Acquisizione ed interpretazione di dati sul suolo per l'implementazione e la validazione di modelli predittivi

Martina Sinatra

Dipartimento di Biotecnologie, Università di Verona, Ca' Vignal 2, Strada le Grazie 15, 37134 Verona (<u>martina.sinatra@univr.it</u>)

1. Introduzione

L'utilizzo efficiente ed efficace dell'acqua è di importanza fondamentale per uno sviluppo agricolo sostenibile e per il mantenimento della sicurezza alimentare, alla luce dei futuri scenari di cambiamento climatico, della richiesta di acqua da parte di tutti i settori economici e dei fenomeni siccitosi di diversa intensità che hanno colpito tutta l'Italia. Nell'ottica di gestire in modo ponderato e sostenibile la risorsa idrica, monitorando la condizione di benessere delle colture, possono essere utilizzate tecnologie di *remote sensing* (RS) che prevedono rilievi da drone o satellite. Le informazioni ricavate tramite queste tecnologie possono fornire suggerimenti molto utili non solo per la gestione della produzione agricola, ma anche per la stima della resa delle colture (Mulla 2013; Xue and Su, 2017) in quella che è nota come agricoltura di precisione.

Nel corso del tempo, si è passati sempre più frequentemente all'utilizzo delle piattaforme dette *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV), ovvero droni dotati di telecamere multispettrali dai quali è possibile ottenere immagini con una risoluzione più elevata rispetto al satellite (0,08 m da drone –talvolta anche inferiore– contro 10 m da satellite) (Sozzi et al., 2020). Le principali applicazioni per il RS in agricoltura si basano sui seguenti spettri luminosi: (i) la regione dell'ultravioletto (UV), che va da 10 a 380 nm; (ii) lo spettro del visibile, composto dalle regioni di lunghezza d'onda blu (*Blue*, B; centrata a 475 nm), verde (*Green*, G; 560 nm) e rossa (*Red*, R; 668 nm); (iii) il *Red Edge* (RE; 717 nm) e il vicino infrarosso (*Near Infrared*, NIR; 840 nm). Da tali bande possono essere ricavati diversi indici di vegetazione, attribuibili ad una serie di caratteristiche da cui poter stimare la crescita e il vigore delle piante (Xue and Su, 2017).

Tra tutti gli indici di vegetazione noti, l'NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) è quello più conosciuto e utilizzato (Radočaj et al., 2023). Viene calcolato come rapporto tra la differenza e la somma della riflettanza nel NIR e R, ovvero $\frac{NIR-R}{NIR+R}$, dove valori negativi indicano una condizione di malessere della pianta, mentre valori positivi si riferiscono a piante sane.

Integrare i telerilevamenti con le informazioni relative alle caratteristiche del suolo (es. carbonio organico - C_{org} -, azoto totale - N_{tot} -, tessitura, contenuto di nutrienti etc.) può fornire un quadro complessivo sullo stato delle colture e sul comportamento dell'acqua nel sistema suolo-pianta.

In quest'ottica, uno dei fattori fondamentali da tenere in considerazione è il contenuto di C_{org} , il quale svolge un'essenziale funzione positiva su molte proprietà fisico-chimiche del suolo, tra cui la ritenzione idrica, la fertilità, la capacità tampone e la disponibilità di nutrienti (Kuśmierz et al., 2023). Il contenuto di C_{org} nel suolo è influenzato dal clima e dalle temperature della zona geografica di riferimento ed è perciò una risorsa fortemente minacciata dall'aumento delle temperature causato dal cambiamento climatico (Ondrasek et al., 2019).

Anche la tessitura¹ svolge un ruolo non trascurabile nell'interazione suolo-acqua: infatti, molte proprietà del suolo sono influenzate da essa, quali il drenaggio e la capacità di ritenzione idrica, l'aerazione, la suscettibilità all'erosione, la capacità di scambio cationico (CSC) e la capacità tampone (Easton and Bock, 2016). Per esempio, a particelle di piccole dimensioni (<0,002 mm) corrisponde una maggiore superficie disponibile per l'interazione sia con altre particelle di suolo, sia con composti organici e ioni, aumentando il compattamento del suolo e favorendo la formazione di aggregati. Ciò ha ripercussioni sul comportamento dell'acqua, poiché grazie alla forza capillare maggiore essa viene fortemente trattenuta all'interno dei pori (riducendo la quantità d'acqua disponibile per le piante), ma anche sul contenuto di sostanza organica (SO) nel suolo, poiché troveremo una maggiore presenza di molecole organiche occluse all'interno degli aggregati e adese alle superfici dei minerali rispetto a suoli caratterizzati da una granulometria di maggiori dimensioni (0,05-2,00 mm) (Hassink 1992). Unendo tutte queste informazioni è possibile costruire un quadro completo sull'interazione suolo-acqua-pianta per poter regolare le pratiche agricole in modo accurato.

