



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELLA BASILICATA

Dottorato di Ricerca in  
“Ingegneria per l’Innovazione e lo Sviluppo Sostenibile”

TITOLO DELLA TESI

“Telerilevamento e monitoraggio dello stato idrico della vegetazione e del suolo mediante l’uso di sensoristica ottica e a microonde”

Settore Scientifico-Disciplinare “FIS/06”

Coordinatore del Dottorato

Dottorando

Prof.ssa Aurelia Sole

Simone Pilia

Relatori

Prof. Carmine Serio

Co-tutor Simonetta Paloscia (CNR-IFAC)

Ciclo XXXVII



# Sommario

Sintesi .....	5
Abstract .....	7
Capitolo 1 - Introduzione.....	9
Radiazione elettromagnetica.....	11
Regioni di campo.....	14
Polarizzazione.....	15
Spettro elettromagnetico.....	17
Concetto di risoluzione.....	19
Il telerilevamento della superficie terrestre .....	20
SLAR.....	22
SAR .....	23
Sentinel-1.....	25
Sentinel-2.....	28
Capitolo 2 - Stato dell'arte .....	31
Risposta delle piante a stati di stress .....	31
Protezione delle piante dagli agenti di stress: il ciclo delle xantofille.....	35
Uso del telerilevamento per stimare le diverse condizioni della vegetazione .....	38
Sensibilità delle microonde al contenuto in acqua .....	38
Uso del SAR per la stima della biomassa.....	41
Capitolo 3- Scopo della tesi.....	45
Capitolo 4- Modelli elettromagnetici .....	47
Onda riflessa e trasmessa rispetto ad un angolo di incidenza.....	49
Espressioni dei campi all'interno di mezzi con o senza perdite .....	50
Segnale elettromagnetico all'interno di un mezzo composto .....	53
Rappresentazione del segnale elettromagnetico all'interno della vegetazione: il water cloud model (WCM) .....	56
Contributo di scattering superficiale per una superficie rugosa .....	59
Criteri per considerare una superficie liscia .....	62
Modelli elettromagnetici per un suolo nudo.....	63
Formulazione del WCM utilizzata durante gli esperimenti.....	66
Capitolo 5- Campagne sperimentali e risultati .....	69
Google Earth Engine .....	70
Misure in-situ.....	71
Scelta della <i>acf</i> per la stima del backscattering del suolo.....	74

Determinazione dei coefficienti $A$ e $B$ nel WCM.....	78
Impatto della $SMC$ sul $PRI$ .....	81
Determinazione degli indici multispettrali dalle bande di S-2.....	82
Relazioni con il $PRI$ .....	85
Variazioni nello stato della coltura rispetto ai differenti passaggi satellitari.....	93
Capitolo 6 - Discussioni.....	97
Capitolo 7 - Conclusioni.....	99
Appendice.....	101
Codice utilizzato in Google Earth Engine (Javascript).....	101
Anno 2022.....	101
Anno 2023.....	108
Stima PWC(Matlab).....	115
Modello di Dobson (Matlab).....	119
Modello iem (Matlab).....	120
R2_fitting (Matlab).....	124
Codice per valutare variazioni del PWC rispetto alle variazioni di PRI (Matlab).....	125
Bibliografia.....	129

## Sintesi

L'agricoltura è una delle attività più antiche e importanti dell'umanità perché fornisce i mezzi di sostentamento per diversi miliardi di persone <sup>[1]</sup>. Attraverso l'uso di una serie di pratiche agricole sostenibili, rese sempre più necessarie a causa dei cambiamenti climatici, i sistemi agroalimentari possono generare benefici per l'intero ecosistema aiutando la conservazione della biodiversità, l'immagazzinamento del carbonio ed una migliore gestione dell'acqua all'interno del ciclo idrogeologico <sup>[2]</sup>.

La gestione delle pratiche agricole tradizionali può essere migliorata grazie alla mole crescente di dati provenienti sia da piattaforme remote satellitari che di campo e tramite la loro integrazione. L'uso dei dati telerilevati aperti (open data) rappresenta una importante risorsa utilizzabile da chiunque per il monitoraggio nelle zone soggette ai cambiamenti climatici. Le tecniche di telerilevamento forniscono un valido strumento per il monitoraggio a diverse scale spaziali, al fine di analizzare le condizioni idriche del suolo e della vegetazione le cui variazioni possono comportare un degrado nella produzione e nell'efficienza agricola. L'uso di segnali elettromagnetici a diverse lunghezze d'onda consente di indagare strati diversi di suolo e vegetazione, fornendo informazioni su varie condizioni delle colture. Una banda spettrale molto interessante a questi scopi, anche grazie a una moltitudine di satelliti dalle prestazioni sempre più avanzate, si è rivelata quella delle microonde che non solo è trasparente alla copertura nuvolosa e non è dipendente dall'illuminazione solare, ma ha anche una notevole capacità di penetrazione nei corpi osservati e una dipendenza diretta, tramite la costante dielettrica, dal contenuto in acqua. Perciò, l'uso combinato di applicazioni di telerilevamento a microonde e di near-sensing offre la possibilità di ottenere una maggior resilienza rispetto alle condizioni locali.

Le piante, che hanno la capacità di adattarsi e vivere in ambienti anche estremi, sviluppano un'ampia varietà di strategie per sopravvivere rispetto a diverse condizioni di stress, le quali tendono ad incidere negativamente sullo sviluppo e sulla crescita della vegetazione. Per utilizzare l'energia solare senza subire dei danni, quest'ultime utilizzano meccanismi di difesa che possono includere la produzione di una serie di pigmenti nella parte esterna della foglia. Uno di questi riguarda il ciclo delle xantofille che permettono l'attivazione di un meccanismo fotoprotettivo che protegge la pianta da un eccesso di energia solare. L'attivazione del ciclo delle xantofille è strettamente legato ad una caratteristica di assorbimento della luce, da parte della pianta, nella lunghezza d'onda dei 531 nm. su queste premesse è stato generato un indice denominato *PRI* (photochemical reflectance index) che permette di indicare la presenza di un'elevata attività nel ciclo delle xantofille, ovvero, se la pianta riesce a sfruttare tutta l'energia, o gran parte di essa, per attivare i processi di fotosintesi.

In questo studio è stato sfruttato il potenziale dell'integrazione fra dati ottici e a microonde per monitorare le caratteristiche e lo stato della vegetazione, con la possibilità, conseguentemente, di individuare eventuali condizioni di stress. In particolare, l'attività del ciclo delle xantofille, misurabile attraverso il *PRI*, è strettamente legata alla capacità della pianta di gestire l'energia solare in eccesso e rappresenta un indicatore precoce dello stress fisiologico. Questo approccio consente di identificare le condizioni di stress che possono compromettere l'accumulo di biomassa e ridurre la resa agricola. Inoltre, la biomassa totale della vegetazione può essere quantificata utilizzando sensori a microonde, che sono particolarmente sensibili al contenuto di acqua nelle piante. L'idea della tesi consiste nel verificare le relazioni tra l'attività fotosintetica, stimata tramite il *PRI*, e il contenuto idrico rilevato tramite dati a microonde, per comprendere meglio le dinamiche di stress e

salute delle colture. Un ulteriore obiettivo è analizzare e validare questi parametri confrontandoli con indici ottici già consolidati in letteratura, al fine di confermare e approfondire la conoscenza dello stato fisiologico delle piante e ottimizzare la gestione agricola. Tale interazione mira, inoltre, a individuare quanto del contenuto idrico nelle colture, misurato tramite sensori satellitari, sia necessario per determinare una variazione significativa del *PRI*, assicurando che tale variazione sia attribuibile al cambiamento nel contenuto in acqua e non alle naturali fluttuazioni dell'attività fotosintetica della pianta.

Nello studio, sono stati osservati due campi di sorgo, coltura fortemente resistente alla siccità, durante le stagioni estive del 2022 e del 2023 utilizzando i dati delle missioni satellitari di Sentinel-1 e Sentinel-2. I dati di backscattering di Sentinel-1, che è un radar ad apertura sintetica (SAR), sono stati inseriti insieme ad una serie di misure in-situ in alcuni modelli elettromagnetici per ottenere informazioni relative al contenuto in acqua della vegetazione e del terreno. E' stata sfruttata l'elevata sensibilità dei dati SAR al contenuto in acqua del suolo e delle piante con l'elevata sensibilità dei dati ottici ai diversi pigmenti, producendo così informazioni più approfondite sullo stato di salute della vegetazione e validando così le misure di *PRI* effettuate in loco.

I risultati ottenuti con i dati satellitari a microonde e multispettrali evidenziano un'elevata sensibilità del SAR allo stato idrico del suolo e della vegetazione agricola e la possibilità di stimare sia l'umidità del suolo che il contenuto in acqua delle piante, confermando che questi dati possono essere utilizzati in modo complementare per monitorare lo stato della vegetazione agricola: i dati SAR in banda C possono essere utilizzati per stimare il contenuto in acqua della vegetazione (in ambito tecnico spesso si trova con il suo termine in inglese plant water content, *PWC*), mentre gli indici multispettrali derivati da Sentinel-2, come ad esempio il Normalized Difference Red Edge (*NDRE*) o il Plant Senescence Reflectance Index (*PSRI*), possono essere utilizzati per rilevare lo stato dei pigmenti. Il metodo implementato aiuta a migliorare il monitoraggio della vegetazione, evidenziando lo stato idrico della vegetazione e le sue variazioni che gli indici basati solo su microonde o dati multispettrali non sono in grado di rilevare.

## Abstract

Agriculture is one of the oldest and most important activities of humanity because it provides the means of livelihood for several billions of people <sup>[1]</sup>. Through the use of a series of sustainable agricultural practices, made increasingly necessary due to climate change, agri-food systems can generate benefits for the entire ecosystem by helping to conserve biodiversity, store carbon and better manage water within the hydrogeological cycle <sup>[2]</sup>.

The management of traditional agricultural practices can be improved thanks to the growing amount of data coming from both satellite and in-situ platforms and through their integration. The use of open remote sensing data represents an important resource that can be used by anyone for monitoring in areas subject to climate change. Remote sensing techniques provide a valid tool for monitoring at different spatial scales, in order to analyze the water conditions of soil and vegetation whose variations can lead to a degradation in agricultural production and efficiency. The use of electromagnetic signals at different wavelengths allows to investigate different layers of soil and vegetation, providing information on various crop conditions. A very interesting spectral band for these purposes, also thanks to a multitude of satellites with increasingly advanced performances, has turned out to be that of microwaves which is not only transparent to cloud cover and does not depend on solar illumination, but also has a notable capacity to penetrate the observed bodies and a direct dependence, via the dielectric constant, on the water content. Therefore, the combined use of microwave remote sensing and near-sensing applications offers the possibility of achieving greater resilience to local conditions.

Plants, which have the ability to adapt and live in even extreme environments, develop a wide variety of strategies to survive in different stress conditions, which tend to negatively affect the development and growth of vegetation. To use solar energy without suffering damage, the latter use defense mechanisms that can include the production of a series of pigments on the outer part of the leaf. One of these concerns the xanthophyll cycle that allows the activation of a photoprotective mechanism that protects the plant from an excess of solar energy. The activation of the xanthophyll cycle is strictly linked to a characteristic of light absorption, by the plant, in the wavelength of 531 nm. On these premises, an index called *PRI* (photochemical reflectance index) was generated that allows to indicate the presence of a high activity in the xanthophyll cycle, that is, if the plant is able to exploit all the energy, or a large part of it, to activate the photosynthesis processes.

In this study, the potential of the integration between optical and microwave data has been exploited to monitor the characteristics and the state of vegetation, with the consequent possibility of identifying possible stress conditions. In particular, the activity of the xanthophyll cycle, measurable by the *PRI*, is strictly linked to the plant's ability to manage excess solar energy and represents an early indicator of physiological stress. This approach allows to identify stress conditions that can compromise biomass accumulation and reduce agricultural yield. Furthermore, the total biomass of vegetation can be quantified using microwave sensors, which are particularly sensitive to water content in plants. The idea of the thesis is to verify the relationships between photosynthetic activity, estimated by the *PRI*, and water content detected by microwave data, to better understand the dynamics of stress and crop health. A further objective is to analyze and validate these parameters by comparing them with optical indices already consolidated in the literature, in order to confirm and deepen the knowledge of the physiological state of plants and optimize agricultural management. This interaction also aims to identify how much of the water content in crops,

measured by satellite sensors, is necessary to determine a significant change in *PRI*, ensuring that this change is attributable to changes in water content and not to natural fluctuations in the plant's photosynthetic activity.

In this study, the potential of integrating optical and microwave data was exploited to monitor vegetation characteristics and status with the consequent possibility of identifying any stress conditions. In particular, two fields of sorghum, a highly drought-resistant crop, were observed during the summer seasons of 2022 and 2023 using data from the Sentinel-1 and Sentinel-2 satellite missions. Backscattering data from Sentinel-1, which is a synthetic aperture radar (SAR), were inserted together with a series of in-situ measurements into some electromagnetic models to obtain information on the water content of vegetation and soil. The high sensitivity of SAR data to soil and plant water content was exploited with the high sensitivity of optical data to different pigments, thus producing more in-depth information on the health status of vegetation and validating the *PRI* measurements carried out in situ.

The results obtained with microwave and multispectral satellite data highlight a high sensitivity of SAR to soil and agricultural vegetation water status and the possibility to estimate both soil moisture and plant water content, confirming that these data can be used in a complementary way to monitor agricultural vegetation status: C-band SAR data can be used to estimate the plant water content (*PWC*), while Sentinel-2 derived multispectral indices, such as the Normalized Difference Red Edge (*NDRE*) or the Plant Senescence Reflectance Index (*PSRI*), can be used to detect pigment status. The implemented method helps to improve vegetation monitoring, highlighting vegetation water status and its daily variations that indices based only on microwave or multispectral data are not able to detect.

# Capitolo 1 - Introduzione

Il ciclo dell'acqua permette il movimento e la circolazione dell'acqua nell'oceano, nell'atmosfera e nella biosfera. All'interno del ciclo idrologico le particelle d'acqua si muovono continuamente per mezzo di diversi fenomeni fisici come l'evaporazione, i processi di condensazione, l'infiltrazione, lo scorrimento o la precipitazione. Gli oceani sono il serbatoio dominante del ciclo globale, detenendo oltre il 97% dell'acqua mondiale. Al contrario, l'atmosfera contiene solo lo 0,001% del contenuto in acqua e il resto si trova all'interno dei ghiacciai e nel sottosuolo<sup>[3]</sup>. Nel bilancio idrico terrestre, raffigurato nella Fig. 1, vari parametri geofisici, alcuni dei quali descritti nella Tabella 1, risultano fondamentali per valutare l'entità delle risorse idriche disponibili in tutto il bacino idrogeologico.

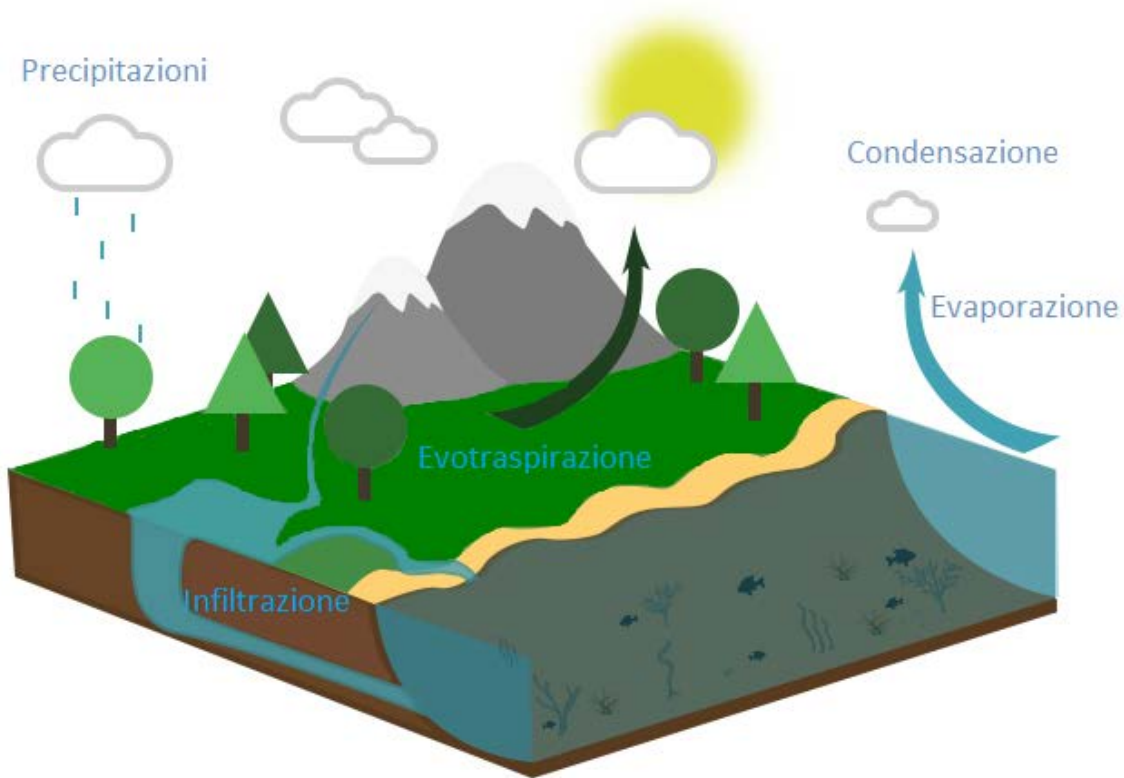


Fig. 1 Schema del ciclo idrogeologico e parametri coinvolti.

Tabella 1 Parametri idrogeologici coinvolti

---

## Caratteristiche del terreno

- Uso del territorio
  - Geometria/drenaggio
  - Pendenze/topografie
  - Temperatura superficiale
-

---

### Umidità del terreno

- Contenuto in acqua nel terreno
- Condizioni di congelamento del terreno

### Neve

- Contenuto in acqua della neve
- Condizioni del manto nevoso (dimensioni dei grani, contenuto in acqua liquido)

### Vegetazione

- Contenuto in acqua delle piante
  - Indice di area fogliare “leaf area index” (*LAI*)
- 

Il monitoraggio a livello globale di questi parametri permette di ottenere una stima delle risorse idriche ai fini di previsioni di rischi (come inondazioni siccità, valanghe), della gestione dell'acqua, dell'ottimizzazione delle irrigazioni.

Il bilancio idrico terrestre può essere descritto come:

$$P(t) = Q(t) + ET(t) \pm \Delta GW(t) \pm \Delta S(t) \pm \Delta SM(t) \quad (1.1)$$

dove  $P$  indica le precipitazioni;  $Q$  il deflusso;  $ET$  l'evapotraspirazione;  $\Delta GW$  la variazione delle acque sotterranee;  $\Delta S$  le variazioni nell'immagazzinamento per laghi, neve, umidità delle piante, ecc.;  $\Delta SM$  la variazione dell'umidità del suolo; e  $t$  è la variabile temporale. Le variabili  $P$ ,  $Q$  e  $ET$  sono generalmente considerati flussi mentre  $GW$ ,  $S$ ,  $SM$  possono essere considerati stati del sistema in un dato momento.

Il bilancio idrico, anche in sistemi controllati a scala locale come nell'agricoltura, è di difficile quantificazione a causa della sua variabilità spaziale e temporale. Inoltre, l'impatto dell'uomo, ad esempio con l'uso delle pratiche irrigue, rende l'analisi del problema maggiormente complessa. Tuttavia, studi sul bilancio idrico<sup>[4]</sup> sono necessari anche su piccole scale per comprendere i processi idrogeologici che modellano i flussi energetici e idrici nel sistema suolo-vegetazione-atmosfera sia spazialmente che temporalmente<sup>[5]</sup>. Inoltre, gli studi sul bilancio idrico diventano estremamente importanti su ampie scale per comprendere il funzionamento del clima a livello globale.

Nel terreno, uno dei parametri più importanti che veicola il comportamento del ciclo idrogeologico è l'umidità del suolo<sup>[6]</sup>. L'umidità influenza i flussi di evapotraspirazione svolgendo un ruolo importante nella previsione degli eventi idrogeologici estremi. I suoi valori sono solitamente ottenuti da dati meteorologici o forniti da rilevazioni in situ. Tuttavia, per grandi aree la stima non è così facile a causa dell'impossibilità di recuperare molti campioni per ottenere una stima precisa dell'umidità<sup>[7]</sup>.

Un'altra variabile fondamentale per il ciclo è l'impatto dell'agricoltura<sup>[8]</sup> che sfrutta molte risorse di acqua dolce. Una agricoltura efficiente è fondamentale per porre fine agli sprechi idrici e raggiungere una sicurezza alimentare mondiale. Con l'aumento della domanda di acqua dolce, è importante fare un uso ottimale delle risorse attuando un'agricoltura sostenibile, come consigliato dall'Agenda delle Nazioni Unite per lo sviluppo sostenibile. In particolare, si consiglia di “attuare pratiche agricole resilienti che aumentino la produttività e la produzione, che aiutino e mantengano gli ecosistemi, che rafforzino la capacità di adattamento ai cambiamenti climatici, alle condizioni

meteorologiche estreme, alla siccità, alle inondazioni e ad altri disastri e che migliorino progressivamente la qualità della terra e del suolo " <sup>[9]</sup>.

In questo contesto, l'utilizzo di dati satellitari multifrequenza, e a microonde in particolare, contribuiscono alla stima di queste variabili grazie alla sensibilità del segnale rispetto alla costante dielettrica dell'acqua <sup>[10]</sup>, <sup>[11]</sup>, <sup>[12]</sup>. Inoltre, i sensori a microonde consentono di osservare la superficie indipendentemente dall'illuminazione solare e dalle condizioni meteorologiche. Utilizzando modelli elettromagnetici, che simulano l'emissione o lo scattering dalle superfici naturali, è possibile interpretare le misure e stimare i parametri che caratterizzano il suolo e la sua copertura, come la vegetazione e/o la neve <sup>[13]</sup> e i ghiacci. Pertanto, a seconda delle caratteristiche delle onde elettromagnetiche emesse dalla vegetazione è possibile comprenderne alcune caratteristiche.

Altri tipi di sensori, come quelli multispettrali, offrono la possibilità di ottenere informazioni diverse sulle superfici osservate. Questi strumenti registrano la quantità di energia riflessa dagli oggetti nelle lunghezze d'onda tipiche del visibile e dell'infrarosso. A causa delle loro lunghezze d'onda, però, i valori acquisiti sono dipendenti dall'illuminazione solare e dalle condizioni meteorologiche e non tutte le misure possono essere considerate affidabili. Conseguentemente, i dati multispettrali non sono sempre adatti per ricavare informazioni sulle superfici e anche per questo i dati alle microonde si rivelano importanti per fornire informazioni a supporto delle decisioni.

L'utilizzo sinergico di dati ottici e a microonde <sup>[14]</sup> è quindi oggetto di un numero crescente di studi scientifici, anche per alcuni vantaggi come la possibilità di ottenere un maggior numero di informazioni in uno stesso intervallo temporale.

