

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

DICAM - Topografia

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA

in

Telerilevamento e GIS M

**"Analisi di dati satellitari Sentinel ottici e radar
per lo studio della copertura del suolo"**

CANDIDATO

Francesco Tadei

RELATORE:

Chiar.mo Prof.
Gabriele Bitelli

CORRELATORI

Dott.Ing. Francesca Franci
Dott.Ing. Emanuele Mandanici

Anno Accademico 2015/2016

Sessione III

A chi crede che la Scienza,
se applicata,
salverà l'Umanità.

PAROLE CHIAVE:

- ✦🌀 *Telerilevamento satellitare*
- ✦🌀 *ESA*
- ✦🌀 *Copernicus*
- ✦🌀 *Sentinel*
- ✦🌀 *Radar (SAR)*
- ✦🌀 *Land cover/ land use*
- ✦🌀 *Classificazione*
- ✦🌀 *Valle del Metauro e valle del Foglia*
- ✦🌀 *Corine Land Cover*

INDICE

Introduzione

Capitolo 1 – European Space Agency – Programma Copernicus

- 1.1 ESA, Generalità
- 1.2 Programma Copernicus
- 1.3 Missione Sentinel
 - 1.3.1 Sentinel-1
 - 1.3.2 Sentinel-2
 - 1.3.3 Sentinel-3
 - 1.3.4 Sentinel-4/Sentinel-5
 - 1.3.5 Sentinel-5P
 - 1.3.6 Sentinel-6
- 1.4 Contributi di altre missioni
- 1.5 Segmento di terra

Capitolo 2 – Le mappe di *land use/cover*

- 2.1 Introduzione
- 2.2 Classificazione delle immagini satellitari
 - 2.2.1 Classificazione *pixel based*
 - 2.2.2 Classificazione *object based*
 - 2.2.3 Valutazione dell'accuratezza
- 2.3 *Corine Land Cover*
- 2.4 *Global Land Cover*
- 2.5 Dato Radar nella classificazione: alcuni casi di studio

Capitolo 3 – Caso di studio: valle del Metauro e valle del Foglia

- 3.1 Area di studio
- 3.2 Materiale selezionato
- 3.3 Software per l'elaborazione delle immagini
 - 3.3.1 ESA-SNAP
 - 3.3.2 ENVI

3.4 Pre-elaborazione delle immagini

3.4.1 Radar, Sentinel-1

3.4.2 Ottico, Sentinel-2

3.5 Classificazione

3.5.1 Isodata

3.5.2 Maximum Likelihood

3.5.3 Validazione

3.5.4 Considerazioni

3.6 Confronto con *Corine Land Cover*

3.7 Considerazioni

3.8 Approccio object-oriented

Capitolo 4 - Conclusioni

Bibliografia

INTRODUZIONE

L'imponente sviluppo scientifico e tecnico avvenuto nell'ultimo secolo ha fatto sì che venissero sviluppate delle tecnologie che fino a pochi decenni fa erano inimmaginabili.

Certamente la ricerca spaziale rappresenta una delle più importanti avanguardie della tecnica e dell'Ingegneria e più in generale della Scienza.

In suddetto contesto si collocano le tecnologie e la Scienza del Telerilevamento satellitare o *Remote Sensing*.

Con il termine telerilevamento si indica "una scienza che permette di ottenere informazioni qualitative e quantitative da un oggetto, un'area o un fenomeno tramite l'analisi di dati acquisiti da un dispositivo a distanza che non è in contatto con l'oggetto, l'area o il fenomeno investigato" (Papale e Barbati, 2005).

Il telerilevamento satellitare permette così l'acquisizione di dati, sottoforma di immagini, su vaste aree di superficie terrestre in tempi relativamente brevi.

Con il tempo le tecniche di acquisizione dei dati e le tecnologie costruttive dei sensori sono state perfezionate ed ora è possibile accedere a dati con diverse risoluzioni geometriche, spettrali, temporali e radiometriche.

Ad oggi sono disponibili immagini satellitari multispettrali con risoluzione geometrica dell'ordine del decimetro.

Tutte queste peculiarità del telerilevamento lo rendono un valido supporto sia per attività scientifiche sia commerciali od amministrative.

A livello scientifico le tecniche di *Remote Sensing* si applicano a numerosi campi tra cui la geologia, la climatologia, la meteorologia, l'oceanografia e l'idrologia.

Il dato satellitare risulta molto utile per la cartografia di aree remote o paesi in via di sviluppo; in queste zone le tecniche tradizionali con misurazioni sul campo o rilievi fotogrammetrici sono di difficile applicazione.

Dal punto di vista commerciale la possibilità di accedere a dati su vastissime aree può essere importante per applicazioni in campo agro-forestale e per la pesca, oltre che per le attività di ricerca delle materie prime.

Le immagini telerilevate forniscono un importante strumento di pianificazione e monitoraggio nell'ambito dell'amministrazione del territorio. Sono presenti in letteratura numerosi studi a riguardo, sia sull'ambiente urbano che naturale.

Una delle più interessanti applicazioni del telerilevamento satellitare è quella relativa al *risk management* e la gestione dei disastri naturali; in questo filone si inseriscono diversi progetti e organizzazioni come ITHACA (*Information for Humanitarian Assistance, Cooperation and Action*) oppure GDACS (*Global Disaster Alert and Coordination System*), organizzazioni rivolte al miglioramento dei sistemi di allerta (*Early Warning*), valutazione dei danni nelle prime fasi delle emergenze (*Early Impact*), di condivisione di informazioni georeferenziate e coordinamento nelle prime fasi delle emergenze.

L'Agenzia Spaziale Europea ha lanciato il programma *Copernicus*, il quale tramite dati satellitari fornisce una serie di prodotti e servizi a supporto di studi scientifici e gestione delle emergenze.

All'interno di tale programma si trovano progetti come EMS (*Emergency Management Service*) che è costituito da tre moduli: *mapping*, EFAS (*European Flood Awareness System*) e EFFIS (*European Forest Fire Information System*).

Un altro programma europeo è G-MOSAIC (GMES services for Management of Operations, Situation Awareness and Intelligence for regional Crises) che produce informazioni di supporto con attenzione particolare alle crisi esterne all'UE.

Accanto a questi progetti sono inoltre presenti numerose realtà di *crowdmapping* a cui è possibile partecipare *on-line*.

Recentemente l'Agenzia Spaziale Europea (ESA) ha dato inizio alla missione Sentinel, all'interno del programma *Copernicus*, con il lancio di una nuova serie di satelliti per l'osservazione terrestre. Alcuni di questi sono già operativi e sono disponibili, *open source*, immagini radar e multispettrali.

Questa tesi si propone di sperimentare l'utilizzo integrato di immagini Sentinel multispettrali e radar per la generazione di mappe di copertura del suolo delle valli del Metauro e del Foglia in provincia di Pesaro-Urbino.

Nel primo capitolo viene presentata ESA (*European Space Agency*) cercando di evidenziarne la vocazione scientifica e comunitaria; si descriverà poi il programma *Copernicus* e i suoi scopi per concludere con la presentazione della missione Sentinel.

Il secondo capitolo racchiude il concetto di mappa di *land use/land cover* contiene l'inquadramento teorico delle tematiche trattate in questa tesi. Si esporranno i principi della classificazione delle immagini satellitari, le mappe di copertura del suolo reperibili *open source* e alcuni esempi di letteratura riguardanti l'utilizzo di immagini multi-

sensore per lo studio del territorio.

La parte sperimentale di questa tesi è descritta nel terzo capitolo. Dopo l'inquadramento geografico del territorio analizzato, vengono presentati i dati utilizzati, i software e le procedure per giungere al prodotto finale: una mappa tematica dell'area di studio.

Infine ci sarà un confronto con le mappe tematiche già disponibili per la stessa zona e alcune considerazioni sul prodotto generato dalla sperimentazione.

Il quarto capitolo contiene le conclusioni del lavoro, dove si valuterà l'esperienza svolta e i possibili sviluppi futuri.

Capitolo 1. European Space Agency – Programma Copernicus

1.1 ESA, Generalità

ESA è l'acronimo di *European Space Agency* che si autodefinisce “la porta d'accesso allo spazio per l'Europa” (www.esa.int).

Vede gli albori nel 1960 con la conferenza europea preparatoria per la ricerca spaziale (COPERS, *European Preparatory Commission for Space Research*), dalla quale nel 1962 nasce ELDO (*European Launcher Development Organization*) allo scopo di creare un vettore di lancio indipendente dalle due potenze spaziali dell'epoca.

La prima sede di ricerca viene posta in Italia, a Frascati, tale sede nel 1966 verrà denominata ESRIN (*European Space Research INstitute*) come la conosciamo oggi.

Il 30 maggio 1975 Belgio, Danimarca, Francia, Repubblica Federale di Germania, Italia, Olanda, Spagna, Svezia, Svizzera e Regno Unito firmarono la convenzione di fondazione di ESA (*Convention of establishment of European Space Agency*).

Attualmente ESA è una organizzazione internazionale composta da 22 stati membri e si occupa di coordinare le risorse finanziarie ed intellettuali dei paesi membri al fine di produrre programmi e attività che rispecchino e uniscano gli intenti di ogni paese europeo in campo spaziale. La missione di ESA è quella di dare forma allo sviluppo delle capacità spaziali europee e assicurarsi che gli investimenti sullo spazio continuino a creare benefici per i cittadini europei e del mondo.



European Space Agency

Figura 1.1 Logo di ESA

Gli stati membri sono Austria, Belgio, Repubblica Ceca, Danimarca, Estonia, Finlandia, Francia, Germania, Grecia, Ungheria, Irlanda, Italia, Lussemburgo, Olanda, Norvegia, Polonia, Portogallo, Romania, Spagna, Svezia, Svizzera e Regno Unito. Il Canada, inoltre, prende parte ad alcuni progetti grazie ad un accordo di cooperazione.

Anche altri paesi europei hanno accordi di cooperazione con ESA, come Bulgaria, Cipro, Lituania e Malta, mentre altri, come Lettonia, Slovenia e Slovacchia partecipano al *Plan for European Cooperating States (PECS)*.



Figura 1.2 Stati membri (www.esa.int)

Complessivamente il budget dell'agenzia, nel 2016, si attesta su €5250 milioni di euro, la maggior parte dei quali (circa 1600 milioni di euro) sono destinati all'osservazione terrestre.

Per rendere queste cifre comprensibili si può dire che ciascun paese investe nei programmi spaziali comunitari un ammontare pari “a un biglietto del cinema” per ciascun abitante, cifra che negli USA è quadruplicata.

Le sedi di ESA sono diverse e dislocate tra i vari paesi europei:

- Quartier Generale ESA: si trova a Parigi, in questo luogo vengono stabilite le politiche e i programmi da attuare.
- EAC, *European Astronauts Center*, Colonia, Germania, è la base di addestramento degli astronauti europei.
- ESAC, *European Space Astronomy Center*, Madrid, Spagna, ospita il centro per le operazioni scientifiche per le missioni astronomiche e planetarie. Fornisce servizi per ricerche astronomiche in tutto il mondo.
- ESOC *European Space Operations Center*, Darmstadt, Germania, ospita il sistema di controllo e monitoraggio dei veicoli spaziali.
- ESRIN, il centro per l'osservazione terrestre, Frascati, Roma, coordina oltre 20 stazioni in Europa per l'osservazione della Terra, mantiene il più grande archivio europeo di dati ambientali.
- ESTEC, *European Space Research and Technology Center*, Noordwijk, Olanda, è lo stabilimento più grande, responsabile della preparazione tecnica dei progetti

spaziali e fornisce supporto ai satelliti, all' esplorazione spaziale e alle attività di volo.

- ECSAT, *European Center for Space Applications and Telecommunications*, Harwell, Regno Unito, supporta attività legate alle telecomunicazioni.
- ESA *Redu Center*, Belgio, è responsabile di controllo e test dei satelliti, facendo parte della rete di stazioni di terra dell'ESA, inoltre ospita “the Space Weather Data Center”.
- Base di lancio, Guyana Francese.

Inoltre ESA collabora con USA e Russia in alcune missioni (come la stazione spaziale internazionale) e ha numerose stazioni di tracciamento in varie parti del mondo.

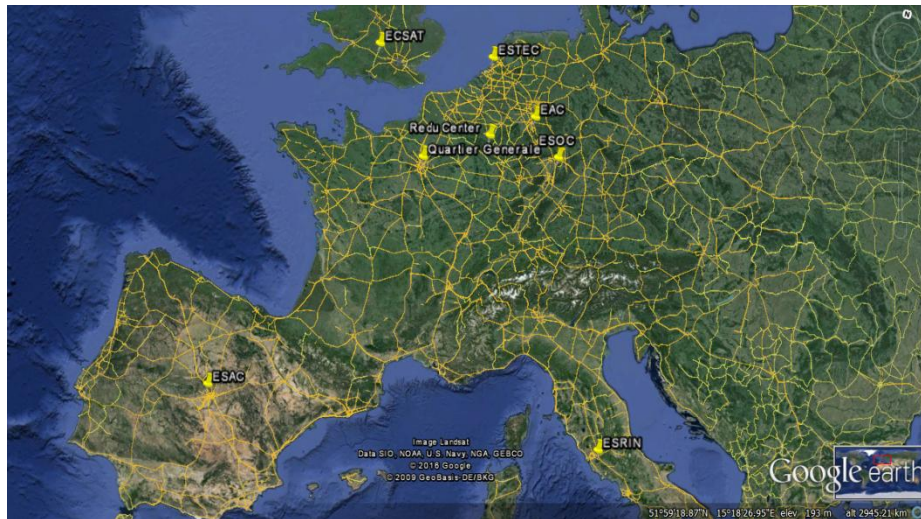


Figura 1.3 Sedi ESA in Europa (earth.google.com)

In queste sedi lavorano 2200 tra ingegneri, scienziati, informatici altro personale tecnico e amministrativo proveniente da ciascun stato membro.

I Programmi sviluppati da ESA sono rivolti allo studio della terra, del sistema solare, dell'universo e allo sviluppo di sistemi e servizi satellitari. Di seguito sono riportati alcuni progetti attivi e futuri di ESA:

- Artemis, il più avanzato satellite di telecomunicazioni europeo.
- Huygens, sonda atterrata su Titano durante la famosa missione Cassini, in collaborazione con la NASA.
- Hubble, telescopio spaziale in collaborazione con NASA.
- ISS, Stazione Spaziale Internazionale, collaborazione con USA, Russia, Canada e Giappone.
- Envisat, il più grande e complesso satellite ambientale.

- Rosetta, celeberrima sonda inviata sulla cometa 67/P e il cui lander è atterrato nel 2014. Missione conclusa.
- Sentinel, progetto rivolto allo studio e all'osservazione della Terra mediante 6 serie di satelliti.
- Galileo, sistema di posizionamento satellitare.
- PROBA, progetto innovativo e rivolto all'invio in orbita di mini satelliti.

Oltre a queste missioni si aggiungono altre missioni per l'esplorazione e lo studio del sistema solare e numerosi osservatori orbitanti, ognuno dei quali analizza una porzione dello spettro elettromagnetico per lo studio dello spazio profondo (figura 1.4).

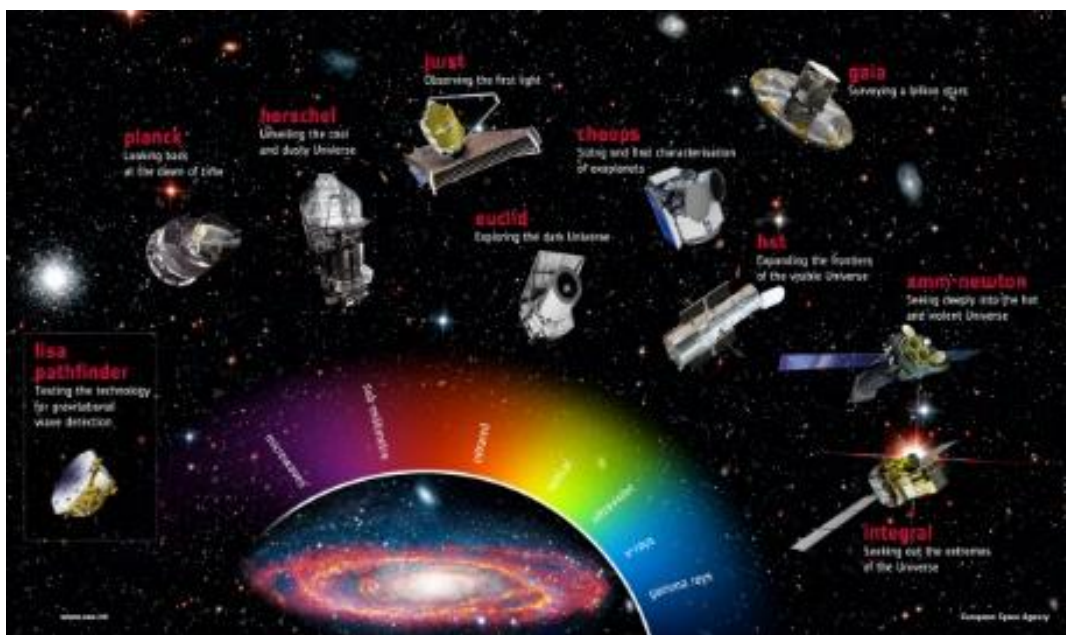


Figura 1.4 Osservatori spaziali (www.esa.int)

Oltre a questi programmi, particolare attenzione va rivolta al programma *Copernicus*, pensato per lo studio e l'osservazione della Terra, all'interno del quale si inserisce la missione Sentinel.

La restante parte del capitolo 1 sarà dedicata ai suddetti programmi, in quanto i dati acquisiti dai satelliti Sentinel sono stati utilizzati in questa tesi per una sperimentazione riguardo la possibilità del loro utilizzo in un'ottica di generazione di mappe di *land use/land cover* con risoluzioni migliori rispetto *Corine Land Cover* e *Global Land Cover*.

1.2 Programma Copernicus

Copernicus è attualmente il più ambizioso programma di osservazione terrestre al mondo ed è costituito da differenti sistemi (satelliti, stazioni terrestri, sensori aerei e marini) che acquisiscono dati sulla Terra, come riportato sul sito internet di ESA (http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview3).

Sul medesimo sito web si riporta che *Copernicus* è un programma che darà forma al futuro del nostro pianeta per il beneficio di tutti, ESA mette a disposizione la sua esperienza trentennale in programmi spaziali per contribuire al programma.

Questo programma fornisce informazioni accurate, tempestive e facilmente accessibili per migliorare la gestione ambientale, comprendere e mitigare gli effetti dei cambiamenti climatici ed assicurare la sicurezza civile.

Il programma è coordinato e gestito dalla Commissione Europea, mentre lo sviluppo delle infrastrutture avviene sotto il controllo di ESA per quanto riguarda le componenti spaziali.

Le aree tematiche in cui si inseriscono i servizi legati al programma *Copernicus* sono sei:

- territorio,
- mare,
- atmosfera,
- cambiamento climatico,
- gestione emergenze,
- sicurezza.

Questi servizi sono a supporto di una infinità di applicazioni che includono la protezione ambientale, la gestione delle aree urbane, la pianificazione territoriale, l'agricoltura, la gestione delle foreste, la pesca, i trasporti, lo sviluppo sostenibile, la protezione civile e il turismo.

La varietà di applicazioni fa sì che i maggiori utilizzatori dei servizi *Copernicus* siano le pubbliche autorità, specialmente per la definizione di politiche ambientali e la gestione delle emergenze.

In questa tesi l'utilizzo dei dati Sentinel è rivolto allo studio del territorio, per cui particolare attenzione va concessa al tema dei servizi terrestri, i quali sono a loro volta suddivisi in quattro aree (<http://land.copernicus.eu/>):

- Globali, questi servizi forniscono una serie di prodotti per lo studio della superficie terrestre a livello globale (con risoluzioni spaziali medie e basse), i prodotti sono usati per il monitoraggio della vegetazione, il ciclo dell'acqua e altre applicazioni.
- Pan-Europei, servizi rivolti allo studio della copertura e dell'uso del suolo europeo e del loro cambiamento negli anni (corpi idrici, suolo nudo, foreste, aree impermeabilizzate...).
- Locali, servizi relativi a specifiche aree nelle quali vengono riscontrate peculiarità (coste, grandi città, reti idriche).
- In-sito, tutti i servizi hanno bisogno di dati presi nelle zone di studio per supportare i prodotti satellitari.

Un importante prodotto Pan-Europeo è *CORINE Land Cover (CLC)*, che consiste in uno studio delle coperture del suolo (*land cover*) nel territorio europeo.

I prodotti pan-europei sono coordinati dalla *European Environment Agency (EEA)*.

Per le specifiche esigenze del programma è stato sviluppato il progetto Sentinel, che prevede il lancio in orbita di 12 satelliti che formeranno la componente spaziale del programma *Copernicus*.

Il prossimo paragrafo sarà interamente dedicato alla descrizione del progetto Sentinel e dei satelliti, con particolare attenzione ai satelliti Sentinel 1 e Sentinel 2, le cui immagini saranno utilizzate e analizzate in questa tesi.

1.3 Missione Sentinel

Il programma *Copernicus* per i suoi scopi, si è sempre servito dei dati provenienti da diverse missioni spaziali, come le già citate *Landsat* o *Rapid Eye* per il monitoraggio del territorio, ma dal 3 aprile 2014 (lancio del satellite Sentinel-1A) è partita una nuova serie di missioni con la quale si intende lanciare in orbita 6 serie da 2 satelliti: le missioni Sentinel.

La finalità primaria dei satelliti Sentinel è quella di supportare le necessità operative del *Global Monitoring for Environmental Security (GMES) programme* (Malenowsky et al., 2012).

I satelliti delle missioni Sentinel rappresentano la componente spaziale del programma *Copernicus* e costituiscono anche il contributo europeo al sistema dei sistemi globali di osservazione terrestre (*Global Earth Observation System of Systems GEOSS*). A completare la componente spaziale ci sono i satelliti di altre missioni già operative e saranno analizzati nel paragrafo 1.4.

Sui satelliti Sentinel sono (e saranno) montate varie soluzioni tecnologiche, dai sensori radar ai multispettrali, per gli svariati campi di applicazione già visti per il programma *Copernicus*.

Le missioni Sentinel saranno sei:

- Sentinel-1, fornisce immagini radar, giorno e notte e con qualunque condizione meteorologica.
- Sentinel-2, produce immagini ottiche ad alta risoluzione.
- Sentinel-3, genererà prodotti ottici e radar altimetrici per lo studio dell'ambiente marino e dei ghiacci marini.
- Sentinel-4, fornirà dati per lo studio della composizione atmosferica.
- Sentinel-5, sarà del tutto simile alla Sentinel-4.
- Sentinel-5P, missione precorritrice della Sentinel-5 con la quale si intende ridurre il gap con lo strumento *Sciamanchy* di *Envisat*.
- Sentinel-6, porterà un altimetro radar per misurare la superficie marina, per studi di oceanografia e studi sul clima.

Di seguito in verranno analizzate le singole missioni più nel dettaglio.

1.3.1 Sentinel-1

La missione Sentinel-1 è costituita da una costellazione di due satelliti, equipaggiati con sola strumentazione radar, il satellite Sentinel-1A è stato lanciato il 3 aprile 2014, mentre l'1-B il 25 aprile 2016; entrambi sono arrivati in orbita grazie a un razzo Soyuz russo partito dal centro di lancio ESA nella Guyana Francese.

La missione è il risultato di una cooperazione tra diverse realtà: ESA, la Commissione Europea e un consorzio di oltre 60 aziende dirette da Thales Alenia Space e Airbus Defence and Space.

(http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Introducing_Sentinel-1).

Si riporta una tabella riassuntiva (tabella 1.1) di tutte le caratteristiche specifiche della strumentazione dei satelliti Sentinel-1, presa direttamente dal sito web della missione.

Caratteristica	Valore
Centro di frequenza	5.405 GHz (corrisponde a una lunghezza d'onda di ~5.5465763 cm)
Larghezza della banda	0-100 MHz (programmabile)
Polarizzazione	HH+HV, VV+VH, VV, HH
Range angolo di incidenza	20°- 46°
Direzione di vista	destra
Tipo di antenna	Slotted waveguide radiators
Dimensione antenna	12.3 m x 0.821 m
Massa antenna	880 kg (rappresenta il 40% della massa totale di lancio)
Larghezza di azimut del raggio	0.23°
Range di azimut del raggio	Da -0.9° a +0.9°
Larghezza del raggio in elevazione	3.43°
Range di elevazione del raggio	Da -13.0° a +12.3°

RF potenza di picco	- 4.368 kW, - 4.075 kW (IW, doppia polarizzazione)
Larghezza dell'impulso	5-100 μ s (programmabile)
Transmit duty cycle	Max 12%, SM 8.5%, IW 9%, EW 5%, WV 0.8%
Rumore al ricevitore	3 dB
Range massimo larghezza banda	100 MHz
PRF (Pulse Repetition Frequency)	1 000 - 3 000 Hz (programmabile)
Compressione dei dati	FDBAQ (Flexible Dynamic Block Adaptive Quantization)
ADC frequenza di campionamento	300 MHz (real sampling)
Quantizzazione	10 bit
Massa totale degli strumenti (inclusa l'antenna)	945 kg
Assetto della guida	Zero-Doppler steering and roll steering

Tabella 1.1 caratteristiche strumenti Sentinel-1

Applicazioni

Le applicazioni legate ai prodotti della prima serie di satelliti ESA ricoprono quasi tutti i campi applicativi generali proposti dal programma *Copernicus*, in particolare si estendono a:

- oceani e ghiacci, Sentinel-1 fornisce immagini radar per generare mappe temporali dei ghiacci marini per il passaggio di navi nelle acque artiche oltre a provvedere ad una campionatura continua dell'oceano al fine di ottenere informazioni su venti e onde. Ovviamente c'è anche un aspetto puramente ambientale, come il tracciamento delle perdite di carburanti o inquinanti in genere.
- Monitoraggio del territorio, il tempo di rivisitazione ridotto (3 giorni) permette una valutazione eccellente delle variazioni di copertura del terreno (*land cover*)

specialmente grazie all'integrazione di dati multispettrali acquisiti da Sentinel-2. Le informazioni relative alla copertura del suolo, con un intervallo temporale così ristretto, sono di notevole importanza per applicazioni agricole e per il monitoraggio di colture su larga scala e di foreste.

Inoltre l'interferometria radar permette applicazioni ambientali come lo studio della subsidenza o il monitoraggio di frane o vulcani con precisioni millimetriche.

- Emergenze, i prodotti Sentinel-1 sono particolarmente adatti per una risposta celere alle emergenze ambientali di qualsiasi natura, specialmente per eventi meteorologici estremi, data la capacità del sensore radar di "vedere" oltre le nubi.

Caratteristiche dei satelliti

Ogni satellite pesa 2300kg ed è stato progettato per una vita utile minima di sette anni in orbita.

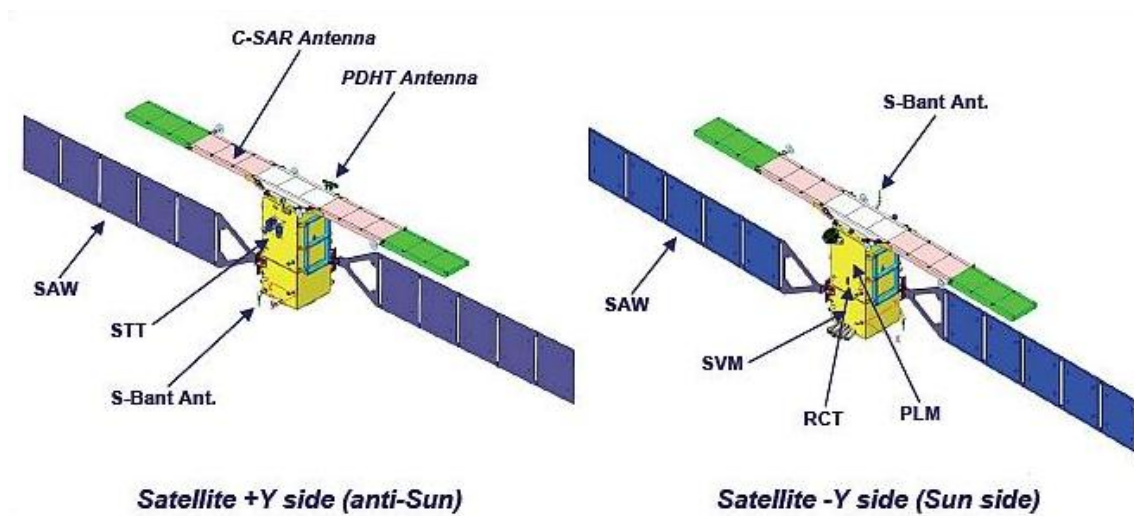


Figura 1.5 rappresentazione dei satelliti Sentinel-1

(<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/satellite-description>)

Il satellite è stabilizzato a tre assi, caratterizzato da sensori di campo magnetico.