2. Obiettivi

La presente ricerca mira ad individuare le principali caratteristiche dei suoli che influenzano lo stato vegetativo e la produzione agricola di alcune colture rappresentative del Veneto (mais, bietola, asparago) per l'implementazione e la validazione di modelli in grado di fornire agli agricoltori i mezzi necessari per affrontare situazioni di siccità. Ciò permetterebbe di modulare *ad hoc* alcune pratiche agricole, tra cui l'apporto di acqua, fertilizzanti e ammendanti, in base alle necessità della singola coltura o di aree circoscritte al suo interno che risultano affette da stress.

¹ Distribuzione percentuale delle particelle di sabbia (dimensioni comprese tra 0,05 e 2,00 mm), limo (0,002-0,05 mm) e argilla (<0,002 mm) (FAO, 2006).

3. Materiali e metodi

3.1. Piano sperimentale

Il presente progetto si è focalizzato sul territorio del Consorzio di bonifica Lessinio Euganeo Berico (LEB). In particolare, sono stati presi in considerazione i campi coltivati a bietola (*Beta vulgaris L*.; SB), mais (*Zea mays L*.; M) e asparago (*Asparagus officinalis L*.; A) di quattro aziende agricole situate all'interno del territorio LEB (numerate da $1 -1^*$ corrisponde alla fascia anomala con piante in stato di stress idrico all'interno del campo di bietola dell'azienda 1-a 4) (Fig. 1).

In concomitanza a rilievi tramite drone sono stati effettuati dei campionamenti di suolo, sia per la determinazione della densità, sia per determinare la tessitura, il contenuto di C_{org} e micro-/macro-nutrienti (e.g., N_{tot}, P disponibile ecc.), umidità, pH e conducibilità elettrica (CE).



Figura 1. Siti di studio: a) azienda 1 (M e SB); b) azienda 2 (M e SB); c) azienda 3 (M e SB); d) azienda 4 (A).

3.2. Rilievi UAV

Durante la campagna di rilievi, è stato utilizzato un drone DJI P4 equipaggiato con un sensore di immagine provvisto di 6 lenti, una per la luce visibile (RGB) e cinque per il canale di imaging multispettrale per registrare la riflettanza nelle bande B (B1), G (B2), R (B3), RE (B4) e NIR (B5) separatamente, ottenendo così altre cinque immagini (una per banda). Le fotografie sono state elaborate per generare una serie di immagini ortorettificate e georeferenziate per la stima della condizione vegetativa. La procedura è stata organizzata in varie fasi tramite il software Metashape. Nella prima fase è stato effettuato l'allineamento della fotocamera in modo da orientare le camere nello spazio individuando i punti omologhi tra le immagini, i quali vengono sfruttati per accoppiare le immagini tra loro.

Come risultato, viene generata una nuvola sparsa di punti e un insieme di posizioni della fotocamera. Per aumentare la precisione del modello, sono stati manualmente inseriti i vari *Ground Control Points* (GCPs), le cui coordinate GPS sono state registrate durante la campagna di rilievi (Fig. 2a). In seguito è stato ripetuto l'allineamento delle foto seguendo la medesima procedura, ma questa volta utilizzando come riferimento le coordinate dei GCPs. Sulla base delle posizioni di ripresa stimate delle camere, è stata poi generata una nube densa di punti o *Dense Cloud* (Fig. 2b). In seguito è stato generato il modello di elevazione, e infine, sono state create le immagini ortorettificate da cui è possibile calcolare gli indici di vegetazione. Dal software sono state esportate sia le immagini ortorettificate per le cinque bande, sia l'immagine ortorettificata RGB (Fig. 2c).



