro G. 2002. Urban growth of small villages through a comparison of ancient maps and satellite imagery. In *Proceeding - 3rd International Symposium Remote Sensing of Urban Areas*, Tüyap - Istanbul, 2002.
- Batty M. 2008. The size, scale and shapes of cities. *Science*, 319, 769-771.
- Batty M. 2002. Thinking about cities as spatial events. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 29, 1-2.
- Batty M., Longley P. A. 1997. The fractal city. *Architectural Design*, 67, 74-83.
- Batty M. and Longley P. A. 1994. *Fractal Cities. A geometry of form and function*. London: Academic Press.
- Batty M. 1974. Urban density and entropy functions. *Journal of Cybernetics*, 4, 2, 41-55.
- Baudot Y. 1993. Vegetation monitoring in urban areas using remote sensing. *Sistema Terra*, 2, 66-68.
- Bianchin I., Pesaresi M. 1992. Approccio strutturale alla'analisi di immagine per la descrizione del territorio: una esplorazione degli strumenti di morfologia

- matematica. Contributo al *V Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Telerilevamento*. Milano.
- Bonavero P. 1997. The internationalisation of the Italian urban system in the European context. In Dematteis G., Bonavero P., (eds.) *Il sistema urbano italiano nello spazio unificato europeo*. Il Mulino Bologna, 1993.
- Brueckner, J. K. 2002. Urban Sprawl: Diagnosis and Remedies. *International Regional Science Review*. 23, 2: 160–171.
- Burchell W. R., Shad A. N. 1998. The cost of Sprawl – Revisited. *TCRP Report 39 Transit Cooperative Research Program*, Transport Research Board. National Academy Press, Washington DC 1998.
- Burgess, E. W. 1925. The growth of the city: an introduction to a research project. Park, R. E., Burgess, E. W. and McKenzie, R. D. (Eds.) *The City*. Chicago University Press: Chicago, IL, pp. 47-62.
- Camagni R. 1993. Organisation économique et réseaux de villes. In Salles A. (ed.) *Les Villes, lieux d'Europe*, 147-178. Datar, Paris Editions de l'Aube.
- Candau J. 2000. Calibrating a cellular automaton model of urban growth in a timely manner. In Parks, B. O., Clarke, K. C., and Crane M. P. (eds.). *Proceedings of the Fourth International Conference on Integrating Geographic Information Systems and Environmental Modelling: problems, prospects and research needs*. 2-8 September 2000, Banff, Alberta, Canada.
- Carruthers, J. I., and Ulfarsson, G. F., 2003, Urban sprawl and the cost of public services. *Environment and Planning B: Planning and Design* 30, 4, 503 – 522
- Christaller W. 1933. *Die zentralen Orte in Süddeutschland*. (Jena); republished 1966 as *Central Places in Southern Germany*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Clarke K. C. 2008. Mapping and Modelling Land Use Change: an Application of the SLEUTH Model. In Cartwright, C. Bishop, I., Lowell, K., Pullar, D. and Duncan,

- D. (Eds.) *Landscape Analysis and Visualisation: Spatial Models for Natural Resource Management and Planning*, Springer, Berlin, 353-366.
- Clarke, K. C., Hoppen, S. and Gaydos, L. 1997. A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24, 247-261.
- Clausius R. 1864. *Abhandlungen ueber die Mechanische Waermethorie, Erste Abtheilung, 1864. (I-VIII) & Zweite Abtheilung, 1867 (IX - XVI)*, Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig.
- Comin F. 2008. *Storia di Pordenone*. Edizioni Biblioteca dell'Immagine 2008, Pordenone.
- Comité de Développement Spatial 1996(U.E.). Schéma de Développement de l'Espace Communautaire (SDEC). Contributo presentato al Conseil informal des mistres en charge de l'aménagement du territoire. Venezia 3-4 maggio 1996.
- Cosgrove D. 2006. Los Angeles and the Italian "Citta' Diffusa": landscapes of the cultural space economy. In Terkenli, T. S. and d'Hautesserre, A, M. *Landscapes of a New Cultural Economy of Space*, Springer.: New York. pp. 69-91.
- Dear M., Flusty S. 1998. Postmodern Urbanism. *Annals of the Association of American Geographers*, 88, 50-72.
- Dematteis G. 2003 Città diffusa, periurbanizzazione e piani strategici. In Bertuglia C., Stanghellini A., Staricco L., *La diffusione urbana: tendenze attuali e scenari futuri*. Franco Angeli, Milano.
- Dematteis G. 1997 Globalization and regional integration the case of the Italian urban system. *GeoJournal* 43, 4, 331-338.
- De Spuches G., Guarrasi V., Picone M. 2002. *La città incompleta*. Palumbo, Palermo 2002.
- De Vecchis G., Staluppi G. 2006. *Didattica della Geografia*. UTET Università 2006.