## Radiazione elettromagnetica

Per ottenere informazioni sui corpi senza che lo strumento di rilevamento utilizzato sia a contatto diretto con l'oggetto di studio viene utilizzato il telerilevamento, in grado di determinare alcune caratteristiche fisico/chimiche dei corpi mediante l'uso di un sensore che misura l'energia elettromagnetica emessa o riflessa dal corpo <sup>[15]</sup>. Questi sensori, spesso montati su piattaforme aeree o satellitari, esplorano la superficie di interesse producendo una immagine in cui ciascun pixel indica l'intensità della radiazione elettromagnetica riflessa o emessa nella porzione di spazio osservata. In base al tipo di misura effettuata possiamo distinguere i sensori per telerilevamento in due tipi: attivi e passivi. I primi inviano un segnale elettromagnetico e misurano l'energia riflessa dagli oggetti osservati mentre secondi misurano la radiazione che i corpi emettono in modo naturale, senza l'uso di una sorgente elettromagnetica esterna. A prescindere dal tipo di sensore utilizzato, la radiazione elettromagnetica è fisicamente sempre la stessa. Questa è composta da un campo elettrico e uno magnetico mutuamente perpendicolari sia tra loro che rispetto alla direzione di propagazione dell'onda. Con il concetto di radiazione intendiamo la propagazione del campo elettromagnetico nello spazio che può essere descritta tramite le equazioni di Maxwell:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \vec{E}(\vec{r}, t) = -\frac{d\vec{B}(\vec{r}, t)}{dt} \\ \nabla \times \vec{B}(\vec{r}, t) = \vec{J}(\vec{r}, t) + \frac{d\vec{D}(\vec{r}, t)}{dt} \\ \nabla \cdot \vec{B}(\vec{r}, t) = 0 \\ \nabla \cdot \vec{D}(\vec{r}, t) = \rho \end{array} \right. \quad (1.2)$$

con:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{D}(\vec{r}, t) = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E}(\vec{r}, t) \\ \vec{B}(\vec{r}, t) = \mu_0 \mu_r \vec{H}(\vec{r}, t) \end{array} \right. \quad (1.3)$$

i simboli utilizzati con le loro unità di misura sono:

- $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [H/m]$  permeabilità magnetica del vuoto
- $\mu_r [H/m]$  permeabilità magnetica relativa al mezzo
- $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} [F/m]$  permittività dielettrica del vuoto
- $\varepsilon_r F/m$  permittività dielettrica relativa al mezzo.
- $\vec{E}$  vettore del campo elettrico  $[V/m]$
- $\vec{D}$  vettore di induzione elettrica  $[C/m^2]$
- $\vec{B}$  vettore di induzione magnetica  $[Wb/m^2]$
- $\vec{H}$  vettore di campo magnetico  $[H/m]$
- $\vec{J}$  densità di corrente elettrica  $A/m^2$
- $\rho$  densità di carica elettrica  $C/m^3$
- $\vec{r}$  vettore che indica le coordinate nello spazio  $(x, y, z) m$
- $t$  tempo  $s$

nell'aria sia  $\mu_r$  che  $\varepsilon_r$  hanno valori vicini a quello del vuoto, pari a 1. Le equazioni di Maxwell permettono di conoscere i valori dei campi nello spazio, indicati da un vettore nelle tre dimensioni  $\vec{r}$  e nel tempo  $t$ . Gli operatori :

$$\nabla = \left( \frac{d}{dx}, \frac{d}{dy}, \frac{d}{dz} \right); \nabla \times E = \begin{bmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ \frac{d}{dx} & \frac{d}{dy} & \frac{d}{dz} \\ E_x & E_y & E_z \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

permettono di calcolare la divergenza e il rotore dei campi nelle tre dimensioni spaziali. Le equazioni (1.2) e (1.3) vengono generalmente rappresentate nel dominio della frequenza, piuttosto che come dipendenti dal dominio del tempo, in quanto nelle applicazioni pratiche del telerilevamento, con grandi distanze tra il sensore e l'oggetto da studiare, le onde possono essere considerate, con buona approssimazione, piane. Vengono, perciò, considerati sia i campi che le sorgenti a frequenza costante. In questi casi si utilizza la rappresentazione nel dominio della frequenza, con  $\frac{d}{dt} = j\omega$  e  $\nabla = -j\beta$  con le variabili che sono generalmente rappresentate tramite le lettere maiuscole. Inoltre, si definiscono altre variabili caratteristiche delle onde elettromagnetiche, quali:

$$f = 1/T \quad [Hz] \quad (1.5)$$

$$\omega = 2\pi f \quad \left[ \frac{rad}{s} \right] \quad (1.6)$$

$$\beta = k = \frac{2\pi}{\lambda} [m^{-1}] \quad (1.7)$$

$$f = \frac{v_p}{\lambda} [Hz] \quad (1.8)$$

$$v_p = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (1.9)$$

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (1.10)$$

con  $T$  periodo del segnale elettromagnetico, ovvero quanto tempo impiega il segnale per ripresentare le stesse caratteristiche di ampiezza e fase. Il suo reciproco, pari a  $f$  e denominata frequenza, indica la quantità di cicli nell'unità di tempo e si misura in  $[Hz]$ . La pulsazione, o velocità angolare, del segnale elettromagnetico  $\omega$  indica quanti periodi ci sono rispetto ad un intervallo  $2\pi$ . Il numero d'onda  $k = \beta + j\alpha = \beta$  per un mezzo privo di perdite ( $\alpha = 0$ ), rappresenta il numero di lunghezze d'onda contenute in uno spazio radiale  $2\pi$  mentre  $\lambda$  rappresenta la lunghezza d'onda dell'onda elettromagnetica rapportata rispetto alla velocità di propagazione dell'onda elettromagnetica nel mezzo,  $v_p$ . Qui  $c_0$  indica la velocità di propagazione dell'onda nel vuoto. Sostituendo i valori di  $\epsilon_0, \mu_0$  si ottiene  $c_0 \sim 2.998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  [16]. Lavorando sempre nel dominio della frequenza e indicando con  $\hat{x}$  la direzione di propagazione del campo elettrico,  $\hat{z}$  quello dell'onda, la relazione tra campo magnetico ed elettrico è governata dalle soluzioni:

$$\vec{E} = E_x \hat{x} \quad (1.11)$$

$$\vec{H} = H_y \hat{y} \quad (1.12)$$

$$\vec{k} = k \hat{z} \quad (1.13)$$

considerando la sola soluzione rispetto a  $\hat{y}$ :

$$H_y(z, t) = \frac{E_{x0}}{\eta} \cos(\omega t - kz) \quad (1.14)$$

dove  $\eta = \frac{\omega \mu_0 \mu_r}{k} = \sqrt{\mu_0 \mu_r \epsilon_0 \epsilon_r}$  indica l'impedenza caratteristica del mezzo in cui avviene la propagazione, in  $[\Omega]$ , che vale  $120\pi$  per il vuoto e viene generalmente indicata con il simbolo  $\eta_0$ . Di conseguenza,  $\vec{H}$  è attenuato da un fattore  $\eta$  rispetto a  $\vec{E}$  ed il campo si muove in una direzione perpendicolare rispetto a quella di  $\vec{E}$  (Fig. 2). Infine, sia  $\vec{E}$  che  $\vec{H}$  risultano perpendicolari rispetto alla direzione di propagazione dell'onda, lungo  $\hat{z}$  [17].

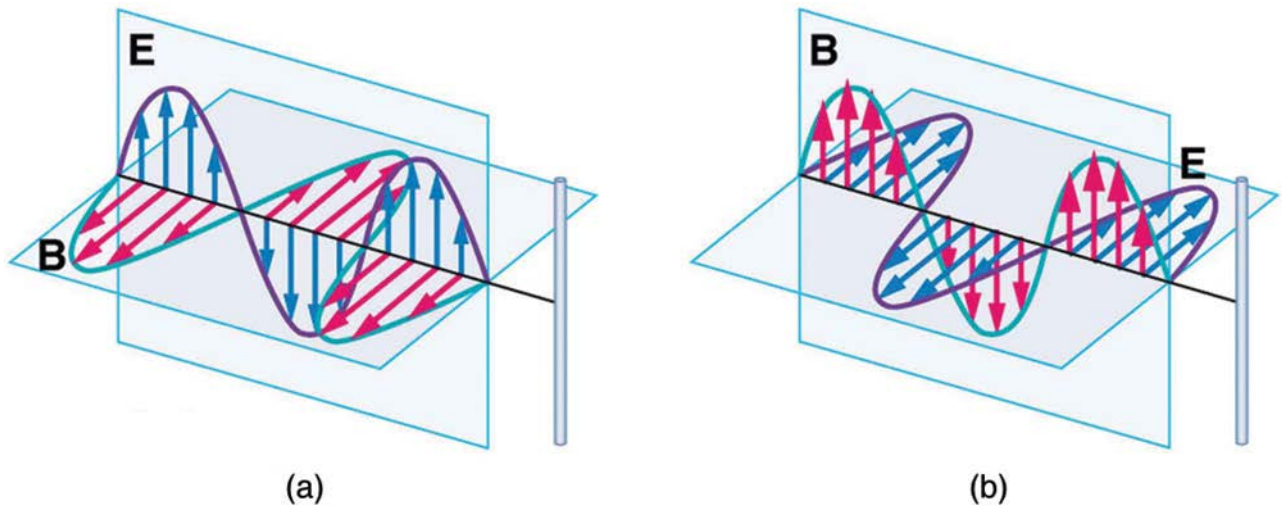


Fig. 2 Andamento del campo elettrico (E) e di induzione magnetica (B) nello spazio. Considerando il campo elettrico orientato verticalmente, quello magnetico sarà orientato orizzontalmente (a) e viceversa (b).

## Regioni di campo

In base alle sue caratteristiche, il campo elettromagnetico attorno all'antenna può essere suddiviso in tre regioni principali: la *regione reattiva del campo vicino*, la *zona di Fresnel* e la *zona di campo lontano* o *zona Fraunhofer*. La *regione di campo vicino reattivo* è definita come "quella parte della regione del campo vicino che circonda immediatamente l'antenna, in cui il campo reattivo predomina", ovvero sono preponderanti le componenti induttive e capacitive. Il limite di questa regione è dato da:

$$R < 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \quad (1.15)$$

con:

$R$  = distanza dall'antenna

$D$  = dimensione massima dell'antenna (oppure a seconda della geometria diametro della circonferenza che racchiude la sorgente elettromagnetica).

La seconda regione, *zona di Fresnel*, è definita come "Quella porzione del campo vicino regione di un'antenna tra il campo lontano e la parte reattiva del campo vicino regione, in cui la distribuzione del campo angolare dipende dalla distanza dall'antenna". Questa regione è associata all'intervallo:

$$0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \leq R \leq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (1.16)$$

infine, nella *regione di Fraunhofer* la distribuzione angolare del campo è indipendente dalla distanza tra il punto di osservazione e la sorgente. Questa regione si estende da  $R > \frac{2D^2}{\lambda}$  verso l'infinito. In questa regione, di nostro interesse per il telerilevamento ambientale, qualsiasi sia la frequenza di utilizzo il campo elettromagnetico giace perpendicolare rispetto alla direzione di propagazione dell'onda e data l'ampia distanza tra l'oggetto di studio ed il punto dell'osservatore le onde possono

essere considerate piane, a differenza di quanto avviene nelle altre due regioni <sup>[18]</sup>, <sup>[19]</sup>. Infine, il modo con cui il campo elettromagnetico viene irradiato nello spazio può essere rappresentato come un solido o un diagramma di radiazione. Entrambi descrivono il comportamento del campo nella zona di campo lontano, rispettivamente, in 3 o 2 dimensioni. A prescindere dalla geometria, si parlerà di *pattern dell'antenna* descrivendo come l'antenna irradia (o riceve) l'energia nello spazio circostante <sup>[20]</sup>. Il pattern dell'antenna sarà costituito da un lobo principale, dove viene irradiata la maggior parte dell'energia, e una serie di lobi secondari indesiderati. Date le ampie distanze tra la sorgente ed i bersagli, all'interno dell'angolo costituito dal lobo principale le distanze tra i diversi oggetti e la sorgente possono essere considerate costanti, pari a  $R$ .

## Polarizzazione

Consideriamo un campo elettrico che giace in un piano  $xy$  che si propaga lungo la direzione  $z$ . Possiamo definire la polarizzazione di un'onda come l'orientamento del vettore del campo elettrico, che può essere in una direzione fissa o può cambiare nel tempo. Il campo elettrico, che indicheremo con  $\vec{E}$ , nel tempo tratterà una curva sul piano  $xy$ . Quando questa curva ha un andamento lineare si parlerà di polarizzazione lineare, altrimenti di polarizzazione ellittica o circolare. Rappresentiamo  $\vec{E}$  nel dominio della frequenza, supponendo che sia orientato verso  $\hat{x}$  ed il campo magnetico verso  $\hat{y}$ :

$$E_x(z, t) = E_{x0} \cos(\omega t - \beta z) \quad (1.17)$$

Dove fissato  $z$  il campo “si muove” lungo l'asse  $x$  nel tempo. Nella maggior parte delle applicazioni pratiche, però, saranno presenti delle componenti del campo elettrico anche lungo  $\hat{y}$  e l'equazione (1.17) possiamo descriverla in termini più generici come:

$$\vec{E}(z, t) \hat{x} + E_y(z, t) \hat{y} = E_{x0} \cos(\omega t - \beta z) \hat{x} + E_{y0} \cos(\omega t - \beta z + \theta) \hat{y} \quad (1.18)$$

le cui due componenti del campo sono sfasate di un termine  $\theta$ , indicando un ritardo. L'equazione (1.18) descrive l'andamento generale di un campo elettrico nel piano  $xy$ . In linea generale, il campo elettrico andrà a creare una struttura ellittica, come raffigurato nella Fig. 3, da cui il termine “polarizzazione ellittica del campo elettrico”. Solo in alcuni casi particolari, vedi Fig. 4, si parlerà di polarizzazione del campo elettrico circolare, ovvero si forma un cerchio, quando  $\theta = \pm 90$  e  $E_{x0} = E_{y0}$ , oppure lineare per  $E_x = 0$  e  $E_y = -E_{y0}$  o con  $E_x = E_{x0}$  e  $E_y = 0$ . Inoltre si parlerà di polarizzazione sinistrorsa o destrorsa a seconda della direzione con cui si muove il vettore del campo elettrico: se si muoverà nel piano  $xy$ : per  $\omega t > 0$  si parlerà di polarizzazione sinistrorsa, al contrario di polarizzazione destrorsa.

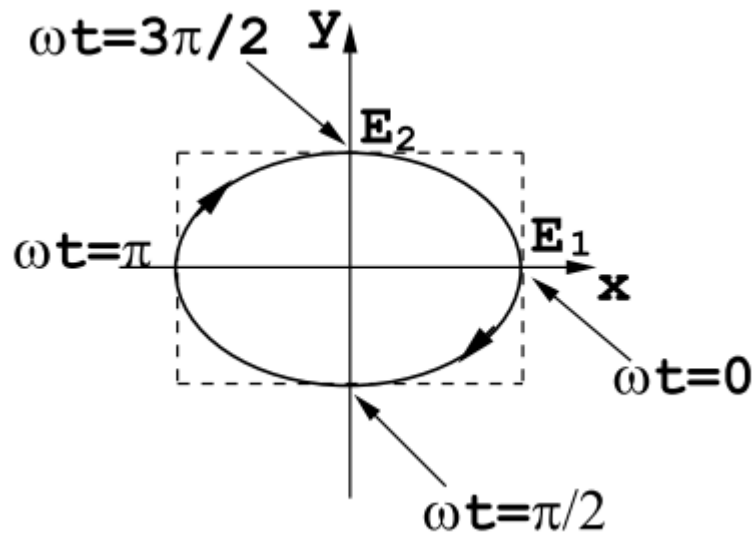


Fig. 3 Polarizzazione ellittica sinistrorsa del campo elettrico

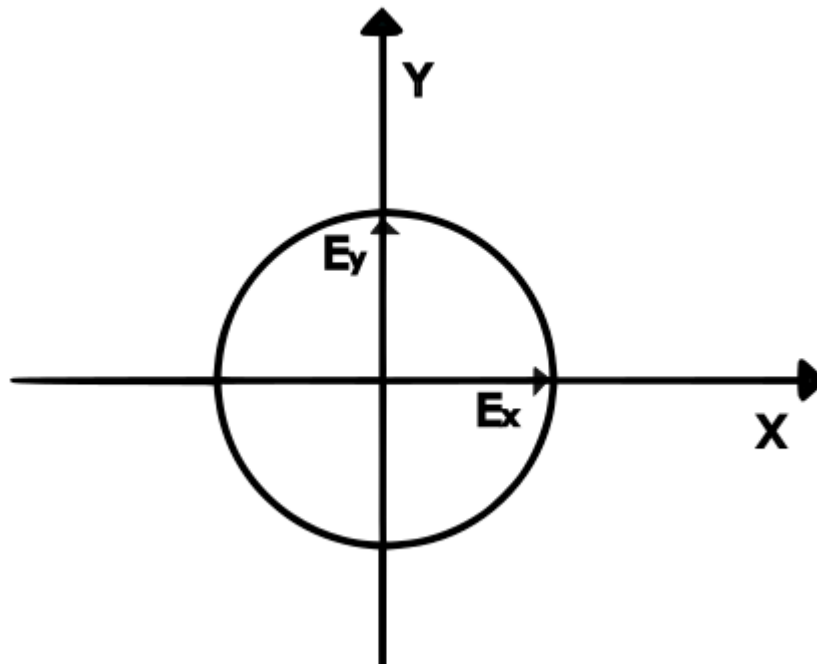


Fig. 4 Polarizzazione circolare del campo elettrico. I campi in  $\hat{x}$  e  $\hat{y}$  hanno uguali intensità e formano un angolo retto. Quando il campo è tutto contenuto lungo un versore, si parla di polarizzazione lineare in quanto nel tempo è presente solo  $E_x$  o  $E_y$ .

I segnali trasmessi da strumenti elettronici sono segnali che possiedono un campo elettrico polarizzato in un certo modo. All'opposto, i segnali emessi dai corpi naturali portano ad onde statisticamente scorrelate come polarizzazione. In questo caso si parla di onde incoerenti o non polarizzate. Nel mezzo tra un segnale perfettamente polarizzato e uno scorrelato vi sono una moltitudine di casi parzialmente polarizzati, come nel caso delle onde scatterate dai corpi generici.

Per identificare “lo stato di polarizzazione” o “grado di coerenza” di un’onda piana si valuta la cross-polarizzazione tra le componenti lungo  $\hat{x}$  e  $\hat{y}$ , supponendo  $\hat{z}$  la direzione di propagazione dell’onda. Si definisce *stato di polarizzazione* di un’onda:

$$\rho_{xy} = \left| \frac{\langle E_x E_y^* \rangle}{(\langle |E_x|^2 \rangle \langle |E_y|^2 \rangle)^{1/2}} \right| = 1 \text{ onde polarizzate; } 0 \text{ onde non polarizzate} \quad (1.19)$$

con  $\langle E_{xy} \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T E_{xy} f(E_{xy}) dx$ , ovvero indica il valor medio di  $E_{xy}$ . Generalmente tal parametro non è mai 0 o 1 ma si trova compreso tra i due valori. Perciò, si parlerà di onde parzialmente polarizzate. Infine, nei successivi paragrafi e capitoli, indicheremo  $\hat{x}$  con H, indicando una polarizzazione orizzontale, e  $\hat{y}$  con V, indicando una polarizzazione verticale <sup>[17]</sup>.

## Spettro elettromagnetico

La luce del sole è la forma di energia elettromagnetica più familiare per gli esseri umani. La luce riflessa dagli oggetti viaggia, nella maggior parte dei casi, in linea retta verso l’occhio dell’osservatore <sup>[21]</sup>. Una volta raggiunta la retina, genera una serie di impulsi elettrici che vengono trasmessi dal nervo ottico verso il cervello che ricostruisce, così, l’immagine dell’ambiente circostante. Questo processo di visione umana tipica negli esseri viventi é analoga nel telerilevamento dove al posto del nostro occhio è presente un o una serie di sensori elettronici <sup>[22]</sup>. La luce visibile è chiamata così perché l’occhio umano riesce a percepirla mentre altre forme di energia elettromagnetica risultano invisibili. Sir Isaac Newton (1643-1727) ha studiato la natura della luce bianca concludendo che quest’ultima è costituita da “una serie di componenti diversamente colorati”. Nel corso degli anni e dei secoli successivi si scoprì che non solo la luce è un’onda elettromagnetica ma anche altre onde costituite da diverse lunghezze d’onda L’insieme di tutte le possibili onde elettromagnetiche viene denominato “spettro elettromagnetico” includendo diverse tipi di onde, dai raggi  $\gamma$  e cosmici fino alle onde radio, vedi Fig. 5. Nel caso delle onde simmetriche, cioè onde che presentano periodicamente le stesse caratteristiche nel tempo, esse vengono descritte con il termine frequenza, vedi equazione (1.8), che descrive il numero di forme d’onda che attraversano un dato punto in un secondo. In alternativa, può essere considerato il termine lunghezza d’onda  $\lambda$  indicando la distanza tra due picchi successivi, Fig. 6. La velocità con cui tali onde viaggiano nel mezzo, equazione (1.9), dipende dal mezzo con cui le onde interagiscono.

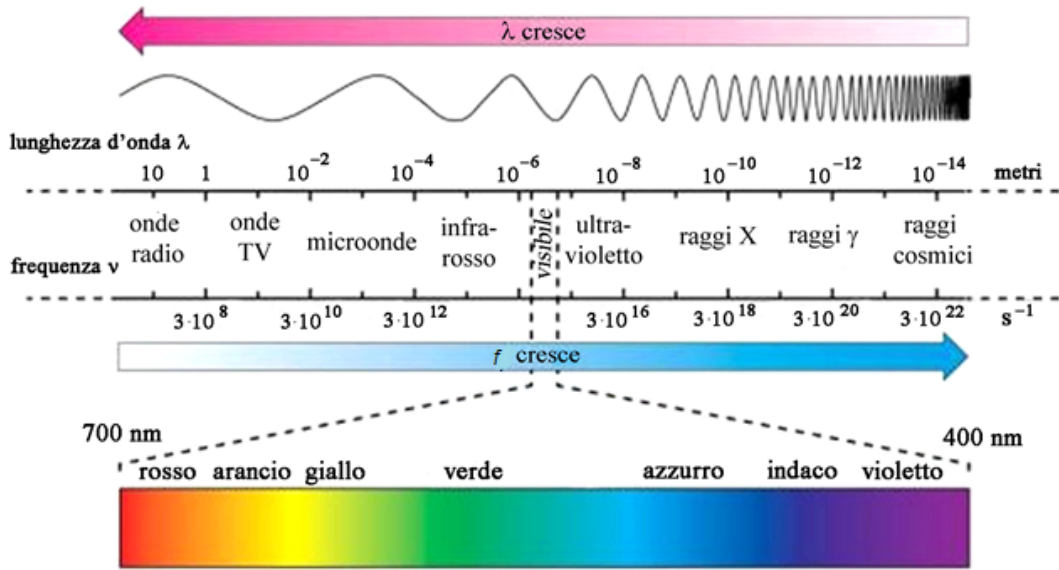


Fig. 5 Spettro elettromagnetico. Tanto più la lunghezza d'onda diminuisce e tanto più aumenta la frequenza. Onde elettromagnetiche a frequenze elevate interagiscono con elementi sempre più piccoli. I raggi X permettono di vedere la struttura ossea del nostro corpo mentre i raggi γ hanno lunghezze d'onda talmente piccole da interagire con la struttura del nostro DNA e sono dannosi per la vita sulla Terra. La luce è racchiusa in una porzione ristretta di lunghezze d'onda tra 700 e 400 nm.

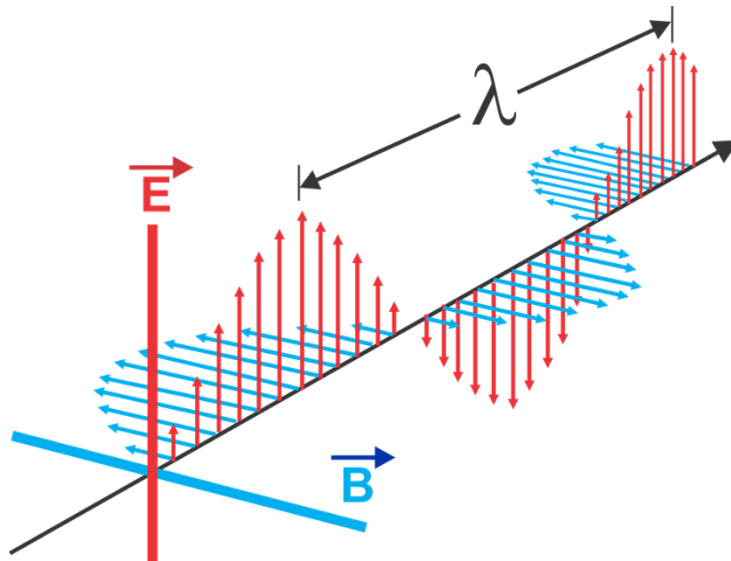


Fig. 6 Distanza tra due picchi nel segnale elettromagnetico, lunghezza d'onda  $\lambda$ , mentre l'onda si muove nello spazio. La sua frequenza  $f$  è inversamente proporzionale a  $\lambda$  rispetto alla velocità con cui si muove l'onda nel mezzo, vedi equazione (1.8)

Dato che l'onda elettromagnetica può essere vista sia come onda sia come mezzo corpuscolare <sup>[23]</sup>, l'energia che ogni onda elettromagnetica porta con sé vale:

$$En = hf \quad (1.20)$$

dove  $En$  indica l'energia dell'onda elettromagnetica e  $h$  è la costante di Planck, pari a  $6.625 \cdot 10^{-34}$  J·s. Dall'equazione (1.20) si nota come onde ad alta frequenza, come i raggi X, portino con sé una maggior quantità di energia rispetto alle onde a frequenza più bassa, come le onde radio o le

microonde. Lo spettro di quest'ultime copre un intervallo di frequenze che va da 30-3000 MHz per le onde radio mentre le microonde coprono l'intervallo 3-300 GHz, a cui corrispondono le lunghezze d'onda comprese tra 10 cm e 1 mm (1 MHz=10<sup>6</sup> Hz; 1 GHz= 10<sup>9</sup> Hz) <sup>[24]</sup>. Le diverse frequenze nello spettro delle microonde sono ulteriormente suddivise per intervalli <sup>[25]</sup> dove ciascun intervallo viene adibito per diversi servizi commerciali o di ricerca. Le bande tipicamente utilizzate nel telerilevamento sono quelle mostrate nella Tabella 2.