Il sistema è equipaggiato con un set di pannelli solari (ali) in grado di fornire 5900W accumulabili in una batteria.

Il satellite nasce sulla base di PRIMA (Piattaforma Italiana Multi Applicativa) costruita sulle esperienze precedenti di RADARSAT e COSMO-SKYMED. La piattaforma

assicura una conoscenza accurata dell'assetto rispetto a ciascun asse ($<0,004^\circ$) e un sistema di calcolo in real-time dell'orbita con un sistema di propulsione apposito per il controllo della stessa.

Grazie a questi accorgimenti, l'orbita viene mantenuta con variazioni inferiori a $\pm 50\text{m}$ rispetto all'orbita prefissata, durante le normali operazioni.

Inoltre il satellite ha strumentazioni relative alla gestione dei dati, la propulsione, la potenza, il controllo delle temperature, la comunicazione coi centri di controllo e l'analisi e gestione di eventuali anomalie.

(<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/satellite-description>).

Orbita e copertura geografica

I due satelliti condividono la stessa orbita quasi-polare eliosincrona sfasati di 180° ; con entrambi i satelliti operanti un ciclo dura sei giorni (12 giorni per un solo satellite).

Ogni ciclo è composto da 175 orbite per ciascun satellite.

I satelliti orbitano a 693 km dalla terra, il posizionamento deve essere particolarmente preciso, soprattutto per le applicazioni interferometriche. Il controllo è definito tramite un "tubo orbitale" di 50m di raggio (si veda figura 1.6) che si estende attorno al tracciato nominale dell'orbita, il satellite è mantenuto all'interno di questo "tubo" tramite gli strumenti di controllo dell'orbita.

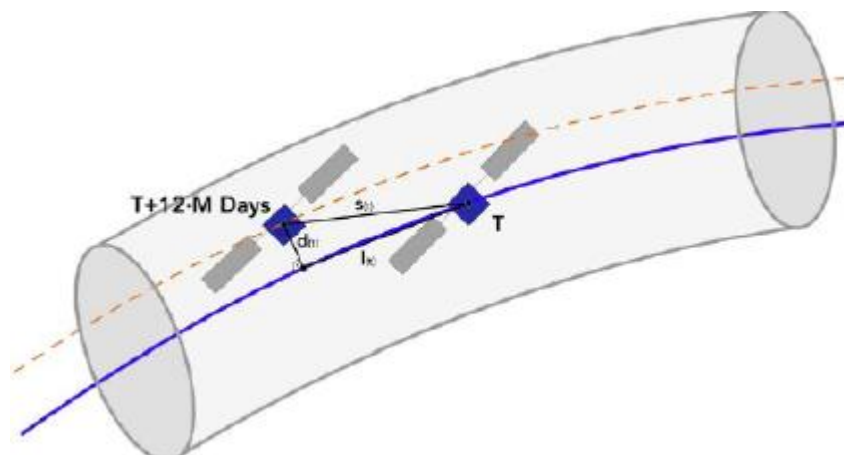


Figura 1.6 "Tubo" orbitale (<https://sentinel.esa.int>)

Un singolo satellite è potenzialmente in grado di mappare le terre emerse ogni 12 giorni (con modalità "*Interferometric wide swath*"), i due satelliti assieme lo fanno in 6 giorni, ma siccome la spaziatura tra le tracce dei satelliti a terra varia con la latitudine, il

tempo di rivisitazione e decisamente inferiore alle alte latitudini piuttosto che all'equatore.

Complessivamente con entrambi i satelliti in orbita, la frequenza con cui un satellite passa sul medesimo punto è di tre giorni all'equatore e meno di un giorno sul' Artico.

La figura sottostante mostra la variazione della frequenza di rivisitazione alle varie latitudini; in generale Europa, Canada e le maggiori rotte marittime sono rilevate in meno di tre giorni.

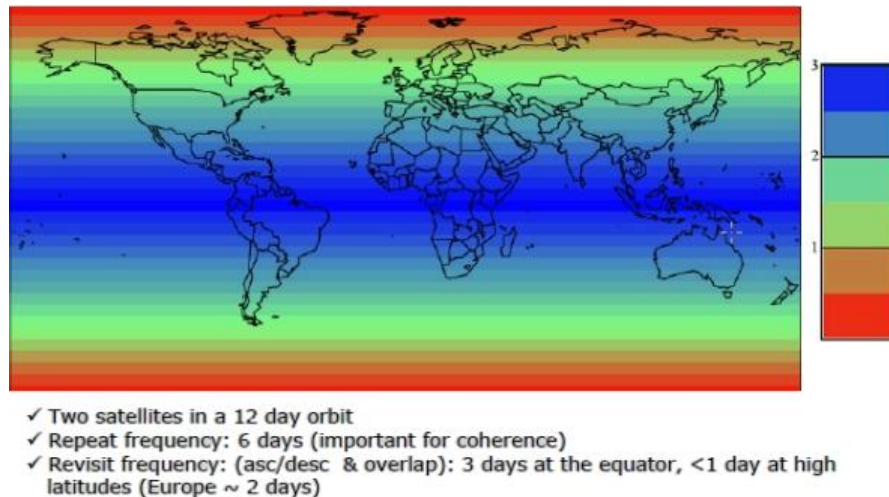


Figura 1.7 frequenza di rivisitazione Sentinel-1 (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>)

Strumenti

I satelliti Sentinel-1 sono equipaggiati con un radar ad apertura sintetica in banda C che supporta operazioni in doppia polarizzazione (HH+HV, VV+VH), ciò è possibile grazie ad un sistema di trasmissione (interscambiabile da H a V) e due sistemi di ricevitori paralleli per polarizzazioni H e V.

Le modalità di acquisizione sono quattro (figura 1.8), le cui caratteristiche principali sono riportate nella tabella sottostante (Tabella 1.2).

Le differenti modalità di acquisizione differiscono per angolo di incidenza del raggio al terreno, risoluzione spaziale, polarizzazione e *swath*, con questo ultimo termine si intende la larghezza della porzione di superficie terrestre acquisita dal sensore quando il satellite ruota attorno alla terra (traccia a terra dell'*array* del sensore).

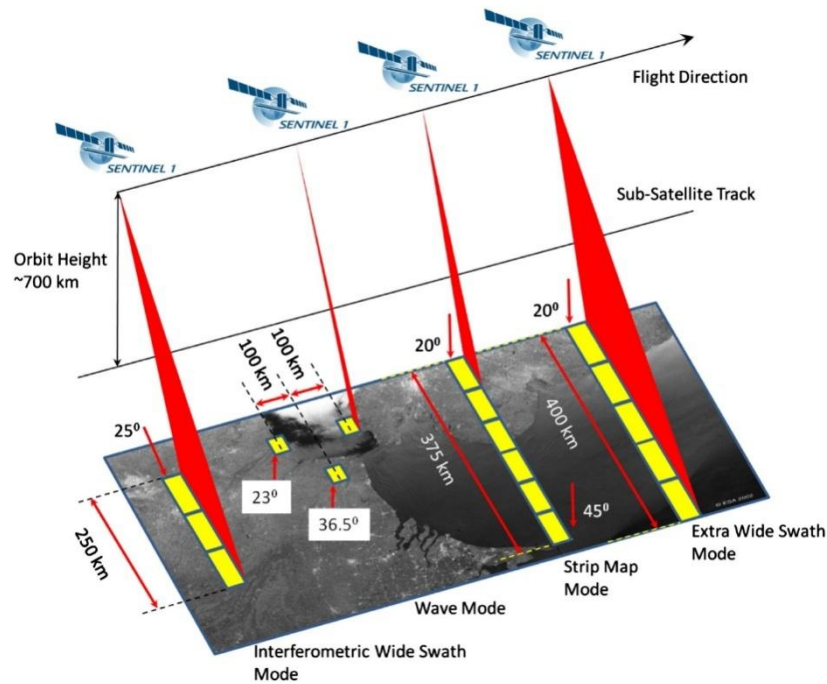


Figura 1.8 Modalità di acquisizione Sentinel-1 (<http://sentinel.esa.int>)

Modalità	Angolo incidenza	Risoluzione spaziale	Swath	Polarizzazione
Stripmode	20°-45°	5x5 m	80 km	HH+HV, VH+VV, HH, VV
Interferometric Wide swath	29°-46°	5x20 m	250 km	HH+HV, VH+VV, HH, VV
Extra Wide swath	19°-47°	20x40 m	400 km	HH+HV, VH+VV, HH, VV
Wave	22°-35° 35°-38°	5x5 m	20x20 km	HH, VV

Tabella 1.2 Modalità di acquisizione

Le modalità di acquisizione principali sono la *Interferometric Wide swath* (IW) e la *Wave mode* (WV), la prima è la modalità di default per l'acquisizione su terra e soddisfa quasi tutte le necessità di servizio, la seconda invece viene utilizzata in mare aperto.

La modalità IW consiste in una acquisizione di dati con uno *swath* di 250 km suddivisi in tre *sotto-swath*, producendo così un'immagine per ciascun sotto-swath e una per ogni canale di polarizzazione, per un totale di tre immagini in polarizzazione singola o sei in polarizzazione doppia.

La risoluzione spaziale è 5x20m.

Le immagini possono poi essere unificate con una operazione di *merging* in una unica che ricopre una vasta area, per garantire questa possibilità ogni *sub-swath* ha una minima area di sovrapposizione (~2km).

La modalità WV, invece, fornisce una serie di immagini (a singola polarizzazione VV o HH) ad angoli di incidenza alternati e ad una distanza di 100km, come meglio spiegato in figura 1.9.

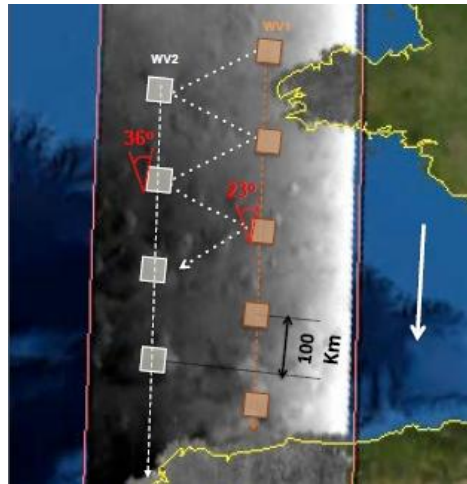


Figura 1.9 Modalità di acquisizione Wave (<http://sentinel.esa.int>)

Ciascuna immagine copre 20x20km di superficie terrestre con una risoluzione di 5x5 m. Esistono altre due modalità di acquisizione come riportato in tabella 1.1, la modalità *Stripmode* (SM) ed *Extra Wide Swath* (EW) che sono di supporto alle normali operazioni, la prima genera una serie di sei immagini con risoluzione di 5x5m e uno swath di 80 km, la seconda lavora in maniera simile alla IW mode utilizzando 5 *sub-swath* ottenendo una risoluzione spaziale di 20x40m.

Dati

Non appena i dati giungono a terra inizia la fase di *processing*, grazie ad un network di centri di processamento e archivio i quali lavorano sistematicamente sui dati e provvedono ad un successivo invio online a tutti gli utenti.

Ogni modalità di acquisizione dati può generare prodotti a diversi livelli:

- Livello 0, sono i *raw data*, non compressi e non calibrati, i dati di base da cui tutti gli altri prodotti provengono, in IW mode sono circa 1GB.

- Livello 1 *Single Look Complex*, sono dati calibrati e geo-referenziati usando dati di orbita e assetto provenienti dal satellite, sono dati da 8GB (IW mode polarizzazione doppia, o 4GB se in polarizzazione singola).
- Livello 1 *Ground Range Detected*, dati calibrati, georeferenziati e proiettati al suolo usando un modello di ellissoide. Sono disponibili a più livelli di risoluzione.
- Livello 2, sono prodotti di interesse geofisico ottenuti da dati SAR e vengono utilizzati per applicazioni in ambito oceanico, legate a vento, onde e correnti.

1.3.2 Sentinel-2

La missione Sentinel-2 consiste in due piattaforme multispettrali, la prima Sentinel-2A è stata lanciata in orbita il 23 giugno 2015, mentre il secondo lancio è previsto per la seconda metà del 2016.

La missione Sentinel-2 fornisce immagini multi-spettrali (13 bande) ad alta e media risoluzione spaziale a seconda della specifica banda.

Applicazioni

I satelliti Sentinel-2 si pongono in continuità, come tipo di immagine, con i satelliti SPOT e LANDSAT, fornendo al programma *Copernicus* dati necessari ad una vasta gamma di applicazioni, anche in combinazione con i dati radar provenienti dalla missione Sentinel-1, come:

- cambiamento climatico, le immagini provenienti dai satelliti Sentinel-2 possono essere di grande supporto (visto il tempo di rivisitazione ridotto di massimo 5 giorni) per il monitoraggio della deforestazione o della desertificazione.
- Monitoraggio del territorio, ha i medesimi campi applicativi della missione Sentinel-1 e insieme ad essa può fornire dati per la stesura di mappe di copertura e uso del suolo.
- Gestione delle emergenze, dato il breve tempo di rivisitazione i dati Sentinel-2 si prestano molto bene a questo tipo di applicazioni anche nel caso di emergenze umanitarie.

- Sicurezza, i prodotti Sentinel-2 possono essere utilizzati come supporto per il monitoraggio dei confini, delle rotte marine commerciali e migratorie, al fine di aumentare la sicurezza interna dell'Unione Europea.

Caratteristiche dei satelliti

I satelliti pesano circa 1200 kg e sono progettati per una vita utile di circa 7 anni, anche se le batterie e i propellenti sono stati caricati per 12 anni di operazioni, incluse le manovre orbitali di fine vita dello strumento.



Figura 1.10 Rappresentazione satellite Sentinel-2(<https://sentinel.esa.int>)

Sono adatti ad un lancio con piccoli vettori quali VEGA e ROCKOT.

I sensori MSI (*Multispectral INSTRUMENT*) montati sulla piattaforma lavorano passivamente, i raggi di luce incidenti vengono divisi e filtrati su piani focali separati, uno per le bande del visibile (VIS), uno per la banda dell'infrarosso vicino (*Near-Infrared* NIR) e uno per l'infrarosso "a onde corte" (*Short Wave Infrared* SWIR).

Un apposito meccanismo, una sorta di otturatore, evita che i sensori vengano colpiti dai raggi provenienti direttamente dal sole, lo stesso meccanismo funziona anche da strumento di calibrazione raccogliendo i raggi del sole dopo la riflessione tramite un diffusore.

Orbita e copertura geografica

I due satelliti operano sulla medesima orbita inclinata di $98,62^\circ$ (rispetto all'equatore), eliosincrona, ad una elevazione media di 786 km, sfasati di 180° .

La scelta dell'orbita eliosincrona è stata fatta perché così si minimizza l'impatto delle ombreggiature sul terreno.

L'orbita è mantenuta stabile da un sistema di propulsione dedicato e tramite le misurazioni di un ricevitore GNSS a doppia frequenza.

Sono progettati affinché la frequenza di rivisitazione sia di 5 giorni all'equatore (2-3 giorni alle latitudini medie) nelle stesse condizioni di presa, questo valore diminuisce se ci riferiamo a diverse condizioni di presa, per via della sovrapposizione laterale delle acquisizioni.

I Sentinel-2 acquisiscono sistematicamente dati su terra emersa e aree costiere in una banda che va da 56° latitudine Sud (Isla Hornos, Capo Horn, Sud America) a 84° latitudine Nord (sopra la Groenlandia), includendo anche:

- isole più grandi di 100 km²;
- isole dell'Unione Europea;
- isole con linea di costa di almeno 20 km;
- mar Mediterraneo;
- corpi idrici interni (fiumi, laghi, acquitrini...);
- tutti i mari chiusi.

La seguente figura 1.11 mostra le zone in cui i satelliti raccolgono dati.

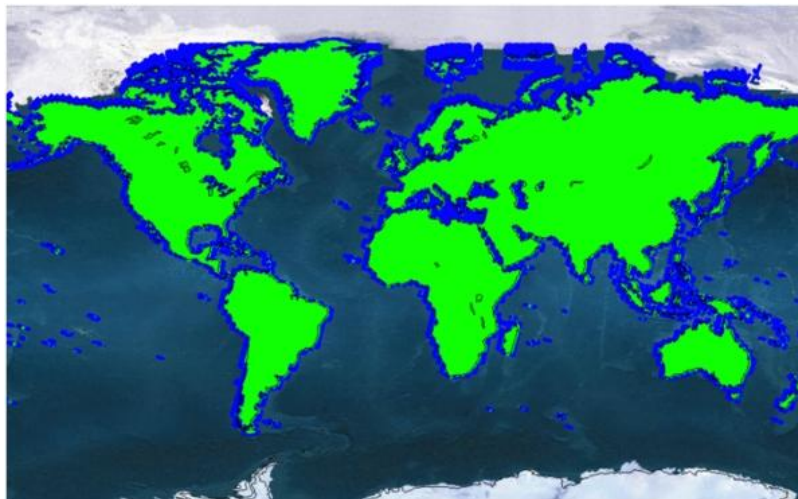


Figura 1.11 Aree coperte da Sentinel-2(<https://sentinel.esa.int>)

Oltre alle normali zone di acquisizione, ad intervalli regolari, vengono eseguite acquisizioni su specifiche zone, come Dome-C in Antartide, al fine della calibrazione degli strumenti.

Strumenti

I satelliti Sentinel-2 sono equipaggiati un sensore multispettrale, MSI, strumento push-broom che acquisisce righe di dati perpendicolarmente allo *swath* e sfrutta il movimento in avanti del satellite per acquisire nuove stringhe di dati.

Come già detto, la radiazione incidente viene deviata tramite un sistema “beam-splitter” su vari piani focali a seconda dei filtri applicati.

Lo *swath* è di 290km.

Per poterlo garantire, sia i sensori VNIR che SWIR sono composti da 12 detector posti su due file orizzontali, come si vede in figura 1.12

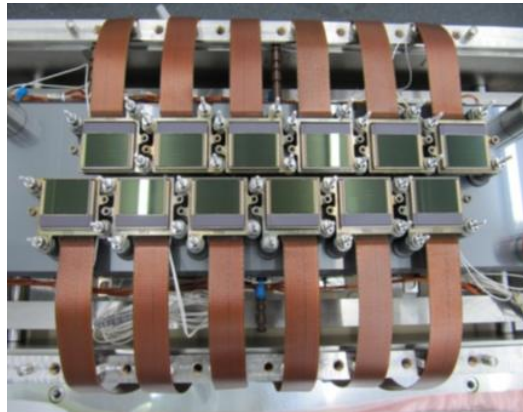


Figura 1.12 piano focale bande VNIR(<https://sentinel.esa.int>)

I sensori Sentinel-2 sono in grado di ricevere informazioni su 13 bande spettrali a diverse risoluzioni spaziali, come riportato nella seguente tabella 1.3

Numero banda	Lunghezza d'onda centrale [nm]	Larghezza della banda [nm]	Risoluzione spaziale [m]	
1	443	20	60	VIS
2	490	65	10	
3	560	35	10	
4	665	30	10	
5	705	15	20	NIR
6	740	15	20	
7	783	20	20	
8	842	115	10	
8a	865	20	20	

9	945	20	60	SWIR
10	1380	30	60	
11	1610	90	20	
12	2190	180	20	

Tabella 1.3 Bande spettrali Sentinel-2

In generale le bande dei Sentinel-2 sono più strette dei suoi predecessori come il LANDSAT, questo serve a limitare l'influenza atmosferica sulla ricezione delle onde luminose. La banda 8a nell'infrarosso vicino è appositamente progettata con una larghezza "ristretta" per evitare contaminazioni dovute al vapore acqueo presente in atmosfera; nonostante ciò è in grado di descrivere il *plateau* della curva spettrale della vegetazione nell'infrarosso ed è sensibile agli ossidi di ferro nel terreno.

La banda 1, nel campo del blu, è necessaria per la correzione precisa delle deformazioni indotte dall'aerosol atmosferico.

La risoluzione radiometrica del MSI è di 12 bit con la capacità di acquisire immagini in un range di valori di intensità luminosa che va da 0 a 4095.

Dati

I dati Sentinel-2 sono disponibili in vari livelli di processamento come riportato di seguito:

Name	High-level Description	Production & Distribution	Data Volume
Level-1B *	Top-of-atmosphere radiances in sensor geometry	Systematic generation and on-line distribution	27 MB (each 25x23km ²)
Level-1C	Top-of-atmosphere reflectances in cartographic geometry	Systematic generation and on-line distribution	500 MB (each 100x100km ²)
Level-2A	Bottom-of-atmosphere reflectances in cartographic geometry (prototype product)	Generation on user side (using Sentinel-2 Toolbox)	600 MB (each 100x100km ²)

Figura 1.13 Dati Sentinel-2(<https://sentinel.esa.int>)

I dati sono forniti in un formato apposito (SENTINEL-SAFE) che include oltre all'immagine JPEG, indicatori di qualità, dati ausiliari e metadati.

Al livello 2A si trovano prodotti ortorettificati con informazioni sulla riflettanza *Bottom-Of-Atmosphere* (BOT) e una classificazione di base (incluse le classi di nubi). Questo genere di prodotti sono generati dagli utenti dei prodotti 1C. Ai livelli 1C e 2A si trovano “granuli” (chiamati anche *tiles*) di 100 kmq

Al livello 1B si trovano invece immagini che coprono aree di circa 25 kmq, questo è il livello minimo di dati fornito e contiene informazioni di tutte le bande spettrali.

1.3.3 Sentinel-3

Il sistema Sentinel-3 sarà costituito da due satelliti, per ora soltanto il satellite 3A è in orbita, ed è stato lanciato il 16 febbraio 2016, il secondo satellite sarà mandato in orbita nel 2017.

L'obiettivo principale è quello di mappare la superficie oceanica, compiere misure di temperatura di terra e mare e fornire informazioni di colore sulla superficie sia terrestre che marina.

Applicazioni

I prodotti delle piattaforme Sentinel-3 avranno applicazione perlopiù di carattere ambientale, per le previsioni meteorologiche e per lo studio delle dinamiche globali oceaniche e atmosferiche.

Inoltre le misure di temperatura e di colore degli oceani saranno di supporto per lo studio della biologia marina e per il monitoraggio della qualità dell'acqua e dei ghiacci oceanici.

Caratteristiche dei satelliti

I satelliti sono progettati per una vita utile di 7 anni, anche se contengono abbastanza propellente per poter operare fino a 12 anni ed hanno un peso di 1250 kg.

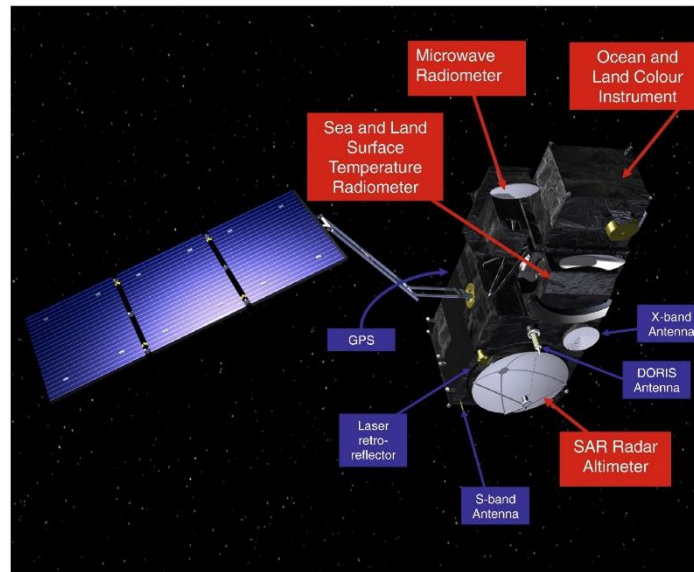


Figura 1.14 satellite Sentinel 3(<https://sentinel.esa.int>).

Come si vede dalla figura 1.16 i satelliti sono dotati di una grande varietà di strumenti che permettono tutte le misure richieste dalla missione.

Orbita e copertura geografica

I due satelliti viaggeranno (sfasati di 180°) sulla medesima orbita eliosincrona, quasi-polare con inclinazione di $98,65^\circ$ ed un'altitudine di 814,5 km. Il ciclo orbitale dura 27 giorni (385 orbite per ciclo).

Il tempo di rivisitazione è minore di 2 giorni per lo strumento OLCI (*Ocean and Land Colour Instrument*) e minore di un giorno per lo strumento SLSTR (*Sea and Land Surface Temperature Radiometer*) all'equatore.

Ogni strumento acquisisce dati in maniera differente:

- OLCI, la presa è determinata in base a specifiche condizioni di illuminazione solare;
- MWR (*MicroWave Radiometer*) e SRAL (*SAR Radar Altimeter*) acquisiscono lungo tutta l'orbita.

Strumenti

I satelliti Sentinel-3 sono equipaggiati con numerosi strumenti:

- OLCI, in grado di misurare la riflettanza tramite un sensore a 21 bande spettrali;

- SLSTR, utilizzato per rilevare le temperature di terra e mare;
- SRAL, strumento radar a doppia frequenza per applicazioni interferometriche;
- MWR, utilizzato in accoppiata con lo strumento SRAL per lo studio altimetrico;
- Sistema per la determinazione dell'orbita precisa che include un ricevitore GNSS, un'antenna DORIS e un retro-riflettore per applicazioni di posizionamento orbitale laser da terra.

OLCI è un sensore di tipo push-broom multispettrale a 21 bande composto da 5 camere rivolte in direzione non nadirale, con angolo di inclinazione (tilt) verso ovest (backward view). La risoluzione spaziale è di 300 m e lo *swath* è 1270 km

Numero banda	Lunghezza d'onda centrale [nm]	Grandezza della banda [nm]	Funzione	
Oa1	400	15	Correzione aerosol	VIS
Oa2	412,5	10	Torbidità	
Oa3	442,5	10	Clorofilla	
Oa4	490	10	Clorofilla, pigmenti	
Oa5	510	10	Clorofilla, torbidità	
Oa6	560	10	Minimo di clorofilla	
Oa7	620	10	Sedimenti	
Oa8	665	10	Clorofilla	
Oa9	673,75	7,5	Fluorescenza	
Oa10	681,25	1,7	Picco fluorescenza clorofilla	
Oa11	708,75	10	Transizione "red-edge"	
Oa12	753,75	7,5	Assorbimento O2	
Oa13	761,25	2,5	Assorbimento O2/aerosol cor.	
Oa14	764,375	3,75	Corr. atmosferiche	
Oa15	767,5	2,5	nuvole	
Oa16	778,75	15	Corr. Atm./ Corr. aerosol	
Oa17	865	20	Corr. Atm e aerosol/ co-registrazione pixel	
Oa18	885	10	Assorbimento del vapore	
Oa19	900	10	Assorbimento del vapore	

Oa20	940	20	Assorbimento del vapore	
Oa21	1020	40	Corr. Atmosferica/ Correzione aerosol	

Tabella 1.4 Bande spettrali OLCI

Lo strumento SLSTR è uno scanner conico con scansione “*along track*”, lo *swath* al nadir è di 1420 km e 750km “*backward*”.

Le bande del visibile e dell’infrarosso vicino (bande S1-S6) hanno una risoluzione spaziale di 500m, mentre le bande che operano nell’infrarosso termico (TIR), canali S7-S9 e canali F1-F2, hanno risoluzione di 1km.

Numero banda	Lunghezza d’onda centrale [µm]	Grandezza della banda [nm]	Funzione	
S1	0,555	0,02	Nuvole, vegetazione	V
S2	0,659	0,02	NDVI, aerosol	
S3	0,865	0,02	NDVI, co-registrazione	NIR
S4	1,375	0,015	Cirri	SWIR
S5	1,610	0,06	Ghiaccio e neve	
S6	2,250	0,05	Vegetazione, nuvole	
S7	3,74	0,38	SST(Sea Surface Temperature), LST(LandST),fuoco	TIR
S8	10,85	0,9	SST,LST, fuoco	
S9	12	1	SST,LST	
F1	3,74	0,38	Fuochi attivi	
F2	10,85	0,9		

Tabella 1.5 Bande strumento SLSTR

L’altimetro radar fornisce una copertura altimetrica SAR del 100% della superficie terrestre, e può compiere misure sia “*along track*”, sia con una modalità ad anello (supportata da un modello digitale del terreno della zona osservata) in modo da migliorare la presa di zone particolarmente impervie o di zone di transizione mare/terra o mare/ghiaccio.

1.3.4 Sentinel-4/Sentinel-5

Le missioni Sentinel-4 e 5 sono state studiate appositamente per fini ambientali di monitoraggio della qualità dell'aria e della composizione dell'atmosfera con un'alta risoluzione spaziale e temporale.

Queste due missioni non prevedono il lancio di satelliti, ma la strumentazione di Sentinel-4 sarà ospitata a bordo della terza generazione di satelliti Meteosat, mentre lo spettrometro di Sentinel-5 sarà sulla seconda generazione di MetOp.

Applicazioni

Gli utilizzi principali legati alle missioni Sentinel 4 e 5 riguarderanno il monitoraggio della concentrazione dei gas atmosferici e dell'aerosol, a supporto dei servizi operativi che si occupano di qualità dell'aria o di monitoraggio della stessa.

