

18/11/2025

Quantificazione delle aree coperte da vegetazione nei centri abitati delle maggiori realtà urbane italiane a partire da immagini aeree (ortofoto)

Nota metodologica

A cura di:

Fabrizio De Fausti⁽¹⁾, Marco Di Zio⁽²⁾, Giuseppe Lancioni⁽³⁾, Stefano Mugnoli⁽⁴⁾, Donatella Papa⁽¹⁾, Alberto Sabbi⁽⁴⁾, Francesco Sisti⁽¹⁾

⁽¹⁾ DIRM – DCME – MEC

⁽²⁾ DIRM – DCME

⁽³⁾ DIPS – DCAT – ATD

⁽⁴⁾ DIPS – DCAT – ATA

Introduzione

Il telerilevamento (in inglese Remote Sensing) è una branca delle scienze applicate che mira a ricavare informazioni qualitative e quantitative rilevando oggetti 'a distanza', per mezzo di sensori installati su aerei, satelliti, droni che misurano la radiazione elettromagnetica emessa, riflessa o trasmessa dagli oggetti indagine dello studio.

Da molti decenni, l'osservazione della Terra tramite satelliti artificiali si è affermata come una tecnica efficace per monitorare il nostro pianeta e raccogliere dati estremamente utili per lo studio di numerosi aspetti ambientali e territoriali (come lo stato della vegetazione, l'inquinamento delle acque, il dissesto idrogeologico, la copertura e il consumo del suolo, ecc.).

I vantaggi delle immagini telerilevate sono significativi, a partire dalla facilità con cui si possono acquisire informazioni territoriali che altrimenti sarebbero estremamente costose da ottenere. Inoltre, la possibilità di disporre di immagini con continuità nel tempo consente lo studio di fenomeni che altrimenti sarebbe impossibile analizzare.

Le grandezze fisiche rilevate dai sensori sono di tipo elettromagnetico, come ad esempio la radiazione emessa, la fase, la polarizzazione e l'ampiezza del campo elettrico, che determinano la cosiddetta "firma spettrale" degli oggetti rilevati. La firma spettrale di un oggetto rappresenta il suo peculiare comportamento rispetto alle radiazioni elettromagnetiche incidenti a diverse lunghezze d'onda; conoscendo la firma spettrale di un oggetto, è possibile identificarlo.

Uno degli "oggetti" di studio del telerilevamento è storicamente la vegetazione; numerosi indici spettrali sono stati sviluppati da studiosi per evidenziare vari aspetti della copertura vegetale (come lo stress idrico, la quantificazione della biomassa, i danni causati da incendi, ecc.).

Tutto ciò si basa sul comportamento della clorofilla (Figura 1), in relazione alla sua capacità di assorbire la radiazione luminosa a diverse lunghezze d'onda.

Attraverso l'uso di immagini telerilevate questo studio prende in considerazione la quantificazione del verde sul territorio urbano delle 14 città metropolitane italiane.

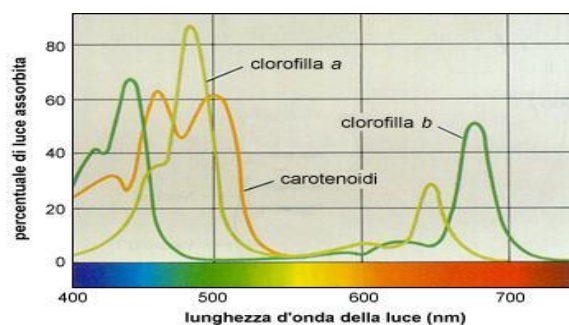


Figura 1: Il grafico mostra come la clorofilla (clorofilla a e b) assorbe in maniera diversa la radiazione elettromagnetica con lunghezza d'onda differente.

Fonte principale

Le immagini utilizzate sono ortofoto ad alta risoluzione spaziale, fornite dall'AGEA (Agenzia per le Erogazioni in Agricoltura), rilevate attraverso voli aerei che, con cadenza triennale, coprono l'intero territorio nazionale e vengono periodicamente rilasciate all'ISTAT a partire dal 2005. La risoluzione di un pixel è di 20 cm sul terreno per le aree urbane ed extraurbane (dopo il 2010) e di 50 cm per le aree extraurbane (prima del 2010). Ogni ortofoto è composta da 4 bande spettrali:

- Rosso (Red) λ 650 nm;
- Verde (Green) λ 550 nm;
- Blu (Blue) λ 450 nm;
- Vicino Infrarosso (NIR) λ 800 nm.

Le ortofoto, date queste caratteristiche specifiche, possono essere efficacemente utilizzate per calcolare gli indici di vegetazione e per analizzare la copertura vegetale dei centri urbani delle principali città italiane.

