

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITA' DI BOLOGNA
CAMPUS DI CESENA
SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN ARCHITETTURA

***Strumenti informatici per l'analisi spaziale:
ipotesi di applicazione allo studio della densità
e dei tessuti urbani***

Tesi in
TECNICA URBANISTICA

Relatore

Prof. Arch. Valentina Orioli

Presentato da

Matteo Corvi

Correlatori

Arch. Elena Candigliota

Dott. Francesco Immordino

Sessione III
Anno accademico 2013-2014

Indice

Introduzione.....	1
1 Il degrado del territorio: cause della dispersione urbana e vantaggi di un monitoraggio accentrato.....	5
1.1 Dispersione urbana e pianificazione territoriale.....	5
1.2 Nuovi strumenti per l'analisi a scala territoriale.....	8
2 Gli strumenti di analisi spaziale.....	11
2.1 GIS come strumento di analisi e di supporto alle decisioni.....	11
2.2 Analisi a oggetti.....	14
3 Ipotesi di applicazione dell'analisi a oggetti: i casi studio di Faenza, Forlì, Cesena e Rimini.....	25
3.1 Dati utilizzati ed elaborazioni preliminari.....	25
3.2 Procedure di classificazione delle forme insediative.....	28
3.2.1 Edificazione compatta: centri storici e tessuto intricato.....	38
3.2.2 Edificazione a grana fine: espansioni abitative.....	41
3.2.3 Edificazione a grana grossa: attività produttive e distretti industriali.....	43
3.2.4 Forme aperte: quartieri pianificati ed edificazioni lineari.....	45
3.2.5 Cittadelle: edilizia fuoriserie e grandi contenitori.....	51
3.2.6 Valutazione semi-quantitativa dei risultati ed ulteriori sviluppi.....	64
3.3 Classificazione dei fenomeni di dispersione urbana.....	72
3.3.1 Procedura di elaborazione e classificazione.....	79
3.3.2 Valutazione qualitativa dei risultati ed ulteriori sviluppi.....	86
Bibliografia tematica.....	93
Urbanistica, pianificazione e analisi tipomorfologica.....	93
GIS, <i>image processing</i> e analisi a oggetti.....	95

Introduzione

Questa tesi nasce come naturale proseguimento dell'attività svolta in qualità di tirocinante presso il centro ricerche ENEA di Bologna, durante la quale sono entrato a contatto con il mondo del telerilevamento, disciplina che si occupa dell'acquisizione e dell'elaborazione di immagini (in base al tipo di strumentazione utilizzata per l'acquisizione si distingue tra telerilevamento satellitare, aereo e di prossimità). In particolare ho avuto modo di studiare e applicare in contesti di ricerca l'analisi a oggetti (o *object oriented*), una metodologia avanzata di estrazione di informazioni da dati telerilevati che sta acquisendo sempre più punti di contatto con il mondo dei sistemi informativi territoriali. Durante il periodo di tirocinio è stata sviluppata una applicazione per il rilevamento delle siepi boschive in Val d'Agri, applicazione presentata poi personalmente nel 2013 al workshop tematico annuale organizzato dall'ENEA e dall'Associazione Italiana di Telerilevamento a San Martino in Pensilis e all'eCognition Day a Roma (workshop annuale riguardante il principale software di analisi a oggetti, eCognition Developer). Questa applicazione è attualmente presente tra i casi studio scaricabili sul sito del distributore italiano del software, Sysdeco Italia. Nel 2014 parte di questo stesso lavoro di tesi è stato presentato personalmente alle edizioni annuali successive di entrambi i workshop, rispettivamente a Pescara e a Roma.

Sebbene questi ambiti di ricerca non facciano direttamente parte del piano di studi e le conoscenze ad essi relative siano state acquisite perlopiù al di fuori del normale percorso didattico, ho sempre considerato particolarmente significativa una delle prime nozioni apprese durante la mia carriera universitaria, nozione riguardante la figura e la formazione dell'architetto e di come esso sia non tanto uno specialista, quanto una figura preposta alla sintesi delle diverse spinte specialistiche che emergono durante la progettazione. Senza dubbio in questa tesi il termine "progettazione" non può essere usato che in maniera inconsueta rispetto all'usuale pratica dell'architetto come professionista, nondimeno si tratta

di un progetto, in particolare di una procedura informatica di analisi dei tessuti e della morfologia e della densità urbana, una procedura basata quindi su vincoli di natura tipologica, una procedura frutto del lavoro di sintesi tra istanze di natura scientifica e logico-informatica, e istanze derivanti dalla formazione in ambito urbanistico ricevuta durante il corso di laurea e in seguito approfondita con la realizzazione di questo lavoro.

Più in dettaglio questa tesi si prepone di indagare quali ricadute positive potrebbe avere, nei confronti della pianificazione urbanistica e il monitoraggio a scala territoriale, l'applicazione delle tecnologie di analisi spaziale assistita dal computer, con particolare riferimento all'analisi tipomorfologica delle forme insediative, sia a scala di quartiere (distinguendo tessuto compatto, a grana fine, grossa, ecc.), che a scala urbana (analisi della densità e delle aggregazioni extraurbane).

È necessario sottolineare il carattere fortemente sperimentale di questa tesi e di come la relativa scarsità di casi studio in letteratura relativi all'analisi dell'edificazione a partire da dati telerilevati impedisca la compilazione di una bibliografia particolarmente ricca di studi applicativi.

Questo lavoro è stato realizzato con il supporto scientifico e didattico offerto dall'ENEA - UTSISM Unità Tecnica di Ingegneria Sismica - Bologna, in particolare dei ricercatori Elena Candigliota e Francesco Immordino, correlatori di questa tesi.

La tesi è strutturata come segue.

Il primo capitolo è dedicato ad inquadrare il contesto disciplinare all'interno del quale si vuole inserire questo lavoro. Il contesto disciplinare cui si fa riferimento è quello dell'urbanistica, relativamente allo studio dei fenomeni di dispersione urbana e all'approccio alla pianificazione necessario al loro contrasto, con riferimento conclusivo al possibile contributo che le tecnologie dell'informazione geografica possono fornire.

Nel secondo capitolo vengono approfondite le potenzialità delle tecnologie di analisi spaziale, come esse siano sottoutilizzate, le difficoltà nell'applicazione al

contesto urbano attualmente in fase di superamento, con particolare enfasi nei confronti dell'analisi *object oriented* e dello stato dell'arte di questa metodologia per quanto riguarda l'analisi dell'urbanizzato (sono mostrati alcuni casi studio internazionali particolarmente rilevanti).

Il terzo capitolo costituisce la parte “progettuale” di questa tesi e risulta di conseguenza il più corposo. Consiste nell'esposizione e nell'approfondimento delle strategie adottate al fine di elaborare ipotesi applicative delle recenti tecnologie di elaborazione *object-oriented* al tema dell'analisi della forma della città e della tipomorfologia dei tessuti urbani. In questo capitolo vengono riportati i risultati ottenuti dall'analisi delle principali città romagnole che si collocano sull'asse della via Emilia attraverso l'uso del software di analisi a oggetti *eCognition Developer 8.9*.

La prima ipotesi applicativa si pone come obiettivo la messa a punto di una metodologia supervisionata di classificazione della superficie urbana edificata, individuando le principali categorie definite in letteratura secondo caratteristiche tipomorfologiche (grana, impianto, tipi edilizi prevalenti, caratteristiche distributive dei fabbricati). Le categorie impiegate sono state in particolare derivate dagli studi di Elio Piroddi, Antonio Cappuccitti e Patrizia Gabellini sulle caratteristiche morfologiche dei diversi tessuti e aggregati urbani, al fine di poter formalizzare un'ontologia delle classi condivisa. Utilizzando come dato di partenza il database topografico vettoriale regionale dei vari territori comunali, sono stati analizzati come casi studio quattro comuni romagnoli sull'asse della Via Emilia (Faenza, Forlì, Cesena, Rimini). Un risultato positivo potrebbe confermare la fattibilità di un aggiornamento preventivo e continuo dei database anche per quanto riguarda tipologie di informazioni complesse come la natura delle relazioni spaziali tra fabbricati e la forma degli stessi, informazioni che normalmente per essere interpretate e classificate richiedono l'intervento più accurato, ma più lento e discrezionale, di personale addestrato.

La seconda ipotesi applicativa prevede l'individuazione negli stessi centri urbani (Faenza, Forlì, Cesena e Rimini) delle aree periurbane e degli aggregati extraurbani che potrebbero essere opportunamente oggetto di interventi di

densificazione e rifunzionalizzazione. Anche in questo caso viene utilizzato come dato di partenza il database topografico regionale. Oltre che fornire indirizzi progettuali in fase di elaborazione dei piani e contribuire al monitoraggio dello stato di degrado morfologico degli insediamenti, la stima della superficie densificabile potrebbe fornire utili informazioni per la pianificazione economica di incentivi agli interventi di recupero delle aree urbane periferiche e smarginate.

1 Il degrado del territorio: cause della dispersione urbana e vantaggi di un monitoraggio accentrato

1.1 Dispersione urbana e pianificazione territoriale

Dal secondo dopoguerra ad oggi il territorio italiano è andato incontro ad un ben noto processo di espansione della superficie soggetta ad edificazione, fenomeno descritto in letteratura con un vasto ed evocativo insieme di termini, spesso ossimorici quando associati alle parole città o tessuto urbano - quali diffuso, rarefatto, disperso, pulviscolare, poroso - o che rimandano a fenomeni di tipo distruttivo - come esplosione, frantumazione, sfilacciamento, esondazione -. Con questi termini ci si riferisce sia agli effetti che questa espansione edilizia ha avuto sulla forma fisica della città, e conseguentemente sulla sostenibilità logistica ed energetica, sia alle conseguenze sul piano sociale e culturale, con la diffusione di stili di vita “urbani” in un territorio assai più vasto di quanto non fosse storicamente quello delle città.¹

Questi nuovi insediamenti caratterizzati da una bassa densità insediativa, se paragonati alle porzioni di città consolidata e dalla trama maggiormente compatta quali il centro storico e le espansioni ottocentesche, scaricano infatti sul resto del territorio e della stessa città un pesante fardello in termini di mobilità e di inquinamento, essendo fruibili solamente attraverso un esteso impiego del mezzo privato, consumando inoltre direttamente una risorsa materiale e non rinnovabile come la superficie agricola e degradando una risorsa culturale come il paesaggio, sostituendo ad un territorio fortemente antropizzato ma dal carattere ben definito e *altro* dalla città come la campagna, l'ibrido indefinito dello *sprawl* e dei suoi spazi privi di qualità.

¹ I termini riportati fanno riferimento al lavoro di numerosi autori, a partire dal testo fondamentale di F. Indovina, *La città diffusa*, DAEST, Venezia 1990. Per una sintesi delle diverse posizioni culturali, cfr. C. Bianchetti, *Abitare la città contemporanea*, Skira, Milano 2003.

Ma gli effetti della dispersione non si limitano, come già accennato, alla congestione del traffico e al degrado ambientale, condizioni esperibili direttamente anche dai visitatori casuali che si trovano solamente a transitare attraverso queste zone. La scarsità di luoghi di aggregazione derivante dall'impostazione ipo- o monofunzionale di queste espansioni periferiche si traduce in una fonte di alienazione sociale per gli abitanti, cui si unisce una perdita di identità paesaggistica dovuta all'eccessiva dilatazione degli spazi. Anche in quei brani di edificazione periurbana dove esiste grossomodo un impianto, la serialità e riproducibilità all'infinito di questo e l'inopportuna presenza di spazi anti-urbani, come i distacchi strada-edificio, vengono a negarne in definitiva l'identità.

Negli ultimi anni si è presa coscienza dei benefici di cui possono al contrario trarre vantaggio gli insediamenti morfologicamente compatti e funzionalmente densi, con ripercussioni positive anche sul resto del territorio e sull'ambiente e il paesaggio: la maggiore concentrazione della popolazione rende più semplice servire quartieri densi attraverso il trasporto pubblico e implementare sistemi di efficienza energetica come il teleriscaldamento, tanto più convenienti quanto maggiore è la densità abitativa; recuperare la continuità e la densità morfologica dell'abitato consente di rinsaldare il tessuto sociale agevolando di conseguenza l'inserimento di nuove funzioni minori facilitato dal maggiore bacino di utenza in una retroazione reciproca "densità – funzionalizzazione", realizzando così quella *mixité* sociale e degli usi che è la caratteristica fondamentale della città.

Particolarmente importante per il nostro discorso sono però le cause alla base del fenomeno dispersivo.

Alcuni autori che hanno analizzato il fenomeno, come Paola Bonora e Luca Reale, ne individuano le cause nelle politiche di deregolamentazione e di decentramento amministrativo implementate in Italia a partire dagli anni '70, in seguito alle quali è stato affidata agli enti locali la responsabilità di gestire l'edificazione, senza tuttavia il supporto di linee direttive di area vasta che ne guidassero l'evoluzione con razionalità. La debolezza della pianificazione territoriale unita alla necessità degli enti locali di far cassa, data la progressiva

crisi fiscale, incamerando con continuità oneri di urbanizzazione, ha quindi lasciato mano libera al caos insediativo dell'iniziativa privata, mentre l'intervento pubblico si limitava ad interventi puntuali su aree nodali strategiche.²

D'altra parte i due decenni seguiti alla fine della seconda guerra mondiale, fino all'emanazione della Legge "ponte" (Legge 765/1967), avevano visto processi di ricostruzione ed espansione urbana attuarsi quasi sempre in assenza di piani regolatori, e con la sostanziale massimizzazione dei profitti privati a scapito della collettività.³

Se ad esempio in Francia la riflessione critica rispetto al decentramento amministrativo è stata avviata già negli anni '80, l'Italia si trova in una condizione di ritardo rispetto a questi temi. Ritardo che si sta colmando sul piano teorico, ma la coerenza latita su quello operativo, dato che si rileva ancora un forte distacco tra le raccomandazioni iniziali presenti nei piani, che affermano in linea teorica l'importanza della densificazione e della preservazione della superficie non ancora edificata, e la loro traduzione pratica.

Gli studi attuali sul consumo di suolo in Italia mostrano inoltre come la frammentazione amministrativa, che si traduce in un "eccesso di pianificazione" sul territorio, possa essere considerata una delle cause dell'odierno spreco di territorio agricolo: il numero elevatissimo di Comuni (circa 8.000), ognuno dei quali con competenze e strumenti urbanistici, produce infatti una moltiplicazione delle attese e delle previsioni di crescita urbana.⁴

Se dunque risulta necessaria una pianificazione di inquadramento rafforzata, positivamente associata, e non subordinata all'iniziativa privata, risulta utile interrogarsi sulle modalità operative che questa pianificazione potrebbe far proprie, affinché i principi operativi appena descritti possano diventare pratica consolidata. In questa prospettiva questo lavoro intende sperimentare un'analisi

² P. Bonora, *Città smarginata e consumo di territorio*, in P. Bonora (a cura di), *Rappresentare la territorialità*, Archetipo Libri, Bologna 2011; L. Reale, *Densità città residenza: tecniche di densificazione e strategie anti-sprawl*, Gangemi, Roma 2008.

³ Riguardo alla questione della rendita urbana e al suo necessario contrasto si rimanda agli scritti di G. Campos Venuti, ma anche ai contributi di E. Salzano e V. De Lucia.

⁴ Si rimanda al lavoro del Centro di Ricerca sui Consumi di Suolo, dell'ISPRA, e agli scritti di Paolo Pileri.

quantitativa della morfologia urbana, nella convinzione che possa fornire informazioni di supporto all'analisi e alla pianificazione degli insediamenti alla scala territoriale.

1.2 Nuovi strumenti per l'analisi a scala territoriale

A parità di territorio preso in esame, quanto più è dettagliata la scala di rappresentazione tanto più sono numerosi i dati da interpretare per comprendere la realtà. Per questo nell'analisi territoriale si preferisce filtrare le informazioni attraverso un fattore di scala appropriato che permetta di visualizzarle come una sintesi percepibile dall'occhio umano, selezionando le informazioni ritenute importanti, perdendo quelle non più discriminabili e mettendo invece in risalto quelle rapportabili al contesto spaziale di riferimento.

La gerarchia della pianificazione urbanistica e in particolare il principio di sussidiarietà sono proprio basati su una distribuzione delle competenze che consenta ad ogni livello di gestire il territorio alla scala che gli compete e che gli è ottimale. Tuttavia, come accennato sopra, questo modello è stato esasperato dal decentramento amministrativo degli ultimi decenni e si è indebolita la comunicazione tra i vari livelli impedendo un'efficace pianificazione interscalare del territorio.

Se quindi si vuole procedere in senso contrario, e cioè verso un rafforzamento della pianificazione di inquadramento, appare necessario risolvere questo deficit di comunicazione.

Tuttavia ci sono alcuni ostacoli e difficoltà che si frappongono. I dati non sono sempre aggiornati, univoci e affidabili, come si nota nel rapporto 2010 del CRCS⁵ e come lamentato nel PSC di Faenza riguardo alla carenza di

⁵ D. di Simine, *Il progetto "Criteri metodi e procedure per il rilevamento dei consumi di suolo su base comunale"*, in: CRCS, *Rapporto 2010*, INU Edizioni 2011.

informazioni a livello locale e nazionale sui parchi e sugli spazi verdi urbani⁶. La scarsità di risorse degli enti locali di grado inferiore non aiuta in questo senso.

Ma aldilà delle ristrettezze economiche e della limitata capacità tecnica di molti Comuni (che depongono a favore dell'intercomunalità e dell'aggregazione amministrativa), ci si può chiedere se esistano metodologie di indagine che possano ridurre la distanza tra la realtà e i pianificatori territoriali. Ovvero metodologie di analisi e valutazione che possano scavalcare i livelli subordinati di raccolta delle informazioni e centralizzarne l'elaborazione.

La disponibilità continua e aggiornata di informazioni sulla situazione del territorio a scale diverse porterebbe diversi benefici. Da un lato permetterebbe un monitoraggio continuo del livello di consumo del suolo e dello stato di degrado dell'ambiente e del paesaggio favorendo la definizione tempestiva di interventi di salvaguardia e la valutazione dell'efficacia degli stessi. Dall'altro permetterebbe di stimare le risorse necessarie agli interventi e quindi di orientarsi verso una maggiore sinergia tra pianificazione e intervento economico privato, in uno scenario in cui la pianificazione supera i tradizionali strumenti prescrittivi e dove l'intervento privato viene supportato da politiche economiche di incentivo di respiro regionale e nazionale.

Già da tempo nelle amministrazioni locali vengono utilizzati strumenti informatici che permettono la gestione, l'integrazione, l'archiviazione e la riproduzione cartografica di una vasta mole di informazioni. Informazioni che in vari ambiti sono estratte direttamente dalla realtà a terra in modo centralizzato tramite telerilevamento: ci si riferisce ad esempio ad immagini aeree o satellitari del territorio, censimenti in ambito agricolo delle colture e del loro stato di salute, stima della superficie boschiva, analisi del rischio idrogeologico, ecc. Queste informazioni così ottenute sono integrate con gli altri dati di origine diversa all'interno dei sistemi GIS, noto acronimo di *Geographic Information System*, anche conosciuti come SIT, Sistemi Informativi Territoriali. Questi sistemi, di cui si tratterà più approfonditamente nel prossimo capitolo, cercano, nella loro accezione più completa, di riprodurre per quanto tecnicamente possibile i

⁶ Comune di Faenza, *PSC di Faenza, Relazione indicatori prestazionali*, Faenza, 2009.

processi cognitivi e analitici che vengono messi in atto dal cervello umano davanti ad una carta, permettendo al contempo l'integrazione delle informazioni su base geografica e la contemporanea analisi a scale diverse. Tuttavia queste ultime potenzialità possono risultare frustrate, dato che i software GIS vengono spesso utilizzati solamente come strumenti informatici di produzione cartografica. Questo, come nota Piero Secondini⁷, si verifica soprattutto nelle amministrazioni di rango regionale, mentre l'uso dei GIS e degli strumenti di analisi spaziale si sta facendo strada a una scala di pianificazione maggiore: dall'analisi del flusso del traffico in una certa località, alla localizzazione dei servizi sanitari in base ai bacini d'utenza, fino all'analisi multicriteria per la pianificazione di una politica di incentivo al fotovoltaico⁸.

Così come questi strumenti di analisi trovano utilizzo nella pianificazione locale potrebbero trovare impiego anche nella pianificazione di inquadramento, tanto più considerando la possibilità di eseguire contemporaneamente analisi a scale diverse, dal quartiere, alla città, al sistema territoriale.

In particolare in questo lavoro si vuole cominciare ad esplorare quale potrebbe essere il contributo di queste tecnologie all'analisi morfologica della città e dei tessuti urbani, e valutare quanto possa essere utile integrare l'usuale approccio interpretativo personale, caratterizzato da forte componente arbitraria, con l'apporto di parametri logici e statistici applicabili e replicabili in modo oggettivo e tempestivo su vasta scala.

⁷ Piero Secondini, *Sistemi informativi geografici e processo di pianificazione nella Pubblica Amministrazione: alcune riflessioni con riferimento al contesto italiano*, in: AA.VV. (a cura di), *La diffusione dei GIS nelle amministrazioni locali italiane: nuove opportunità per il governo del territorio*, F. Angeli, Milano 1998.

⁸ A. Seravalli, *GIS: teorie e applicazioni*, La mandragora 2011.

2 Gli strumenti di analisi spaziale

2.1 GIS come strumento di analisi e di supporto alle decisioni

Se consideriamo il termine GIS, noto acronimo di *Geographic Information System*, i più richiameranno alla mente degli strumenti informatici di produzione cartografica. Questa risulta in realtà una definizione piuttosto riduttiva di ciò che è, o può essere, un GIS, dato che la produzione di cartografia viene considerata in letteratura solo l'ultima delle sei funzioni proprie dei GIS (Acquisizione, Archiviazione, Interrogazione, Analisi, Visualizzazione, Restituzione Cartografica)⁹.

Queste sei funzioni possono essere fondamentalmente ricondotte alle tre principali fasi che costituiscono ogni procedimento logico: *Input* (Acquisizione), *Elaborazione* (Analisi) e *Output* (Archiviazione, Interrogazione, Visualizzazione, Restituzione cartografica). Ci si vuole qui in particolare soffermare sul momento intermedio di analisi, delle tre fasi la più sottoutilizzata in media dagli utilizzatori di software GIS¹⁰, in particolare all'interno delle amministrazioni locali italiane di rango più elevato¹¹. Si può cercare infatti di riprodurre all'interno dei software GIS, attraverso un'opportuna formalizzazione, quell'insieme di processi logici e cognitivi che i pianificatori mettono normalmente in atto davanti a una rappresentazione cartografica per valutare i diversi scenari e prendere una decisione motivata, avvantaggiandosi nel far questo dell'approccio quantitativo proprio dell'analisi assistita dal computer. Questa modalità quantitativa di interpretazione delle informazioni, comunemente chiamata Analisi Spaziale, si basa sull'uso di strumenti informatici per misurare la concentrazione, le distanze,

⁹ A. Seravalli, *GIS: teorie e applicazioni*, La mandragora 2011.

¹⁰ *Ibid.*

¹¹ Piero Secondini, *Sistemi informativi geografici e processo di pianificazione nella Pubblica Amministrazione: alcune riflessioni con riferimento al contesto italiano*, in: AA.VV. (a cura di), *La diffusione dei GIS nelle amministrazioni locali italiane: nuove opportunità per il governo del territorio*, F. Angeli, Milano 1998.

la prossimità, l'inclusione o la sovrapposizione, così come di modelli per la comprensione delle regole che determinano la distribuzione nello spazio dei fenomeni¹².

In questo modo i GIS, nella loro componente di Analisi Spaziale, sono utilizzati come veri e propri Sistemi di Supporto alle Decisioni (DSS, *Decision Support Systems*), ovvero “*un potente insieme di strumenti in grado di accogliere, memorizzare, richiamare, elaborare, trasformare e rappresentare in scenari opportuni dati georiferiti per fornire ai decisori elementi oggettivi di valutazione su problemi di carattere ambientale*”¹³.

Come riportato nel capitolo precedente, numerosi sono gli esempi di applicazione: dall'analisi del flusso del traffico in una certa località, alla localizzazione dei servizi sanitari in base ai bacini d'utenza, fino all'analisi multicriteria per la pianificazione di una politica di incentivo al fotovoltaico.

Si può tuttavia notare come gli esempi di applicazione sopra riportati riguardino soprattutto fenomeni di natura prevalentemente socio-economica, benché definiti nello spazio, o comunque dalle variabili fisiche ben delineate, come l'inclinazione delle coperture, l'irraggiamento, i consumi, ecc. (in riferimento all'incentivazione del fotovoltaico). Poiché questa tesi si propone di esplorare le possibili applicazioni che l'analisi assistita in ambiente GIS può avere nello studio della città fisica e della sua morfologia e quali ricadute positive possa generare questo strumento di analisi sul monitoraggio dello stato di fatto e sulla pratica pianificatoria, ci si deve interrogare sul perché tra tutti i fenomeni urbani oggetto di questo tipo di analisi la morfologia urbana sia ancora terreno scarsamente esplorato.

L'aspetto fondamentale che ha fin qui probabilmente disincentivato l'applicazione dell'analisi automatica allo studio della morfologia urbana è la natura stessa del fenomeno oggetto di studio, ovvero la forma fisica della città: l'ambiente urbano è da sempre un territorio di frontiera per la ricerca in campo geomatico e nel processamento di immagini, a causa dell'intrinseca varietà dei

¹² Mario Boffi citato in A. Seravalli, *GIS: teorie e applicazioni*, La mandragora 2011.

¹³ Mario A. Gomarasca, *Elementi di geomatica*, Associazione italiana di telerilevamento, Firenze 2004; definizione derivata dalla sintesi delle enunciazioni di Cowen e Burrough.

fenomeni di natura antropica che ne costituiscono il tessuto. A differenza di quanto possa ad esempio avvenire nell'analisi delle coperture vegetate in campo agronomico (uno dei contesti maggiormente consolidati di applicazione delle tecnologie di analisi assistita) automatizzare la "comprensione" da parte di un software di come si configuri la realtà a terra in un ambiente urbano, partendo da immagini aeree o satellitari, risulta tutt'altro che banale, a causa della mole di variabili di origine e natura diverse da prendere in considerazione. Va da sé che se la tecnologia necessaria ad interpretare la grande quantità di dati generati da un rilievo urbano ad ampia scala è risultata finora acerba¹⁴, anche le applicazioni ad un livello semantico più elevato risultano compromesse in partenza. La ricerca si è quindi comprensibilmente fin'ora concentrata su applicazioni di livello semantico più basilare, come l'individuazione e la classificazione del singolo edificio. Poiché si stanno facendo importanti passi avanti in questo campo, in particolare, come si vedrà nel prossimo paragrafo, grazie all'uso integrato di informazioni spettrali e modelli della superficie, è possibile interrogarsi su quali tipologie di analisi potrebbero beneficiare di questa futura abbondanza di informazioni. L'analisi delle forme insediative e della tipomorfologia dei tessuti urbani potrebbe essere tra queste.

Per esplorare queste potenzialità di applicazione risultano sicuramente utili quei software GIS di analisi a oggetti che supportano più attivamente e in modo maggiormente personalizzabile e mirata l'analisi della struttura semantica e tessiturale della realtà indagata. Se infatti i software GIS più diffusi sono prevalentemente "trasformatori di tematismi", ovvero permettono di lavorare su banche dati e di indagarne e rielaborarne il contenuto, i software di analisi a oggetti sono orientati alla produzione di questi tematismi, collocandosi in quella fase di elaborazione intermedia tra l'acquisizione delle informazioni, fase cui è dedicata, per quanto riguarda la realtà fisica, la disciplina del telerilevamento scientifico, e la manipolazione avanzata delle stesse.

Tuttavia è giusto notare come man mano la ricerca farà passi avanti in questo campo sarà inevitabile una sempre maggiore integrazione e interscalarità delle

¹⁴ Dimostrazione di questa condizione di immaturità è la grande varietà di approcci diversi al problema proposte in letteratura (reti neurali, *fuzzy logic*, *cell automata*, analisi supervisionata...).

analisi. Se infatti, come detto sopra, l'obiettivo dei sistemi GIS è riprodurre nei limiti del possibile i meccanismi cognitivi umani, bisogna notare come questi processi cognitivi non siano affatto lineari, dall'informazione di livello semantico inferiore a quella di livello superiore, ma si organizzino piuttosto secondo un processo iterativo dove i vari livelli di elaborazione si influenzano a vicenda fino a raggiungere il risultato finale¹⁵.

2.2 Analisi a oggetti

Si può dire che la classificazione automatica, e in particolare l'analisi a oggetti, ambisce ad essere l'equivalente informatico della fotointerpretazione. La classificazione a oggetti o *object-based* nasce per sopperire alla lacuna di analisi contestuale tipica dei tradizionali metodi di classificazione basati sul singolo pixel o *pixel-based*. L'utilizzo di metodi *pixel-based* è diffuso soprattutto nel campo del telerilevamento scientifico applicato ad analisi di contesti relativamente omogenei, come la classificazione e la valutazione dello stato di salute delle coperture vegetate in campo agronomico o forestale. Le metodologie a singolo pixel prevedono un'approfondita analisi delle caratteristiche spettrali del singolo pixel e sono applicate spesso ad immagini ricavate attraverso sensori multi o iperspettrali, ovvero sensori che suddividono il segnale elettromagnetico in entrata in un numero di canali molto maggiore rispetto ai normali RGB, spesso espandendo le informazioni al campo del non visibile (infrarosso vicino, lontano, ecc.). Tuttavia queste metodologie non si dimostrano particolarmente accurate nell'analisi di riprese ad alta risoluzione geometrica di zone estremamente complesse come le aree urbane.

La sempre maggiore disponibilità di immagini ad alta risoluzione geometrica ha quindi spinto la ricerca ad elaborare metodi d'indagine che permettessero di sfruttare meglio questa tipologia di dato estremamente ricca di informazioni, ma,

¹⁵ Thomas Blaschke, Josef Strobl, *What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS*, GeoBIT/GIS 6 (01), 12-17.

allo stesso tempo, estremamente complessa da interpretare, soprattutto in relazione ai contesti urbani. Se infatti i pixel di un'immagine a bassa risoluzione possono essere classificati singolarmente in base alle caratteristiche spettrali, in caso di immagini ad alta risoluzione, dove l'oggetto d'indagine è spesso più grande del singolo pixel, c'è il rischio che si realizzi un forte effetto "sale e pepe", ovvero una classificazione eterogenea di un gruppo di pixel che invece, se analizzati ad occhio, verrebbero considerati un unico insieme. Durante la fotointerpretazione vengono infatti messi in atto dal cervello dei meccanismi cognitivi che permettono di aggregare le singole informazioni puntuali, trasmesse dalla retina, in insiemi dotati di valore semantico, ovvero oggetti (mentali) significativi.

La metodologia di classificazione a oggetti è orientata a riprodurre i suddetti meccanismi cognitivi gerarchici di aggregazione delle informazioni e di interpretazione delle stesse, come ad esempio le valutazioni di prossimità tra diversi oggetti, che devono prima essere riconosciuti come entità autonome, per poterne poi valutare le diverse caratteristiche. Queste caratteristiche, attributi o *features* possono essere proprietà geometriche (dimensione, lunghezza, forma, ecc.), relazionali (vicinanza ad altri oggetti, rapporti gerarchici, ecc.) o combinazioni delle due precedenti (ad esempio la tessitura).

Due sono le azioni fondamentali costitutive della classificazione *object-oriented*: *segmentazione e classificazione*.

La *segmentazione* è l'operazione in base alla quale l'immagine viene suddivisa in vari sottoinsiemi omogenei di pixel, detti *objects* o oggetti, l'unità fondamentale su cui si basa la successiva analisi. La segmentazione si sviluppa generalmente in livelli gerarchici in modo da poter poi analizzare la struttura semantica degli oggetti ottenuti (Figura 1). L'obiettivo generale è quello di ottenere oggetti significativi, il più possibile corrispondenti alla realtà dell'immagine; migliore risulta la segmentazione, migliore sarà la qualità della classificazione finale.

