



Pisa, 25-27 giugno 2025

Tecnologie Prossimali e di Telerilevamento per la Caratterizzazione Suolo-Pianta in *Citrus reticulata* cv. Tango



Alessandra Lepore^{1, *}, Marco Limongiello², Elèna Grobler¹, Giovanni De Rosa³, Angela Maffia³, Giuseppe Celano³

e-mail dell'autore di riferimento*: alepore@unisa.it

¹Scuola di Dottorato in Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari, Università della Basilicata, via dell'Ateneo Lucano 10, Potenza, Italia, in forma associata con l'Università di Salerno, Via Giovanni Paolo II, 132, 84084 Fisciano, Italia. alepore@unisa.it (A.L.); eglober@unisa.it (E.G.)

²Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Salerno, 132, 84084 Fisciano (Salerno), Italia; mlimongiello@unisa.it (M.L.).

³Corso di Agraria, Dipartimento di Farmacia, Università di Salerno, Via Giovanni Paolo II, 84084 Fisciano, Italia; gderosa@unisa.it (G.D.R.); amaffia@unisa.it (A.M.); gcelano@unisa.it (G.C.).



Progetto: ARTE – ARmonia e TE di compost: utilizzo di tè di compost on-farm aerato e tè di compost arricchito con microrganismi per produzioni di actinidia, agrumi e IV gamma ad elevata sostenibilità.

PSR: Campania 2014–2020

CUP: B28H24013830004

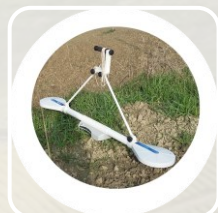
STATO DELL'ARTE

In ambito agronomico, l'interesse verso l'**integrazione di tecnologie di rilievo prossimale e remoto** ha portato allo sviluppo di numerosi studi focalizzati su singole componenti del sistema suolo-pianta o su combinazioni parziali tra dati strutturali, spettroscopici e pedologici.

Tuttavia, l'effettiva convergenza metodologica di queste fonti informative, così come l'integrazione in modelli predittivi geospaziali, risulta ancora **limitata**.

La **costruzione di approcci analitici** in grado di correlare in modo congiunto parametri biometrici tridimensionali, indici di vegetazione e conducibilità elettrica rappresenta un passaggio strategico per l'evoluzione verso sistemi di supporto decisionale integrati, capaci di orientare la gestione agronomica **sito-specifica** e la previsione della produttività.

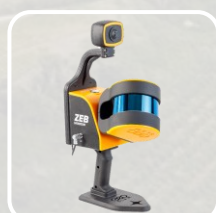
OBIETTIVI



Impiego di misure EMI per caratterizzare la variabilità del suolo nello strato radicale attivo



Utilizzo di dati multispettrali per stimare indici di vigoria



Applicazione di rilievi LiDAR per analizzare la struttura tridimensionale della chioma



Valutazione dell'influenza delle proprietà chimico-fisiche del suolo sulla vigoria vegetativa e sulla morfostuttura delle piante

WORKFLOW SPERIMENTALE

Contesto sperimentale: Agrumeto di *Citrus reticulata* cv. Tango

Variabilità del suolo

- EMI Profiler EMP-400
 - Acquisizione a tre frequenze: 3, 7 e 14 kHz per esplorare la struttura del suolo a diverse profondità.
 - Elaborazione dati con MagMap2000 e SmartMap in QGIS.

Variabilità vegetativa attraverso sistemi multispettrali

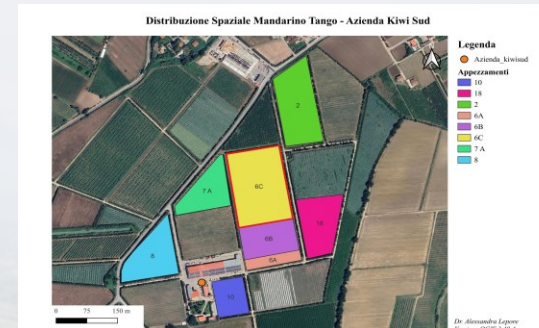
- DJI Phantom 4 Multispectral
 - Ortomosaico elaborato in Metashape.
 - SAVI calcolato in QGIS.

Variabilità vegetativa (LiDAR)

- GeoSLAM ZEB HORIZON RT
 - Elaborazione delle nuvole in CloudCompare.
 - Voxelizzazione e analisi morfometriche in MATLAB.
 - Altezza, volume, diametro, LAI su 30 piante.