Gli indici radiometrici

Gli indici utilizzati per l'identificazione della vegetazione sono calcolati in funzione dei valori delle bande spettrali disponibili delle ortofoto. In una prima fase di sperimentazione e test sono stati presi in considerazione diversi indici di vegetazione:

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [1]-[2]: è sicuramente il più famoso e utilizzato indice radiometrico. Basato sul comportamento spettrale della clorofilla rispetto ad altri elementi (ad esempio suolo e acqua) (Figura 2), è calcolato dalla seguente formula:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$$

Un'altra versione sfrutta la differenza della riflettanza¹ con il canale del Blu invece che del Rosso:

$$NDVI' = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{BLUE}}{\rho_{NIR} + \rho_{BLUE}}$$

ENDVI (Enhanced Normalized Difference Vegetation Index) [3]: utilizza il verde come canale di riflettanza; ricordiamo infatti che una pianta in condizioni ottimali riflette sia il verde che il NIR. Si può quindi implementare la formula dell'ENDVI come segue:

$$ENDVI = \frac{[(\rho_{NIR} + \rho_{GREEN}) - (2 \rho_{BLUE})]}{[(\rho_{NIR} + \rho_{GREEN}) + (2 \rho_{BLUE})]}$$

NDVI_{vis} (Normalized Difference Vegetation Index_{vis}): utile per ortofoto in cui la banda NIR risulta compromessa e non utilizzabile:

$$NDVI_{vis} = \frac{[(2 \rho_{GREEN}) - (\rho_{RED} + \rho_{BLUE})]}{[(2 \rho_{GREEN}) + (\rho_{RED} + \rho_{BLUE})]}$$

Dopo una ricerca bibliografica tesa a determinare quale potesse essere l'indice radiometrico che meglio discrimina la vegetazione e quindi possa permettere una più comoda determinazione della soglia [4], [5] è stato deciso che l'indice migliore da usare in ambito urbano è certamente l'NDVI. All'interno dei centri abitati bisogna considerare che la vegetazione, almeno in alcune aree, possa essere 'stressata'; in questo caso l'NDVI (red) riesce a discriminarla meglio. Per una maggiore comprensione della questione in Figura 2 un paragone tra l'NDVI(red) e l'NDVI'(blue).

¹ La riflettanza, indicata dalla lettera dell'alfabeto greco ρ misura la capacità di riflettere parte della luce incidente su una data superficie o materiale. Rappresenta il rapporto tra intensità della radiazione riflessa e l'intensità della radiazione incidente. È una grandezza adimensionale.

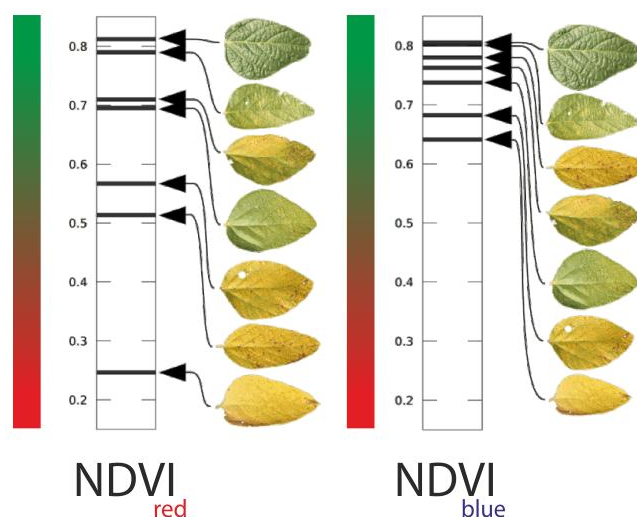


Figura 2. Confronto schematico tra l'NDVI-red e l'NDVI-Blue.

Fonte: <https://blog.analistgroup.com/indice-ndvi-blue-e-ndvi-red-quali-scegliere/>

Anche per l'ENDVI si può affermare la stessa cosa [6].

In Figura 3 una rappresentazione schematica della differente riflettanza al rosso e al vicino infrarosso di alcune tipologie di copertura del suolo e foglie.

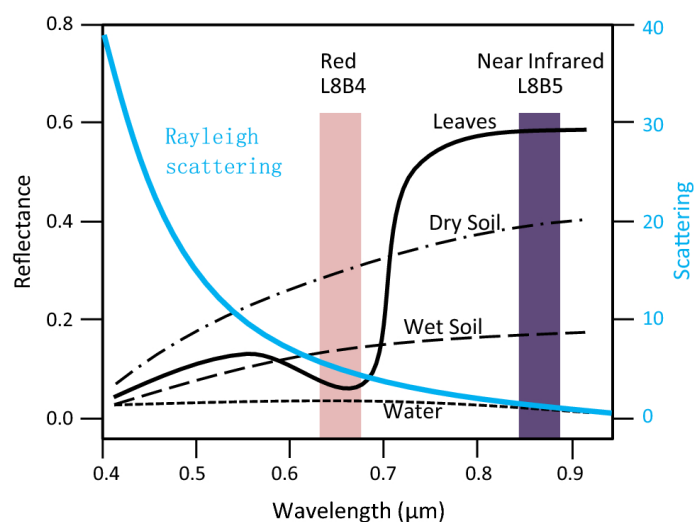


Figura 3. Il grafico mostra come le diverse tipologie di copertura del suolo riflettono in maniera diversa le lunghezze d'onda del rosso e del NIR [7].