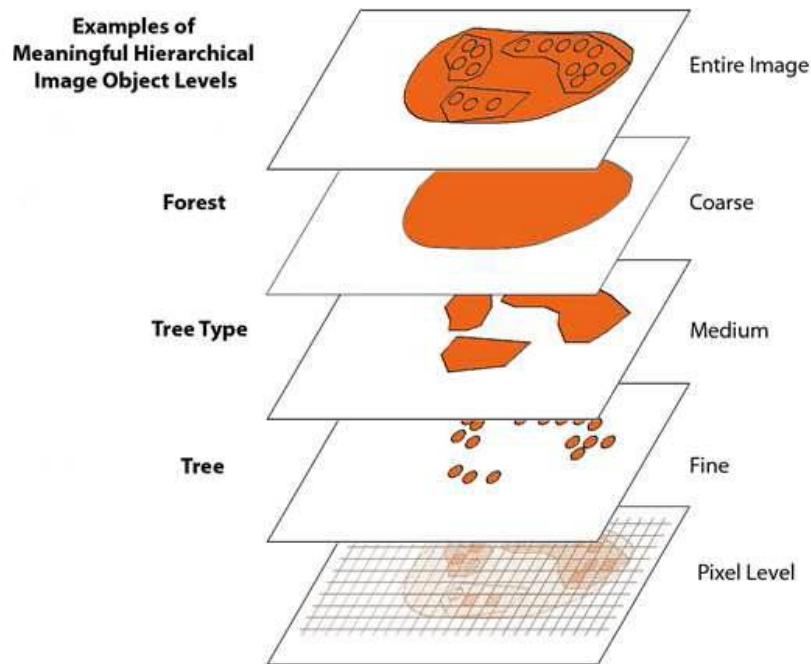


Figura 1 - Gerarchia della segmentazione¹⁶

Sono stati finora elaborati diversi algoritmi di segmentazione. All'interno del software *eCognition*, software commerciale con cui sono sviluppate la maggior parte delle applicazioni nel campo dell'analisi a oggetti¹⁷, il più importante e flessibile è l'algoritmo di *segmentazione multirisoluzione*. Si tratta di un algoritmo di segmentazione *bottom-up region merging*, ovvero che parte dal singolo pixel fino a creare per accrescimento oggetti alla scala (*scale*) data, rispettando al contempo parametri di forma (*shape*) e compattezza (*compactness*) forniti in *input*. In base ai vari parametri (*scale*, *shape* e *compactness*) la segmentazione viene eseguita attribuendo maggior peso alle caratteristiche spettrali (colore) o tessiturali. La scelta dei valori da attribuire ai vari parametri dipende dal tipo di oggetti che si vuole ottenere e costituisce la parte più dispendiosa in termini di tempo durante la fase di elaborazione delle procedure di segmentazione. Poiché l'approccio standard consiste nell'individuare i parametri attraverso un dispendioso processo empirico *trial and error*, sono stati proposti

¹⁶ Immagine tratta da *eCognition Developer 8.9 User Guide*.

¹⁷ J.S. Walker, T. Blaschke, *Object-based land-cover classification for the Phoenix metropolitan area: optimization vs. transportability*, in: "International Journal of Remote Sensing", n. 29, 2021-2040.

approcci diversi, ad esempio basati sulla logica *fuzzy*¹⁸ o sulla *varianza locale*¹⁹ al fine di automatizzare ed ottimizzare la definizione dei parametri.

Esistono anche altre procedure di segmentazione che consentono di sfruttare informazioni di tipo vettoriale, permettendo l'integrazione di dati di natura diversa. Quest'ultima procedura è stata utilizzata nelle applicazioni proposte in questo lavoro per effettuare la *rasterizzazione* (Figura 2) del database topografico regionale, ovvero la trasformazione degli oggetti vettoriali in oggetti costituiti da pixel, interpretabili dal software (vedi cap. 3).

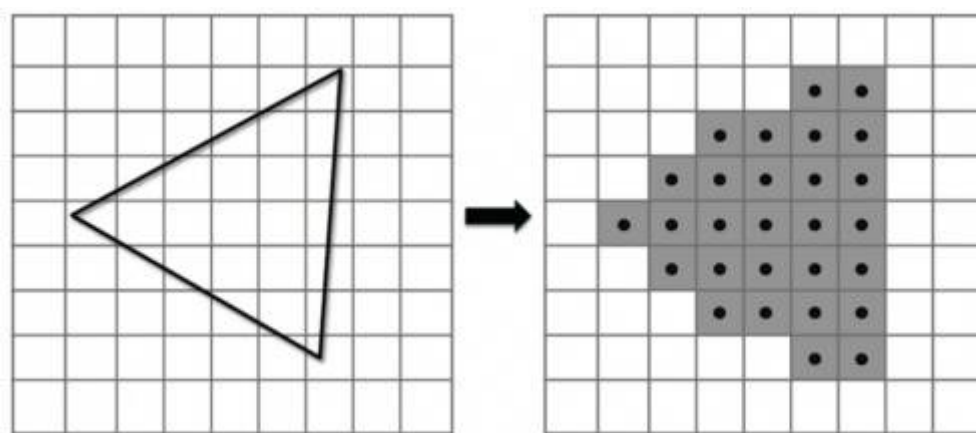


Figura 2 – Trasformazione di un oggetto vettoriale (sinistra) in dato *raster* (destra)

Con *classificazione* si intende quell'insieme di operazioni che portano ad associare informazioni di tipo semantico agli oggetti precedentemente ottenuti tramite segmentazione. Questa fase del complessivo processo di elaborazione si appoggia fortemente sulla conoscenza a priori delle caratteristiche degli oggetti che si vogliono individuare, conoscenza che deve essere organizzata in una ontologia formale al fine di garantire la trasparenza, l'oggettività e la trasferibilità (possibilità di riutilizzo) della classificazione e del procedimento utilizzato²⁰. La

¹⁸ Y. Zhang, *A fuzzy logic approach to supervised segmentation for object oriented classification*, 2006.

¹⁹ L. Drăguț, O. Csillik, C. Eisank, D. Tiede, Automated parameterisation for multi-scale segmentation on multiple layers, in: "ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing", n. 88, 2014; S. d'Oleire-Oltmanns, D. Tiede, *Specific target objects – specific scale levels? Application of the estimation of scale parameter 2 (ESP 2) tool for the identification of scale levels for distinct target objects*, in: "South-Eastern European Journal of Earth Observation and Geomatics", Vo3, No2S, 2014.

²⁰ G. Forestier, A. Puissant, C. Wemmert, P. Gañarski, *Knowledge-based region labeling for remote sensing image interpretation*, in: "Comput. Environ. Urban Syst", n. 36, 470–480.

definizione dell'ontologia consiste nell'individuazione dei concetti semantici (ad esempio di natura morfologica come “forma allungata”) che verranno poi tradotti in un linguaggio interpretabile dalla macchina tramite uso di *features* e relativi requisiti assegnati ad ogni classe. Dal punto di vista del software *eCognition*, con il termine *features* si intendono gli attributi degli oggetti virtuali, valori assegnati dal programma attraverso funzioni matematiche (ad esempio la caratteristica “forma allungata” può essere descritta dal rapporto tra lunghezza e larghezza; tanto maggiore sarà il rapporto tanto più l'oggetto avrà una forma complessivamente stretta e allungata).

I requisiti sono enunciati logici che permettono di valutare l'appartenenza o meno di un oggetto ad una determinata classe: il tipo più semplice di valutazione è eseguita comparando una *feature* a un valore dato in *input* detto *threshold value*, o valore soglia. Ad esempio la classe “Abitazioni mono o plurifamiliari” potrebbe essere definita dal requisito “*Number of Pixels < 2000*”. Più requisiti possono essere organizzati in alberi logici per cercare di riprodurre la complessità della realtà.

Metodologie di classificazione più avanzate possono prevedere l'impiego della logica *fuzzy*, o sfocata, in base alla quale, a differenza della logica *booleana*, l'appartenenza a una classe non è limitata ai valori “vero” o “falso”, ma può anche essere “abbastanza vera” o “abbastanza falsa” in base ai requisiti forniti; in altri termini la classificazione può spaziare da valori di appartenenza compresi tra 0 e 1.

Al fine di ottenere migliori risultati finali le fasi di segmentazione e classificazione possono essere alternate in un processo iterativo. Un approccio di questo tipo è stato sperimentato nell'identificazione attraverso immagini satellitari *QuickBird* di insediamenti abusivi a Rio de Janeiro²¹. In seguito alla prima segmentazione e successiva classificazione degli oggetti ottenuti (tetti,

²¹ P. Hofmann, J. Strobl, T. Blaschke, H. Kux, *Detecting informal settlements from QuickBird data in Rio de Janeiro using an object based approach*. in: Blaschke, T., Lang, S., Hay, G. (Eds.). “*Object based image analysis*”, Springer, Heidelberg, Berlin, New York, 537-560; da questo lavoro sono tratte le figure 3, 4 e 5.

ombre, macchie di vegetazione) (Figura 3) gli autori dello studio hanno proceduto con un'ulteriore fase di classificazione, distinguendo tra insediamenti regolari ed abusivi in base alla presenza particolarmente accentuata di quegli oggetti che, in base all'ontologia precedentemente elaborata, qualificano positivamente per la classe relativa agli insediamenti abusivi.

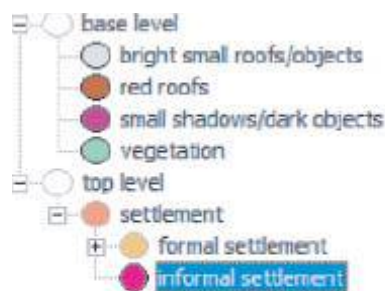


Figura 3 - Gerarchia delle classi

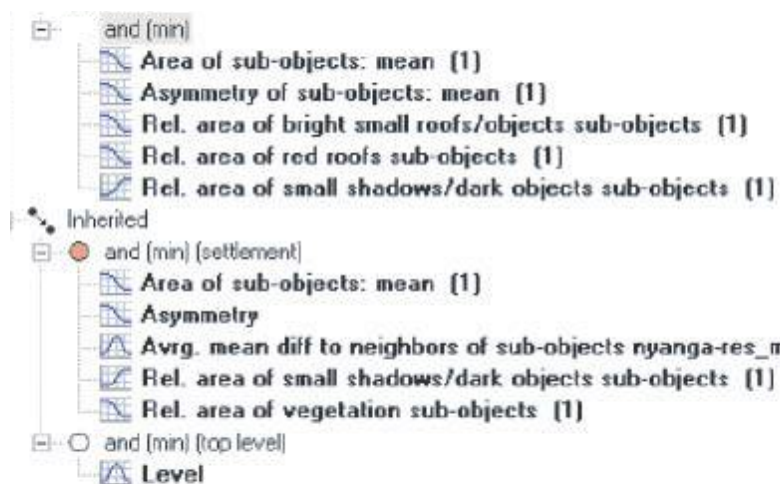


Figura 4 - Requisiti della classe "informal settlement"

Infine la procedura di elaborazione si conclude con un'alternanza classificazione/segmentazione in cui gli insediamenti ritenuti classificati erroneamente come regolari, in quanto circondati da insediamenti di altro tipo, vengono uniti agli oggetti classificati come abusivi in un processo di accrescimento iterativo, che si conclude quando non ci sono più insediamenti regolari circondati da insediamenti abusivi (Figura 5).

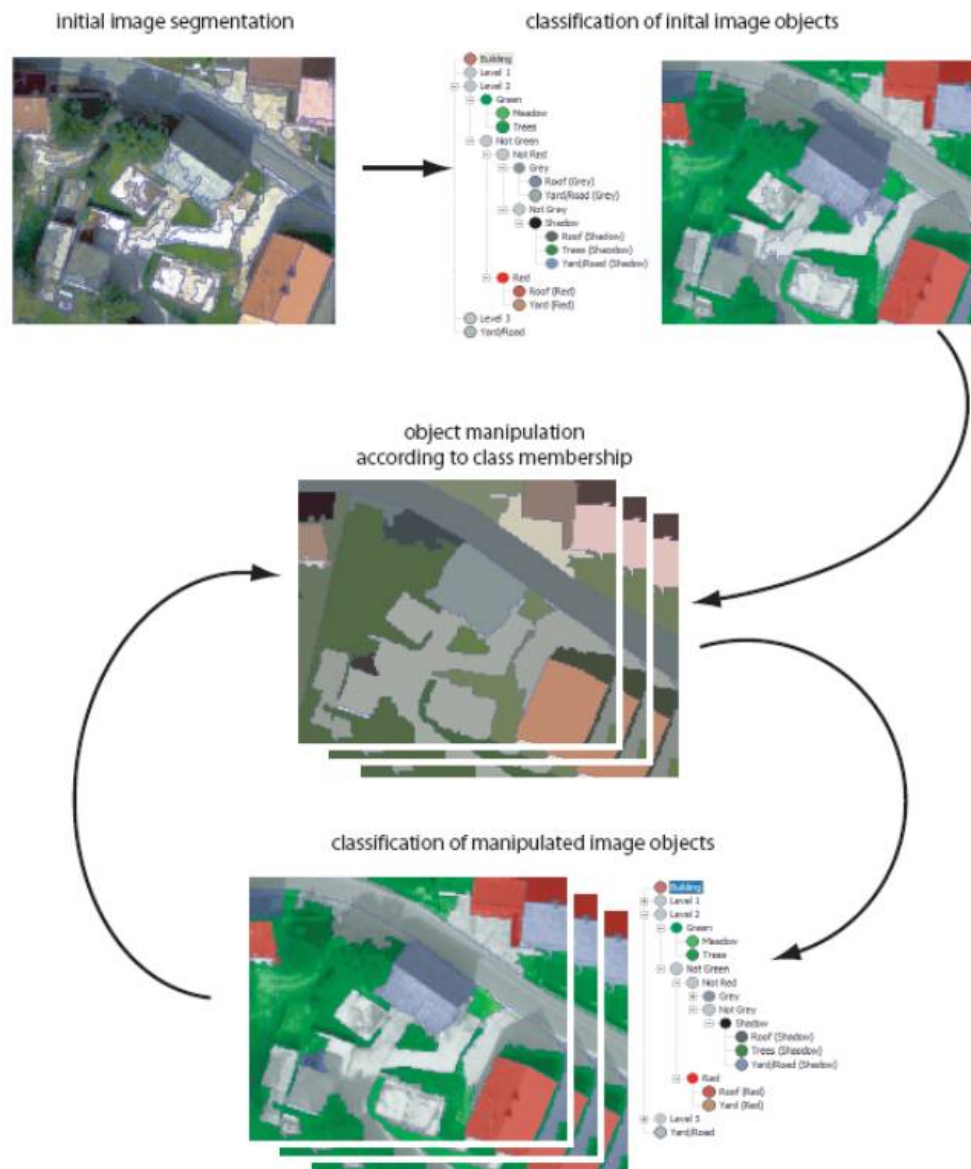


Figura 5 - Schema del processo iterativo segmentazione/classificazione

Per quanto riguarda l'individuazione e la classificazione dei singoli edifici, allo stato dell'arte attuale la qualità della segmentazione può trarre un notevole beneficio dalle informazioni ricavate attraverso sensori *laserscanner*, in congiunzione con le usuali informazioni spettrali²². Questi sensori permettono infatti di ottenere accurati modelli digitali della superficie (DSM) che possono essere processati al fine di ottenere una rappresentazione della perimetrazione dei fabbricati (Figura 6). Le informazioni aggiuntive sulle variazioni dell'elevazione

²² *eCognition 8.0 Guided Tour – Level 3. Advanced example of building extraction. For intermediate and advanced users; Classification of buildings using LiDar and RGB data.* Trimble; da questo lavoro sono tratte le figure 6 e 7.

della superficie possono essere quindi integrate con le informazioni spettrali fornite dall'immagine per migliorare l'accuratezza e la precisione degli oggetti edilizi estratti (Figura 7).

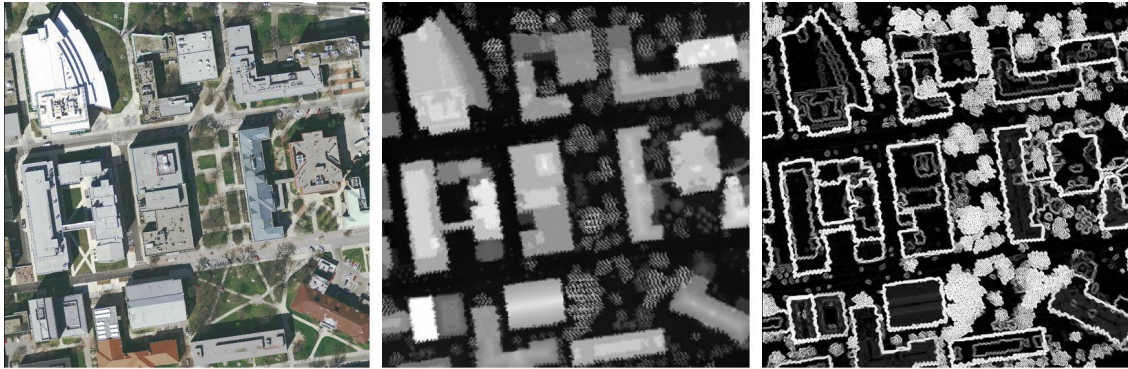


Figura 6 - Estrazione dei perimetri degli edifici: dati RGB (sinistra), DSM (centro), layer della pendenza (destra)



Figura 7 - Risultato di segmentazione e classificazione eseguite tramite uso integrato di informazioni spettrali e sull'elevazione del suolo

L'integrazione tra dati spettrali e DSM è stata sperimentata nel 2009 per la classificazione di tipologie edilizie nelle città tedesche di Colonia e Dresda²³. Attraverso un approccio di tipo *fuzzy logic* che ha permesso di valutare gli oggetti in base a più di 20 *features*, relative a forma, dimensione e contenuto spettrale, gli autori hanno ottenuto una classificazione in cinque classi dei fabbricati

²³ M. Wurm, H. Taubenböck, A. Roth, S. Dech, *Urban Structuring Using Multisensoral Remote Sensing Data: By the Example of the German Cities Cologne and Dresden*, in: "Proceedings of Urban Remote Sensing Event, Shanghai, China, 20–22 May 2009"; da questo lavoro sono tratte le figure 8, 9 e 10.

presenti nell'area urbanizzata presa in considerazione: “edifici a blocco/edifici isolato”, “edifici in altezza”, “semi-dispersi / dispersi”, “non residenziali / industriali”, “a schiera” (Figura 8). Successivamente i vari isolati sono stati classificati in base alla tipologia di edifici presente al proprio interno (Figura 9).

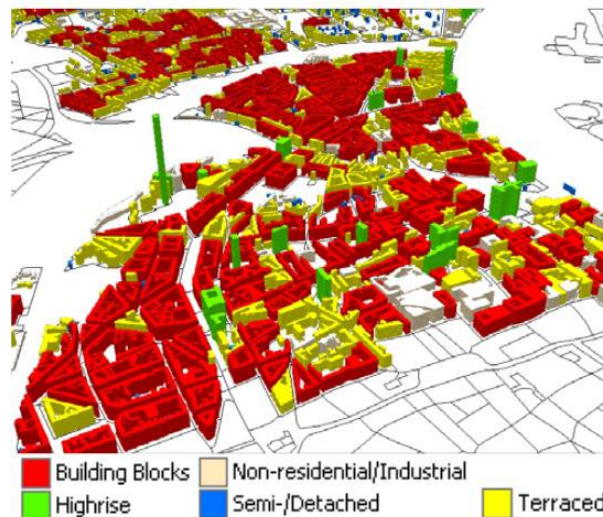


Figura 8 - Vista a volo d'uccello degli edifici classificati

Nel 2014 è stato proposto un metodo *object-based* in cui a partire da dati laser da sensore aereo sono state estratte le impronte delle coperture degli edifici e classificate in tre categorie: “edifici per appartamenti”, “edifici industriali e fabbriche”, “edifici piccoli / residenziali”²⁴ (Figura 10).

²⁴ M. Belgiu, I. Tomljenovic, T.J. Lampoltshammer, T. Blaschke, B. Höfle, *Ontology-Based Classification of Building Types Detected from Airborne Laser Scanning Data*, in: “Remote Sensing”, n. 6, 2014, 1347-1366; da questo lavoro è tratta la figura Figura 10.

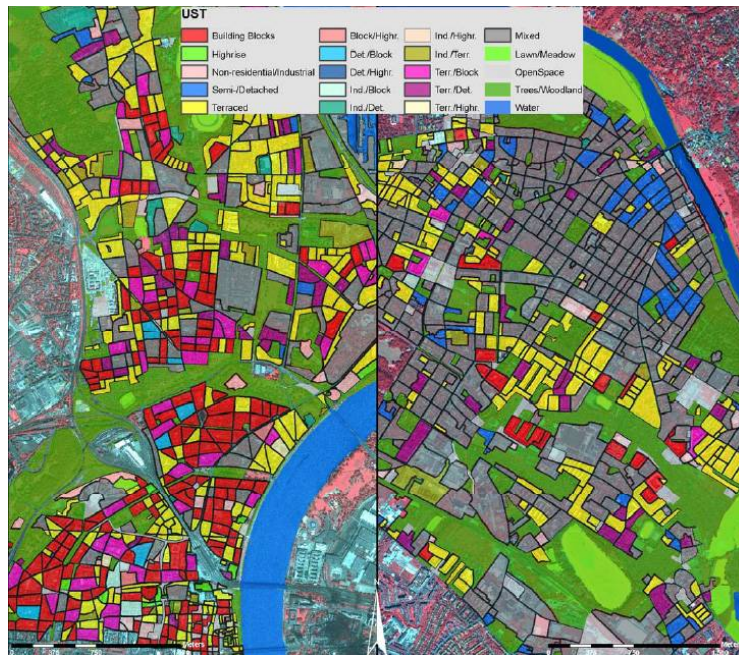


Figura 9 - Risultato della classificazione degli isolati per le aree studio di Colonia (a sinistra) e Dresda (a destra)

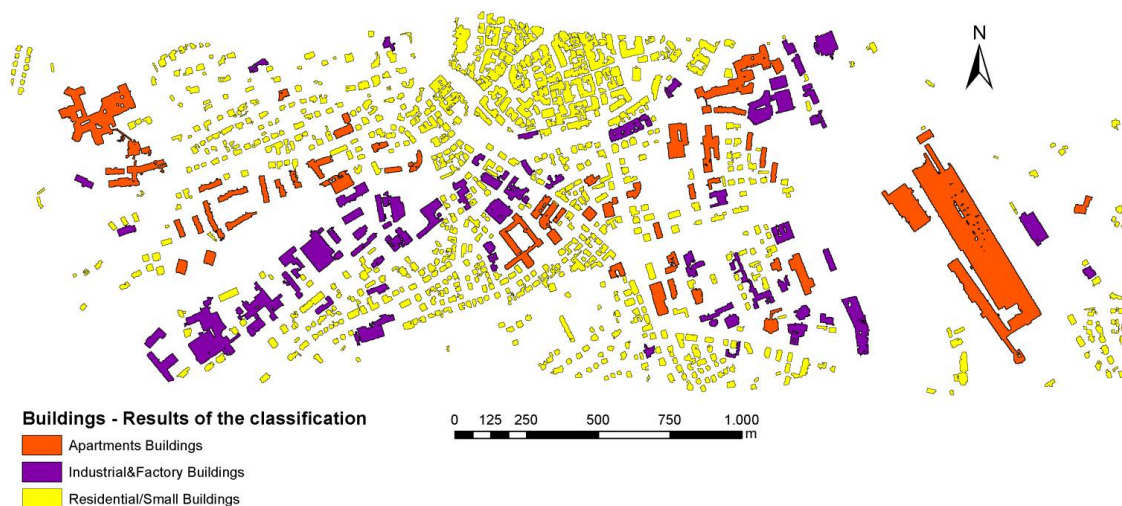


Figura 10 - Risultato della classificazione di singoli fabbricati a partire da dati laser aerei

La classificazione è stata eseguita utilizzando tecniche di apprendimento automatico *machine learning* per l'individuazione delle *features* più adatte a formalizzare l'ontologia delle classi (l'algoritmo utilizzato ha identificato come *features* più valide l'inclinazione della copertura e l'area dell'impronta). L'accuratezza del rilevamento è risultata diversa per le varie classi: mentre è stata stimata del 97.7% per la classe "edifici industriali e fabbriche", l'accuratezza per le classi "edifici per appartamenti" ed "edifici piccoli/residenziali" è stata stimata

del 60% e del 51% rispettivamente, mettendo in luce, secondo gli autori, la necessità di includere nella definizione delle classi ulteriori informazioni, in particolare riguardanti la natura delle relazioni spaziali.

Le maggiori opportunità applicative sembrano al momento derivare dall'integrazione sempre più stretta delle varie metodologie di acquisizione (telerilevamento), elaborazione (classificazione *object-oriented*) e gestione (sistemi informativi territoriali) dei dati. Esempio recente dell'applicazione sinergica di queste tecnologie è l'esperimento di automazione dei registri catastali nel *länder* Rheinland-Pfalz, in base al quale le eventuali modifiche al patrimonio edilizio sono individuate in modalità semiautomatica a partire dall'analisi a oggetti di immagini telerilevate, riducendo la necessità di dispendiose verifiche sul campo e di conseguenza i tempi di aggiornamento dei database, che passerebbero dall'ordine di anni a quello di mesi²⁵.

Tuttavia è opinione dell'autore che le tecnologie di analisi assistita potrebbero non solo contribuire all'ottimizzazione delle procedure di acquisizione e gestione delle informazioni sullo stato di fatto, ma anche permettere una armonizzazione e centralizzazione dell'analisi delle condizioni paesaggistiche e dell'elaborazione di proposte e di interventi correttivi dei fenomeni attualmente in atto all'interno del territorio urbanizzato. Nel prossimo capitolo verranno mostrate alcune ipotesi applicative nell'ambito dell'analisi morfologica delle forme urbane e delle tipologie insediative, nel tentativo, con questo lavoro di tesi, di fare alcuni passi in questa direzione.

²⁵ Todd Douglas, Trimble, *Infrastructure challenges & geospatial solutions*, Geospatial World Forum, Amsterdam, 2012.

3 Ipotesi di applicazione dell'analisi a oggetti: i casi studio di Faenza, Forlì, Cesena e Rimini

3.1 Dati utilizzati ed elaborazioni preliminari

L'insieme dei dati relativi ai casi di studio qui trattati è costituito dal database topografico vettoriale e dalle ortofoto multifunzione RGB AGEA del territorio emiliano-romagnolo, limitati a dei *subsets* (ritagli) relativi alle aree maggiormente infrastrutturate dei comuni di Faenza, Forlì, Cesena e Rimini. Questi prodotti informativi risalgono entrambi al 2008 e la scala di elaborazione è direttamente derivata dalla risoluzione geometrica delle ortofoto corrispondenti, pari a 50 cm/pixel.

Poiché questa sperimentazione è basata principalmente su valutazioni di carattere geometrico e spaziale la principale fonte di informazioni è costituita dal database vettoriale, mentre le ortofoto hanno svolto soprattutto una funzione di "orientamento" e di "navigazione" durante l'elaborazione della procedura. L'informazione spettrale è stata limitata a questo ruolo sia per la volontà di mettere a fuoco maggiormente le possibilità che l'analisi assistita può fornire allo studio della tipomorfologia, sia per la ridotta qualità dell'ortorettifica nelle fasce di bordo delle riprese aeree²⁶. È comunque presente una breve "escursione" nel campo dell'analisi spettrale, per quanto permesso dalla limitazione ai soli canali RGB delle immagini a disposizione.

Le informazioni sono state processate in ambiente *eCognition Developer 8.9*²⁷.

Una prima elaborazione preliminare, comune ad entrambe le ipotesi applicative presentate, è costituita dalla trasformazione dei dati di natura vettoriale in dati di

²⁶ Le ortofoto AGEA fornite alla facoltà sono orientate soprattutto ad analisi dei campi, perciò alcuni centri urbani sono stati ripresi "di striscio" rispetto al percorso di volo, risultando in riprese di scorcio evidenti soprattutto in relazione agli edifici più elevati.

²⁷ Per l'esatta definizione delle varie *features* e strumenti utilizzati in questo lavoro e citati di seguito si fa riferimento all'*eCognition Developer 8.9 Reference Book* e all'*eCognition Developer 8.9 User Guide*.

natura *raster*. In ambiente *eCognition* questa operazione, detta “rasterizzazione”, viene eseguita tramite sovrapposizione georeferenziata dei *layers* vettoriali all’immagine di riferimento e successiva segmentazione della stessa in oggetti virtuali costituiti da aggregati continui di pixels, ricalcanti la forma degli oggetti vettoriali originari. Oltre al vantaggio di poter integrare informazioni di natura diversa, la conversione del database vettoriale in dato *raster* è vantaggiosa dal punto di vista computazionale. In generale l’analisi su dati *raster* infatti richiede minore potenza di calcolo e conseguentemente minore tempo di elaborazione e questo diventa un fattore rilevante se si vogliono eseguire analisi su un notevole volume di informazioni, come nel caso di valutazioni su elementi relativamente minuti - i singoli fabbricati - rispetto alla scala urbana-territoriale di riferimento. Dal database topografico sono stati in particolare estratti e rasterizzati i poligoni appartenenti alla classe “cassoni edilizi” (involuppo di edifici adiacenti) e alle classi relative alla maglia stradale e alle strutture ferroviarie.

I dati sono stati organizzati in una gerarchia di due livelli. Al livello superiore la segmentazione è stata eseguita utilizzando solamente le informazioni derivanti dalla maglia stradale e ferroviaria, individuando così gran parte degli isolati costituenti la trama urbana, mentre al livello inferiore la segmentazione viene eseguita utilizzando sia le informazioni sulla maglia stradale che sui fabbricati. In questo modo gli isolati possono essere classificati secondo le caratteristiche dei relativi sub-oggetti attraverso la definizione di opportune *features*.

La sola segmentazione basata sulla maglia stradale tuttavia non è sufficiente ad isolare tutti gli aggregati edilizi dai terreni non edificati. In particolare le aree edificate ai margini dell’urbanizzato restano unite ai terreni agricoli. Per discriminare questi raggruppamenti, l’immagine, limitatamente agli oggetti non classificati come maglia stradale, viene suddivisa in una scacchiera dalla casella di lato pari a 10 pixel (5 metri). Successivamente, tramite apposita *feature*, viene calcolata per ogni oggetto la percentuale di area classificata come fabbricato in un intorno di 100 pixel. Le caselle che superano una certa soglia vengono unite ai fabbricati adiacenti andando a formare degli isolati indipendenti dalla maglia

stradale (Figura 11). È stata utilizzata una funzione di area relativa invece che una semplice distanza fissa sia per semplicità di implementazione (all'interno del software le distanze sono calcolate tra i baricentri degli oggetti, non dal bordo), sia perché attraverso il calcolo dell'area relativa la distanza entro cui i fabbricati possono essere lontani tra di loro può variare. Questo risulta utile per connettere sia edificato a grana piccola come villette che a grana grossa come impianti industriali (Figura 12).

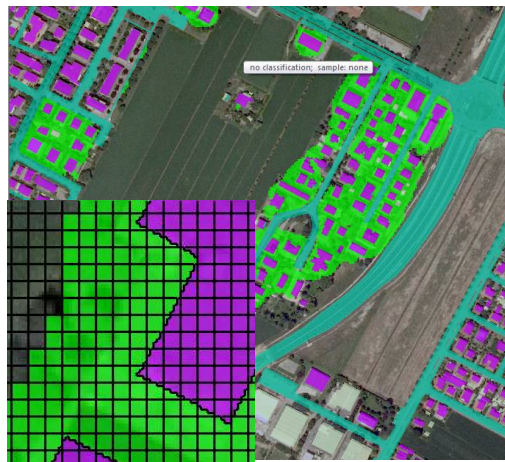


Figura 11 - Segmentazione degli aggregati edilizi non definiti dalla maglia stradale



Figura 12 - Diversa distanza di aggregazione a seconda della grana

Relativamente all'uso del database topografico per l'individuazione dei corpi edilizi va sottolineato che le tecniche di integrazione dei dati ottenuti tramite sensori LIDAR o *laser scanner* permettono già adesso, come mostrato nel

paragrafo 2.2, di estrarre con buona precisione il perimetro dei fabbricati, mentre sono allo studio tecniche di estrazione del tracciato viario a partire da immagini satellitari²⁸.