Analisi Statistica

- Analisi delle correlazioni tra EC_a , SAVI, e volumetria.



Calcoli biometrici

- **Volume (m^3)**: Il volume è stato stimato mediante voxelizzazione della nuvola di punti. Lo spazio è stato suddiviso in voxel di lato fisso e sono stati considerati solo quelli contenenti almeno un punto.

$$V = N_{\text{voxel}} \times \text{voxelSize}^3$$

dove N_{voxel} rappresenta il numero di voxel occupati.

- **Altezza (m)**: L'altezza è stata determinata come differenza tra il valore massimo e minimo delle coordinate Z corrispondente all'estensione verticale della chioma.

$$H = \max(Z) - \min(Z)$$

- **Diametro XY (m)**: È stata calcolata l'ampiezza orizzontale massima della chioma nel piano XY, come:
$$D_{xy} = \max(\max(X) - \min(X), \max(Y) - \min(Y))$$
 rappresentando la dimensione laterale prevalente della pianta.

- **LAI (Leaf Area Index)**: Indica quanta superficie fogliare c'è sopra ogni metro quadrato di suolo. Il LAI è stato stimato a partire dal volume della chioma e dalla sua area proiettata sul suolo.

$$LAI = \alpha \times \frac{V}{A_{\text{proj}}}$$

Dove:

α = coefficiente empirico (stimato ≈ 2.5 per agrumi)

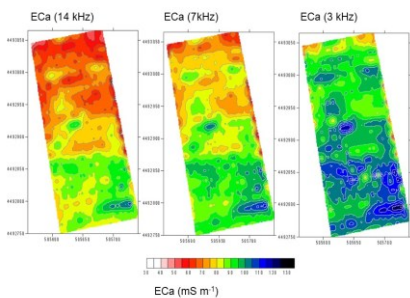
VVV = volume voxelizzato della chioma

A_{proj} = area proiettata sul piano XY (stima della copertura al suolo)

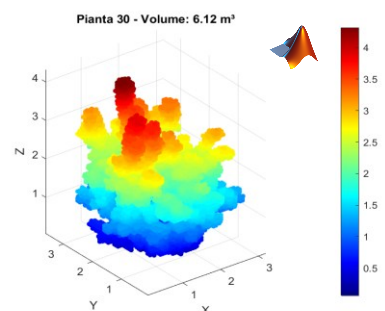
Interpretazione:

LAI $\sim 1 \rightarrow$ bassa densità fogliare

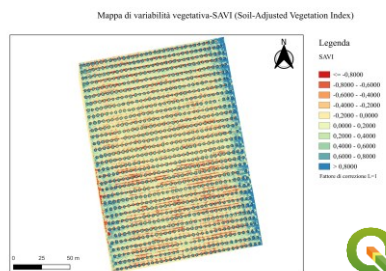
LAI $> 3 \rightarrow$ chioma molto densa



Mappe di conducibilità elettrica apparente (EC_a)



Ricostruzione volumetrica 3D della chioma in MATLAB



Mappa del Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)

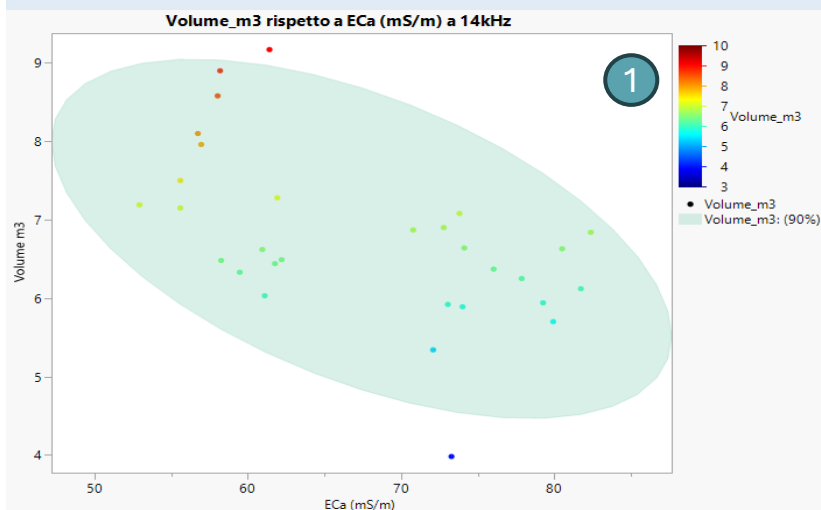
L'analisi statistica è stata condotta nel software **JMP Pro 18**, previa verifica della distribuzione delle variabili tramite analisi grafiche e test di normalità. È stato costruito un modello di regressione lineare con selezione automatica delle variabili mediante procedura **stepwise**, considerando come variabile dipendente il **volume della chioma**.