Riconoscimento della vegetazione

Il calcolo dell'indice NDVI restituisce immagini in cui ogni pixel assume un valore continuo compreso tra [-1,1]; valori più alti indicano una maggiore presenza di vegetazione con clorofilla. E' possibile misurare la vegetazione urbana a partire dalle ortofoto originali, identificando i pixel associati alle aree di copertura vegetale attraverso un processo decisionale basato sul confronto del valore dell'NDVI con una soglia prestabilita. Per implementare questo processo, è fondamentale effettuare un'analisi dettagliata dell'istogramma dell'NDVI relativo all'immagine acquisita, al fine di determinare il valore soglia (threshold) che permetta di classificare un pixel come 'verde' (Figura 4). Tale valore viene quindi utilizzato per generare una mappa binaria o

maschera, indicativa della presenza di vegetazione (Figura 5).

Poiché l'andamento dell'istogramma riflette le specifiche caratteristiche della copertura del suolo di ciascun centro urbano, esso può variare significativamente tra diverse città. Ad esempio se in un'area urbana non sono presenti corsi d'acqua di un certo rilievo, si potrebbe non presentare il picco dei valori negativi che identifica appunto l'acqua. Quindi ogni città presenta un istogramma proprio dovuto alla differente distribuzione delle varie tipologie di copertura del suolo.

Questo rende necessario sviluppare e implementare un algoritmo robusto e adattativo, in grado di individuare in modo efficace la soglia dell'NDVI adatta per ogni contesto urbano.

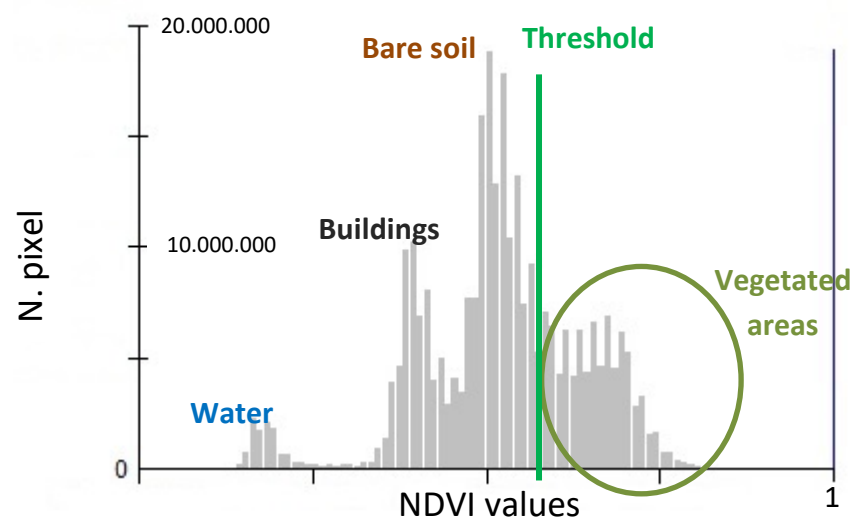


Figura 4. Istogramma dei valori di NDVI che mostra picchi caratteristici di diverse tipologie di copertura del suolo.