Perciò questa ricerca, pur concentrandosi sull'interpretazione delle relazioni spaziali che intercorrono tra i manufatti edilizi e tralasciando la fase, più propriamente attinente al telerilevamento e all'*image processing*, del riconoscimento della natura dei singoli oggetti, ha comunque l'ambizione di porsi in continuità metodologica con le suddette discipline. È infatti ipotizzabile, col miglioramento in corso delle tecnologie di analisi assistita, un passaggio diretto dal dato grezzo al dato interpretato, senza interventi intermedi.

3.2 Procedure di classificazione delle forme insediative

Per classificare gli oggetti virtuali, associare cioè ad ogni oggetto un insieme di appartenenza, è necessario innanzitutto individuare le caratteristiche che definiscono l'appartenenza o meno a ciascuna categoria. Nelle procedure di classificazione supervisionate, quale è l'approccio utilizzato in questa sperimentazione, viene formalizzata la conoscenza a priori in possesso dello sviluppatore, definendo dei parametri statistici che permettano alla macchina di valutare nel linguaggio di calcolo la corrispondenza o meno del singolo oggetto rispetto alle caratteristiche richieste.

Il risultato finale che si vuole qui ottenere è la classificazione degli aggregati e dei complessi edilizi in cinque classi tipomorfologiche: edificazione compatta, edificazione a grana fine, edificazione reticolare a grana grossa, forme aperte, cittadelle. Queste classi tipomorfologiche sono state individuate in riferimento alla letteratura esistente, in particolare ai lavori di Elio Piroddi, Antonio Capuccitti e Patrizia Gabellini.²⁹

²⁸ J.D. Wegner, J.A. Montoya-Zegarra, K. Schindler, *A higher-order CRF model for road network extraction*, in: "Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2013 IEEE Conference"

Con “Edificazione Compatta” (Figura 13) si intende una forma-tessuto intricata e compatta a grana media, caratterizzata da una relazione diretta tra edificio e spazio pubblico. Il complesso edilizio assume spesso una configurazione a corte chiusa, con una o più bucatore, in cui la copertura completa del lotto sul lato strada porta a contatto i singoli edifici, determinando sequenze continue di cortine edilizie lungo le strade. In alcuni casi l’aggregato edilizio assume una configurazione a corte aperta, dove lo spazio pubblico racchiuso da uno o più corpi edilizi diventa direttamente accessibile dall’invaso stradale. L’involuppo complessivo degli edifici è spesso articolato in “bracci” che si sviluppano internamente all’isolato in modo irregolare. Questa configurazione tipomorfologica corrisponde, nel territorio romagnolo, all’impianto medievale proprio dei centri storici.

Nella classe “Edificazione a Grana Fine” (Figura 14) rientra la quasi totalità dell’espansione urbana a scopo abitativo dal dopoguerra a oggi. Essa è costituita in gran parte da edifici mono o plurifamiliari con lotto di pertinenza arretrati rispetto al tracciato stradale e in parte minore da palazzine a blocco o in linea, anch’esse generalmente arretrate e isolate al centro del lotto di pertinenza. La pianta dei fabbricati è tendenzialmente quadrata o leggermente rettangolare; le eccezioni, come intensivi dalla lunghezza notevole, sono tra di loro distanti e immerse nella tipologia prevalente, non costituendo perciò aggregati tipologici autonomi degni di nota. La maglia stradale che definisce gli isolati è generalmente reticolare, raramente organica.

²⁹ E. Piroddi, A. Cappuccitti, *Urbanistica è progetto di città*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna 2012; A. Cappuccitti, *Tessuto urbano*, in C. Mattogno (a cura di), *Ventuno parole per l’urbanistica*, Carocci, Roma 2008; P. Gabellini, *Fare urbanistica: esperienze, comunicazione, memoria*, Carocci, Roma 2010.



Figura 13 – Edificazione compatta; in senso orario a partire da in alto a sinistra: Forlì, Cesena, Rimini, Rimini

Le aree classificabili come “Edificazione a Grana Grossa” (Figura 15) corrispondono per la maggior parte a fabbricati adibiti ad attività produttive; a presentare una configurazione di questo tipo sono quindi i più o meno vasti distretti industriali collocati ai margini della città, il più delle volte segregati dalla funzione abitativa, più raramente inseriti come piccole enclavi nel tessuto più minuto. Le caratteristiche principali che permettono di definire questa tipologia di tessuti sono la considerevole dimensione in pianta dei corpi edilizi e le tendenzialmente omogenee proprietà cromatiche delle coperture industriali, di colore grigio.



Figura 14 - Edificazione a grana fine; in senso orario a partire da in alto a sinistra: Forlì, Cesena, Cesena, Rimini

Appartengono alla classe “Forme Aperte” (Figura 16, Figura 17) quegli insediamenti caratterizzati da edificazioni ad alta densità inserite tuttavia all’interno di un impianto planimetrico a basso rapporto di copertura. Si tratta perlopiù di sistemi lineari o a corti aperte, costituiti da elementi che possono raggiungere una notevole dimensione, dalla forma sia rigida (stecche) che maggiormente fluida e articolata.

Si tratta spesso di operazioni di edilizia sociale frutto di progettazione unitaria in cui la bassa variabilità tipologica unita all’ampia superficie inutilizzata e al disagio economico e sociale più o meno latente può creare situazioni

problematiche rendendo queste forme insediative obiettivi privilegiati per opere di risanamento quali *infilling* morfologico e funzionale.



Figura 15 - Edificazione reticolare a grana grossa; in senso orario a partire da in alto a sinistra: Forlì, Cesena, Cesena, Rimini

Infine l'edilizia fuoriserie dei grandi complessi e dei grandi contenitori commerciali, rientrante nella classe "Cittadelle"³⁰ (Figura 20). In questa categoria rientrano tutte quelle funzioni speciali presenti solo un numero definito di volte come, ad esempio, ospedali, grandi scuole e università, mercati generali e rionali e centri commerciali. Dal punto di vista morfologico alcuni di questi edifici

³⁰ Il termine è stato proposto da Patrizia Gabellini in P. Gabellini, *Fare urbanistica: esperienze, comunicazione, memoria*, Carocci, Roma 2010, p. 34.

speciali sono caratterizzati, oltre che dalla notevole dimensione, anche da un impianto distributivo particolarmente articolato, in relazione alla propria funzione specifica. Ad esempio complessi come campus universitari e scuole risultano spesso organizzati secondo un impianto distributivo a padiglioni. Altra caratteristica è l'isolamento spaziale, che risulta crescere in funzione della dimensione stessa del fabbricato. Questi grandi complessi tendono infatti a creare il vuoto intorno a sé, in particolare i grandi centri commerciali posti all'esterno del corpo urbano.



Figura 16 - Forme aperte; Forlì (in alto), Cesena (in basso)



Figura 17 - Forme aperte, Rimini



Figura 18 – Cittadelle; fier a sinistra) e ospedale (a destra), Rimini



Figura 19 – Cittadelle; fiera e centro commerciale (a sinistra), rocca medievale (carcere) e campus universitario (a destra), Forlì



Figura 20 – Cittadelle; ospedale (a sinistra) e centro commerciale (a destra), Cesena

Le procedure di classificazione di seguito proposte sono basate su tre passaggi:

- 1) valutazione del grado di corrispondenza dei singoli edifici rispetto alle varie caratteristiche geometriche e distributive sopra elencate;
- 2) eventuale valutazione delle relazioni spaziali che intercorrono tra gli oggetti sopradetti mediante *features* relazionali;
- 3) classificazione degli aggregati in base alle valutazioni precedenti.

I punti 1) e 2) consistono nell'individuazione e definizione di tutte quelle *features* necessarie a descrivere e formalizzare la conoscenza a priori esercitata ed applicata dalla mente umana durante l'analisi tipomorfologica. Possono essere semplici *features* preimpostate e già presenti all'interno del software che permettono di calcolare alcune caratteristiche geometriche (come area in pixel, compattezza, snellezza, ecc.) o relazionali e di prossimità (come presenza, numero e area relativa degli oggetti appartenenti ad una certa classe in un dato intorno areale o contenuti in un super-oggetto). Possono però essere realizzate anche *features* "personalizzate", sia come più o meno semplici funzioni matematiche di altre *features*, sia come *output* di procedure di elaborazione più complesse e articolate, come si vedrà in seguito nel caso della classificazione delle "cittadelle". Specialmente nella descrizione degli oggetti di gerarchia inferiore, come i singoli fabbricati, le varie *features* geometriche sono spesso "raccolte" in un unico indice descrittivo sintetico, ovvero una funzione matematica che restituisce un unico valore a partire da più valori in *input*; poiché questi indici sono associati in genere a classi ausiliarie (utilizzate per le successive valutazioni di natura relazionale, come ad esempio ("abitazioni mono-plurifamiliari" o "intensivi lineari")), più il valore è elevato più l'oggetto possiede le caratteristiche tipiche di quella classe; viceversa se il valore è prossimo o uguale a 0. Spesso la funzione è definita in modo tale che le varie caratteristiche si possano compensare tra di loro.

Il punto 3) consiste nella formalizzazione dei requisiti che devono essere soddisfatti affinché un aggregato risulti appartenente ad una determinata classe. Questi requisiti sono codificati per ogni classe in un albero logico più o meno complesso che "soppesa" le varie *features* e indici sintetici attraverso gli operatori logici. Spesso valori particolarmente pronunciati in alcune caratteristiche possono compensare carenze sotto altri aspetti; ad esempio l'appartenenza, in bilico, se limitata alla valutazione di una sola caratteristica geometrica o relazionale, di un isolato ad una certa tipologia aggregativa può essere rafforzata dalla accentuata presenza al contorno di isolati o edifici dall'appartenenza certa a quella stessa tipologia. Questo approccio può essere

formalizzato tramite requisiti discreti come nel caso dell'edificazione compatta (vedi paragrafo 3.2.1, Figura 24) o attraverso l'uso di funzioni continue, come nel caso degli indici sintetici sopra menzionati e delle *membership functions* (funzioni di appartenenza), funzioni che associano in modo biunivoco ad ogni oggetto un valore di classificazione compreso tra 0 e 1 in base alla *feature* assegnata (Figura 21).

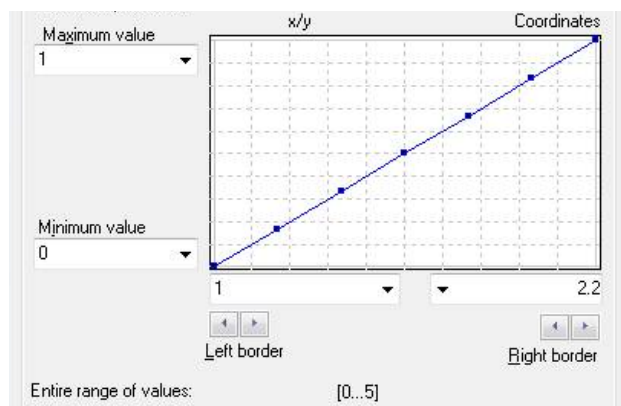


Figura 21 - Riquadro di impostazione di una *membership function*, in questo caso relativa alla feature *Density*³¹

È da notare che le classificazioni vengono effettuate in successione, perciò anche aggregati già classificati vengono presi in considerazione per le valutazioni successive (in alcuni casi la classe “Edificazione compatta” costituisce un’eccezione e viene esclusa, vedi paragrafi 3.2.4 e 3.2.5); la classificazione definitiva risulta quindi l’ultima classe assegnata.

³¹ In questo caso è stata scelta una funzione lineare con estremo inferiore 1 ed estremo superiore 2.2 (in ascissa): tra questi due estremi la funzione restituisce valori di appartenenza compresi tra 0 e 1 (in ordinata); a valori inferiori a 1 e superiori a 2.2 sono invece associati valori di appartenenza 0 e 1 rispettivamente.

3.2.1 Edificazione compatta: centri storici e tessuto intricato

Ad ogni caratteristiche tipomorfologica prevalente dei fabbricati appartenenti al tessuto compatto sono state associate le seguenti *features*: relativamente alla presenza di corti e ai contorni frastagliati ed irregolari dei corpi edilizi è stato utilizzato il *Border Index*, mentre per identificare i fabbricati che presentano un rapporto diretto con lo spazio pubblico è stata utilizzata la *feature Relative external border to Maglia stradale*.

La *feature Border Index* (Indice di Bordo) è calcolata come il rapporto tra il bordo (sia interno che esterno) dell'oggetto e il bordo della sua più piccola approssimazione rettangolare. Questa *feature* fornisce quindi una buona descrizione di quanto un oggetto sia frastagliato e se presenti delle bucaure (da un punto di vista zenitale). Più il valore di output è elevato (tendente al limite ad infinito) più l'oggetto è frastagliato, mentre un valore unitario indica una forma perfettamente rettangolare.

La *feature* personalizzata *Relative External Border to Maglia Stradale* calcola il rapporto tra il bordo esterno dell'oggetto a contatto con la maglia stradale e il bordo esterno totale, con il bordo esterno calcolato al netto di corti chiuse e corti aperte. Sono precedentemente classificati come corti aperte gli oggetti con percentuale di bordo a contatto con fabbricati superiore all'80%. Questa *feature* quantifica la tendenza degli edificati compatti dei centri storici a creare cortine continue a contatto diretto con lo spazio pubblico della strada.

L'indice descrittivo sintetico è costruito come il semplice prodotto delle precedenti *features*; qualora il valore di tale indice sia maggiore di 1.4 l'oggetto edilizio preso in esame può essere ragionevolmente considerato in possesso di una combinazione favorevole delle tre caratteristiche tipomorfologiche elencate sopra e quindi classificato nella categoria intermedia "Tipi a Corte". (Figura 22)



Figura 22 - Classificazione degli edifici in un centro storico

Caratteristica spaziale tipica del tessuto compatto è appunto la compattezza dell'aggregato edilizio complessivo, dovuta da una parte ai bordi dei complessi edilizi addossati al limite dell'isolato, senza alcuno spazio residuale a separare spazio pubblico ed edificio, e dall'altra alla relativa ristrettezza della sezione stradale. Per esprimere queste relazioni spaziali sono state utilizzate la *feature Relative Area of Tipi a Corte* e la *feature* personalizzata *Relative Area of Tipi a Corte (Media dei sub-oggetti)*.

La prima *feature* calcola la percentuale di area classificata come “tipi a corte” in un raggio di 500 pixel (250 metri) dal baricentro dell'oggetto in esame (viene considerata solamente l'area degli oggetti con baricentro all'interno del raggio di calcolo).

La seconda *feature* calcola, per ogni super-oggetto al livello di classificazione superiore, la media di *Relative Area of Tipi a Corte* dei relativi sub-oggetti.

Come risultato vengono evidenziate le aree con maggiore presenza di edifici classificati come tipi a corte. (Figura 23)

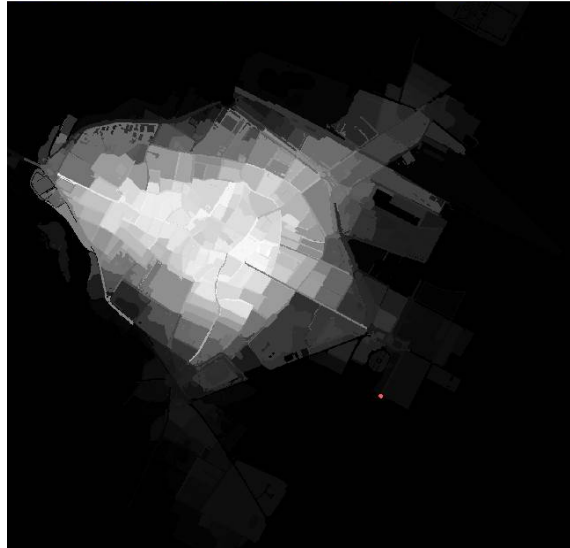


Figura 23 - Concentrazione di edificazione compatta nel centro storico di Forlì

Per effettuare la classificazione finale è stato elaborato un albero logico che permetta di combinare le informazioni precedentemente ottenute (di natura morfologica e di natura relazionale) in un'unica valutazione (Figura 24).

Affinchè un oggetto venga classificato come “Edificazione Compatta” deve soddisfare i seguenti requisiti: devono essere presenti sub-oggetti classificati come “Fabbricati” o “Tipi a Corte” e possedere una delle diverse combinazioni sotto codificate delle *features Relative Area of Tipi a Corte (Media dei sub-oggetti)* e *Relative Area of Sub Objects Tipi a Corte*. Quest'ultima *feature* calcola il rapporto di copertura per ogni isolato, limitato alla superficie classificata come Tipi a Corte. Esprime quindi la più o meno pronunciata presenza di edifici con questa classificazione all'interno di ogni super-oggetto.

I valori soglia delle due *features* necessari alla classificazione sono combinati inversamente in modo tale che oggetti con un valore elevato in una caratteristica possano avere un valore basso nell'altra e viceversa. Questo settaggio dei requisiti è finalizzato a ridurre il più possibile l'effetto “sale e pepe” causato dalla presenza di piccoli aggregati dalle caratteristiche difformi rispetto al tessuto compatto circostante.

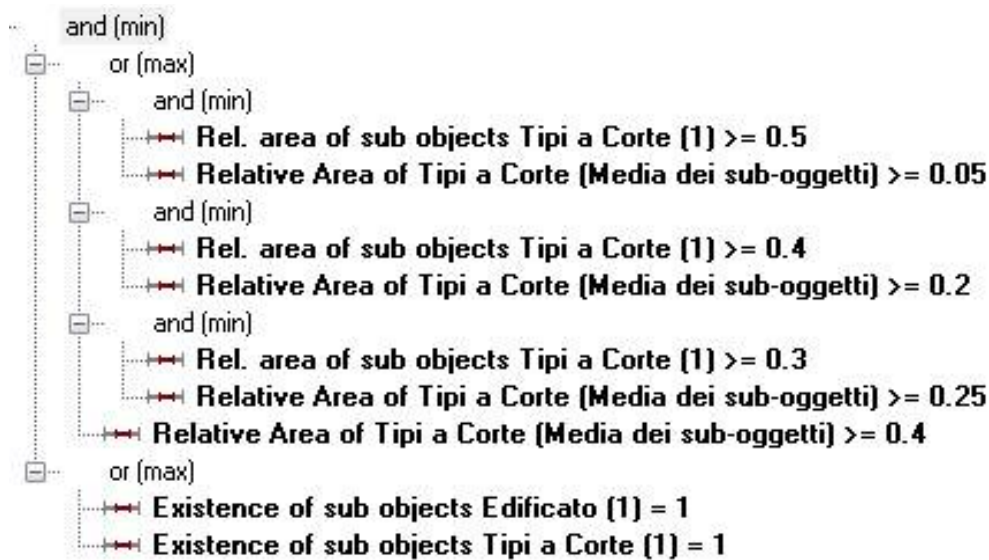


Figura 24 - Albero logico descrittivo della classe "Edificazione Compatta"

3.2.2 Edificazione a grana fine: espansioni abitative

Alle caratteristiche tipomorfologiche prevalenti dei fabbricati appartenenti al tessuto a grana fine sono state associate le seguenti *features*: per quantificare la compattezza del singolo edificio è stata utilizzata il valore nella *feature Density*, mentre per discriminare gli edifici di dimensione ridotta la *feature Number of Pixels*.

La *feature Density* descrive la distribuzione nello spazio di oggetto. La forma più "densa" è quella del quadrato; al contrario più un oggetto è modellato come un filamento, minore è il valore di densità.

La *feature Number of Pixels*, fornisce molto semplicemente l'area di sedime in pixel del fabbricato preso in considerazione.

Una prima classificazione viene eseguita al fine di assegnare ad ogni oggetto edilizio non precedentemente classificato un "valore di appartenenza" alla classe "Mono-plurifamiliari", tipologia prevalente del tessuto a grana fine. A tale scopo viene implementata nella descrizione della classe una *membership function* (Figura 25, Figura 26).

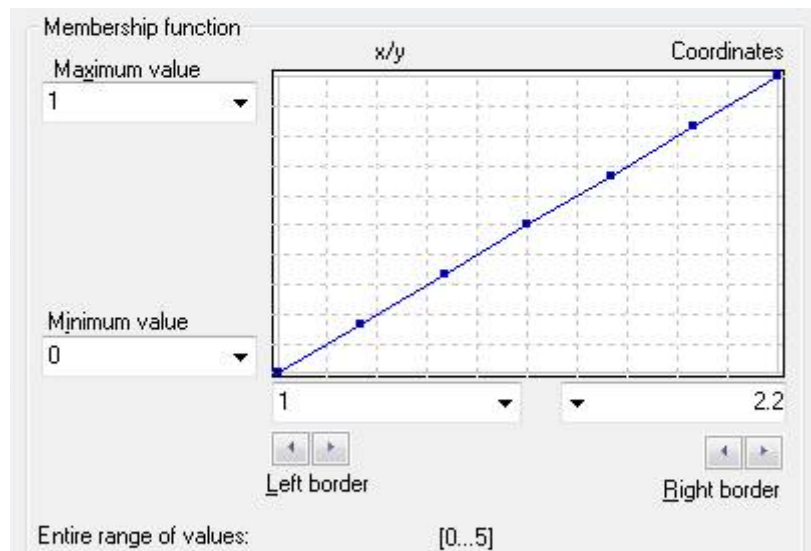


Figura 25 - Funzione di appartenenza basata sulla *feature Density*

La classificazione viene limitata ai fabbricati con una dimensione in numero di pixel compresa tra 200 e 3000, in modo da tener conto del tipo di grana, in questo caso “fine”, che si vuole identificare.

Per effettuare la classificazione al livello di gerarchia superiore, ovvero sugli aggregati già segmentati vengono combinate in un unico indice, tramite semplice moltiplicazione, le *features Membership to Mono-Plurifamiliari (Media dei Sub Oggetti)* e *Relative Area of Sub Objects Mono-Plurifamiliari*.

La prima *feature* calcola per ogni super-oggetto la media dei valori di appartenenza alla classe “Mono-plurifamiliari”, precedentemente determinati, dei relativi sub-oggetti. La seconda *feature* calcola la percentuale di area classificata come “Mono-plurifamiliari” all’interno di ogni aggregato edilizio.

Vengono infine classificati come “Edificazione a Grana Fine” tutti gli aggregati con un valore dell’indice sintetico sopra descritto maggiore di 0.1 e un numero di fabbricati contenuti come sub-oggetti maggiore di 3.



Figura 26 - Visualizzazioni dei valori di appartenenza assegnati

3.2.3 Edificazione a grana grossa: attività produttive e distretti industriali

Alle caratteristiche tipomorfologiche, spettrali e relazionali del tessuto a grana grossa sono state associate le seguenti *features*: per individuare i fabbricati con coperture industriali è stata utilizzata la *feature Band Ratio R/B*, mentre gli edifici con area di sedime elevata sono stati discriminati attraverso la *feature Number of Pixels*; per valutare l'eventuale aggregazione a scala urbana in distretti monofunzionali è stata sfruttata la *feature Relative area of Edificazione a grana grossa (1000)*.

Mentre la *feature Number of Pixels* appartiene all'ambito dell'analisi geometrica e morfologica, come spiegato brevemente nella classificazione del tessuto precedente, la *feature* personalizzata *Band Ratio R/B* (rapporto tra bande Rosso/Blu) si basa su una semplice tecnica che rientra nell'ambito dell'analisi spettrale. Si è voluto infatti introdurre, nel contesto di continuità operativa tra telerilevamento, *image processing* e analisi spaziale proposto in questa ricerca,

un piccolo cenno all'uso che può venir fatto delle informazioni contenute nel dato di partenza, ovvero l'immagine, in questo caso scomposta nei tre canali RGB³². Poiché in questo caso si tratta di distinguere tra coperture in laterizio, di colore tendente al rosso, e coperture industriali (alluminio, acciaio, pvc) di colore grigio il rapporto tra il canale del rosso e il canale del blu permette di valutare l'eventuale prevalenza del primo rispetto al secondo, depurando l'informazione del fattore luminosità. In questo modo l'analisi può essere applicata a tutta l'immagine indipendentemente dalle condizioni di illuminazione a terra.

Vengono classificati come "Capannoni" le edificazioni con dimensione maggiore di 3000 pixel e *Band Ratio R/B* inferiore a 1.05. Un valore unitario del rapporto tra bande indica bilanciamento delle due componenti, cui corrisponde quindi il colore grigio al netto della componente verde, la quale non è stata considerata in quanto la valutazione viene già circoscritta ai fabbricati.

Vengono successivamente classificati come "Edificazione a grana grossa" quegli aggregati con elevata presenza al proprio interno di oggetti classificati come "Capannoni". L'area relativa con questa classificazione deve superare come valore 0.2. Data la tendenza di questo tipo di tessuto ad aggregarsi in distretti monofunzionali viene eseguita un'ulteriore classificazione basata oltre che sulla presenza di capannoni all'interno dell'aggregato, anche sulla presenza al contorno di aggregati già classificati come "Edificazione a grana grossa". In questo caso l'area relativa interna di capannoni deve superare un valore soglia inferiore, 0.1, compensato però da un valore di area relativa della classe di aggregazione, calcolata in un intorno areale di 1000 pixel, superiore a 1.5.

³² L'elevazione contenuta, in relazione all'area di sedime, dei fabbricati industriali permette di tralasciare l'impatto di eventuali riprese di scorcio.

3.2.4 Forme aperte: quartieri pianificati ed edificazioni lineari

Alle caratteristiche tipomorfologiche dei fabbricati e degli aggregati che costituiscono le forme aperte sono state associate le seguenti *features*: per la valutazione della forma dei fabbricati, in modo da discriminare gli edifici lineari, è stata utilizzata la *feature Density*, mentre per valutare l'area di sedime dei fabbricati, che in questo caso deve risultare medio-elevata, è stata utilizzata ancora una volta la *feature Number of Pixels*.

Per valutare l'eventuale dilatazione degli spazi interstiziali e conseguente basso rapporto di copertura è stato utilizzato un raggio di calcolo elevato per la *feature Membership to Linee (Somma)*.

Le caratteristiche spaziali e distributive tipiche delle forme aperte rendono necessario attribuire, a differenza delle ultime due tipologie di aggregazione, una maggiore importanza all'analisi delle relazioni spaziali tra gli edifici. Infatti, a causa della dilatazione degli spazi, questi quartieri risultano molto spesso attraversati dalla viabilità principale, da un sistema di connettività interno al gruppo di edifici, o da entrambi. In questo caso quindi la segmentazione basata sulla maglia stradale principale e secondaria, utilizzata precedentemente con profitto, non è sufficiente a creare aggregazioni esaustive, valevoli di essere classificate semplicemente in base alla tipologia di edificato presente al suo interno. Si può infatti presentare il caso di una o due stecche, anche di notevoli dimensioni, con a disposizione un lotto di pertinenza circondato dalla connettività stradale, che tuttavia risultano isolate e non costituiscono ulteriori aggregazioni con tipologie simili, non rientrando perciò nella categoria tipomorfologica delle forme aperte per come è stata definita (Figura 27).



Figura 27 - Stecca isolata

Per prima cosa i singoli fabbricati sono stati classificati organizzando i requisiti in un albero logico (Figura 28).

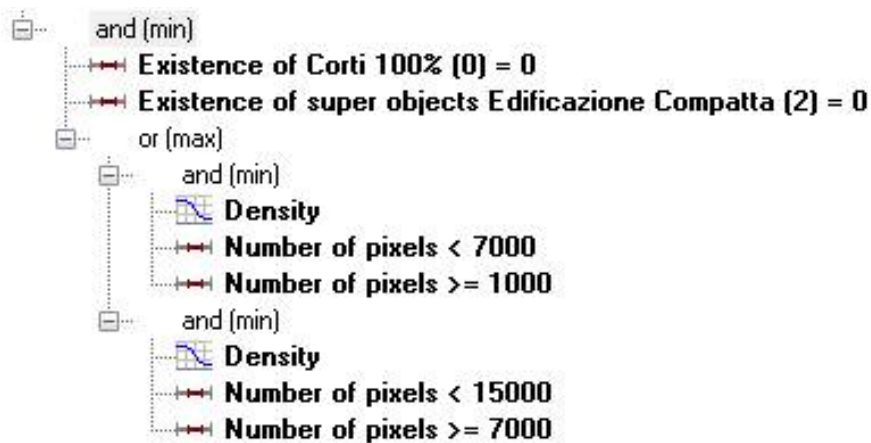


Figura 28 - Albero logico per la classificazione di edifici lineari

Oltre ad escludere che gli edifici esaminati dall'algoritmo non presentino corti chiuse al proprio interno e che il super-oggetto (ovvero l'isolato-aggregato di riferimento) non sia già stato classificato come "Edificazione Compatta", l'insieme degli edifici sono stati divisi in due fasce in base all'area di sedime. Con un'area compresa tra 1000 e 7000 pixel i fabbricati sono soggetti ad una classificazione basata su una funzione di appartenenza che attribuisce a valori relativamente elevati di densità (corrispondenti a una forma sempre più compatta) un valore di appartenenza comunque rilevante. La funzione infatti

comincia ad assegnare agli oggetti valore di appartenenza nullo solo a partire da densità maggiore o uguali a 2.2 (Figura 29).

Se l'area di sedime del fabbricato è invece compresa tra 7000 e 15000 pixel la funzione di appartenenza comincia ad assegnare valori nulli già da densità pari a 1.5 (Figura 30).

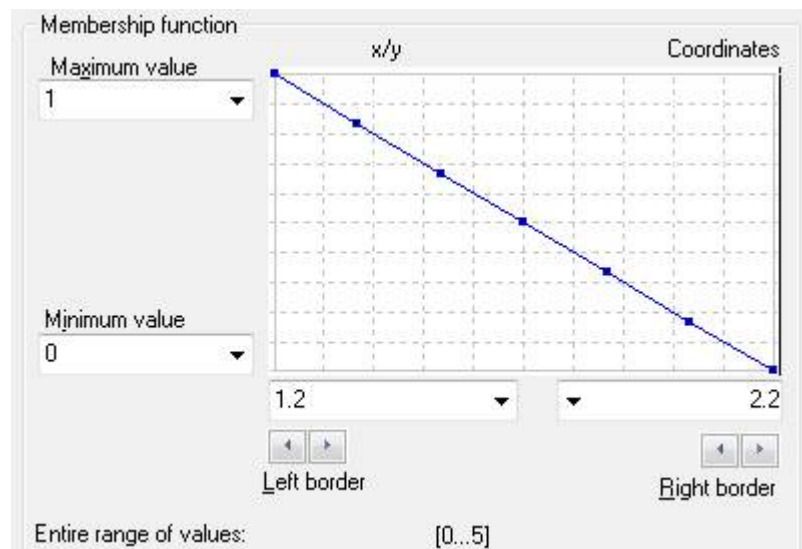


Figura 29 - Funzione di appartenenza utilizzata nel range 1000-7000 pixel

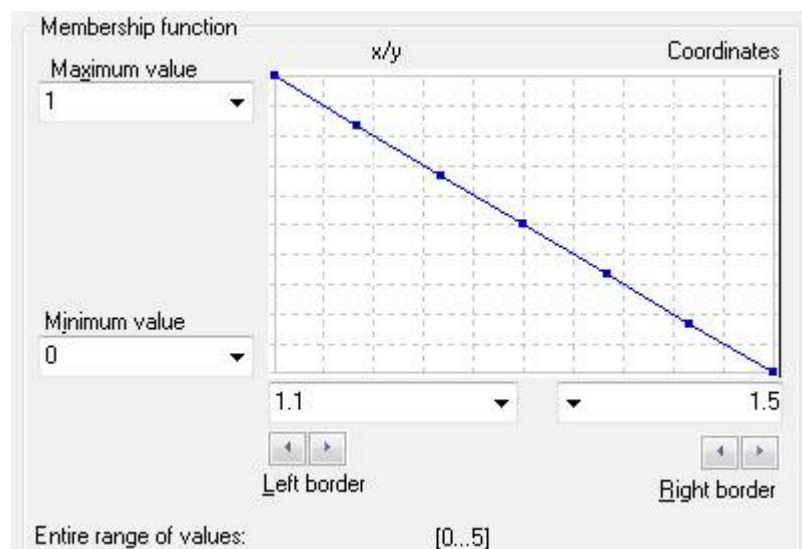


Figura 30 - Funzione di appartenenza utilizzata nel range 7000-15000 pixel

Questo diverso trattamento dei dati è finalizzato ad enfatizzare il peso della forma (ovvero della “snellezza”) nella classificazione degli edifici di dimensione maggiore. Infatti, in queste tipologie di intervento, all'aumento della scala di

edificazione del singolo fabbricato la tipomorfologia tende a orientarsi verso una maggiore linearità, fino ipoteticamente ai grandi segni di scala urbana come gli edifici-bordo³³.