Le variabili esplicative incluse nel modello sono state la **conducibilità elettrica apparente del suolo** (EC_a a 14 kHz), l'**altezza della pianta**, il **diametro XY** e il **LAI**.

Il modello finale ha restituito un **R^2 corretto = 0.84**, a indicare una buona capacità esplicativa.

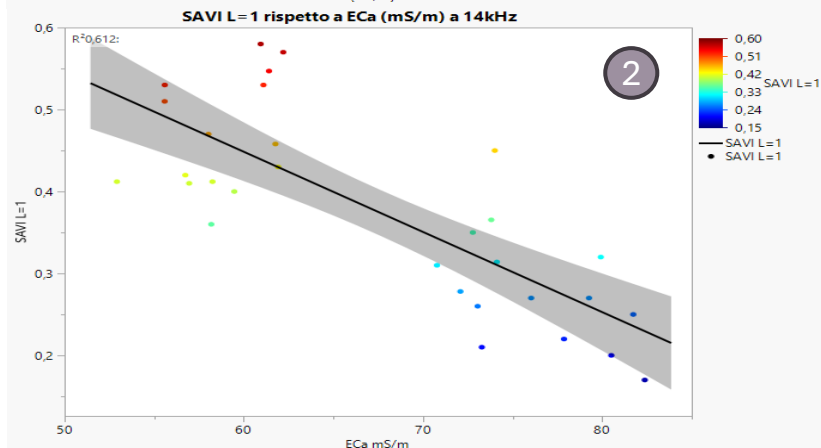
Sono risultate statisticamente significative ($p < 0.001$) le variabili altezza, diametro XY ed EC_a , quest'ultima con una relazione inversa rispetto al volume.

Il LAI, essendo derivato dal volume, è stato **escluso** dall'interpretazione per evitare effetti di collinearità.



Il **grafico 1** mostra una **tendenza inversa** tra la conducibilità elettrica apparente del suolo (EC_a 14kHz) e il volume della chioma.

Le piante localizzate in aree con EC_a più elevata presentano **volumi vegetativi inferiori** suggerendo un possibile effetto limitante delle condizioni pedologiche meno favorevoli sulla crescita strutturale.



L'analisi di **regressione lineare** nel **grafico 2** evidenzia una relazione inversa significativa tra l'indice SAVI (con $L = 1$) e la conducibilità elettrica apparente del suolo (EC_a) misurata a 14 kHz, con un coefficiente di determinazione $R^2 = 0.612$.

All'aumentare dell' EC_a , che riflette condizioni pedologiche più conduttive, si osserva una **diminuzione della risposta vegetativa**, espressa dal SAVI. Il risultato **supporta** l'ipotesi di un **effetto inibente delle condizioni del suolo** sulla vigoria della chioma, e **conferma la validità dell'integrazione** tra dati EMI e indici di vegetazione per l'analisi funzionale delle colture arboree.

L'**approccio integrato** proposto ha permesso di **caratterizzare** in modo congiunto la struttura tridimensionale della chioma e lo stato vegetativo delle piante, in relazione alle proprietà fisiche del suolo.

I risultati evidenziano una **coerenza** tra i dati multispettrali (SAVI), le informazioni biometriche 3D e l' EC_a misurata negli strati radicali attivi. In particolare, aree con EC_a **più bassa** mostrano volumi **vegetativi superiori**, associati a una **maggiore vigoria**.

Queste evidenze confermano l'**efficacia dell'integrazione** tra **tecnologie prossimali** e di **telerilevamento** per l'analisi della **variabilità spaziale** in frutticoltura, ponendo le basi per lo sviluppo di modelli previsionali geospaziali a supporto della gestione agronomica **sito-specifica**.

Le **prospettive future** prevedono l'**estensione del dataset su scala temporale e pedologica**, l'integrazione di indicatori produttivi diretti e l'**implementazione di modelli statistici** per la **stima della resa potenziale**.