Figura 2. Passaggi per il processamento delle immagini da drone utilizzando il software Metashape. a) Nuvola sparsa di punti e GCPs; b) *Dense Cloud* e GCPs; c) immagine RGB ortorettificata.

3.3. Calcolo dell'indice NDVI e dello Standardized Vegetation Index (SVI)

Tramite RStudio (R Core Team, 2023), all'immagine ortorettificata RGB è stata applicata una maschera per rimuovere il suolo. In seguito, è stato calcolato l'indice di vegetazione NDVI all'interno di una *shape*, creata utilizzando QGIS (QGIS Development Team, 2023); tale *shape* racchiude soltanto il campo di interesse e non considera il contorno (strade, canali, altra vegetazione ecc.) (Fig. 3).

I valori di NDVI ottenuti sono stati standardizzati per la media storica riferita allo stesso giorno (o media settimanale) dell'anno considerando un periodo di 20 anni, con la relativa deviazione standard, entrambe ricavate tramite Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017) sfruttando i dati da satellite (Sentinel 2 e Landsat 7). In questo modo si ottiene il corrispettivo valore per l'indice SVI (*Standardized Vegetation Index*) come indicato da Peters et al. (2002). Per verificare la compatibilità tra i dati Landsat 7 e Sentinel 2 e i dati da drone, è stata effettuata una regressione lineare per evidenziare le differenze tra le immagini da drone e da satellite, in modo da applicare una correzione per ottenere dei dati comparabili. Ciò è risultato necessario poiché, in termini di

variabilità, i dati da satellite hanno mostrato un range più basso di valori di SVI, probabilmente dovuto alla rimozione del suolo nelle immagini UAV che non avviene nelle immagini da satellite e che, di conseguenza, includono nel calcolo dell'indice SVI anche valori molto bassi di NDVI, solitamente attribuiti al suolo nudo (Sozzi et al., 2020).



Figura 3. Immagine ortorettificata RGB con sovrapposizione della *shape* (linea rossa), disegnata utilizzando il software QGIS (QGIS Development Team, 2023).

In seguito alla correzione è stato calcolato un indice SVI per ogni coltura. In particolare, viene calcolato uno *z*-*score*, che si presuppone segua una distribuzione normale:

$$z_{ijk} = \frac{NDVI_{ijk} - \overline{NDVI_{ij}}}{\sigma_{ij}}$$

dove z_{ijk} corrisponde allo *z-score* per il pixel *i* durante la settimana *j* per l'anno *k*, *NDVI*_{ijk} è il valore di NDVI del pixel *i* riferito alla settimana *j* per l'anno *k* (corrisponde al nostro valore di NDVI rilevato tramite drone), \overline{NDVI}_{ij} è il valore medio di NDVI per il pixel *i* riferito alla settimana *j* per *n* anni e σ_{ij} corrisponde alla deviazione standard per il pixel *i* riferito alla settimana *j* per *n* anni. Perciò, l'indice SVI viene definito come:

$$SVI = P(Z < z_{ijk})$$

e indica la probabilità (0 < SVI < 1) che un valore di NDVI sia maggiore, minore o uguale rispetto a tutti i possibili valori in un certo arco di tempo, considerando lo stesso periodo (in questo caso una specifica settimana) in anni precedenti. In particolare, i due estremi indicano rispettivamente che il valore misurato di NDVI è minore (SVI = 0) o maggiore (SVI = 1) di tutti i possibili valori riferiti a quella settimana in anni precedenti. Per facilitare l'interpretazione, i valori di SVI sono stati suddivisi in 5 classi: NDVI molto scarsi (0-0,05), scarsi (0,05-0,25), medi (0,25-0,75), buoni (0,75-0,95) e molto buoni (0,95-1).

3.4. Campionamenti di suolo e preparazione dei campioni

I campioni di suolo per le diverse colture (Fig. 4) sono stati prelevati in differenti punti del campo utilizzando un carotatore e poi uniti in un campione finale. Il campionamento è stato effettuato a due profondità (0-15 and 15-30 cm), e per ogni campione è stata prelevata un'aliquota per la determinazione della densità apparente (ρ_{app}). I campionamenti sono stati effettuati nei mesi di Giugno e Luglio 2022. I campioni sono stati conservati a 4 °C per poi essere asciugati all'aria, macinati e setacciati a <2 mm. Una parte del campione è stata micronizzata con un mulino a sfere (MM400, Retsch) per le successive analisi.