Edifici con un'area fuori da questi intervalli vengono esclusi dalla classificazione in quanto le aggregazioni a forma aperta difficilmente presentano fabbricati di dimensione maggiore, mentre gli edifici sotto i 1000 pixel non risultano comunque significativi, sempre nel caso non siano già stati precedentemente classificati come abitazioni mono-plurifamiliari.

Per valutare le relazioni di prossimità esistenti tra gli oggetti classificati con la procedura descritta sopra sono state create alcune *features* personalizzate.

La *feature Membership*Pixels* (abbreviato *MP*) calcola per ogni oggetto il prodotto tra il valore di appartenenza alla classe “Linee” e l'area in pixel diviso per 10000. La divisione arbitraria per 10000 ha il semplice scopo di facilitare la visualizzazione a schermo del dato.

La *feature Membership to Linee (Somma 250)* (abbreviato M_{250}) calcola per ogni oggetto la somma dei valori di *Membership*Pixels* sull'insieme degli oggetti entro un raggio di 250 pixel.

La *feature Membership to Linee (Somma 500)* (abbreviato M_{500}) calcola per ogni oggetto la somma dei valori di *Membership*Pixels* sull'insieme degli oggetti entro un raggio di 500 pixel.

La *feature Membership to Linee (Somma tot)* (abbreviato M_{tot}) calcola per ogni oggetto la somma delle precedenti *features* secondo la seguente formula:

$$M_{tot} = M_{250} + M_{500} + 2MP$$

Poiché le *features* relazionali non tengono conto, per programmazione del software, del valore proprio dell'oggetto su cui avviene il calcolo, risulta

³³ Data l'estensione di tali interventi, la loro classificazione necessiterebbe di procedure apposite che esulano dallo scopo e dalla collocazione geografica/territoriale di questo lavoro. Per una breve raccolta e analisi di queste tipologie di intervento vedi: L. Reale, *Densità città residenza: tecniche di densificazione e strategie anti-sprawl*, Gangemi 2008.

necessario introdurlo nella somma, moltiplicando *MP* per il numero di *features* sommate (in questo caso due).

La somma delle due *features* con raggio di calcolo diverso permette di valutare sia le condizioni di prossimità a una scala maggiore (raggio di 500 pixel) e quindi le condizioni complessive degli insediamenti, sia le condizioni di continuità locale (raggio di 250 pixel) tra un numero limitato di fabbricati. Inserire nella formula solamente la *feature* con raggio di calcolo maggiore rischierebbe di falsare il risultato in quanto aree circondate da elementi classificati potrebbero risultare maggiormente idonee rispetto alle aree dove sono effettivamente presenti tali elementi (Figura 31). Il metodo misto permette di conseguenza di escludere oggetti relativamente isolati, ma dalla forma particolarmente snella e circondati da oggetti classificati che si trovano al limite dei 500 pixel. Infatti seppure nel caso delle forme aperte gli spazi siano piuttosto dilatati e l'aggregato complessivo piuttosto esteso, gli edifici si trovano spesso in una condizione di continuità, formando delle "catene" o dei sotto-aggregati rispetto all'insediamento complessivo.

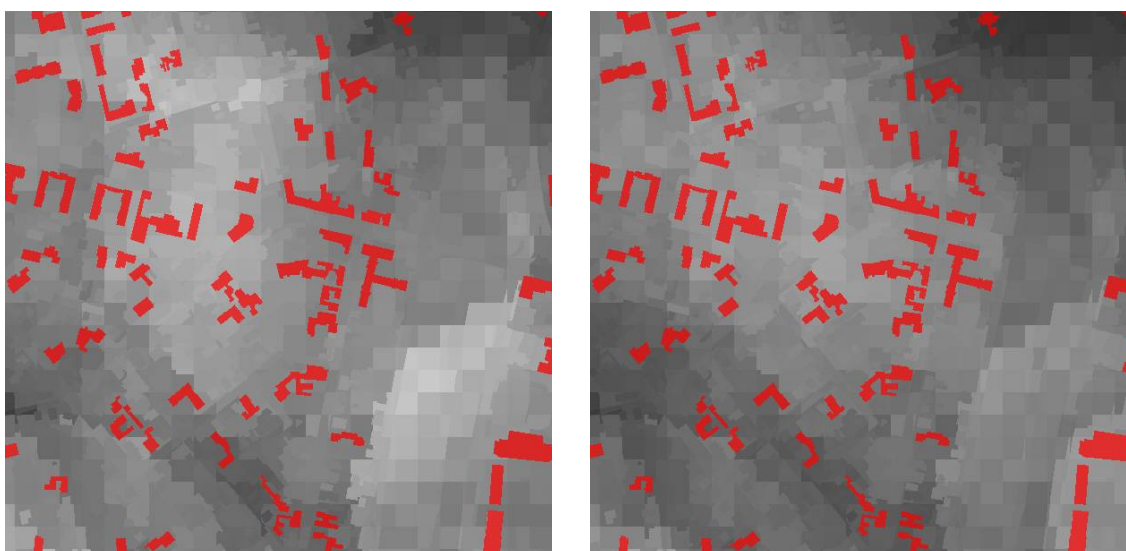


Figura 31 - Differenza tra metodi di calcolo: limitato al raggio maggiore (a sinistra) e metodo misto (a destra). A sinistra alcune aree vuote sono maggiormente evidenziate rispetto alle aree effettivamente occupate.

La *feature Membership to Linee (Somma tot)* permette quindi di valutare il livello di aggregazione degli edifici lineari inizialmente classificati. Questa valutazione

e altri requisiti sono stati quindi inseriti in un ulteriore albero logico che definisce la classe definitiva “Forme Aperte” (Figura 32).

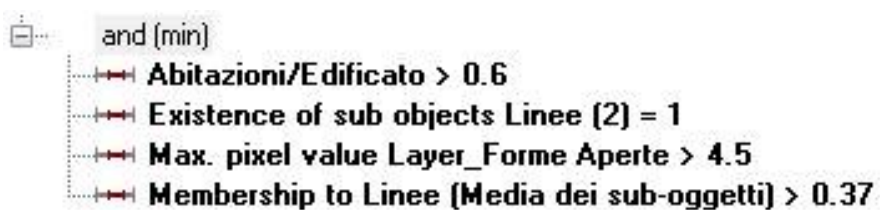


Figura 32 - Requisiti della classe "Forme Aperte"

La *feature Abitazioni/Edificato* calcola la percentuale di superficie classificata come “Abitazioni” (classe madre in cui rientrano le classi “Mono-Plurifamiliari” e “Forme Aperte”) sul totale della superficie edificata. Come condizione questa *feature* deve essere maggiore di 0.6. Questa condizione esclude dalla classificazione tutti gli aggregati con una quantità eccessiva di oggetti classificati come grana grossa o non ancora classificati (che quindi potrebbero rientrare nella categoria successiva).

Altra condizione è che siano contenuti nell’aggregato sub-oggetti classificati come “Linee”.

La terza condizione prevede che all’interno dell’aggregato siano presenti uno o più pixel con valore del layer specificato nel requisito maggiore di 4.5. I valori della *feature Membership to Linee (Somma tot)* sono stati infatti “stampati” virtualmente su un layer temporaneo per facilitarne la visualizzazione. La presenza di pixel dal valore elevato indica quindi un’elevata presenza al contorno di oggetti che potrebbero complessivamente indicare la presenza di una forma aperta, che siano molti oggetti dalle caratteristiche più incerte o pochi che possiedono adeguatamente le caratteristiche tipologiche dell’elemento lineare. Per evitare quindi che un’eccessiva presenza al contorno di oggetti comunque molto incerti falsi il risultato risulta necessaria un’ulteriore condizione, di seguito riportata.

La *feature Membership to Linee (Media dei sub-oggetti)* calcola per ogni super-oggetto la media dei valori di appartenenza precedentemente calcolati dei sub-oggetti. La condizione relativa a questa *feature* garantisce che solo gli aggregati

che contengono edifici dall'appartenenza alla classe "Linee" complessivamente abbastanza certa possano essere classificati come "Forme Aperte".

3.2.5 Cittadelle: edilizia fuoriserie e grandi contenitori

Le caratteristiche tipomorfolologiche e relazionali dei fabbricati classificabili come "Cittadelle" sono state associate alle seguenti *features*: per effettuare una discriminazione in base all'estensione dell'intervento, che deve in questo caso risultare elevata, è stata utilizzata la *feature length*width*, mentre per valutare la forma, che deve risultare complessivamente compatta, è stata impiegata la *feature length/width*; la *feature Indice Sintattico*, approfondita di seguito, è stata utilizzata per indagare l'articolazione dell'impianto distributivo dei fabbricati; caratteristiche relazionali come il fatto di essere raramente collocate all'interno o nei pressi di distretti industriali, o lo scarso rapporto con il contesto sono state formalizzate attraverso l'impiego delle *features Relative Area of Capannoni (500)* e *Relative Area of Edificato (300)* rispettivamente.

Trattandosi di interventi fuori scala che per definizione non instaurano un particolare rapporto con il contesto urbano (se esistente), le caratteristiche dimensionali e relazionali possono essere analizzate in modo piuttosto semplice ed intuitivo: la *feature* personalizzata *length*width* (prodotto di lunghezza e larghezza) viene utilizzata per descrivere l'estensione complessiva dell'intervento comprese eventuali bucatore o spazi interstiziali nel caso di perimetro particolarmente articolato, mentre la forma il più delle volte compatta (si tratta spesso di grandi contenitori scatolari) può essere descritta da un semplice rapporto lunghezza/larghezza.

Quindi se nel caso precedente la parte più complessa è risultata l'elaborazione di una procedura che permettesse di analizzare le caratteristiche spaziali e relazionali degli aggregati a partire dalle caratteristiche morfologiche, in questo

caso la difficoltà è insita nell'analisi delle caratteristiche strettamente morfologiche.

L'analisi della morfologia risulta necessaria in quanto la semplice classificazione in base a dimensione e contesto rischia di includere nell'insieme delle "Cittadelle" anche vari fabbricati a scopo industriale isolati e di notevoli dimensioni, mentre alla definizione di cittadelle è attribuita anche un'accezione funzionale definita, per quanto variegata, ovvero quella di contenitori per funzioni specifiche che possono essere presenti in una città o comune solo un numero finito di volte.

Alcune *features* preimpostate, come il già utilizzato *Border Index*, permettono di valutare in una certa misura quanto una forma è frastagliata e articolata, e in alcuni casi potrebbero risultare sufficienti a discriminare alcune tipologie. Tuttavia alcune configurazioni sfuggirebbero alla valutazione, in quanto, più che di oggetti dalla forma "omogeneamente irregolare", si tratta di oggetti frutto dell'unione di più forme semplici e compatte, meno discriminabili in base all'indice di bordo o altri parametri simili. (Figura 33)

Per valutare più specificamente l'impianto distributivo di questi complessi si deciso quindi di sviluppare una procedura apposita, anche al fine di sperimentare la scalabilità dell'analisi a oggetti, aumentando la scala di indagine ai dettagli morfologici dei singoli fabbricati. La procedura elaborata infatti non si limita a calcolare indici relativamente astratti utilizzando formule statistico-matematiche applicate all'intero corpo edilizio, ma cerca di spezzare l'oggetto principale in vari oggetti minori e di valutarne la connessione, mimando per quanto possibile i processi cognitivi messi in atto dal cervello davanti all'immagine.

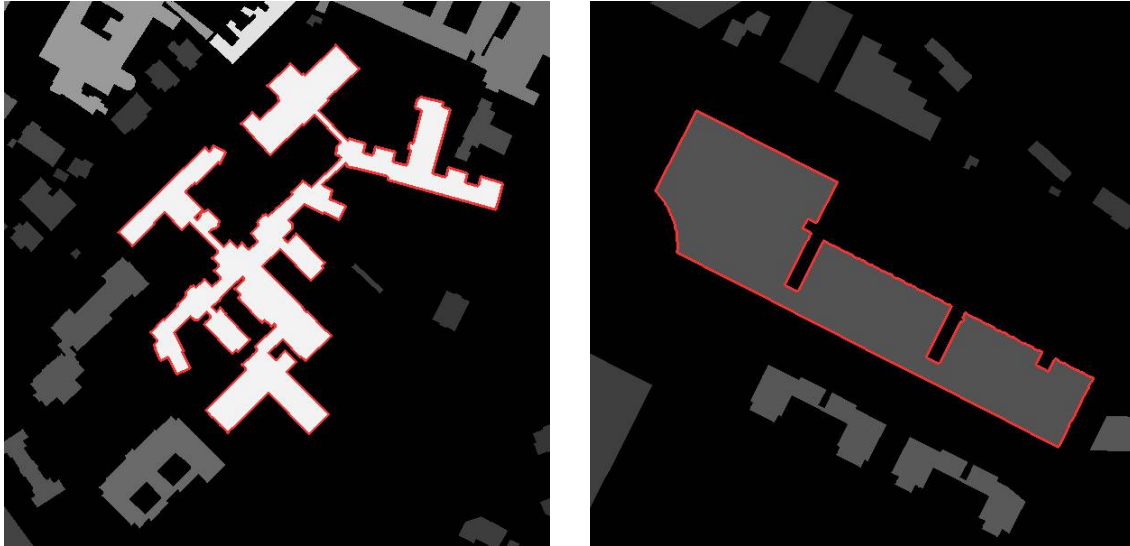


Figura 33 - Visualizzazioni della *feature Border Index*. A sinistra campus universitario con valore della *feature* elevato (5.86), a destra centro commerciale con valore della *feature* molto minore (2.01). Entrambi i complessi possono essere identificati come cittadelle.

Nuclei e Connessioni

La metodologia di scomposizione sintattica di seguito proposta è stato elaborata a partire dalla definizione intuitiva dei due tipi di sub-oggetti che vanno a comporre i super-oggetti:

- possono essere definite “Nuclei” porzioni non contigue dell’oggetto principale, al limite coincidenti con l’oggetto principale stesso;
- possono essere definite “Connessioni” porzioni dell’oggetto principale adiacenti a due o più Nuclei, all’interno dei quali possa essere collocata una circonferenza di diametro d uguale al minor segmento comune, senza che si generino punti di tangenza o di intersezione tra la suddetta circonferenza e il perimetro del Nucleo adiacente considerato (Figura 34).

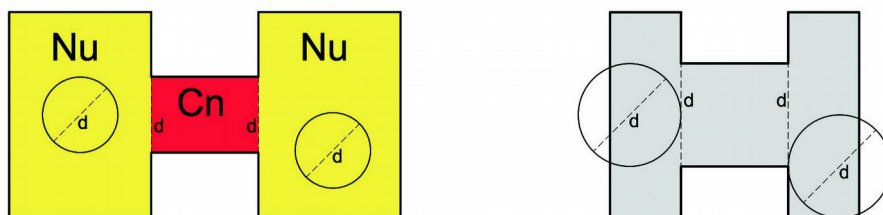


Figura 34 - A sinistra un oggetto divisibile in Nuclei (Nu) e Connessioni (Cn) in base alle definizioni date; a destra, in grigio, un oggetto indivisibile secondo le stesse definizioni.

Presenza di Connessioni

Per individuare le parti dell'oggetto eventualmente corrispondenti a Nuclei e Connessioni viene per prima cosa eseguita una segmentazione in *loop* dell'oggetto che separi i pixel più vicini al bordo esterno da quelli più interni, raccogliendoli in diversi sub-oggetti, dallo spessore ortogonale massimo di due pixel, che chiameremo "Anelli", simili appunto ad anelli concentrici che corrono lungo il bordo prima dell'oggetto analizzato e poi degli stessi Anelli precedentemente creati. In seguito ad ogni iterazione viene valutata la presenza di Anelli che "racchiudono" due o più oggetti: se ciò avviene significa che due o più Nuclei e, di conseguenza, una o più Connessioni, sono presenti all'interno dell'oggetto preso in esame (Figura 35). Il *loop* può essere quindi interrotto per effettuare le operazioni che porteranno alla creazione degli oggetti effettivamente corrispondenti per forma e dimensione alle due categorie ricercate.



Figura 35 - Segmentazione a strati di una rocca medievale. L'individuazione di un Anello rosso indica la presenza di connessioni.

Creazione dei sub-oggetti

La parte degli oggetti "Anelli" a partire dalle quali verranno generati i sub-oggetti "Connessioni" definitivi corrisponde ai tratti in cui i bordi dell'oggetto sono abbastanza vicini da generare un unico segmento. Questa porzione viene

individuata classificando e sottraendo i pixel che non sono a contatto con i futuri Nuclei. Dopodiché, una volta suddiviso ciò che resta degli anelli in oggetti mono-pixel, i Nuclei e le Connessioni vengono estesi attraverso algoritmi di *merging* fino a coprire l'intera superficie dell'oggetto iniziale, generando così i sub-oggetti definitivi (Figura 36).

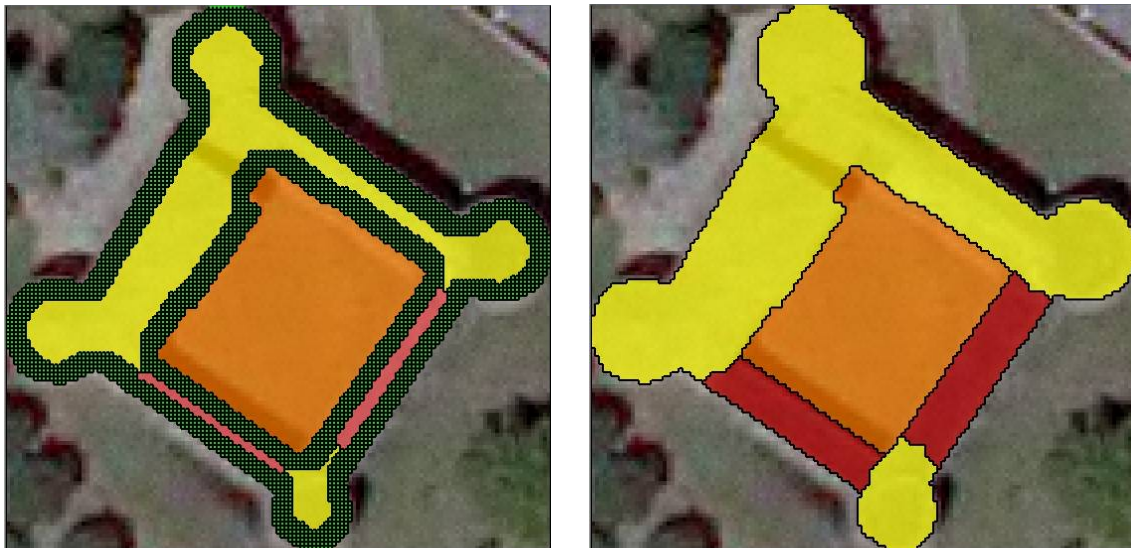


Figura 36 - A sinistra individuazione degli oggetti da cui verranno generati Nuclei (in giallo) e Connessioni (in rosa); a destra i sub-oggetti definitivi.

Gerarchia

Sono numerosi i casi di oggetti particolarmente articolati in cui i Nuclei sono a loro volta scomponibili in sotto-Nuclei e relative Connessioni. In tal caso l'intero oggetto allo stato di scomposizione corrente viene copiato in un sotto-livello, e viene applicato il procedimento sopra esposto di individuazione degli eventuali sub-oggetti. Viene creata così una gerarchia di sub-oggetti (Figura 37) che, tuttavia, essendo basata solamente sullo "spessore" delle connessioni, non è ancora indicativa della reale struttura sintattica dell'oggetto preso in esame.

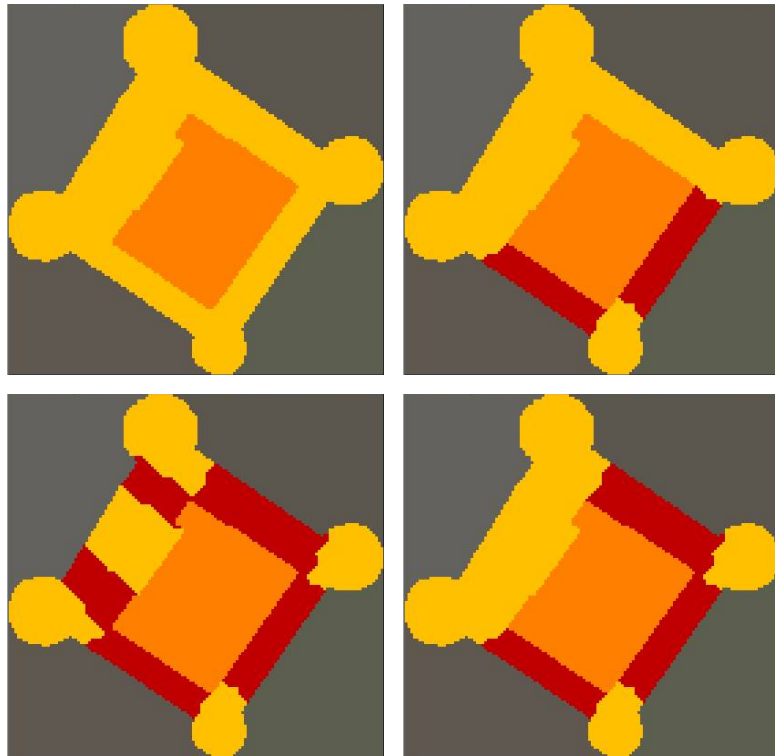


Figura 37 - Gerarchia dei sottolivelli in base allo spessore delle connessioni (in senso orario a partire dall'immagine in alto a sinistra).

Parametri di valutazione

Un impianto distributivo a padiglioni è caratterizzato dalla presenza di elementi di maggior dimensione collegati tra loro da elementi connettivi più snelli; tanto più sono estesi in lunghezza gli elementi connettivi, comparabili per area gli elementi connessi e differenti in dimensione connessioni e nuclei, più si può attribuire all'oggetto analizzato le caratteristiche di una tipologia a padiglioni, o comunque un forte articolazione morfologica.

Per valutare quanto sono autonomi e distinti i nuclei tra di loro, si possono quindi prendere in considerazione alcune caratteristiche quali snellezza della connessione, differenza di dimensione tra i singoli nuclei connessi e differenza di dimensione tra la connessione e i nuclei adiacenti.

La snellezza fornisce un'indicazione di quanto i nuclei sono tra loro distanti a parità di spessore della connessione (tendenzialmente omogeneo per costruzione su tutta la lunghezza). Maggiore è la distanza più i nuclei possono essere considerati entità autonome (Figura 38).

La **snellezza della connessione** (S_{Cn}) viene calcolata come il rapporto tra la porzione di bordo dell'oggetto Connessione a contatto con i vari oggetti Nuclei (b_{CnNu}) e il bordo totale della connessione (b_{Cn}) (Figura 39):

$$S_{Cn} = \frac{b_{CnNu}}{b_{Cn}}$$

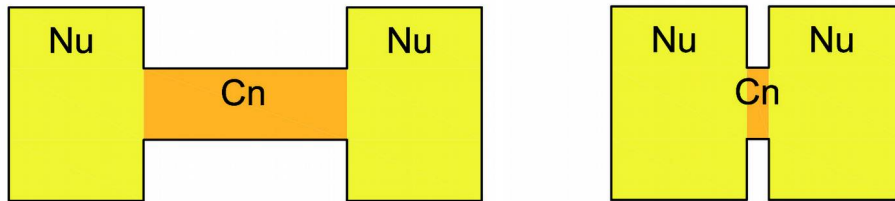


Figura 38 - Confronto tra Connessioni di lunghezza diversa

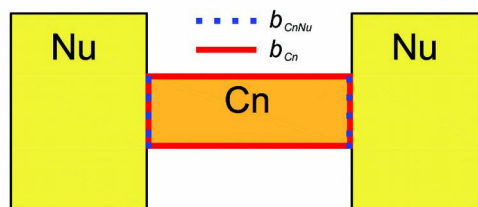


Figura 39 – Parametri di calcolo della snellezza della connessione (S_{Cn})

La differenza di dimensione tra i Nuclei è un'utile informazione dato che un oggetto molto piccolo connesso ad uno di dimensioni molto maggiori è meno distinguibile rispetto a due oggetti simili per dimensione, a parità di connessione (Figura 40).

L'**omogeneità di dimensione tra i nuclei** (O_{Nu}) viene calcolata secondo la seguente formula, dove σ_{Nu}^* è il coefficiente di variazione tra l'area dei nuclei a contatto con la connessione:

$$O_{Nu} = 1 - \sigma_{Nu}^*$$

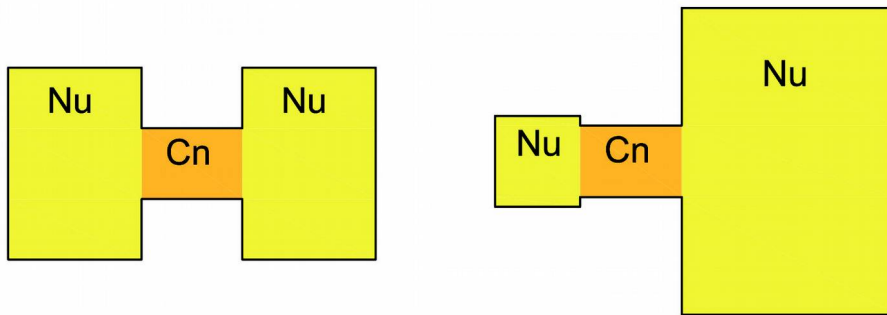


Figura 40 - Confronto tra oggetti con differente distribuzione dell'area tra i nuclei (omogenea e disomogenea)

Infine maggiore è la differenza di dimensione tra la connessione e la superficie totale dei nuclei maggiore risulta la distinguibilità di questi ultimi (Figura 41).

La **disomogeneità di dimensione tra Nuclei e Connessione** (D_{NuCn}) è calcolata come il coefficiente di variazione tra la media l_{Cn} della lunghezza dei bordi comuni Connessione-Nucleo, e la radice l_{Nu} dell'area media dei Nuclei (Figura 42). È stato utilizzato il bordo medio comune per quantificare la dimensione della Connessione in quanto proprietà indipendente dalla lunghezza dell'oggetto, a differenza dell'area, evitando sovrapposizione concettuale con l'indice di snellezza.

$$D_{NuCn} = \frac{l_{Nu} - l_{Cn}}{l_{Nu} + l_{Cn}}$$

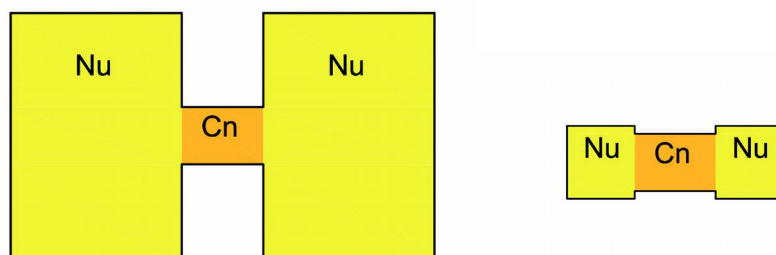


Figura 41 - Confronto tra oggetti con diverso valore di disomogeneità

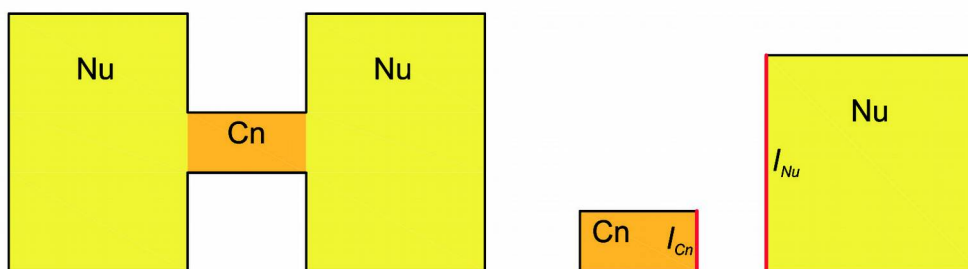


Figura 42 - A sinistra l'ipotetico oggetto in esame; a destra relativi elementi calcolati. A destra il lato evidenziato in rosso del rettangolo Cn rappresenta la media della lunghezza dei bordi comuni (in questo caso il valore è pari a $b_{CnNu} / 2$ poiché ci sono due nuclei a contatto). Sempre a destra il quadrato Nu in giallo rappresenta la media dell'area dei nuclei; il lato evidenziato in rosso corrisponde alla radice l_{Nu} .

Per poter effettuare una valutazione complessiva dell'importanza sintattica della singola connessione gli indici sopra illustrati sono stati definiti usando rapporti percentuali e coefficienti, in modo che il valore restituito sia compreso tra 0 e 1, rendendoli quindi più facilmente combinabili in un unico indice. Questo indice, definito *Indice Sintattico* è calcolato come media pesata dei precedenti indici. Sia gli indici intermedi che, di conseguenza, l'indice finale hanno un range teorico di 0-1.

$$\text{Indice Sintattico} = \frac{aS_{Cn} + bO_{Nu} + cD_{NuCn}}{a + b + c}$$

All'interno del *ruleset* è stato applicato un parametro c doppio rispetto ad a e b ritenendo la disomogeneità tra Connessione-Nuclei particolarmente rilevante per quantificare l'importanza sintattica della Connessione. Tuttavia si potrebbero sperimentare diverse medie pesate, funzioni, o alberi logici, elaborati in modo da penalizzare il valore finale dell'Indice Sintattico in caso di fluttuazioni estreme tra i diversi indici ed evitare così compensazioni eccessive tra gli indici intermedi.

Maggiore risulta il valore di questo indice più i nuclei esaminati risultano autonomi e distinguibili e di conseguenza maggiore risulta l'articolazione dell'edificio in elementi morfologicamente autonomi.

Come dato definitivo da utilizzare per compiere la classificazione delle cittadelle si è deciso di considerare il maggiore *Indice Sintattico* rilevato all'interno di ciascun oggetto analizzato, ritenendo questa informazione sufficientemente indicativa della complessità sintattica dell'oggetto (Figura 43).