- Dietzel, C., Oguz, H., Hemphill, J. J., Clarke, K. C. and Gazulis, N. 2005a. Diffusion and coalescence of the Houston Metropolitan Area: evidence supporting a new urban theory. *Environment and Planning-B: Planning and Design*, 32, 2, 231-246.
- Dietzel, C, Herold, M., Hemphill, J. J., and Clarke, K.C. 2005b. Spatio-temporal dynamics in California's Central Valley: empirical links to urban theory. *International Journal of Geographic Information Science*, 19, 175-195.
- Dietzel C. and Clarke K. C. 2007. Toward Optimal Calibration of the SLEUTH Land Use Change Model. *Transactions in GIS*, 11, 1, 29–45.
- Donnay J. P., Barnsley M. J., Longley P. A. 2001. Remote Sensing and Urban Analysis. Taylor and Francis, Gisdata 9, New York, 3-11.
- Donnay J. P. 1999. Use of remote sensing information in planning. In *Geographical Information and Planning*, a cura di Stillwell, Geertman e Openshaw. Berlino, Springer. 242-260.
- Dowling T. J. 2000. Reflections on Urban Sprawl, Smart Growth, and the Fifth Amendment. *University of Pennsylvania Law Review*, 148, 3 873-887.
- Dreier P. 2005. How the media compound urban problems. *Journal of Urban Affairs*. Vol. 27, 2. 193-201.
- Ehlers M. 1995. The promise of remote sensing for land cover monitoring and modelling. In *Proceedings of the Joint European Conference on Geographical Information*. Basel, AKM Messel AG, 426-432.
- European Environment Agency 2006. *Urban sprawl in Europe. The ignored challenge*. European Commission Joint Research Centre and European Environment Agency.
- Eurostat 1995. *Pilot Project Delimitation of Urban Agglomerations by Remote Sensing: Results and Conclusions*. Luxemburg: Office for Official Publications of the European Communities.

- Ewing R. H., Bartholomew, K., Winkelman, S., Walters, J. and Chen, D. 2007. *Growing Cooler: Evidence on Urban Development and Climate Change*. Urban Land Institute: Washington DC.
- Ewing R., Schmid, T., Killingsworth, R., Zlot, A. and Raudenbush, S. 2003. Relationship between Urban Sprawl and Physical Activity, Obesity, and Morbidity. In Marzluff, J. M., Shulenberger, E., Endlicher, W., Alberti, M., Bradley, G., Ryan, C., Simon, U. and ZumBrunnen, C. (Eds.) *Urban Ecology: An International Perspective on the Interaction Between Humans and Nature*. Springer Science: New York. pp. 567-582.
- Ewing R. H. 2002. *Measuring Sprawl and Its Impact*.
<http://www.smartgrowthamerica.com/sprawindex/sprawindex.html>.
- Ewing R. H. 1994. Characteristics, Causes, and Effects of Sprawl: A Literature Review. *Environmental and Urban Studies*. 21, 2, 1–15.
- Faggi P. 2006. Territorio, attori, progetti. Verso una geografia comparata dello sviluppo locale. *Geotema*. 24, 2006, 108-119.
- Favretto A. 2006. *Strumenti per l'analisi geografica GIS e telerilevamento*. Patron. Bologna, Italy.
- Favretto A., Martellozzo F. 2008. Evoluzione della copertura del suolo in ambito urbano. Uno studio preliminare per alcuni comuni della Provincia di Pordenone (Friuli Venezia Giulia) attraverso immagini telerivelate di periodi diversi. *Atti del VII Workshop "Beni ambientali e culturali e GIS – Comunicare l'Ambiente"*, Trieste, 2008, Patron Editore.
- Foody G. M. 2002. Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80, 185– 201. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 49, 1693-1707.
- Forster B. C. 1983. Some urban measurements from Landsat data.