Tabella 2 Suddivisione delle bande alle microonde

Banda	$f$ [GHz]	$\lambda$ [m]
P	0.3-1	$1-3 \cdot 10^{-1}$
L	1-2	$3 \cdot 10^{-1}-1.5 \cdot 10^{-1}$
S	2-4	$1.5 \cdot 10^{-1}-7.5 \cdot 10^{-2}$
C	4-8	$7.5 \cdot 10^{-2}-3.75 \cdot 10^{-2}$
X	8-12	$3.75 \cdot 10^{-2}-2.5 \cdot 10^{-2}$
Ku	12-18	$2.5 \cdot 10^{-2}-1.67 \cdot 10^{-2}$
K	18-27	$1.67 \cdot 10^{-2}-1.11 \cdot 10^{-2}$
Ka	27-40	$1.11 \cdot 10^{-2}-0.75 \cdot 10^{-2}$

L'intervallo elettromagnetico delle microonde utilizzato nel telerilevamento ha la caratteristica di risultare debolmente sensibile alle condizioni atmosferiche e, pertanto, permette di acquisire immagini radar, utilizzando sensori attivi, o radiometriche, con l'uso di sensori passivi, in qualsiasi condizione atmosferica, cosa che, invece, non è possibile con un telerilevamento, ad esempio, ottico <sup>[26]</sup>.

## Concetto di risoluzione

Il compito principale di un sensore utilizzato nel telerilevamento è quello di misurare l'energia elettromagnetica in un certo intervallo di frequenze. L'energia che arriva al sensore dipende da una moltitudine di aspetti fisici come le proprietà del terreno, l'illuminazione, il rilievo, l'influenza atmosferica. Naturalmente ogni sensore sarà più o meno sensibile ad alcune variabili. Ad esempio, un sensore nelle lunghezze d'onda delle microonde non risente della presenza delle nubi o dell'assenza dell'illuminazione solare. Ogni misurazione è di solito associata ad un sistema di coordinate generando, così, una funzione  $En(x, y)$  che rappresenta una immagine. Il valore di  $En$  dipende dall'energia che arriva al sensore, equazione (1.20), ma anche dalle coordinate  $(x, y)$  e dalla lunghezza d'onda  $\lambda$ . In linea generale, un sensore può acquisire dati in un intervallo di frequenze, denominato banda spettrale o canale, oppure su più intervalli contemporaneamente come nel caso dei sensori multispettrali o iperspettrali. Quest'ultimi si differenziano per il numero di bande, dove i sensori iperspettrali <sup>[27]</sup> hanno centinaia di bande mentre i multispettrali, al massimo, qualche decina <sup>[28]</sup>. Inoltre, qualsiasi dato registrato dal sensore sarà dipendente dal tempo  $t$ . L'energia  $En$ , raccolta integrando il segnale in un certo intervallo di tempo, viene ad essere prima quantizzata e successivamente convertita in un "digital number". Conseguentemente, i sensori, digitali, montati sulle apposite piattaforme, saranno sensibili a determinati quanti di energia. Tanto più il sensore riesce ad essere sensibile a variazioni nella quantità di energia che riceve, tanto più possiamo ricavare informazioni chimico/fisiche dalla nostra scena di osservazione. Come conseguenza del processo di quantizzazione e campionamento, le immagini registrate sono costituite da singoli elementi, denominati pixel, a cui è associato un singolo valore.

I principali parametri che caratterizzano un sistema di telerilevamento ambientale sono il numero delle bande disponibili, l'intervallo spettrale di ciascuna banda ovvero l'ampiezza della banda acquisita, la risoluzione spaziale, spettrale e temporale. La risoluzione spaziale in una immagine indica la distanza minima affinché due oggetti siano percepibili come separati. La risoluzione spettrale indica la capacità di un sensore di rispondere ad uno specifico intervallo di frequenze, ovvero indica la sensibilità del sensore per gruppi distinti di intervalli di frequenza. Infine, la risoluzione temporale fornisce quanto tempo intercorre tra un passaggio e il successivo sulla stessa area <sup>[29]</sup>.

## Il telerilevamento della superficie terrestre

Non tutte le radiazioni elettromagnetiche presenti nel cosmo, fortunatamente, giungono fino alla superficie terrestre. Questo è dovuto alla presenza dell'atmosfera che funziona da barriera contro alcune frequenze facendone passare altre. Questo fenomeno permette la vita sulla Terra così come la conosciamo. Le uniche onde rilevabili dalla superficie sono quelle che riescono a penetrare l'atmosfera, vedi Fig. 7, mentre per poter captare le onde letali per la vita umana si devono usare satelliti posti oltre l'atmosfera terrestre.

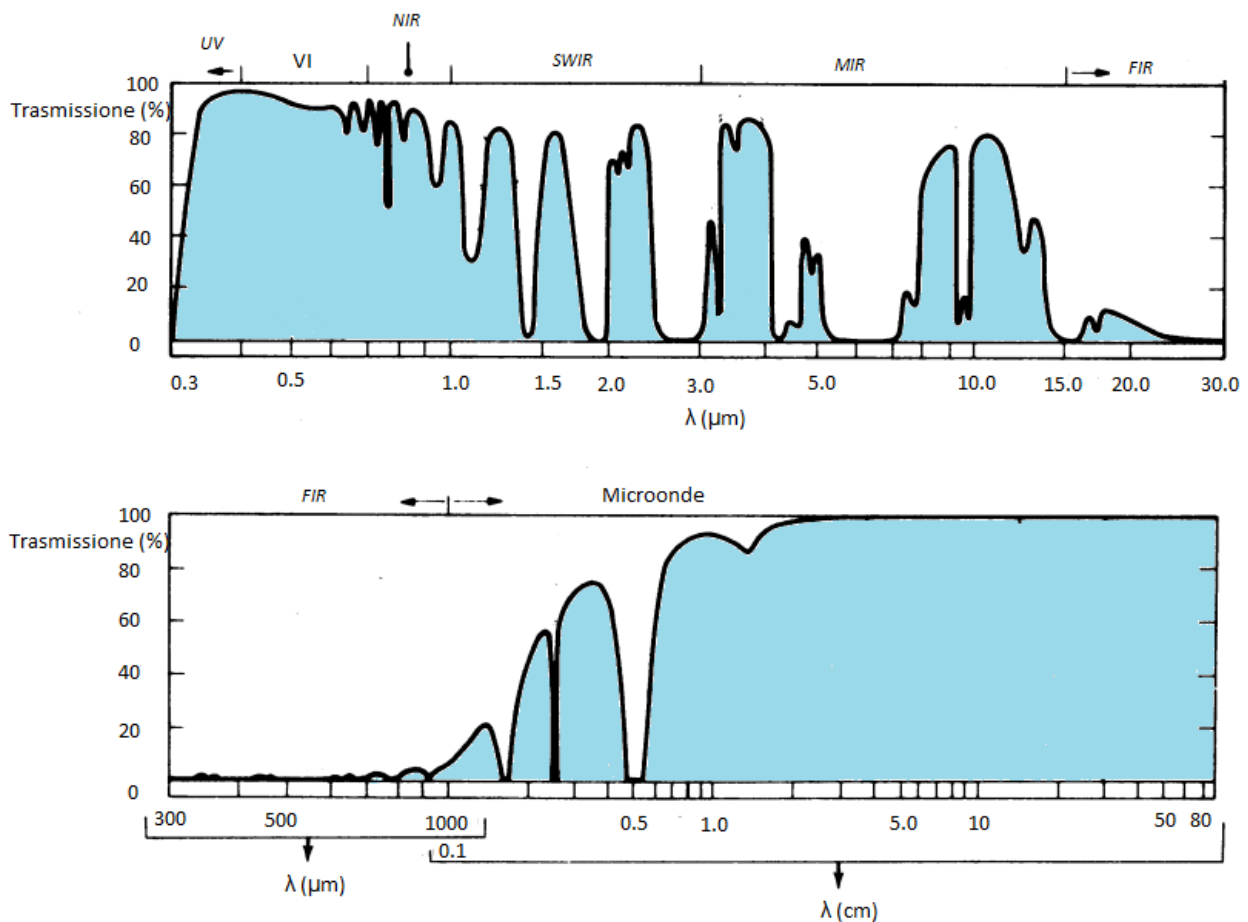


Fig. 7 Trasmissività dell'atmosfera terrestre (%). Figura presa da <sup>[30]</sup>, Figura 1. Legenda: UV=ultravioletto; VI=visibile; NIR=vicino infrarosso; SWIR=infrarosso ad onde corte; MIR= medio infrarosso; FIR=lontano infrarosso.

Nella Fig. 7 si nota come l'atmosfera sia trasparente per le lunghezze d'onda nelle microonde, mentre altre riescono a passare solo parzialmente lo scudo atmosferico. Conseguentemente, non tutti i sensori installati su piattaforme satellitari possono misurare in modo corretto le caratteristiche della superficie terrestre. Quelli che trovano una consistente riflessione atmosferica devono essere posizionati in prossimità della scena oppure su una piattaforma aerea come un velivolo che rimane, comunque vicino alla superficie terrestre per diminuire gli effetti dell'atmosfera. Inoltre, in base alle caratteristiche ed alle proprietà dei corpi, una parte dell'energia elettromagnetica verrà assorbita. Nella Fig. 8 sono mostrate alcune firme spettrali per terreno nudo, vegetazione e acqua. Dalla figura si nota come il picco di riflettanza nel vicino infrarosso e i due nel medio infrarosso possono essere utilizzati per acquisire informazioni sullo stato di salute delle colture <sup>[31]</sup>.

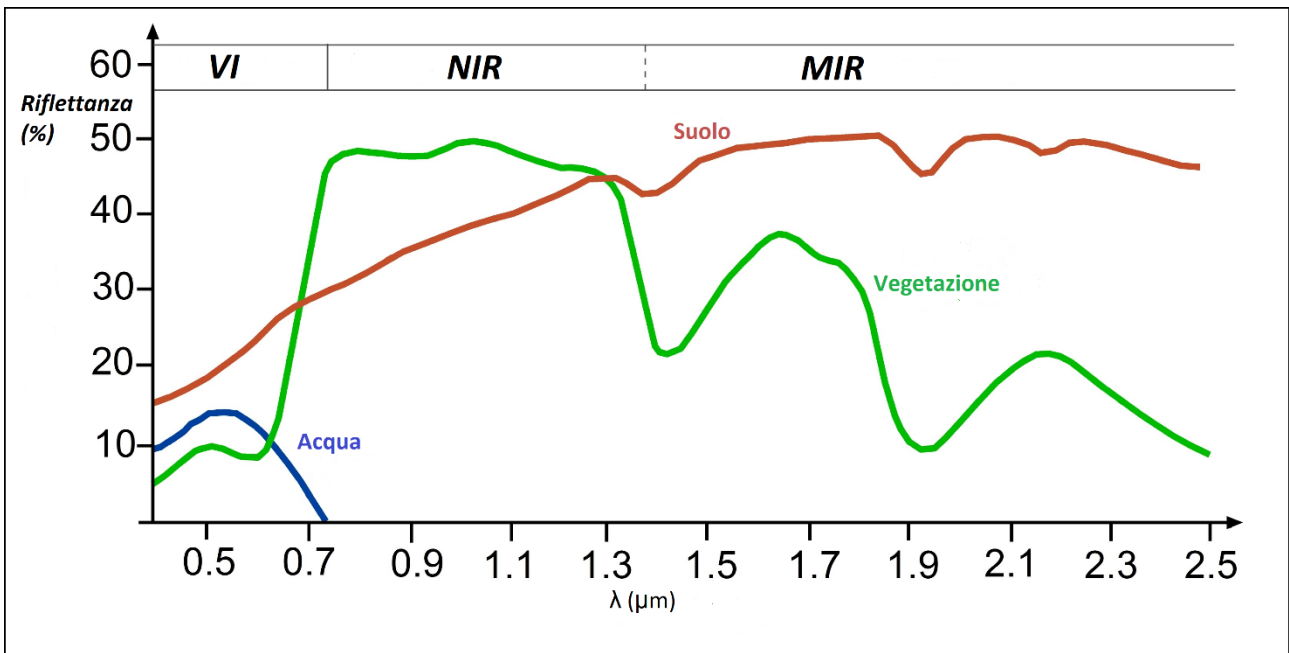


Fig. 8 Esempio di riflettanza di alcuni corpi. Fonte [https://seos-project.eu/classification/images/spectral\\_signatures.jpg](https://seos-project.eu/classification/images/spectral_signatures.jpg)

Pertanto, i sensori utilizzati nell'ottico rilevano la radiazione elettromagnetica riflessa nelle bande spettrali del visibile o nelle vicinanze.

Nell'ambito dei sensori passivi (radiometri) per capire l'ammontare dell'energia emessa da un corpo ci si avvale della legge di Planck che descrive la radianza spettrale come la quantità di energia emessa da un corpo per unità di angolo solido rispetto ad una superficie.

$$B_f(f, T) = \frac{2hf^3}{c_0^2} \cdot \frac{1}{(e^{\frac{hf}{K_B T}} - 1)} \quad (1.21)$$

Con  $K_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$  costante di Boltzman e  $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \frac{\text{Kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}}$  costante di Planck. La formula (1.21) può essere semplificata per le frequenze utilizzate tipicamente nel telerilevamento alle microonde con l'approssimazione di Rayleigh-Jeans:

$$B_f(f, T) = \frac{2K_B T f^2}{c_0^2} \quad (1.22)$$

dove la temperatura  $T$  indica la temperatura di brillantezza  $T_B$  ( $T = T_B$ ) che non è la temperatura termica del corpo. Quest'ultima è relazionata con la temperatura di brillantezza rispetto all'emissività del corpo,  $\varepsilon$ , ovvero alla frazione di energia emanata nella realtà rispetto al caso ideale di corpo nero, in cui tutta l'energia assorbita viene emanata.

$$\varepsilon = \frac{T_B}{T_{termico}} \quad (1.23)$$

I radiometri hanno il vantaggio di avere generalmente una buona sensibilità, dipendente dalle caratteristiche della circuiteria, e di non aver bisogno di un elevato rapporto segnale utile/rumore per misurare efficacemente ma quelli installati su piattaforme satellitari e utilizzati nelle lunghezze d'onda delle microonde presentano risoluzioni elevate anche di diversi Km, risultando adatti solo per applicazioni su scale regionali o nazionali.

Al contrario, i sensori attivi inviano un impulso elettronico e ne misurano la quantità di energia riflessa. Nelle lunghezze d'onda ottiche si parlerà di Lidar (*Light Detection and Ranging*). Questo strumento permette di misurare e ricavare informazioni su oggetti molto piccoli come aerosol o particolati ed è particolarmente utilizzato in meteorologia e nella fisica dell'atmosfera <sup>[32], [33]</sup>. Nel campo delle microonde, invece, si parlerà di radar (*Radio detection and ranging*). L'antenna del radar invia degli impulsi elettromagnetici più o meno lunghi ed in base al tempo che intercorre tra quando viene inviato l'impulso e quando viene ricevuto l'eco di ritorno, si riesce a determinare la distanza che intercorre tra questi due. Inoltre, possono essere ricavate anche altre informazioni dell'oggetto di studio dalla conoscenza della fase come, ad esempio, la velocità radiale <sup>[34]</sup>.

## SLAR

Lo "SLAR" è l'acronimo di "side looking airborne radar" ed è un radar per immagini montato su un aereo o un satellite e puntato perpendicolarmente rispetto alla direzione di volo. L'antenna invia, così, impulsi elettromagnetici di durata  $\tau$  verso terra. Il tempo che intercorre tra l'invio e la ricezione del segnale di ritorno nella direzione denominata "slant range", ovvero quella perpendicolare rispetto alla direzione di volo, che è chiamata invece "along-track", vale:

$$T_{SLAR} = \frac{2R}{c_0} \quad (1.24)$$

Ponendo la durata degli impulsi elettromagnetici  $\tau = T_{SLAR}$  e  $c_0 = c$  si ricava la risoluzione nella direzione "slant range" da (1.24) come:

$$r_R = \frac{c\tau}{2} \quad (1.25)$$

dove spesso in letteratura si trova  $c_0 = c$ . Questa distanza va, però, proiettata rispetto al terreno. Perciò andrà divisa rispetto al coseno dell'angolo di incidenza, che indicheremo con  $\theta$ :

$$r_\rho = \frac{c\tau}{2\cos(\theta)} \quad (1.26)$$

all'opposto, lungo la direzione "along-track" la risoluzione vale:

$$r_a = \theta_a \frac{H}{\cos(\theta)} \quad (1.27)$$

con  $\theta_a$  larghezza del fascio elettronico, in radianti. Il problema è rappresentato graficamente in Fig. 9. Dalle formule possiamo dedurre che:

- per altezze elevate (H alto)  $r_a$  diventa ampissimo. Conseguentemente lo SLAR non è adatto per applicazioni satellitari.
- per altezze ridotte (H piccolo) il tempo di ritorno del segnale  $\tau$  potrebbe essere così piccolo da sovrapporsi con il segnale inviato, con conseguente impossibilità nel distinguere rispetto al segnale in ricezione.
- lo SLAR fornisce dei pixel “rettangolari slargati” in una direzione

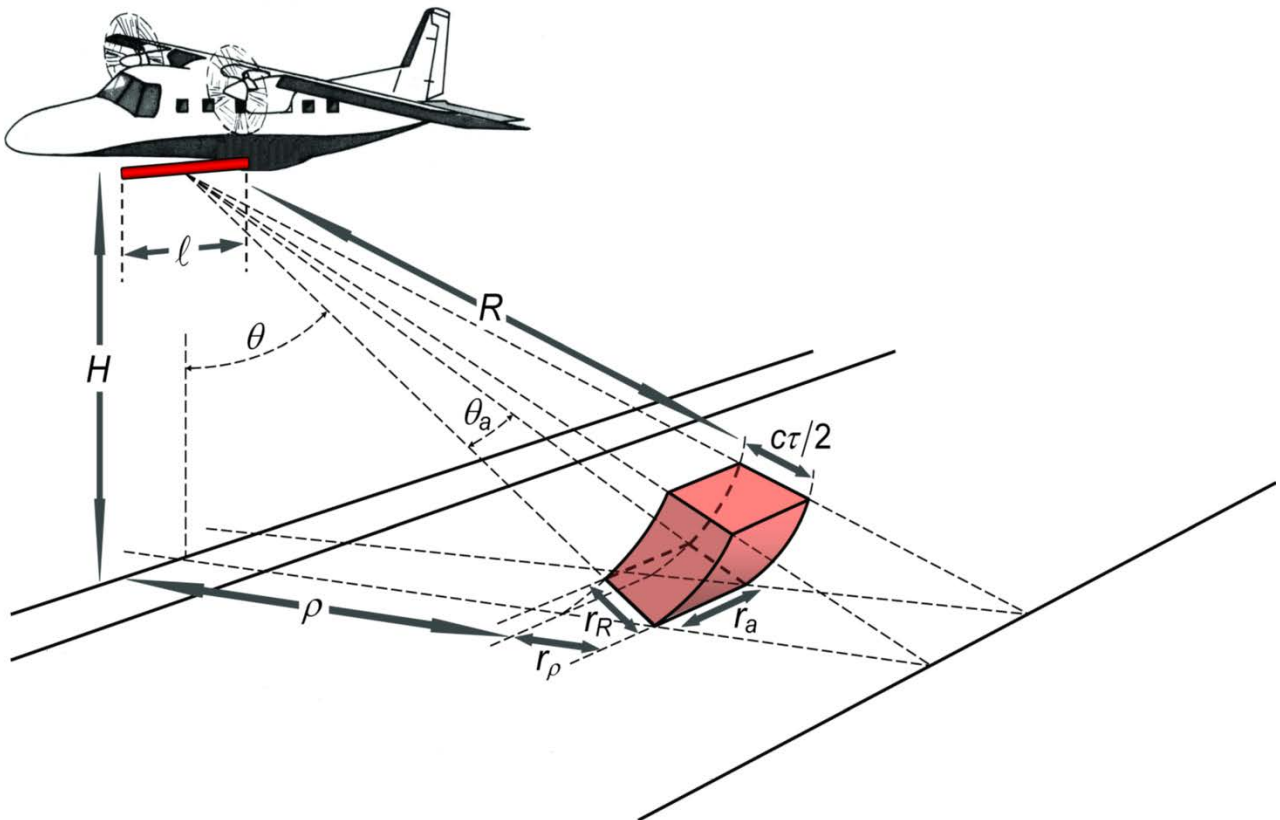


Fig. 9 Geometria SLAR. Con  $l$ = lunghezza antenna,  $\rho$  distanza tra la cella di risoluzione la proiezione della sorgente elettromagnetica a terra. Fonte [35].

## SAR

L'evoluzione di un sistema SLAR è il SAR, acronimo di “synthetic aperture radar”. Per risolvere i problemi dello SLAR il sistema SAR effettua misure nello stesso punto ma in momenti diversi. In questo modo è come se avessimo una antenna molto più lunga rispetto alle dimensioni reali andando a creare una “antenna fittizia”.

Supponiamo di avere una situazione analoga alla Fig. 10.

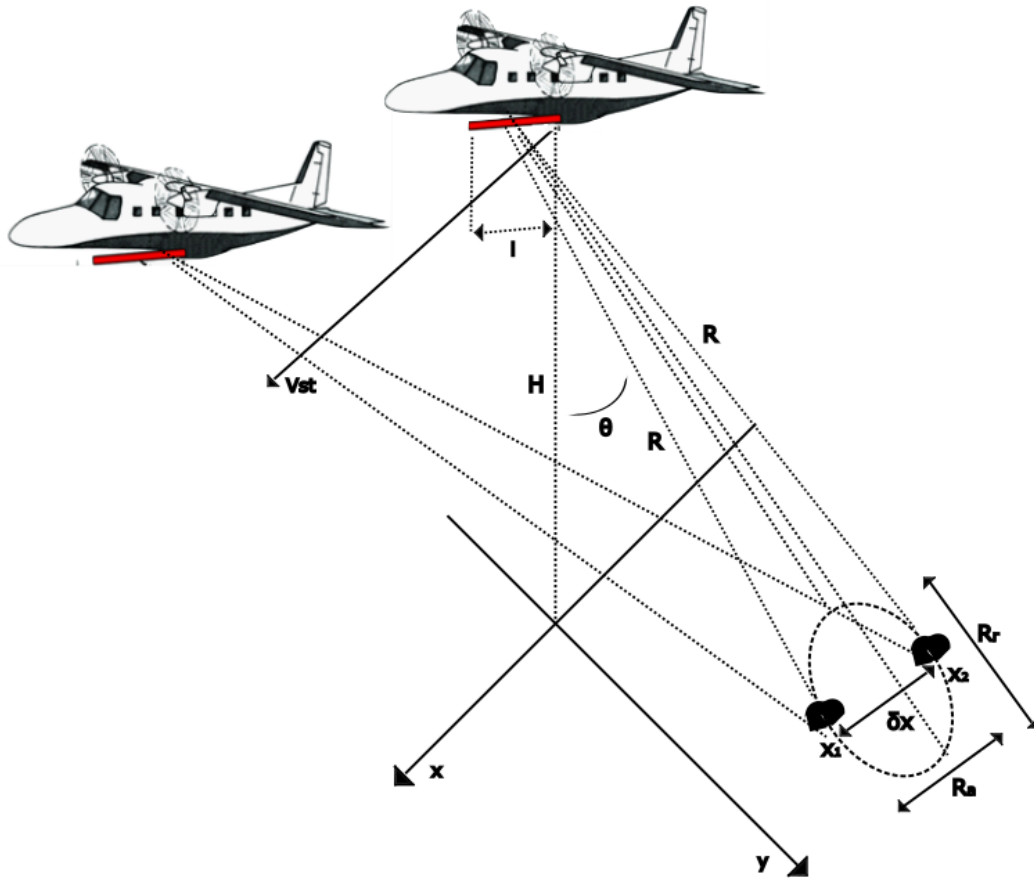


Fig. 10 Geometria SAR.