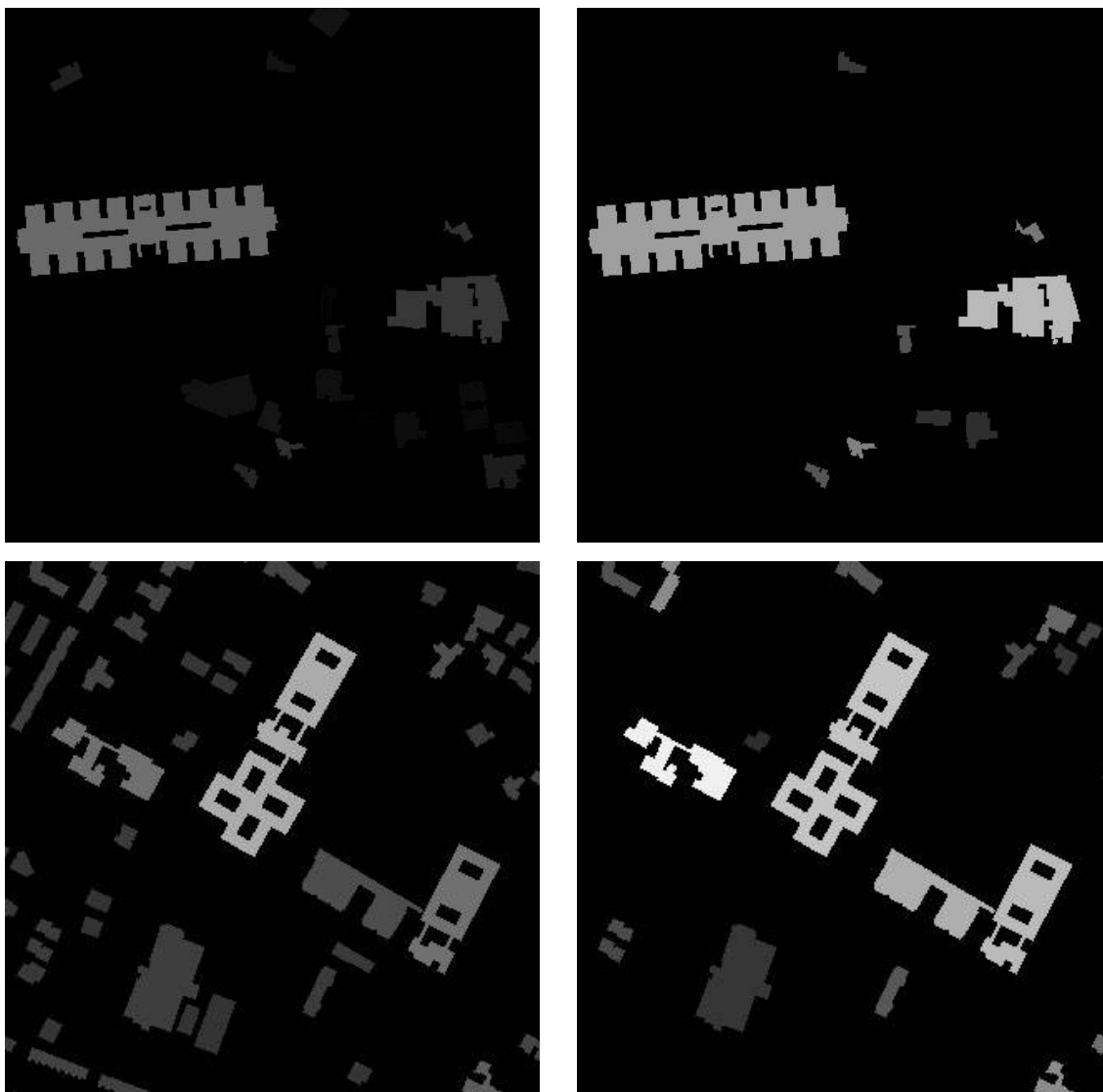


Figura 43 – Visualizzazioni della *feature Border Index* (a sinistra) e della *feature Indice Sintattico (Max)* (a destra). L'indice sintattico permette una maggiore distinguibilità degli edifici articolati in oggetti regolari (maggiore contrasto nelle immagini a destra).

Poiché come già detto nella classe “Cittadelle” rientrano interventi morfologicamente eterogenei si è deciso in fase di classificazione finale di eseguire per prima cosa una classificazione di valutazione, ovvero di assegnare un valore di appartenenza ai possibili oggetti candidati. Questo valore viene

calcolato combinando le varie *features* descrittive come una media aritmetica di altrettante funzioni di appartenenza, opportunamente definite a seconda del significato semantico attribuito (Figura 44).

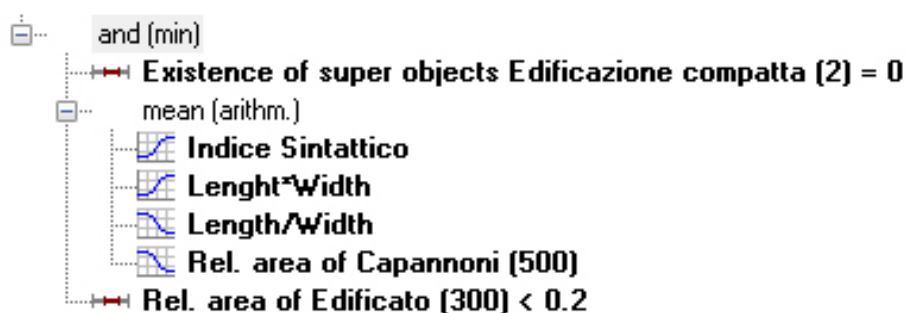


Figura 44 - Descrizione della classe di valutazione

Essendo i centri storici in linea di massima refrattari ad interventi di tale estensione (nel caso tali interventi tendono ad essere comunque bene integrati e rispettosi del contesto urbano in cui si vengono a trovare), per prima cosa vengono esclusi dalla classificazione tutti gli oggetti classificati al livello gerarchico superiore come “Edificazione Compatta”.

A seguire vengono definite le quattro *membership functions* collegate all’operatore logico *mean (arithm.)*; questo operatore esegue la media aritmetica delle funzioni di appartenenza ad esso subordinate.

L’indice sintattico viene elaborato da una funzione di appartenenza lineare da 0 a 0.6 (Figura 45). Oltre un indice di 0.6 viene restituito un valore di appartenenza unitario, poiché è stato notato tramite analisi visiva che, dato l’esito positivo di altre considerazioni, oltre tale valore gli oggetti sono classificabili come cittadelle.

Rispetto alla *feature Lenght*Width* vengono allo stesso modo assegnati i valori di appartenenza attraverso funzione lineare crescente a partire da 20000 pixel fino a 100000 pixel, estensione a partire dalla quale viene assegnato valore di appartenenza unitario, poiché un intervento di tale estensione può, con buona probabilità, essere valutato positivamente per la classe “Cittadelle” (Figura 46).

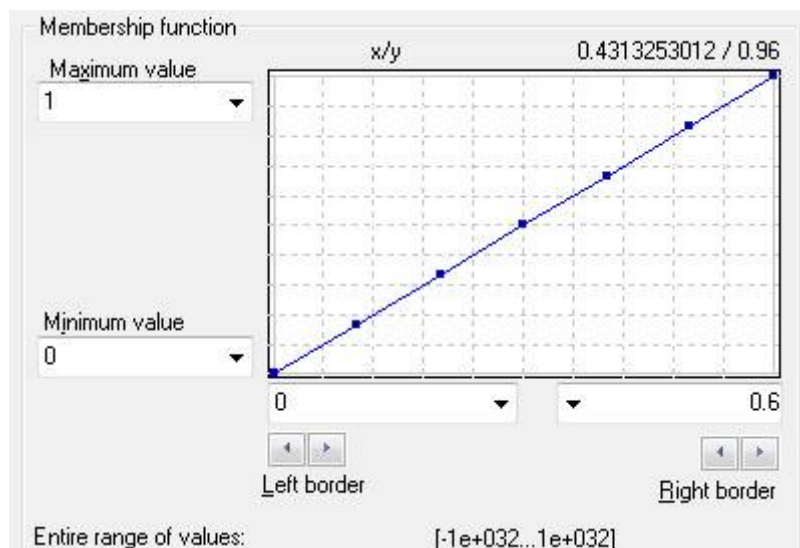


Figura 45 - Funzione di appartenenza relativa alla *feature* *Indice Sintattico (Max)*

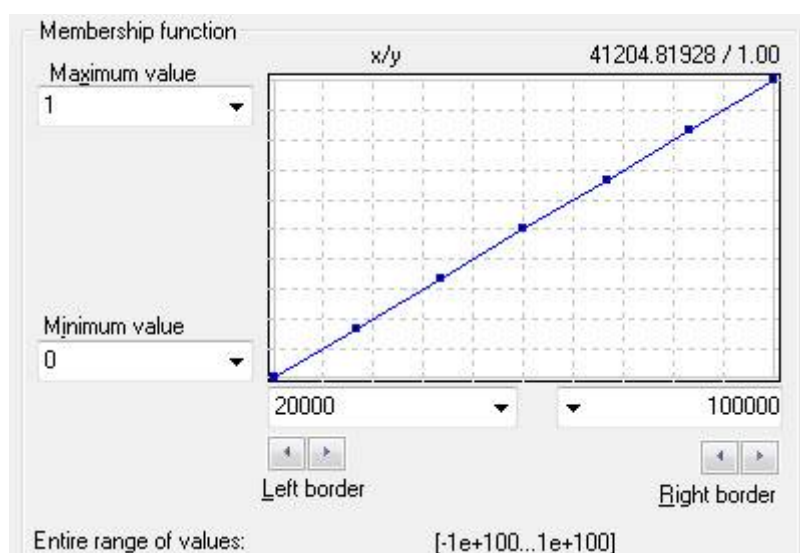


Figura 46 - Funzione di appartenenza relativa alla *feature* *Lenght*Width*

A seguire due parametri che hanno effetto negativo sulla classificazione.

La *feature* *Lenght/Width* descrive quanto un oggetto è allungato. Poiché le cittadelle tendono a possedere complessivamente una forma compatta per descrivere la relazione tra *feature* e classificabilità è stata utilizzata l'approssimazione di una funzione logistica decrescente (Figura 47). Questo tipo di funzione di appartenenza esegue una maggiore discriminazione tra i valori prossimi ai due estremi rispetto ad una funzione lineare. Lo scopo di questa scelta è stato di dare una forte appartenenza agli oggetti con valore della *feature* prossimi a 2 (forma complessiva compatta) e debole appartenenza a quelli con

valori prossimi a 6 (forma complessiva allungata), senza tuttavia rendere precocemente negativo l'apporto di questa funzione alla media complessiva.

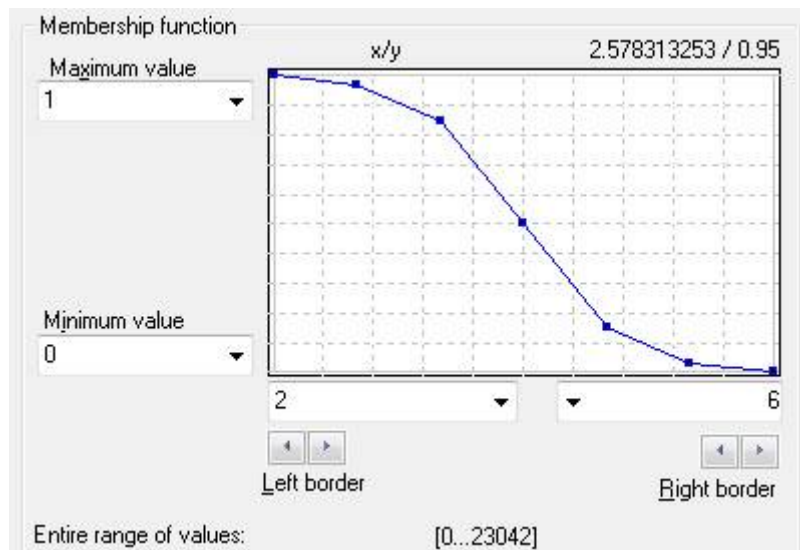


Figura 47 - Funzione di appartenenza relativa alla *feature Length/Width*

L'ultima funzione di appartenenza è relativa alla *feature Relative Area of Capannoni (500)*, *feature* che calcola la percentuale di area classificata come "Capannoni" in un intorno di 500 pixel. Poiché la presenza di fabbricati dalla probabile destinazione industriale è un segno negativo per la classificabilità a cittadella, con una logica identica alla precedente è stata scelta una funzione logistica decrescente compresa tra i valori esterni della *feature* 0 e 0.15 (Figura 48).

La classificazione definitiva è stata effettuata impostando un valore soglia di appartenenza alla classe "Cittadelle" maggiore di 0.8, escludendo poi tutti i fabbricati con eccessiva presenza di edificato al contorno imponendo la condizione *relative area of Edificato (300)* minore di 0.24.

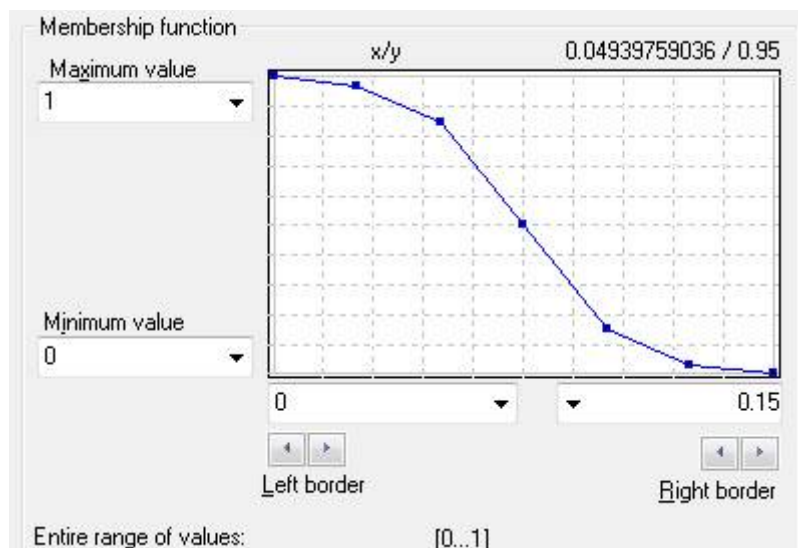


Figura 48 - Funzione di appartenenza relativa alla *feature Relative Area of Capannoni (500)*

3.2.6 Valutazione semi-quantitativa dei risultati ed ulteriori sviluppi

Le elaborazioni grafiche ottenute applicando le procedure sopra illustrate alle aree di studio sono mostrate nella **Tavola 4** e nella **Tavola 5**.

Per quanto riguarda la valutazione di questi risultati bisogna notare come non esistano database di riferimento per l'ontologia dei tessuti urbani e dei corpi edilizi sopra utilizzata (per la quale gli elementi sono discriminati prevalentemente in base a grana, caratteristiche morfologiche, struttura sintattica, caratteristiche di prossimità), per cui non è possibile effettuare un confronto con una "realtà a terra" di riferimento condivisa. Le valutazioni qui di seguito saranno pertanto basate sulla fotointerpretazione delle immagini aeree corrispondenti alle porzioni analizzate del database topografico regionale.

È necessario inoltre puntualizzare una differenza, inizialmente non prevista, nello sviluppo delle procedure di classificazione. L'obiettivo iniziale prevedeva l'elaborazione delle singole procedure di classificazione in un contesto geografico ristretto (la singola città), in modo da verificare poi successivamente il grado di generalizzazione raggiungibile con questa metodologia di sviluppo e poter effettuare una validazione dei risultati di classificazione. Per quanto

riguarda le classi “Edificazione Compatta”, “Edificazione a grana fine” ed “Edificazione a grana grossa” questa impostazione è stata mantenuta e le procedure sono state elaborate sulla città di Forlì e sperimentate poi sulle altre città, così come per la classe “Forme Aperte”, sviluppata inizialmente su Rimini per la maggiore varietà di quartieri conformi alle caratteristiche di questa classe; in questi casi quindi per la classificazione nelle città estranee alla fase di sviluppo degli algoritmi si può effettivamente parlare di validazione della metodologia. Tuttavia per quanto riguarda la classe “Cittadelle” la notevole varietà morfologica della tipologia di riferimento ha reso necessario ampliare il bacino di casi su cui sviluppare la procedura di analisi, estendendo quindi la fase di sviluppo a tutte e quattro le città. Per questa classe quindi non si può parlare di vera e propria validazione in quanto la procedura è stata effettivamente ottimizzata per le aree in esame; tuttavia il numero elevato di casi utilizzati rende questa sperimentazione un risultato importante, pur sottolineando la necessità di una effettiva sperimentazione su altre aree.

Bisogna notare che con questa procedura non tutti gli aggregati sono stati classificati; tra gli aggregati che non soddisfano nessuno dei requisiti sopra esposti si possono trovare per lo più edifici che possiedono alcune caratteristiche proprie dell’edilizia tipica del centro storico, ma sono troppo esterni e marginali rispetto al nucleo originale per mantenere il carattere urbano specifico dell’edificazione compatta o aggregati dal contenuto eccessivamente eterogeneo. Molti di questi casi sono stati considerati come errori. Ovviamente fin qui si è parlato di aggregati, perciò la dispersione pulviscolare di singoli fabbricati nelle campagne, al limite blandamente associati ma comunque immersi in spazi oltremodo dilatati, non è stata classificata.

Per la valutazione dell’affidabilità della classificazione sono stati utilizzati gli indicatori *precision*, *recall* e *F-measure*³⁴: *precision* indica la quantità di casi identificati che sono stati correttamente classificati, mentre *recall* indica la quantità di casi classificabili che sono stati effettivamente identificati;

³⁴ C. Van Rijsbergen, *Information Retrieval*, Butterworth-Heinemann, London, 1979.

l'indicatore *F-measure* fornisce una stima dell'affidabilità complessiva della classificazione basata sui due indicatori precedenti.

$$precision = \frac{\text{veri positivi}}{\text{veri positivi} + \text{falsi positivi}}$$

$$recall = \frac{\text{veri positivi}}{\text{veri positivi} + \text{falsi negativi}}$$

$$F - measure = \frac{2 \times (precision \times recall)}{precision + recall}$$

Il concetto di riferimento su cui è stato basato il calcolo dell'attendibilità per la maggior parte delle classi è la classificazione del singolo pixel (quindi i vari aggregati sono stati pesati in base all'estensione). Tuttavia il concetto di aggregato non è stato applicato alle cittadelle; inoltre l'estensione è stata utilizzata come parametro positivo per l'appartenenza alla tipologia delle cittadelle, cosa che potrebbe falsare la valutazione di attendibilità dato che le cittadelle di dimensioni maggiori (di più facile e certa classificazione) avrebbero un peso nella valutazione proporzionato alla loro area, riducendo il peso della classificazione delle cittadelle più piccole (ad esempio l'ospedale di Rimini è certamente meno esteso della fiera eppure la classificazione dell'ospedale è un risultato importante). Perciò le cittadelle sono state valutate come singoli oggetti classificati.

Questi indicatori fanno comunque riferimento, come detto sopra, ad una classificazione ottimale frutto di fotointerpretazione personale, conferendo quindi alla seguente analisi di attendibilità un carattere semi-quantitativo.

Le classi "Edificazione a Grana Fine" ed "Edificazione a Grana Grossa" risultano le più affidabili, probabilmente in virtù dei requisiti di classificazione piuttosto semplici e lineari. Queste classi presentano infatti indicatori di attendibilità piuttosto elevati (*precision* 0.96, *recall* 0.99, *F-measure* 0.97 e *precision* 0.97, *recall* 0.91, *F-measure* 0.94 rispettivamente). Osservando le immagini aeree si

nota come la maggior parte dei rispettivi errori siano circoscritti all'interno delle due classi, in particolare dovuti alla maggiore "inclusività" della classe "Edificazione a Grana Fine" verso la classe "Edificazione a Grana Grossa", coerentemente con i valori degli indicatori. Si tratta in buona parte di situazioni in cui all'interno di uno stesso aggregato si trovano incluse le due diverse tipologie di edificazione. Tuttavia esse risultano spazialmente segregate l'una rispetto all'altra (Figura 49), perciò si può ottenere un ulteriore miglioramento della precisione attraverso una più accurata definizione degli aggregati, integrando maggiormente le fasi di classificazione e di segmentazione e "spezzando" gli aggregati più eterogenei.



Figura 49 – Esempio di aggregato non classificato (contorno in rosso) con segregazione in base alla grana: a sinistra si può notare edificazione a grana grossa (edifici industriali), mentre a destra edificazione a grana fine (abitazioni mono o plurifamiliari)

Per attendibilità seguono "Edificazione Compatta", "Cittadelle" e "Forme Aperte", probabilmente per via della maggiore complessità relazionale e spaziale di queste categorie tipomorfologiche, in particolare la varietà di configurazione interne alla stessa tipologia per quanto riguarda le forme aperte.

La classificazione dell'edificazione compatta ha condotto comunque a risultati abbastanza soddisfacenti (*precision* 0.99, *recall* 0.80, *F-measure* 0.88). I valori di *precision* e *recall* indicano come l'errore sia completamente dovuto al numero di

falsi negativi, ovvero aggregati potenzialmente classificabili come Edificazione Compatta che non sono stati individuati o sono stati classificati erroneamente, mentre gli aggregati effettivamente classificati possiedono con certezza le caratteristiche tipomorfologiche ricercate. Questo è probabilmente dovuto a una classificazione eccessivamente restrittiva, in particolare con riferimento alle fasce di bordo dei centri storici e le propaggini degli stessi che si estendono per alcuni isolati lungo alcuni assi di comunicazione (Figura 50). Ulteriori iterazioni della classificazione che tengano conto della presenza pregressa di aggregati classificati come edificazione compatta, eventualmente alternate a fasi di affinamento della segmentazione, potrebbero migliorare il risultato finale³⁵.



Figura 50 - Fascia di bordo non classificata del centro storico di Cesena (a sinistra) ed estensione dell'edificazione compatta non classificata a Rimini (a destra): gli aggregati più esterni (contorno in rosso acceso) sono falsi negativi rispetto alla classe "Edificazione compatta".

La classificazione delle forme aperte ha condotto a risultati di attendibilità complessivamente analoghi (*precision* 0.87, *recall* 0.82, *F-measure* 0.85), anche se rispetto all'edificazione sono presenti entrambe le tipologie di errore (falsi positivi e falsi negativi).

³⁵ Si fa in particolare riferimento al lavoro di P. Hofmann, J. Strobl, T. Blaschke e H. Kux sul rilevamento di insediamenti abusivi a Rio de Janeiro citato nel paragrafo 2.2.

Per quanto riguarda i falsi positivi si tratta spesso di aggregati a grana più o meno fine con elevata presenza nell'intorno di fabbricati longilinei. Sebbene questi fabbricati non presentino complessivamente le caratteristiche aggregative delle forme aperte, risultano comunque sufficienti per numero e forma a far superare agli aggregati che ne sono circondati la soglia di classificazione. Per quanto riguarda i falsi negativi non classificati, si tratta di casi meno eclatanti dove la tipologia dell'edificio lineare ha meno peso. In entrambi i casi (Figura 51) potrebbe essere raggiunta maggiore precisione tenendo conto in fase di classificazione della presenza di vuoti e spazi residuali, fortemente caratterizzanti la categoria delle forme aperte e raramente presenti in prossimità degli aggregati risultanti nella prima tipologia di errore.

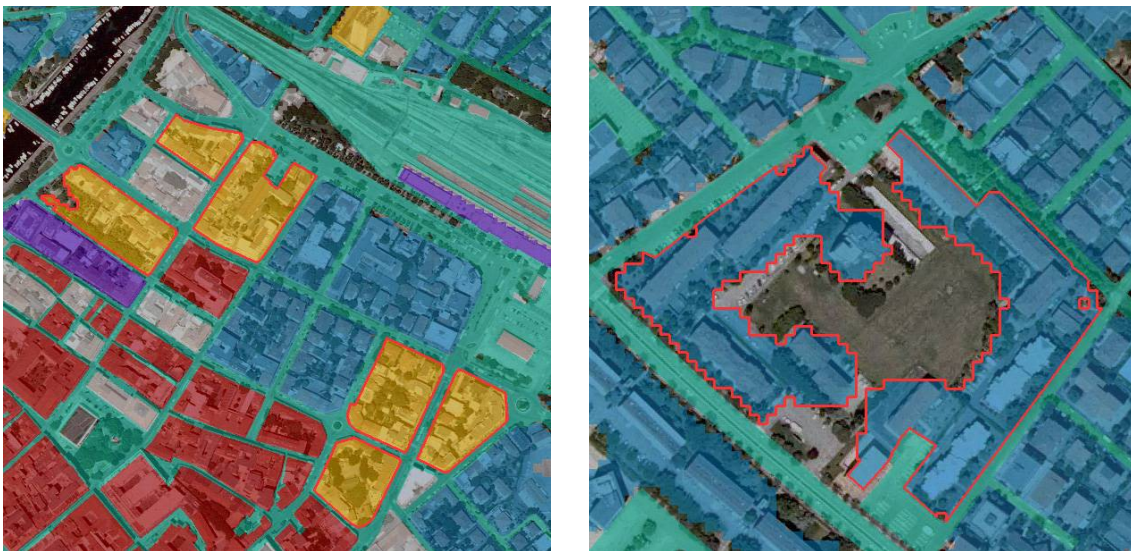


Figura 51 - Errori di classificazione delle forme aperte, Rimini; a sinistra falsi positivi (in giallo), a destra falsi negativi (elementi centrali con contorno rosso).

Sebbene, come già detto, non sia stata effettuata una vera e propria validazione si riportano i risultati relativi alla classe “Cittadelle” (*precision* 0.81, *recall* 0.93, *F-measure* 0.87). Allo stato attuale la stragrande maggioranza delle strutture di grande dimensione e rilevanza funzionale sono state rilevate (fiere, grandi centri commerciali, ospedali, campus). Tuttavia la classificazione paga l'intreccio tra caratteristiche morfologiche e funzionali di questi corpi edilizi, tant'è che attraverso una veloce fotointerpretazione senza conoscenza a priori non è sempre

facile affermare se un dato fabbricato possa essere incluso o meno, in particolare nel caso di impianti industriali isolati e di notevoli dimensioni (Figura 52). In questi casi sarebbe quindi necessario elaborare procedure di analisi contestuali e della tessitura delle coperture particolarmente raffinate. La procedura è stata inoltre progettata per la classificazione di singoli fabbricati, per quanto morfologicamente strutturati, e non identifica complessi funzionalmente rilevanti formati da vari corpi non connessi (Figura 53).



Figura 52 - Classificazione funzionalmente errata di una cittadella (impianto industriale di notevoli dimensioni, Rimini)



Figura 53 - Complesso scolastico composto da padiglioni non connessi, Forlì

In generale i risultati dell'analisi complessiva possono essere considerati soddisfacenti, ed emerge dalla fotointerpretazione una evidente correlazione tra la classificazione tipomorfologica e le funzioni prevalenti o il periodo temporale di formazione (centri storici) degli aggregati. È inoltre da notare come alcuni errori siano diretta conseguenza di imprecisioni, non omogeneità di realizzazione o semplicemente incoerenza con i fini di questo lavoro del database topografico di riferimento (ad esempio alcuni parcheggi longilinei definiti come fabbricati hanno provocato errori nella classificazione delle forme aperte).

Per un ulteriore sviluppo di questo approccio all'analisi tipomorfologica si mette in evidenza la già ampiamente citata necessità di iterazione delle classificazioni, in modo da integrare e sfruttare nelle esecuzioni successive le informazioni ottenute dalle classificazioni precedenti. Potrebbe risultare inoltre proficuo un approfondimento dell'analisi della struttura sintattica dei singoli edifici tentata in questo lavoro, al fine di superare o comunque integrare l'approccio basato su *features* di tipo sintetico-statistico con procedure orientate a riprodurre maggiormente nel dettaglio i meccanismi cognitivi umani.

A trarre beneficio da una procedura di analisi automatizzata di questo tipo potrebbero essere i due livelli di elaborazione adiacenti a quello qui esplorato. Innanzitutto, attraverso importazione dei vettoriali nel SIT di riferimento, il livello di analisi superiore può avvalersi di un nuovo *layer* informativo per approfondire l'analisi morfologica della città; ad esempio potrebbe essere interessante un confronto tra gli ambiti definiti in termini funzionali già classificati all'interno dei database e questa classificazione morfologica degli aggregati urbani, per individuare eventuali differenze. Il livello inferiore di analisi, ovvero la fase di processamento ed interpretazione dei dati telerilevati, può avvalersi di ulteriori informazioni sul contesto in cui si collocano le singole entità (pixel, oggetti) per affinare l'elaborazione attraverso quel processo iterativo di cui si è parlato nel capitolo 3.

3.3 Classificazione dei fenomeni di dispersione urbana

Come sempre, quando si parla di urbanità, di analisi delle forme e delle strutture urbane o di intervenire sull'urbano, è necessario definire per prima cosa la scala della rappresentazione o dell'intervento, a partire dalla quale potranno poi essere identificati i parametri di interpretazione più opportuni. Se con la precedente ipotesi di applicazione ci si è occupati dell'analisi tipomorfologica degli insediamenti alla scala dell'isolato, valutando le caratteristiche dei singoli fabbricati e le relazioni spaziali esistenti fra di essi per classificare la superficie urbanizzata in diverse categorie spazialmente circoscritte, con l'esperimento di analisi esposto di seguito ci si è voluti spostare ad una scala di respiro maggiormente territoriale, per quanto ancora limitata all'estensione comunale. L'obiettivo di questo esperimento consiste nella creazione di una procedura informatica che, attraverso l'elaborazione automatica del database regionale (ipoteticamente ricavato anch'esso tramite procedure automatiche), permetta di individuare le aree edificate per cui possano essere auspicabili interventi di densificazione³⁶ al fine di realizzare o ripristinare le qualità dell'insediamento urbano compatto.

Il significato del termine "densificazione" varia in base alla scala dell'intervento. In generale "densificare" significa aumentare la presenza di un dato elemento in una certa area, ma come è intesa la densità e come viene calcolata è oggetto di interpretazione. A fini di analisi tipomorfologica e di progettazione alla scala planivolumetrica un indicatore particolarmente adatto risulta essere il *Floor Area Ratio (FAR)*, citato da Luca Reale in *Densità città residenza*, per la proprietà di tale rapporto di permettere una più ricca articolazione formale dei volumi in fase progettuale rispetto alla rigida cubatura. Tuttavia l'importanza delle volumetrie nell'analisi delle forme insediative risulta scemare nel passaggio alla scala urbana-territoriale. Ciò è dovuto da un lato al fatto che i fenomeni urbani tendono a essere percepiti progressivamente sempre più come bidimensionali al ridursi

³⁶ Per una panoramica delle possibili tipologie di intervento si fa riferimento a L. Reale, *Densità, città, residenza: tecniche di densificazione e strategie anti-sprawl*, Gangemi, Roma 2008.

della scala di rappresentazione, dall'altro alla relazione inversa tra elevazione dei fabbricati e fenomeni dispersivi esterni alla città consolidata (il così detto *sprawl*, costituito in larga parte da abitazioni mono o plurifamiliare o altri edifici dall'elevazione relativamente ridotta). Per questi motivi è stato scelto come indicatore di densità su cui basare la successiva elaborazione il rapporto tra superficie appartenente agli aggregati edilizi e la superficie lorda in un dato intorno areale. Si è scelto di utilizzare come unità di analisi l'aggregato anziché il singolo edificio poiché dal punto di vista della dispersione territoriale un aggregato di abitazioni mono o plurifamiliari, pur risultando meno denso considerando il semplice rapporto di copertura, ha la stessa importanza di un singolo fabbricato di ampie dimensioni.

Le possibili aree suscettibili di intervento sono quelle zone appartenenti alla fascia periurbana in cui è avvenuta la perdita di margine (Figura 54, Figura 55), filamenti che si estendono nel territorio seguendo gli assi di comunicazione ed infiltrandosi poi nella campagna con una progressione frattale (Figura 56, Figura 57), ed infine le “radure”³⁷ (di piccola dimensione nel caso del territorio romagnolo), ovvero ambiti agricoli periurbani completamente o solo in parte (in quest'ultimo caso si può parlare di “cunei verdi”) inglobati nell'espansione urbana (Figura 58). In tutti questi casi possono essere messi in atto interventi di miglioramento e di tutela paesaggistici, ripristinando i margini (o “mettendoli in sicurezza” nel caso siano stati mantenuti) ed agendo sul tessuto retrostante.