- Forster B. C. 1980. Urban residential ground cover using Landsat digital data. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 46, 547-558.
- Frenkel, A, and Ashkenazi, M. 2008. Measuring urban sprawl: how can we deal with it? *Environment and Planning B: Planning and Design*. 35, 1, 56–79.
- Fritz L. W. 1999. High resolution commercial remote sensing satellites and spatial information, <http://www.isprs.org/publications/highlights/highlights0402/fritz.html>.
- Garreau J. 1991. *Edge City: life on the new frontier*. Anchor Books Edition 1992.
- Glaeser E. L. and Kahn M. E. 2003. *Sprawl and urban growth*. Discussion paper 2004, Harvard Institute of Economic Research.
- Goodchild, M. F. 1987. *Spatial autocorrelation. Concepts and Techniques in Modern Geography*: Norwich, UK. 47.
- Gordon, P. and Wong, H. L. 1985. The costs of urban sprawl—some new evidence. *Environment and Planning A*, 17, 5, 661–666.
- Green K., Kempka D., Lackey L. 1994. Using remote sensing to detect and monitor land-cover and land-use change, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 60, 331–337.
- Harris C. and Ullman E. 1945. The nature of cities. *Annals of the American Academy of Political and Social Science*, 242, 7-17.
- Hasse J. E. and Lathrop R. G. 2003. Land resource impact indicators of urban sprawl. *Applied Geography*, 23, 159–175.
- Heikkila E. J. and Hu, L. 2006. Adjusting spatial-entropy measures for scale and resolution effects. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 33, 845- 861.
- Henry M. S., Schmitt, B. and Piguet, V. 2001. Spatial econometrics models for simultaneous systems: Application to rural community growth in France. *International Regional Science Review*, 24, 2, 171–193.

- Hellevik O. 1988. *Introduction to causal analysis: Exploring survey data by cross-tabulation*. Second edition. NY: Oxford University Press. Contemporary social research series, 9.
- Herold M., Scepan J., Clarke, K. C. 2002. The use of remote sensing and landscape metrics to describe structures and changes in urban land uses. *Environment and Planning A*, 34, 1443-1458.
- Huang X. and Jensen R. J. 1997. A machine-learning approach to automated knowledge-base building for remote sensing image analysis with GIS data. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 63, 10, 1185-1194.
- Isserman A. M. 2002. *The right people, the right rates: making population estimates and forecasts with an interregional Cohort Component Model*. Research Paper 9216, Economics and Geography Department of West Virginia University, 2002.
- Jackson et al. 1980. Urban land mapping from remotely sensed data. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 46, 1041-1050.
- Jacobs J. 1961. *The Death and Life of Great American Cities*. 1961 New York, Random House.
- Jensen J. R. 1981. Urban change detection mapping using Landsat data. *The American Cartographer*, 8, 1237-1247.
- Jensen J. R. 1996. *Introductory digital image processing. A remote sensing perspective*. 2nd Ed. Prentice-Hall: Upper Saddle River, NJ.
- Karlström E. and Ceccato V. 2000. A new information theoretical measure of global and local spatial association. *Papers of the European Regional Science Association*, Barcelona, 29 August-1 September, Royal Institute of Technology, Urban Studies, SE 10044, Stockholm.
- Karckainen B. C. 1997. The risk of Risk Assessment. *EarthMatters*, Biodiversity and Land, 83 Cornell Law Review 1, 12.