Dato che la piattaforma su cui è montato il SAR è in movimento, quest'ultimo vedrà i bersagli a terra  $(x_1, x_2)$  muoversi con una velocità relativa a prescindere dal fatto che quest'ultimi siano realmente in movimento. Lo scostamento in fase del segnale di ritorno provocherà uno spostamento dello spettro in frequenza sul segnale ricevuto. Questa variazione, chiamata frequenza doppler, vale:

$$f_d = \frac{2 \cdot (V_{st} \sin(\theta))}{\lambda} \sim \frac{2V_{st}x}{\lambda R} \quad (1.28)$$

dove possono essere distinti i due oggetti:

$$x_1 = \frac{\lambda R f_{d1}}{2V_{st}} \quad x_2 = \frac{\lambda R f_{d2}}{2V_{st}}; \quad \delta x = x_2 - x_1 \quad (1.29)$$

posta  $\delta f_d$  la risoluzione doppler:

$$\delta x = \frac{\lambda R}{2V_{st}} \delta f_d \quad (1.30)$$

e posto il reciproco della risoluzione doppler come il tempo in cui il target rimane all'interno del fascio elettronico:

$$S = 1/\delta f_d = \frac{R\lambda}{lV_{st}} \quad (1.31)$$

si ha:

$$\delta x = \frac{\lambda R}{2V_{st}} \delta f_d = \frac{l}{2} = R_a \quad (1.32)$$

per cui risoluzione lungo la direzione di volo risulta insensibile rispetto all'altezza della piattaforma.

Lungo la direzione denominata "along-track", chiamata anche "in range", posto l'impulso come un segnale di chirp  $\tau = 1/B_c$  la risoluzione vale:

$$R_r = \frac{1}{2B_c \sin(\theta)} \quad (1.33)$$

anche questa indipendente dall'altezza della piattaforma <sup>[36]</sup>.

## Sentinel-1

Grazie alle missioni satellitari Copernicus, realizzate dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA) è possibile monitorare la superficie terrestre con alta risoluzione spaziale e temporale.

Sentinel-1 (S-1), grazie ad un radar in banda C centrato a 5.4 GHz, permette di determinare lo stato idrico della vegetazione e del suolo grazie all'alta sensibilità delle microonde al contenuto in acqua dei corpi, indipendentemente dalle condizioni meteorologiche. I dati SAR di S-1 estratti dai campi agricoli si basano sul coefficiente di backscattering  $\sigma^0$  in due polarizzazioni: VH e VV. Sebbene l'ultima sia caratterizzata da una maggior intensità del segnale elettromagnetico, la prima risulta più sensibile alla presenza della biomassa.

La missione si basa su una costellazione di due satelliti identici, S-1A e S-1B, che sono stati lanciati separatamente: S-1A a partire dall'Aprile del 2014 mentre S-1B è stato spedito in orbita nell'Aprile del 2016. Un singolo satellite S-1 è potenzialmente in grado di mappare il globo ogni 12 giorni in un singolo passaggio che può essere del tipo ascendente (ascending), dove il satellite viaggia verso il lato nord della Terra, o discendente (descending), con moto verso il sud del pianeta, vedi Fig. 11. Dato che S-1A e S-1B condividono lo stesso piano orbitale con una differenza di fase di  $180^\circ$ , con entrambi i satelliti operativi la periodicità scende a 6 giorni.

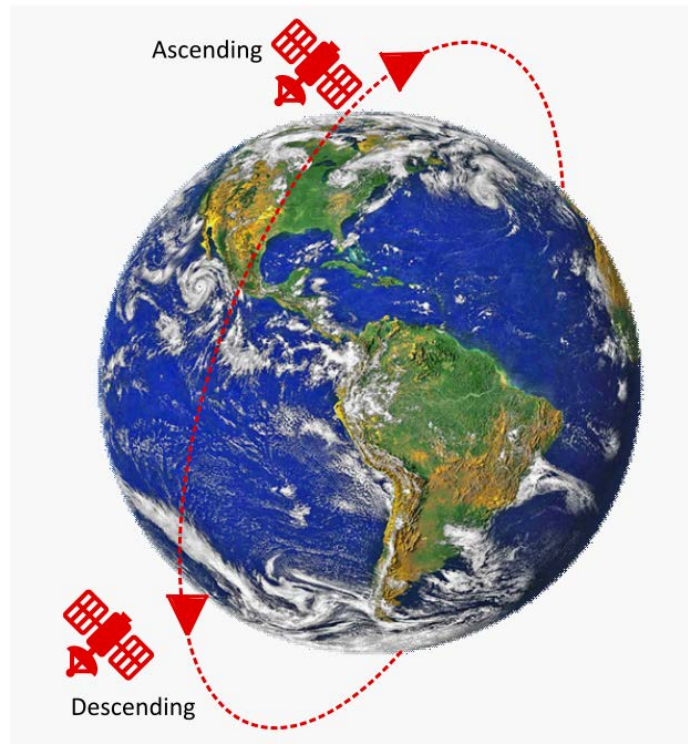


Fig. 11 Orbite del satellite: ascending, con moto verso il nord, e descending, con moto verso il sud

Sfortunatamente, dal 23 Dicembre 2021 S-1B ha riscontrato un'anomalia all'alimentazione dell'elettronica, impedendogli di fornire i dati. Da allora l'ESA e la Commissione Europea hanno annunciato che la missione di S-1B è terminata. Al contrario, S-1A rimane tutt'oggi pienamente operativo e sono in vigore piani per lanciare Sentinel-1C il prima possibile <sup>[37]</sup>.

I prodotti S-1 che sono stati utilizzati sono del tipo GRD (Ground Range Detected) di livello 1 e consistono in dati SAR che sono stati rilevati e proiettati a terra. La proiezione ellissoidale dei prodotti GRD viene corretta utilizzando l'informazione sull'altezza del terreno (DMT, digital model terrain). Il prodotto risultante ha una risoluzione spaziale approssimativamente quadrata con uno speckle <sup>[38]</sup> ridotto, un rumore tipico delle immagini radar, grazie all'elaborazione del tipo multi-look, un tipo di elaborazione del segnale ottenuta a partire da diverse osservazioni per migliorare l'immagine finale <sup>[39]</sup>.

La modalità di acquisizione delle immagini utilizzate è del tipo Interferometric Wide Swath (IW). Per questi prodotti, il multi-looking viene eseguito su ciascun burst (breve sequenza di impulsi) individualmente. Tutti i burst in tutte le aree secondarie vengono quindi uniti per formare un'unica immagine contigua. Le altre modalità di acquisizione possibili per S-1 sono lo StripMap (SM) dove l'immagine è formata in larghezza dallo swath del SAR e in lunghezza viene seguita la linea di volo della piattaforma, la modalità Extra Wide Swath (EW) simile alla IW utilizzando 5 sub-swath con risoluzione 20x40 metri utilizzata generalmente per lo studio del ghiaccio e delle aree marittime, la modalità Wave (WV) che consiste nell'acquisizione di diverse scene in polarizzazione co-polare (VV o HH) dove ogni scena è elaborata come una singola immagine, spesso questa modalità è usata per l'oceanografia.

La modalità a swath interferometrico acquisisce dati con una banda di 250 km ad una risoluzione spaziale di 5 x 20 m (per single look). La modalità IW acquisisce tre aree secondarie, vedi Fig. 12, utilizzando l'osservazione del terreno con il SAR a scansione progressiva (TOPSAR, Terrain Observation with Progressive Scans SAR). Con la tecnica TOPSAR il raggio viene orientato elettronicamente "da indietro ad avanti" nella direzione dell'azimut per ogni burst, evitando sovrapposizioni ed ottenendo una qualità dell'immagine omogenea <sup>[40]</sup>.

I prodotti IW SLC (Single look complex) contengono un'immagine per ogni sotto-swath e una per ogni canale di polarizzazione, per un totale di tre (se si usa una polarizzazione singola) o sei (in caso di polarizzazione doppia) immagini in un prodotto IW. Dopo l'unione di burst e sub-swath, è possibile creare il prodotto completo, come prodotto GRD. In Tabella 3 sono presenti le risoluzioni per ciascun beam <sup>[41]</sup>.

Per quanto riguarda i distinti passaggi satellitari sopra i campi di interesse, sono state considerate separatamente le 4 orbite satellitari disponibili di S-1 (identificate con i numeri d'orbita 15, 117, 95 e 168), due presenti al mattino e due alla sera, ciascuna con una periodicità di 12 giorni data l'assenza di S-1B. I passaggi Descending (circa 5.15 GMT, Greenwich mean time), con orbite numero 95 e 168, presentavano un successivo passaggio satellitare dopo sole 36 ore grazie ai passaggi Ascending, con orbite numero 15 e 117 (orario circa 17:15 GMT).

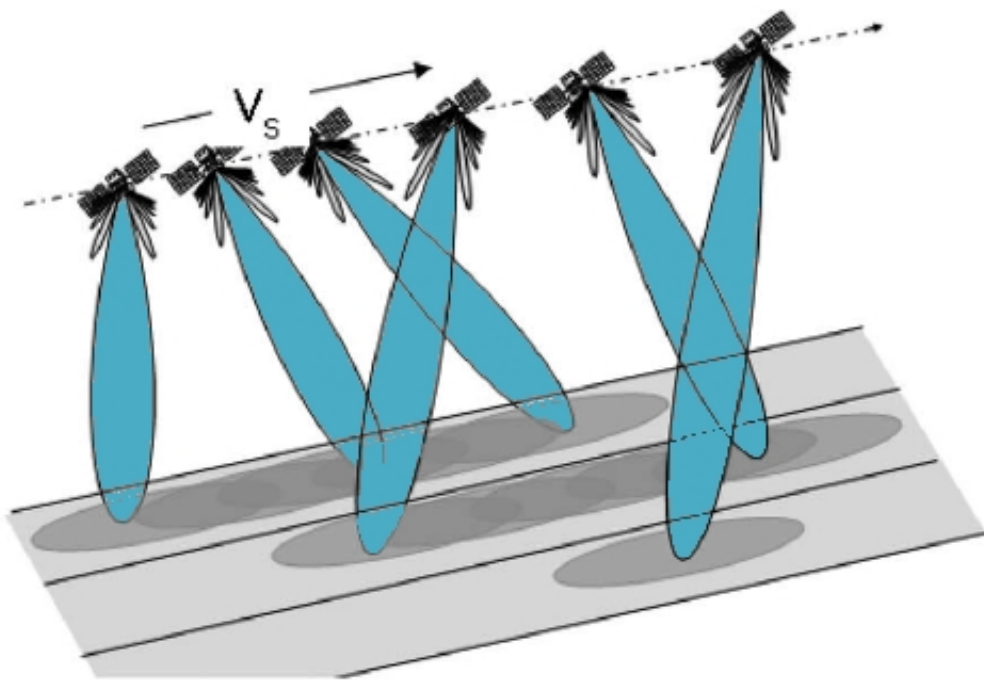


Fig. 12 Acquisizione di sub-swath TOPSAR.  $V_s$  indica la direzione di moto del satellite. Immagine da <sup>[42]</sup>

Tabella 3 Risoluzioni per i prodotti IW GRD

<b>Beam ID</b>	<b>IW1</b>	<b>IW2</b>	<b>IW3</b>
Risoluzione spaziale rg x az [m]	20.4x22.5	20.3x22.6	20.5x22.6
Pixel spacing rg x az [m]	10x10	10x10	10x10
Angolo di incidenza [deg]	32.9	38.3	43.1

## Sentinel-2

La missione Sentinel-2 (S-2) è stata sviluppata dall'ESA all'interno del programma Copernicus e si costituisce di due satelliti identici: S-2A e S-2B.

Lo strumento multispettrale (multispectral instrument, MSI) installato a bordo è stato guidato dall'esigenza di avere alte prestazioni geometriche e spettrali per fornire informazioni sullo stato e sulle condizioni del nostro pianeta su lunghezze d'onda nell'ottico e nelle immediate vicinanze per monitorare le aree verdi del nostro pianeta e fornire supporto nella gestione dei disastri naturali. Lo strumento usa una modalità di acquisizione del tipo push-broom con cui le immagini sono prodotte utilizzando una serie di rilevatori posizionati lungo il percorso ortogonale (across-track) alla direzione di moto (along-track) e sfruttando il movimento della piattaforma per registrare le successive linee, vedi Fig. 13

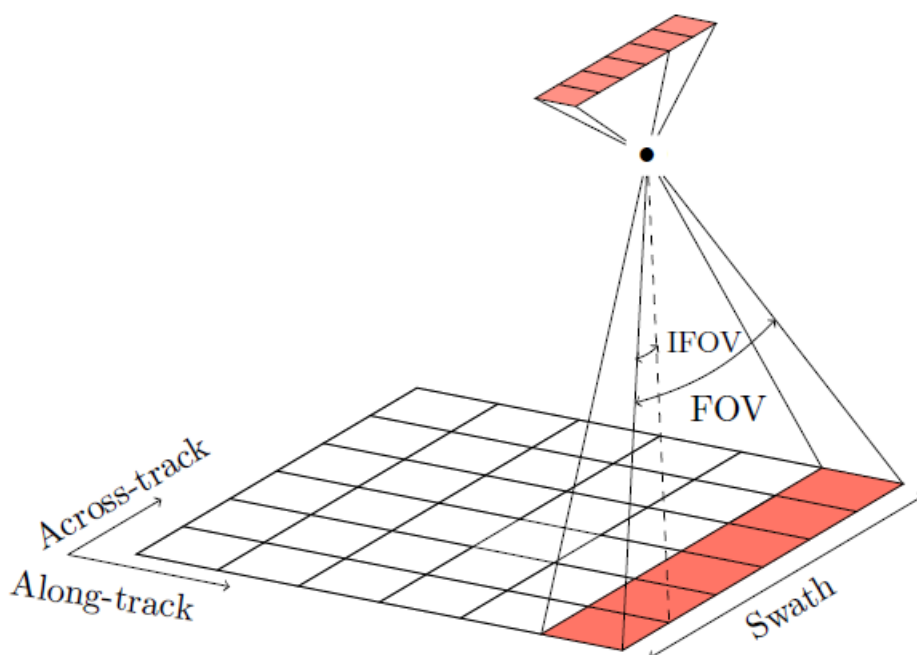


Fig. 13 Geometria nell'acquisizione del tipo push-broom. La copertura angolare di una linea di rilevatori è denominata FOV=Field of View mentre quella di una singola cella a terra è denominata IFOV=Istantaneous FOV. Figura da <sup>[43]</sup>

L'uso congiunto delle 13 bande disponibili su S-2, vedi Tabella 4, offre la possibilità di realizzare una serie di indici che possono essere più o meno sensibili alle condizioni di salute della vegetazione. I dati sulle risposte spettrali sono pubblici e consultabili <sup>[44]</sup>. La banda 10 non è disponibile sulla piattaforma Google Earth Engine (GEE) che verrà utilizzata per l'acquisizione dei dati.

Tabella 4 Bande di S2

Numero della Banda	Descrizione	S2A $\lambda$ centrale [nm]	Larghezza di banda [nm]	S2B $\lambda$ centrale [nm]	Larghezza di banda [nm]	Risoluzione spaziale [m]
1	Aerosols	442.7	20	442.3	20	60
2	Blu	492.7	65	492.3	65	10
3	Verde	559.8	35	558.9	35	10
4	Rosso	664.6	30	664.9	31	10
5	Red Edge 1	704.1	14	703.8	15	20
6	Red Edge 2	740.5	14	739.1	13	20
7	Red Edge 3	782.8	19	779.7	19	20
8	NIR	832.8	105	832.9	104	10
8A	Red Edge 4	864.7	21	864.0	21	20
9	Vapor acqueo	945.1	19	943.2	20	60
10	SWIR	1373.5	29	1376.9	29	60
11	SWIR1	1613.7	90	1610.4	94	20
12	SWIR2	2202.4	174	2185.7	184	20

I dati di S-2 hanno una copertura globale delle superfici terrestri da 56° S a 84° N. La missione ha uno swath di 290 km con passaggio sopra l'area di interesse pochi minuti dopo le 10:00 GMT. Quest'ora è stata appositamente scelta per ridurre al minimo la copertura nuvolosa e garantire un'adeguata illuminazione solare. S-2 offre migliori risoluzioni spaziali e temporali rispetto ad altre analoghe missioni come Landsat <sup>[45]</sup>.

La risoluzione spaziale anche a 10 m fa sì che i dati S-2 abbiano il potenziale per l'esplorazione dettagliata della superficie terrestre come per l'espansione urbana <sup>[46]</sup>, <sup>[47]</sup> e l'agricoltura<sup>[48]</sup>, <sup>[49]</sup>. L'altra caratteristica dei dati di S-2 è la sua elevata risoluzione temporale di 5 giorni, caratteristica dovuta alla presenza dei due satelliti S-2A e S-2B che operano con una fase di orbita di 180°.

I dati S-2 subiscono diversi tipi di elaborazione. I livelli 0 e 1A sono sotto forma di dati di immagine grezzi compressi, il livello 1B fornisce immagini corrette da un punto di vista radiometrico con valori di radianza (ovvero la quantità di radiazione riflessa o trasmessa da una superficie per un angolo solido unitario,  $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ ) rispetto alla parte superiore dell'atmosfera (TOA, top of the atmosphere), il livello 1C è composto da celle ortorettificate nel formato UTM/WGS 84. Infine, i prodotti di livello 2A con riflettanza rispetto alla parte bassa dell'atmosfera (BOA, bottom of the atmosphere) possono essere ottenuti da quelli di livello 1C utilizzando il Sentinel-2 Toolbox <sup>[50]</sup>.

# Capitolo 2 - Stato dell'arte

## Risposta delle piante a stati di stress

Le piante sono molto resilienti e riescono a modificare le attività fisiologiche in risposta alle mutevoli condizioni climatiche ed ambientali in cui viviamo. Nei modelli di crescita cambiamenti nelle attività metaboliche diurne delle attività cellulari e cambiamenti durante il periodo giorno/notte possono essere considerati come un riordino delle attività metaboliche e di crescita, più che effetti di stress. Questi processi possono tuttavia influire sulla resa agricola e sulla qualità dei raccolti e possono comportare una modifica nelle dimensioni delle foglie, negli stomi, nelle altezze. Grazie ad adattamenti, le piante possono rispondere a diverse condizioni adattandosi alle mutevoli condizioni di crescita in un ambiente aperto <sup>[51]</sup>, <sup>[52]</sup>, <sup>[53]</sup>. Lo stato di sofferenza delle colture può essere indotto da vari fattori naturali e antropici. Possono essere identificati diversi tipi di stress a seconda della durata temporale, a breve o lungo termine, o dell'intensità.

Il concetto di stress in ambito agronomico e forestale <sup>[54]</sup> fu coniato da Selve e racchiuso dalle sue affermazioni *“Tutti gli agenti possono agire come fattori di stress, producendo allo stesso modo sia stress che azioni specifiche”* e *“Esistono fattori di stress, fattori specifici e risposte generali non specifiche”* <sup>[55]</sup>. Successivamente Levitt <sup>[56]</sup> definì lo stress come *“Qualsiasi fattore ambientale potenzialmente sfavorevole per gli organismi viventi”*. Ancora, in base alla letteratura ed ai suoi studi, Larcher <sup>[57]</sup> lo definì come *“l'espressione in modo differente a seconda del livello di organizzazione”*. Inoltre, da un punto di vista botanico affermò che lo stress può essere visto *“come uno stato in cui le crescenti richieste portano ad una destabilizzazione delle normali funzioni, seguita da normalizzazione ed una successiva maggior resistenza”*. Lichtenthaler <sup>[58]</sup> distinse lo stress in due tipologie: eustress e distress. Il primo è positivo in quanto rafforza le capacità di resistenza e di resilienza delle piante mentre il secondo è negativo perché causa un danneggiamento se non addirittura la morte delle strutture cellulari. Come affermato dallo stesso studioso *“Uno stress lieve può attivare il metabolismo cellulare, aumentare l'attività fisiologica di una pianta e non provocare alcun danno su effetti anche a lunga durata. Tale stress lieve, stimolante, è favorevole per la pianta”*. Il vero distress si manifesta quando una certa soglia di stress, che non può più essere compensata, viene superata. Quando questa soglia di tolleranza è oltrepassata, lo stress che si manifesta, anche se per breve tempo, può comportare gli stessi danni di uno stimolo lieve che dura costantemente nel tempo. Secondo Lichtenthaler possiamo identificare 3 tipi livelli:

- Stress
  - Quando sulle piante viene applicata una forza esterna, dannosa
- Sottoposizione ad una tensione (strain)
  - Che indica la risposta della pianta rispetto alla causa di stress. In questo stato la pianta continua a vivere anche se con una riduzione del suo stato metabolico e di crescita.
- Danno
  - Che indica il risultato di uno stress troppo forte che non può più essere compensato

Perciò se i fattori di sofferenza non sono troppo gravi, questi portano a tre fasi di risposta per poi, dopo la rimozione di quest'ultimi, portare alla rigenerazione se il danno non è troppo grave. Queste fasi sono:

### 1. Fase di risposta

In cui si attivano delle funzioni di allerta come la modifica delle normali attività metaboliche, un declino nella vitalità della pianta, un eccesso nei processi anabolici

### 2. Fase di restituzione

Dove lo stress continua e la pianta si adatta. Durante questa fase di “resistenza” si attivano i processi riparatori.

### 3. Fase finale

La pianta ha subito un forte stress o uno stress per molto tempo con un sovraccarico della sua capacità di adattamento portando a malattie croniche o addirittura alla morte

### 4. Fase di rigenerazione

Rigenerazione parziale o totale quando il fattore o i fattori di stress vengono eliminati.

All'inizio della fase di stress le piante reagiscono con un calo di una o più attività fisiologiche, come una diminuzione delle attività di fotosintesi e metaboliche. Il tempo e la fase con cui si verifica l'esaurimento dei fattori di stress definiscono il nuovo standard fisiologico delle piante. Lo stato di tensione che perdura, tuttavia, non comporta necessariamente il verificarsi di un danno. Se l'intensità e la durata dello stress non sono troppo lunghe e/o elevate le piante riusciranno ad orientarsi all'interno dell'intervallo di resistenza che le compete (vedi Fig. 14). Generalmente sono diversi i fattori che agiscono contemporaneamente sulla pianta. Questi possono essere divisi in stress biotici, causati da un altro essere vivente, come funghi, virus, batteri, insetti o animali che vivono nel terreno, e stress abiotici che sono provocati da un fattore ambientale estremo come alte temperature, grandinate o un eccesso di irraggiamento solare <sup>[59]</sup>.

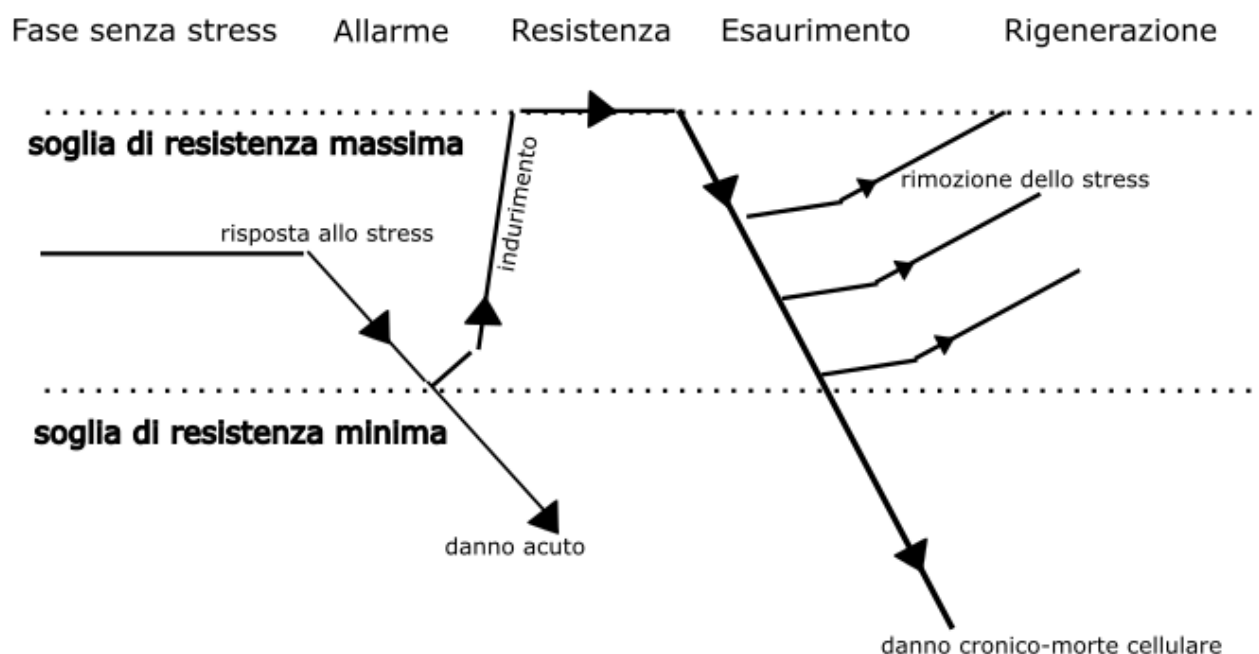


Fig. 14 Concetto generale tra i vari stati della pianta quando agisce un agente stressante esterno. Le piante crescono verso una condizione media a meno di un agente dannoso. In questo caso, la coltura risponderà attraverso diverse fasi. Una volta rimosso l'agente, l'organismo ritornerà ad uno stato di salute a meno di aver oltrepassato alcune soglie critiche.