³⁷ F. Zanfi, D. Gambino, *Le radure della Brianza centrale, un progetto per gli ultimi spazi aperti della città diffusa*, in: AA.VV., *Quando l'autostrada non basta : infrastrutture, paesaggio, urbanistica nel territorio pedemontano lombardo*, Quodlibet, Macerata 2013



Figura 54 - Perdita di margine: quartieri di Faenza (a sinistra) e Forlì (a destra)



Figura 55 - Perdita di margine: quartieri di Rimini



Figura 56 - Filamenti: estensioni dell'urbanizzazione cesenate



Figura 57 - Filamenti: estensioni dell'urbanizzazione forlivese (a sinistra) e riminese (a destra)



Figura 58 - Ambiti agricoli periurbani (radure) inglobati dall'edificato riminese (in alto) e forlivese (in basso)

Tuttavia in urbanistica e sociologia con il termine densità ci si può riferire anche ad altri ambiti concettuali, come la popolazione (numero di abitanti, caratteristiche socioeconomiche della popolazione presente, ecc.) o il numero e varietà di funzioni presenti in una certa area. In particolare la densità delle funzioni (sia pubbliche che private) è un fattore particolarmente importante nel definire la qualità urbana delle varie parti della città. Sebbene l'analisi della densità funzionale non rientri nello scopo di questo lavoro, è noto in letteratura come la carenza di funzioni socialmente aggregative sia una caratteristica

dell'urbanizzazione diffusa e dei *clusters*³⁸ in essa immersi (Figura 59). Perciò oltre ad interventi di riqualificazione morfologica relativi alla densità fisica, in questi casi risultano particolarmente necessari interventi di densificazione funzionale, introducendo spazi e funzioni pubbliche che possano compensare l'autoreferenzialità dello spazio privato.

Queste diverse fenomenologie di dispersione possono essere trovate anche mescolate (Figura 60) e presentarsi a diverse scale di definizione (Figura 61).



Figura 59 - *Clusters* nel diffuso: aggregazioni nell'orbita di Faenza, Forlì, Cesena e Rimini (da in alto a sinistra in senso orario)

³⁸ “*Cluster nel diffuso*” è la denominazione attribuita da Patrizia Gabellini a quegli aggregati ripetitivi e monofunzionali di capannoni o abitazioni unifamiliari esterni alla città consolidata. Vedi P. Gabellini, *Fare urbanistica: esperienze, comunicazione, memoria*, Carocci, Roma 2010, p. 36.



Figura 60 - *Sprawl* di tipologia mista, Cesena



Figura 61 - Fenomeno del *clustering* a diversa scala di aggregazione, Faenza (a sinistra) e Forlì (a destra)

Come strumento di elaborazione meta-progettuale, le analisi che ci si prefigge di ottenere con la procedura esposta di seguito sono orientate a concretizzare su mappa le due principali strategie meta-progettuali di compattazione e razionalizzazione della forma urbana: da un lato indirizzare la potenzialità edificatoria verso interventi di densificazione delle aree smarginate continue alla città consolidata, dall'altro realizzando, là dove è necessario, uno sviluppo policentrico dell'edificazione diffusa, promuovendo la concentrazione e la

densificazione morfologica e funzionale dei filamenti e dei vari *clusters* sparsi nella campagna.³⁹

3.3.1 Procedura di elaborazione e classificazione

Al fine di poter quantificare lo *sprawl*, nella letteratura scientifica sono stati proposti vari indici che permettono di stimare le caratteristiche morfologiche degli insediamenti urbani, come regolarità/irregolarità dei bordi, distanza dalla città consolidata degli aggregati non connessi e più in generale indicatori di complessità⁴⁰. Tuttavia i fenomeni della perdita di margini nelle fasce periurbane e della formazione di *clusters* nel diffuso rimangono intrinsecamente legati al concetto di densità, per cui si è deciso di limitarsi di seguito ad utilizzare, ed eventualmente manipolare, tale indicatore.

La procedura esposta è costituita da una prima fase di elaborazione grafica e una seconda fase di classificazione: durante la fase di elaborazione i dati relativi alla densità vengono esportati su *layers* temporanei e manipolati graficamente in modo automatico al fine di ricavare informazioni sulla localizzazione dei margini urbani; le informazioni su densità e margini vengono quindi sfruttate per ottenere una classificazione indicativa delle zone densificabili, suddivise nelle classi “Clusters” e “Dispersioni periurbane”. Nella prima classe rientrano le urbanizzazioni riconducibili ad aggregazioni nel diffuso o infiltrazione per filamenti lungo gli assi di comunicazione, mentre nella seconda classe sono fatti rientrare i fenomeni di dispersione delle periferie e di inclusione di radure o cunei verdi nel tessuto urbano.

³⁹ Esempio di elaborazione meta-progettuale è il lavoro svolto dal gruppo Metrogramma sui possibili scenari di sviluppo della città di Bolzano.

⁴⁰ Per un elenco dei vari indicatori si fa riferimento a N. Schwarz, *Urban form revisited – Selecting indicators for characterising European cities*, in: “Landscape and Urban Planning”, n. 96, 2010, 29-47.

Anche in questo caso i dati vettoriali e le immagini da essi derivate sono stati processati con l'uso del software *eCognition*, in coerenza con il discorso di continuità metodologica portato avanti finora.

Per valutare i fenomeni dello “smarginamento” urbano e del *clustering* si è deciso di utilizzare la somma algebrica di due diversi indicatori di densità, uno calcolato su un'area circolare di raggio 250 pixel (125 metri) e il secondo calcolato con un raggio maggiore, pari a 1500 pixel (750 metri). Questo approccio, già utilizzato per la classificazione delle forme aperte (vedi paragrafo 3.2.4), permette infatti di valutare contemporaneamente le condizioni di densità locali (nell'intorno minore) e le condizioni di densità complessive (nell'intorno maggiore).

I due indirizzi meta-progettuali sopra individuati fanno riferimento a fenomeni urbani di scala differente: da un lato la perdita del margine è un fenomeno relativo alla dilatazione degli spazi tra i singoli fabbricati e di conseguenza descrivibile con una densità bassa ma omogenea nell'intorno considerato; al contrario il fenomeno del *clustering* nel diffuso è descrivibile da una densità relativamente elevata se si considera lo spazio prossimo all'aggregato, associata tuttavia ad una densità molto minore se si allarga l'analisi ad un intorno più ampio. Per distinguere questi fenomeni sono state definite due diverse somme algebriche degli indicatori di densità sopra descritti: la prima data dalla somma delle due densità, la seconda data dalla sottrazione.

$$D_1 = D_{250} + D_{1500}$$

$$D_2 = D_{250} - D_{1500}$$

Queste somme algebriche sono state definite come *features* personalizzate e calcolate sull'insieme degli oggetti ottenuti attraverso una segmentazione a scacchiera con passo di 100 pixel dell'intera scena (Figura 62). I valori ottenuti sono poi esportati e visualizzati su *layers* temporanei (Figura 63).

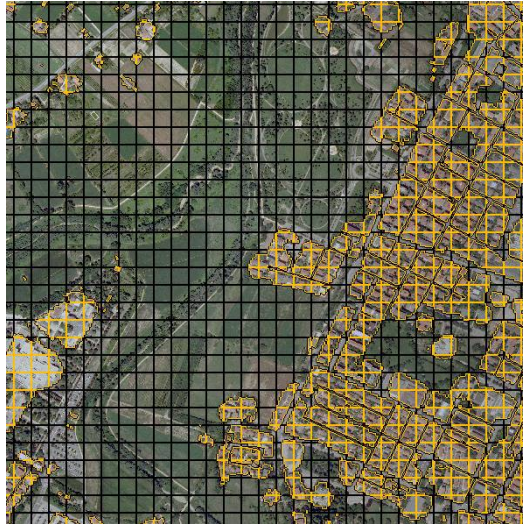


Figura 62 - Segmentazione a scacchiera

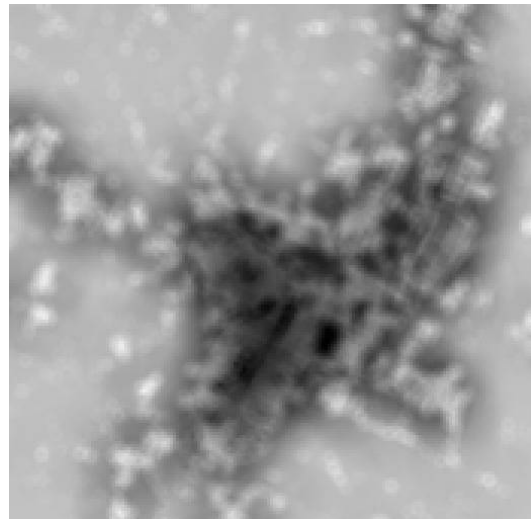
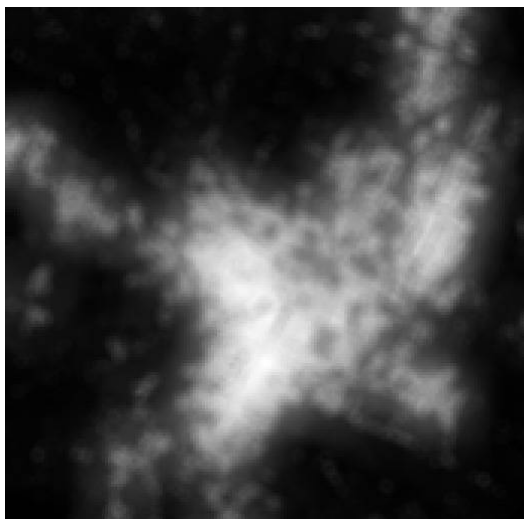
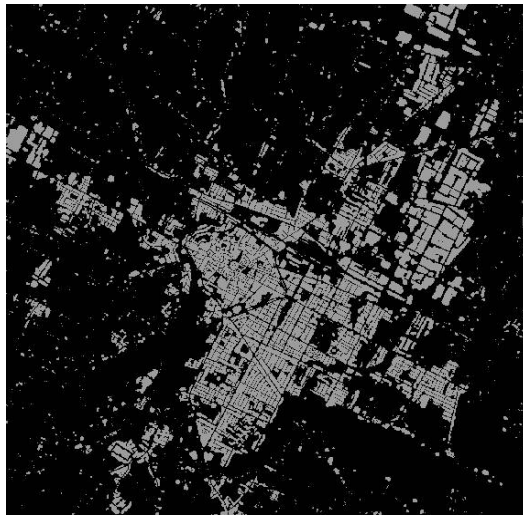


Figura 63 - Forlì: visualizzazione dell'urbanizzazione (in alto) e dei due indicatori di densità D_1 (in basso a sinistra) e D_2 (in basso a destra).

Le mappe così ottenute forniscono una lettura diversa del territorio: la mappa derivata dalla somma D_1 consente una lettura della densità in senso quantitativo, indipendente della posizione relativa del brano di urbanizzato considerato rispetto all'agglomerato principale e con valori precisi e univoci per ogni tessuto o grado di dispersione; al contrario la mappa derivata dalla differenza D_2 fornisce una lettura qualitativa circoscritta, mettendo in evidenza l'isolamento dei *clusters* rispetto alla città consolidata, al costo però di una perdita di reciprocità tra risultato di calcolo e densità effettiva del tessuto in esame (ad esempio alcune aree, caratterizzate da un'urbanizzazione più dispersa, risultano avere lo stesso valore D_2 di tessuti maggiormente compatti).

In realtà l'importanza delle informazioni ricavate dall'applicazione di queste somme algebriche non risiede tanto nei valori assoluti ottenuti, ma nelle variazioni di tono che sono presenti all'interno delle immagini. Per estrarre queste informazioni è stata utilizzata una tecnica di *image processing* che permette di mettere in risalto le variazioni più o meno brusche nei valori di *digital number* tra pixel contigui, evidenziando in sostanza i bordi delle zone più chiare.

Le immagini sono state processate utilizzando il filtro *surface calculation (slope)* dopo essere state opportunamente ricampionate riducendo la risoluzione (operazione necessaria per ottenere un buon risultato di processamento) (Figura 64). Questo filtro è normalmente utilizzato per calcolare la pendenza nei vari modelli digitali dell'elevazione (DEM)⁴¹, tuttavia possiamo astrarre i valori delle somme algebriche calcolate come quote in un sistema di riferimento tridimensionale, dove in base all'entità della pendenza e quindi della variazione dei parametri di densità si individua il margine urbano (se esiste) e quanto esso sia netto e definito.

⁴¹ Si fa riferimento alla letteratura scientifica specifica e alle applicazioni mostrate nel paragrafo 2.2.

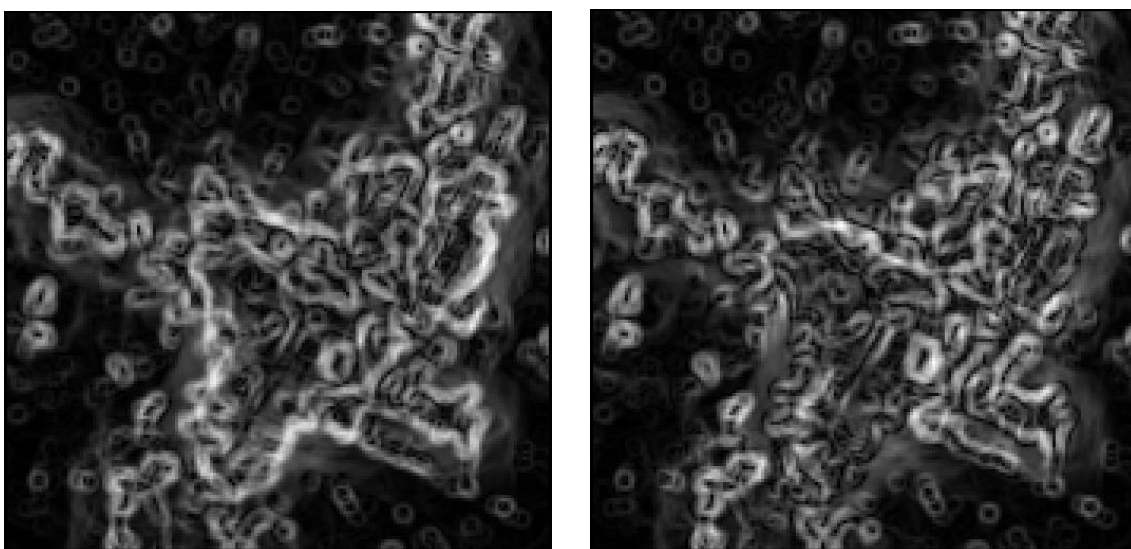
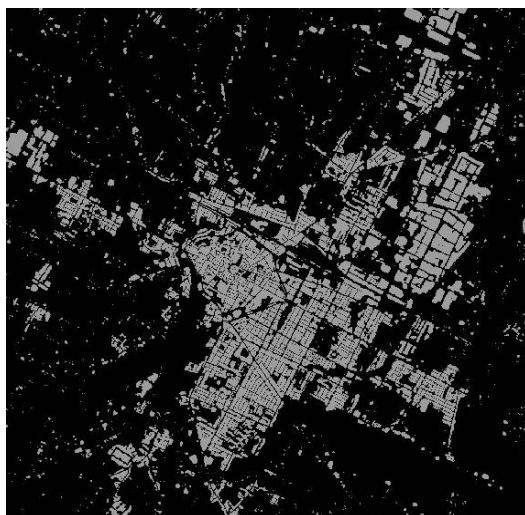


Figura 64 – Forlì: risultato complessivo del processamento tramite filtro *surface calculation (slope)*; urbanizzazione (in alto) e visualizzazioni delle pendenze derivate dagli indicatori D_1 (in basso a sinistra) e D_2 (in basso a destra).

Il confronto di seguito mette in evidenza come tra i *layers* di pendenza le differenze maggiori siano concentrate nelle aree riconducibili all'edificazione strutturata e compatta (relativamente alla scala di analisi corrente) dove il margine risulta sostanzialmente integro (Figura 65) e l'intensità della rappresentazione è proporzionale a tale integrità. Le aree maggiormente in evidenza nel *layer* D_2 risultano inoltre essere più interne all'edificato se in prossimità dell'agglomerato principale, mentre sono leggermente più in evidenza, e in modo più omogeneo su tutta l'immagine al contrario del *layer* D_1 , se relative ad aggregati isolati (i *clusters*) (Figura 66). Da questo si deduce la convenienza ad utilizzare il *layer* derivato da D_1 per valutare l'edificazione

periurbana, mentre il *layer* derivato da D_2 può essere utilizzato per classificare i *clusters* nel diffuso.

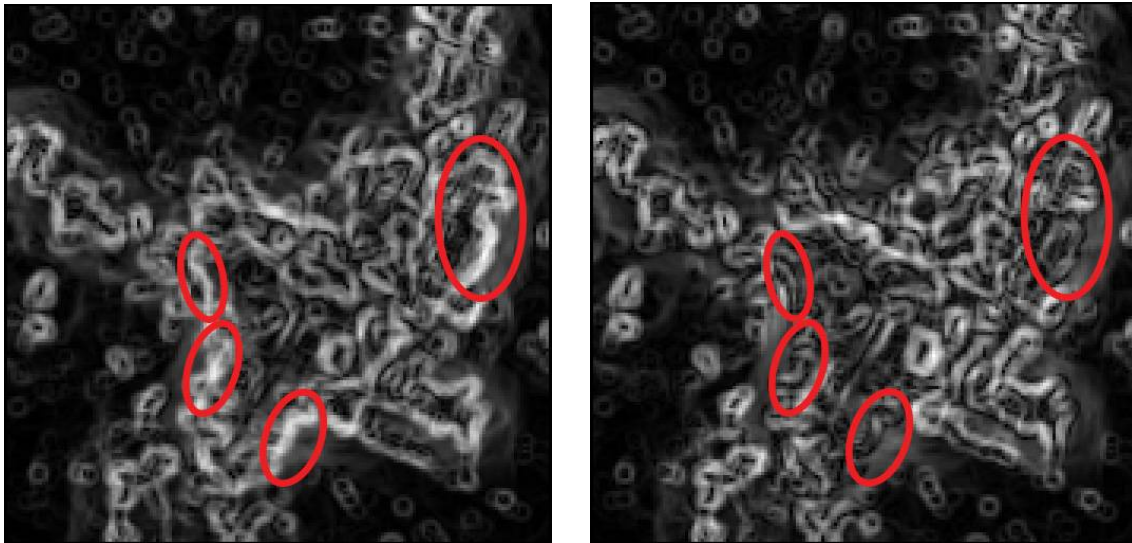


Figura 65 – Forlì: differenze nell’elaborazione dei margini.

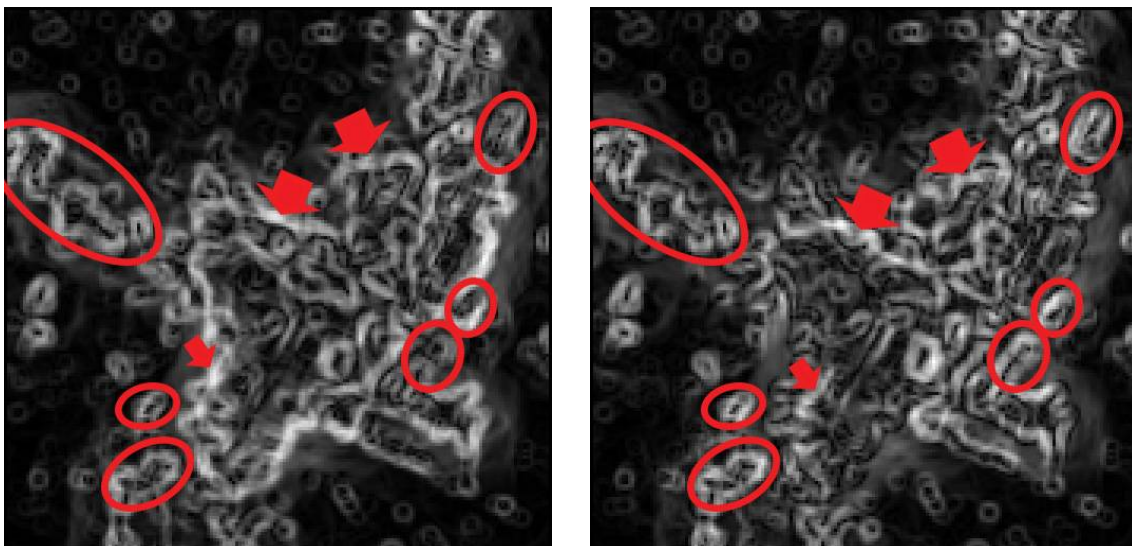


Figura 66 – Forlì: differenze nell’elaborazione dei *clusters* (cerchiati) e dei margini sfrangiati (freccie).

Anche in seguito ad alcune prove sperimentali la combinazione più convincente tra dati raster elaborati e definizione delle classi è risultata essere l’associazione tra D_1 e “Dispersione periurbana” e tra D_2 e “Clusters”. I requisiti definitivi utilizzati per la classificazioni sono i seguenti: valore di densità a 1500 compreso tra 0.2 e 0.45 e valore di pendenza derivato da D_1 compreso tra 9 e 12 per la

classe “Dispersione Periurbana”; valore di densità a 1500 compreso tra 0.3 e 0.03 e valore di pendenza derivato da D_2 maggiore di 10 per la classe “Clusters”. L’ordine di classificazione prevede la precedenza per la classe “Clusters”, mentre la classe “Dispersione periurbana” viene individuata in un secondo momento.



Figura 67 – Criteri di classificazione per “Clusters”

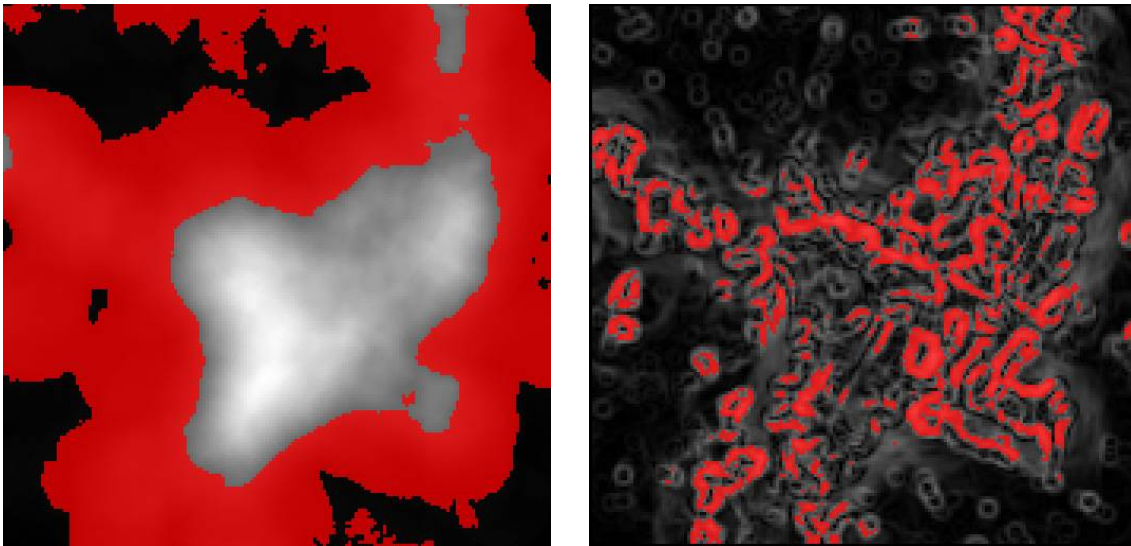


Figura 68 – Forlì: classificazioni parziali in base ai singoli criteri per la classe “Clusters”: in base e ai valori di densità a 1500 pixel (a sinistra) e ai valori di pendenza (a destra).



Figura 69 – Criteri di classificazione per “Dispersione Periurbana”

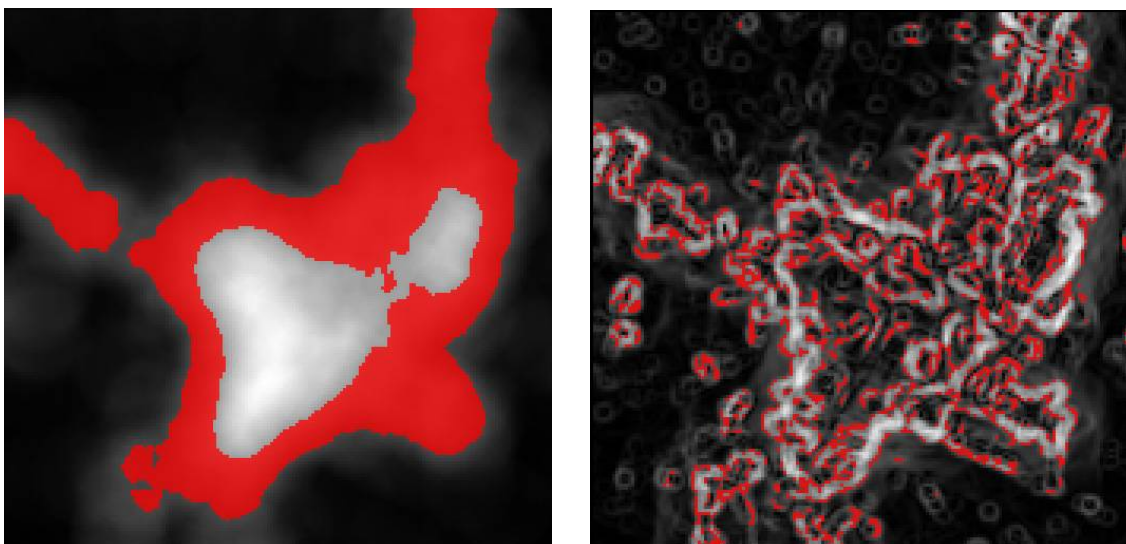


Figura 70 – Forlì: classificazioni parziali in base ai singoli criteri per la classe “Dispersione periurbana”: in base ai valori di densità a 1500 pixel (a sinistra) e ai valori di pendenza (a destra).

3.3.2 Valutazione qualitativa dei risultati ed ulteriori sviluppi

Non esistendo dei database o informazioni oggettive con cui confrontare i risultati ottenuti può essere effettuata solamente una valutazione di tipo qualitativo rispetto alle indicazioni sullo stato del territorio e sul grado di intervento necessario che emergono dall’analisi. Inoltre allo stato attuale questo lavoro si qualifica come una analisi di inquadramento, base per ulteriori elaborazioni, attraverso la quale non si vogliono individuare con esattezza le aree di intervento, ma al massimo gli ambiti critici a scala territoriale, attraverso una fotointerpretazione degli elaborati grafici finali.

I risultati delle classificazioni effettuate su vari comuni del territorio romagnolo (Faenza, Forlì, Cesena, Rimini) sono mostrati nella **Tavola 7**.

Visionando questi risultati si possono notare innanzitutto la diversa distribuzione delle classi sull’immagine: mentre i requisiti selezionati per l’individuazione dei cluster hanno prodotto aree classificate di tipo continuo, la classificazione della densificazione periurbana ha generato un effetto granulare la cui maggiore aggregazione in certe zone della mappa permette di individuare le aree

maggiormente rappresentative delle condizioni urbane di perdita del margine e frammentazione relative a tale classe.

Per quanto riguarda la classe relativa alle aree di dispersione periurbana, si nota come in generale vengano evidenziati i margini dell'edificazione, con pochi elementi allineati classificati come "Dispersione periurbana", se relativi a margini netti senza dispersione limitrofa (Figura 71), o con vari punti classificati che coprono un'area più estesa e che si estendono nel tessuto retrostante se si tratta di urbanizzazione sfrangiata (Figura 72). Se si volesse automatizzare ulteriormente il procedimento di riconoscimento sarebbe quindi necessario elaborare strategie di analisi dell'aggregazione spaziale di questi risultati.

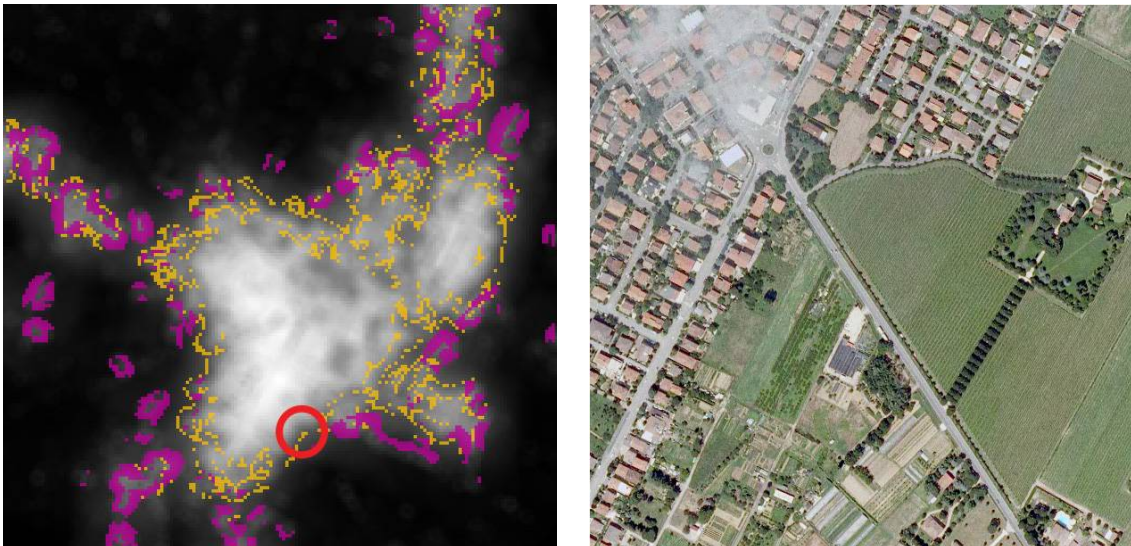


Figura 71 – Forlì: evidenziato nel cerchio rosso (a sinistra) un margine netto nell'urbanizzazione (a destra corrispondente foto aerea dell'area); il margine netto è caratterizzato dalla presenza di pochi punti allineati (in giallo) corrispondenti alla classe "Dispersione periurbana".

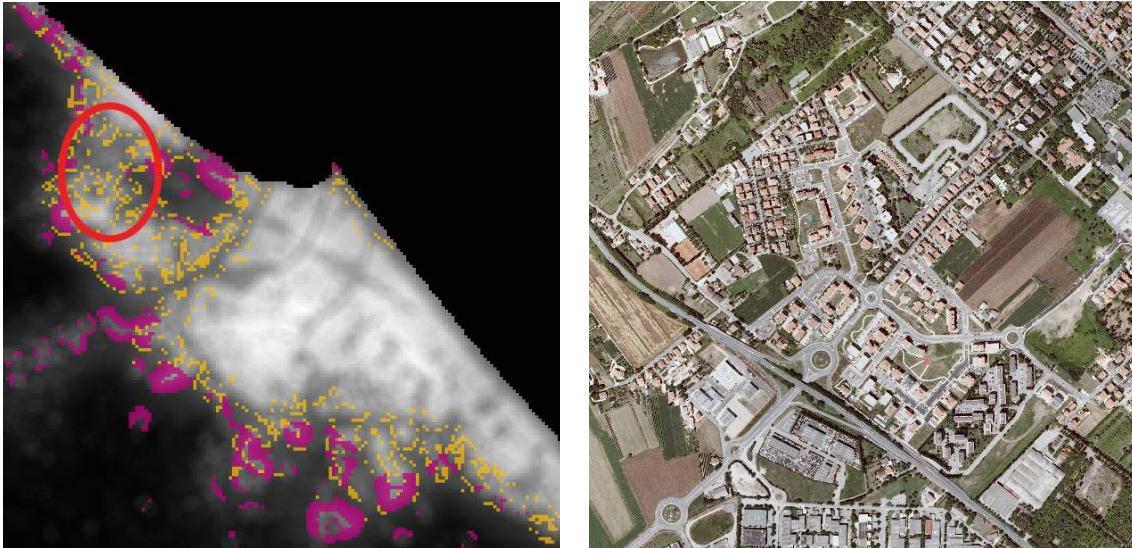


Figura 72 – Rimini: evidenziata nel cerchio rosso (a sinistra) un’area di urbanizzazione diradata (a destra corrispondente foto aerea); elementi classificati come “Dispersione periurbana” (in giallo) sono presenti su tutta l’area.

Relativamente alla rilevazione dei *clusters* nel diffuso, tali aggregazioni sono state individuate, con particolare chiarezza nel caso dei filamenti (Figura 73) o nel caso siano caratterizzate da forma compatta e dimensioni contenute (dell’ordine di 1 km di diametro) (Figura 74).