Figura 4. Campioni di suolo prelevati: a) suolo coltivato a SB dell'azienda 1 per l'area con vegetazione sana (SB1) e quella con vegetazione in stato di stress idrico (SB1*); b) suolo coltivato a M dell'azienda 2; c) suolo coltivato a M dell'azienda 3; d) suolo dell'azienda 4 coltivato ad A.

3.5. Densità apparente e contenuto di umidità

I campioni sono stati prelevati utilizzando appositi anelli di metallo di dimesioni note (Eijkelkamp). La ρ_{app} è stata calcolata dal rapporto tra il peso secco del campione e il volume del cilindro di metallo, mentre il contenuto di umidità è stato determinato tramite la seguente formula:

$$\mathbf{U} = 1000 \cdot \frac{\mathbf{m}_0 - \mathbf{m}_1}{\mathbf{m}_0}$$

dove "U" corrisponde al contenuto di umidità (in g kg⁻¹), "m₀" rappresenta il peso fresco del campione (in g) e "m₁" corrisponde al peso secco del campione (in g).

3.6. pH e conducibilità elettrica

Per la determinazione del pH (Fig. 5a) i campioni sono stati sospesi in acqua distillata con un rapporto di 1:2,5; la misura è stata determinata in seguito ad agitazione per 2 ore. Per la misura della CE (Fig. 5b), ai campioni sono stati aggiunti ulteriori 25 mL di acqua distillata per ottenere un rapporto 1:5; la misura è stata effettuata in seguito ad agitazione per 2 ore, sedimentazione (Fig. 5c) e filtrazione con carta filtro (Whatman 42) (Fig. 5d).

Prima di effettuare la misura, ad ogni campione è stata applicata 1 goccia di una soluzione di sodio esametafosfato [(NaPO₃)₆] allo 0.1% ogni 25 mL di filtrato.



Figura 5. Strumenti per la misurazione del pH (a) e della CE (b). Dopo esser stati lasciati una notte a sedimentare (c) i campioni sono stati filtrati con carta filtro (d).

3.7. Tessitura

La tessitura, espressa come distribuzione percentuale delle particelle di sabbia, limo e argilla, è stata determinata attraverso un analizzatore granulometrico a diffrazione laser (Microtrac MRB Sync).

3.8. Analisi elementale e determinazione del contenuto di nutrienti

I campioni di suolo sono stati analizzati tramite l'analizzatore elementale CHNS Vario macro Cube (Elementar; Fig. 6a,b) per determinare la concentrazione totale di carbonio (C), idrogeno (H), azoto (N) e zolfo (S) mediante *flash combustion* (T = 1100 °C).

Per l'analisi CHNS, sono stati pesati 30 mg di campione all'interno di campsule di stagno con aggiunta di 30 mg di ossido di tungsteno in polvere (WO₃) per facilitare la combustione.

Per la determinazione del contenuto di C_{org} , i campioni sono stati acidificati utilizzando HCl al 37% per rimuovere il C inorganico, seguendo la procedura riportata da Harris et al. (2001).

In particolare, i campioni pesati all'interno di capsule di argento sono stati posti all'interno di un essiccatore insieme ad un beaker contenente circa 80-90 mL di una soluzione di HCl al 37% (Fig. 6c). Trascorse 8 ore, i campioni sono stati posti in stufa durante la notte a 60 °C e poi compattati, ricoperti con foglietti di stagno e infine analizzati (Fig. 6d,e).



Figura 6. a) Fornace dell'analizzatore elementale dove avviene il processo di combustione e vengono generati i gas; b) sistema di trappole: N viene rilevato per primo, seguono SO₂, H₂O e CO₂; c) acidificazione per la determinazione del C_{org} : i campioni pesati vengono posti all'interno di un essiccatore insieme ad un beaker contenente HCl al 37%; d) in seguito all'acidificazione e ad un passaggio in stufa, i campioni vengono avvolti con foglietti di stagno e pressati (e).

Le concentrazioni di calcio (Ca_{ex}), magnesio (Mg_{ex}), potassio (K_{ex}) e sodio (Na_{ex}) scambiabili, fosforo assimilabile (P_{ass}) e ferro disponibile (Fe_{dis}) sono state determinate tramite tecniche di analisi ICP.