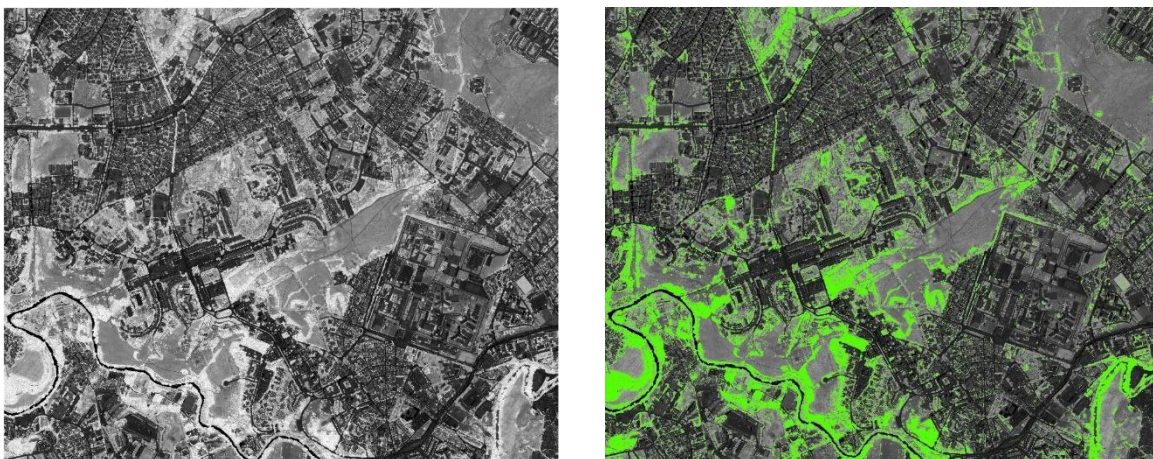


Figura 5. Centro urbano di Roma. A sinistra elaborazione in toni di grigio dell'indice NDVI a destra la maschera di vegetazione generata con una soglia di 0.31. Fonte: Elaborazione Istat su ortofoto AGEA 2017.

Descrizione del processo

Per ogni anno disponibile e per ogni città si eseguono le elaborazioni necessarie alla preparazione dei dati, come descritto di seguito.

L'unità spaziale dell'analisi è "la località di centro abitato capoluogo" così come definita nelle Basi Territoriali Istat 2021, a cui nel seguito ci si riferirà come *centro abitato capoluogo*.

Dalla banca dati delle Basi Territoriali (BT) ISTAT 2021 [8] si ottengono i confini del *centro abitato capoluogo*² della città metropolitana di interesse; successivamente, si uniscono e si ritagliano le ortofoto che coprono la stessa area. Questo processo produce un'immagine raster georeferenziata (*mosaico*, cioè l'unione di tutte le immagini aeree che compongono la città di interesse).

Il calcolo dell'indice radiometrico NDVI è effettuato esclusivamente per i centri abitati capoluogo, definiti e delimitati nelle Basi Territoriali dell'ISTAT. Estendere la quantificazione delle aree vegetate all'intero territorio comunale potrebbe comportare distorsioni per il calcolo degli indicatori di copertura, a causa della presenza di aree agricole e boschive in aree dove la popolazione è poco presente.

Si può considerare la possibilità di estendere la quantificazione del verde oltre che alle 14 città metropolitane italiane, anche ad altre località abitate rappresentate nelle Basi Territoriali dell'ISTAT, oppure alle località abitate di altre città rilevanti (ad esempio i comuni capoluogo di provincia).

Metodo adattativo per l'individuazione della soglia NDVI per la classificazione del verde

Di seguito sono descritti i passi della procedura che abbiamo denominato *two steps* per individuare in maniera adattativa la migliore soglia NDVI necessaria per classificare il verde.

1. Dopo la fase di preprocessing dal mosaico si calcola l'istogramma dei valori NDVI. Questo processo produce un'immagine a un solo canale (in scala di grigi) con i valori di NDVI relativi all'area urbana di interesse.
2. Si applica uno smoothing all'istogramma NDVI utilizzando l'algoritmo di Kernel Density Estimation (KDE) [9], [10]. Successivamente, si individua una soglia approssimativa di NDVI, situata nel minimo locale più a destra dell'istogramma. Questa soglia permette di identificare una prima copertura vegetale.
3. Al mosaico NDVI viene applicato l'algoritmo di rilevamento dei bordi Canny Edge [11], comunemente utilizzato in computer vision, per identificare i bordi presenti

² La località di centro abitato capoluogo è definita nelle basi territoriali 2021. I relativi cartogrammi sono reperibili nel file "Allegato.zip". Questa rappresenta il centro abitato dove è localizzata la casa comunale, non necessariamente il centro più importante dal punto di vista demografico. [8]

nell'immagine. Questo processo consente la segmentazione dell'immagine, individuando le zone di transizione tra diversi elementi territoriali, come edifici, prati, strade, boschi e cespugli. L'algoritmo opera calcolando i gradienti e identificando i bordi caratterizzati da una variazione significativa nei valori dell'indice NDVI.

Tra tutti i bordi individuati al punto 3, vengono selezionati esclusivamente quelli relativi alle aree di vegetazione, campionate utilizzando la prima maschera di verde ottenuta nella fase 2 con l'algoritmo KDE.