Dato che le piante acquisiscono l'acqua di cui necessitano dal terreno, molte caratteristiche e condizioni del suolo sono avvertite da parte delle piante attraverso le dinamiche di umidità nel terreno <sup>[60]</sup>. Condizioni di siccità avvertite dalla pianta sono determinate dalla disponibilità d'acqua e non tanto dalla carenza di precipitazioni, tant'è che si possono sperimentare situazioni di siccità anche in condizioni climatiche favorevoli a causa delle caratteristiche del terreno. In particolare, in molti ecosistemi e nei climi più aridi il fattore di stress più importante per la vegetazione risulta un deficit nella quantità d'acqua disponibile nel suolo. In aggiunta, possono interferire anche altri fattori come una carenza di materiali organici nutrienti nel terreno <sup>[61]</sup>. Sebbene gli effetti nella fisiologia delle piante possano apparire simili, le fonti di stress possono essere differenti e possono essere legate al suolo, alla vegetazione o al clima, soprattutto quando la causa scatenante è dovuta ad una carenza idrica <sup>[62]</sup>. Un fattore fondamentale per la buona crescita della vegetazione è l'illuminazione solare. Le piante hanno la capacità di adattare la morfologia fogliare e modificare l'apparato fotosintetico rispetto all'energia incidente. A seconda del tipo di pianta, la capacità di adattamento e di sopravvivenza rispetto ad una certa quantità di energia solare incidente risulterà differente. Alcune piante, quelle del gruppo 1 della Fig. 15, hanno una bassa capacità di adattamento e non possono vivere o sopravvivere con una luce solare diretta. Altre piante, di cui fanno parte la maggior parte delle colture, necessitano di un elevato irraggiamento per produrre una resa ragionevole ma la loro capacità di adattamento è abbastanza ristretta. Tra queste rientrano i vari tipi di grano e cereali che sono rappresentati dal gruppo 3. Infine, esiste un altro gruppo di piante, quelle del gruppo 2 come ad esempio il faggio, che presentano una forte capacità di adattamento. Sebbene i processi di adattamento alla luce siano un fattore essenziale per avere una data tolleranza allo stress, esistono molti altri fattori che determinano la tolleranza complessiva, come i meccanismi di adattamento e la capacità di riparazione dei singoli processi <sup>[63]</sup>, <sup>[64]</sup>. Conseguentemente, la tolleranza a diversi fattori di stress sarà distinta a seconda del tipo di pianta.

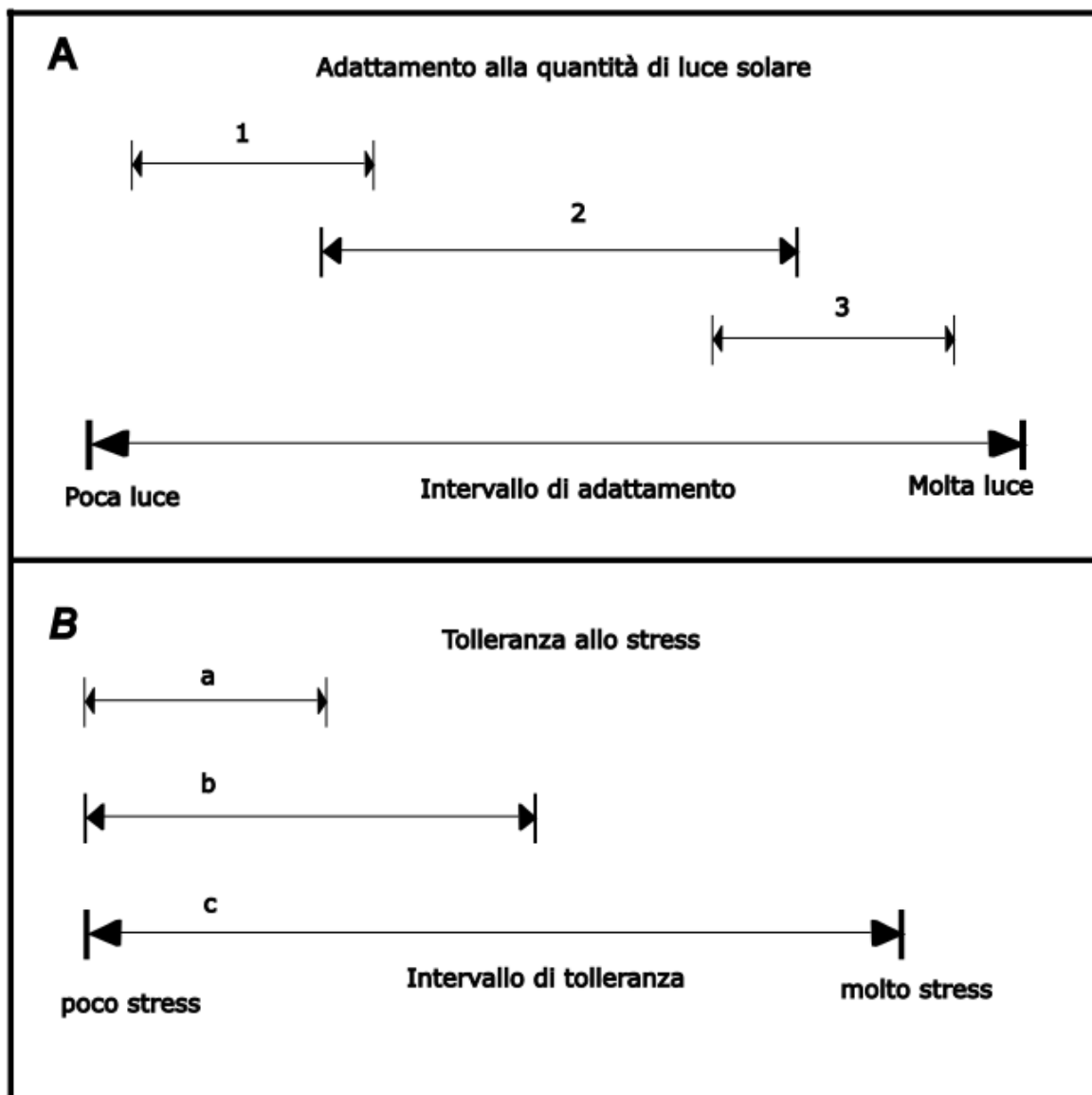


Fig. 15 Capacità di adattamento alla luce solare (A) e allo stato di stress (B). Nella figura (A) sono indicati 3 gruppi di piante con diverse capacità di adattamento alla luce solare, nella figura (B) le piante a, b e c possiedono rispettivamente una bassa, media e forte capacità di adattamento allo stress.

Le condizioni di stress possono essere rilevate utilizzando delle misure sui livelli di fotosintesi, di traspirazione e di conduttanza degli stomi o misurando i livelli dei carotenoidi e delle clorofille. I vari fattori modificano l'attività vitale della pianta con conseguente modifica nell'attività fotosintetica. All'aumentare delle condizioni di sofferenza, si riduce l'attività fotosintetica mentre aumenta la quantità di calore emessa. Questi cambiamenti possono essere notati in modo non invasivo utilizzando una apposita strumentazione che misura la fluorescenza e la risposta elettromagnetica delle piante <sup>[65]</sup> per diverse lunghezze d'onda, come nell'ottico o nel vicino infrarosso <sup>[66]</sup>.

Allo stesso tempo, quando i fattori stressanti sono presenti per un'intera area geografica, questo comporta una serie di cambiamenti non più sulla singola pianta ma per l'intero ecosistema. Si parla,

infatti, di “memoria dell’ecosistema” quando interi ecosistemi, in base agli eventi passati, riescono a modificare ed influenzare i comportamenti presenti e futuri <sup>[67]</sup>. Questi eventi agiscono da fattori stressanti e nella maggior parte dei casi sono causati da fattori ambientali esterni. Se i fattori non sono troppo intensi o lunghi, l’intero ecosistema riesce ad adattarsi ottenendo una maggior resilienza in vista di futuri eventi indesiderati e dannosi. In questo contesto, però, l’aumento delle temperature e della variabilità climatica, a causa del cambiamento climatico, esercita ed eserciterà sempre più frequentemente situazioni che causeranno con alta probabilità perdite consistenti per gli ecosistemi e per gli esseri viventi che ci vivono, esseri umani compresi <sup>[68]</sup>, <sup>[69]</sup>. La conoscenza di come gli stress associati ai cambiamenti climatici incidono sulle organizzazioni biologiche più grandi, compresi gli ecosistemi, è fondamentale per adottare specifiche strategie di mitigazione e adattamento. In merito, è stato recentemente previsto che con l’aumento del numero di fattori di stress che incidono su un ecosistema, i processi che permettono il sostentamento dell’ecosistema diminuiranno drasticamente <sup>[70]</sup>, <sup>[71]</sup>, vedi Fig. 16.

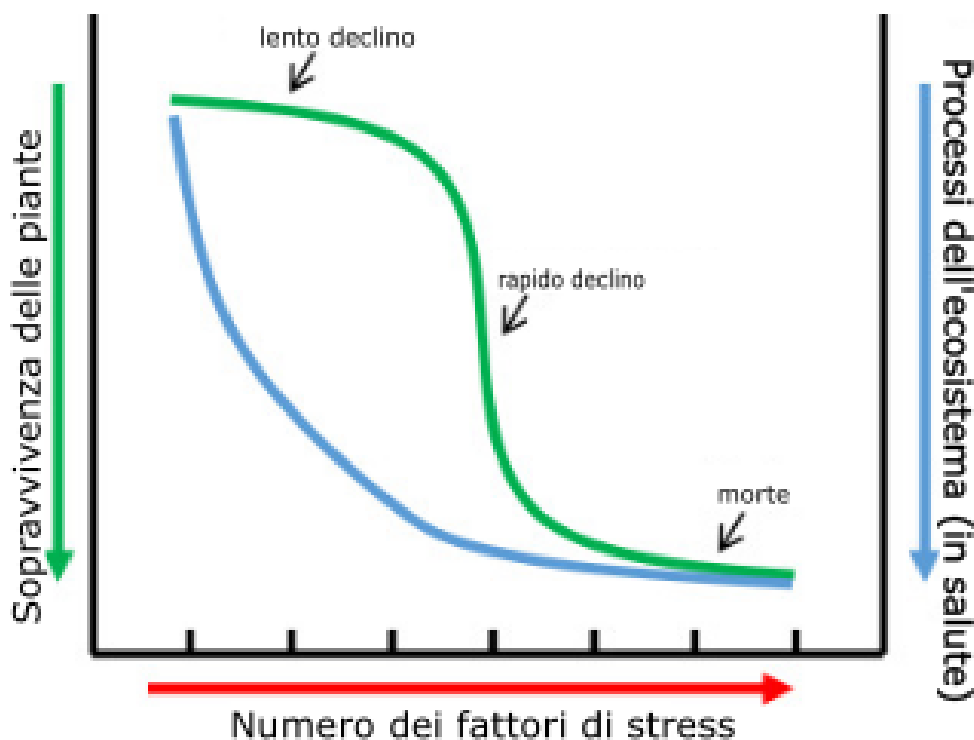


Fig. 16 Effetti sinergici del numero crescente di fattori di stress in combinazione con la capacità di sopravvivenza e dei processi vitali negli ecosistemi. In verde, quando numerosi fattori di stress colpiscono la singola pianta. In blu, quando gli effetti sinergici di più fattori di stress agiscono sull'intero ecosistema. All'aumentare delle cause esterne diminuiscono i processi connessi al buon funzionamento dell'intero sistema ambientale. Figura da <sup>[70]</sup>.

## Protezione delle piante dagli agenti di stress: il ciclo delle xantofille

La vegetazione tende ad aggregarsi crescendo e fiorendo quando particolari condizioni ottimali glielo permettono. Nonostante ciò, può essere soggetta a diversi fattori che ne limitano il funzionamento delle normali attività fisiologiche. L'attività di fotosintesi rappresenta un processo biochimico fondamentale che avviene all'interno delle piante, durante il quale l'anidride carbonica

è rimossa dall'atmosfera e fissata in carboidrati fornendo l'energia metabolica che permette i processi di crescita, mantenimento, riproduzione e crescita della biomassa.

Generalmente le piante assorbono più energia di quella che gli serve per attivare i processi relativi alla fotosintesi. Conseguentemente, per utilizzare l'energia solare senza subire danni, le piante sono dotate di vari meccanismi di difesa <sup>[72]</sup>. Questi includono processi biochimici e la produzione di una serie di pigmenti nella parte epidermica esterna della foglia. Uno di questi meccanismi è il ciclo delle xantofille che fungono da meccanismo fotoprotettivo, vedi Fig. 17. Queste sono dei pigmenti che permettono di ridurre la quantità di energia che raggiunge i centri di reazione fotosintetica. Le xantofille contenute all'interno della vegetazione sono coinvolte nei processi di de-epossidazione (l'epossidazione è una reazione chimica che comporta la formazione di un epossido ovvero un composto organico dove l'ossigeno è uno degli atomi di un anello a tre termini) e possono presentarsi sotto la forma di:

- i. la violaxantina ( $V$  in  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), con due epossidi che assorbono i fotoni incidenti e li trasmettono ai centri reattivi per condurre la fotosintesi;
- ii. l'anteraxantina ( $A$  in  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), con un epossido;
- iii. la zeaxantina ( $Z$  in  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) priva di epossidi, per cui l'energia in entrata viene rilasciata e quindi non viene trasmessa ai fotosistemi, e quindi non viene utilizzata per condurre la fotosintesi.

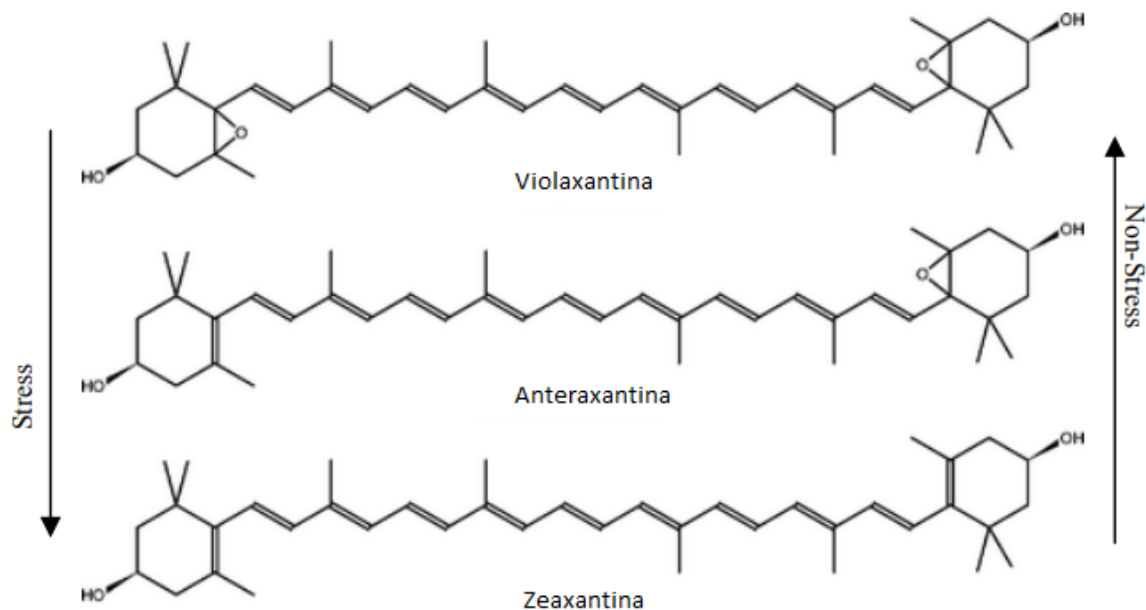


Fig. 17 Molecole che partecipano al ciclo delle xantofille. Sotto condizioni di stress la violaxantina si trasforma in anteraxantina e successivamente in zeaxantina attraverso processi di de-epossidazione evitando danneggiamenti nella pianta. Al contrario, in condizioni normali si verifica il processo opposto.

Quando è presente un eccesso di luce, ovvero la radiazione attiva incidente ( $PAR$ =photosynthetically active radiation) eccede la capacità di fotosintesi, la violaxantina è profondamente ossidata a zeaxantina tramite l'anteraxantina e tale reazione viene invertita quando risulta presente poca luce.

Lo stato di epossidazione EPS <sup>[73]</sup> può essere un buon indicatore per rilevare i cambiamenti a breve termine dell'attività fotosintetica. Quest'ultimo è indicato come:

$$EPS = (V + 0.5)/(V + A + Z) \quad (2.1)$$

in questo contesto, Gamon <sup>[74],[75]</sup> si accorse che il fenomeno della de-epossidazione della violaxantina è strettamente legato ad una caratteristica di assorbimento della luce, da parte della pianta, nella lunghezza d'onda dei 531 nm. Il ricercatore notò una differenza nel valore di riflettanza tra la pianta completamente illuminata e, al contrario, coperta per non farle ricevere luce. L'idea di Gamon era quella di realizzare un indice che indicasse se la pianta ha, in un determinato momento, un alto ciclo delle xantofille ovvero, in altri termini, se riesce a sfruttare tutta l'energia, o gran parte di essa, per attivare i processi di fotosintesi. L'indice fu coniato come *PRI* (photochemical reflectance index) pari alla normalizzazione tra la riflettanza rispetto ad una lunghezza d'onda di riferimento dove non si nota la variazione di stato nell'eossidazione della pianta ( $\rho_{ref}$  comunemente posto a 550 o 570 nm) e il valore a 531 nm, dove si notò un picco rispetto all'*EPS* ( $R^2=0.99$  in <sup>[74]</sup>).

$$PRI = \frac{\rho_{ref} - \rho_{531nm}}{\rho_{ref} + \rho_{531nm}} \quad (2.2)$$

Successivamente, molti autori considerarono la normalizzazione delle due lunghezze d'onda come:

$$PRI = \frac{\rho_{531nm} - \rho_{ref}}{\rho_{531nm} + \rho_{ref}} \quad (2.3)$$

dove è possibile utilizzare indistintamente sia l'equazione (2.2) che (2.3), cambiando semplicemente il segno della variabile. L'indice, essendo una normalizzazione, risulta adimensionale e compreso tra [-1;+1]. Secondo l'equazione (2.3), ad esempio, tanto più il *PRI* > -1 e tanto più si attiva il ciclo delle xantofille limitando l'attività fotosintetica, e viceversa per l'equazione (2.2). Nei suoi esperimenti, Gamon notò la dipendenza del *PRI* anche rispetto a stati di stress nella pianta, indotti direttamente per carenza idrica o nutrizionale <sup>[75]</sup>.

Poiché tali pigmenti sono legati ai meccanismi di assorbimento della luce, l'indice *PRI* è stato ampiamente collegato all'efficienza d'uso della luce (*LUE*=light use efficiency) su scala fogliare <sup>[76], [77]</sup>, al *RUE* (radiation use efficiency), all'*APAR* (absorbed photosynthetically active radiation), al *NPP* (net primary production) <sup>[78], [79]</sup>, alla temperatura <sup>[80]</sup> ed al potenziale idrico dello stelo in modo da poter utilizzare l'indice al posto di misure di temperatura fogliare ottenendo anche delle preliminari mappe di irrigazione <sup>[81]</sup> al fine di stimare eventuali stati di stress idrico nella vegetazione <sup>[82], [83]</sup>. Nello studio di Zarco-Tejada <sup>[84]</sup> gli autori hanno proposto anche un indice di *PRI* normalizzato (*PRI<sub>norm</sub>*) rispetto al contenuto in clorofilla della pianta ed alla struttura della vegetazione. Gli autori affermano che l'indice riesce a seguire meglio i cambiamenti fisiologici nell'arco della giornata della pianta rispetto al classico indice notando forti analogie anche con l'indice termico *CWSI* (crop water stress index), un indicatore termico fortemente relazionato allo stress idrico ampiamente accettato in letteratura <sup>[85]</sup>. Nonostante questi vantaggi, risulta difficoltoso calcolare l'indice *PRI<sub>norm</sub>* dato che bisogna conoscere le diverse risposte spettrali in gioco in apposite lunghezze d'onda (570, 531, 800,670,700 e 800 nm) non sempre rilevabili con misure locali o con sensori posti a distanza per misurare le caratteristiche dei corpi.

## Uso del telerilevamento per stimare le diverse condizioni della vegetazione

Possono essere utilizzati diversi approcci per valutare lo stato di salute delle piante. Il telerilevamento consente di stimare le condizioni fisiologiche della pianta senza danneggiare quest'ultima e senza misure distruttive. Ad esempio, possono essere effettuate misure attraverso l'uso di sensori in situ installati su apposite piattaforme<sup>[86], [87]</sup> come nel caso delle "flux towers technique"<sup>[88]</sup> ed attraverso la modellazione di processi fisici<sup>[89]</sup>. Il "flux tower technique" permette, mediante una serie di strumenti installati in diverse aree, di misurare il flusso netto di carbonio, acqua ed energia scambiata tra un ecosistema e l'atmosfera e permette di ottenere una informazione continua nel tempo sul livello di attività fotosintetica dei vari ecosistemi. Grazie a ciò, è possibile fornire tutta una serie di dati per sviluppare, calibrare e validare dei modelli guidati anche a partire da una serie di indicatori sullo stato di salute delle colture.

Negli ultimi decenni sono stati sviluppati una serie di indici sensibili allo stato di salute della vegetazione. Questi indici possono essere calcolati tramite misure non distruttive rilevando, in modo passivo o attivo, le risposte dei corpi in apposite lunghezze d'onda. Ad esempio, una coltura in salute avrà agli occhi umani un colore verde vivo mentre una pianta in fase di senescenza ci apparirà di colore rosso o giallo. Allo stesso modo, i diversi strumenti, sensibili anche per lunghezze d'onda non apprezzabili dall'occhio umano, potranno fornirci informazioni sullo stato attuale delle colture.

Il telerilevamento, mediante l'uso di sensori posti a distanza dell'oggetto di studio, permette di conoscere le diverse condizioni dei corpi grazie alla variazione del segnale elettromagnetico che viene captato dalla strumentazione<sup>[90]</sup>. Ad esempio, l'uso di misure tramite piattaforme satellitari permette di ottenere una serie di informazioni sulla superficie e sulle condizioni atmosferiche della Terra<sup>[91]</sup>. L'uso dei dati satellitari migliora la quantità e la qualità delle osservazioni terrestri "fotografando" le diverse condizioni del pianeta nel tempo. La difficoltà nell'ottenere dati satellitari multi- ed iper-spettrali con adeguata risoluzione spaziale e privi di copertura nuvolosa, condizioni necessarie per poter acquisire informazioni sulle condizioni dei corpi, è stato mostrato da diversi studi<sup>[92], [93]</sup> e, anche per questo motivo, le immagini SAR, per frequenze al massimo di qualche decina di  $GHz$ <sup>[94]</sup>, possono fornire informazioni dettagliate in quanto scarsamente influenzate dalle condizioni di illuminazione e nuvolosità<sup>[95]</sup>.

## Sensibilità delle microonde al contenuto in acqua

L'uso sinergico di dati sia ottici che derivanti da sensori SAR<sup>[48]</sup> è stato di conseguenza oggetto di un numero via via crescente di studi scientifici anche per alcuni inconfutabili vantaggi quali, ad esempio, quello di fornire immagini con risoluzioni spaziali nettamente inferiori rispetto alle superfici dei campi agricoli, indipendentemente dalla presenza delle nuvole o dalle condizioni meteorologiche in diversi momenti della giornata ed avere, inoltre, una maggior sensibilità nell'identificare differenze nella rugosità superficiale e nell'umidità del terreno<sup>[96], [97]</sup> nella morfologia della vegetazione (stadi colturali) e nei parametri del suolo<sup>[98]</sup>. Le immagini SAR sono utili per studiare le caratteristiche dei corpi grazie alla sensibilità delle onde elettromagnetiche ai diversi oggetti ed ai loro cambiamenti nel tempo, soprattutto per quanto riguarda la loro sensibilità

al contenuto in acqua dei corpi. Grazie ai diversi studi sulle proprietà dielettriche dell'acqua [99] è stato possibile identificare la risposta dielettrica dell'acqua sotto l'assunto di molecole polari, dove una molecola presenta una carica positiva su una parte ed una negativa sulla parte opposta, seguendo l'equazione di Debye [100]:

$$\varepsilon_w = \varepsilon_{w\infty} + \frac{\varepsilon_{w0} - \varepsilon_{w\infty}}{1 + j2\pi f\tau_w} \quad (2.4)$$

dove:

$\varepsilon_{w0}$  = costante dielettrica per  $f=0$  [F/m]

$\varepsilon_{w\infty}$  = costante dielettrica per  $f=\infty$  [F/m]

$f$  = frequenza [Hz]

$j$  = unità complessa, pari a  $j = \sqrt{-1}$

$\tau_w$  = "relaxation time", o tempo di rilassamento in italiano, dell'acqua [s].