3.9. Analisi statistica e validazione dei risultati

Sono state effettuate una serie di analisi di correlazione, sia tra SVI e ogni parametro fisicochimico, sia tra i diversi parametri del suolo. Le relazioni più significative risultate dalle correlazioni uno a uno sono poi state rappresentate in termini di influenza relativa sullo stato delle colture attraverso grafici ternari.

Per poter validare i risultati ottenuti, è stato utilizzato il database LUCAS (*Land Use and Coverage Area frame Survey*) Soil comprendente informazioni su circa 26 mila campioni di suolo da 28 Paesi europei (Orgiazzi et al., 2017). I dati LUCAS Soil più recenti (anno 2018) sono stati integrati con le informazioni sulla tessitura degli anni precedenti (2009-2012 e 2015). Sono stati presi in considerazione il medesimo range di valori ottenuti nel presente studio per i parametri del suolo nei suoli temperati europei, le stesse tipologie di coltura (SB e M) e i corrispondenti valori di SVI (ricavati tramite Google Earth Engine; Gorelick et al., 2017); in questo modo è stato possibile validare le relazioni ottenute tra parametri del suolo e SVI relativi al presente studio.

4. Risultati e discussione

4.1. Caratteristiche dei suoli e indice SVI da drone

Le principali caratteristiche dei suoli e rispettivo SVI da drone sono indicati nella Tabella 1. I suoli analizzati hanno presentato un contenuto di C_{org} prevalentemente intorno all'1-2%, in linea con le caratteristiche dei suoli agricoli italiani (Jones et al., 2005). M1 e SB1 hanno mostrato complessivamente valori maggiori di N_{tot}, C_{org} e Fedis, ma non per gli altri nutrienti; M2 e SB2, invece, hanno riscontrato valori superiori per quanto riguarda Ca_{ex} e Mg_{ex}. A4 ha rappresentato un'eccezione per alcuni parametri (N_{tot}, C_{org}), mostrando valori che superavano di molto quelli delle altre colture. La fascia anomala (SB1*) ha dimostrato avere valori particolarmente ridotti di limo (43,9 e 46,1%), con aumento della percentuale di sabbia (28,9 e 26,7%); lo stesso decremento si è osservato per N_{tot} e C_{org}, confrontando con i valori per la zona con vegetazione sana (SB1). M3 e SB3 hanno registrato valori inferiori di N_{tot}, C_{org} e Ca_{ex}, mentre M3 nello specifico ha espresso un contenuto di P_{ass} da 2 a 4 volte maggiore rispetto alle altre colture. Il pH ha subito variazioni trascurabili tra tutte le colture (7,7-8,2).

Per quanto riguarda l'indice SVI, la correzione tramite regressione lineare dei dati da satellite ha permesso di ottenere valori di NDVI confrontabili con i dati UAV, da cui poter calcolare la variazione storica; la validità della correzione è stata constatata tramite il test di Mood, secondo il quale il nuovo dataset da satellite mostrava la stessa mediana dei dati UAV (Mood 1974) (Fig. 7).



Figura 7. Differenze tra NDVI da UAV e da satellite (Sat): a) regressione lineare tra i dati UAV e da satellite considerando l'immagine più vicina al giorno del rilievo con drone. b) distribuzione di NDVI da UAV e da satellite prima (Sat) e dopo (Sat*) aver allineato i dati applicando la regressione in (a). Il test di Mood è significativo con p<0.05 e ha dimostrato che i nuovi dati da satellite corretti e i dati UAV provengono da popolazioni di dati con la stessa mediana e risultano in questo modo confrontabili.

Osservando i risultati di SVI ottenuti notiamo che SB1*, M2 e SB3 hanno mostrato condizioni di vegetazione normali rispetto alla media storica (Tab. 1; Fig. 8a -fascia anomala-,b,d), SB2 ha mostrato condizioni di vegetazione migliorate (Tab. 1; Fig. 8c), mentre in tutti gli altri casi le condizioni sono risultate sempre nella media rispetto al passato, ma con SVI più alto rispetto a SB1*, M2 e SB3 (M1, SB1, M3, A4; Tab. 1; Fig. 8a,d,e).

Tabella 1. Principali parametri chimico-fisici dei suoli analizzati divisi per azienda, coltura e profondità; è indicata inoltre la mediana dell'indice SVI corretto per ogni coltura.