Provvederanno anche a fornire indicazioni sullo strato di ozono, sulla misura della radiazione solare e un monitoraggio del clima.

Strumenti

La missione Sentinel-4 prevede uno spettrometro ad alta risoluzione in grado di rilevare tre bande spettrali, ultravioletto (UV 305-400 nm), visibile (400-500 nm) e NIR(750-775 nm), con risoluzione spaziale di 8 km.

La strumentazione di Sentinel-5 sarà un sistema a sette bande spettrali, due nell'ultravioletto, una nel visibile, due nel NIR e due in campo SWIR, la risoluzione spaziale sarà di 8x8 km eccetto per la prima banda dell'ultravioletto (sotto i 300 nm) che avrà risoluzione spaziale di 50x50 km.

1.3.5 Sentinel-5P

La missione Sentinel-5Precursor si pone esattamente in linea con le missioni 4 e 5, ed ha i medesimi obiettivi, però prevede il lancio di un satellite apposito da parte di ESA a

fine 2016, con l'obiettivo di ridurre il gap di disponibilità di dati atmosferici tra le missioni SCIAMANCHY/Envisat e le future Sentinel-4 e 5.

Le applicazioni sono le medesime descritte nel precedente paragrafo per Sentinel-4 e 5.

Caratteristiche del satellite

Il satellite è adatto al lancio su piccoli vettori come VEGA o ROCKOT e consiste in un supporto esagonale che contiene tutti gli strumenti.

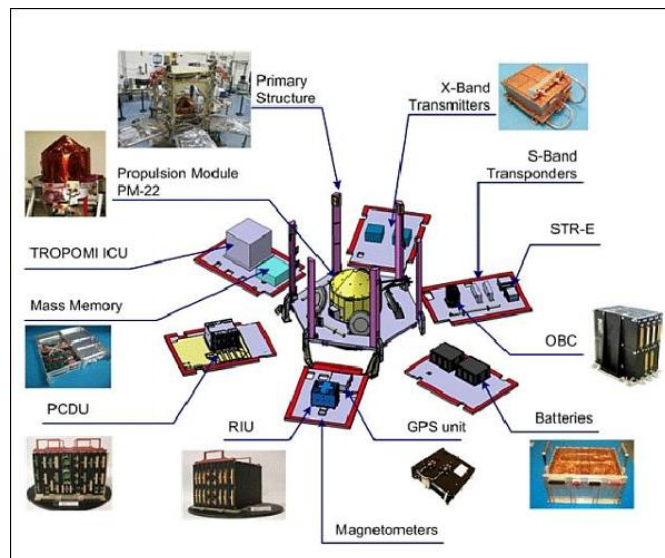


Figura 1.15 Piattaforma Sentinel-5P (<https://sentinel.esa.int>)

Il satellite è progettato per una vita utile complessiva di 7 anni e avrà un peso di 980 kg.

Orbita e copertura geografica

L'orbita prevista è quasi-polare eliosincrona, ad un'altitudine di 835 m e una durata del ciclo orbitale di 16 giorni.

Grazie al suo *swath* molto ampio (2600km) lo strumento fornirà una giornaliera copertura della superficie terrestre per le latitudini maggiori di 7° e minori di -7°, mentre per la fascia compresa tra quei due valori di latitudine la copertura sarà del 95%.

Strumenti

Lo strumento principale portato in orbita dal satellite si chiamerà TROPOMI, un sensore *push broom* a visione nadirale.

Sarà composto da quattro spettrometri, ognuno dei quali sensibile a due bande spettrali, per un totale di otto bande: 2 in UV, 2 V, 2 NIR, 2 SWIR.

Avrà una risoluzione spaziale di 7 km in acquisizione “*along track*”, in modalità “*across track*” la risoluzione spaziale varia tra le bande, come riportato nella seguente tabella 1.6.

Numero banda	Range di lunghezza d'onda [nm]	Risoluzione spaziale [km]		
		centro	bordo	
1	270-300	28	68	UV
2	300-320	7	17	
3	320-405	7	17	V
4	405-495	7	17	
5	675-725	7	17	NIR
6	725-775	3,5	8,5	
7	2305-2345	7	34	SWIR
8	2345-2385	7	34	

Tabella 1.6 Bande spettrali e risoluzioni spaziali TROPOMI

Dati

I prodotti TROPOMI sono distribuiti a due livelli:

- livello-1b, contengono radianza e irradianza per ogni pixel a ciascuna lunghezza d'onda.
- Livello 2, forniscono direttamente parametri atmosferici geofisici.

1.3.6 Sentinel-6

La missione Sentinel-6 è stata pensata per fornire informazioni dettagliate sulla superficie oceanica, essenziali per il monitoraggio continuo del livello del mare, indicatore fondamentale dei cambiamenti climatici e per gli studi oceanografici.

Si trova in continuità con la precedente missione ESA CryoSat e completa le informazioni sull'oceano prodotte dalla missione Sentinel-3.

La mappatura del 95% degli oceani non ghiacciati avviene in 10 giorni, offrendo informazioni sulle correnti oceaniche, sulla velocità del vento e sull'altezza delle onde, importante per la sicurezza della navigazione.

Il satellite avrà una massa complessiva di 1440 kg e una vita utile prevista di 5,5 anni con propellenti per ulteriori 2 anni di missione.

Sul satellite verrà montato Poseidon-4, un altimetro SAR, insieme a un radiometro a microonde (AMR-C), un ricevitore GNSS-POD per la stima precisa dell'orbita, un'antenna DORIS per il tracciamento preciso dell'orbita e un retro-riflettore laser per il puntamento da terra.

1.4 Contributi di altre missioni

Il programma *Copernicus* comprende, oltre alla serie di satelliti Sentinel appositamente pensati e dedicati al programma, una lunga serie di altre missioni anche di altre agenzie spaziali chiamate “*Contributing missions*” (missioni contribuenti), che integrano la componente spaziale del programma.

Ci sono circa trenta missioni di contributo, alcune sono di ESA, altre degli stati membri e altre ancora di enti terzi europei o internazionali che condividono alcuni dati con *Copernicus*.

Le categorie di missioni che contribuiscono al programma sono:

- SAR;
- sensori ottici;
- sistemi di altimetria;
- atmosferiche.

SAR

Le missioni SAR, che integrano i dati provenienti dalla missione Sentinel-1, sono:

- Envisat, missione ESA del 2002, ha un sensore radar a banda C ed opera in quattro modalità differenti: *image*, *wave*, *wide-swath* e *global monitoring*, nelle prime due modalità la risoluzione è di circa 30 m, in *wide-swath* è di 150 m e in *global monitoring* è di 1000 m.

- Cosmo-SkyMed, missione italiana costituita da quattro satelliti e lanciata nel 2010, opera con un sensore radar in banda X ed opera in tre modalità: *Stripmap* con uno *swath* di 3040 km e una risoluzione spaziale di 3-15 m, *ScanSar* con uno *swath* di 100x100 km e risoluzione di 30x30 m, *Spotlight-2* con uno *swath* di 10x10 km e risoluzione di 1m.
- Radarsat-2, missione Canadese del 2007, con radar a banda C, opera in diversi modi con un *range* di risoluzioni che va da 3 a 100 m e *swath* che variano da 20 a 500 km.
- TerraSAR-X, missione tedesca del 2007 equipaggiata con sensore a banda X che opera in tre diverse modalità con risoluzioni spaziali di 1 m (area di 5x10 km), 3 m (30x50 km) e 16 m (100x150 km).

Campo ottico

Le missioni che prevedono sensori che lavorano in campo ottico integrano i dati provenienti dalla missioni Sentinel-2 e 3 e sono:

- Envisat, è equipaggiata anche con sensori ottici, in totale conta 15 bande spettrali con una risoluzione spaziale di 300m, ricopre l'intera superficie terrestre in tre giorni.
- DMC (Disaster Monitoring Constellation), lanciato tra il 2002 e il 2005, ha una risoluzione di 32 m (22 m dal 2009) e uno *swath* di 600 km, inoltre DCM-3 ha una banda pancromatica con risoluzione spaziale di 1 m.
- HiROS, offrirà immagini con risoluzione submetrica (0,5 m) nel pancromatico e 2 m nel multispettrale con *swath* di 12 km.
- Pleiades, missione italo-francesce, progettata per sostituire la missione francese SPOT e per completare le informazioni fornite da Cosmo-SkyMed con una risoluzione spaziale di 0,5 m.
- RapidEye, missione tedesca del 2008, offre immagini in cinque bande spettrali con risoluzione spaziale di 6,5 m.
- SPOT, missione francese iniziata nel 1986 con l'ultima serie lanciata nel 2005 (SPOT-5), in pancromatico le risoluzioni sono di 2,5 m e 10 in multispettrale con una copertura al suolo di 60x60 km.

Altimetria

Le missioni che sono equipaggiate con un sensore radar altimetrico, integrano i dati della missione Sentinel-3 e sono:

- Envisat,
- Cryosat, missione ESA del 2010, questa missione ha un sensore mai usato prima ed è capace di misurare lo spessore del ghiaccio e monitorare gli spostamenti delle masse di ghiaccio galleggiante.
- Jason-2 (OSTM)/Jason-3, è un satellite internazionale nato dalla cooperazione di NASA e un altro ente, misura la superficie del mare con accuratezza centimetrica.
- Saral/Altika, missione nata dalla collaborazione tra Francia e India.

Atmosferiche

Queste missioni si uniranno alle Sentinel 4 e 5 e contribuiranno allo studio dell'atmosfera e della meteorologia:

- Calipso, missione di collaborazione tra NASA e Francia, è stato lanciato nel 2006, ha un sensore per lo studio dell'aerosol e un radiometro a infrarossi.
- Envisat, tra tutti gli strumenti che ospita ha anche il già citato Sciamanchy, che insieme agli strumenti GOMOS e MIPAS, è dedicato allo studio delle concentrazioni dei gas atmosferici.
- Meteosat (seconda generazione), progetto di ESA e Eumetsat, forniscono dati per le previsioni meteorologiche.
- MetOp, missione ESA e Eumetsat composta da due satelliti lanciati nel 2006 e 2012.

1.5 Segmento di terra

A completare la componente spaziale del programma *Copernicus*, c'è il segmento di terra, che contribuisce alla riuscita delle missioni spaziali operando sui satelliti e rendendo disponibili i dati per gli utenti.

Per rispondere a queste necessità ci sono un centro di controllo del volo equipaggiato con apposite antenne in grado di comunicare coi satelliti per inviare comandi e correzioni, e una stazione in grado di ricevere i dati dai satelliti.

In aggiunta a queste due strutture primarie ci sono infrastrutture di processamento e raccolta dei dati.

Il segmento di terra garantisce le *performances* qualitative della missione e deve operare un monitoraggio della qualità dei dati ricevuti ed effettuare eventuali correzioni dove necessario.

Ciascuna missione afferente al programma *Copernicus*, compresa Sentinel, ha il suo specifico segmento di terra che opera indipendentemente ma sempre in coordinazione con il segmento di terra di *Copernicus*.

Il segmento dedicato a Sentinel si chiama *Sentinel Core Ground Segment* ed è formato da:

- Segmento di volo, si occupa di tutto ciò che riguarda il volo dei satelliti.
- *Core Ground Stations*, sono le stazioni dove i dati di Sentinel vengono scaricati e vengono generati i prodotti.
- Centri di processamento e archivio, qui tutti i dati “non critici”, che non devono essere processati urgentemente, vengono elaborati e resi pubblici online.
- Centro di *performance*, in questa sede avvengono tutte le operazioni di calibrazione, validazione e controllo qualità.
- Strutture per la determinazione dell'orbita precisa, sono una serie di piattaforme GNSS che forniscono dati per la stima dell'orbita.
- *Wide Area Network*, permette che tutti i prodotti e i dati ausiliari possano essere trasmessi tra i vari centri operazionali di terra.

La seguente figura 1.16 è riassuntiva delle varie parti che compongono il segmento di terra del programma *Copernicus*.

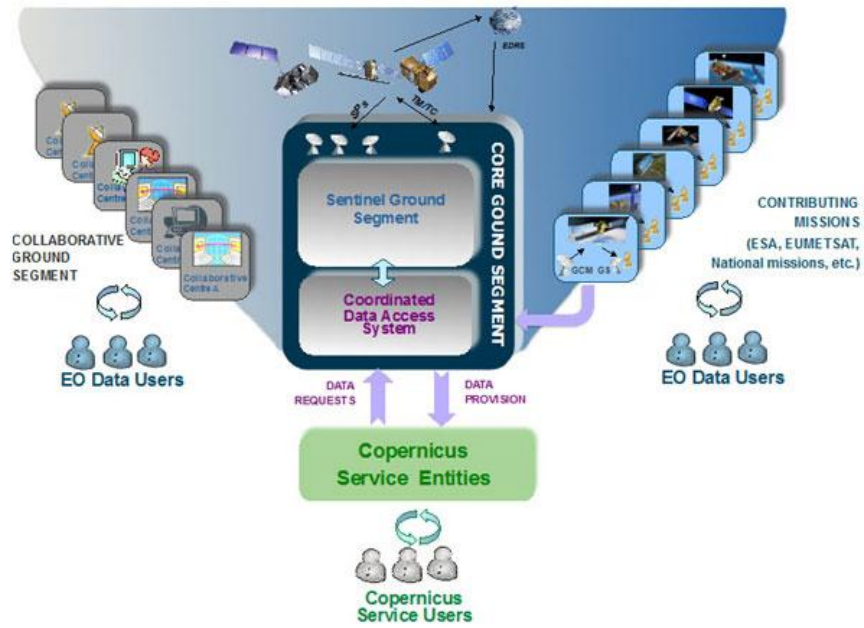


Figura 1.16 Segmento di terra programma Copernicus (<https://sentinel.esa.int>)

Capitolo 2. Le mappe di Land use/cover

2.1 Introduzione

Una delle funzioni più importanti dei dati telerilevati è la produzione di mappe tematiche di uso del suolo (*land use*) e di copertura del suolo (*land cover*) che si possono ottenere mediante un processo chiamato classificazione delle immagini (Aldoski et al, 2013).



Figura 2.1 Processo di generazione di mappe tematiche (Bitelli, 2015)

Land use è il termine utilizzato per descrivere l'utilizzo umano del suolo. Include gli insediamenti, aree protette e agricole. Oltre queste categorie generiche ne esistono di più precise, come insediamenti urbani e rurali, parchi nazionali e foreste protette, infrastrutture di trasporto e altre.

Con il termine *land cover* ci si riferisce alla naturale copertura che caratterizza una certa area: potrebbe essere per esempio foresta, tundra, deserto, savana, steppa o altro (De Sherbinin 2002).

La copertura del suolo è un elemento fondamentale per gli studi che interessano la superficie terrestre, come studi climatici, idrologici, sull'erosione del suolo, l'atmosfera, la conservazione degli habitat, la vegetazione, la sicurezza del cibo.

Essa può variare nel tempo non solo per interventi antropici ma anche per fenomeni naturali; si tratta dunque di un dato di natura dinamica (Ban et al, 2015).

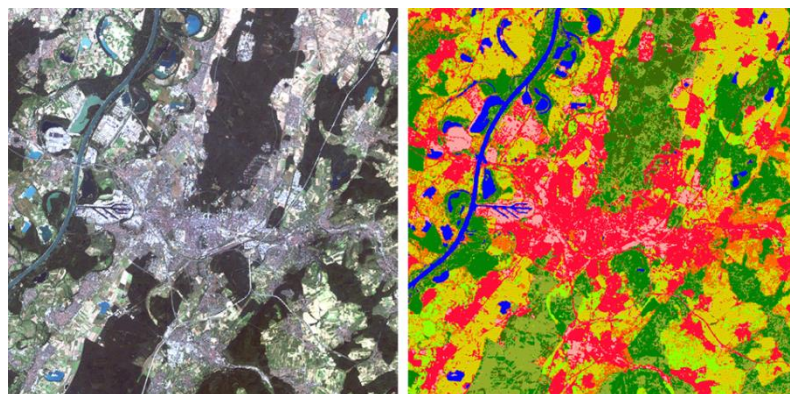


Figura 2.2 Esempio di mappa di land cover (Naumann, 2008)

Affinché possano essere valutati i cambiamenti nel tempo sono necessarie mappe di copertura del suolo della stessa zona generate in anni differenti (o in diversi momenti dell'anno); con queste informazioni posso essere valutate le decisioni passate prese sul territorio e si possono stimare gli effetti dei presenti provvedimenti nel futuro prima che questi vengano attuati. (oceanservice.noaa.gov)

Tale tipo di analisi prende il nome di *change detection analysis*.

“Per *change detection* si intende il processo di identificazione dei cambiamenti in un oggetto o in un fenomeno che avvengono in un particolare intervallo temporale. Presupposto fondamentale delle analisi di *change detection* effettuate con dati telerilevati è che un cambiamento di copertura del suolo o della superficie osservata da un sensore corrisponda a un cambiamento di risposta spettrale e che questo cambiamento spettrale sia sensibilmente più rilevante rispetto ai cambiamenti dovuti ad altri fattori, quali le condizioni atmosferiche al momento delle acquisizioni, o l'umidità dei suoli o ancora differenze nelle condizioni di acquisizione dei dati telerilevati.”(www.irea.cnr.it).

L'analisi di *change detection* può essere applicata a molti campi tra i quali lo studio della deforestazione, la sensibilità alla desertificazione, l'urbanizzazione, ecc... (De Sherbinin, 2002).

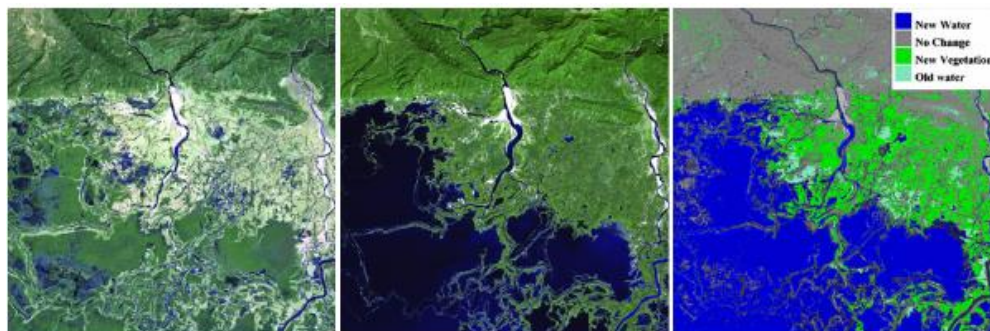


Figura 2.3 Esempio di *Change Detection analysis*: a sinistra, prima dell'alluvione; al centro: post alluvione. A destra la mappa dei cambiamenti. (www.irea.cnr.it)

L'utilizzo dei dati satellitari permette di studiare ampie aree geografiche; l'integrazione di dati ottici e alle micro-onde, insieme a raffinate metodologie di classificazione delle immagini, può consentire l'individuazione accurata delle classi di copertura del suolo a scala regionale o anche più ampia (Wang et al, 2012, Novelli et al, 2016).

2.2 Classificazione delle immagini satellitari

Il concetto di classificazione è basato sull'idea che gli elementi presenti sulla superficie terrestre abbiano una diversa riflettanza spettrale; grazie a questo è possibile, tramite apposite procedure, riconoscerli e classificarli (Al-doski et al, 2013).

La riflettanza spettrale è legata alla lunghezza d'onda incidente, come si può vedere nei seguenti diagrammi di riflettanza spettrale (figura 2.4).

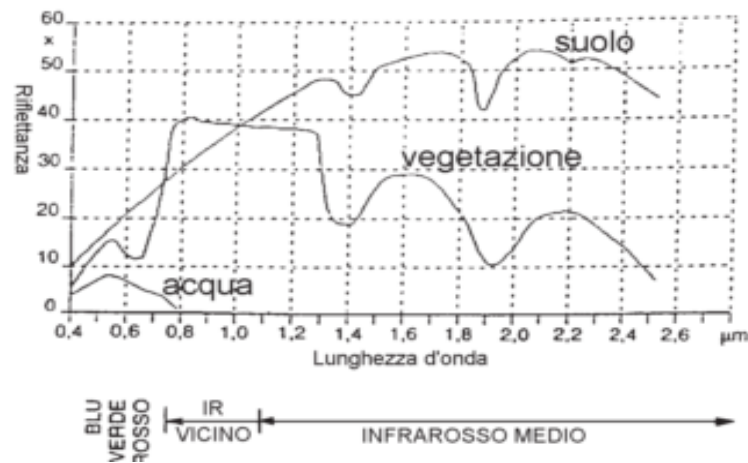


Figura 2.4 Diagrammi di riflettanza spettrale (Bitelli, 2015)

Il processo di classificazione associa ad ogni *pixel* (o gruppi di *pixel*) informazioni di tipo semantico riguardo la classe di appartenenza.

L'identificazione della classe di appartenenza dei *pixel* (o gruppi di *pixel*) può avvenire per foto-interpretazione, ossia tramite un operatore umano (esperto) che riconosce direttamente sull'immagine gli elementi che la compongono e li assegna alle rispettive categorie, oppure con metodologie automatiche.

La classificazione automatica utilizza particolari algoritmi di *image processing* che definiscono le caratteristiche matematiche di ciascuna classe di copertura dell'immagine e a queste assegna i *pixel* che hanno caratteristiche analoghe. In questo caso l'interazione con l'operatore umano è minima.

Di seguito verranno analizzati i principali processi di classificazione automatica e saranno presentati due progetti di realizzazione di mappe di *land cover*, uno europeo e uno globale.

2.2.1 Classificazione *pixel based*

Una immagine digitale è una matrice di elementi in cui a ciascun elemento è associato un valore di *digital number* (DN) che corrisponde all'energia riflessa (o emessa) dalla superficie che si sta osservando. I DN assumono valori diversi a seconda della risoluzione radiometrica del sensore; nel caso delle immagini Sentinel-2 essa è di 12 bits (Berger et al, 2012).

A seconda del sensore che si sta utilizzando i dati vengono immagazzinati in n matrici, una per ciascuna banda spettrale.

I valori assunti dai *pixel* nelle n bande possono essere considerati come le componenti di un vettore n-dimensionale detto vettore delle caratteristiche; tali componenti rappresentano le coordinate del *pixel* nello spazio delle caratteristiche.

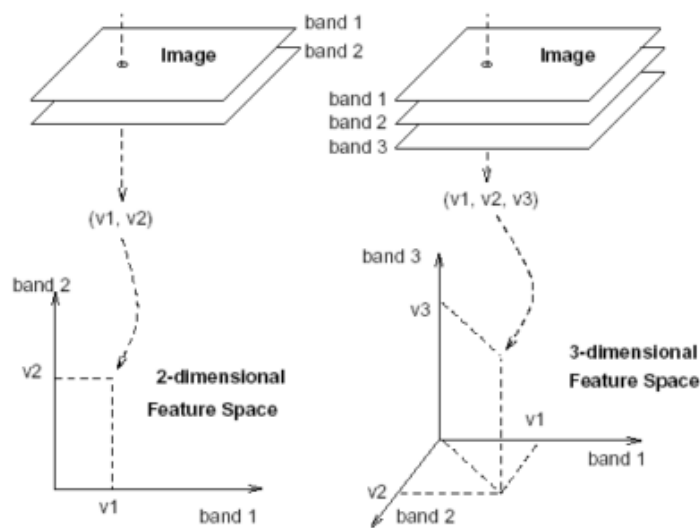


Figura 2.5 Esempio di rappresentazione di un *pixel* nello spazio delle caratteristiche (Trianni, 2006)

Lo spazio delle caratteristiche (o delle *features*) è uno spazio n-dimensionale dove sono contenute le informazioni spettrali (tramite i valori di DN) di ciascun *pixel* in ciascuna banda.

Nello spazio delle *features* i punti che rappresentano *pixel* che hanno caratteristiche simili si addensano nella medesima zona formando dei raggruppamenti detti *cluster*.

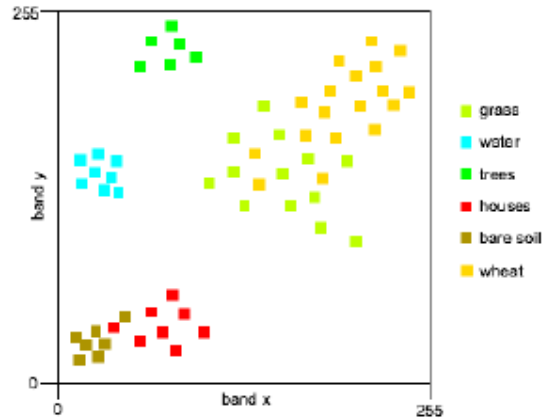


Figura 2.6 Esempio di spazio delle caratteristiche con rappresentati cluster di sei classi di copertura del suolo. (Trianni, 2006)

Si assume quindi che ciascun *cluster* rappresenti una classe di copertura/uso del suolo che si vuole identificare; a questo punto ogni *pixel* dell'immagine può essere analizzato e confrontato con le classi identificate e assegnato ad una di esse (Trianni, 2006).

Quindi in un processo di classificazione di tipo *pixel based* il software agisce confrontando e classificando ogni *pixel* dell'immagine individualmente in base alle sue caratteristiche spettrali nelle *n* bande che compongono l'immagine digitale.

Esistono due fondamentali tipologie di classificazione:

- Classificazione supervisionata (*supervised*).
- Classificazione non supervisionata (*unsupervised*).

La differenza risiede nell'operazione di ripartizione dello spazio delle caratteristiche. Nella classificazione non supervisionata gli algoritmi di *clustering* individuano autonomamente un certo numero di *cluster* all'interno dello spazio delle *features*.

L'algoritmo utilizzato in questa tesi per una prima analisi non supervisionata dell'immagine è il classificatore Isodata implementato nel software ENVI, questo classificatore raggruppa iterativamente i *pixel*, con tecniche a minima distanza, dopo aver calcolato le medie delle classi. Ad ogni iterazione vengono ricalcolate le medie e i *pixel* vengono ri-classificati in base alle nuove medie.

Le operazioni sulle classi vengono eseguite sulla base di parametri di input assegnati dall'operatore, in primo luogo il numero delle classi che si desidera estrarre. Si possono inserire soglie di deviazione standard o di distanza superate le quali i *pixel* rimangono non classificati; il processo continua fino a che il numero di *pixel* di ogni classe cambia, tra una iterazione e la successiva, di un valore piccolo (inserito dall'utente) oppure fino a quando non viene raggiunto il numero massimo di iterazioni previste.

Nella classificazione supervisionata, invece, un operatore individua nell'immagine delle aree di addestramento (*training sites*), ossia delle zone in cui riconosce gli elementi di una certa classe, in base a queste il software estrae le caratteristiche spettrali di ciascuna classe operando poi la partizione nello spazio delle caratteristiche.

La classificazione supervisionata richiede una conoscenza profonda dell'area di analisi o dei rilievi per poter identificare anche spazialmente i *training sites*.

Nelle analisi svolte in questa tesi è stata scelta la classificazione supervisionata che si basa sul criterio di assegnazione alla massima verosimiglianza (*Maximum likelihood*).

Questo algoritmo tiene conto della forma e della distribuzione dei *cluster* tramite il calcolo del valore medio dei *pixel* appartenenti ai *training sites* e della varianza e covarianza inter-classe. Alla base dell'algoritmo c'è l'ipotesi che la distribuzione di probabilità della nuvola di punti generata dai *training sites* sia di tipo gaussiano.

Per ciascuna classe si ricavano anche le funzioni di probabilità, ossia la variazione della probabilità di appartenenza alla classe al variare della distanza dal valore medio della classe. In pratica si generano delle curve concentriche di equi-probabilità che si allontanano dal punto medio della classe.

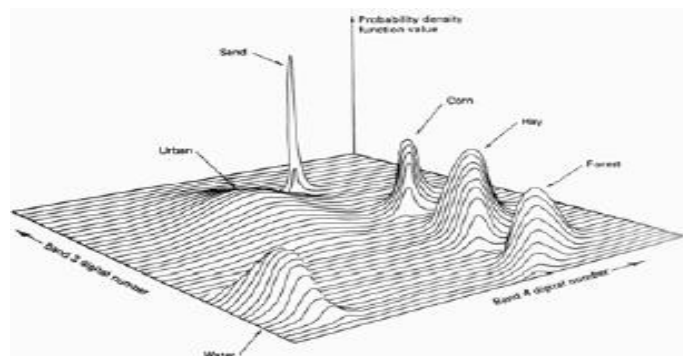


Figura 2.7 Curve densità di probabilità per una coppia di bande (Bitelli, 2015)

Di seguito in figura 2.8 si riporta un esempio bidimensionale del principio di funzionamento del classificatore *Maximum likelihood*.