4. Viene applicata una tecnica di buffering ovvero l'espansione dei bordi rilevati, con l'obiettivo di estendere l'area intorno ai bordi di vegetazione selezionati al punto 4. Questo buffer viene utilizzato come maschera sul mosaico NDVI originale per ricampionare i pixel nelle regioni di maggiore interesse, riducendo così il rumore introdotto dalle aree irrilevanti [12] (Figura 5).
5. Infine, si applica l'algoritmo di clustering di Otsu [13] all'istogramma ricampionato per determinare una soglia ottimale per l'identificazione delle aree verdi. Questo algoritmo viene tradizionalmente impiegato come metodo di clustering per determinare automaticamente la soglia ottimale in contesti a due classi minimizzando la varianza intraclasse. Questa caratteristica lo rende particolarmente adatto per il nostro caso, in cui il clustering si limita a due classi.
6. Una volta individuata la soglia ottimale, viene creata una mappa binaria del centro urbano che, per ogni pixel, indica la presenza o l'assenza di vegetazione. Questa mappa rappresenta un prodotto intermedio essenziale per il calcolo finale degli indicatori di verde.
7. Per la costruzione di indicatori che considerino le dimensioni delle aree verdi, si esegue un processo noto come clumping. In questo processo, i pixel che indicano la presenza di vegetazione e che sono spazialmente adiacenti vengono aggregati in un'unica entità chiamata clump.

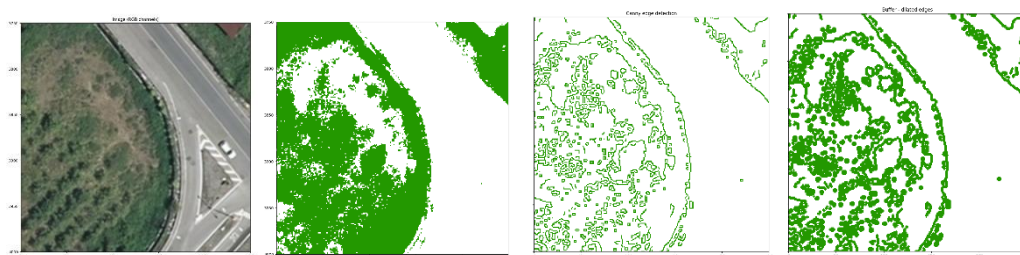


Figura 5. Da sinistra a destra le fasi del processo descritto: Ortofoto originale; Maschera KDE; Bordi rilevati da Canny edge; Buffering di 5 pixel.

La metodologia descritta permette un'efficace identificazione delle aree coperte da vegetazione.

Indicatori di vegetazione

Con le informazioni precedentemente ottenute vengono calcolati i seguenti indicatori che sintetizzano la quantità di vegetazione nei Centri abitati capoluogo delle città di interesse:

1. **Verde totale percentuale:** è il rapporto percentuale della superficie di verde totale sulla superficie del centro abitato capoluogo. Rappresenta un indicatore di 'densità' territoriale della vegetazione nel centro abitato.

2. **Verde totale percentuale aree $\geq 100\text{mq}$:** è il rapporto percentuale della superficie di verde totale delle aree con superficie maggiore di 100 mq sulla superficie del centro abitato capoluogo. Questo indicatore è utile per comprendere la quantificazione del verde al netto di aree di piccole dimensioni, trascurabili dal punto di vista statistico.
3. **La variazione del verde totale tra due voli:** indica la variazione della percentuale di verde totale per aree superiori a 100 mq. È importante per comprendere la variazione nel tempo³ del verde nel centro abitato capoluogo. L'intervallo temporale tra due voli è di tre anni.
4. **Quartili della distribuzione della dimensione delle aree verdi:** di tutte le aree verdi con superficie superiore a 100 mq viene calcolata la distribuzione della superficie in mq e sono riportati il primo, secondo e terzo quartile (Q1, Q2, Q3). È un indicatore utile per quantificare la dimensione delle aree verdi nel centro abitato capoluogo e restituisce una misura della loro frammentazione.

La valutazione dell'accuratezza dei dati ottenuti (Accuracy assessment)

Quando si parla di 'accuracy assessment' (valutazione di accuratezza) relativamente a un prodotto ottenuto mediante classificazione di immagini telerilevate, si intende il processo di confronto tra l'immagine classificata e una fonte di dati di riferimento, detta "ground truth" o di verità al suolo. L'obiettivo è quello di determinare quanto accuratamente l'immagine classificata rappresenti la realtà.

L'accuracy assessment è uno step cruciale in qualsiasi attività legata alla classificazione di immagini telerilevate. In particolare, si utilizza per:

- **Valutare la qualità della classificazione**, comparando le classi individuate dall'algoritmo di classificazione con le informazioni di riferimento per determinare l'accuratezza della mappa finale;
- **Identificare gli errori**, comprendendo le cause di eventuali disallineamenti tra l'immagine classificata e la realtà, e consentendo di calibrare al meglio i processi di classificazione;
- **Quantificare e identificare la tipologia di errore**, fornendo delle indicazioni essenziali per una corretta valutazione dell'affidabilità del prodotto ottenuto.