Azienda	Coltura	Prof.	ρ _{app}	sabbia	limo	argilla	Ntot	Corg	Caex	Mgex	Kex	Na _{ex}	Pass	Fedis	SVI
		(cm)	(g/cm ³)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(meq/ 100g)	(meq/ 100g)	(meq/ 100g)	(meq/ 100g)	(mg/kg)	(mg/kg)	
1	М	0-15	1.30	15.4	63.3	21.4	0.22	2.08	13.5	1.5	0.6	0.1	59	59.9	0.68
		15-30	1.43	11.6	61.2	27.2	0.22	2.11	14.0	1.6	0.7	0.2	62	61.1	
	CD	0-15	1.31	13.0	63.6	23.3	0.25	2.37	14.3	1.6	0.4	0.1	61	51.4	0.59
		15-30	1.25	8.6	66.1	25.3	0.26	2.39	14.3	1.7	1.2	0.1	63	62.2	
1*	- 58	0-15	1.36	28.9	43.9	27.2	0.16	1.48	15.0	1.9	0.6	0.1	47	34.0	0.42
		15-30	1.25	26.7	46.1	27.2	0.17	1.47	12.8	1.6	0.6	0.1	47	34.7	
2	М	0-15	1.22	14.8	59.9	25.3	0.17	1.43	13.8	2.3	0.4	0.1	33	19.8	0.37
		15-30	1.41	11.5	57.4	31.1	0.17	1.42	19.4	3.4	0.6	0.2	34	20.9	
	SB	0-15	1.06	8.3	58.6	33.1	0.19	1.63	18.0	3.0	1.1	0.2	53	22.2	0.76
		15-30	1.20	7.4	55.7	37.0	0.19	1.58	15.5	2.6	0.9	0.1	63	29.0	
3	М	0-15	1.39	19.5	61.1	19.5	0.14	1.12	7.8	1.7	0.2	0.1	146	28.3	0.61
		15-30	1.36	21.7	56.9	21.4	0.14	1.10	9.2	1.9	0.3	0.2	138	7.0	
	SB	0-15	1.42	18.4	62.2	19.5	0.13	1.04	8.7	1.4	0.4	0.1	67	29.1	0.46
		15-30	1.58	19.2	61.3	19.5	0.13	1.08	9.1	1.5	0.6	0.1	70	33.2	
4	А	0-15	0.92	9.8	59.0	31.1	0.30	4.11	21.1	1.6	1.4	0.1	41	27.1	0.66
		15-30	1.20	9.5	57.4	33.1	0.29	4.13	16.1	1.9	1.0	0.1	39	6.0	



Figura 8. Rappresentazione grafica della variazione dell'indice SVI all'interno dei campi coltivati a M, SB e A: (a) corrisponde all'azienda 1, (b) e (c) all'azienda 2, (d) all'azienda 3 ed (e) all'azienda 4.

4.2. Determinazione del contributo delle caratteristiche del suolo sullo stato delle colture

Per l'anno 2022, sono state individuate delle relazioni significative fra stato della vegetazione (SVI), contenuto di Corg, percentuale di limo+argilla, e contenuto di Ntot, indipendentemente dalla tipologia di coltura. Basandosi sull'analisi di correlazione e sulla facilità di misurazione, sono stati scelti tre parametri che possano maggiormente influenzare lo stato della coltura: in particolare, il contenuto di limo+argilla (correlazione: valore p = 0.09; r = 0.64 a 0-15 cm) costituisce un parametro strutturale tendenzialmente stabile nel tempo, che insieme al contenuto di Corg può restituire informazioni essenziali sulle condizioni fisiche del suolo, dato che entrambi influenzano il contenuto di acqua. Infatti, è stato dimostrato che il contenuto di SO risulta fortemente correlato con il contenuto di acqua e di limo (Hudson, 1994; Menzies Pluer et al., 2020). In particolare, Menzies Pluer et al. (2020) riporta una correlazione positiva anche tra NDVI, SO, limo e argilla, suggerendo che lo stato di salute e la crescita delle colture possa essere influenzato da tali fattori e non soltanto dal contenuto di nutrienti. Inoltre, il contenuto di Corg è influenzato dal cambiamento climatico e può fungere da indicatore per valutare la qualità del suolo in condizioni di alta temperatura. N_{tot} invece è un parametro chimico che può condizionare in modo diretto lo stato di benessere della pianta, poiché rappresenta un nutriente indispensabile. Nonostante, come per gli altri nutrienti, il contenuto di Ntot sia influenzato dall'applicazione di fertilizzanti e ammendanti, risulta il nutriente la cui concentrazione è più semplice da rilevare. Perciò, i parametri scelti sono il contenuto di limo+argilla, Corg e Ntot. Data la difficoltà nel definire qualitativamente tali parametri del suolo, i dati per ogni variabile sono stati posti in ordine crescente e convertiti in percentili, rendendoli indipendenti dal loro valore reale.