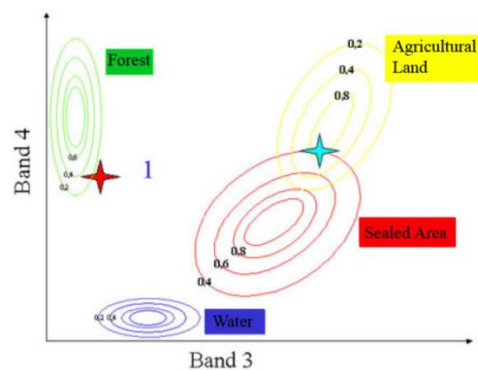


Figura 2.8 *Maximum Likelihood*, esempio bidimensionale (Naumann, 2008)

In definitiva il classificatore funziona calcolando la probabilità che un determinato *pixel* sia appartenente ad una certa classe e lo assegna alla classe con il più alto valore di probabilità. L'operatore può definire una soglia minima di probabilità affinché il *pixel* venga assegnato; se tale valore non è rispettato il *pixel* rimane non classificato.

2.2.2 Classificazione *object based*

L'approccio alla classificazione *object oriented* non è basato sulle caratteristiche spettrali dei singoli *pixel*, ma sfrutta il contenuto informativo di gruppi di *pixel* che formano, appunto, gli oggetti.



Figura 2.9 Esempio di oggetti individuati in una immagine digitale
(www.gisgeography.com)

Gli oggetti hanno caratteristiche radiometriche derivanti dalla media dei *pixel* che li compongono, ma contengono anche informazioni di tipo geometrico e dimensionale.

Il processo di classificazione *object oriented* consta di due fasi: segmentazione e classificazione.

La segmentazione è un processo di unione "dal basso" di diverse regioni dello spazio a partire da un singolo *pixel*; nei successivi *step* gli oggetti vengono uniti per formare oggetti più grandi (Heremans et al, 2003).

Per compiere questa operazione di fusione l'algoritmo utilizza un criterio di eterogeneità inteso come combinazione dei livelli di grigio nelle bande spettrali e proprietà geometriche. Se il fattore di eterogeneità è minore del fattore di scala gli oggetti vengono fusi, altrimenti restano separati (Picchio, 2010).

Inoltre è possibile realizzare una segmentazione multi-risoluzione agendo sul fattore di scala (più basso il fattore di scala, più piccoli gli oggetti); in questo modo si ottengono strutture gerarchiche su più livelli di segmentazione ad ognuno dei quali è associato un parametro di scala.

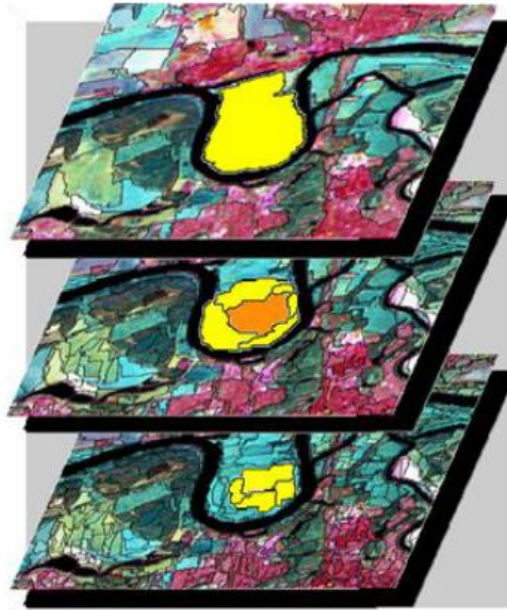


Figura 2.10 Esempio di segmentazione multirisoluzione
(<http://www.ricercasit.it/summerschoolfeltre>)

Una volta terminata la fase di segmentazione si procede alla classificazione che può avvenire utilizzando tutti gli algoritmi sviluppati per la classificazione *pixel based*; in questo caso è possibile però includere molte altre informazioni oltre alle caratteristiche spettrali fornite dall'immagine (Heremans et al, 2003).

Le informazioni disponibili sono:

- geometriche, informazioni sia derivanti dalle caratteristiche geometriche di ciascun poligono (area, forma, numero di lati, perimetro) sia dal confronto tra la posizione dei poligoni nello spazio.
- Tessiturali, ossia la variazione dei livelli di grigio tra oggetti adiacenti.
- Tematiche, cioè derivanti da livelli informativi aggiuntivi, come rilievi ausiliari o DSM.
- Gerarchiche, sono informazioni calcolate in base a dei poligoni omologhi su un diverso livello gerarchico di segmentazione.

2.2.3 Valutazione dell'accuratezza

La valutazione dell'accuratezza è l'ultimo processo che deve essere eseguito prima che una mappa tematica venga consegnata al committente.

L'accuratezza di una mappa tematica è la misura della coerenza tra la mappa tematica derivante da un processo di classificazione e un riferimento di "verità a terra" (*check sites*). Il procedimento per la selezione delle aree di verità avviene in maniera analoga alla scelta dei *training sites* per una classificazione supervisionata.

È fondamentale sottoporre le immagini classificate ad una valutazione per poter conoscere l'affidabilità del risultato del processo di classificazione.

Gli errori che possono essere riscontrati sono di due tipi:

- errore di commissione, se ad una classe vengono assegnati *pixel* che in realtà non le appartengono;
- errori di omissione, se alcuni *pixel* appartenenti ad una classe non vengono assegnati ad essa.

Per valutare gli errori è possibile utilizzare una matrice di confusione di dimensione $m \times m$ dove m è il numero di classi.

Nelle righe sono riportati i dati della classificazione, nelle colonne i dati derivanti dai *check sites*.

Di seguito si riporta un esempio di matrice di confusione (Figura 2.11) per una immagine con quattro classi di copertura del suolo.

		Dati di riferimento				Tot. Riga (p_{itot})
		Rocce	Latifoglie	Conifere	Pascoli	
Dati di classificazione	Rocce	91	5	13	4	113
	Latifoglie	11	65	12	14	102
	Conifere	7	0	110	15	132
	Pascoli	9	6	18	116	149
Tot. Colonna (p_{jtot})		118	76	153	149	496

Figura 2.11 Esempio di matrice di confusione

I numeri p_{kk} sulla diagonale evidenziati in verde sono i *pixel* classificati correttamente, i numeri p_{itot} sono i *pixel* complessivamente attribuiti a ciascuna classe, evidenziati in giallo, mentre i numeri p_{jtot} evidenziati in azzurro, rappresentano il numero totale di *pixel* in quella classe nei dati di riferimento. Il valore evidenziato in viola rappresenta il numero di *pixel* complessivamente presenti nella matrice (p_{TOT}).

Da questa matrice è possibile ricavare una serie di parametri di accuratezza della classificazione:

- accuratezza globale (*Overall accuracy*): è il rapporto tra i *pixel* correttamente classificati e il numero totale di *pixel* nella matrice, si esprime come segue:

$$OA = \frac{\sum_{k=1}^m p_{kk}}{p_{TOT}}$$

Questo rapporto esprime la probabilità che un *pixel* qualsiasi sia ben classificato.

- Accuratezza utente (*User accuracy*): rapporto tra il numero di *pixel* correttamente classificati per una certa classe e il numero totale dei *pixel* assegnati alla stessa classe:

$$UA = \frac{p_{kk}}{p_{itot}}$$

Esprime la probabilità che un *pixel* di una classe estratto a sorte sia correttamente classificato.

- Accuratezza produttore (*Producer accuracy*): rapporto tra la somma dei *pixel* correttamente classificati in una classe e il totale dei *pixel* per quella classe nell'immagine di riferimento:

$$PA = \frac{p_{kk}}{p_{jtot}}$$

Rappresenta la probabilità che un punto qualsiasi preso in una classe nell'immagine di riferimento sia correttamente classificato nella mappa tematica.

- Errore di commissione (*Commission error*): è la probabilità che un *pixel* estratto a sorte appartenente ad una classe nella mappa tematica non sia stato classificato correttamente:

$$CE = 1 - UA$$

- Errore di omissione (*Omission error*): è la probabilità che un *pixel* scelto casualmente da una classe dell'immagine di riferimento non sia stato correttamente classificato nella mappa tematica:

$$OE = 1 - PA$$

- Coefficiente kappa (*kappa-coefficient*): tiene conto della possibilità che tra la mappa tematica generata dall'algoritmo di classificazione e l'immagine di riferimento ci sia corrispondenza casuale. L'indice assume valori tra 0 e 1 dove un risultato di 0.7 o superiore indica una buona classificazione, ossia vuole dire che il processo di classificazione ha evitato il 70% degli errori che si sarebbero

potuti commettere con una classificazione puramente casuale. Il valore del coefficiente kappa assume valori simili alla OA, ma leggermente inferiori.

2.3 Corine Land Cover

Corine Land Cover (Coordination of Information on the Environment) è un programma varato dall'unione europea nel 1985 con l'obiettivo di fornire informazioni geografiche coerenti sulla copertura del suolo dei 12 paesi della comunità europea.

Appositamente per il progetto è stata realizzata una cartografia in scala 1:100000 per tutti i paesi membri.

Successivamente gli sviluppatori di CLC hanno posto come unità minima cartografabile 25 ettari, che a quella scala risulta essere un quadrato di 5x5 mm o un cerchio di raggio 2.8 mm.

La classificazione è stata realizzata in tre livelli gerarchici:

- Livello 1: si distinguono 5 classi fondamentali
- Livello 2: è un prodotto intermedio utilizzato per cartografie a scala da 1:500000 a 1:1000000, comprende 15 classi
- Livello 3: utilizzato sulle cartografie 1:100000 e comprende 44 classi.

L'ultimo aggiornamento del 2012 copre ben 39 paesi; è stato prodotto in due anni con immagini acquisite tra il 2011 e il 2012 e raggiunge un'accuratezza globale della classificazione pari al 85%.

Al fine di confrontare il prodotto del lavoro di classificazione svolto in questa tesi con immagini Sentinel-1 e Sentinel-2 con CLC2012, verranno generate mappe di copertura del suolo con le medesime classi del livello 1.

Di seguito si riportano le classi nei vari livelli.

LEVEL 1	LEVEL 2	LEVEL 3
1-Artificial surfaces	1.1 Urban fabric	1.1.1 Continuous urban fabric
		1.1.2 Discontinuous urban fabric
	1.2 Industrial, commercial and transport units	1.2.1 Industrial or commercial units
		1.2.2 Road and rail networks and associated land
		1.2.3 Port areas
		1.2.4 Airports
	1.3 Mine, dump and construction sites	1.3.1 Mineral extraction sites
		1.3.2 Dump sites
		1.3.3 Construction sites

Capitolo 2

Le mappe di land use/cover

	1.4 Artificial, non-agricultural vegetated areas	1.4.1 Green urban areas
		1.4.2 Sport and leisure facilities
2-Agricultural areas	2.1 Arable land	2.1.1 Non-irrigated arable land
		2.1.2 Permanently irrigated land
		2.1.3 Rice fields
	2.2 Permanent crops	2.2.1 Vineyards
		2.2.2 Fruit trees and berry plantations
		2.2.3 Olive groves
	2.3 Pastures	2.3.1 Pastures
	2.4 Heterogeneous agricultural areas	2.4.1 Annual crops associated with permanent crops
		2.4.2 Complex cultivation patterns
		2.4.3 Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation
2.4.4 Agro-forestry areas		
3-Forest and semi natural areas	3.1 Forests	3.1.1 Broad-leaved forest
		3.1.2 Coniferous forest
		3.1.3 Mixed forest
	3.2 Scrub and/or herbaceous vegetation associations	3.2.1 Natural grasslands
		3.2.2 Moors and heathland
		3.2.3 Sclerophyllous vegetation
		3.2.4 Transitional woodland-shrub
	3.3 Open spaces with little or no vegetation	3.3.1 Beaches, dunes, sands
		3.3.2 Bare rocks
		3.3.3 Sparsely vegetated areas
		3.3.4 Burnt areas
		3.3.5 Glaciers and perpetual snow
4-Wetlands	4.1 Inland wetlands	4.1.1 Inland marshes
		4.1.2 Peat bogs
	4.2 Maritime wetlands	4.2.1 Salt marshes
		4.2.2 Salines
		4.2.3 Intertidal flats
5-Water bodies	5.1 Inland waters	5.1.1 Water courses
		5.1.2 Water bodies
	5.2 Marine waters	5.2.1 Coastal lagoons
		5.2.2 Estuaries
		5.2.3 Sea and ocean
NODATA	NODATA	NODATA
UNCLASSIFIED	UNCLASSIFIED LAND SURFACE	UNCLASSIFIED LAND SURFACE
	UNCLASSIFIED WATER BODIES	UNCLASSIFIED WATER BODIES
	UNCLASSIFIED	UNCLASSIFIED

Figura 2.12 Classi nei livelli di *CORINE Land Cover* (EEA, 1995)

Nonostante l'area minima di 25 ettari sia troppo elevata per uno studio locale (inoltre negli aggiornamenti le variazioni di copertura del suolo inferiore a 5 ettari non vengono riportate), *CORINE Land Cover* offre comunque un ottimo prodotto per studi in ambito ambientale e di pianificazione territoriale a scala regionale e nazionale.

Le mappe di land use/cover

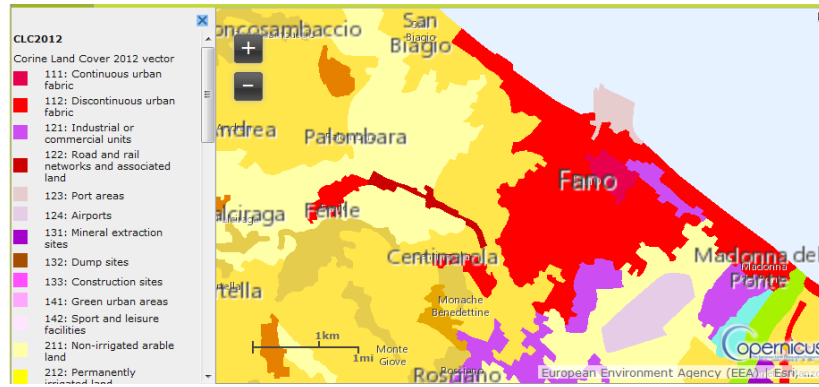


Figura 2.13 Esempio CLC2012, livello 3, della zona di Fano (PU), Marche (land.copernicus.eu)

In definitiva, il prodotto finale è una mappa tematica, ottenuta a valle di una classificazione di immagini satellitari provenienti dalle piattaforme Landsat, fino al 2000 (CLC 2000), poi dai satelliti SPOT 4/5, e infine dalle piattaforme IRS P6 LISS III e Rapid Eye (CLC 2012).

Nell'immagine 2.14 sono riportati alcuni dati riguardo al prodotto CORINE.

	CLC1990	CLC2000	CLC2006	CLC2012
Satellite data	Landsat-5 MSS/TM single date	Landsat-7 ETM single date	SPOT-4/5 and IRS P6 LISS III dual date	IRS P6 LISS III and RapidEye dual date
Time consistency	1986-1998	2000 +/- 1 year	2006 +/- 1 year	2011-2012
Geometric accuracy, satellite data	≤ 50 m	≤ 25 m	≤ 25 m	≤ 25 m
Min. mapping unit/width	25 ha/ 100m	25 ha/ 100m	25 ha/ 100m	25 ha/ 100m
Geometric accuracy, CLC	100 m	better than 100 m	better than 100 m	better than 100 m
Thematic accuracy, CLC	≥ 85% (probably not achieved)	≥ 85% (achieved)	≥ 85% (not checked)	≥ 85%
Change mapping (CLCC)	not implemented	boundary displacement min. 100 m; change area for existing polygons ≥ 5 ha; for isolated changes ≥ 25 ha	boundary displacement min. 100 m; all changes ≥ 5 ha are to be mapped	boundary displacement min. 100 m; all changes ≥ 5 ha are to be mapped
Thematic accuracy, CLCC	-	not checked	≥ 85% (achieved)	≥ 85%
Production time	10 years	4 years	3 years	2 years
Documentation	incomplete metadata	standard metadata	standard metadata	standard metadata
Access to the data (CLC, CLCC)	unclear dissemination policy	dissemination policy agreed from the start	free access for all users	free access for all users
Number of countries involved	28 (27 with late implementation)	30 (35 with late implementation)	38	39

Figura 2.14 Dati su CORINE Land Cover (<http://land.copernicus.eu>)

Tutti i dati sono disponibili per il *download* gratuitamente al sito <http://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>.

È possibile scaricare mappe sia in formato *raster* (*geoTIFF*) con risoluzione di 100 m o 250 m, che in formato vettoriale (*ESRI and SQLite geodatabase*).

Sono disponibili anche dei *layer* che evidenziano i cambiamenti avvenuti tra gli aggiornamenti di CLC.

2.4 Global Land Cover

Il telerilevamento è ormai largamente riconosciuto come l'approccio più flessibile ed economico per raccogliere informazioni su aree molto estese, ma anche se sono state svolte numerose ricerche riguardo la mappatura globale della copertura del suolo, solo pochissime mappe sono disponibili ad oggi. Fino a pochi anni fa le risoluzioni per analisi a scala globale sull'intero pianeta variavano da 1 km a 300 m (Ban et al, 2015).

Gli utenti tuttavia non trovavano tali prodotti soddisfacenti per via dello scarso dettaglio, della bassa accuratezza della classificazione e della difficoltosa interoperabilità con altri prodotti.

Oggi è disponibile una mappa globale di copertura del suolo alla risoluzione di 30 m, grazie all'utilizzo di immagini Landsat TM acquisite nel 2010.

È stata ottenuta dalla Cina la quale nel 2010 ha lanciato il programma *GLC mapping project* (www.glc30.tianditu.com)

Sono state prodotte due versioni, FROM-GLC (*Finer Resolution Observation and Monitoring of Global Land Cover*) e GlobeLand30.

La prima versione contiene due livelli di classi, il primo livello con 10 classi e il secondo livello con 29.

Per il primo livello l'accuratezza varia dal 53,88% con classificatore ML fino a 64,89% con classificatore *Support Vector Machine*, mentre per il secondo livello il miglior risultato in termini di accuratezza si attesta al 52,76% (Gong et al, 2013).

Nonostante l'attenzione posta nella scelta delle immagini affinché fossero acquisite in periodo asciutto e vegetativo, sono notevoli gli effetti mosaico per via delle acquisizioni in giorni differenti (Ban et al, 2015). I prodotti sono disponibili gratuitamente al sito <http://data.ess.tsinghua.edu.cn/>

L'approccio utilizzato per la classificazione della versione FROM-GLC ha portato a scarsi risultati in termini di accuratezza, perciò è stato sviluppato un sistema *pixel-object-knowledge based* (POK) per produrre la versione GlobeLand30.

Per la realizzazione dei prodotti GlobeLand30, è stata svolta un'attenta selezione delle immagini e l'integrazione con dati ancillari come informazioni DEM locali o servizi web come Google maps, Map World e OpenStreet Map.

Per l'identificazione di ciascuna delle 10 classi sono state utilizzate classificazioni *pixel* e *object based* automatiche, dopodichè la qualità della classificazione è stata migliorata con un sistema di verifica *knowledge-based*, con il supporto di servizi web (Ban et al, 2015).

Le performances del sistema sono state valutate scegliendo 8 aree con vari paesaggi nei cinque continenti, ottenendo una OA pari al 80,33% (Chen et al, 2015).

Global testing areas	Ground truth samples (pixels)	Overall accuracy (kappa coefficient)		
		POK 30 m	CORINE	FROM
Southeast of Baikal Lake, Russia	9012	78.9% (0.737)	/	72.9% (0.615)
Northeastern area, Tunisia	300	93.0% (0.890)	/	72.0% (0.603)
Westcentral area, South Africa	1445	79.72% (0.676)	/	28.46% (0.15)
Northern area, Sweden	2345	81.99% (0.766)	63.68% (0.529)	/
Northwestern area, Spanish	1742	84.73% (0.78)	76.63% (0.666)	/
Southeastern area, Canada	67,983	97.2% (0.950)	/	90.6% (0.802)
Amazon river basin, Brazil	144	79.2% (0.677)	/	65.7% (0.262)
Southeastern area, Australia	2194	96.67% (0.950)	/	42.4% (0.315)

Figura 2.15 Confronto accuratezza GL30, CORINE e FROM-GLC (Chen et al, 2015)

La seguente figura rappresenta il workflow seguito (figura 2.16)

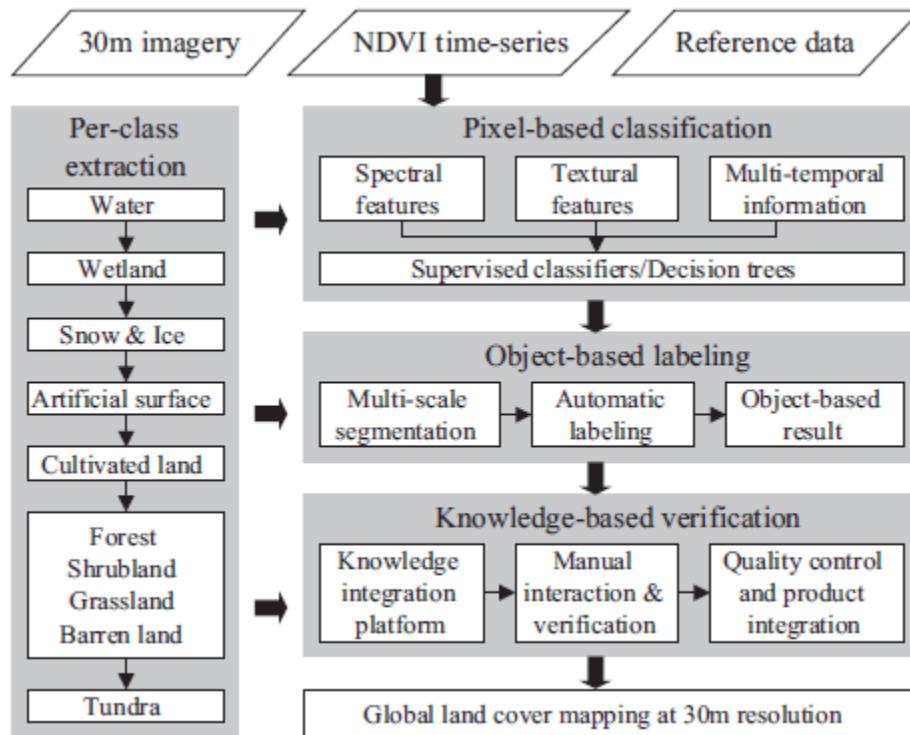


Figura 2.16 Workflow POK (Chen et al, 2015)

Il *dataset* GlobeLand30 è stato donato alle Nazioni Unite il 22 settembre 2014 ed è disponibile gratuitamente sul sito <http://glc30.tianditu.com/>

Di seguito si riporta l'interfaccia del sito, nella quale è possibile selezionare un'area geografica di interesse e successivamente scaricare i relativi dati.

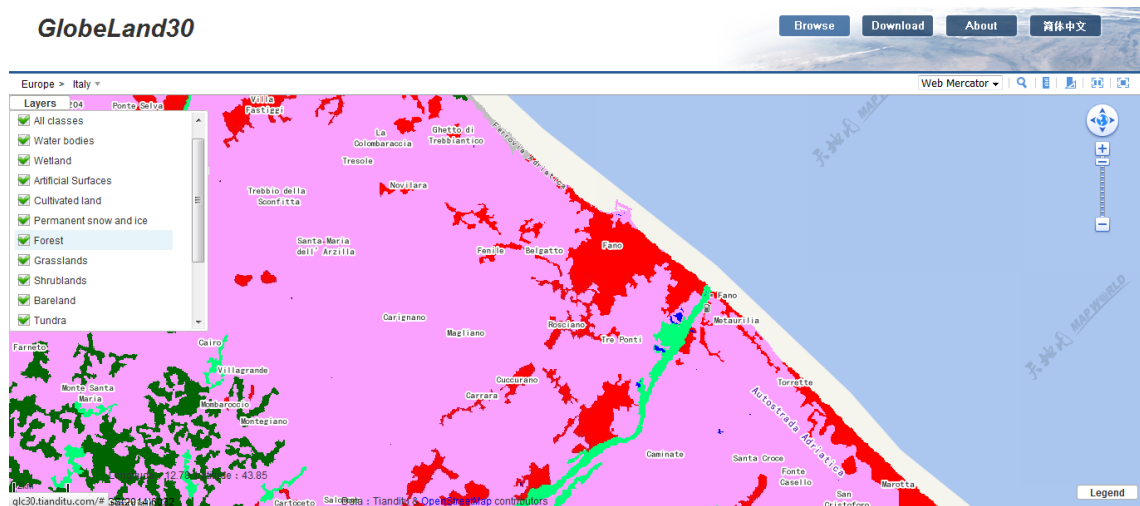


Figura 2.17 Esempio GlobeLand30, della zona di Fano (PU), Marche
(glc30.tianditu.com)

Questo tipo di prodotto rappresenta una pietra miliare per l'osservazione terrestre e le informazioni geografiche *open access* (Ban et al, 2015).

Attualmente i server che ospitano i dati di GLC sono inaccessibili, nonostante i numerosi tentativi di accesso effettuati.

2.5 Dato radar nella classificazione: casi di studio

Sono presenti in letteratura numerosi studi sull'utilizzo combinato del dato radar e ottico per la produzione di mappe di *land use/cover*. Questi studi utilizzano sia metodi di classificazione *pixel based* che *object based*.

In uno studio del 2003 condotto da Heremans et al. (della Accademia Militare Reale del Belgio) con titolo " *Automatic detection of flooded areas on ENVISAT/ASAR images using an object-oriented classification technique and an active contour algorithm*", sono state confrontate due tecniche di estrazione automatica di aree allagate da immagini radar.

Sono state utilizzate immagini ENVISAT/ASAR della regione di Leuven (pochi chilometri a est di Bruxelles) ottenute con banda C, polarizzazione VV e risoluzione spaziale di 30 metri,

Le immagini sono state processate per ridurre l'effetto di speckle e successivamente georeferenziate.

Successivamente sono state utilizzate tecniche automatiche di estrazione per individuare le aree allagate; nello specifico è stata utilizzata una tecnica di classificazione *object oriented* e un *active contour algorithm* (del quale non si entra nel merito).

Per l'analisi *object based* è stato utilizzato il software eCognition e sono state utilizzate due immagini, una di riferimento e una in cui l'area è allagata.

Lo studio è stato svolto in due fasi. In una prima classificazione è stata introdotta la classe "*dark tone objects*" che contiene sia le aree allagate sia altre aree con un basso *backscatter*. Poi, con una seconda classificazione, si sono suddivise le aree allagate confrontando l'immagine di riferimento con la seconda, partendo dal presupposto che i valori dei *pixel* delle zone allagate subiscono un notevole decremento di valore tra l'immagine di riferimento e l'immagine allagata. I *pixel* appartenenti alla classe "*dark tone object*" che non sono rappresentativi dell'area allagata invece avranno dei valori circa uguali tra le due immagini.

Nelle conclusioni i ricercatori affermano che questa metodologia è effettivamente in grado di individuare automaticamente le aree allagate.

Uno studio del 2014 di Shiraishi e altri con titolo "*Comparative assessment of supervised classifiers for land use-land cover classification in a tropical region using time-series PALSAR mosaic data*" presenta un paragone tra cinque diversi classificatori utilizzati per generazione di mappe di *land use/cover* su una zona tropicale situata nella parte centrale dell'isola di Sumatra in Indonesia.

Sono state utilizzate immagini PALSAR (risoluzione 25m) con polarizzazioni HH e HV. Sono stati scelti dati di tre anni dal 2007 al 2009 con osservazioni effettuate nel periodo secco. Oltre a queste immagini sono stati impiegati dati *raster* SRTM con *pixel spacing* di 90 metri per ottenere informazioni di quota.

Sono state prodotte sia mappe di *land use/land cover* (LULC) sia mappe *forest/non forest*, utilizzando una classificazione supervisionata di tipo *object based*.

Non si entrerà nel merito dei classificatori utilizzati, si indica soltanto che il più accurato è risultato il classificatore *Random Forest* (RF), del quale si riportano nella seguente figura 2.15 i risultati di accuratezza.

ACCURACY OF CLASSIFICATIONS		
Classes	Producer's accuracy (%)	User's accuracy (%)
(a) LULC classifications (10 classes)		
Forest	80.49	86.20
Mangrove	70.60	27.04
Re-Growth	24.28	40.46
Acacia	73.39	49.52
Oil Palm	73.80	77.60
Rubber	60.49	43.31
Coconut	86.30	57.45
Open Area	39.98	42.04
Other	39.14	60.34
Water	95.88	86.56
Overall accuracy [%]	64.07	
Kappa coefficient	0.58	
(b) FNF classification (2 classes)		
Forest	80.49	86.20
Non-Forest	94.43	91.80
Overall accuracy (%)	90.22	
Kappa coefficient	0.76	

Figura 2.15 Accuratezza del classificatore RF (Shiraishi et al, 2014)

Al di là delle performance dei singoli classificatori, ciò che è importante è il fatto che questo studio dimostra l'effettiva possibilità di utilizzare immagini radar PALSAR per ottenere mappe di land cover con buone accuratezze utilizzando informazioni multitemporali.