Generalmente l'accuracy assessment si esplica secondo due modalità: **qualitativa** e **quantitativa**. La prima si effettua con un confronto visivo tra l'immagine classificata ottenuta e un'immagine telerilevata di riferimento o uno strato cartografico rappresentante la stessa area geografica; la seconda, generalmente considerata più affidabile, inserisce una valutazione numerica dell'accuratezza, utilizzando tecniche statistiche come ad es. la matrice di confusione.

In questo paragrafo si descriverà la metodologia utilizzata per quantificare l'accuratezza, sulla base di una analisi quantitativa, per ciascuna area di riferimento.

La metodologia di accuracy assessment utilizzata

Vista l'impossibilità di effettuare una 'ground truth' direttamente in loco (la sperimentazione riguarda 14

³ In presenza di lievi variazioni nei confini amministrativi dei centri capoluogo, nelle analisi in serie storica potrà essere adottata un'area di studio fissa, riportando i dati ai confini di un determinato anno, per assicurare la comparabilità.

differenti realtà urbane ubicate nell'intero territorio nazionale), è stato deciso di quantificare l'attendibilità della mappa tematica o maschera di verde ottenuta attraverso foto-interpretazione con l'ausilio delle ortofoto utilizzate per l'estrazione degli indici radiometrici. La foto-interpretazione viene effettuata da un esperto di dominio attraverso valutazione visiva. Sulla base di queste considerazioni, si è deciso di estrarre un certo numero di punti all'interno dell'area di ognuno dei singoli centri abitati capoluogo in numero congruo rispetto alla propria superficie per poi valutarne l'appartenenza alla classe 'verde' o meno.

Come spiegato in precedenza, occorre tener presente che le maschere di verde ottenute sono elaborazioni che si traducono, al termine del processo di 'sogliatura', in mappe tematiche a due classi; quindi un pixel può essere o verde o non verde. Inoltre la minima superficie del pixel di 400 cm² in alcuni casi, può essere un fattore determinante nell'assegnazione della classe da associare al pixel stesso. Sulla base di quanto esposto, nei paragrafi successivi si descrive dettagliatamente la procedura di accuracy assessment eseguita.

Validazione effettuata tramite estrazione casuale di punti

Dal punto di vista tecnico, l'estrazione dei punti è molto semplice e viene eseguita automaticamente da semplici tool GIS. Nella sperimentazione effettuata ci si è basati su due tool presenti nel software ARCGIS Pro® prodotto e distribuito dalla ESRI (Environmental System Research Institute).⁴

L'algoritmo 'Create random points'⁵ genera un definito numero di punti scelti casualmente all'interno di una specifica area. Il parametro che indica la minima distanza da un punto all'altro è fissato a 10 m.

Ogni punto è individuato da un ID specifico e consecutivo.

La sperimentazione è stata effettuata estraendo 150 punti per il centro capoluogo di ogni città metropolitana esaminata.

Il processo di assessment è costituito dalle seguenti fasi:

- Ogni punto è stato valutato a video e a ciascuno di esso è stato attribuito una classe: 1 verde; 0 non verde;
- Per ogni singolo punto è stato estratto il valore NDVI dei file .tif derivati dall'immagine processing⁶;
- Ad ogni pixel NDVI sopra-soglia individuata dalla nostra metodologia, è stato attribuito un valore 1 verde e, se sotto-soglia, 0 non verde, il valore di ogni pixel è quindi lo stesso attribuito al pixel dalla nostra procedura prima della fase di clumping;
- Al termine degli step come descritti sopra, è stata elaborata una tabella di comparazione pixel vs pixel e conteggiati i casi corretti e gli errori.

⁴ Il sito ufficiale della ESRI è: www.ESRI.com

⁵ <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/data-management/create-random-points.htm>

⁶ L'estrazione dei valori dei pixel di un raster, è stata attuata utilizzando l'algoritmo 'Extract values to points'. Tale algoritmo Estrae i valori delle celle di un raster sulla base di un insieme di elementi puntuali e registra i valori nella tabella degli attributi di una feature puntuale di output. Per maggiori informazioni: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/extract-values-to-points.htm>

I risultati ottenuti si possono riassumere nella tabella sottostante (*Tabella 1*).

Tabella 1: Riassunto dei principali risultati ottenuti nella sperimentazione

Città	Anno di volo	Accuratezza
Milano	2021	0,947
Bari	2022	0,927
Bologna	2014	0,945
Firenze	2022	0,896
Cagliari	2022	0,940
Reggio di Calabria	2021	0,910
Torino	2015	0,860
Venezia	2021	0,887
Messina	2022	0,947
Palermo	2022	0,947
Catania	2022	0,920
Napoli	2020	0,873
Genova	2022	0,887

Fonte: elaborazione Istat su dati Istat

L'accuratezza, definita come la frazione di pixel classificati correttamente nostro algoritmo, risulta generalmente elevata in tutte le città analizzate, con valori compresi tra 0,860 e 0,947. Le città che presentano le migliori performance sono Milano, Messina e Palermo, tutte con un'accuratezza pari a 0,947, seguite da Bologna e Cagliari. In particolare, solo tre città scendono al di sotto della soglia dello 0,90: Torino (0,860), Napoli (0,873) e Firenze (0,896). La maggior parte delle città registra valori superiori a 0,91, a conferma della solidità del metodo di classificazione adottato. Il valore medio dell'accuratezza complessiva è pari a circa 0,914, con una distribuzione abbastanza omogenea tra le diverse aree urbane. I risultati evidenziano una buona capacità del modello nel distinguere correttamente le aree verdi dalle non verdi.