- Krier L. and Thadani D. 2009. *The Architecture of Community*. Island Press: Washington, D.C.
- Ladd H. F. 1992. Population Growth, Density and the Cost of Providing Public Services. *Urban Studies*, 29, 2, 273-295.
- Li, Z. and Huang, P. 2002. Quantitative measures for spatial information maps. *International Journal of Geographic Information Science*. 16, 7, 699-709.
- Lillesand T.M., Kiefer R.W. *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons, New York, 1999.
- Longley P. A. 2003. Towards better understanding of digital differentiation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 27, 103-106.
- Longley P. A. 2002. Will developments in urban remote sensing and GIS lead to 'better' urban geography? *Progress in Human Geography*, 26, 3, 231-239.
- Longley P. A. et al. 2001. Remote Sensing and Urban Analysis: A research Agenda. In *Remote Sensing and Urban Analysis*, Gisdata 9, Taylor and Francis.
- Lowry I. S. 1990. World Urbanization in Perspective. *Population and Development Review*, 16, Supplement: Resources, Environment, and Population: Present Knowledge, Future Options, pp. 148-176.
- Lu D., Mausel P., Brondizio E., Moran E. 2004. Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 2365-2407.
- Medvedkov O. 1970. *Soviet Urbanization*. Routledge 1990.
- Meredith J. R. 2003. Sprawl and the New Urbanist Solution. *Virginia Law Review*. Vol. 89, n. 2. 447-503.
- Novelli E. and Occelli S. 1999. Profili descrittivi di distribuzioni spaziali : alcune misure di diversificazione. *Cybergeo: European Journal of Geography*, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, 108, on line since 04 October 1999.
- Peiser R.B. 1989. Density and urban sprawl. *Land Economics*, 65, 3, 193-204.

- Perlich P. S. 2003. 2002 Population Estimates for Utah,” *Utah Economic and Business Review*, 63, 1 e 2, 2003.
- Petit C., Lambin E.F., 2002. Long-term land-cover changes in the Belgian Ardennes (1775-1929): Model-based reconstruction *versus* historical maps. *Global Change Biology*, 8, 7, 616-631.
- Petrov L. O., Lavalle C., Kasanko M. 2009. Urban land use scenarios for a tourist region in Europe: Applying the MOLAND model to Algarve, Portugal. *Landscape and Urban Planning*, 92, 10–23.
- Poindexter G. C. 1997. Legal Empowerment of the Neighbourhood. *Urban Studies*, 33, 1821-1829.
- Ridley H. M. et al. 1997. Evaluating the potential of forthcoming commercial US high-resolution satellite sensor imagery at the Ordinance Survey. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 63, 997-1005.
- Rusk D. 1993. Cities without suburbs. *Woodrow Wilson Center Press*, Washington D. C.
- Sallez A., Vérot P. 193. Les villes en question. In Sallez A. (ed.) *Les Villes, lieux d'Europe*, 147-178. Datar, Paris Editions de l'Aube.
- Shannon, C. E (1948) *A mathematical theory of communication*. Bell System Technical Journal, vol. 2 pp. 379–423 and 623–656, July and October.
- Silva, E. and Clarke, K. C. 2005. Complexity, emergence and cellular urban models: lessons learned from applying SLEUTH to two Portuguese metropolitan areas. *European Planning Studies*, 13, 1, 93-115.
- Silva E. and Clarke C. K. 2002. Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto, Portugal. *Computers, Environments and Urban Systems*, 26, 525-552.

- Smiraglia D., Carranza M. L., Blasi C., Analisi diacronica dei contatti e valutazione dello stato di conservazione del paesaggio. In *Atti della VI Conferenza Nazionale Asita*, Perugia, 2002.
- Tinti V. 1837. *La storia di Pordenone*. Ed. 1987, Edizioni Biblioteca dell'Immagine, Pordenone.
- Transit Cooperative Research Program 74, 2000. *The Cost of Sprawl – 2000*. Transport Research Board, National Academy Press, 2002 Washington DC.
- Weber C. 1993. *Images satellitaires et milieu urbain*. Paris, Hermès.
- Welch R. 1982. Spatial resolution requirements for urban studies. *International Journal of Remote Sensing*, 3, 3251-3261.
- Yeh, A. G. and Li, X. 2001. Measurement of urban sprawl in a rapidly growing region using entropy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 67, 1, 83-90.