Lo studio di Ulmann e altri ricercatori del 2014 dal titolo "*Land Cover Characterization and Classification of Arctic Tundra Environments by Means of Polarized Synthetic Aperture X- and C-Band Radar PolSAR) and Landsat 8 Multispectral Imagery — Richards Island, Canada*", propone di analizzare immagini PolSAR dai satelliti TerraSAR-X in doppia polarizzazione (HH/VV), immagini Radarsat-2 a Quattro polarizzazioni insieme al dato multispettrale Landsat 8.

L'area analizzata si trova nei territori del nord-ovest in Canada.

Le immagini utilizzate sono le seguenti:

Sensor	AcquisitionDate	Incidence Angle	Polarization	AcquisitionMode	Resampled Resolution
L 8	2 August 2013	n/a	n/a	n/a	30.0 m
TSX	13 August 2012	30.6°	HH/VV	Stripmap	12.0 m
TSX	4 September 2012	31.6°	HH/VV	Stripmap	12.0 m
TSX	15 September 2012	32.1°	HH/VV	Stripmap	12.0 m
TSX	26 September 2012	32.7°	HH/VV	Stripmap	12.0 m
R-2	5 August 2010	46.1°	HH/HV/VH/VV	Fine	12.0 m
R-2	25 August 2010	40.7°	HH/HV/VH/VV	Fine	12.0 m

Figura 2.16 Immagini utilizzate e risoluzioni (Ullmann et al, 2014)

La classificazione è stata svolta sia con algoritmi supervisionati (*Maximum Likelihood* di ENVI) che non supervisionati (utilizzando un classificatore simile a *PolSAR Wishart Maximum Likelihood*) e utilizzando sia immagini di un singolo sensore che combinazioni di dati.

La classificazione è stata fatta considerando 20 classi, successivamente unite fino a formare cinque classi:

- NBG: zone non vegetate, suolo nudo;
- VLD: vegetazione bassa, massimo 20 cm di altezza, soprattutto prati;
- VMD: vegetazione sotto i 50 cm, dominata da erbe e cespugli
- VSD: vegetazione sotto 1m di altezza, soprattutto cespugli;
- VWT: aree vegetate in acque ferme.

L'accuratezza globale della classificazione non supervisionata mostra come con una unica fonte di dati il miglior risultato si ottenga con le immagini Landsat 8 (71%), con le immagini Radarsat-2 (a quattro polarizzazioni) o TerraSAR-X si arriva al 62%, il peggior risultato si riscontra con il dato Radarsat-2 a doppia polarizzazione, con una accuratezza globale del 56%.

L'utilizzo di combinazioni di dati aumenta i valori di OA, in particolare il miglior risultato si riscontra con l'utilizzo di dati Landsat 8 e TerraSAR-X, raggiungendo una accuratezza del 71%.

Le immagini ottiche da sole garantiscono una accuratezza maggiore rispetto al solo dato radar, ma essa risulta ulteriormente accresciuta dalla combinazione con questi ultimi.

Vale lo stesso discorso per la classificazione supervisionata, dove il miglior risultato si ottiene con la combinazione di immagini Landsat 8 e PolSAR, con una accuratezza globale del 87%.

Anche in questo caso si dimostra come i dati multisensore permettano di distinguere meglio alcuni tipi di coperture del suolo.

Uno studio del 2011 condotto da Wang, Feng e Vu Duc, del Dipartimento di Geografia dell'Università di Singapore prende in esame l'utilizzo di immagini multisensore per la mappatura di una zona a prevalente copertura di foresta pluviale nel nord della Thailandia.

Il *data set* utilizzato comprende dati ottici da Landsat TM, immagini radar PALSAR dai satelliti ALOS e informazioni sul terreno da un DTM ricavato da dati ASTER.

L'obiettivo dello studio è quello di definire quali combinazione dei dati disponibili sia la migliore per l'area in esame in termini di accuratezza della classificazione.

Inoltre è stata generata una mappa apposita per individuare le aree agricole sottoposte a rotazione (*short crop mapping*) dei raccolti utilizzando immagini multitemporali PALSAR.

Il workflow seguito è sintetizzato nella seguente figura 2.14

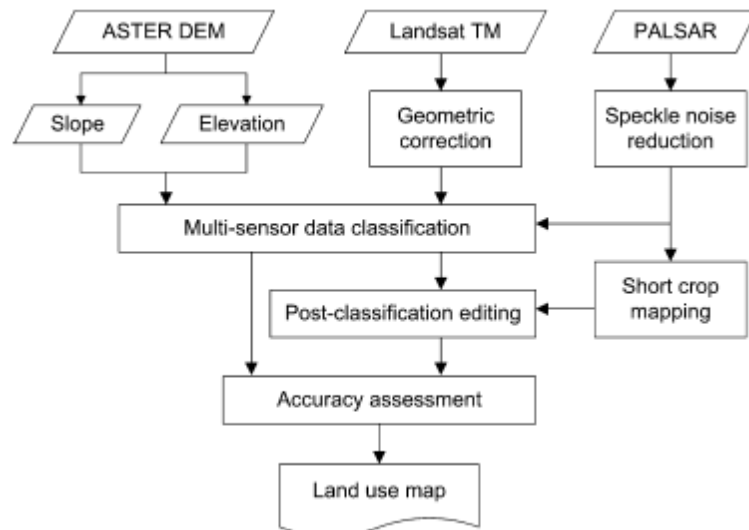


Figura 2.14 Procedura di integrazione dei dati multisensore disponibili
(Wang et al, 2011)

Utilizzando i dati provenienti dal Ministero dell'Agricoltura thailandese e indagini sul luogo sono state individuate 14 classi di copertura/ uso del suolo.

Complessivamente sono state utilizzate nove bande per la classificazione:

- 6 bande dall'immagine Landsat TM,
- 1 banda radar dall'immagine PALSAR,
- Due bande per il DTM, una per il valore di *elevation* e uno per il valore di *slope*.

Di queste sono state fatte dodici diverse combinazioni per poter valutare quale fosse la migliore in termini di accuratezza della classificazione e per ogni combinazione è stato utilizzato un classificatore di tipo *Maximum Likelihood*.

In termini di accuratezza globale, i ricercatori hanno trovato il migliore risultato con l'utilizzo di tutte le bande più la mappa *short crop*, con un valore calcolato di *overall accuracy* di 89,7% e un valore di coefficiente kappa pari a 0.88.

Utilizzando solo immagini Radar e ottiche, senza quindi includere informazioni dal DTM, si sono ottenuti valori di accuratezza globale pari a 55,5% e coefficiente kappa pari a 0,48.

Lo studio dimostra quindi come l'integrazione di dati multisensore e DTM, migliori notevolmente i risultati di una classificazione condotta con soli dati ottici; inoltre dimostra come il dato radar non migliori la qualità complessiva della classificazione, ma permetta di poter meglio distinguere alcune classi.

Capitolo 3. Caso di studio: valle del Metauro e valle del Foglia

In questo capitolo viene presentato il caso di studio a partire da un inquadramento territoriale dell'area scelta. Si descrive il materiale scelto, i software utilizzati e le metodologie di analisi.

L'obiettivo finale è quello di generare una mappa tematica della zona in analisi utilizzando il dato ottico di Sentinel-2 assieme al dato radar di Sentinel-1 e confrontarla con le mappe europee e globali in modo da poter comprendere le potenzialità delle nuove immagini disponibili in una ottica di studio della copertura del suolo.

L'utilizzo del dato Radar in integrazione con dati ottici permette potenziali vantaggi nella classificazione di aree miste con vegetazione spontanea e agricola, perché il radar risponde maggiormente alle caratteristiche geometriche superficiali piuttosto che alla riflettività (Wang et al., 2011).

3.1 Area di studio

L'area di studio selezionata si trova in Italia, nel nord della regione Marche, in provincia di Pesaro-Urbino e comprende le vallate percorse dai fiumi Foglia e Metauro. Il fiume Foglia sorge sugli Appennini e sfocia nel mar Adriatico presso la città di Pesaro, il fiume Metauro nasce dalla confluenza di due torrenti nei pressi della cittadina di Borgopace e sfocia nel mar Adriatico poco a sud della città di Fano.



Figura 3.1 Percorso dei fiumi Foglia e Metauro indicati dalle frecce rosse (www.sapere.it)

I due fiumi percorrono circa 100 km attraversando prima un territorio montuoso/collinare per poi proseguire sulle pianure costiere.

Lungo il corso dei due fiumi sono dislocati numerosi insediamenti e diversi distretti industriali e commerciali, ma l'agricoltura rappresenta la maggior causa di sfruttamento del suolo.

Ad eccezione di poche zone come il parco naturale nazionale Gola del Furlo, il parco delle "Cesane" e il parco naturale del monte San Bartolo (presso Pesaro), le due vallate risultano quasi completamente coperte da campi coltivati.



Figura 3.2 Tipica vista di una porzione della valle del Metauro nei pressi della cittadina di Piagge. (www.mapio.net)

Ad eccezione delle città di Pesaro (94000 abitanti) e Fano (61000 abitanti) gli insediamenti urbani sono piuttosto piccoli e "diffusi" distribuendosi principalmente attorno al percorso dei fiumi. Inoltre numerosi casolari sono presenti sulle colline tra i campi coltivati, come è possibile constatare anche dalla foto in figura 3.2.

3.2 Materiale selezionato

Per lo studio delle vallate del Metauro e del Foglia sono state utilizzate una immagine Radar Sentinel-1A e una immagine multispettrale Sentinel-2A che ricoprono l'area di analisi che si estende per circa 3400 km quadrati.

I dati sono stati scaricati gratuitamente dagli appositi server di ESA e sono disponibili all'indirizzo web <https://scihub.copernicus.eu> il quale si presenta con la seguente interfaccia (figura 3.3)

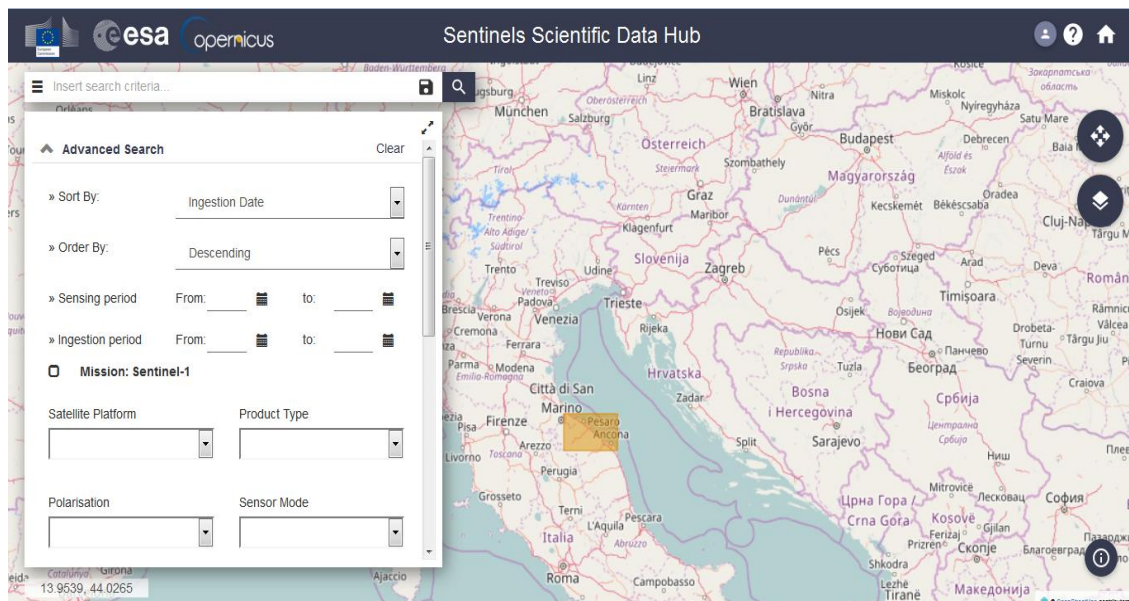


Figura 3.3 Interfaccia grafica Scihub (scihub.copernicus.eu)

In questo portale è possibile selezionare l'area di interesse (rettangolo giallo al centro dello schermo) e svolgere una ricerca avanzata grazie alla finestra sulla sinistra dello schermo dalla quale è possibile scegliere la missione, il livello di pre-trattamento del dato, modalità e periodo di acquisizione, polarizzazione (S1) e copertura nuvolosa (S2). Le immagini selezionate sono in proiezione UTM e Datum WGS84, coregistrate e risalgono ai giorni 07/09/2016 per l'immagine Radar e 04/09/2016 per il multispettrale. L'acquisizione è avvenuta in un periodo molto secco; ad agosto si sono registrate solo 10,3 mm di precipitazione contro una media mensile degli ultimi 60 anni di 63 mm, come si evince dai dati medi mensili della stazione di Urbino dell'"Osservatorio Meteorologico A. Serpieri" (www.ossmeteo.uniurb.it)

Il subset finale si estende tra le coordinate 43°58'36" N 12°28'15" E (spigolo in alto a sinistra, 43°58'35"N 13°11'43" E (alto dx), 43°26'25" N 12°28'15" E (in basso sx), 43°26'25" N 13°11'43" E.

3.3 Software per l'elaborazione delle immagini

Per analizzare le immagini sono stati utilizzati due *software* differenti.

Il software SNAP versione 4.0 fornito da ESA nasce appositamente per il trattamento e l'analisi delle immagini Sentinel perciò è stato utilizzato per il pre-trattamento dei dati Radar e ottici

Il *software* ENVI in versione 5.1 è stato utilizzato per le operazioni di classificazione dell'immagine.

Infine è stato utilizzato anche un software GIS per vagliare diverse soluzioni per il confronto dei risultati della sperimentazione con altri dati vettoriali e *raster* a disposizione.

3.3.1 ESA-SNAP 4.0

SNAP è un *software* per l'elaborazione delle immagini satellitari prodotto e distribuito gratuitamente da ESA, nasce con l'intento specifico di trattare le immagini provenienti dalle piattaforme Sentinel.

Il *software* è in grado di leggere numerosi formati di file sia Radar che ottici dando la possibilità di indicare da che piattaforma satellitare provengono i dati che si stanno aprendo.

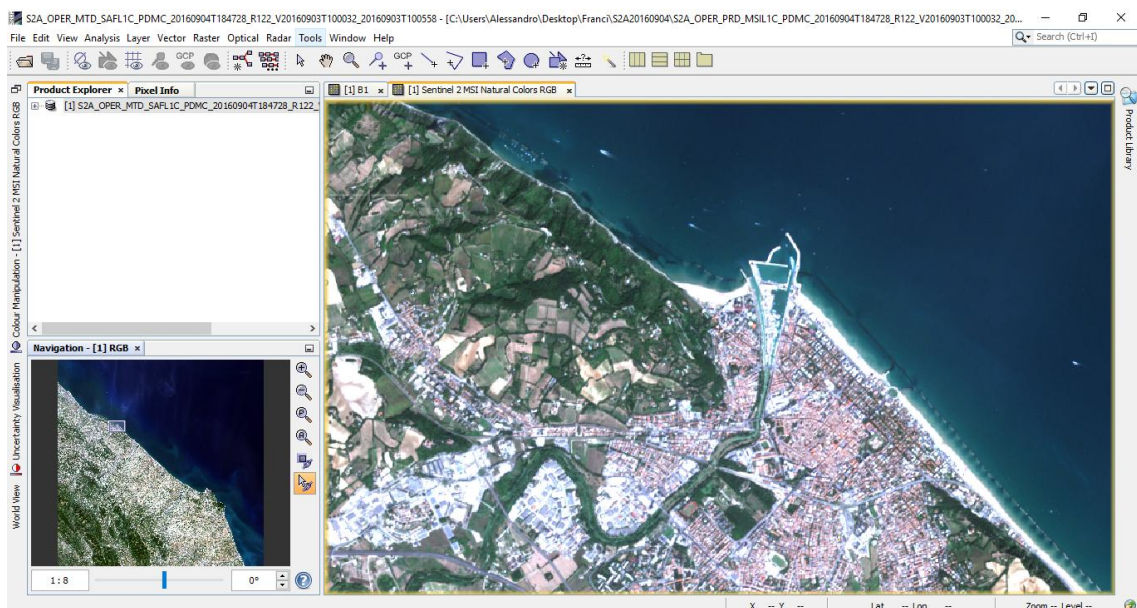


Figura 3.4 Interfaccia di SNAP 4.0

L'interfaccia grafica si presenta con una barra di menu principale nelle quali finestre sono raccolte tutte le possibili operazioni eseguibili sulle immagini:

- *Analysis* permette di scegliere opzioni di analisi statistica dell'immagine, visualizzazione di *scatter plot* o istogrammi.
- *Layer* contiene funzioni con le quali è possibile creare diversi livelli sull'immagine sovrapponendo puntatori, griglie o altro.
- *Vector*, questa finestra dà la possibilità di creare file vettoriali sull'immagine.
- *Raster* permette di scegliere funzioni per l'analisi delle immagini o il loro trattamento, è possibile compiere ritagli, operazioni di *resampling*, ri-proiezione dell'immagine, mosaico, *textureanalysis* e classificazione.
- *Optical* contiene funzioni che permettono il pre-trattamento dei dati ottici e l'estrazione di alcuni indici come NDVI.
- *Radar* permette di compiere tutte le operazioni sulle immagini radar, dalla calibrazione alle correzioni geometriche fino alle applicazioni interferometriche.

Questo *software* si è dimostrato efficace nel trattamento preliminare dei dati Sentinel, la descrizione delle operazioni effettuate sulle immagini è rimandata al paragrafo 3.4

3.3.2 ENVI 5.1

ENVI versione 5.1 è un *software* commerciale per il trattamento di dati telerilevati distribuito da Exelis.

È possibile aprire file provenienti da numerose piattaforme aeree e satellitari, nonché dati Lidar.

L'interfaccia si presenta come una sola barra dei menu dalla quale è possibile selezionare l'immagine da aprire, dopodiché appaiono altre quattro finestre, tre contengono l'immagine in diverse scale, la quarta permette di scegliere quali bande visualizzare e in che combinazione e contiene anche informazioni di georeferenziazione dell'immagine.

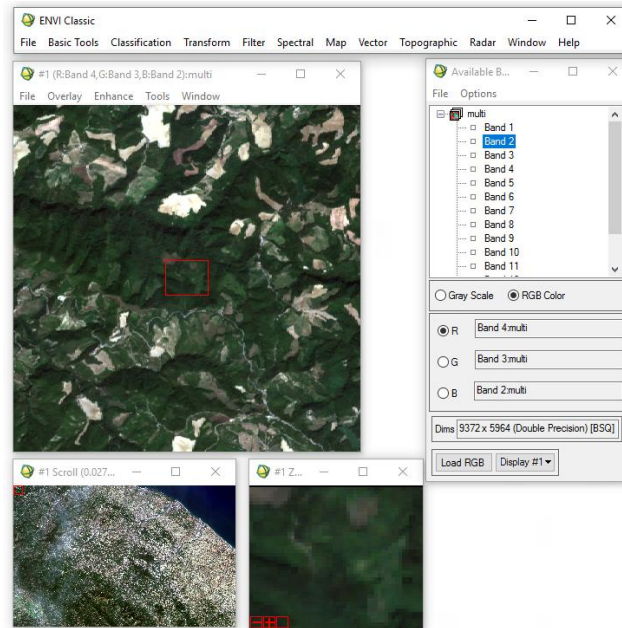


Figura 3.5 Interfaccia di ENVI

ENVI permette di compiere numerose operazioni come:

- Coregistrazione di più immagini;
- Ortorettifica;
- Ritagli, ridimensionamenti, unione di bande (Layerstacking);
- Individuazione di aree di interesse (ROI tools);
- Classificazione e operazioni di post-classificazione;
- Applicazione di filtri;
- Creazione di modelli digitali del terreno;
- Operazioni su immagini radar.

Questo software è stato utilizzato per tutte le operazioni di classificazione delle immagini e per le operazioni di post-classificazione.

3.4 Pre-elaborazione delle immagini

Le immagini scaricate dai server di ESA, soprattutto l'immagine SAR, non sono utilizzabili direttamente per la classificazione in ENVI.

Per questo è necessario che vengano eseguite alcune operazioni di *pre-processing* delle immagini tramite il *software* SNAP citato nel paragrafo precedente.

3.4.1 Radar, Sentinel 1

Il *pre-processing* dell'immagine Radar è stato svolto tramite il software SNAP 4.0 per poter apportare correzioni radiometriche e geometriche.

L'immagine Radar Sentinel-1 di livello 1-GRD non comprende le correzioni radiometriche che si rendono necessarie al fine di poter effettuare valutazioni quantitative, per il confronto con immagini radar del medesimo sensore acquisite in tempi diversi o con modalità differenti e per il confronto con immagini acquisite da altri sensori.

Il valore dei DN dei *pixel* dell'immagine di livello 1-GRD rappresenta la magnitudine misurata (il valore di ciascun *pixel* è scalato in proporzione alla radice quadrata della potenza), l'obiettivo della calibrazione dell'immagine SAR è quello di assegnare a ciascun *pixel* un valore che possa essere direttamente collegato al *backscatter* della zona illuminata (earth.esa.it).

Per la correzione radiometrica delle immagini S1 tutte le informazioni sono già contenute all'interno del prodotto sotto forma di vettore contenuto nella cartella delle annotazioni, questo permette di passare dai valori di intensità ai valori di σ^0 .

Le correzioni geometriche si rendono necessarie in quanto le variazioni della topografia della zona rappresentata causano una distorsione delle distanze nell'immagine SAR per tutti i punti che non sono acquisiti in posizione nadirale rispetto al sensore.

L'operatore "*Range Doppler Terrain Correction*" è stato impiegato proprio per compensare queste distorsioni in modo tale che l'immagine utilizzata rappresenti il più fedelmente possibile la morfologia della zona.

Nella seguente figura è rappresentata la geometria delle distorsioni in una immagine SAR.

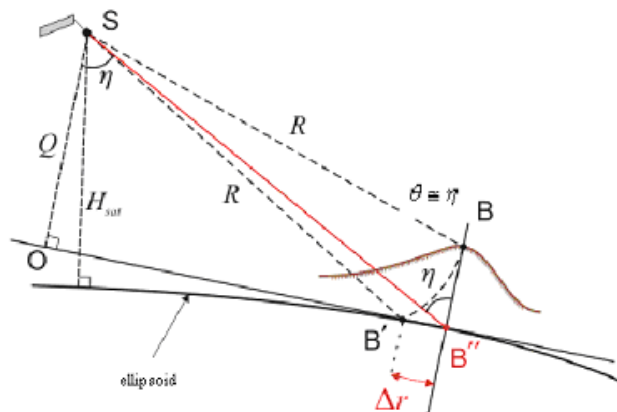


Figura 3.6 Geometria delle distorsioni in una immagine SAR (<http://earth.esa.it>)

Nella figura si vede come il punto B con elevazione h rispetto all'ellissoide di riferimento venga riportato sull'immagine nella posizione B' quando la sua reale posizione sarebbe B". Lo scarto Δr tra B' e B" rappresenta l'effetto di distorsione dovuto alla topografia dell'immagine.

L'algoritmo scelto genera un'immagine ortorettificata utilizzando un'immagine SAR simulata e un modello digitale di elevazione (DEM) tramite i seguenti passaggi:

- Simulazione SAR: viene generata un'immagine SAR simulata utilizzando un DEM, i vettori di geocodifica e delle orbite dell'immagine originale e una modellazione matematica della geometria delle immagini SAR. Si ottiene una immagine simulata con la stessa dimensione e risoluzione dell'immagine originale.
- Co-registrazione: l'immagine simulata e originale vengono co-registrate e viene prodotta una funzione WARP che fa corrispondere a ciascun *pixel* dell'immagine simulata la posizione nell'immagine originale.
- Correzione topografica: l'algoritmo associa a ciascuna cella del DEM la posizione del corrispondente *pixel* nell'immagine simulata, dopodiché tramite la funzione WARP risale alla posizione all'interno dell'immagine originale. Infine il valore del *pixel* nell'immagine ortorettificata viene ottenuto dall'immagine originale per interpolazione

Questo tipo di correzione permette di utilizzare dati di diversa provenienza e acquisiti con diverse geometrie di presa.

Eseguite le due operazioni descritte l'immagine ha una risoluzione di 10x10 metri, è stata tagliata creando il subset di dati necessario all'analisi ed esportata in formato TIFF.

3.4.2 Ottico, Sentinel 2

L'immagine multispettrale (13 bande) Sentinel-2 viene fornita sia intera, sia scomposta in "granuli", per via di problemi di visualizzazione e gestione dell'immagine complessiva della dimensione di 5,13 GB si è scelto di utilizzare soltanto i due granuli che ricoprono l'area di interesse.

Nei prodotti di livello 1C i valori di DN dei *pixel* rappresentano la riflettanza *Top-Of-Atmosphere* pertanto non necessitano di ulteriori calibrazioni; inoltre le immagini sono

georeferenziate e riferite all'ellissoide WGS84. Quindi non sono necessarie ulteriori procedure di calibrazione o correzione geometrica.

Il *preprocessing* del dato ottico, eseguito su *software* SNAP 4.0, si riduce ad una operazione di *resampling* per ottenere la risoluzione di 10x10 metri (la stessa dell'immagine SAR) in tutte le bande.

Per eseguire il ricampionamento è stato scelto l'algoritmo *Nearest Neighbor* il quale associa ad ogni *pixel* dell'immagine in *output* il valore di DN del *pixel* più vicino nell'immagine in *input*.

Successivamente i due granuli sono stati uniti in una unica immagine tramite il comando *mosaicing*, dal mosaico è stato poi ottenuto il *subset* che ricopre soltanto l'area di interesse.

Infine il *subset* ottenuto è stato esportato in formato GeoTIFF.

Occorre tenere in considerazione che il ricampionamento aumenta considerevolmente la dimensione dell'immagine, se i due granuli avevano una dimensione di circa 500 MB, l'immagine contenente il *subset* esportata in formato GeoTIFF risulta occupare 22 GB di memoria in quanto il formato non è compresso, mentre in origine le immagini sono fornite in formato jpeg2000.

L'immagine multispettrale presenta ancora qualche problematica in quanto la banda 10 come possiamo vedere in figura 3.6 fornisce una rappresentazione incomprensibile, mentre la banda 11 presenta valori di DN molto bassi per cui non fornisce informazioni utili per distinguere i vari elementi sull'immagine. Tali bande sono state eliminate ottenendo così un'immagine finale con 11 bande spettrali.

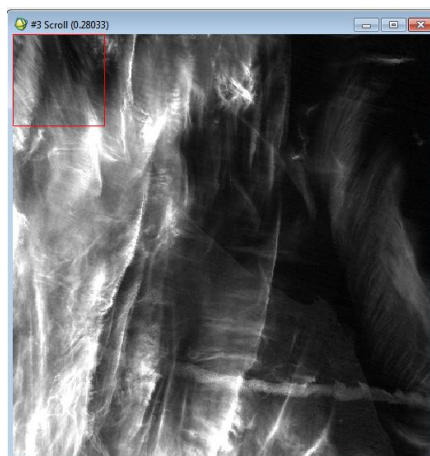


Figura 3.7 Visualizzazione di un granulo in banda 10

3.5 Classificazione

A questo punto le due immagini a disposizione sono pronte per essere utilizzate in ENVI e classificate.

L'idea di base è quella di utilizzare il dato Radar come banda aggiuntiva all'immagine multispettrale e verificare quali benefici apporti alla classificazione.

Per questo è stata generata una terza immagine, tramite il comando *Layer Stacking*, la quale contiene le 11 bande del multispettrale più la banda Radar in polarizzazione VH (tale immagine a 12 bande spettrali verrà chiamata nel corso della trattazione OR).

Il processo di classificazione è stato svolto su *software* ENVI 5.0 e si sviluppa in più fasi:

- in prima battuta si è eseguita una classificazione non supervisionata con classificatore ISODATA sulle singole immagini (multispettrale e radar)
- in seconda fase è stata realizzata una classificazione supervisionata con l'algoritmo *Maximum Likelihood* (ML) sull'immagine multispettrale.
- infine è stata eseguita una classificazione supervisionata sull'immagine OR con algoritmo ML.

3.5.1 Isodata

La classificazione non supervisionata è stata svolta con i parametri di default forniti dal *software*, si è scelto di stabilire un minimo di cinque classi e un massimo di dieci.

Il classificatore ha individuato dieci classi spettrali.

Il risultato della classificazione non è soddisfacente, tuttavia dà alcune informazioni riguardo gli elementi dell'immagine che presentano firme spettrali simili.

Infatti si nota come il colore marrone ricopra sia zone coltivate che zone urbane, così come accade alla classe individuata dal colore verde.

Nelle immagini seguenti è riportata la stessa zona come appare nella rappresentazione RGB (a sinistra) e in seguito alla classificazione non supervisionata (a destra).