Figura 6: Estrazione random per il centro di Reggio di Calabria

Fonte: elaborazione Istat su dati Istat e AGEA

Le due tipologie di errori di interpretazione riscontrati

La peculiarità del dato di base (le Ortofoto AGEA a 20 con pixel di 20 cm), inevitabilmente può portare ad errori che si possono raggruppare in due grandi tipologie:

- errori di interpretazione posizionale;
- errori di interpretazione relativo al valore NDVI del pixel.

Per meglio comprendere la differenza tra queste tipologie di errata interpretazione, in Figura 7 se ne mostrano concretamente due esempi.



Figura 7: A sinistra un esempio di incertezza sulla posizione del punto di controllo; a destra un esempio di incertezza sul valore NDVI del pixel relativo al punto di controllo.

Fonte: elaborazione Istat su dati AGEA

Come si può vedere chiaramente dalla figura 7, il punto di controllo dell'immagine a sinistra può trarre in

inganno relativamente alla sua posizione; non è ben chiaro se esso è posizionato sulla chioma dell'albero o sul muretto divisorio tra le abitazioni. La figura a destra mostra un esempio di errore legato al valore NDVI del pixel; il punto cade evidentemente all'interno di un'area verde ma il valore del pixel risulta leggermente sotto soglia (0,2218 vs 0,2461). Ciò logicamente può portare a errori di interpretazione del punto.

Vantaggi e limiti degli indici radiometrici di vegetazione

Gli indici radiometrici estratti da ortofoto non sono influenzati dagli stessi fattori atmosferici che possono interferire con il calcolo basato su immagini satellitari; è comunque possibile elencare i benefici e i limiti di tali indici. Gli indici di vegetazione relativi a un'area con fitta vegetazione tendono a produrre valori positivi (tra 0,3 e 0,8), mentre nel caso di nuvole o neve saranno caratterizzati da valori negativi.

Altre tipologie di copertura del suolo visibili dall'alto e che possono influenzare il calcolo sono:

- le acque ferme (come laghi e fiumi) presentano una riflettanza piuttosto bassa sia nel vicino infrarosso (NIR) che nel rosso, almeno lontano dalle coste, il che può portare a valori positivi e quindi a essere individuate come aree potenzialmente verdi;
- i terreni con vegetazione rada, invece, tendono a mostrare una riflettanza spettrale nel vicino infrarosso leggermente superiore rispetto al rosso, generando quindi valori positivi, ma piuttosto bassi (tra 0,1 e 0,2).

L'utilizzo degli indici radiometrici per le valutazioni solleva una serie di problemi che possono gravemente limitare l'effettiva utilità se non sono adeguatamente affrontati:

- Le misurazioni di riflettanza dovrebbero essere effettuate sulla stessa area e acquisite simultaneamente, il che potrebbe non essere sempre fattibile con strumenti che catturano diversi canali spettrali con differenti telecamere o piani focali. Discrepanze nella registrazione delle immagini spettrali possono causare errori significativi, rendendo i risultati non affidabili.
- Effetti atmosferici: la reale composizione dell'atmosfera (in particolare per quanto riguarda il vapore acqueo e l'aerosol) può influenzare significativamente le misure effettuate dallo spazio. Quindi, queste ultime possono essere male interpretate se questi effetti non sono adeguatamente presi in considerazione (nel caso delle ortofoto, come si è già detto, questo effetto è assolutamente trascurabile).
- Nuvole: nuvole profonde (otticamente spesse) possono essere molto evidenti sia nelle immagini satellitari che nelle ortofoto e producono caratteristici valori di NDVI ed ENDVI che facilitano il loro discernimento. Invece nubi sottili (ad esempio i cirri) oppure nuvole di piccole dimensioni, con un diametro minore della superficie effettivamente campionata dal sensore (ma non è questo il caso delle ortofoto), possono contaminare significativamente le misurazioni. Allo stesso modo, le ombre delle nubi in zone che non appaiono chiare possono influire sui valori e portare a errate interpretazioni. Nel caso delle immagini satellitari, questi fenomeni avversi possono essere minimizzati con mosaici di immagini. In pratica se una parte di un'immagine presenta una copertura nuvolosa densa, quest'area può essere sostituita da un ritaglio preso da un'altra immagine che non ha questo problema. Immagini di indici radiometrici composite hanno portato ad un gran numero di

nuove applicazioni con le quali si può studiare l'andamento della vegetazione nel tempo.