L'equazione (2.4) può essere riscritta rispetto ad una parte reale ed una immaginaria  $\varepsilon_w = \varepsilon'_w - j\varepsilon''_w$  dove la parte immaginaria indica un fattore di perdita dielettrica il cui valore è diverso da 0 per un materiale con perdite (generalizzando  $\varepsilon''_{mezzo} = j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}$  con  $\sigma$  [S/m] conducibilità del mezzo). Perciò per un materiale privo di perdite vale  $\varepsilon_w = \varepsilon'_w$  mostrando la sensibilità del mezzo dielettrico al campo elettrico  $\vec{E}$ . I valori reali ed immaginari corrispondono a:

$$\varepsilon'_w = \varepsilon_{w\infty} + \frac{\varepsilon_{w0} - \varepsilon_{w\infty}}{1 + (2\pi f\tau_w)^2} \quad (2.5)$$

$$\varepsilon''_w = \frac{2\pi f\tau_w(\varepsilon_{w0} - \varepsilon_{w\infty})}{1 + (2\pi f\tau_w)^2} \quad (2.6)$$

dove il valore di  $\varepsilon_{w\infty}$  è stato assunto pari a 4.9 per [101]. Il valore di  $\tau_w$ , invece, è dipendente dalla temperatura dell'acqua ed ottenuta da [10] tramite fit polinomiale di dati sperimentali:

$$\tau_w = (1.1109 \cdot 10^{-10} - 3.824 \cdot 10^{-12}T + 6.938 \cdot 10^{-14} \cdot T^2 - 5.096 \cdot 10^{-16} \cdot T^3) / 2\pi \quad (2.7)$$

con  $T$  [°C]. A partire da questa, è possibile determinarsi il valore della "frequenza di rilassamento" (frequency relaxation)  $f_0$ :

$$f_0 = (2\pi\tau_w)^{-1} \quad (2.8)$$

che rientra nell'intervallo delle microonde: per  $T=0^\circ\text{C}$   $f_0 \cong 9.0$  GHz mentre per  $T=40^\circ\text{C}$   $f_0 \cong 27.38$  GHz. I valori di  $\epsilon_{w0}$  sono ottenuti dalla regressione di Klein e Swift <sup>[102]</sup>:

$$\epsilon_{w0}(T) = 88.045 - 0.4147 \cdot T + 6.295 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 1.075 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 \quad (2.9)$$

ottenendo le rappresentazioni mostrate in Fig. 18 da cui si può notare l'alta sensibilità delle microonde al contenuto in acqua, soprattutto per frequenze inferiori ai 10 GHz arrivando anche a valori di permittività dielettrica superiori a 80 [F/m].

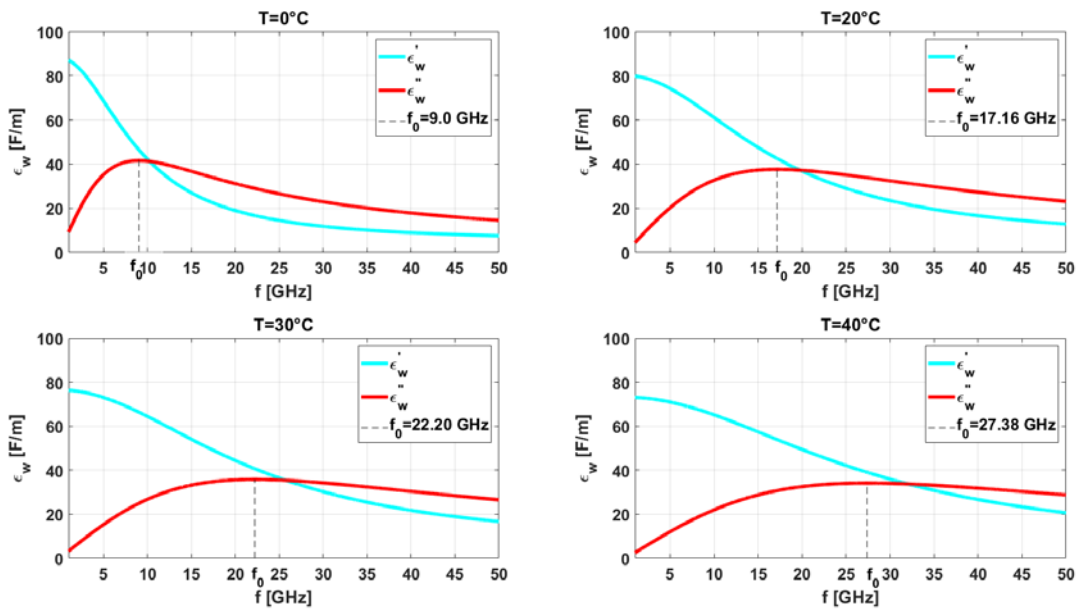


Fig. 18 Risposta dielettrica dell'acqua tra  $0^\circ\text{C}$  e  $40^\circ\text{C}$

La costante dielettrica equivalente di un materiale eterogeneo è data dalle costanti dielettriche dei singoli costituenti, dalla loro densità, dalla loro distribuzione spaziale e dall'orientazione relativa all'angolo di incidenza del campo elettrico. Generalmente le singole componenti dielettriche risultano immerse all'interno di un "materiale contenitore". Ad esempio, per quanto riguarda la rappresentazione della vegetazione, questa può essere pensata come una serie di elementi (foglie, steli, frutti) distribuiti all'interno dell'aria. Nella maggior parte dei casi, le dimensioni dei singoli elementi delle piante sono più grandi o al massimo comparabili con la lunghezza d'onda del segnale portando all'assunzione di un mezzo disomogeneo ed anisotropo. All'interno di questi, la propagazione del campo elettromagnetico avviene attraverso sia meccanismi di assorbimento che di scattering. D'altro canto, anche il terreno contiene dell'acqua in forma liquida. In assenza di quest'ultima i valori tipici della parte reale della costante dielettrica del suolo oscillano tra 2 e 4 [F/m] mentre quelli della parte immaginaria sono generalmente inferiori a 0.05 [F/m] <sup>[103]</sup>, seguendo il modello di Dobson in <sup>[104]</sup>:

$$\epsilon'_{suolo} = (1 + 0.44 \cdot \rho_b)^2 \quad (2.10)$$

con  $\rho_b$  [g/cm<sup>3</sup>] densità apparente del suolo. Al contrario, in presenza di un contenuto in acqua volumetrico, indicato con il termine  $m_v$ , i termini costituenti della costante dielettrica del suolo sono indicati <sup>[103]</sup> come:

$$\varepsilon'_{suolo} = [1 + 0.66 \cdot \rho_b + m_v^{\beta_1} \cdot (\varepsilon'_w)^\alpha - m_v]^{1/\alpha} \quad (2.11)$$

semplificando:

$$\varepsilon'_{suolo} = m_v^{\beta_2} \cdot \varepsilon''_w \quad (2.12)$$

con  $\alpha$ ,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  parametri di fit dipendenti dalle componenti e caratteristiche del terreno.

## Uso del SAR per la stima della biomassa

Il SAR ha mostrato, fin dai suoi albori con il lancio del primo SAR nello spazio a bordo del satellite Seasat <sup>[105]</sup>, grandi potenzialità producendo immagini dettagliate sullo stato del nostro pianeta. Grazie alle sue caratteristiche ed alla sua forte sensibilità al contenuto in acqua dei corpi osservati, può offrire un importante contributo nella stima dei principali parametri legati al ciclo idrologico, contribuendo anche alla comprensione delle leggi che regolano lo scambio energetico tra suolo-pianta-atmosfera <sup>[95]</sup>. I sensori SAR inviano un impulso elettromagnetico, con un certo angolo di incidenza, e misurano la quantità di energia che ritorna nella direzione del sensore per analizzare le caratteristiche della superficie di interesse. Matematicamente questa misura viene calibrata utilizzando il termine sezione trasversale del radar (radar cross section, *RCS*) definita come il rapporto tra la potenza del segnale ricevuto rispetto a quello incidente per una superficie di riferimento. Questa superficie è quella che permetterebbe di ottenere in ricezione la stessa quantità di potenza sotto l'ipotesi di avere una sfera perfettamente riflettente. Da letteratura <sup>[106]</sup> il termine *RCS* viene identificato con il simbolo  $\sigma$  e la sua proiezione rispetto all'area di illuminazione ( $A$ ) come  $\sigma^0$ .

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} [m] \quad (2.13)$$

$$\sigma^0 = \frac{\sigma}{A \cos(\theta_i)} \quad [ ] \quad (2.14)$$

Con  $r$  distanza tra trasmettitore e target,  $E_s$  ed  $E_i$  valori, rispettivamente, di campo elettrico scatterato verso il sensore ed incidente su quest'ultimo,  $\theta_i$  angolo di incidenza. Dato che stiamo misurando la porzione di energia che ritorna verso il dispositivo, tecnicamente viene utilizzato il termine “backscattering”, per evidenziare proprio questo tipo di fenomeno. Il valore di  $\sigma^0$  non è sempre facile da interpretare poiché è influenzato da una moltitudine di parametri della scena di

interesse. I parametri più importanti che veicolano il valore di  $\sigma^0$  sono la rugosità superficiale e le proprietà dielettriche degli oggetti osservati, entrambi dipendenti dalla lunghezza d'onda,  $\lambda$ , e dalla polarizzazione del segnale: mentre la rugosità incide sulla direzione di dispersione del segnale; le caratteristiche dielettriche determinano come la lunghezza d'onda del segnale va ad interagire con i corpi attraverso i diversi fenomeni di assorbimento, scattering e penetrazione nel mezzo. Conseguentemente, queste variabili hanno un forte impatto nel momento in cui si vuole determinare “la firma” degli oggetti presenti all'interno di una scena di osservazione.

I segnali radar riescono a penetrare tanto di più all'interno del mezzo man mano che  $\lambda$  aumenta grazie alla dipendenza della costante dielettrica relativa  $\epsilon_r$  dall'onda incidente, fornendo maggiori penetrazioni per basse frequenze (banda L o addirittura P) per quanto riguarda i campi agricoli mentre i segnali a frequenze maggiori tendono ad essere più sensibili a fenomeni di scattering più superficiali. All'interno delle aree coltivate, generalmente i segnali in banda L e C riescono a penetrare all'interno della vegetazione fornendo un contributo di  $\sigma^0$  dovuto principalmente da una componente di volume. Il segnale così intercettato dal radar sulla scena di osservazione è determinato sia da fenomeni di scattering di superficie che volumetrici. Lo scattering che si forma a causa dello squilibrio in termini elettromagnetici tra l'aria ed un altro mezzo, suolo o strato di vegetazione, genera uno scattering di superficie mentre quello volumetrico è causato dalla presenza di diversi scatteratori (per quanto riguarda la vegetazione questi sono le diverse foglie, steli, rami o frutti) all'interno della singola cella radar. Il backscattering determinato dalla componente di vegetazione include anche una parte più o meno rilevante dovuta a rimbalzi multipli tra il suolo e le varie componenti della vegetazione. Tanto più il segnale riesce a penetrare all'interno del mezzo, vedi Fig. 19, tanto più la componente volumetrica risulterà importante. Penetrazione che, oltre a dipendere dalle caratteristiche dielettriche del mezzo, è funzione anche della densità delle piante. Diversi esperimenti in banda C, ad esempio, mostrano come vi sia una maggior o minor influenza del terreno a seconda della quantità di colture presenti <sup>[106], [107]</sup>. Il valore, identificato con il simbolo  $\delta_p$ , viene calcolato come la quantità di estinzione del segnale di intensità pari a  $1/e \cong 37\%$ :

$$\delta_p \cong \frac{\lambda \sqrt{\epsilon_r''}}{2\pi \epsilon_r''} [m] \quad (2.15)$$

Con  $\epsilon_r'$  e  $\epsilon_r''$ , rispettivamente, parte reale ed immaginaria della costante dielettrica del mezzo.

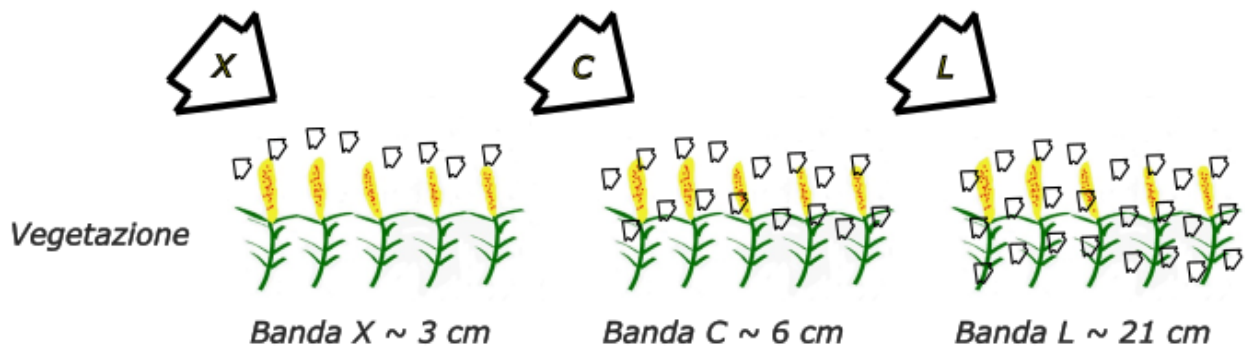


Fig. 19 Penetrazione del segnale SAR al variare di  $\lambda$ .

Diversi esperimenti e studi teorici hanno pertanto dimostrato che i segnali nelle lunghezze d'onda delle microonde, ed ovviamente il backscattering misurato dai sensori SAR, è sensibile alle caratteristiche della vegetazione <sup>[108], [109], [110], [111]</sup>. Le caratteristiche dielettriche della vegetazione risultano fortemente influenzate dal contenuto in acqua in un ampio intervallo di frequenze mentre le caratteristiche geometriche influenzano la diffusione in diversi modi a seconda della polarizzazione e della frequenza <sup>[112]</sup>.



## Capitolo 3- Scopo della tesi

L'importanza di monitorare lo stato fisiologico delle piante e la loro risposta a situazioni di stress idrico è stata ampiamente studiata in letteratura <sup>[113]</sup>, <sup>[114]</sup>.

Il *PRI* è un indicatore dell'attività del ciclo delle xantofille, un processo fotoprotettivo che consente alle piante di gestire l'eccesso di energia solare, evitando danni fotosintetici. Questo indice è considerato un segnale precoce dello stress fisiologico che può compromettere la produttività agricola e l'accumulo di biomassa. Dall'altro lato, i sensori a microonde, come quelli di S-1, offrono la possibilità di rilevare il contenuto idrico della vegetazione grazie alla sensibilità delle onde elettromagnetiche grazie alla costante dielettrica dell'acqua. Questa tecnologia ha il vantaggio di operare in qualsiasi condizione meteorologica, fornendo informazioni essenziali anche in presenza di nuvole o assenza di luce solare.

Nonostante la ricchezza di studi disponibili sulle tecniche ottiche e a microonde, la letteratura mostra una carenza di ricerche che esplorino in modo integrato il legame tra l'attività fotosintetica, misurata dal *PRI*, e il contenuto idrico della vegetazione, rilevato da sensori radar. In particolare, manca una visione che colleghi queste misure per comprendere meglio come le piante reagiscono e si adattano a possibili condizioni di stress idrico. La maggior parte delle ricerche esistenti tende a trattare separatamente le informazioni ottiche e a microonde, senza approfondire come l'integrazione di queste tecniche possa fornire una comprensione più completa e accurata rispetto all'argomento di ricerca.

Alla luce di questa analisi, emergono alcuni gap di ricerca. Primo, manca uno studio che metta in relazione il *PRI*, con le misurazioni a microonde. Secondo, non sono state sufficientemente esplorate le variazioni temporali, di questi parametri e il loro significato per il monitoraggio per analizzare le variazioni dello stato agricolo. Infine, è necessario validare e confrontare questi parametri con indici consolidati in letteratura per confermare l'affidabilità e l'utilità pratica del metodo combinato.

Da tali questioni possono essere derivate le seguenti domande:

1. Qual è la relazione specifica tra l'attività fotosintetica, misurata con il *PRI*, e il contenuto idrico della vegetazione rilevato dai sensori a microonde?
2. Come variano queste relazioni e quali implicazioni hanno per la comprensione delle dinamiche delle piante?
3. In che misura l'integrazione dei dati ottici e a microonde può fornire una stima più affidabile dello stato fisiologico delle piante rispetto agli indici ottici già conosciuti, e come può essere utile per ottimizzare la gestione agricola in aree a basso apporto idrico?

Conseguentemente, lo scopo di questa tesi è quello di valutare un possibile legame tra lo stato idrico della vegetazione, determinabile mediante l'uso di sensori satellitari e le condizioni di salute delle piante.

Attraverso la conoscenza dell'indice *PRI*, verrà analizzato lo stato nel ciclo delle xantofille presente all'interno della pianta e questo sarà confrontato con lo stato idrico. Inoltre, dato che i passaggi satellitari avvengono sia nella prima mattinata che nel tardo pomeriggio in base alle orbite, sarà

possibile analizzare eventuali variazioni del *PRI* rispetto al contenuto in acqua delle colture nel corso della giornata. Inoltre, gli stessi valori di *PRI* saranno associati anche rispetto a dati multispettrali, nell'ottico e in lunghezze d'onda vicine, per studiare come le due diverse variabili si relazionano tra di loro.

Gli esperimenti sono stati eseguiti su campi agricoli non irrigati vicino all'Istituto di Fisica Applicata Nello Carrara (IFAC), campi la cui unica fonte di alimentazione idrica era quindi quella dovuta alla pioggia (rainfed agriculture). In particolare, le misure sono state eseguite sul sorgo, un tipo di coltura fortemente resistente alla siccità <sup>[115]</sup> per valutare come le piante rispondono in condizioni idriche difficili con basso apporto idrico, tipico di molte zone aride in cui si applica la rainfed agriculture <sup>[116]</sup>, <sup>[117]</sup>. In queste aree si applicano le tecniche agricole tipiche dell'aridocoltura, utilizzata in ambienti dove le precipitazioni sono rare, le alte temperature e l'elevata intensità luminosa determinano perdite di acqua importanti e la gestione idrica è tipicamente relegata ad un uso efficiente del terreno.

In queste aree vengono piantate coltivazioni molto ampie di diversi ettari dove possono essere elaborati una grande quantità di pixel. Al contrario in un campo-test, dove ci si può permettere di irrigare pienamente solo una parte del raccolto e nell'altra creare le condizioni per uno stress idrico, le dimensioni dei terreni sono generalmente tali da avere pochi pixel a disposizione per l'elaborazione del dato. Inoltre, fattore ancor più importante, i valori dei pixel vicino ai bordi del campo agricolo potrebbero risentire della risposta del backscattering di corpi presenti nelle immediate vicinanze (strade, lampioni, edifici etc.), andando a diminuire ulteriormente la già esile quantità di pixel disponibili per l'elaborazione dell'informazione.

## Capitolo 4- Modelli elettromagnetici

Elaborando le equazioni di Maxwell è possibile risolvere quest'ultime ottenendo delle espressioni esplicite per le grandezze di  $\vec{E}$  e  $\vec{H}$  <sup>[103]</sup>. Per ragioni di semplicità, rappresenteremo i vettori  $\vec{E}$  ed  $\vec{H}$  con  $E$  e  $H$  come funzioni nello spazio  $(x, y, z)$  considerando l'assenza di correnti impresse. Si ottiene così l'equazione d'onda che governa un campo elettrico all'interno di un mezzo omogeneo:

$$\nabla^2 E + j\omega\mu\varepsilon\varepsilon_0 E = 0 \quad (3.1)$$

con  $\nabla^2$  operatore laplaciano per cui si ottiene la seguente relazione.

$$\nabla^2 E = \left(\frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2}\right)E \quad (3.2)$$

Definendo la costante di propagazione  $\gamma$  come:

$$\gamma = j\omega\sqrt{\mu\varepsilon\varepsilon_0} \quad (3.3)$$

si può sia riscrivere l'equazione (3.1) ed elaborando le equazioni di Maxwell anche rispetto ad  $H$  otteniamo:

$$\nabla^2 E - \gamma^2 E = 0 \quad (3.4)$$

$$\nabla^2 H - \gamma^2 H = 0 \quad (3.5)$$

le cui equazioni sono analogamente risolvibili, a meno dell'impedenza caratteristica del mezzo  $\eta$ . A seconda del mezzo con cui l'onda interagirà vi saranno distinte soluzioni, ad esempio per un mezzo privo di perdite  $\varepsilon = \varepsilon'$  e  $\sigma = 0$  da cui definendo il numero d'onda  $k$ :

$$k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon'\varepsilon_0} \quad (3.6)$$

si ottiene, per semplicità solo rispetto al campo elettrico:

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0 \quad (3.7)$$

al contrario, per un mezzo con perdite si ha:

$$\gamma^2 = -\omega^2\mu\varepsilon\varepsilon_0 = \gamma = -\omega^2\mu\varepsilon_0(\varepsilon' - j\varepsilon'') = -\omega^2\mu\varepsilon_0\left(\varepsilon' - j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}\right) \quad (3.8)$$

poiché  $\gamma$  è complesso lo possiamo esprimere  $\alpha + j\beta$  dove  $\alpha$  prende il nome di costante di attenuazione nel mezzo mentre  $\beta$  indica la costante di fase, con valori:

$$\alpha = -\omega\sqrt{\mu\varepsilon_0} \cdot \text{Im}\{\sqrt{\varepsilon}\} \quad (3.9)$$

$$\beta = \omega\sqrt{\mu\varepsilon_0} \cdot \text{Re}\{\sqrt{\varepsilon}\} \quad (3.10)$$

dalle quali, attraverso una serie di sostituzioni ed elaborazioni matematiche, possiamo ottenere i valori di  $\alpha$  e  $\beta$  in funzione della permeabilità magnetica e permittività elettrica. Per ragioni di semplicità considereremo  $\mu = \mu_0$  in quando i materiali che comunemente si trovano nel telerilevamento a microonde sono non magnetici.

$$\alpha = \omega \left\{ \frac{\varepsilon' \varepsilon_0 \mu_0}{2} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} - 1 \right] \right\}^2 \text{ [Np/m]} \quad (3.11)$$

$$\beta = \omega \left\{ \frac{\varepsilon' \varepsilon_0 \mu_0}{2} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} + 1 \right] \right\}^2 \text{ [Np/m]} \quad (3.12)$$

Da cui cambia anche l'equazione dell'impedenza caratteristica del mezzo che diventa:

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon \varepsilon_0}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon' \varepsilon_0}} \left( 1 - j \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^{-1/2} = \frac{\eta_0}{\sqrt{\varepsilon'}} \left( 1 - j \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^{-1/2} \text{ [\Omega]} \quad (3.13)$$

per un'onda piana con campo elettrico  $\vec{E} = E_x(z) \hat{x}$  che viaggia lungo l'asse  $z$ , l'equazione (3.4) si riduce a:

$$\frac{d^2 E_x(z)}{dx^2} - \gamma^2 E_x(z) = 0 \quad (3.14)$$

fornendo la soluzione:

$$E(z) = E_{x0} e^{-\gamma z} \hat{x} = E_{x0} e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} \hat{x} \quad (3.15)$$

con  $E_{x0}$  ampiezza del campo elettrico. Dall'equazione (3.15) è possibile calcolarsi il modulo del campo elettrico:

$$|E_x(z)| = |E_{x0} e^{-\alpha z} e^{-j\beta z}| = |E_{x0}| e^{-\alpha z} \quad (3.16)$$

la cui intensità cala esponenzialmente rispetto alla direzione di propagazione in funzione di  $\alpha$ . Parte dell'energia del segnale è, così, convertita in calore e dispersa. Viene definita la distanza con cui l'intensità del campo elettrico si attenua di un fattore pari a  $1/e \cong 37\%$  come profondità di penetrazione (skin depth):

$$\delta_s = \frac{1}{\alpha} \text{ [m]} \quad (3.17)$$

per  $z=3\delta_s$  il campo elettrico ha una intensità inferiore al 5% del suo valore iniziale mentre per  $z=5\delta_s$  l'intensità è inferiore al 1%. Queste equazioni sono da considerarsi sotto l'ipotesi di un mezzo lineare, isotropico ed omogeneo. A seconda delle caratteristiche del mezzo, vi potranno essere delle approssimazioni, ad esempio nel caso di  $\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \ll 1$  si parlerà di mezzo dielettrico a basse perdite mentre per  $\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \gg 1$  di buon conduttore. Nella pratica, si ritiene un buon conduttore un mezzo per cui il rapporto  $\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} > 100$  e un dielettrico a basse perdite per  $\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} < 1/100$ . Per valori compresi tra i due estremi, si parla di “quasi-conduttore”.