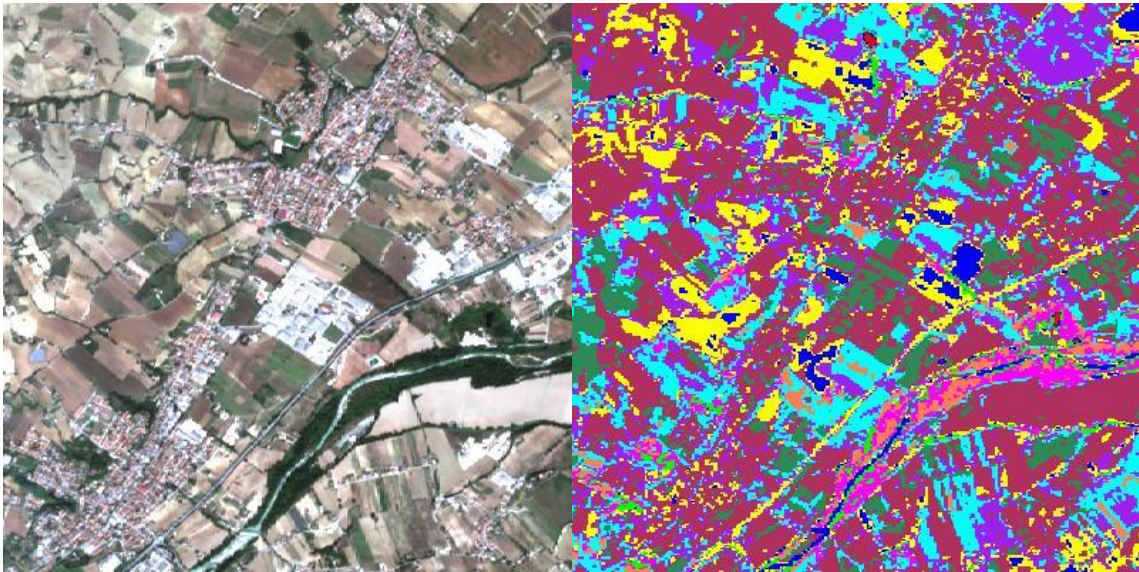


Figura 3.8 Confronto immagine RGB e classificata con ISODATA

Di seguito si riportano i risultati della classificazione non supervisionata eseguite sulle due bande radar, VH a sinistra e VV a destra.

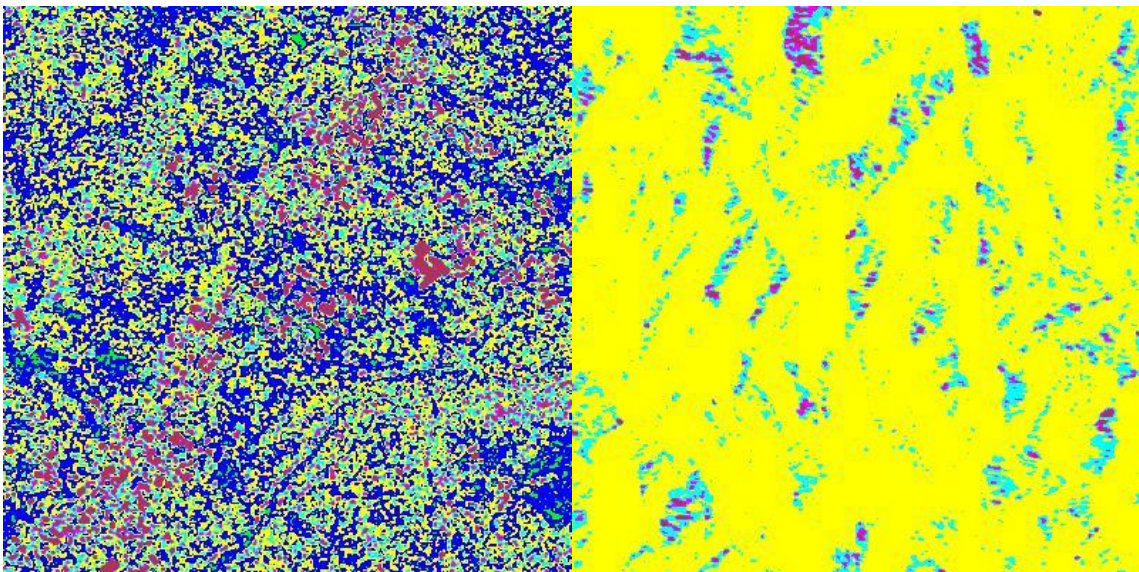


Figura 3.9 Risultati classificazione ISODATA banda radar VH (sinistra) e VV (destra)

Le due immagini rappresentano la stessa zona della precedente immagine 3.8; la polarizzazione VH mostra come il radar sembri essere utile per discriminare la componente artificiale (in marrone) dal resto del paesaggio.

Nella banda VV invece sembra che non sia possibile discriminare quasi nessun elemento, pertanto è stata scartata anche dall'immagine OR in quanto non avrebbe aggiunto alcun elemento all'analisi.

3.5.2 Maximum Likelihood

La seconda fase della sperimentazione prevede la classificazione supervisionata delle immagini tramite algoritmo con criterio di assegnazione a massima verosimiglianza.

Il software ENVI implementa la massima verosimiglianza calcolando la funzione di discriminazione seguente per ciascun *pixel* dell'immagine (Richards, 1999):

$$g_j(x) = \ln p(\omega_j) - \frac{1}{2} \ln |S_j| - \frac{1}{2} (x - m_j)^T S_j^{-1} (x - m_j)$$

Dove:

- j rappresenta la classe;
- x è il vettore n-dimensionale che contiene i valori dei DN del *pixel* nelle varie bande; n è il numero di bande;
- $p(\omega_j)$ è la probabilità che la classe j appaia nell'immagine, è uguale per tutte le classi;
- S_j è la matrice di covarianza della classe j, il valore assoluto $| |$ ne indica il determinante;
- m_j è il vettore media.

Tramite la funzione riportata ENVI assegna i *pixel* a ciascuna delle classi.

Si è scelto di classificare l'immagine secondo quattro classi fondamentali, confrontabili con il livello 1 di CLC 2012:

- Superfici artificiali
- Superfici agricole
- Vegetazione
- Corpi idrici

Non viene riportata la classe 4 di CLC in quanto nel territorio analizzato non sono presenti *wetlands* in nessuna delle forme intese dalla legenda di CLC.

Sulla base delle caratteristiche spettrali, sono state identificate 16 classi differenti all'interno dell'immagine, successivamente queste classi sono state unite per formare le 4 classi principali di cui sopra.

La prima operazione necessaria è l'individuazione dei *training sites* per ciascuna classe; tale operazione si è rivelata essere la più complessa e la più dispendiosa in termini di tempo, in quanto richiede una analisi delle firme spettrali *pixel-by-pixel* per identificare aree omogenee come siti di addestramento.

Per fare ciò si è ricorso al comando *ROI tool* di ENVI selezionando le aree di addestramento per fotointerpretazione.

Una volta individuata e selezionata un'area di interesse questa appare come un poligono in ENVI; a titolo di esempio è riportato uno dei siti di addestramento per la classe "Campi Bianchi" che appare come un poligono blu al centro del quadrato rosso nell'immagine in figura 3.10.

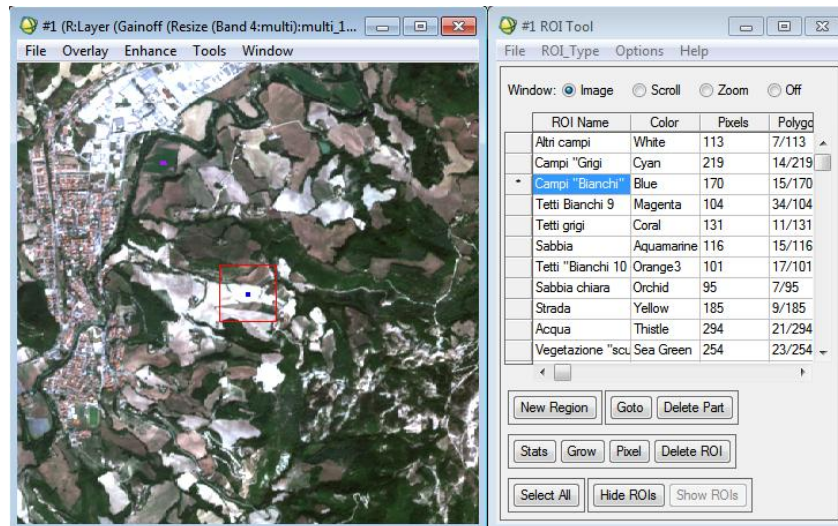


Figura 3.10 Finestra *ROI tool* e posizione della regione di interesse sull'immagine

Per identificare meglio i *training sites* di alcune classi è stata utilizzata una visualizzazione a falsi colori.

La visualizzazione RGB in colori naturali prevede l'utilizzo delle bande 4 3 2 ma è possibile sostituire la banda 4 con la banda 8 (NIR) per ottenere una rappresentazione *false colours* che esalta in modo particolare la vegetazione in modo da poter individuare in maniera più agevole le aree di addestramento relative.

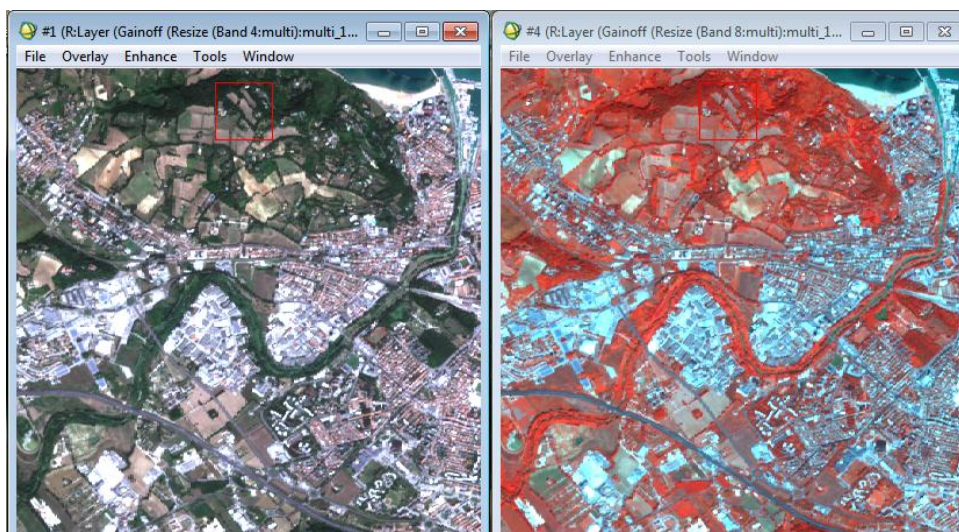


Figura 3.11 Esempio di visualizzazione in falsi colori, bande 8 3 2.

Questo tipo di visualizzazione evidenzia con un rosso acceso la vegetazione, mentre lascia le zone artificiali di un colore azzurro lieve e i campi arati risultano grigio-verde. Per poter scegliere le aree è stato sfruttato il comando *Z-profile* il quale permette di visualizzare la firma spettrale del *pixel* selezionato; questa è stata poi confrontata con la curva di riflettanza spettrale media della classe in analisi come riportato nella seguente figura 3.12

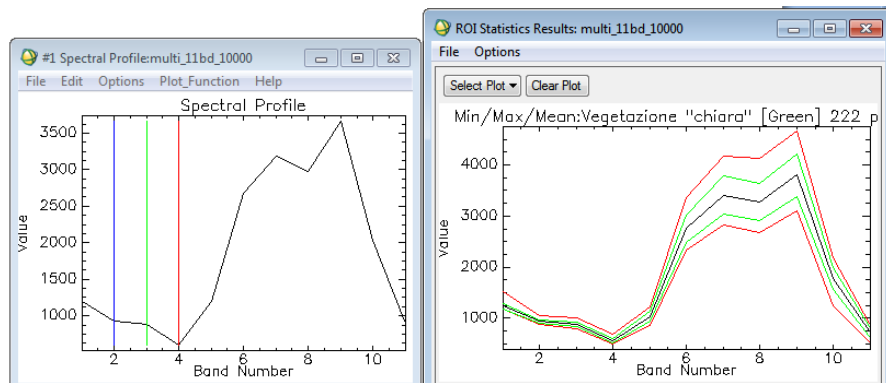


Figura 3.12 Esempio di firma spettrale di un *pixel* a sinistra e firma spettrale media della classe "Vegetazione chiara" a destra

Conclusa la fase di addestramento è stato avviato l'algoritmo di classificazione assegnando a ciascuna classe la soglia di probabilità di 0.7 ad eccezione della classe "Campi Bianchi" e "Tetti Rossi" alle quali sono stati assegnati rispettivamente i valori di 0.98 e 0.99, in quanto in seguito a una serie di simulazioni si è visto che queste classi generavano confusione con alcuni tipi di campi coltivati.

Si riporta di seguito il risultato della classificazione a 16 classi.



Figura 3.13 Risultato della classificazione ML a 16 classi

All'immagine classificata è stato applicato l'algoritmo *Sieve* il quale risolve il problema dei *pixel* isolati verificando se i *pixel* vicini sono della medesima classe.

Qualora all'interno di una zona omogenea ci fosse un *pixel* assegnato ad una classe diversa, quest'ultimo viene sostituito con un *pixel* nero, appartenente cioè alla categoria "non classificato".

In fase di implementazione dell'algoritmo è possibile scegliere il minimo numero di *pixel* considerabili coerenti e il numero di *pixel* vicini da analizzare (si può scegliere tra 4 e 8).

In questa sperimentazione si è scelto di eliminare gruppi fino a due *pixel* considerando coerenti tre *pixel* adiacenti della stessa classe e di analizzare i 4 *pixel* vicini.

A questo punto dell'elaborazione all'interno di una area omogenea potrebbero essere presenti sia *pixel* non classificati che piccoli gruppi di *pixel* assegnati ad altre classi.

L'algoritmo *Clump*, tramite un operatore morfologico, riduce questo problema rendendo l'immagine classificata più omogenea.

Il software permette di scegliere la dimensione dell'operatore che agisce sull'immagine; per evitare di intervenire in modo troppo pesante sui risultati della classificazione si è scelto un operatore di dimensione 3x3.

La figura 3.14 rappresenta le due operazioni di post classificazione descritte: a sinistra viene riportata l'immagine così com'è a valle del processo di classificazione, al centro è stato applicato l'algoritmo *Sieve* (si notano molti più *pixel* neri) e a destra l'immagine dopo l'esecuzione del processo di *clumping* (molto più omogenea).

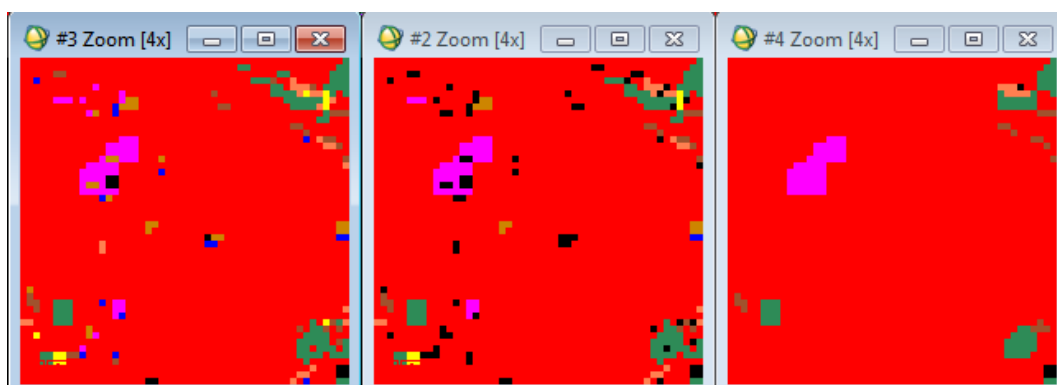


Figura 3.14 Esempio di applicazione dei processi di post classificazione

A questo punto l'immagine risulta più omogenea e coerente, L'ultima operazione di post classificazione consiste nell'unire le classi per formare le 4 categorie fondamentali indicate all'inizio del paragrafo.

Di seguito si riporta il risultato definitivo della classificazione.

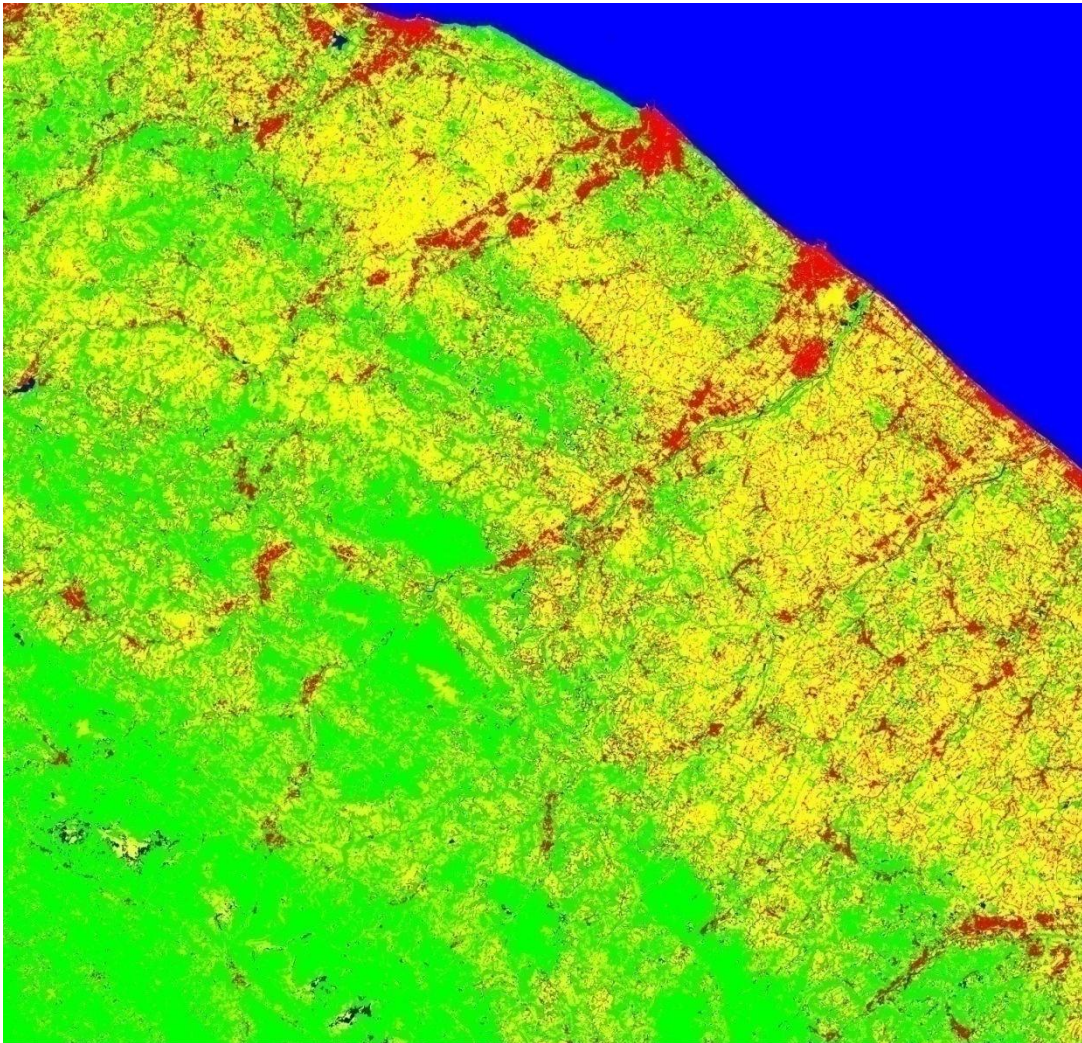


Figura 3.15 Risultato della classificazione dell'immagine ottica

Le 4 classi sono caratterizzate dai colori:

- Superfici artificiali, Rosso ■
- Superfici agricole, Giallo ■
- Vegetazione, Verde ■
- Corpi idrici, Blu ■

Il processo descritto è stato svolto per l'immagine multispettrale.

A questo punto della sperimentazione è stata aggiunta anche la banda in polarizzazione VH dell'immagine radar Sentinel-1.

Il risultato della classificazione è il medesimo dell'immagine ottica, non ci sono apprezzabili differenze a livello visivo.

L'incidenza effettiva del dato radar sulla classificazione sarà valutato in termini di accuratezza nel prossimo paragrafo 3.5.3

3.5.3 Validazione

La fase di validazione prevede il confronto tra i risultati della classificazione e delle aree di verità a terra (*check sites*) per poter quantificare l'accuratezza della mappa tematica prodotta (si veda paragrafo 2.2.3).

I punti rilevati sono quasi tutti all'interno della vallata del Metauro, dal paese di Cantiano a Fano; si spingono anche fino alla cittadina di Marotta.



Figura 3.16 Distribuzione dei punti GPS

Le aree di verità a terra sono state individuate mediante rilievo GPS svolto in due giornate grazie all'applicazione gratuita *Avenza Maps* distribuita da *Avenza System Inc.* e installata su smartphone *Samsung Galaxy S6 Edge*.

La precisione raggiungibile dal posizionamento assoluto offerto dagli smartphone si aggira sui 10 metri, coerentemente con la risoluzione geometrica delle immagini satellitari, perciò si è deciso di non ricorrere a strumenti più precisi.

Sono stati individuati 10 punti per la classe "Vegetazione" e 11 per le classi "Superfici Artificiali" e "Superfici Agricole"; a questi sono stati aggiunti 10 punti per la classe "Acqua" ottenuti per fotointerpretazione (coadiuvata dalla conoscenza personale della zona).

Complessivamente sono stati raccolti 42 punti di verità a terra.

A ciascun punto GPS corrisponde un *pixel* sulla mappa individuato in ENVI mediante la funzione *ROI Tool*.

Il punto rilevato è stato considerato come un vertice di un poligono composto da quattro *pixel* in modo tale che a ciascun *check point* fosse associata un'area di 2×2 *pixel* per un totale di 400 metri quadri.

Complessivamente le aree di verità a terra ricoprono una superficie di 4800 metri quadri.

Le ROI così ottenute sono state utilizzate per generare le matrici di confusioni sia per la classificazione ottenuta con la sola immagine ottica che per quella ottenuta fondendo il dato ottico e radar.

Di seguito è riportata l'accuratezza globale (OA, evidenziata in azzurro) e la matrice di confusione espressa in *pixel* e in termini percentuali della classificazione dell'immagine ottica.

Overall Accuracy = (153/168) 91.0714%					
Kappa Coefficient = 0.8811					
	Ground Truth (Pixels)				
Class	Acqua	Vegetazione	Artificiale	Coltivato	Totale
Unclassified	0	0	1	0	1
Acqua	40	0	0	0	40
Vegetazione	0	40	0	0	40
Artificiale	0	0	35	6	41
Coltivato	0	0	8	38	46
Totale	40	40	44	44	168
	Ground Truth (Percent)				
Class	Acqua	Vegetazione	Artificiale	Coltivato	Totale
Unclassified	0.00	0.00	2.27	0.00	0.60
Acqua	100.00	0.00	0.00	0.00	23.81
Vegetazione	0.00	100.00	0.00	0.00	23.81
Artificiale	0.00	0.00	79.55	13.64	24.40
Coltivato	0.00	0.00	18.18	86.36	27.38
Totale	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Figura 3.17 Matrice di confusione classificazione immagine ottica

Si riportano anche i parametri di accuratezza della classificazione ottenuta con immagine ottica.

Class	Commissione (Percent)	Omissione (Percent)	Commissione (Pixels)	Omissione (Pixels)
Acqua	0.00	0.00	0/40	0/40
Vegetazione	0.00	0.00	0/40	0/40
Artificiale	14.63	20.45	6/41	9/44
Coltivato	17.39	13.64	8/46	6/44
Class	Prod. Acc. (Percent)	User Acc. (Percent)	Prod. Acc. (Pixels)	User Acc. (Pixels)
Acqua	100.00	100.00	40/40	40/40
Vegetazione	100.00	100.00	40/40	40/40
Artificiale	79.55	85.37	35/44	35/41
Coltivato	86.36	82.61	38/44	38/46

Figura 3.17 Parametri di accuratezza classificazione immagine ottica

Si può notare come l'acqua e la vegetazione vengano classificate in maniera perfetta, mentre la maggior confusione avviene tra superfici artificiali e agricole.

Nello specifico il maggior errore riscontrato risiede in 8 *pixel* classificati come superfici coltivate che in realtà sono superfici artificiali, l'errore complessivamente è del 18,18%.

Mentre il 13,64% dei *pixel* appartenenti alle aree agricole sono stati classificati come aree artificiali. L'accuratezza globale si attesta al 91,1%.

Nel successivo paragrafo 3.5.4 si spiegherà la probabile causa di tali errori.

Di seguito si riportano i medesimi dati riguardanti la classificazione dell'immagine OR.

Overall Accuracy = (156/168) 92.8571%					
Kappa Coefficient = 0.9049					
Class	Ground Truth (Pixels)				
	Acqua	Vegetazione	Artificiale	Coltivato	Totale
Unclassified	0	0	1	0	1
Acqua	40	0	0	0	40
Vegetazione	0	40	0	0	40
Artificiale	0	0	39	7	46
Coltivato	0	0	4	37	41
Totale	40	40	44	44	168
Class	Ground Truth (Percent)				
	Acqua	Vegetazione	Artificiale	Coltivato	Totale
Unclassified	0.00	0.00	2.27	0.00	0.60
Acqua	100.00	0.00	0.00	0.00	23.81
Vegetazione	0.00	100.00	0.00	0.00	23.81
Artificiale	0.00	0.00	88.64	15.91	27.38
Coltivato	0.00	0.00	9.09	84.09	24.40
Totale	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Class	Commissione (Percent)	Omissione (Percent)	Commissione (Pixels)	Omissione (Pixels)	
Acqua	0.00	0.00	0/40	0/40	
Vegetazione	0.00	0.00	0/40	0/40	
Artificiale	15.22	11.36	7/46	5/44	
Coltivato	9.76	15.91	4/41	7/44	
Class	Prod. Acc. (Percent)	User Acc. (Percent)	Prod. Acc. (Pixels)	User Acc. (Pixels)	
Acqua	100.00	100.00	40/40	40/40	
Vegetazione	100.00	100.00	40/40	40/40	
Artificiale	88.64	84.78	39/44	39/46	
Coltivato	84.09	90.24	37/44	37/41	

Figura 3.18 Matrice di confusione e parametri di accuratezza classificazione immagine OR

Come si può notare dalla tabella in figura 3.18 l'inserimento della banda radar migliora l'accuratezza globale del 1,8%, raggiungendo il valore di 92,9%.

Il miglioramento non è netto né evidente ad una analisi visiva dei prodotti, ma occorre considerare che la banda radar si aggiunge a ben 11 bande ottiche, per cui il suo contributo è limitato.

Guardando la matrice di confusione si nota come il miglioramento più marcato si riscontra nella classe delle superfici coltivate, dove i *pixel* classificati come artificiali si riducono a 4 (errore del 9,09%).

3.5.4 Considerazioni

La mappa prodotta (Figura 3.15) riproduce in maniera fedele alla realtà le caratteristiche del territorio esposte all'inizio del capitolo; usciti dalla zona appenninica (spigolo in basso a sinistra), eccetto tre macro aree verdi, il resto delle vallate sono ricoperte da campi coltivati, specialmente a sud del fiume Metauro, dove lo sfruttamento agricolo del suolo raggiunge il suo massimo.

Anche la distribuzione urbana predetta nel paragrafo 3.1 trova riscontro nella classificazione effettuata: si possono individuare i due centri urbani principali di Pesaro

e Fano sulla costa (più Cattolica, il centro urbano più a Nord) e un'urbanizzazione diffusa soprattutto lungo il corso dei fiumi.

È necessario specificare che in questa tesi la mappa di copertura del suolo è stata realizzata pensando soprattutto alla diversificazione tra aree permeabili ed aree impermeabili.

Per questo motivo appaiono alcune zone classificate come campi coltivati anche se in realtà non lo sono, come l'elemento giallo indicato al centro dell'immagine 3.19 che viene classificato come campo coltivato quando in realtà è il terreno dello stadio della città di Fano.

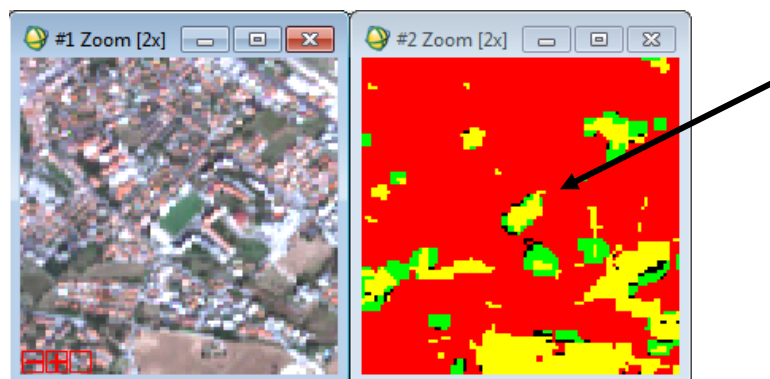


Figura 3.19 Esempio di campo coltivato in città

A parte queste piccole aree la grandissima maggioranza delle zone inserite nella categoria "Campi coltivati" sono effettivamente tali o sono comunque elementi tipici del gruppo 2 di CLC (si veda paragrafo 2.3).