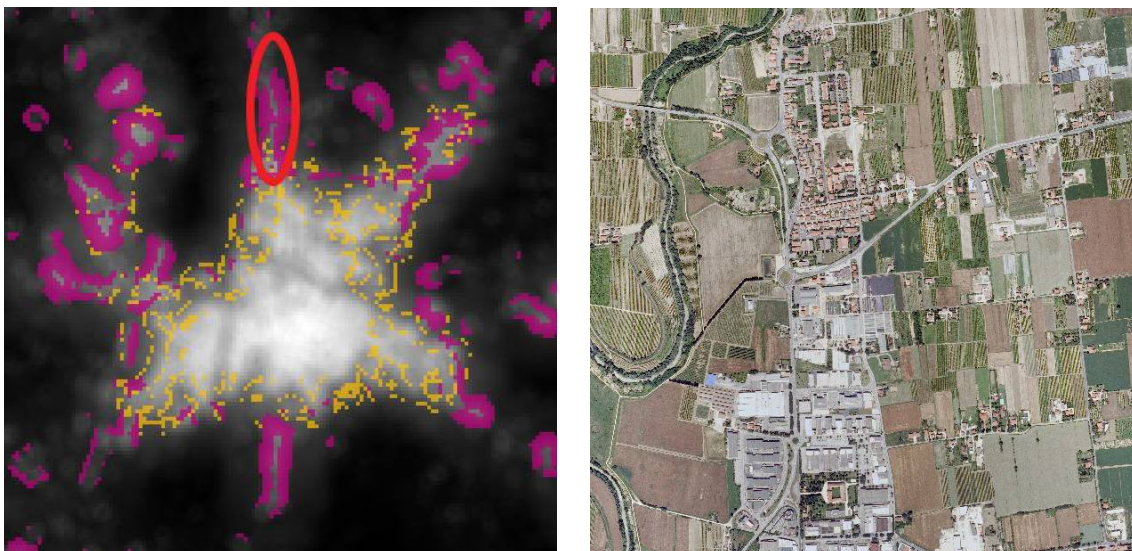


Figura 73 – Cesena: evidenziata nel cerchio rosso (a sinistra) un’urbanizzazione lungo un asse stradale (a destra corrispondente foto aerea); la classificazione dei bordi come “Clusters” (in viola) è fortemente coerente con la forma a filamento dell’urbanizzazione.

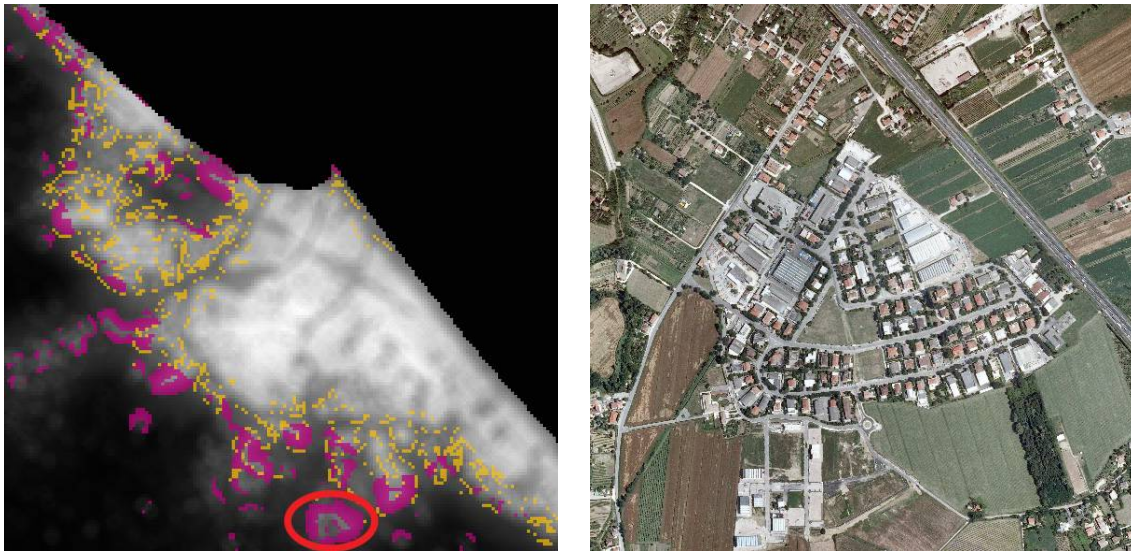


Figura 74 – Rimini: evidenziato nel cerchio rosso (a sinistra) un’aggregazione esterna all’urbanizzazione principale (a destra corrispondente foto aerea); la classificazione dei bordi come “Clusters” (in viola) è fortemente coerente con il fenomeno dispersivo del *clustering* nel diffuso.

Una terza situazione è caratterizzata dalla compresenza di entrambe le classificazioni. Entrando in gioco la componente relativa alla dispersione periurbana, una valutazione della situazione è vincolata all’analisi complessiva dell’area sottesa dall’aggregato dei pixel classificati come “Periurbane”. In questi casi le zone classificate come *clusters* hanno individualmente scarso significato, ma se associate all’aggregato di dispersione possono fornire informazioni sul grado di indipendenza dall’agglomerato principale in base all’incidenza sul totale e alla posizione, ad esempio nel caso le aree classificate come “Clusters” si interpongano tra due nuclei di edificazione (Figura 75). Coerentemente con i parametri forniti rientrano in questa categoria i *clusters* compatti di estensione maggiore (piccoli borghi o distretti industriali più isolati) nei quali la classificazione specifica si limita ai relativi “sotto-cluster” più esterni, mentre la parte interna risulta classificata come dispersione periurbana.

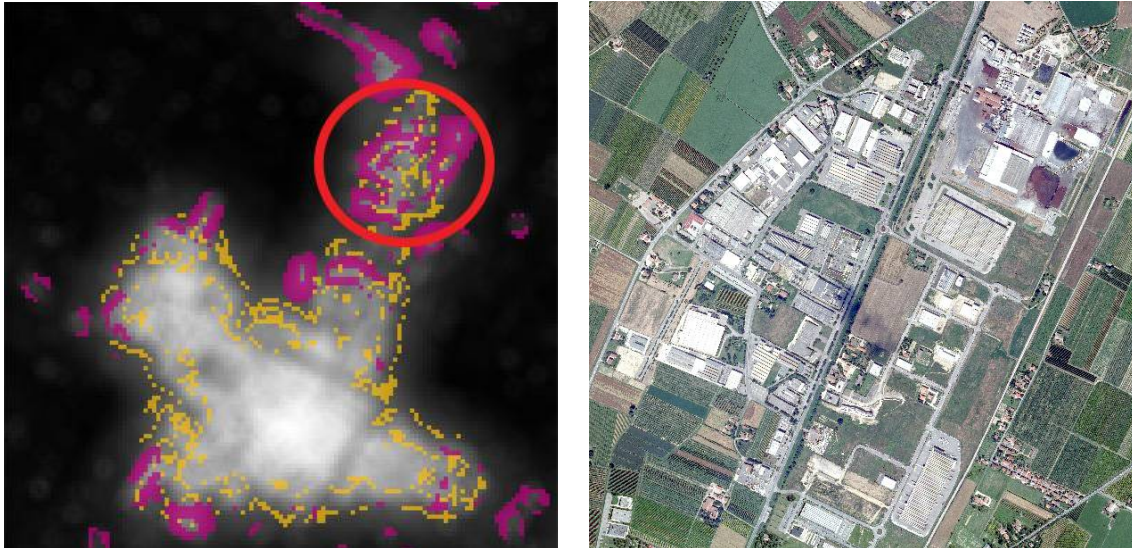


Figura 75 – Faenza; evidenziata nel cerchio rosso (a sinistra) un distretto industriale (a destra corrispondente foto aerea); la presenza di classe “Dispersione Periurbana” (in giallo) indica un certo grado di dispersione interna, mentre la presenza della classe “Clusters” (in viola) indica il grado di autonomia dell’aggregato rispetto al nucleo urbano principale.

Questa procedura è comunque strettamente tarata sulle dimensioni e la morfologia del sistema urbano territoriale preso in esame, in particolare per quanto riguarda l’individuazione dei *clusters* nel diffuso. Se si volesse procedere verso un’ulteriore automazione dell’analisi, sarebbe quindi necessario relativizzare la procedura, attraverso un adeguamento automatico dei parametri di densità di riferimento rispetto all’effettiva dimensione territoriale degli aggregati in esame.

È inoltre necessario un cenno rispetto alla trasparenza dei processi di classificazione. In questo caso l’elaborazione è stata basata su elaborazioni grafiche che sebbene siano basate su indicatori consolidati dei fenomeni reali (la densità rispetto all’urbanizzazione) possono risultare, con questo grado di approfondimento, concettualmente slegate e autonome rispetto agli stessi fenomeni, anche se confermate dalla sperimentazione empirica effettuata. A tal fine, se si dovesse procedere con questo approccio, risulterebbe necessaria un’analisi più rigorosa del rapporto tra gli indicatori frutto di elaborazione, come la sopracitata “pendenza”, e le effettive caratteristiche delle transizioni tra tessuto urbano e campagna o tra diversi tessuti urbani.

In definitiva sebbene sia rilevabile una forte corrispondenza visiva tra classificazione informatica e caratteristiche morfologiche e spaziali dei fenomeni urbani, a questo grado di sviluppo della procedura non è ancora possibile effettuare una vera e propria analisi quantitativa delle aree suscettibili di intervento. Tuttavia le informazioni qui ottenute possono essere ulteriormente elaborate per ottenere una delimitazione più precisa dei rispettivi fenomeni ed integrate all'interno di sistemi decisionali con ulteriori informazioni, sia attinenti ad altri ambiti (come conformazione del terreno, condizioni idrogeologiche, popolazione, funzioni presenti, ecc.), sia specifiche sul carattere tipomorfologico degli aggregati a scala maggiore (come la classificazione dei tessuti urbani precedentemente mostrata), al fine di poter valutare lo stato di “degrado” urbanistico, i fenomeni in atto di consumo del suolo ed eventuali interventi di riequilibrio e di “messa in sicurezza” morfologica.

Bibliografia tematica

Urbanistica, pianificazione e analisi tipomorfologica

AA.VV., *Il consumo di suolo in Italia - edizione 2014*, ISPRA, Roma 2014.

AA.VV., *La diffusione dei GIS nelle amministrazioni locali italiane: nuove opportunità per il governo del territorio*, F. Angeli, Milano 1998.

AA.VV., *Quando l'autostrada non basta : infrastrutture, paesaggio, urbanistica nel territorio pedemontano lombardo*, Quodlibet, Macerata 2013.

Claudia Mattogno (a cura di), *Ventuno parole per l'urbanistica*, Carocci, Roma 2008.

Comune di Faenza, *PSC di Faenza, Relazione indicatori prestazionali*, Faenza, 2009.

CRCS, *Rapporto 2010*, INU Edizioni 2011.

Cristina Bianchetti, *Abitare la città contemporanea*, Skira, Milano 2003.

Elio Piroddi, Antonio Cappuccitti, *Urbanistica è progetto di città*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna 2012.

Federico Zanfi, *Città latenti: un progetto per l'Italia abusiva*, Bruno Mondadori, Milano 2008.

Francesco Domenico Moccia, *Abitare la città ecologica*, CLEAN, Napoli 2011.

Francesco Indovina, *La città diffusa*, DAEST, Venezia 1990.

ISPRA, *Il consumo di suolo in Italia*, Roma 2014.

Luca Reale, *Densità città residenza: tecniche di densificazione e strategie anti-sprawl*, Gangemi, Roma 2008.

Luca Reale, *La città compatta: sperimentazioni contemporanee sull'isolato urbano europeo*, Gangemi, Roma 2012.

Luisa De Biasio Calimani (a cura di), *Il sistema del verde urbano. Elemento di riconversione ecologica della città*. Padova, Il poligrafo, Padova 2001.

Metrogramma, *Bolzano città contemporanea: 4 scenari meta progettuali*, 2002.

<http://architettura.it/architetture/20020108/>

Nina Schwarz, *Urban form revisited – Selecting indicators for characterising European cities*, in: “Landscape and Urban Planning”, n. 96, 2010, 29-47.

Paola Bonora (a cura di), *Rappresentare la territorialità*, Archetipo Libri, Bologna 2011.

Paolo Pileri, *Cambiare per ripartire, l'occasione del nuovo governo metropolitano per sciogliere cinque nodi cruciali dell'urbanistica*, in: “Paolo Testa (a cura di), *Rapporto Cittalia 2013. Le città metropolitane*, Roma 2013”.

Paolo Pileri, *La tutela del suolo (risorsa ambientale e bene comune) nel cuore dell'Agenda Urbana*, in: “Forum dell'Agenda urbana italiana, Atti del seminario, CSS, Roma 2013”.

Paolo Pileri, *Questioni di scala per il governo dei consumi di suolo*, in: “CRCS, *Rapporto 2014*, INU Edizioni 2014”.

Patrizia Gabellini, *Fare urbanistica: esperienze, comunicazione, memoria*, Carocci, Roma 2010.

GIS, *image processing* e analisi a oggetti

Alessandro Seravalli, *GIS: teorie e applicazioni*, La mandragora 2011.

Chiara Martelli, *Estrazione di features con tecniche di classificazione pixel e object-oriented*, Tesi di laurea in Telerilevamento, Gabriele Bitelli (relatore), Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna, 2009.

Cornelis Van Rijsbergen, *Information Retrieval*, Butterwort-Heinemann, London, 1979.

eCognition Developer 8.0 Guided Tour – Level 3. Advanced example of building extraction. For intermediate and advanced users; Classification of buildings using LiDar and RGB data.

<http://www.ecognition.com/document/data-guidedtour3advanced-buidling-extraction>

eCognition Developer 8.9 Reference Book.

eCognition Developer 8.9 User Guide.

Emanuela Caiaffa, *Il contributo del GIS nello studio di analisi ambientale*, in: “Energia Ambiente e Innovazione”, Ed. ENEA, n. 3, 2005.

Germain Forestier, Anne Puissant, Cédric Wemmert, Pierre Gançarski, *Knowledge-based region labeling for remote sensing image interpretation*, in: “Computer Environment Urban Systems”, n. 36, 2012, 470–480.

Gotthard Meinel, Marco Neubert, Johannes Reder, *The potential use of very high resolution satellite data for urban areas – first experience with IKONOS data, their classification and application in urban planning and environmental monitoring*.

http://www.ecognition.com/sites/default/files/396_meinel_neubert_reder_regens_burg2001.pdf

Jan D. Wegner, Javier A. Montoya-Zegarra, Konrad Schindler, *A higher-order CRF model for road network extraction*, in: “Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2013 IEEE Conference”.

Jason S. Walker, Thomas Blaschke, *Object-based land-cover classification for the Phoenix metropolitan area: optimization vs. transportability*, in: “International Journal of Remote Sensing”, volume 29, n. 7, 2008, 2021-2040.

Karin Hedman, Uwe Stilla, Gianni Lisini, Paolo Gamba, *Road network extraction in urban areas by means of feature-level fusion*, TerraSAR-X Science Team Meeting, 2008.

Lucian Drăguț, Ovidiu Csillik, Clemens Eisank, Dirk Tiede, *Automated parameterisation for multi-scale segmentation on multiple layers*, in: “ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing”, n. 88, 2014, 119-127.

Mariana Belgiu, Ivan Tomljenovic, Thomas J. Lampoltshammer, Thomas Blaschke, Bernhard Höfle, *Ontology-Based Classification of Building Types Detected from Airborne Laser Scanning Data*, in: “Remote Sensing”, n. 6, 2014, 1347-1366.

Mario A. Gomarasca, *Elementi di geomatica*, Associazione italiana di telerilevamento, Firenze 2004.

Michael Wurm, Hannes Taubenböck, Achim Roth, Stephan Dech, *Urban Structuring Using Multisensoral Remote Sensing Data: By the Example of the German Cities Cologne and Dresden*, in: “Proceedings of Urban Remote Sensing Event, Shanghai, China, 20–22 May 2009”.

<http://core.ac.uk/download/pdf/11137493.pdf>

Peter Hofmann, Josef Strobl, Thomas Blaschke, Hermann Kux, *Detecting informal settlements from QuickBird data in Rio de Janeiro using an object based approach*. In: Blaschke, T., Lang, S., Hay, G. (eds), *Object based image Analysis*, Springer, Heidelberg, Berlin, New York, 537-560.

Qiaoping Zhang, Isabelle Couloigner, *Automated road network extraction from high resolution multi-spectral imagery*, ASPRS (American Society of Photogrammetry and Remote Sensing) 2006 Annual Conference, Reno Nevada.

http://www.ecognition.com/sites/default/files/185_asprs2006_0182.pdf

Sebastian d’Oleire-Oltmanns, Dirk Tiede, *Specific target objects – specific scale levels? Application of the estimation of scale parameter 2 (ESP 2) tool for the identification of scale levels for distinct target objects*, in: “South East European Journal of Earth Observation and Geomatics”, v. 3, n. 2S, 2014.

Thomas Blaschke, Josef Strobl, *What’s wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS*, GeoBIT/GIS 6 (01), 12-17.

http://www.ecognition.com/sites/default/files/390_gis200106012.pdf

Todd Douglas, Trimble, *Infrastructure challenges & geospatial solutions*, Geospatial World Forum, Amsterdam, 2012.

http://www.geospatialworldforum.org/2012/gwf_PDF/Todd%20Douglas.pdf

Xiaojun Yang (ed), *Urban remote sensing: monitoring synthesis and modeling in the urban environment*, Wiley-Blackwell, Chichester 2011.

Yun Zhang, *A fuzzy logic approach to supervised segmentation for object oriented classification*, 2006.

Metodologia di analisi

Acquisizione dei dati



Elaborazione al primo livello semantico: individuazione dei singoli edifici



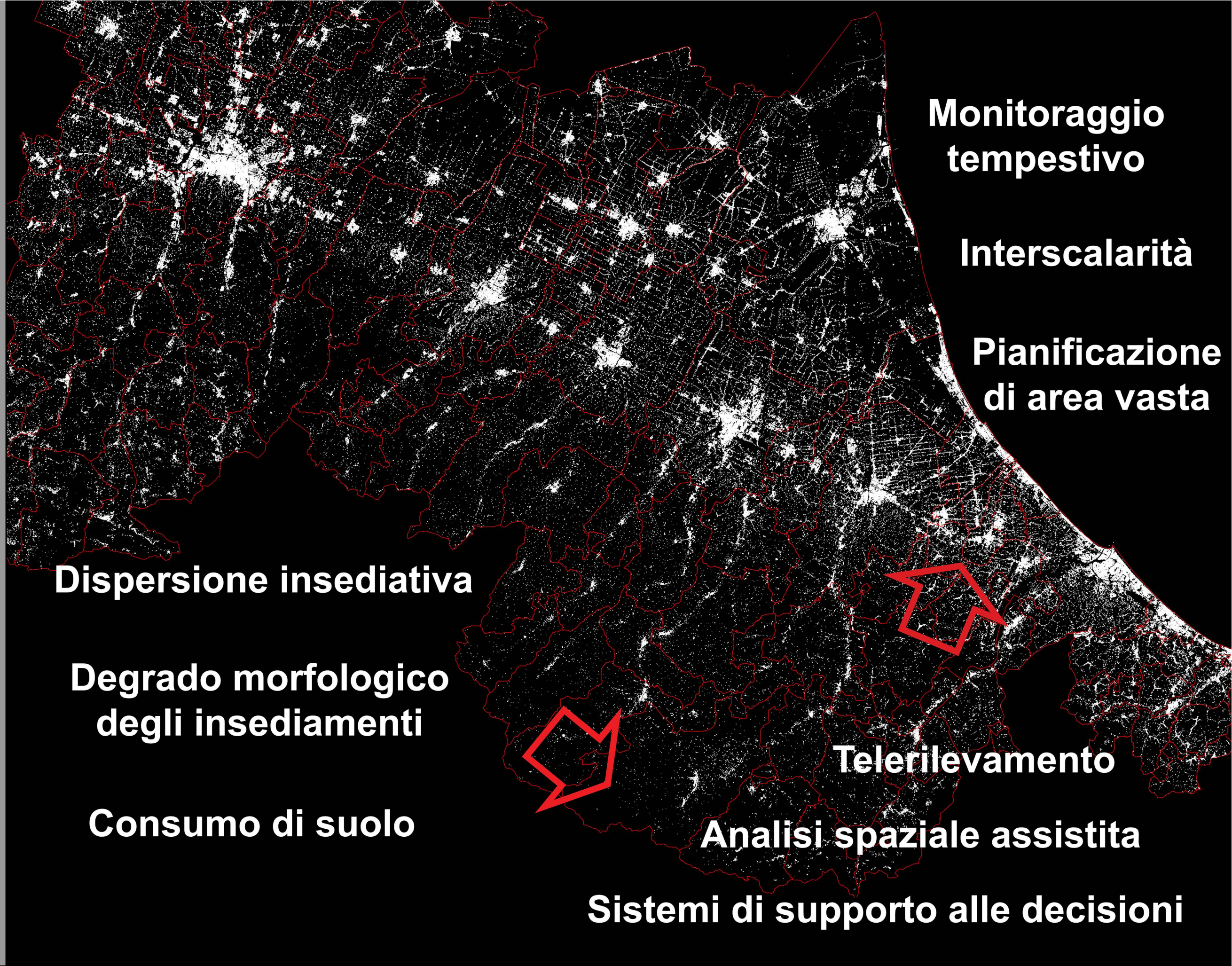
Elaborazione al livello semantico superiore: classificazione degli aggregati urbani



Fase GIS: elaborazione dei tematismi



Pianificazione



Monitoraggio tempestivo

Interscalarità

Pianificazione di area vasta

Dispersione insediativa

Degrado morfologico degli insediamenti

Consumo di suolo

Telerilevamento

Analisi spaziale assistita

Sistemi di supporto alle decisioni

FORME INSEDIATIVE

Tavola 3



Patrizia Gabellini, *Fare urbanistica: esperienze, comunicazione, memoria*

Elio Piroddi, Antonio Cappuccitti, *Urbanistica è progetto di città*

Luca Reale, *Densità città residenza*

Luca Reale, *La città compatta*

Claudia Mattogno (a cura di), *Ventuno parole per l'urbanistica*

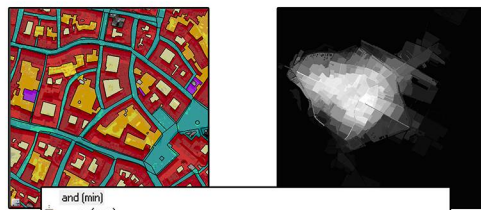
Aggregati

Edificazione compatta



Caratteristiche tipomorfolologiche e spaziali prevalenti:

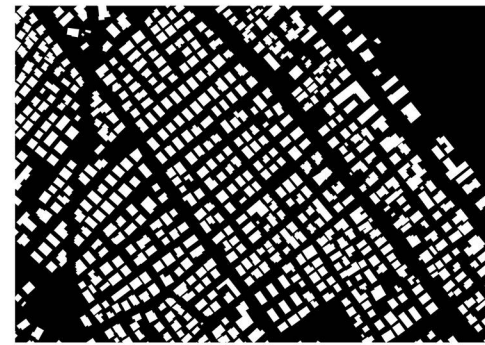
- Presenza di corti
- Confini frastagliati e irregolari
- Rapporto diretto con lo spazio pubblico
- Compattezza dell'aggregato complessivo



```

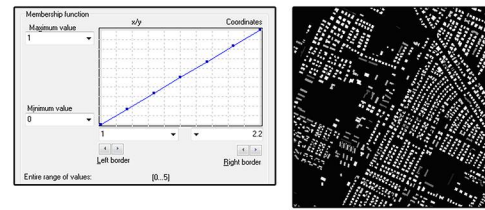
and (min)
  or (max)
    and (min)
      Rel. area of sub objects Tipi a Corte [1] >= 0.5
      Relative Area of Tipi a Corte (Media dei sub-oggetti) >= 0.05
    and (min)
      Rel. area of sub objects Tipi a Corte [1] >= 0.4
      Relative Area of Tipi a Corte (Media dei sub-oggetti) >= 0.2
    and (min)
      Rel. area of sub objects Tipi a Corte [1] >= 0.3
      Relative Area of Tipi a Corte (Media dei sub-oggetti) >= 0.25
      Relative Area of Tipi a Corte (Media dei sub-oggetti) >= 0.4
    or (max)
      Existence of sub objects Edificato [1] = 1
      Existence of sub objects Tipi a Corte [1] = 1
  
```

Edificazione a grana fine



Caratteristiche tipomorfolologiche e spaziali prevalenti:

- Forma compatta dei singoli edifici
- Dimensioni ridotte dei singoli edifici



```

and (min)
  Indice Mono/plurifamiliari >= 0.1
  Number of sub objects Mono/plurifamiliari [1] >= 3

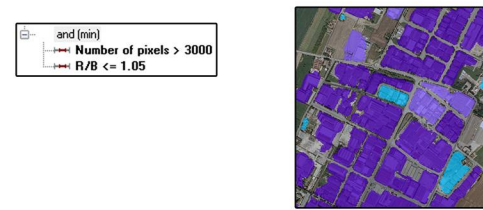
```

Ed. a grana grossa



Caratteristiche tipomorfolologiche e spaziali prevalenti:

- Coperture industriali
- Area di sedime dei singoli edifici elevata
- Eventuale aggregazione a scala urbana in distretti monofunzionali

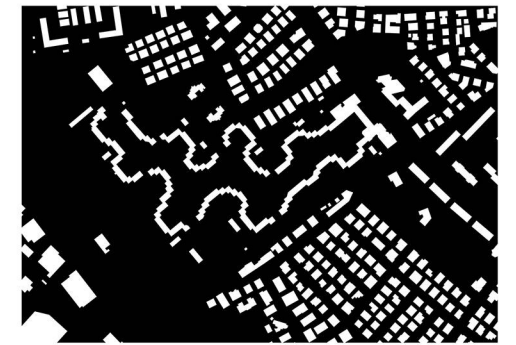


```

and (min)
  Number of pixels > 3000
  R/B <= 1.05
  Rel. area of sub objects Capannoni [1] >= 0.2
  Rel. area of Edificazione a grana grossa 0.2 (1000) >= 0.15
  Rel. area of sub objects Capannoni [1] >= 0.1

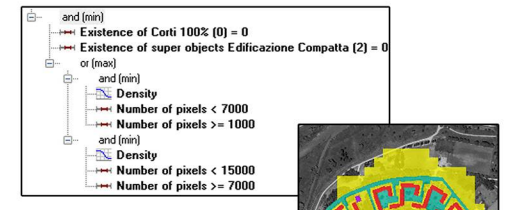
```

Forme aperte



Caratteristiche tipomorfolologiche e spaziali prevalenti:

- Forma prevalentemente allungata dei singoli edifici
- Area di sedime dei singoli edifici medio-elevata
- Eventuale dilatazione degli spazi interstiziali e conseguente basso rapporto di copertura



```

and (min)
  Existence of Corti 100% [0] = 0
  Existence of super objects Edificazione Compatta [2] = 0
  Density
  Number of pixels < 7000
  Number of pixels >= 1000
  Density
  Number of pixels < 15000
  Number of pixels >= 7000
  Abitazioni/Edificato > 0.6
  Existence of sub objects Linee [2] = 1
  Max. pixel value Layer_Forme Aperte > 4.5
  Membership to Linee (Media dei sub-oggetti) > 0.37

```

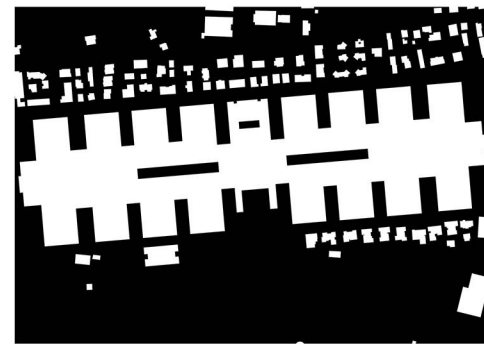
Tavole 4 e 5

FORME INSEDIATIVE

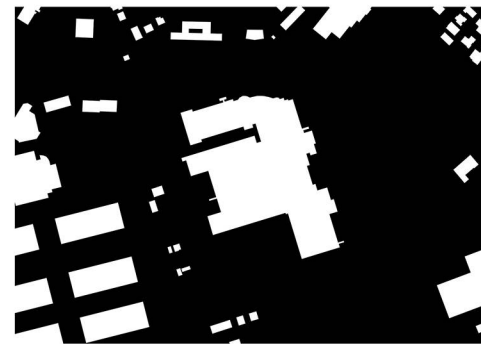


Cittadelle

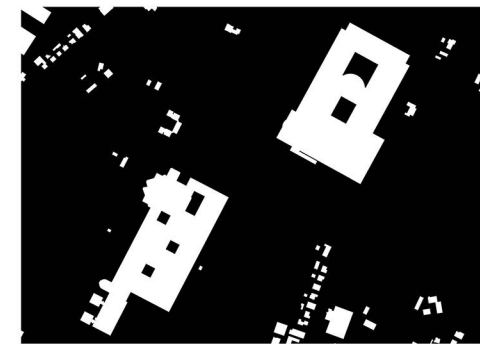
Fiera



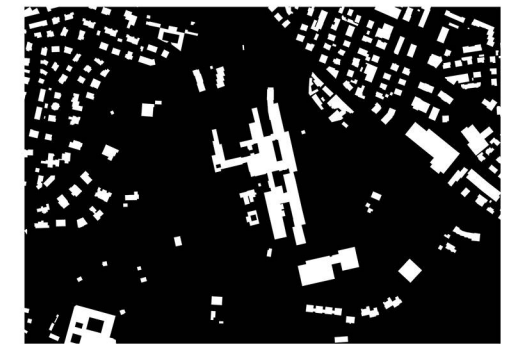
Centri commerciali



Fiera, centri commerciali

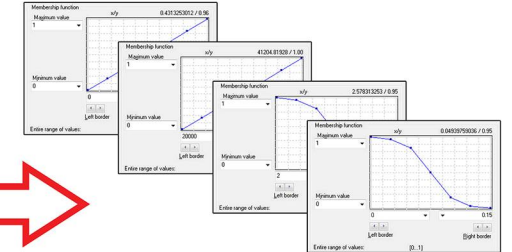
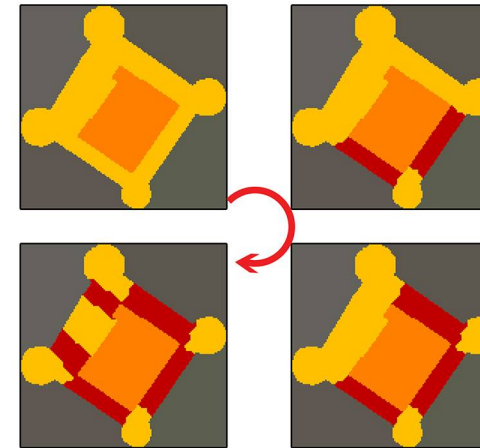
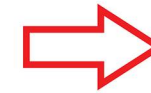
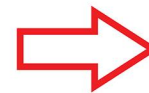
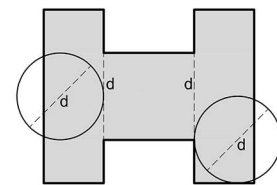
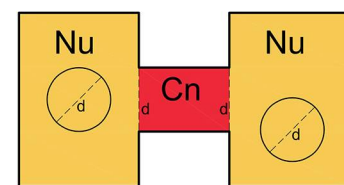
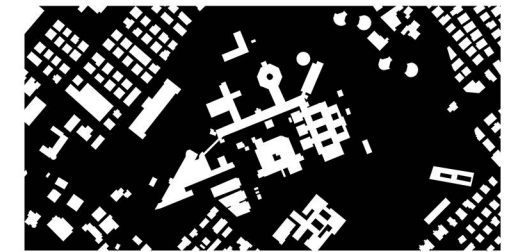


Ospedali



Caratteristiche tipomorfolologiche e relazionali prevalenti:

- Estensione elevata dell'intervento
- Forma complessivamente compatta
- Impianto distributivo articolato
- Scarso rapporto con il contesto



```

and (min)
  Existence of super objects Edificazione compatta (2) = 0
  mean (arithm.)
  Indice Sintattico
  Length*Width
  Length/Width
  Rel. area of Capannoni (500)
  Rel. area of Edificato (300) < 0.2
  