Figura 9. Relazione tra proprietà del suolo e stato della vegetazione: (a) grafico ternario che mostra la divisione dei suoli in due gruppi denominati G1 e G2; (b) distribuzione di SVI dell'intera area coltivata raggruppato in base ai gruppi G1 e G2 evidenziati in (a).

Riportando i risultati in termini di contributo relativo, ovvero il risultato dell'interazione delle tre variabili contemporaneamente (C_{org} , N_{tot} e limo+argilla) rappresentata attraverso un grafico ternario, è emerso che le colture in condizioni vegetative migliori (associate ad un SVI più alto) corrispondevano ad un contributo relativo di C_{org} , limo+argilla e N_{tot} pari a 30-40-30 (gruppo G1; Fig. 9), mentre colture in evidente stato di stress presentavano una proporzione di C_{org} , limo+argilla e N_{tot} pari a 20-60-20 (gruppo G2).

4.3. Validazione con dati LUCAS Soil e SVI da satellite

Per validare il metodo sono stati utilizzati valori SVI da satellite e dati del suolo ricavati dal database LUCAS Soil. La validazione ha confermato una risposta complessivamente omogenea della vegetazione con la divisione in due gruppi, a parità di caratteristiche di C_{org}, limo/argilla e N_{tot}, sempre indipendentemente dal tipo di coltura (Fig. 10). Ciò sembra indicare che il contenuto di limo+argilla giochi un ruolo importante quando si prendono in considerazione colture in stato di stress, poiché è il parametro che ha mostrato un contributo piuttosto differente nei due gruppi; infatti, molti autori hanno considerato il contenuto di argilla e limo+argilla come covariabili nell'analizzare l'effetto delle componenti del suolo sulle sue proprietà fisiche (Johannes et al., 2017). Complessivamente, l'alterazione di una variabile (in questo caso il contenuto di limo+argilla) può avere ripercussioni sulla qualità del suolo e, di conseguenza, sul benessere delle colture (SVI minore).



Figura 10. Proprietà del suolo da database LUCAS Soil e stato della vegetazione: (a) grafico ternario che mostra la divisione dei suoli in due gruppi denominati G1 e G2; il grafico mostra inoltre come varia l'indice SVI in base all'interazione delle tre variabili ricavate da LUCAS Soil; (b) distribuzione di SVI dei vari punti campionati per il database LUCAS Soil raggruppati in base ai gruppi G1 e G2 evidenziati in (a).

5. Conclusioni

Il metodo proposto si basa su un modello regressivo che richiede dati del suolo che generalmente sono in possesso degli agricoltori (contenuto di C_{org} , tessitura, pH, N_{tot} ecc.). Inoltre, questo modello può essere utilizzato per comprendere le potenziali risposte delle diverse colture ai cambiamenti climatici, tenendo in considerazione l'effetto dovuto alla variazione dei parametri chimico-fisici del suolo (e.g., C_{org}).

In conclusione, tale approccio consente di predisporre un'infrastruttura di informazioni che supporti a livello aziendale un uso efficiente dell'acqua e pratiche agronomiche che promuovano la resilienza delle colture. Sono necessari ulteriori approfondimenti per determinare quali siano i parametri del suolo più indicativi della sua qualità e quelli maggiormente responsabili dell'alterazione dello stato di benessere della vegetazione, in modo da realizzare un modello che sia sempre affidabile per condizioni ambientali e colture differenti.