Per poter discriminare il meglio possibile le zone coltivate dalle zone urbane si sono rese necessarie 6 diverse classi per identificare le aree agricole e 4 classi per caratterizzare gli ambienti artificiali.

All'interno delle aree artificiali si riscontrano decine di diverse firme spettrali, questo è dovuto al fatto che la maggior parte dei *pixel* sono misti ed i materiali molto eterogenei. L'individuazione di aree omogenee che formassero i *training sites* per le categorie che costituiscono la classe "Superfici Artificiali" è stata l'operazione più complessa.

La maggior difficoltà riscontrata è stata la discriminazione tra l'ambiente urbano ad alta densità abitativa (ROI "Tetti Rossi") e alcune zone coltivate (ROI "Campi Piatti") nelle quali le terre sono arate. In realtà il materiale che compone i coppi del tetto (generalmente argilla) è quasi il medesimo di un campo arato, per cui in un periodo dell'anno molto secco le risposte spettrali sono comprensibilmente molto simili.

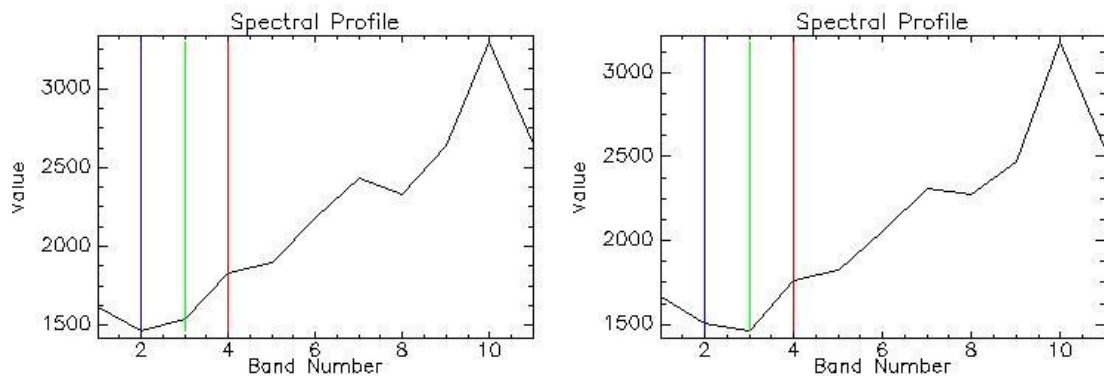


Figura 3.20 Confronto firma spettrale campo arato (sinistra) tetto in zona urbana (destra)

La figura 3.20 riporta le firme spettrali di un campo arato a sinistra e di un tetto a coppi a destra, si può constatare come siano quasi perfettamente uguali.

L'effetto di questa confusione si concretizza con l'assegnazione di alcune aree di campi coltivati alla categoria "Tetti rossi".

Le simulazioni effettuate e l'inserimento di 6 classi spettrali diverse per i campi coltivati hanno mitigato notevolmente il problema seppur non risolvendolo completamente.

Una situazione molto simile si riscontra nella distinzione tra zone di campi arati e aree industriali come si nota in figura 3.21

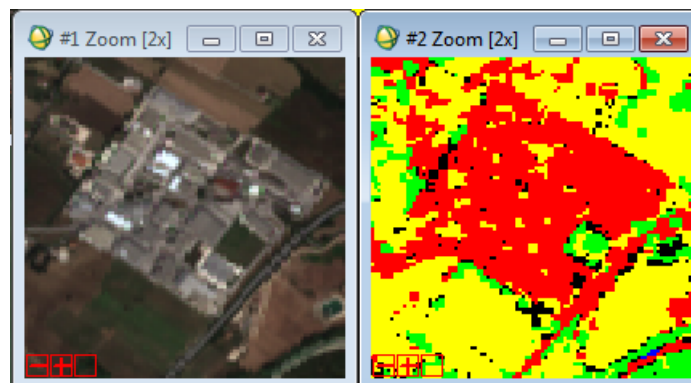


Figura 3.21 Esempio di zona industriale

In questo caso la confusione avviene con una diversa tipologia di campo coltivato (ROI "Campi Bianchi") rispetto al caso precedente.

Tramite un sopralluogo in due diverse località industriali si è verificato che, a differenza di quanto si possa pensare, non tutta l'area è completamente cementificata come mostra anche l'immagine ripresa da Google Earth in figura 3.22

Dopo numerose simulazioni si è deciso di aumentare la soglia di probabilità di attribuzione per le categorie "Tetti rossi" e "Campi bianchi", assegnando rispettivamente i valori di 0.99 e 0.98.

Come mostrato nel paragrafo precedente riguardo l'accuratezza delle mappe la confusione tra aree urbane e aree coltivate viene mitigata, seppur in maniera lieve, dall'aggiunta del dato radar all'analisi; risultato perfettamente in linea con gli studi presenti in letteratura e citati al capitolo 2.

L'ultimo caso di confusione presente riguarda le zone costiere in quanto le aree di spiaggia in concessione vengono interamente classificate come superficie artificiale, questo potrebbe verosimilmente dipendere dalla presenza di ombrelloni aperti che di fatto precludono completamente la vista alla sabbia sottostante.

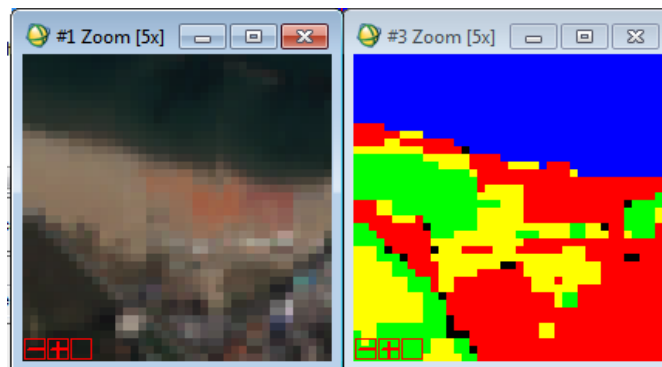


Figura 3.24 Spiaggia parzialmente coperta da ombrelloni

Come si può constatare dall'immagine 3.24 laddove sono presenti gli ombrelloni nell'immagine classificata troviamo una superficie artificiale, mentre l'area di spiaggia libera viene classificata come superficie non urbanizzata.

Va inoltre segnalato che nelle zone agricole sono visibili numerosi *pixel* della classe "Superfici Artificiali"; questo è in linea con la struttura del territorio composto da numerosi casolari e strade vicinali e con l'urbanizzazione "diffusa" definita nel paragrafo 3.1 (si veda anche figura 3.2).

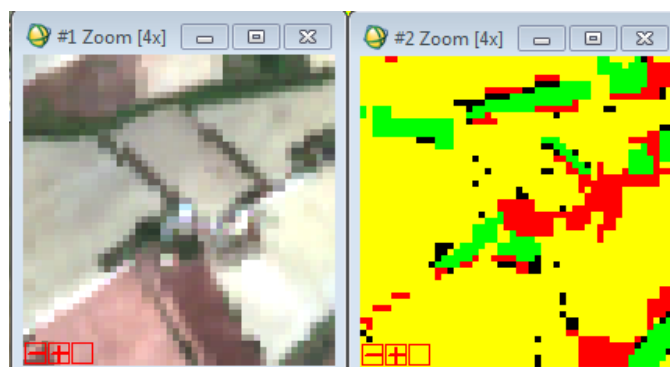


Figura 3.25 Esempio di un casolare e strade contadine

3.6 Confronto con Corine Land Cover

Per confrontare i risultati ottenuti dalla sperimentazione con i dati disponibili di copertura del suolo di CLC è stato necessario come prima cosa produrre mappe che fossero coerenti in termini di sistemi di riferimento.

Perciò utilizzando il comando *Convert Map Projection* di ENVI la mappa tematica OR prodotta in coordinate geografiche è stata riproiettata in coordinate cartografiche, nello specifico si è scelto il sistema di coordinate UTM fuso 33 con Datum WGS84.

È stato impostato il metodo "*Rigorous*" per la trasformazione e l'algoritmo di *resampling* "*Nearest Neighbor*".

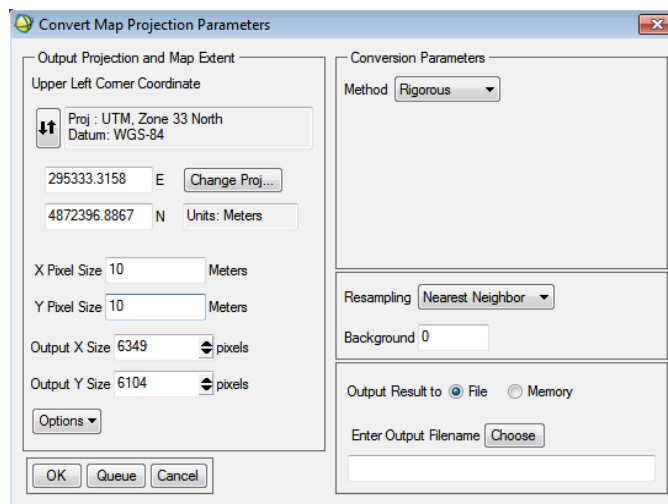


Figura 3.25 Interfaccia comando "*Convert Map Projection*"

L'utilizzo diretto della mappa CLC in formato raster è risultato impossibile in quanto l'immagine fornita è un generico dato TIFF RGB in proiezione arbitraria; non è pertanto possibile eseguire alcuna operazione su tale immagine.

La mappa CLC in formato *shapefile* è in proiezione *Lambert Azimuthal-Equal Area projection* con Datum ETRS89; anche questa è stata riproiettata in coordinate UTM fuso 33-WGS84 in ambiente GIS.

Successivamente CLC è stata rasterizzata in ambiente GIS in modo tale da poterla confrontare con la mappa prodotta dalla sperimentazione.

È stato utilizzato il comando *feature to raster* di ArcGIS, ed è stato settato in modo tale da produrre in output un prodotto con risoluzione geometrica di 10 m.

Inoltre nello spazio dedicato al *processing extent* è stata inserita in input la classificazione OR in modo da produrre un'immagine esattamente coregistrata con essa.

Successivamente il dato Corine in formato raster è stato riclassificato in ENVI, usando il *decision tree*, in modo da produrre un risultato coerente con la classificazione OR.

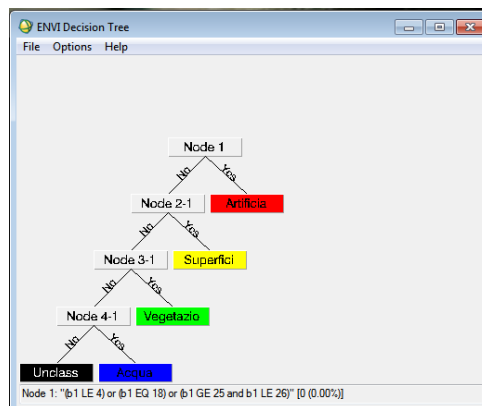


Figura 3.26 Decision tree utilizzato

Il primo confronto effettuato è sulle aree complessive occupate da ciascuna classe di copertura del suolo.

A tale fine è stata generata una terza mappa (Class Majority - CM) derivante da un'analisi di *majority* sulla classificazione OR.

L'analisi di *majority* consiste nell'applicazione all'immagine di un filtro *Kernel* di grandezza scelta dall'utente che sostituisce a ciascun *pixel* centrale il valore della maggioranza dei *pixel* contenuti all'interno del *Kernel*.

In questo caso è stato applicato un Kernel di 25x25, questa operazione fa perdere dettaglio alla mappa tematica prodotta ma fornisce uno strumento di confronto coerente con CLC.

La grandezza del filtro è stata scelta perchè CLC 2012 nasce come un raster con dimensione del *pixel* di 250m. Il filtro 25x25 applicato alla classificazione con pixel di 10m riproduce una situazione analoga ad un raster con risoluzione 250m.

A questo punto sono state confrontate le aree complessive occupate da ciascuna classe di copertura del suolo nelle tre mappe a disposizione.

Di seguito nella tabella 3.1 vengono riportati i risultati del confronto sulle tre mappe OR, CM e CLC12.

La mappa CLC12 non presenta alcuna superficie non classificata.

	AREE COMPLESSIVE [km ²]		
	OR	Class <i>Majority</i>	CLC12
Unclass	93,03	4,37	/
Acqua	3,26	1,26	2,68
Vegetazione	1314,53	1355,67	761,16
Artificiale	337,37	174,46	145,77
Coltivato	1307,87	1515,40	2143,32

Tabella 3.1 Confronto aree complessive, nella classe "Acqua" è stato escluso il mare.

Per poter calcolare le aree che ciascuna classe occupa sul territorio le due classificazioni OR e CM sono state convertite in un file vettoriale in formato *shapefile* (.shp) per poterle utilizzare in ambiente GIS.

L'utilizzo del software QGis si è reso necessario per poter compiere un'analisi più precisa dei dati, in quanto il dato vettoriale permette di estrapolare non soltanto l'area complessiva occupata da ciascuna classe (operazione possibile anche in ENVI con dato raster) bensì offre la possibilità di selezionare soltanto alcuni dei poligoni ed ottenere informazioni su di essi.

Questa potenzialità si è rivelata utile per poter calcolare l'area di superficie non classificata e l'area coperta dalle sole acque continentali.

Infatti nella classe "Acqua" l'area complessiva si riferisce a tutte quelle superfici classificate come acqua ad eccezione della porzione di mare. Si è scelto di escludere il mare dal confronto perché la sua estensione in rapporto alle acque continentali è tale da nascondere ogni variazione significativa nell'individuazione delle acque continentali.

Si segnala inoltre che nell'operazione di riclassificazione di CLC la classe 1.4.1 relativa alle aree verdi urbane è stata assegnata alla vegetazione in maniera tale da avere un confronto più coerente con le mappe prodotte dalla classificazione.

Come secondo elemento di confronto è stata calcolata la matrice dei confusioni tra l'immagine CM e CLC, in modo tale da poter quantificare in termini di *pixel* e in percentuale quale fosse la differenza tra le due mappe.

Si riporta di seguito in figura 3.27 il risultato di tale calcolo.

Overall Accuracy = (30546056/38748192) 78.8322%						
Kappa Coefficient = 0.6934						
Class	Ground Truth (Pixels)					
	Artificiale	Coltivato	Unclass	Acqua	Vegetazione	Totale
Artificiale	1040289	662649	277	4724	36609	1744548
Coltivato	200170	14374014	4433	3066	572370	15154053
Unclassified	4563	43164	3938714	23078	37787	4047306
Acqua	7310	2272	11	4232082	3876	4245551
Vegetazione	205411	6351041	28136	11189	6960957	13556734
Totale	1457743	21433140	3971571	4274139	7611599	38748192

Class	Ground Truth (Percent)					
	Artificiale	Coltivato	Unclass	Acqua	Vegetazione	Totale
Artificiale	71.36	3.09	0.01	0.11	0.48	4.50
Coltivato	13.73	67.06	0.11	0.07	7.52	39.11
Unclassified	0.31	0.20	99.17	0.54	0.50	10.45
Acqua	0.50	0.01	0.00	99.02	0.05	10.96
Vegetazione	14.09	29.63	0.71	0.26	91.45	34.99
Totale	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Class	Commission (Percent)		Omission (Percent)	
	Artificiale	40.37	28.64	704259/1744548
Coltivato	5.15	32.94	780039/15154053	7059126/21433140
Unclassified	2.68	0.83	108592/4047306	32857/3971571
Acqua	0.32	0.98	13469/4245551	42057/4274139
Vegetazione	48.65	8.55	6595777/13556734	650642/7611599

Figura 3.27 Matrice di confusione tra CM e CLC

Dalla matrice di confusione si evince che le due mappe sono sovrapponibili al 78,8%, i maggiori errori ricorrono tra le classi relative alle superficie agricole, superfici artificiali e vegetazione.

Questo è testimoniato anche dai valori degli errori di commissione ed omissione per ciascuna classe.

La classe acqua non presenta notevoli differenze tra le due classificazioni.

Nel successivo paragrafo 3.7 saranno analizzate nel dettaglio le differenze tra le mappe.

3.7 Considerazioni

Il calcolo delle aree complessive ricoperte da ciascuna classe nelle tre mappe analizzate porta a dei risultati molto interessanti.

Le differenze tra le mappe possono dipendere da:

- errori nella classificazione;
- assegnazione delle classi;
- applicazione dell'analisi di *majority* e unità minima cartografabile di CLC (25 ha);
- variazioni sul territorio (*gap* temporale di 4 anni tra le due mappe).

Per evidenziare le differenze tra le mappe si analizzerà il subset in figura 3.28 dove è possibile trovare elementi di ciascuna classe individuata.



Figura 3.28 Subset utilizzato per lo studio delle differenze,
i cerchi indicano zone che verranno analizzate nel dettaglio in seguito

Di seguito vengono riportati i medesimi *subset* di figura 3.28 ottenuti da ciascuna delle tre mappe analizzate (OR, CM, CLC12).

Affianco a ciascun *subset* è posto un grafico che mostra i valori complessivi di area occupata da ciascuna classe nella mappa tematica.

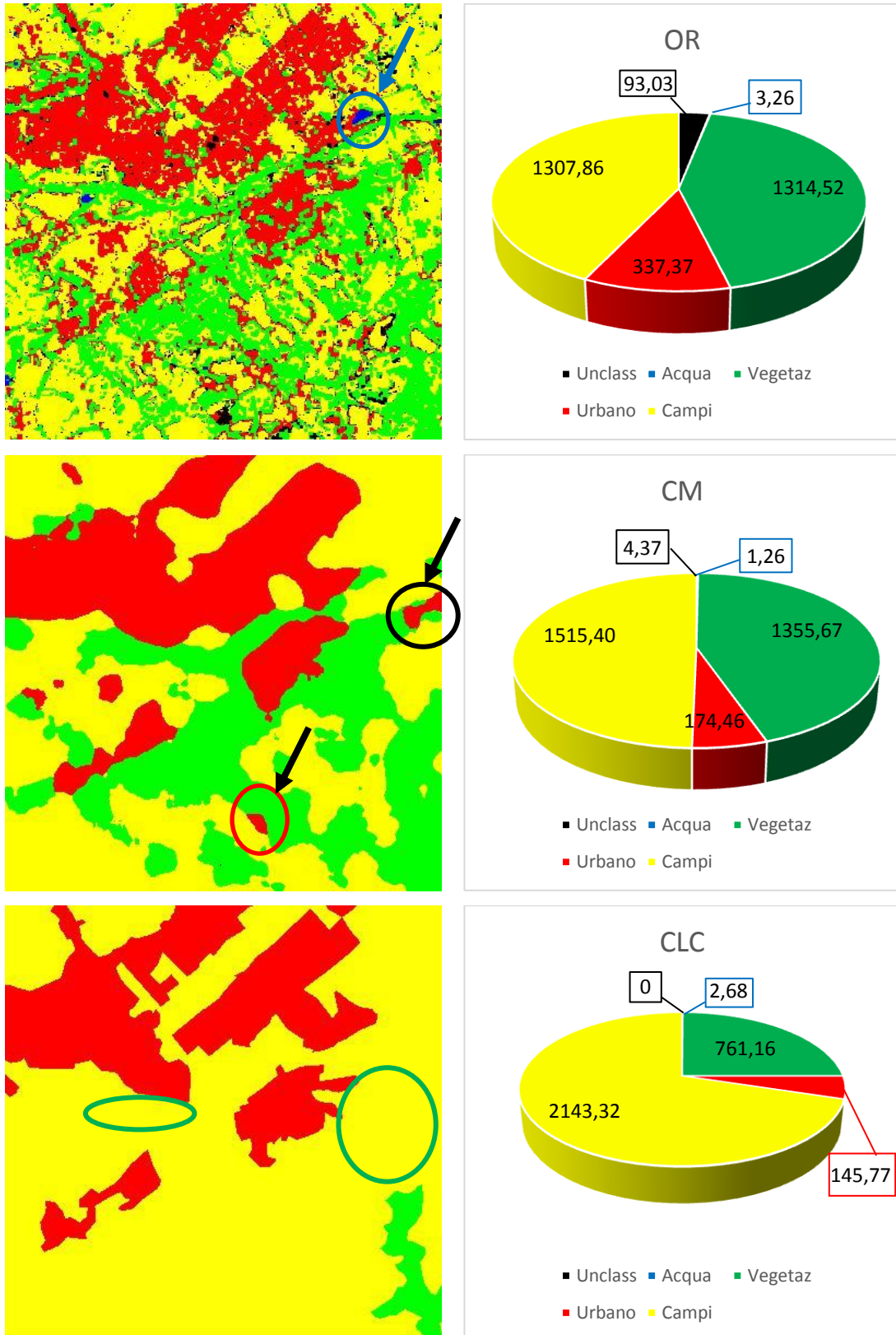


Figura 3.29 Sono riportati a sx le immagini delle mappe tematiche, dall'alto verso il basso troviamo OR, CM e CLC. A dx i rispettivi grafici delle aree complessive.

Le immagini in figura 3.29 mostrano chiaramente le differenze tra le tre classificazioni e ne vengono evidenziate alcune significative riscontrabili anche in altre zone analizzate; come già detto queste dipendono da numerosi fattori.

Nella prima immagine di figura 3.29 è stata evidenziata una area cerchiata in azzurro; tale zona è stata classificata come acqua nella classificazione OR mentre viene esclusa dall'analisi di *majority* e non se ne trova riscontro in CLC.

Questo accade perché l'area è piccola pertanto nell'analisi di *majority* tale informazione viene persa, mentre in CLC è probabile che sia stata esclusa perché inferiore all'unità minima di 25.

Nella seconda immagine è evidenziata un'area con un cerchio nero, tale zona è effettivamente una superficie artificiale visibile anche nella classificazione OR, in CLC non viene riscontrata perché occupa una superficie inferiore a 25 ha.

Il cerchio rosso sulla seconda immagine rappresenta un errore nella classificazione OR dovuto alla confusione presente tra alcune superfici agricole e le superfici artificiali; l'errore è in questo caso esasperato dall'applicazione del filtro *majority* che in quell'area riunisce una serie di errori di alcuni *pixel*.

I cerchi verdi sulla terza immagine indicano zone che CLC classifica come superfici agricole mentre nelle classificazioni prodotte risulta essere un'area vegetata; l'errore è dovuto ad una concomitanza di fattori: il diverso grado di dettaglio delle due immagini, il filtro *majority* che esaspera le differenze tra CLC e la classificazione in zone miste come queste causando perdita di dettaglio. Inoltre in queste zone intervengono anche alcuni errori di classificazione, in quanto alcuni dei campi coltivati coperti da erba o da bassa vegetazione vengono classificati come zone vegetate.

Ci sono altri casi particolari per i quali la differenza dipende dalla modalità con cui le superfici vengono assegnate alle classi; è già stato spiegato il caso delle superfici di verde urbano (classe 1.4.1) che CLC assegna alle superfici artificiali mentre in questa tesi sono state inserite tra le superfici vegetate. Un esempio potrebbe essere il parco "Miralfiore" di Pesaro, una superficie perlopiù vegetata che si trova lungo il corso del fiume Foglia all'interno della città di Pesaro.

Nella classificazione prodotta in questa tesi la zona è stata assegnata correttamente alla classe delle superfici vegetate (in parte anche alla classe delle superfici coltivate in quanto è presente all'interno del parco del suolo nudo), ma nel prodotto CLC l'intera area è indicata come artificiale.

Si riporta l'immagine satellitare del parco "Miralfiore" tratta da Google Earth, la zona analizzata è contornata in verde.



Figura 3.30 Parco "Miralfiore" a Pesaro (www.google.it/maps)

Un altro caso emblematico di differenze tra le mappe dovute alla diversa assegnazione delle classi è il caso dell'aeroporto di Fano.

CLC assegna le superfici aeroportuali alla classe delle superfici artificiali, ciò accade anche nel caso della città di Fano, dove però l'aeroporto consiste in una superficie di suolo nudo parzialmente coperto d'erba, come si vede nella prima immagine di figura 3.31

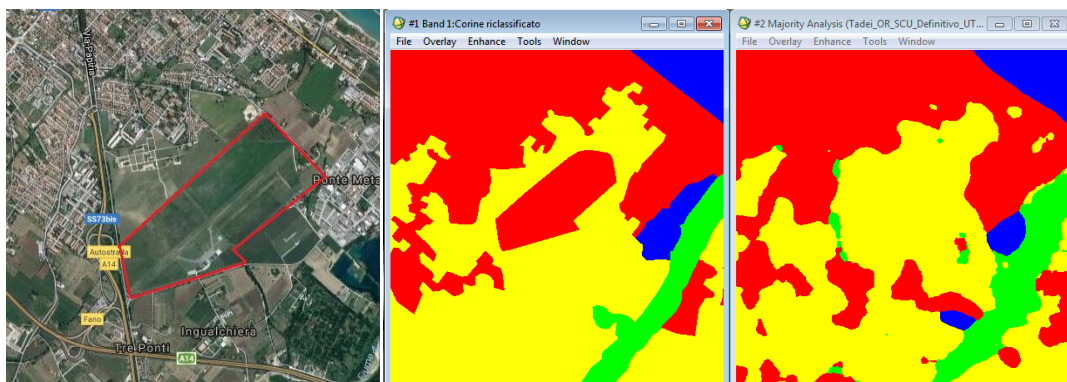


Figura 3.31 Aeroporto di Fano in una immagine satellitare (www.google.it/maps) a sx, al centro porzione di CLC della zona, a dx CM della medesima zona.

La classificazione CM correttamente non assegna la superficie dell'aeroporto alla classe delle superfici urbanizzate perché in questa tesi la mappa prodotta è stata generata con una classificazione supervisionata che analizza soltanto caratteristiche di tipo spettrale. Non sono state aggiunte ulteriori informazioni ottenendo così una mappa di *land cover*.

CLC invece è un prodotto ibrido di *land use* e *land cover*, infatti ai processi di classificazione per fotointerpretazione vengono affiancate ulteriori informazioni come dati in-situ e integrazioni GIS (www.copernicus.com).

Per questo motivo la zona dell'aeroporto di Fano risulta classificata tra le superfici artificiali seppur composta completamente da suolo nudo.

Come già detto all'inizio del capitolo la zona geografica oggetto di questa tesi è caratterizzata da un'urbanizzazione diffusa che vede numerose abitazioni e strade di campagna sparse nel territorio.

Questa particolare conformazione fa sì che nella classificazione OR (immagine centrale nella figura 3.32) compaiano numerosi *pixel* classificati come artificiali in zone per la maggior parte agricole.

Sebbene talvolta queste informazioni risultino derivare da errori nella classificazione, la maggior parte delle volte rappresentano la reale copertura del territorio.

L'analisi di *majority* effettuata però causa una notevole perdita di dettaglio e le piccole aree urbanizzate sparse per le campagne vengono perse a favore soprattutto della categoria dei campi coltivati (immagine di dx nella figura 3.32)

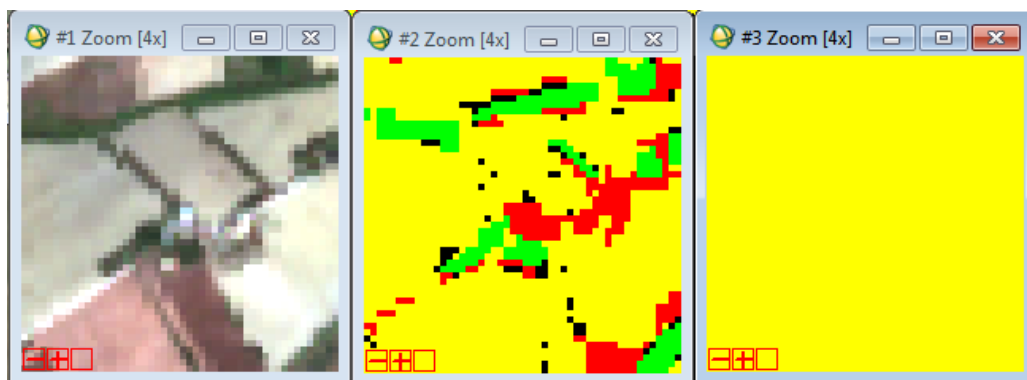


Figura 3.32 a sinistra una zona di campagna con un casolare, al centro la stessa zona nella mappa OR, a destra mappa CM

Le medesime considerazioni valgono per alcune zone di vegetazione, come è evidente in figura 3.32.

Le valutazioni fatte sugli esempi di differenze tra i risultati delle classificazioni riportati nelle figure 3.31 e 3.32 giustificano le notevoli differenze riscontrate nel calcolo delle aree complessive che ciascuna classe occupa sulla mappa.

Si considerano quindi i dati delle aree complessive riportati nella seguente tabella 3.2.