- Effetti del suolo: i terreni tendono a scurirsi quando sono bagnati, e quindi la loro riflettanza diviene una funzione diretta del contenuto d'acqua. Se la risposta spettrale di umidificazione non è esattamente la stessa nelle due bande spettrali, i valori dell'NDVI ed ENDVI di una zona possono variare a causa della non uniforme umidità del suolo (precipitazioni o evaporazioni) e non a causa della diversa copertura dovuta alla vegetazione. Per attenuare l'effetto del suolo si può utilizzare un indice radiometrico specifico: il SAVI (Soil Adjust Vegetation Index).
- Effetti anisotropi: tutte le superfici (naturali o artificiali) riflettono la luce in modo diverso in direzioni diverse, e questa forma di anisotropia è di solito dipendente dalla lunghezza d'onda. Come risultato, il valore degli indici radiometrici dipende anche dall'anisotropia particolare del bersaglio, dalla geometria angolare dell'illuminazione e dell'osservazione al momento delle misurazioni e, quindi, dalla posizione del bersaglio stesso all'interno della fascia dello strumento di ripresa. Comunque, l'uso di immagini composite minimizza queste considerazioni.
- Effetti spettrali: dal momento che ogni sensore ha le proprie caratteristiche e prestazioni, in particolare per quanto riguarda la posizione, la larghezza e la forma delle bande spettrali, una formula unica come quella degli indici utilizzati per questa sperimentazione produce risultati diversi quando applicato alle misure acquisite da strumenti diversi.

Per queste ragioni, le metodologie che si basano sul calcolo degli indici spettrali devono essere utilizzate con grande cautela. In qualsiasi applicazione quantitativa che richieda un elevato livello di accuratezza, è fondamentale prendere in considerazione tutti i fattori perturbanti che possono introdurre errori o incertezze di ordine di grandezza rilevante. Questo rende necessario un approccio adattativo nella determinazione della soglia di vegetazione, come quello implementato nel processo descritto nel paragrafo precedente.

RIFERIMENTI A LETTERATURA DI BACKGROUND

- (1) Xue, J., and Boafeng, S., (2017). "Significant Remote Sensing Vegetation Indices: a Review of Developments and Applications". *Journal of Sensors*, 2017, pp. 1-17.
- (2) Kriegler, F.J., Malila, W.A., Nalepka, R.F., and Richardson, W., (1969). "Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition". *Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 1969, pp. 97-131.
- (3) For more information regarding ENDVI: <https://maxmax.com/endvi.htm>
- (4) Huang, Sha, et al. "A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing." *Journal of Forestry Research* 32.1 (2021): 1-6.
- (5) Mróz, M., and Sobieraj, A., (2004). "Comparison of several vegetation indices calculated on the basis of a seasonal spot xs time series, and their suitability for land cover and agricultural crop identification". *Technical Sciences*, 7, 2004, pp. 39-66.
- (6) T. M. Susantoro et al. 2018 "Utilization of Vegetation Indices to Interpret the Possibility of Oil and Gas Microseepages at Ground Surface" *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 145 012012
- (7) Huete, A.R., (1988). "A soil adjusted vegetation index". *Remote sensing of environment*, 25, 3, 1988, pp. 295-309.
- (8) Sito delle Basi Territoriali ISTAT: <https://www.istat.it/notizia/basi-territoriali-e-variabili-censuarie/>
- (9) Rosenblatt, M., (1956). "Remarks on Some Nonparametric Estimates of a Density Function". *The Annals of Mathematical Statistics*, Ann. Math. Statist. 27(3), 832-837 (September, 1956).
- (10) Parzen, E., (1962). "On Estimation of a Probability Density Function and Mode". *The Annals of Mathematical Statistics*, Ann. Math. Statist. 33(3), 1065-1076 (September, 1962).
- (11) Canny, J., (1986). "A Computational Approach To Edge Detection". *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, IEEE Transactions on. PAMI-8. 679 - 698. 10.1109/TPAMI.1986.4767851.
- (12) Donchyts, G., Schellekens, J., Winsemius, H., Eisemann, E., and van de Giesen, N., (2016). "A 30 m resolution surface water mask including estimation of positional and thematic differences using Landsat 8, SRTM and OpenStreetMap: A case study in the Murray-Darling Basin, Australia". *Remote Sensing*, 8(5), 386.
- (13) Otsu, N., (1979). "A threshold selection method from gray-level histograms". *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 1979, 9(1), 62-66.