## Onda riflessa e trasmessa rispetto ad un angolo di incidenza

Assumiamo un'onda incidente, vedi Fig. 20, con angolo di incidenza  $\theta$  su una superficie di confine tra due mezzi elettromagneticamente diversi tra di loro. Il primo mezzo ha, così, permittività dielettrica  $\epsilon_1$  mentre il secondo  $\epsilon_2$ , entrambi composti dalla sola parte reale e quindi privi di perdite. Chiamiamo gli angoli di incidenza, riflessione e trasmissione nel secondo mezzo rispettivamente con  $\theta_i, \theta_r, \theta_t$  con direzione di propagazione, rispettivamente,  $\hat{k}_i, \hat{k}_r, \hat{k}_t$ .

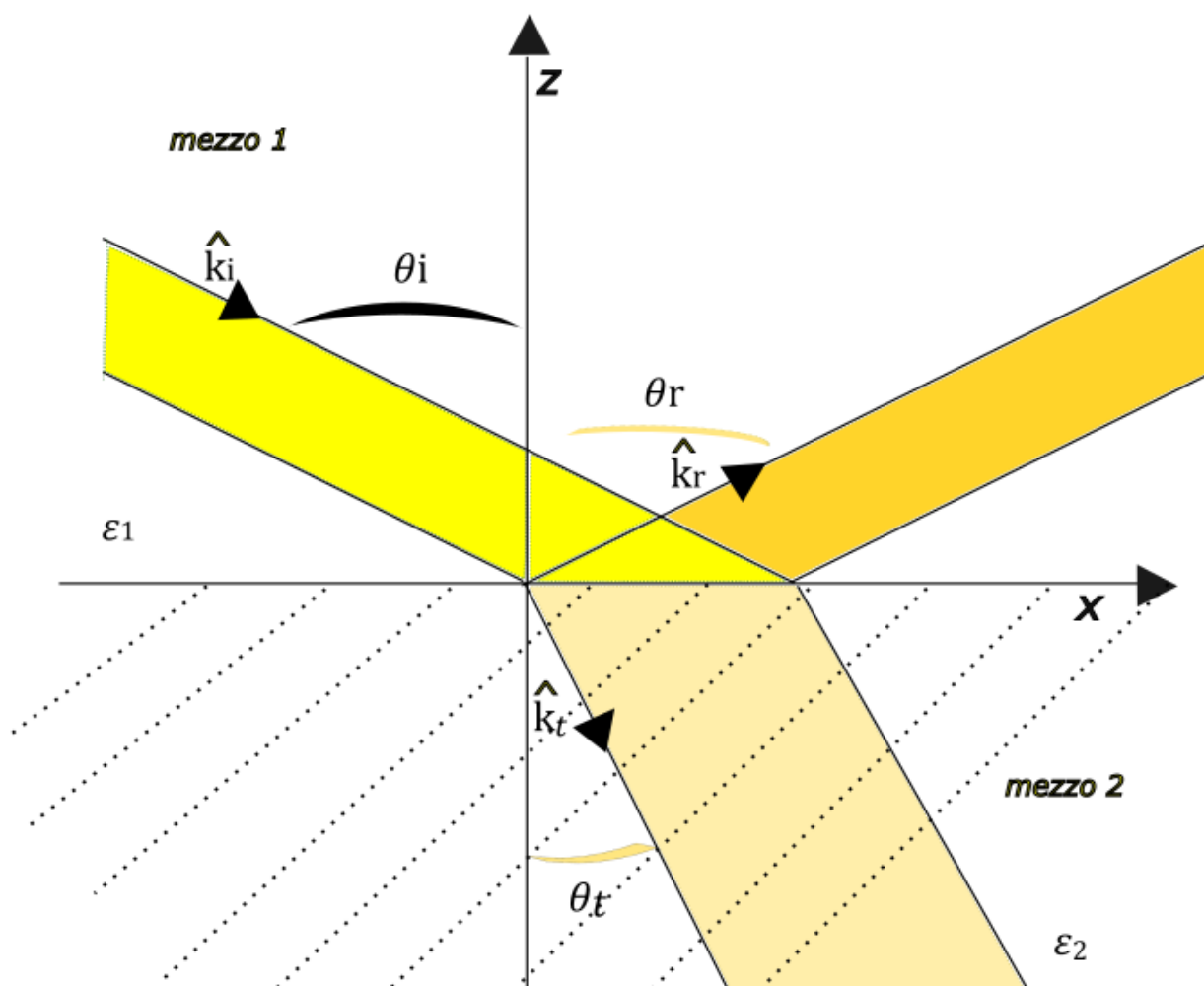


Fig. 20 Onda piana riflessa e trasmessa all'interfaccia tra due mezzi elettromagneticamente diversi

I valori dei diversi angoli sono legati tramite le leggi di riflessione e rifrazione di Snell, rispettivamente:

$$\theta_i = \theta_r \quad (3.18)$$

$$\frac{\sin(\theta_t)}{\sin(\theta_i)} = \sqrt{\frac{\epsilon_1'}{\epsilon_2'}} = \frac{n_1}{n_2} \quad (3.19)$$

con  $n_1$  e  $n_2$ , rispettivamente, indici di rifrazione del primo e secondo mezzo. Dall'equazione (3.19) si deduce che se l'onda passa da un primo mezzo elettromagneticamente meno denso di un secondo, l'onda tenderà a piegarsi in direzione dell'asse  $z$ . Al contrario, se il secondo mezzo è meno denso del primo tenderà a convergere verso la direzione dell'asse  $x$ . Nei casi limite la polarizzazione dell'onda sarà totalmente trasmessa (angolo di Brewster  $\theta_B$ ) o riflessa (angolo critico di riflessione totale  $\theta_c = \theta_i = \theta_r$ ) per cui  $\theta_r = \pi/2$  e nessuna onda viaggia all'interno del secondo mezzo.

$$\sin(\theta_c) = \frac{n_2}{n_1} \sin(\theta_t) |_{\theta_t=\pi/2} = \frac{n_2}{n_1} = \sqrt{\frac{\epsilon_2'}{\epsilon_1'}} \quad (3.20)$$

$$\tan(\theta_B) = \sqrt{\frac{\epsilon_2'}{\epsilon_1'}} \quad (3.21)$$

Nel paragrafo successivo saranno spiegati i meccanismi per arrivare alla formulazione (3.21).

## Espressioni dei campi all'interno di mezzi con o senza perdite

Quando un'onda si propaga da un primo mezzo ad un secondo con un angolo di incidenza come descritto nel precedente paragrafo, si definisce piano di incidenza il piano contenente la normale al confine tra i due mezzi e con direzione pari alla propagazione dell'onda incidente. L'onda, di polarizzazione arbitraria, può essere descritta come la composizione di due onde polarizzate ortogonalmente tra di loro: una con campo elettrico parallelo al piano di incidenza (polarizzazione parallela) e l'altra con campo elettrico perpendicolare allo stesso piano (polarizzazione perpendicolare). Queste due polarizzazioni sono raffigurate rispettivamente nelle Fig. 21 e Fig. 22 dove il piano di incidenza è quello  $x$ - $z$ .

Nel telerilevamento a microonde la polarizzazione orizzontale è quella per cui il campo elettrico risulta parallelo alla superficie terrestre mentre per la polarizzazione verticale  $E$  è perpendicolare a quest'ultima e quindi parallelo al piano di incidenza. Per il caso di un'onda polarizzata in modo generico si tende a decomporre l'onda incidente, riflessa o trasmessa rispetto alle sue componenti orizzontali e verticali.

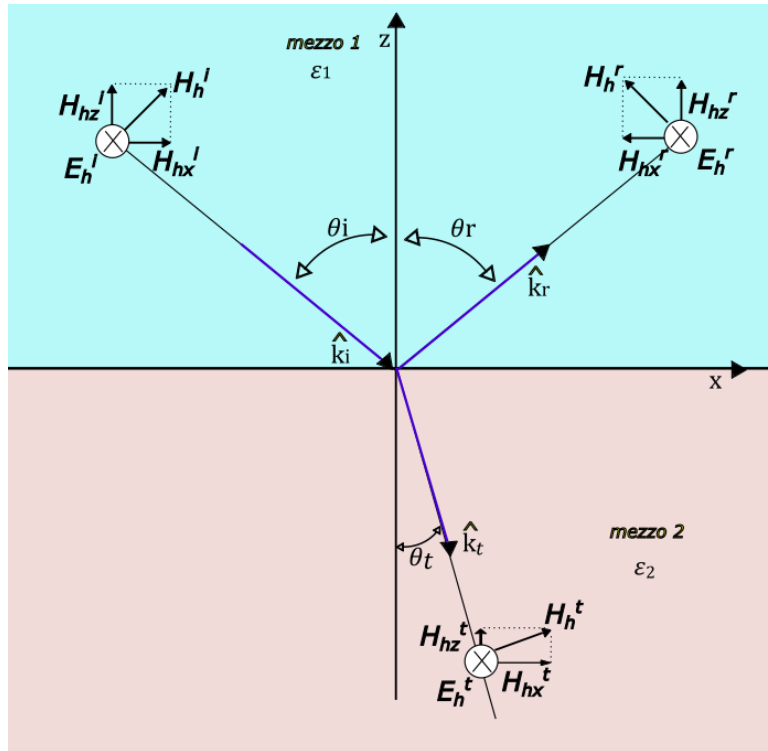


Fig. 21 Onda piana incidente polarizzata orizzontalmente tra un primo ed un secondo mezzo. Legenda: h=orizzontale, v=verticale, i=incidente, r=riflesso, t=trasmesso. Piano di riferimento x-z.

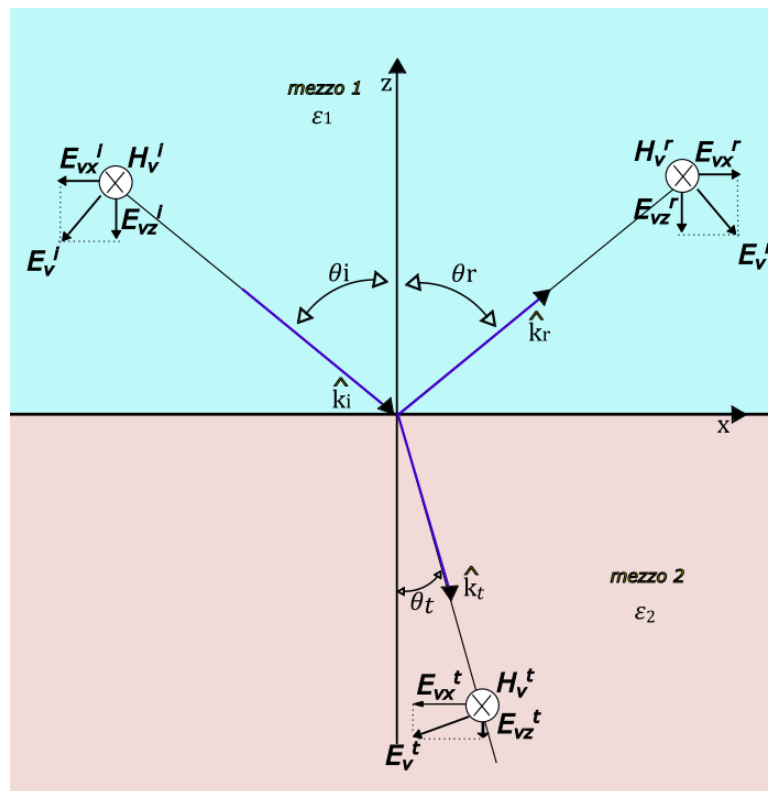


Fig. 22 Onda piana incidente polarizzata verticalmente tra un primo ed un secondo mezzo. Legenda: h=orizzontale, v=verticale, i=incidente, r=riflesso, t=trasmesso. Piano di riferimento x-z.

I valori dei campi elettrici e magnetici delle Fig. 21e Fig. 22 sono mostrati nella Tabella 5 con le rispettive caratteristiche elettromagnetiche dei due mezzi. Uguagliando i valori dei campi al confine

tra i due diversi mezzi, possiamo calcolarci la quantità di campo che viene riflessa o trasmessa nel nuovo mezzo. Questo scalare viene identificato, rispettivamente, con il termine di coefficiente di riflessione ( $\rho$ ) o trasmissione ( $\tau$ ) calcolato rispetto alla polarizzazione di riferimento.

Tabella 5 Espressioni dei campi elettromagnetici per un mezzo senza perdite e con perdite\*

Polarizzazione orizzontale	Polarizzazione verticale	
$E_h^i = \hat{y} E_{h0}^i e^{-jk_1(x \sin \theta_i - z \cos \theta_i)}$ $H_h^i = (\hat{x} \cos \theta_i + \hat{z} \sin \theta_i) \frac{E_{h0}^i}{\eta_1} e^{-jk_1(x \sin \theta_i - z \cos \theta_i)}$ $E_h^r = \hat{y} \rho_h E_{h0}^i e^{-jk_1(x \sin \theta_r + z \cos \theta_r)}$ $H_h^r = (-\hat{x} \cos \theta_r + \hat{z} \sin \theta_r) \rho_h \frac{E_{h0}^i}{\eta_1} e^{-jk_1(x \sin \theta_r + z \cos \theta_r)}$ $E_h^t = \hat{y} \tau_h E_{h0}^i e^{-jk_2(x \sin \theta_t - z \cos \theta_t)}$ $H_h^t = (\hat{x} \cos \theta_t + \hat{z} \sin \theta_t) \tau_h \frac{E_{h0}^i}{\eta_2} e^{-jk_2(x \sin \theta_t - z \cos \theta_t)}$ $\rho_h = \frac{\eta_2 \cos \theta_i - \eta_1 \cos \theta_t}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t}$ $\tau_h = 1 + \rho_h$	$E_v^i = (-\hat{x} \cos \theta_i - \hat{z} \sin \theta_i) E_{v0}^i e^{-jk_1(x \sin \theta_i - z \cos \theta_i)}$ $H_v^i = \hat{y} \frac{E_{v0}^i}{\eta_1} e^{-jk_1(x \sin \theta_i - z \cos \theta_i)}$ $E_v^r = (\hat{x} \cos \theta_r - \hat{z} \sin \theta_r) \rho_v E_{v0}^i e^{-jk_1(x \sin \theta_r + z \cos \theta_r)}$ $H_v^r = \hat{y} \rho_v \frac{E_{v0}^i}{\eta_1} e^{-jk_1(x \sin \theta_r + z \cos \theta_r)}$ $E_v^t = (-\hat{x} \cos \theta_t - \hat{z} \sin \theta_t) \tau_v E_{v0}^i e^{-jk_2(x \sin \theta_t - z \cos \theta_t)}$ $H_v^t = \hat{y} \tau_v \frac{E_{v0}^i}{\eta_2} e^{-jk_2(x \sin \theta_t - z \cos \theta_t)}$ $\rho_v = \frac{\eta_2 \cos \theta_t - \eta_1 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_t + \eta_1 \cos \theta_i}$ $\tau_v = (1 + \rho_v) \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_t}$	
$k_1 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon_1}$	$\eta_1 = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_1}}$	$\eta_2 = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_2}}$
$k_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_2}$	$k_2 \sin \theta_t = k_1 \sin \theta_i$	$\cos \theta_t = \left[ 1 - \left( \frac{k_1}{k_2} \sin \theta_i \right)^2 \right]^{1/2}$
<p>*(1) per un mezzo senza perdite <math>\epsilon = \epsilon'</math>; (2) con perdite <math>\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''</math> e <math>k = 2\pi\sqrt{\epsilon' - j\epsilon''}/\lambda_0</math></p>		

I coefficienti di riflessione e trasmissione indicano i rapporti tra le ampiezze dei campi elettrici, rispettivamente, riflessi e trasmessi rispetto all'onda incidente. Al contrario, se volessimo esaminare i rapporti tra potenze va tenuta conta l'area di illuminazione ( $A$ ) del fascio. Le densità di potenza, in  $[W/m^2]$  sulle superfici incidenti valgono:

$$\delta_h^i = \frac{|E_{x0}^i|^2}{2\eta_1}, \quad \delta_h^r = \frac{|E_{x0}^r|^2}{2\eta_1}, \quad \delta_h^t = \frac{|E_{x0}^t|^2}{2\eta_2} \quad (3.22)$$

con  $\eta_1$  e  $\eta_2$  impedenze del primo e secondo mezzo e  $x$  polarizzazione generica. A seconda dell'angolo di riferimento, definiamo le rispettive aree efficaci come:

$$A_i = A \cos \theta_i, \quad A_r = A \cos \theta_r, \quad A_t = A \cos \theta_t \quad (3.23a)$$

da cui le rispettive potenze [W]:

$$P_x^i = \delta_x^i A_i, \quad P_x^r = \delta_x^r A_r, \quad P_x^t = \delta_x^t A_t \quad (3.23b)$$

mettendo in rapporto le potenze riflesse e trasmesse rispetto a quella incidente si ottiene:

$$\Gamma^x = \frac{P_x^r}{P_x^i} = \frac{|E_{x0}^r|^2 \cos \theta_r}{|E_{x0}^i|^2 \cos \theta_i} = \frac{|E_{x0}^r|^2}{|E_{x0}^i|^2} = |\rho_x|^2 \quad (3.24)$$

$$T^x = \frac{P_x^t}{P_x^i} = \frac{|E_{x0}^t|^2 \eta_1 A \cos \theta_t}{|E_{x0}^i|^2 \eta_2 A \cos \theta_i} = |\tau_x|^2 \frac{\eta_1 \cos \theta_t}{\eta_2 \cos \theta_i} \quad (3.25)$$

con  $\Gamma$  e  $T$  riflettività e trasmissibilità. Per la legge di conservazione dell'energia:

$$P_x^i = P_x^r + P_x^t \quad (3.26)$$

da cui:

$$\Gamma^x + T^x = 1 \quad (3.27)$$

per ottenere l'equazione in (3.21), partendo dalla formula del coefficiente di riflessione e supponendo di avere una riflessione nulla si ottiene:

$$\rho_x = 0 \Rightarrow \eta_1 \cos(\theta_i) = \eta_2 \cos(\theta_t) \quad (3.28)$$

quindi, combinando la (3.28) con la legge di Snell (3.19) e ponendo  $\theta_i = \theta_B$  (angolo di Brewster) si ottiene:

$$\theta_B = \arcsin \sqrt{\frac{1}{1 + (\epsilon_1' / \epsilon_2')}} = \arctan \sqrt{\frac{\epsilon_2'}{\epsilon_1'}} \quad (3.29)$$

## Segnale elettromagnetico all'interno di un mezzo composto

Un radar che osserva la superficie terrestre misura la quantità di  $\sigma^0$  dipendente direttamente dal coefficiente di riflessione della stessa superficie. Invece, un radiometro misura l'emissività <sup>[118]</sup>, legata al termine  $1 - |\rho_x|^2$ . Perciò, a seconda dal tipo di sensore, è importante conoscere il modello da utilizzare per conoscere le soluzioni ai campi rispetto al tipo di scenario presente, se con o senza perdite elettromagnetiche.

Un caso specifico che capita spesso nella natura dei problemi elettromagnetici è quello di avere una serie di mezzi stratificati, ciascuno dei quali composti da più elementi di caratteristiche dielettriche diverse. Ne sono degli esempi le diverse configurazioni aria-neve-terreno, aria-ghiaccio-oceano, aria-macchia di petrolio-oceano e aria-vegetazione-suolo. La Fig. 23 raffigura un esempio di onda piana incidente con angolo  $\theta_i$  su un primo mezzo per poi dividersi in una parte riflessa ed una trasmessa all'interno di un secondo mezzo. A sua volta, il segnale arriva all'interfaccia con il terzo mezzo provocando un'onda trasmessa ed una riflessa di nuovo nel secondo mezzo che, a sua volta, arrivando all'interfaccia primo-secondo mezzo viene ripartita in una componente che viaggia verso il primo mezzo ed un'altra che, rimanendo all'interno dello stesso corpo, ritorna verso l'interfaccia secondo-terzo mezzo generando, così, una serie di riflessioni multiple e proseguendo indefinitamente. Dall'equazione (3.24) ogni riflessione multipla porta una minor quantità di energia rispetto alla riflessione precedente. In condizioni stazionarie, il coefficiente di riflessione nel primo mezzo è determinato dalla somma di tutti i campi elettrici che hanno la stessa direzione di propagazione verso il primo mezzo. Generalmente, possiamo assumere:

- mezzo 1

$$\alpha_1 = 0, \quad \gamma_1 = j\beta_1 = j \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon_1'}, \quad \eta_1 = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_1'}} \quad (3.30)$$

- mezzo 2 ( $\varepsilon_2 = \varepsilon_2' - j\varepsilon_2''$ )

$$\gamma_2 = \alpha_2 + j\beta_2, \quad \eta_2 = \frac{\eta_0}{\sqrt{\varepsilon_2}} \quad (3.31)$$

- mezzo 3 ( $\varepsilon_3 = \varepsilon_3' - j\varepsilon_3''$ )

$$\gamma_3 = \alpha_3 + j\beta_3, \quad \eta_3 = \frac{\eta_0}{\sqrt{\varepsilon_3}} \quad (3.32)$$

dalle leggi di Snell:

$$\gamma_1 \sin \theta_i = \gamma_2 \sin \theta_{t2} = \gamma_3 \sin \theta_{t3} \Rightarrow \cos \theta_{t2} = \left[ 1 - \left( \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \sin \theta_i \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.33)$$

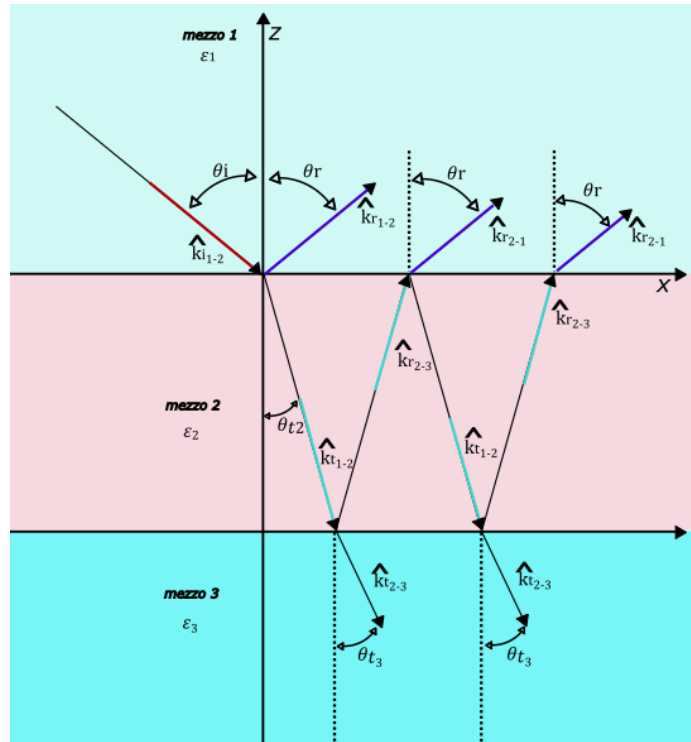


Fig. 23 Riflessioni e trasmissioni multiple all'interno di un mezzo stratificato. Legenda:  $\theta_i$  = angolo di incidenza tra il primo e secondo mezzo,  $\theta_r$  = angolo di riflessione tra il primo ed il secondo mezzo,  $\theta_{t2-3}$  = angoli di trasmissione, rispettivamente nel secondo e terzo mezzo,  $\hat{k}_{x-y}$  versore tra mezzo  $x$  e  $y$ .