	AREE COMPLESSIVE [km ²]		
	OR	Class <i>Majority</i>	CLC12
Unclass	93,03	4,37	/
Acqua	3,26	1,26	2,68
Vegetazione	1314,53	1355,67	761,16
Artificiale	337,37	174,46	145,77
Coltivato	1307,87	1515,40	2143,32

Tabella 3.2 Confronto aree complessive, nella classe acqua è stato escluso il mare.

La classificazione OR quindi presenta il maggior valore di superficie artificiale mentre CM e CLC presentano simili tra loro ma inferiori, questo risulta coerente con quanto detto precedentemente, si ricorda anche che la metodologia utilizzata e gli errori commessi portano a una lieve sovrastima delle zone urbane.

Si osserva che la classe relativa alla vegetazione occupa aree simili in OR e CM, mentre si riduce di oltre il 40% in CLC. Anche questo risulta in linea con le considerazioni fatte in questo paragrafo, in quanto molte zone vegetate riconosciute nella classificazione OR sono aree inferiori ai 25 ha o non vengono rilevate in CLC per via del minor dettaglio della classificazione.

Anche la classe delle superfici coltivate presenta notevoli differenze, registrando un valore molto più alto in CLC piuttosto che nelle classificazioni prodotte, anche in questo caso legato a tutti i fattori spiegati precedentemente.

L'area complessivamente ricoperta dall'acqua a meno del mare è simile nelle classificazioni OR e CLC, passando dalla classificazione OR a CM si perde oltre il 50% della superficie perché l'analisi di *majority* causa la perdita di molte piccole superfici d'acqua composte da pochi *pixel*.

Ci si potrebbe aspettare che in CLC 2012 la superficie d'acqua sia inferiore anche alla mappa CM, tuttavia anche in questo caso sono probabilmente intervenuti dati esterni, come nel caso dell'aeroporto di Fano, per identificare alcune zone come il corso dei fiumi.

Di seguito (figura 3.33) si riporta il caso del corso del fiume all'altezza della gola del Furlo, in prossimità della diga Enel.

In CLC12 viene riportato un tratto di fiume identificato anche in OR ma che viene perso successivamente all'analisi di *majority*.

In quest'area sono probabilmente stati utilizzati dati aggiuntivi al dato satellitare per l'identificazione del corso del fiume.

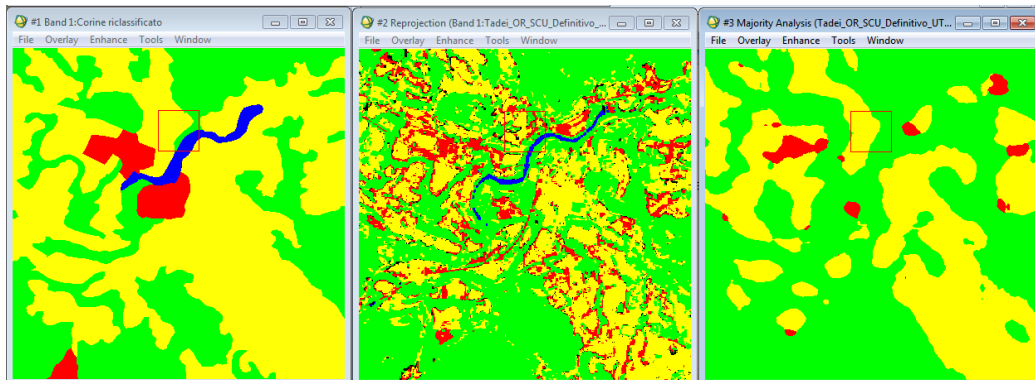


Figura 3.33 a sx CLC12, al centro OR a dx CM

Infine analizzando la zona di studio si può affermare che dal 2012 (anno dell'ultimo aggiornamento di CLC) ad oggi non sono stati riscontrati cambiamenti significativi in termini di copertura del suolo.

La matrice di confusione dà indicazioni più precise su quali siano gli errori commessi, quantificandoli numericamente.

La matrice è stata generata considerando CLC come *ground truth image* (solamente allo scopo di effettuare il confronto) e confrontandola con la CM ottenuta dalla sperimentazione.

Complessivamente il *match* tra le due classificazioni è del 78,83%.

Il 71% delle superfici classificate come artificiale in CLC lo sono anche in CM mentre il 13,73% viene classificato come superficie agricola e il 14,09% come vegetazione.

Questi valori sono giustificati dalle considerazioni fatte nei paragrafi precedenti e sono dovute soprattutto al maggior dettaglio ottenuto con la classificazione OR (e quindi CM).

La minor corrispondenza tra le due mappe si riscontra con la categoria dei campi coltivati, per tutti i motivi spiegati precedentemente: dettaglio della classificazione, unità minima mappabile, errori nella classificazione, differente assegnazione delle classi.

Complessivamente il 67% delle superfici classificate come agricole in CLC lo sono anche in CM, soltanto il 3,09% delle superfici coltivate sono state classificate in CM come urbano e sono dovute perlopiù ad errori nella classificazione, mentre la maggior confusione avviene con la classe della vegetazione: il 29,63% della superficie coltivata in CLC viene classificata come Vegetazione in OR.

Questo errore importante porta ad una notevole sottostima delle zone vegetate in CLC (si veda figura 3.29) ma è coerente con la conformazione del territorio (si veda paragrafo 3.1) dove gli abbondanti campi coltivati sono intervallati da piccole zone vegetate perlopiù inferiori in superficie a 25 ha.

Le zone classificate come vegetate in CLC corrispondono al 91,45% con le analoghe in CM; il 7,52% delle zone vegetate in CLC vengono classificate come urbano.

L'errore commesso riguardo la classe vegetazione sarebbe ancor più severo se la classe 1.4.1 di CLC non fosse stata riclassificata tra le superfici vegetate.

Complessivamente il maggior errore di commissione si registra per la classe della vegetazione con il valore di 48,65%, tale errore è perlopiù dovuto alla commissione di superfici che in CLC sono classificate come agricole.

Per le superfici artificiali l'errore di commissione è del 40,37% dovuto soprattutto alla confusione con la classe delle superfici agricole.

3.8 Approccio object-oriented

Uno dei possibili sviluppi futuri, relativamente all'integrazione di immagini Sentinel radar e multispettrali per la produzione di mappe di uso e copertura del suolo, consiste nell'utilizzo di tecniche di classificazione *object-oriented*.

Un primo test di suddetta procedura è stato effettuato su un subset dell'area di studio che comprende la città di Fano, la sua zona industriale e alcune zone limitrofe tra cui la foce del fiume Metauro.

Il test è stato svolto su immagine OR con il software eCognition Developer 9 prodotto da Trimble.

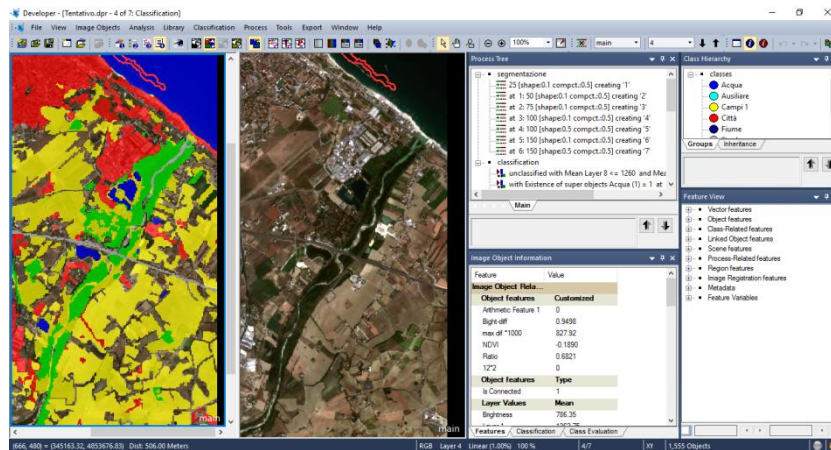


Figura 3.34 Interfaccia di eCognition

Questa tecnica, come già spiegato al paragrafo 2.2.2 consta di due fasi:

- segmentazione;
- classificazione

La segmentazione ha previsto un approccio multilivello implementato mediante un algoritmo di segmentazione multirisoluzione.

Per ciascun livello è possibile scegliere:

- parametro di scala;
- *shape*;
- *compactness*;
- peso relativo di ciascuna banda spettrale.

Il parametro di scala definisce la grandezza degli oggetti, maggiore è il parametro di scala maggiore è la dimensione degli oggetti. Il valore di *shape* indica il peso relativo che a quel livello il software attribuisce alla forma degli oggetti rispetto

all'informazione spettrale; maggiore è il valore di *shape* minore è l'influenza delle caratteristiche spettrali dei *pixel* che compongono gli oggetti. Il terzo parametro regola la compattezza degli oggetti, ossia un valore alto di questo parametro farà sì che il *software* generi degli oggetti compatti; in questa sperimentazione tale valore è stato fissato a 0.5 per tutti i livelli. I parametri di *shape* e *compactness* assumono valori compresi tra 0 e 1.

A tutte le bande è stato attribuito lo stesso peso relativo.

Sono stati creati complessivamente 7 livelli: il primo, con parametro di scala pari a 25 ha prodotto una segmentazione molto fine, cinque livelli intermedi con parametri di scala variabili tra 50 e 150, e il settimo livello con parametro di scala pari a 150 e valore di *shape* pari a 0.5

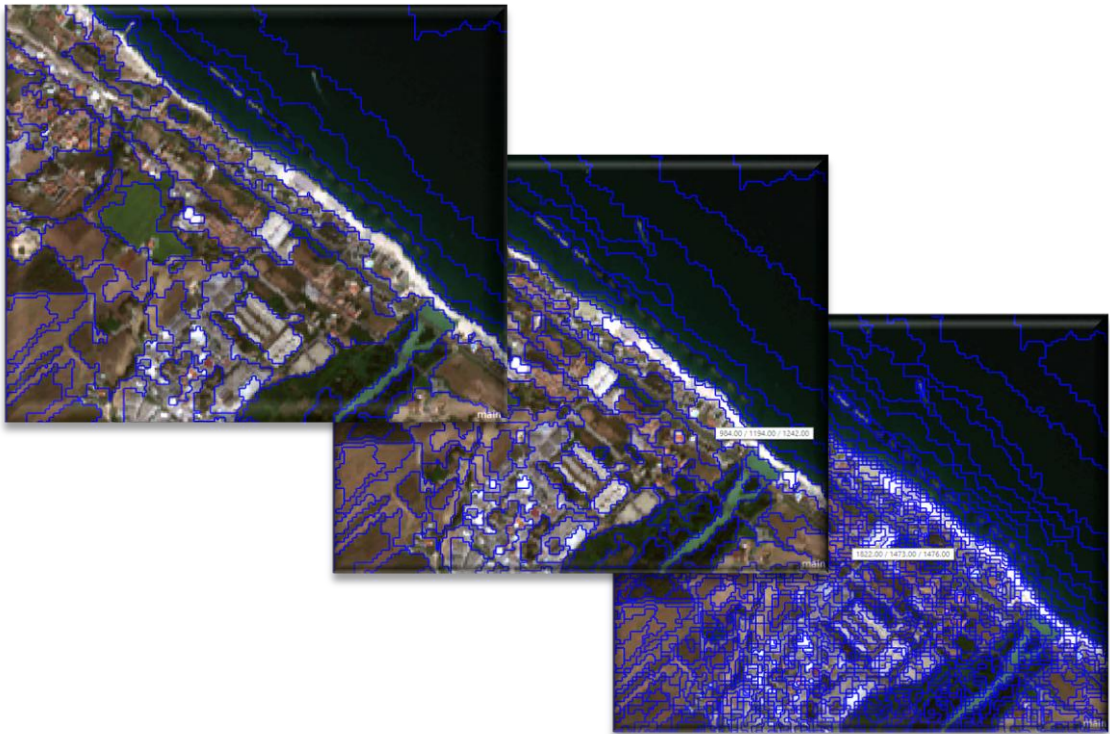


Figura 3.35 Segmentazione multirisoluzione: in alto livello 7, in mezzo livello 4, in basso livello 1

Come si vede in figura le dimensioni degli oggetti variano notevolmente.

Al livello 1 è possibile sfruttare al massimo le informazioni spettrali in quanto gli oggetti sono costituiti da pochi *pixel*, ai livelli superiori gli oggetti sono più grandi pertanto il valore spettrale di ciascun oggetto è mediato su molti *pixel*.

Il livello 7 è stato utilizzato per classificare oggetti molto grandi ed omogenei, nello specifico è stato possibile classificare l'acqua, riuscendo con successo ad estrarre sia il mare che dei laghi.

Il livello 4 è quello in cui è stata svolta quasi per intero la classificazione.

Il processo di classificazione è sequenziale, sono state generate delle regole in serie che compongono il *process tree*.

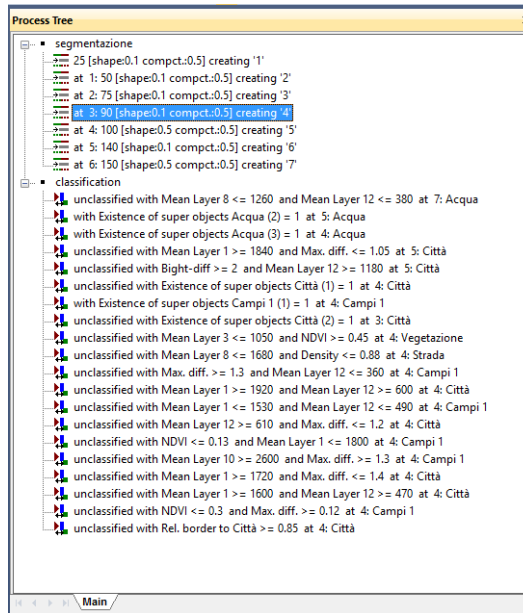


Figura 3.36 Decision tree elaborato

È possibile creare delle regole che contengano dei vincoli legati alle sole caratteristiche spettrali, imponendo delle soglie, oppure integrarle con regole di carattere geometrico e relazionale; l'operatore può scegliere su che livello intervenire con ciascuna regola e su quale classe.

In questo modo è possibile intervenire sull'immagine classificando a ciascun passo soltanto la porzione rimasta non classificata negli *step* precedenti.

Per la classificazione degli oggetti appartenenti alla categoria dell'acqua è stata applicata una regola basata sulle bande 8 (NIR) e 12 (Radar); a queste lunghezze d'onda gli oggetti registrano valori molto bassi di DN.

La vegetazione è stata individuata utilizzando l'indice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) ossia una combinazione dei valori della banda 4 del rosso e della banda 8. La vegetazione presenta dei valori di NDVI alti, imponendo un valore di soglia pari a 0,4 e una seconda regola legata ai valori assunti nella banda 3 (Verde) è stato possibile individuare tutte le superfici vegetate al livello di segmentazione 4.

Per caratterizzare le superfici artificiali sono state utilizzate differenti informazioni spettrali.

Poichè gli oggetti contenenti aree urbane presentano valori di DN alti nella banda 1, quest'ultima è stata utilizzata più volte per ridurre la confusione tra le superfici artificiali e coltivate.

eCognition fornisce le *feature* spettrali denominate *Brightness* e *Max difference* le quali contengono relazioni tra tutte le bande disponibili; le superfici urbane generalmente restituiscono alti valori di *Brightness* e bassi valori di *Max difference*.

È stata generata una terza *feature* che fosse la combinazione delle due precedenti in maniera tale da utilizzarle contemporaneamente assieme ad ulteriori informazioni spettrali. Anche la banda radar si è rivelata utile nella distinzione tra zone artificiali e agricole in quanto generalmente le superfici urbane presentano più alti valori di DN legati al *backscattering*.

Le superfici coltivate sono quelle che presentano la maggior variabilità sia geometrica che spettrale, pertanto sono state utilizzate le bande 10 e 12 insieme all'indice NDVI e la *feature Max Difference*.

Per individuare l'autostrada è stata implementata una regola che contiene una combinazione di dati spettrali (NIR) e geometrici sfruttando una soglia legata alla *density* che restituisce valori bassi (inferiori a 1) per gli oggetti che hanno una forma allungata.

È possibile così individuare in maniera molto precisa il tracciato dell'infrastruttura (linea grigia nella seguente figura 3.37); la classificazione *pixel-based* non presenta la stessa efficacia su tutta la lunghezza dell'autostrada.

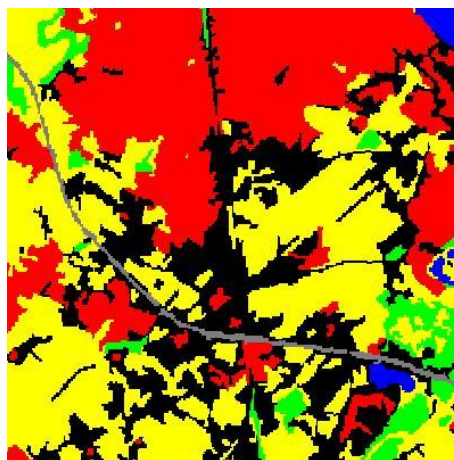


Figura 3.37 subset della classificazione *object-oriented*, la linea grigia è l'autostrada

L'utilizzo della banda 8 però causa una situazione di confusione tra l'autostrada e il fiume, tale errore è comprensibile in quanto i valori nell'infrarosso sono molto simili tra i due elementi così come molto simile è la forma. Si deve considerare inoltre che il fiume è in periodo di magra.

Infine è stata generata una regola relazionale che facesse sì che tutte le aree contornate dalla classe della superfici artificiali fossero classificate come tali.

Il vantaggio dell'utilizzo di un approccio alla classificazione ad oggetti risiede proprio nella possibilità di integrare tali informazioni con quelle spettrali.

Di seguito si riporta un confronto visivo con la classificazione *pixel-based*.

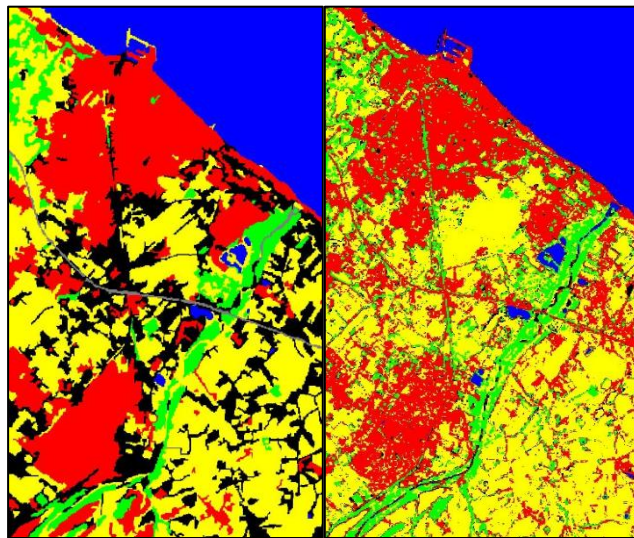


Figura 3.38 Classificazione *object-oriented* a sinistra e *pixel-based* a destra

La classificazione *object-oriented* presenta notevoli difficoltà nella standardizzazione delle operazioni di classificazione in quanto le regole che vengono imposte all'interno del *process tree* contengono delle soglie legate ai valori della bande spettrali utilizzate che spesso si rivelano inadatte qualora si cambi subset all'interno della stessa immagine. Si può affermare che la medesima situazione si verifica nella classificazione *pixel-based* in quanto la selezione dei *training sites* diventa tanto più complessa quanto più grande è l'immagine.

In generale un'immagine più grande presenta delle caratteristiche spettrali e geometriche molto più variegata rispetto ad un piccolo subset della stessa.

Capitolo 4. Conclusioni

Il lancio dei satelliti Sentinel di ESA rappresenta una grande opportunità per l'Europa di creare un sistema tecnologico in grado di fornire immagini radar e multispettrali *open source* a tutti i cittadini del mondo.

L'accesso ad immagini con risoluzione geometrica di 10 m è una grande occasione per tutti coloro che usufruiscono del dato satellitare.

L'obiettivo primario di questa tesi è di sperimentare l'utilizzo delle immagini radar Sentinel-1 e multispettrali Sentinel-2 per poter generare delle mappe tematiche di copertura del suolo (*land cover*).

Si tratta di una delle prime sperimentazioni che prevedano l'utilizzo combinato di immagini Sentinel-1 e Sentinel-2.

Tali dati satellitari sono stati utilizzati sia singolarmente che in combinazione per valutarne appieno le potenzialità.

La zona scelta per la sperimentazione riguarda le valli dei fiumi Foglia e del Metauro, coincidendo all'incirca con la provincia di Pesaro-Urbino. All'interno del lavoro di tesi, accanto alle operazioni di elaborazione dei dati condotte in laboratorio, è stato eseguito un rilievo GPS sul campo per l'individuazione di *check sites* da utilizzare ai fini di una validazione rigorosa dei risultati della sperimentazione.

Per raggiungere gli obiettivi preposti sono state implementate tecniche di classificazione supervisionata *pixel based* con classificatore *maximum likelihood*.

Sono state generate in definitiva due mappe tematiche derivanti dall'utilizzo del dato ottico sia singolarmente che integrato al dato radar.

L'accuratezza ottenuta dalla classificazione del solo dato multispettrale si può definire buona attestandosi al 91,1%; l'integrazione del dato radar causa un incremento di accuratezza globale fino a raggiungere il valore di 92,9%.

Queste percentuali confermano che l'utilizzo delle immagini provenienti dalle piattaforme Sentinel, se adeguatamente trattate in fase di *image processing*, può fornire classificazioni molto accurate.

È stata quindi prodotta una mappa di *land cover* con risoluzione geometrica di 10 m che fornisce un dettaglio sulla copertura del suolo delle zone analizzate maggiore rispetto a qualsiasi dato globale *open source* fino ad ora disponibile.

Occorre ricordare infatti che attualmente i dati di *land cover* disponibili gratuitamente *on line* hanno una risoluzione geometrica massima di 30 metri (*Global Land Cover*).

Come noto, all'interno del programma *Copernicus* sviluppato da ESA è stata creata una mappa di copertura del suolo europea, *Corine Land Cover*, con una risoluzione spaziale di 250 metri.

Per numerose applicazioni, soprattutto a scala nazionale o regionale, tale dato può essere sufficiente in termini di risoluzione, mentre risulta molto scarso per valutazioni su scale minori.

La mappa tematica generata in questa tesi e il prodotto *Corine Land Cover* sono stati confrontati valutando l'area complessiva che ciascuna classe analoga ricopriva sulla mappa.

Ne è emerso che il match tra le due mappe è del 78,8% e le maggiori differenze provengono dalle aree relative alle zone agricole.

Questo dipende da diversi fattori, tra i quali la diversa scala di dettaglio, ma in generale si può affermare che le differenze dipendano in gran parte dal fatto che il prodotto CLC è un ibrido di *land use/land cover*, in quanto alla sua realizzazione, oltre ai dati satellitari, concorrono ulteriori informazioni.

In definitiva si può affermare che il lavoro svolto in questa sperimentazione potrebbe essere inteso come un miglioramento delle mappe *Corine Land Cover* in quanto è stata generata una mappa tematica puramente di *land cover* con una risoluzione geometrica di 10 metri. Tale prodotto potrebbe essere integrato da dati supplementari e fornire una base decisionale molto solida per studi sul territorio e per la pianificazione.

È stato svolto anche un test preliminare di classificazione *object-oriented* il quale ha dato risultati positivi.

Un eventuale sviluppo futuro della sperimentazione potrebbe avere l'obiettivo di generare una procedura di classificazione completamente automatizzata, eventualmente integrando all'analisi ulteriori algoritmi di classificazione e il raffinamento delle tecniche *object-oriented*.

Sarà inoltre possibile integrare ulteriori dati Sentinel provenienti dalle piattaforme che verranno lanciate in orbita nel prossimo futuro.

BIBLIOGRAFIA

- **ESA**, 1975, “*Convention of establishment of European Space Agency*”.

- **Berger M., Moreno J., Johannessen J.A., Levelt P.F., Hanssen R.F.**, 2012, “*ESA’s sentinel mission in support of Earth system science*”, *Remote Sensing of Environment*, n. 120, p. 84-90.

- **Malenovsky Z., Rott H., Chilar J., Schaepman M.E., Garcia-Santos G., Fernandes R., Berger M.**, 2012, “*Sentinel for science: Potential of Sentinel-1,-2 and -3 mission for scientific observation of ocean, cryosphere and land.*”, *Remote Sensing of Environment*, n. 120, p. 91-101.

- **Trianni G.**, 2006, “*Introduzione al Telerilevamento per l’osservazione della Terra*”, dispense, Università degli Studi di Pavia, Facoltà di Ingegneria - Dipartimento di Elettronica.

- **Lillesand, Kiefer, Chipman**, 2015, 6° edizione, “*Remote Sensing and image interpretation*”, Wiley.

- **De Sherbinin A.** (2002) “*A CIESIN Thematic Guide to Land-Use and Land-Cover change (LUCC)*”. Columbia University, Center for International Earth Science Information Network (CIESIN), Palisades, NY, USA.

- **Mare M.M.R, Mihai B.A.**, 2016, “*Mapping land cover using remote sensing data and GIS techniques: a case of study of Prahova Subcarpathians*”, *International Conference – Environment at a Crossroads: SMART approaches for a sustainable future*, vol. 32, p. 244-255.

- **Wang Y., Feng C., Vu Duc H.**, 2011, “*Integrating multi-sensor remote sensing data for land use/cover mapping in a tropical mountainous area in northern Thailand*”, *Geographical Research*, vol. 50, p. 220-231.

- **Novelli A., Aguilar M., Nemmaoui A., Aguilar F., Tarantino E.,** 2016, “*Performance evaluation of object based greenhouse detection from Sentinel-2 MSI and Landsat 8 OLI data: A case study from Almería (Spain)*”, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 52, p. 403-411.

- **Al-doski J., Mansor S.B., Shafri H.Z.M.,** 2013, “*Image Classification in Remote Sensing*”, Journal of Environment and Earth Science, vol. 3, No. 10.

- **Bitelli G.,** 2015, “*La classificazione*”, slides del corso Telerilevamento e GIS, Università di Bologna, Scuola di Ingegneria e architettura - DICAM.

- **Franci F.,** 2011, “*Classificazione e dinamica di sviluppo di aree urbane da immagini satellitari per la gestione del rischio*”, Tesi di laurea, Relatore: Gabriele Bitelli, Università di Bologna - DICAM.

- **Passuello M.,** 2013, “*Strategie di classificazione automatica di immagini multispettrali per aree urbane*”, Tesi di laurea, Relatore: Gabriele Bitelli, Università di Bologna - DICAM.

- **Picchio S.,** 2010, “*Classificazione object-oriented*”, Università "Iuav" di Venezia, Facoltà di pianificazione del territorio.

- **Heremans R., Willekens A., Borghys D., Verbeeck B., Valkenborgh J., Acheroy M., Pernel C.,** 2003, “*Automatic detection of flooded areas on ENVISAT/ASAR images using an object-oriented classification technique and an active contour algorithm*”, International Conference on recent advances in space technologies (RAST), Istanbul.

- **Blaschke T.,** 2009, “*Object based image analysis for remote sensing*”, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Elsevier, vol. 65, p. 2-16.

- **European Environment Agency,** 1995, “*CORINE Land Cover*”.

- **Shiraishi T., Motohka T., Thapa R.B., Watanabe M., Shimada M.**, 2014, "*Comparative assessment of supervised classifiers for land use-land cover classification in a tropical region using time-series PALSAR mosaic data*", Journal of selected topics in applied Earth observations and remote sensing, vol. 7, No. 4.

- **Ullmann T., Schmitt A., Roth A., Duffe J., Dech S., Hubberten H.W., Baumhauer R.**, 2014, "*Land Cover Characterization and Classification of Arctic Tundra Environments by Means of Polarized Synthetic Aperture X- and C-Band Radar PolSAR) and Landsat 8 Multispectral Imagery — Richards Island, Canada*", Remote Sens. 6, No. 9, p. 8565-8593.

- **Haack B., Bechdol M.**, 2000, "*Integrating multisensor data and RADAR texture measures for land cover mapping*", Computer & Geoscience, n. 26, p. 411-421.

- **Ban Y., Gong P., Giri C.**, 2015, "*Global land cover mapping using Earth observation satellite data: Recent progresses and challenges*", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Elsevier, vol. 103, p. 1-6.

- **Chen Ju., Chen Ji., Liao A., Cao X., Chen L., Chen X., He C., Han G., Peng S, Lu M., Zhang W., Tong X., Mills J.**, 2015, "*Global land cover mapping at 30 m resolution: A POK-based operational approach*", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Elsevier, vol. 103, p. 7-27.

- **Gong P. at al.**, 2013, "*Finer resolution observation and monitoring of GLC: first mapping results with Landsat TM and ETM+ data*", International Journal of Remote Sensing, n. 34, p. 2607-2654.

Sitografia:

- www.esa.int
- scihub.copernicus.eu
- www.copernicus.eu
- www.wikipedia.it
- www.google.com/earth
- www.google.it/maps
- www.elsevier.com
- www.sciencedirect.com
- www.irea.cnr.it
- oceanservice.noaa.gov
- www.ossmeteo.uniurb.it