Bibliografia

- Easton, Z.M., Bock, E., 2016. Soil and soil water relationships. College of Agriculture and Life Sciences, Virginia Tech. Pubblicazione BSE-194P.
- FAO, 2006. Guidelines for soil description. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, Italia.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R., (2017). Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment.
- Harris, D., Horwath, W.R., van Kessel, C., 2001. Acid fumigation of soil to remove carbonates prior to total organic carbon or carbon-13 isotopic analysis. Soil Science Society of America Journal 65, 1853-1856.
- Hassink, J., 1992. Effects of soil texture and structure on carbon and nitrogen mineralization in grassland soils. Biology and Fertility of Soils 14, 126-134.
- Hudson, B.D., 1994. Soil organic matter and available water capacity. Journal of Soil and Water Conservation 49, 189-194.
- Johannes, A., Matter, A., Schulin, R., Weisskopf, P., Baveye, P.C., Boivin, P., 2017. Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter?. Geoderma 302, 14-21.
- Jones, R.J.A., Hiederer, R., Rusco, E., Montanarella, L., 2005. Estimating organic carbon in the soils of Europe for policy support. European Journal of Soil Science 56, 655-671.

- Kuśmierz, S., Skowrońska, M., Tkaczyk, P., Lipiński, W., Mielniczuk, J., 2023. Soil organic carbon and mineral nitrogen contents in soils as affected by their pH, texture and fertilization. Agronomy 13, 267.
- Menzies Pluer, E.G., Robinson, D.T., Meinen, B.U., Macrae, M.L., 2020. Pairing soil sampling with very-high resolution UAV imagery: an examination of drivers of soil and nutrient movement and agricultural productivity in southern Ontario. Geoderma 379, 114630.
- Mood, A., Graybill, F., Boes, D., 1974. Introduction to the Theory of Statistics. 3^a Edizione, McGraw-Hill, New York, 521-522.
- Mulla, D.J., 2013. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: key advances and remaining knowledge gaps. Biosystems Engineering 114, 358-361.
- Ondrasek, G., Begić, H.B., Zovko, M., Filipović, L., Meriño-Gergichevich, C., Savić, R., Rengel, Z., 2019. Biogeochemistry of soil organic matter in agroecosystems & environmental implications. Science of the Total Environment 658, 1559-1573.
- Orgiazzi, A., Ballabio, C., Panagos, P., Jones, A., Fernández-Ugalde, O., 2017. LUCAS Soil, the largest expandable soil dataset for Europe: a review. European Journal of Soil Science 69, 140-153.
- Peters, A.J., Walter-Shea, E.A., Ji, L., Viña, A., Hayes, M., Svoboda, M.D., 2002. Drought monitoring with NDVI-based Standardized Vegetation Index. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 68, 71-75.
- QGIS Development Team, 2023. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project http://qgis.osgeo.org.
- Radočaj, D., Šiljeg, A., Marinović, R., Jurišić, M., 2023. State of major vegetation indices in precision agriculture studies indexed in Web of Science: a review. Agriculture 17, 707.
- R Core Team (2023). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <u>https://www.R-project.org/</u>.
- Sozzi, M., Kayad, A., Marinello, F., Taylor, J.A., Tisseyre, B., 2020. Comparing vineyard imagery acquired from Sentinel-2 and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) platform. International Viticulture and Enology Society (OENO One) 2, 189-197.
- Xue, J., Su, B., 2017. Significant remote sensing vegetation indices: a review of developments and applications. Journal of Sensors 2017, Article ID 1353691.

Presentazione della ricerca a convegni nazionali e internazionali

•	General Assembly 2023 della European	"Enhancement of drought monitoring by means of
	Geosciences Union (EGU)	soil sampling and drone-based multispectral
	23-28 Aprile 2023 – Vienna	sensing"
		Giulia Sofia, Martina Sinatra, Paolo Tarolli, Claudio Zaccone
•	Convegno "Suolo, Pianta, Ambiente" 2023 12-15 Settembre 2023 – Palermo	"Un occhio dal cielo, ma con i piedi per terra: Rilievi di suolo e remote sensing per quantificare la resistenza allo stress idrico in agricoltura"
		Martina Sinatra, Giulia Sofia, Paolo Tarolli, Claudio Zaccone

Articoli scientifici

"From soil to the sky: upscaling drought resilience by agronomic soil information and UAVmultispectral imageries" – *in preparazione*

Giulia Sofia, Martina Sinatra, Paolo Tarolli, Claudio Zaccone

Verona, 06/09/2023

Firma Titolare della Borsa di ricerca Martina Sinatza