```


Classificazione

Legenda



Attendibilità

Edificazione Compatta

precision = 0,99
recall = 0,80
F-measure = 0,88

Edificazione a grana fine

precision = 0,96
recall = 0,99
F-measure = 0,97

Edificazione a grana grossa

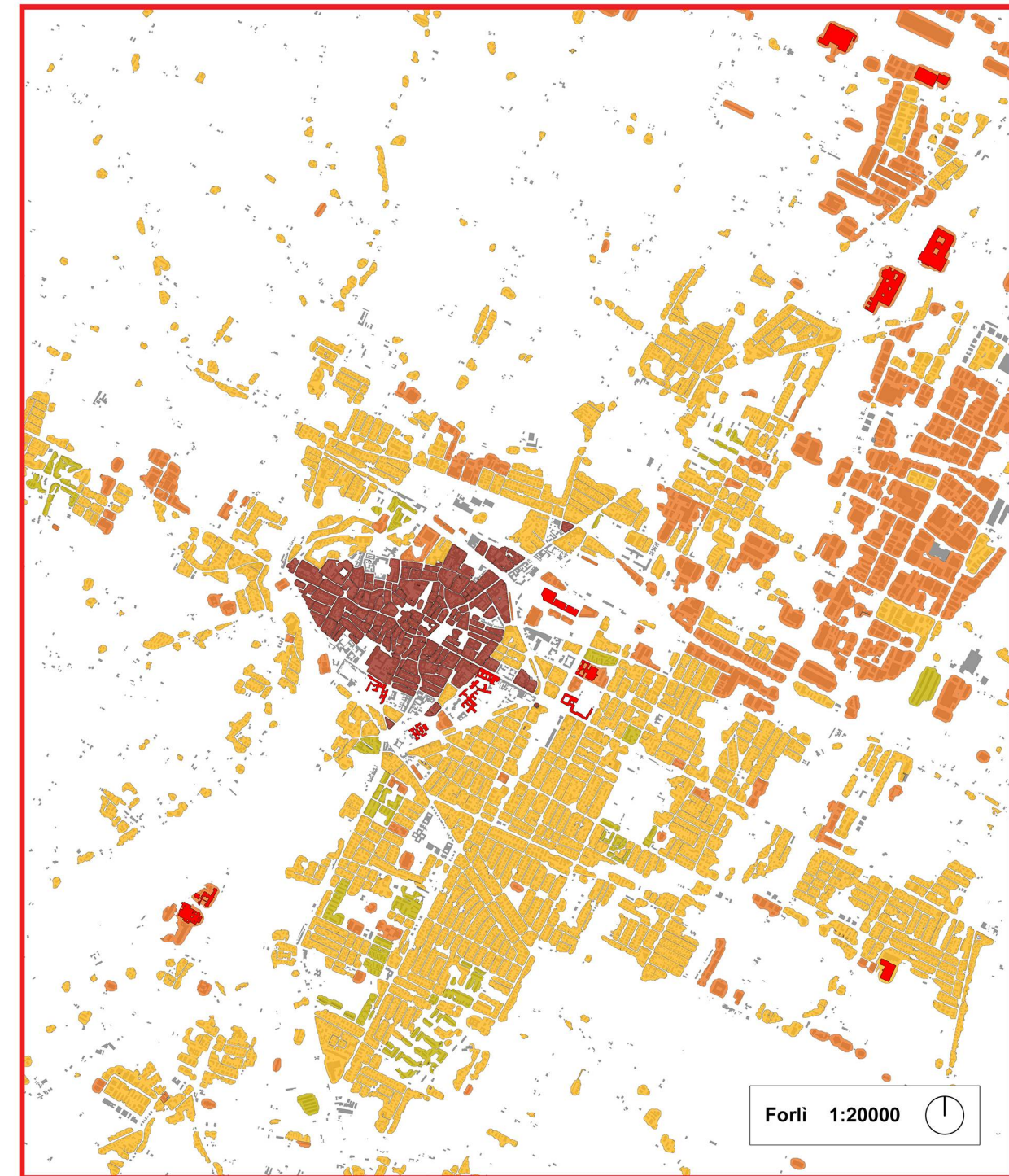
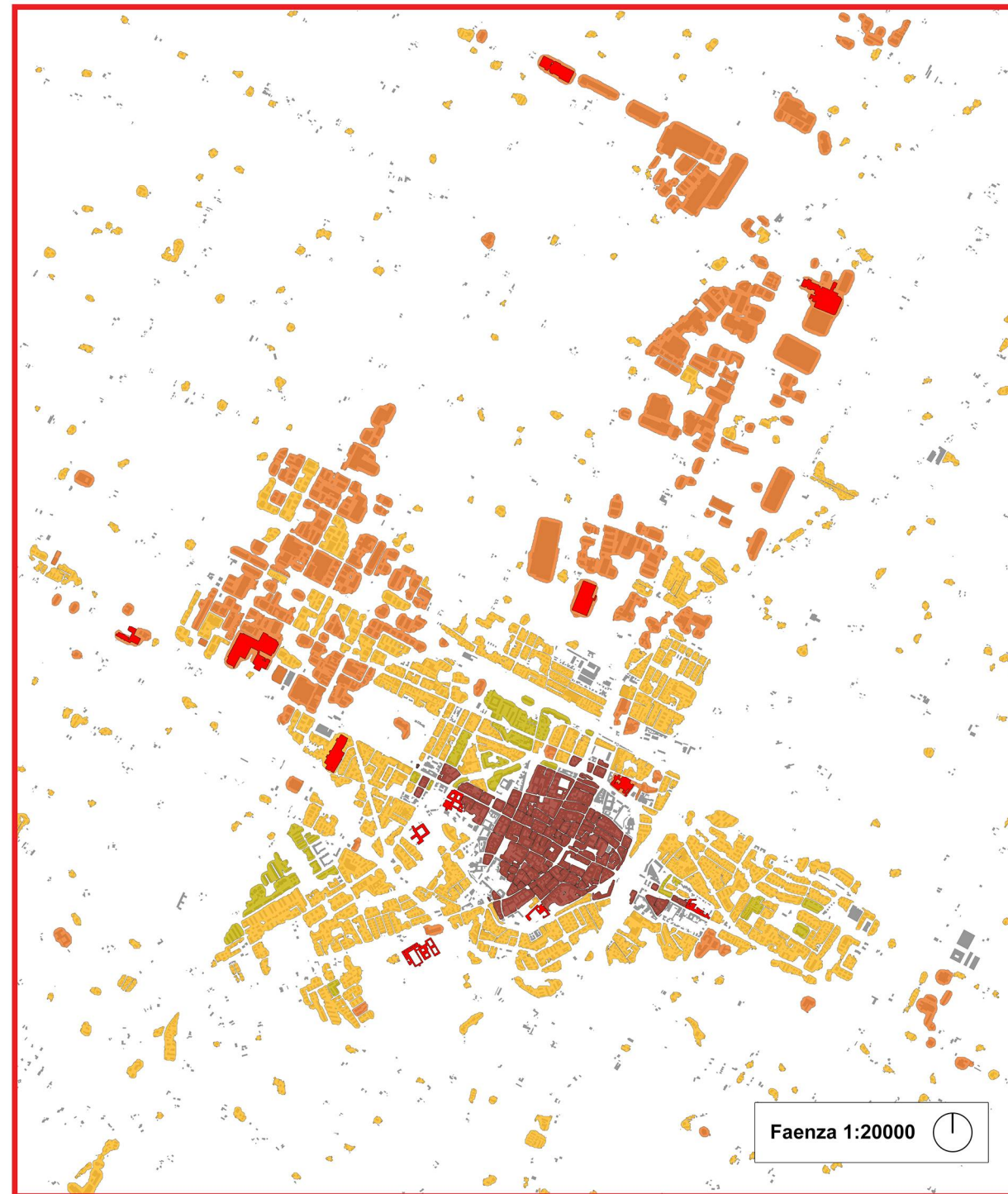
precision = 0,97
recall = 0,91
F-measure = 0,94

Forme aperte

precision = 0,87
recall = 0,82
F-measure = 0,85

Cittadelle

precision = 0,81
recall = 0,93
F-measure = 0,87



Classificazione

Legenda



Attendibilità

Edificazione Compatta

precision = 0,99
recall = 0,80
F-measure = 0,88

Edificazione a grana fine

precision = 0,96
recall = 0,99
F-measure = 0,97

Edificazione a grana grossa

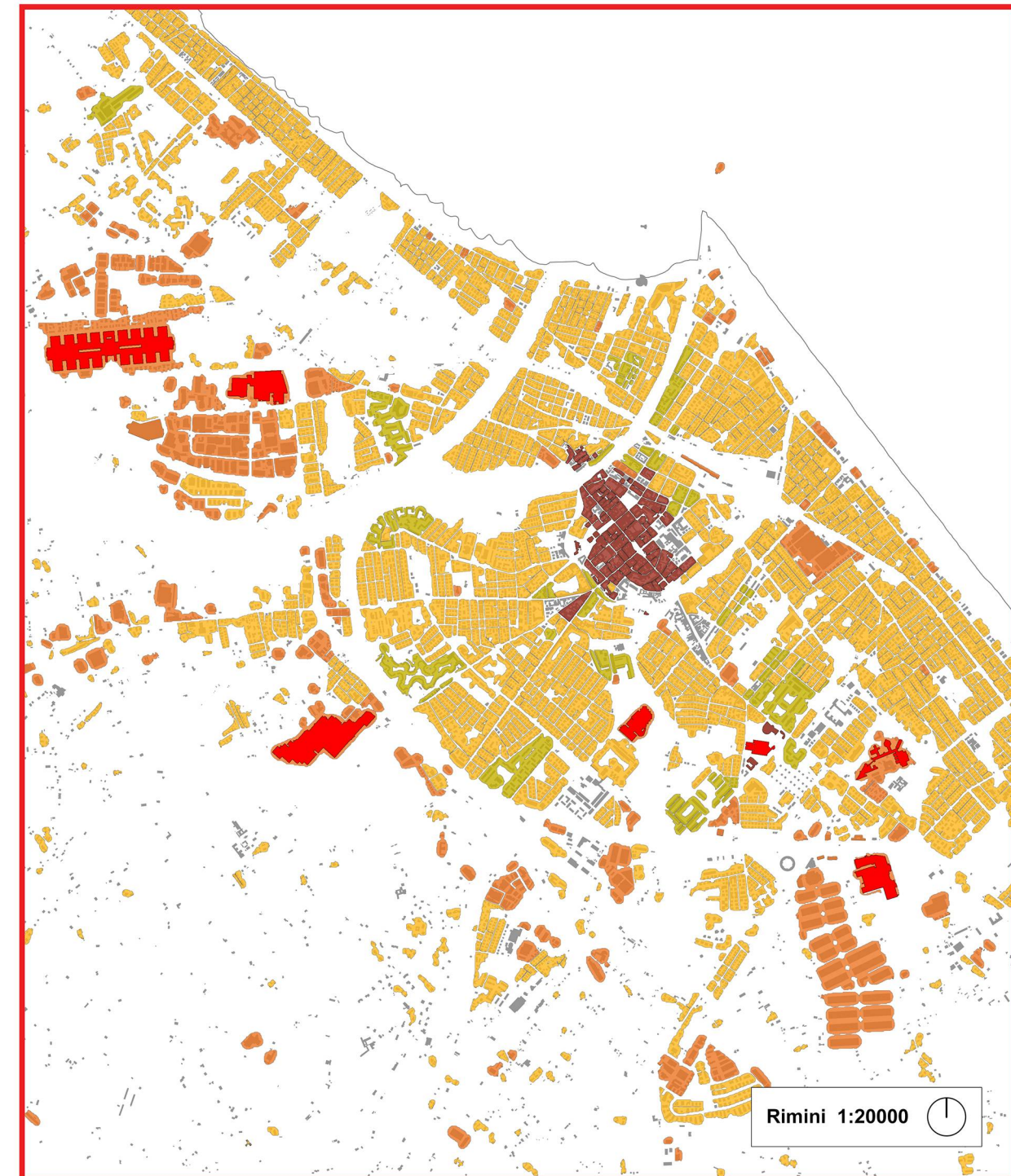
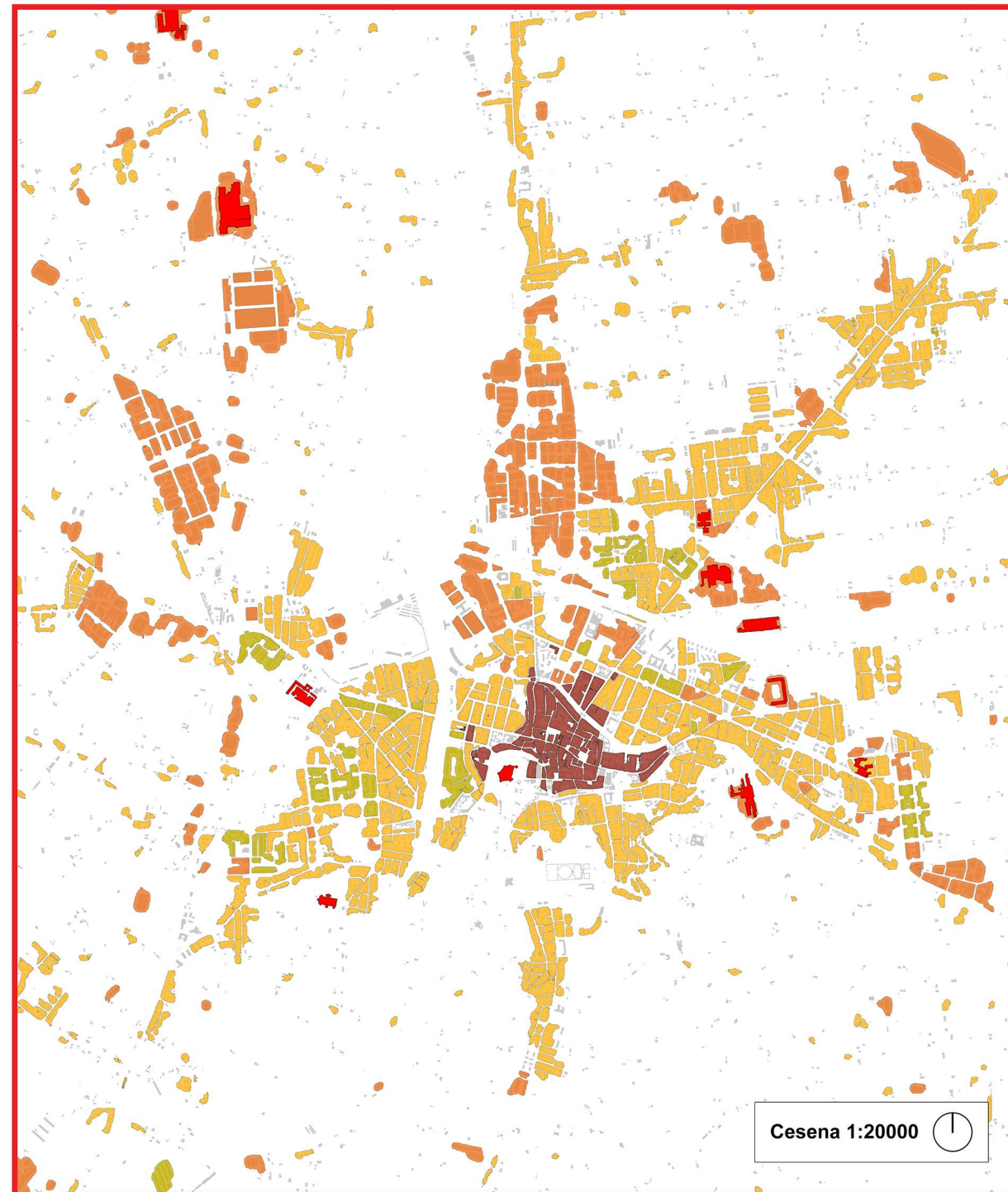
precision = 0,97
recall = 0,91
F-measure = 0,94

Forme aperte

precision = 0,87
recall = 0,82
F-measure = 0,85

Cittadelle

precision = 0,81
recall = 0,93
F-measure = 0,87



FENOMENI DI DISPERSIONE URBANA

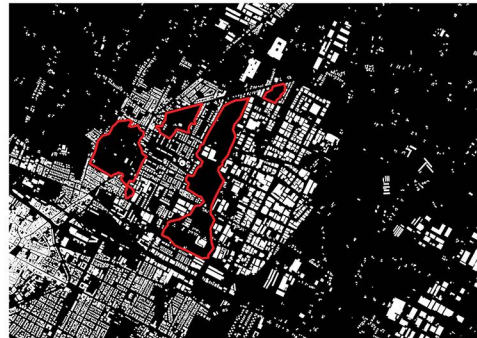


Dispersione periurbana

Clusters

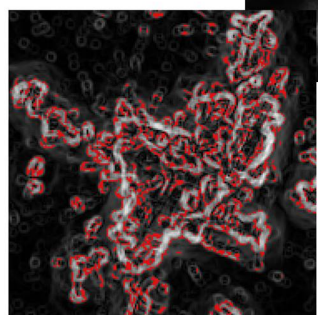
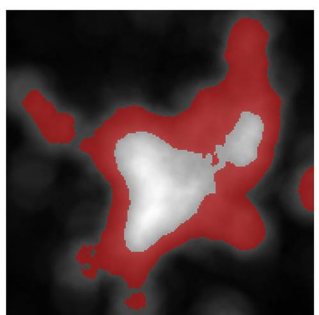
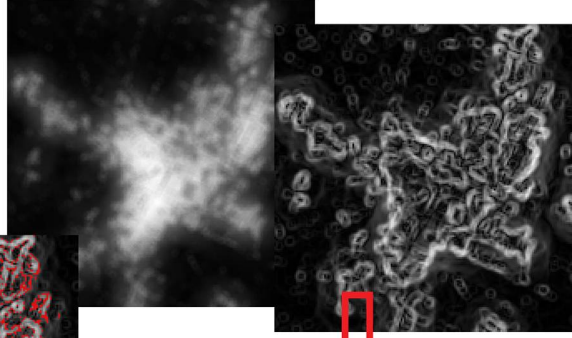
Diradamenti

Radure



Caratteristiche morfologiche:

Dilatazione degli spazi interstiziali sia tra singoli edifici che tra aggregati di espansione in continuità con il nucleo urbano principale

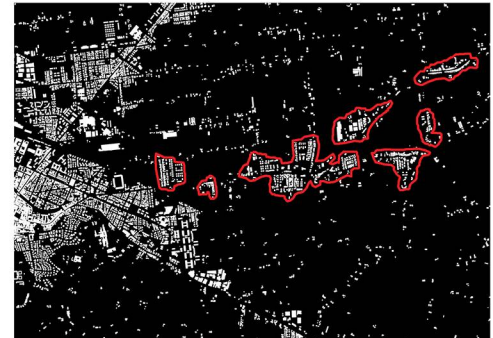


and (min)

- Mean Densità 1500 < 0.45
- Mean Densità 1500 > 0.2
- Mean Pendenza + < 12
- Mean Pendenza + > 9

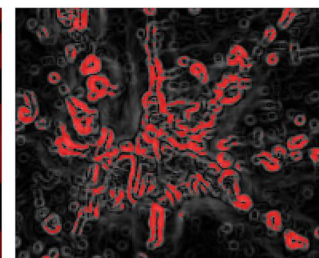
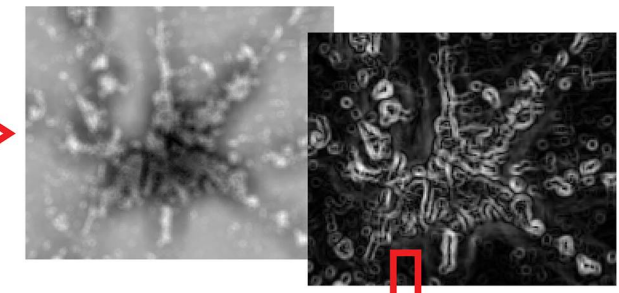
Filamenti

Cluster nel diffuso



Caratteristiche morfologiche:

Ridotta estensione dell'aggregato rispetto al nucleo urbano principale in almeno una delle due dimensioni



and (min)

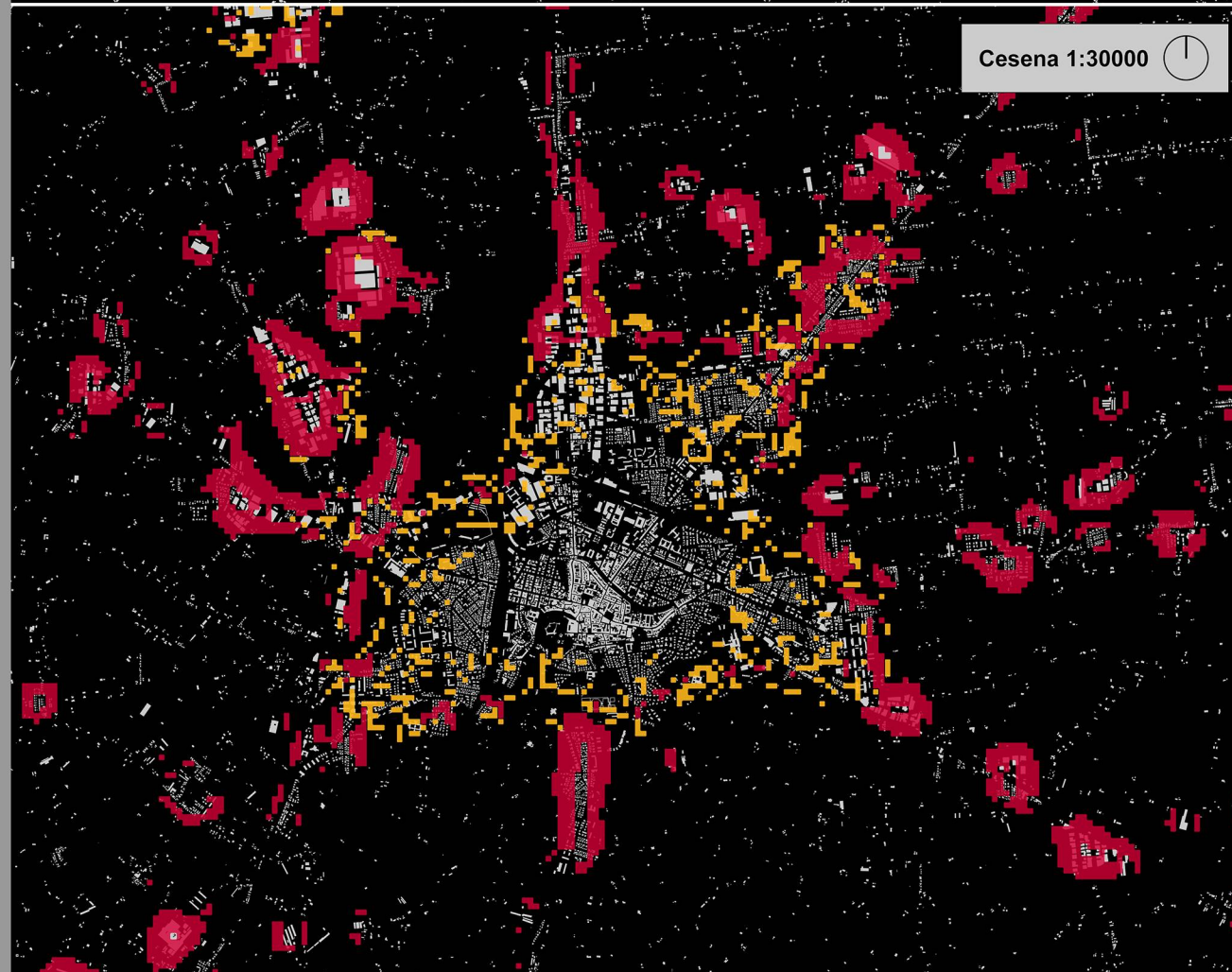
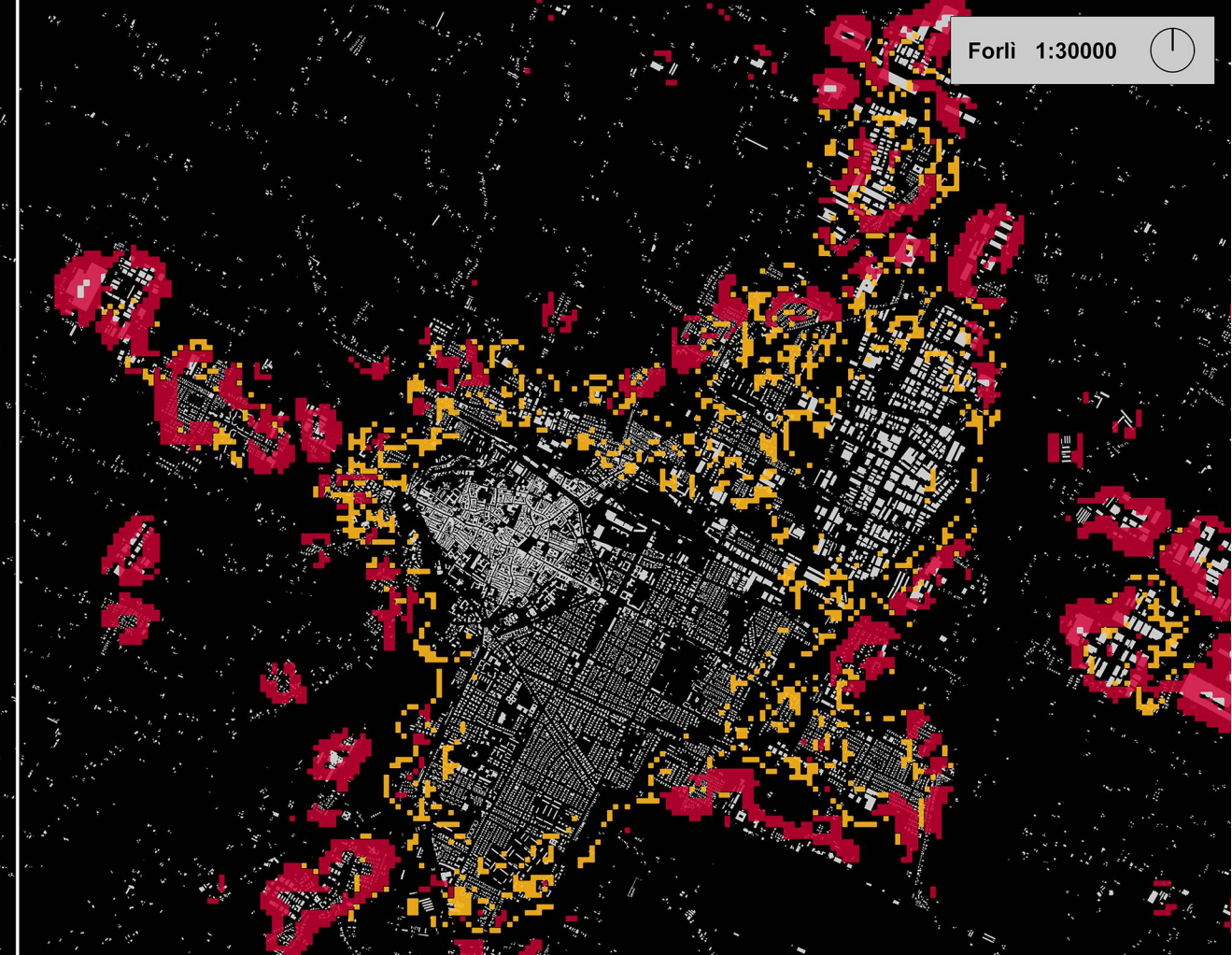
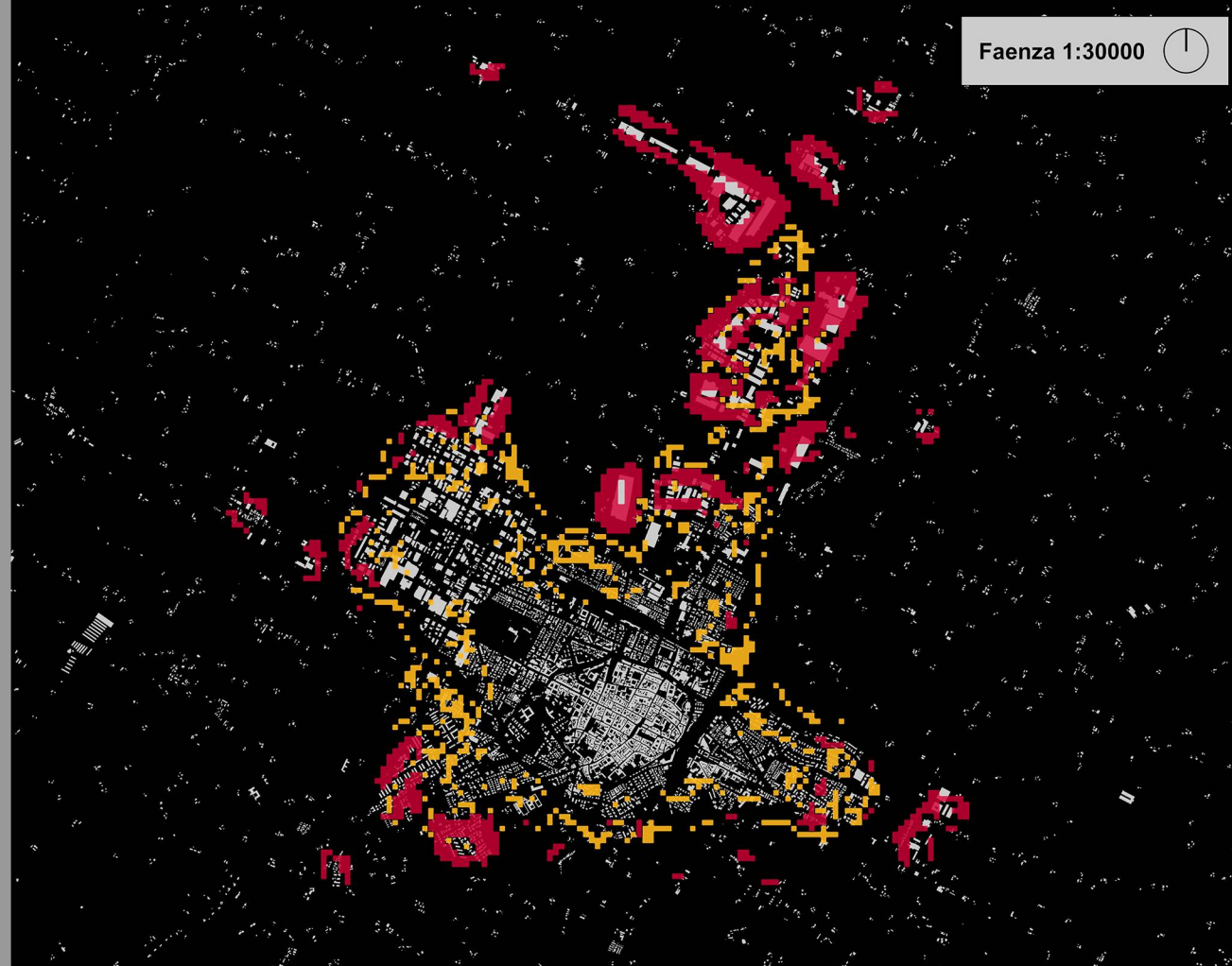
- Mean Densità 1500 < 0.3
- Mean Densità 1500 > 0.03
- Mean Pendenza - > 10

Classificazione

Legenda

 **Dispersione periurbana**
(Diradamenti, radure)

 **Clusters**
(Filamenti,
Cluster nel diffuso)



Strumenti informatici per l'analisi spaziale:
ipotesi di applicazione allo studio della densità e dei tessuti urbani

7. Classificazione dei fenomeni di dispersione urbana (elaborati)

Alma Mater Studiorum - Università di Bologna | Campus di Cesena | Scuola di Ingegneria e Architettura | Corso di laurea specialistica in Architettura

Tesi in TECNICA URBANISTICA | Relatore: Prof. Arch. Valentina Orioli | Correlatori: Arch. Elena Candigliota, Dott. Francesco Immordino | Laureando: Matteo Corvi

Sessione III | Anno accademico 2013-2014