I valori dei coefficienti di riflessione e di trasmissione per ogni strato possono essere calcolati applicando le condizioni al contorno dei campi al confine. Il problema si presta ad una rappresentazione del tipo matriciale dove per ogni strato si applicano le equazioni ai campi <sup>[119]</sup>, <sup>[120]</sup>. Per un'onda incidente di ampiezza  $E_0 = 1$  [V/m], la Fig. 24 raffigura i diversi meccanismi di riflessione, trasmissione e propagazione che l'onda incidente incontra nei diversi mezzi. Di seguito, identificando con:

$\rho_{12}$  = coefficiente di riflessione tra il mezzo 1 e 2 per un angolo di incidenza  $\theta_i = \theta_r$

$\rho_{21}$  = coefficiente di riflessione tra il mezzo 2 e 1 per un angolo di incidenza dal mezzo 2 pari a  $\theta_{t2}$ . Nota che  $\rho_{21} = -\rho_{12}$

$\tau_{12}$  = coefficiente di trasmissione tra il mezzo 1 e 2

$\tau_{21}$  = coefficiente di trasmissione tra il mezzo 2 e 1

$L = e^{-\gamma_2 d \cos \theta_{t2}}$  fattore di propagazione del segnale all'interno del mezzo 2

$\rho_{23}$  = coefficiente di riflessione tra il mezzo 2 e 3 con angolo di incidenza  $\theta_{t2}$

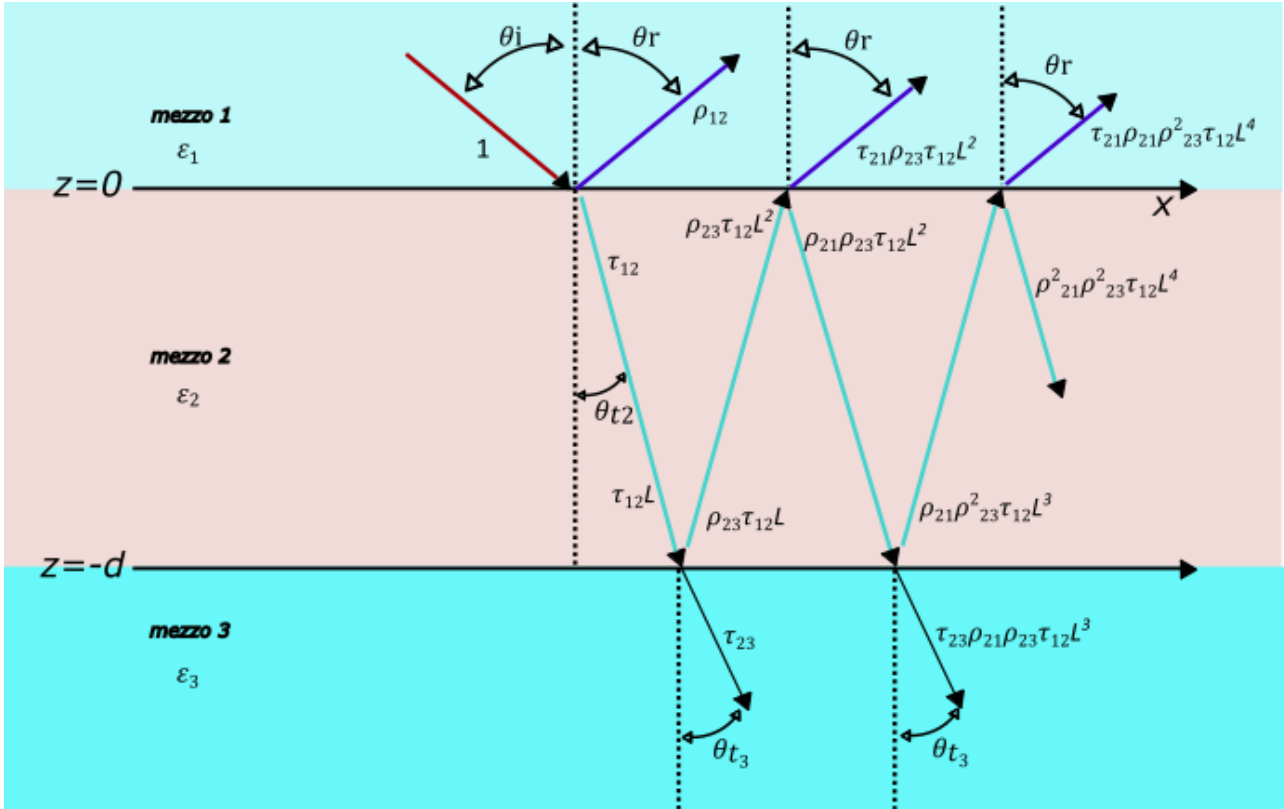


Fig. 24 Processo di riflessioni e trasmissioni multiple

Dove nel primo mezzo il valore del campo elettrico è dato dalla somma delle singole componenti di campo riflesso: la prima è determinata dal coefficiente di riflessione  $\rho_{12}$ , la seconda dal termine  $\tau_{21}\rho_{23}\tau_{12}L^2$ , la terza da  $\tau_{21}\rho_{21}\rho_{23}^2\tau_{12}L^4$  e così via. Sommando tutte le componenti si ottiene:

$$\rho = \rho_{12} + \tau_{21}\rho_{23}\tau_{12}L^2 + \tau_{21}\rho_{21}\rho_{23}^2\tau_{12}L^4 + \dots = \rho_{12} + \tau_{21}\rho_{23}\tau_{12}L^2(1 + x + x^2 + \dots) \quad (3.34)$$

con  $x = \rho_{21}\rho_{23}L^2$ . Inoltre, dato che:

$$\tau_{21} = 1 + \rho_{21} = 1 - \rho_{12} \quad (3.35)$$

$$\tau_{12} = 1 + \rho_{12} \quad (3.36)$$

e i valori di  $\rho_{21}$ ,  $\rho_{23}$  e  $L^2$  sono inferiori a 1, anche  $x < 1$ . Allora:

$$(1 + x + x^2 + \dots) = \frac{1}{1-x} \quad (3.37)$$

ed il coefficiente di riflessione totale (3.34) diventa:

$$\rho = \rho_{12} + \frac{(1-\rho_{12})(1+\rho_{12})\rho_{23}L^2}{1-\rho_{21}\rho_{23}L^2} = \frac{\rho_{12} + \rho_{23}e^{-2\gamma_2 d \cos(\theta_{t2})}}{1 + \rho_{12}\rho_{23}e^{-2\gamma_2 d \cos(\theta_{t2})}} \quad (3.38)$$

con:

$$\text{polarizzazione } H \left\{ \begin{array}{l} \rho_{12} = \frac{\eta_2 \cos \theta_i - \eta_1 \cos \theta_{t2}}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_{t2}} \\ \rho_{23} = \frac{\eta_3 \cos \theta_{t2} - \eta_2 \cos \theta_{t3}}{\eta_3 \cos \theta_{t2} + \eta_2 \cos \theta_{t3}} \end{array} \right. \quad (3.39)$$

$$\text{polarizzazione } V \left\{ \begin{array}{l} \rho_{12} = \frac{\eta_2 \cos \theta_{t2} - \eta_1 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_{t2} + \eta_1 \cos \theta_i} \\ \rho_{23} = \frac{\eta_3 \cos \theta_{t3} - \eta_2 \cos \theta_{t2}}{\eta_3 \cos \theta_{t3} + \eta_2 \cos \theta_{t2}} \end{array} \right. \quad (3.40)$$

tenendo, così, in considerazione solo la parte di segnale riflessa tra il primo ed il secondo mezzo ( $\rho_{12}$ ) con in aggiunta una riflessione multipla al primo ordine ( $\rho_{21}\rho_{23}$ ). La riflettività totale vale:

$$\Gamma = |\rho|^2 \quad (3.41)$$

## Rappresentazione del segnale elettromagnetico all'interno della vegetazione: il water cloud model (WCM)

Il calcolo del valore di  $\delta_s$  all'interno della vegetazione è di non facile risoluzione a causa della difficoltà nel determinare il valore della costante dielettrica per le diverse componenti (foglie, steli, frutti etc). Indirettamente, possono essere ottenute delle indicazioni dal valore di  $\sigma^0$  per angoli di incidenza vicini al nadir, dato che l'onda, per tale angolo, percorre una minor distanza all'interno del mezzo. Da letteratura <sup>[121]</sup> la penetrazione può risultare di diversi metri per basse frequenze, intorno a 1 GHz, mentre diminuisce drasticamente per frequenze più elevate. I fattori che governano la profondità di penetrazione sono la frequenza del segnale elettromagnetico e le caratteristiche dei corpi, all'interno del volume di interesse. Inoltre, se la vegetazione sta perdendo contenuto in acqua, ad esempio dopo la maturazione della pianta, la profondità di penetrazione aumenta data la minor presenza di acqua all'interno dello strato.

La componente di  $\sigma^0$ , data dalla somma del contributo di superficie tra l'interfaccia aria-vegetazione e quello volumetrico dovuto alle riflessioni multiple all'interno della vegetazione, risulta composta principalmente dalla componente volumetrica perché la componente di vegetazione all'interno dello strato considerato è generalmente meno dell'1% del volume totale <sup>[120]</sup> e, perciò, il maggior costituente dello strato è la stessa aria presente nel primo mezzo.

Tali contributi dipendono da diversi fattori: dal valore di  $\delta_s$ , dall'altezza delle piante, dalla frequenza dell'onda, dall'angolo di incidenza. In particolare, per angoli vicini al nadir, ci si aspetta che il contributo di  $\sigma^0$  dovuto al suolo sia non trascurabile se non addirittura comparabile con il valore di backscattering volumetrico. Il valore di  $\sigma^0$  del terreno è principalmente causato da un contributo superficiale in quanto le diverse disomogeneità all'interno del terreno comportano contributi di backscattering di volume trascurabili rispetto alla componente di superficie. Nel rapporto <sup>[122]</sup>, uno dei primi studi sulla risposta elettromagnetica del terreno, sono mostrate varie curve di penetrazione del segnale elettromagnetico all'interno del mezzo al variare sia della frequenza che del tipo di suolo notando che, tendenzialmente, il valore di  $\delta_s$  è di pochi centimetri se non di millimetri per frequenze comprese tra 1 e 10 GHz all'interno di un range di valori del contenuto volumetrico in acqua del terreno tra 0.05 e 0.4 g/cm<sup>3</sup>

Considerando la vegetazione raffigurata nella Fig. 25, i contributi di  $\sigma^0$  sono causati prevalentemente da un contributo del terreno (tenendo conto della doppia trasmissione attraverso la vegetazione) e da un backscattering dovuto ai diversi rimbalzi dei diversi costituenti della vegetazione, entrambi raffigurati con una linea rossa continua. In aggiunta, al sensore arrivano anche altre componenti di minor intensità, raffigurate con la linea tratteggiata, dovute a rimbalzi multipli tra il suolo ed i costituenti delle piante.

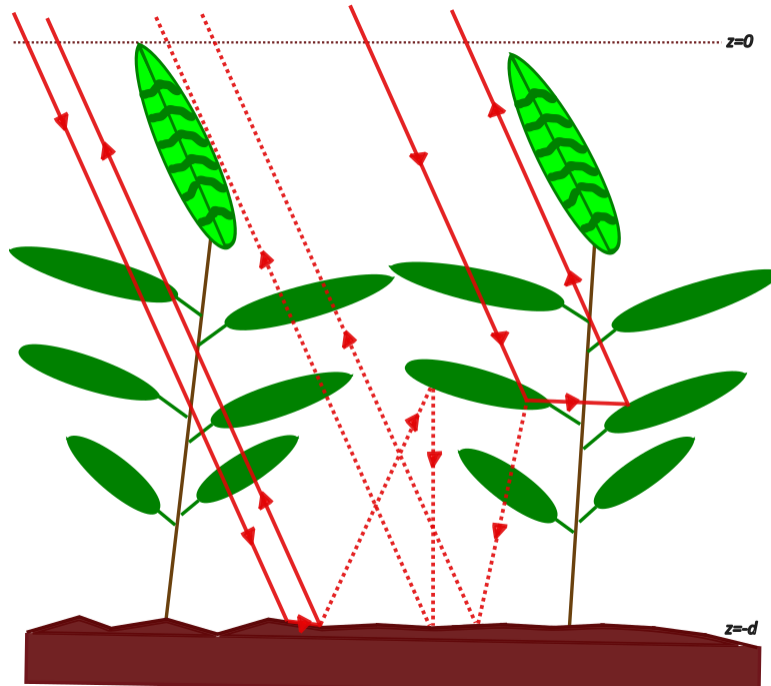


Fig. 25 Contributi di scattering all'interno di uno strato di vegetazione

Per un dato volume all'interno della chioma, il coefficiente di estinzione, ovvero la quantità di energia assorbita o scatterata dal materiale, per un generico materiale di lunghezza infinitesima vale:

$$k_e = k_a + k_s \text{ [Np/m]} \quad (3.42)$$

con  $k_a$  e  $k_s$ , rispettivamente, coefficiente di assorbimento e di scattering. Dato che la vegetazione ha una forma non omogenea nello spazio ed i suoi costituenti hanno diverse forme,  $k_e$  è generalmente dipendente dall'altezza, dalla direzione e dalla polarizzazione del segnale. Per ragioni di semplicità, assumeremo  $k_e$  come una sola funzione dell'altezza delle piante ( $h$ ), lungo l'asse verticale. Data la propagazione dell'onda verso il basso, con angolo di incidenza  $\theta_i$ , la trasmittività (3.25) dello strato di vegetazione per una data polarizzazione  $x$  è dato da:

$$T^x = e^{-\tau_x} \quad (3.43)$$

con  $\tau_x$  attenuazione dello strato di vegetazione:

$$\tau_x = k_e^x h \sec \theta_i \quad (3.44)$$

assumendo che la vegetazione sia composta da una serie di scatteratori uniformemente distribuiti di identiche dimensioni, come raffigurato nella Fig. 26, possiamo ignorare i fenomeni di scattering

dovuti a diversi rimbalzi del segnale, di minor intensità. I valori del coefficiente di estinzione e di scattering di volume valgono:

$$k_e = NQ_e \quad (3.45)$$

$$\sigma_v = N\sigma_b \quad (3.46)$$

con  $N$  numero di scatteratori per  $m^3$ ,  $Q_e$  e  $\sigma_b$ , rispettivamente, coefficiente di estinzione e di backscattering per una singola particella.

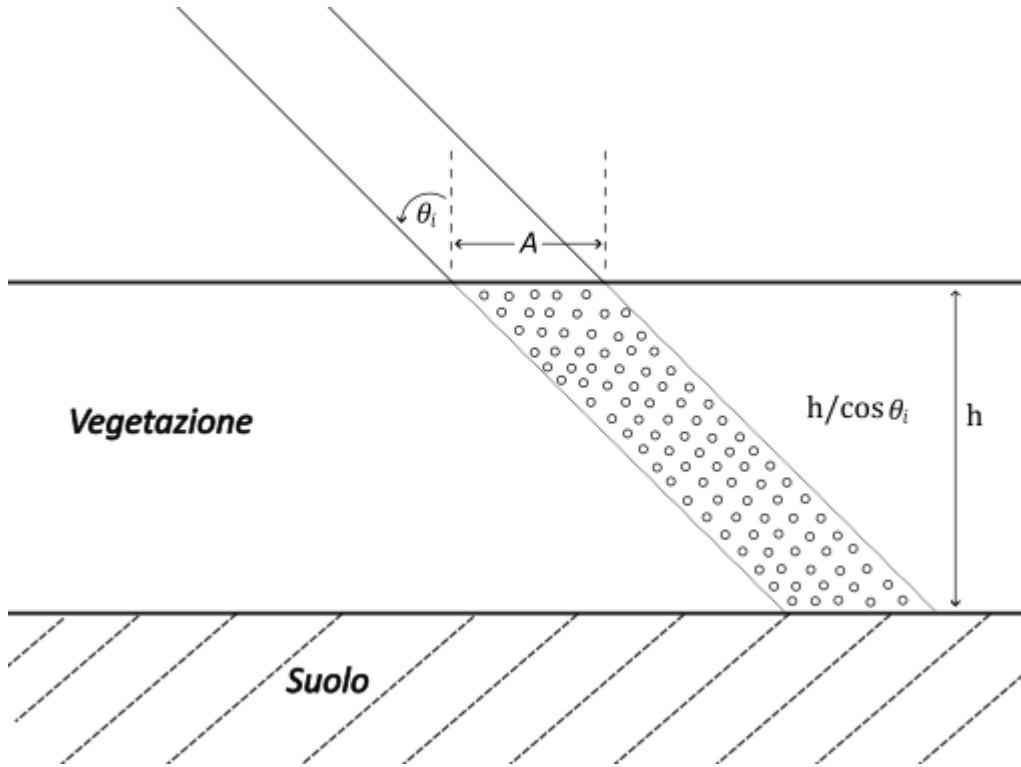


Fig. 26 Strato di vegetazione modellato come un insieme di elementi scatteratori uniformemente distribuiti. L'area illuminata dal segnale è indicata con  $A$

dato che la vegetazione non ha un vero e proprio confine tra il primo mezzo, l'aria e l'inizio delle colture, la potenza che incide nella stessa direzione del sensore è dovuta alla sola componente di volume. Questa è esprimibile come l'integrale della potenza per ogni singolo strato infinitesimale di altezza  $dz$ . Posti  $P_i$  e  $P_r$  la potenza incidente e quella che torna al sensore, dalla teoria del trasferimento radiativo <sup>[120]</sup> si ha:

$$P_i = SA \cos \theta_i \quad (3.47)$$

$$P_r = \frac{SA \cos \theta_i}{4\pi R^2} \int_0^{h/\cos \theta_i} \sigma_v e^{-2k_e z} dz \quad (3.48)$$

con  $S$  densità di potenza  $[\frac{W}{m^2}]$ . Il valore di  $\sigma_v^0$  è ottenuto utilizzando la formula (2.14).

$$\sigma_v^0 = \frac{4\pi R^2 P_r}{AP_i} = \frac{\sigma_v \cos \theta_i}{2k_e} (1 - e^{-2k_e h \sec \theta_i}) = \frac{\sigma_v \cos \theta_i}{2k_e} \left(1 - \frac{1}{L^2}\right) \quad (3.49)$$

con  $L$  pari all'equazione (3.44) al quadrato, per una generica polarizzazione. L'espressione tiene conto del solo contributo della vegetazione, senza quello del terreno. Ipotizzando che il contributo di

backscattering del suolo ( $\sigma_s$ ) sia semplicemente attenuato dallo strato di vegetazione presente al di sopra, il backscattering totale vale:

$$\sigma_{tot}^0 = \sigma_v^0 + \frac{\sigma_s^0}{L^2} \quad (3.50)$$

con  $L^2$  perché il segnale percorre la vegetazione due volte, una volta verso il suolo e un'altra volta nella direzione del sensore, vedi Fig. 25.

Le proprietà dielettriche della vegetazione risultano molto sensibili al contenuto in acqua, vedi capitolo 2, e perciò gli stessi processi di scattering e di assorbimento sono funzione dell'acqua contenuta all'interno delle colture, indicata con  $m_v$ .

$$m_v = \frac{(m_u - m_s)\chi}{h} [Kg/m^3] \quad (3.51)$$

Con  $m_u$  e  $m_s$  massa umida e secca per ogni singola pianta,  $\chi$  numero di piante su  $m^2$  e  $h$  altezza. Nel modello denominato "water cloud model" (WCM) proposto da Attema ed Ulaby <sup>[123]</sup> la vegetazione è pensata come "una nuvola" di particelle d'acqua uniformemente distribuite. Il coefficiente di estinzione può essere allora pensato come:

$$k_e = A_1 m_v \quad (3.52)$$

con  $A_1$  costante dipendente da come il segnale interagisce con i corpi e quindi rispetto alla frequenza, alla geometria e dalla distribuzione degli scatteratori. Invece, il valore di  $\sigma_v$  può essere assunto come:

$$\frac{\sigma_v}{2k_e} = B_2 m_v \quad (3.53)$$

il cui valore può essere sostituito all'interno dell'equazione (3.49). La variabile  $B_2$  indica una costante dipendente dalla geometria e dal tipo di vegetazione. Dato che il backscattering del suolo è fortemente dipendente dall'umidità,  $\sigma_s^0$  può essere modellato come:

$$\sigma_s^0 = C e^{Dm_s} \quad (3.54)$$

con  $C$  e  $D$ , rispettivamente, costanti che indicano la sensibilità rispetto alla rugosità del suolo ed al contenuto in acqua del terreno ( $m_s$ ). Inserendo le equazioni (3.44), (3.49), (3.53) e (3.54) in (3.50):

$$\sigma_{WCM}^0 = B_2 m_v \cos\theta_i \left( 1 - \frac{1}{e^{2A_1 m_v h \sec\theta_i}} \right) + \frac{C e^{Dm_s}}{e^{2A_1 m_v h \sec\theta_i}} \quad (3.55)$$

che descrive il backscattering che si ottiene per un problema elettromagnetico del tipo vegetazione-suolo, sotto l'ipotesi di avere delle particelle d'acqua uniformemente distribuite, in presenza di uno scattering del primo ordine senza rimbalzi multipli.

## Contributo di scattering superficiale per una superficie rugosa

La riflessione di un segnale tra due mezzi lisci all'interfaccia viene descritta attraverso le leggi (3.18)-(3.29). In particolare, la riflettività di un segnale che intercetta un mezzo dielettrico, ad esempio nell'interfaccia aria-terreno, viene descritta dalla legge di Fresnel <sup>[124]</sup> per le due polarizzazioni:

$$\Gamma_v = \left| \frac{\varepsilon \cos \theta_i - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_i}}{\varepsilon \cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_i}} \right|^2 \quad (3.56)$$

$$\Gamma_h = \left| \frac{\cos \theta_i - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_i}} \right|^2 \quad (3.57)$$

con  $\varepsilon$ , nel nostro caso, permittività dielettrica del suolo. Un'onda che, invece, intercetta una superficie rugosa è solo parzialmente riflessa verso la direzione speculare. Conseguentemente, una parte del segnale riflesso tra le due superfici ritorna verso la direzione in cui è presente il radar. La componente di segnale riflessa in modo speculare viene chiamata anche come componente coerente mentre quella che si diffonde in varie direzioni viene chiamata diffusa o non coerente: tanto più la superficie risulta rugosa e tanto più la componente diffusa tende ad aumentare a discapito di quella coerente.

Una superficie che può apparire come “rugosa” per i nostri occhi, potrebbe apparire “liscia” dal punto di vista delle microonde. Questo fenomeno è causato da una serie di unità statistiche, misurate rispetto alla lunghezza d'onda del segnale. I principali parametri che caratterizzano la rugosità di una superficie sono la deviazione standard delle altezze, spesso si trova sotto l'acronimo *rms* o *s*, e la lunghezza di correlazione  $L_c$  dipendenti dalle variazioni casuali della superficie rispetto ad una di riferimento, come raffigurato nella Fig. 27.

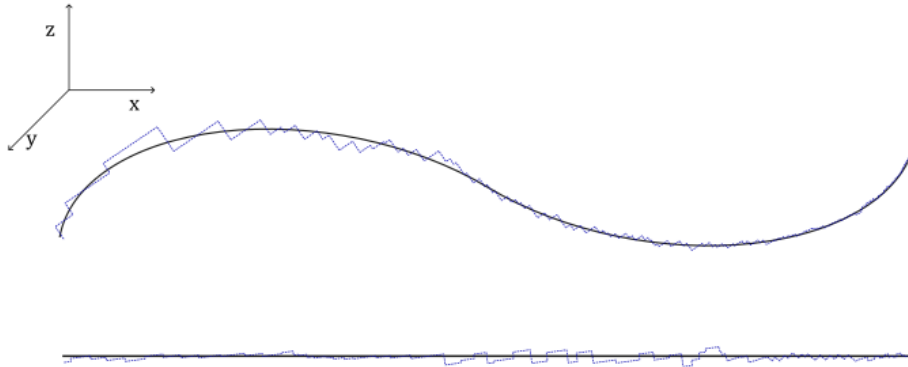


Fig. 27 Esempi di possibili configurazioni di una superficie naturale con oscillazioni casuali (linea tratteggiata) rispetto ad una di riferimento (linea continua)

Supponiamo che l'altezza della superficie lungo  $z$  vari in modo casuale ed isotropico rispetto alle altre direzioni. Cercando di rappresentare l'andamento delle altezze rispetto ad un valore medio  $\bar{z}$ , l'altezza media vale:

$$\bar{z} = \frac{1}{L_x L_y} \int_{L_x/2}^{L_x/2} \int_{L_y/2}^{L_y/2} z(x, y) dx dy \quad (3.58)$$

con  $L_x$  e  $L_y$  dimensioni del segmento rappresentativo della superficie. Le altezze del profilo si distribuiranno attorno al valor medio seguendo una distribuzione di probabilità  $p(z)$  che nella maggioranza dei casi risulterà del tipo gaussiana o esponenziale. Il valore del momento del secondo ordine vale:

$$\overline{z^2} = \frac{1}{L_x L_y} \int_{L_x/2}^{L_x/2} \int_{L_y/2}^{L_y/2} z^2(x, y) dx dy \quad (3.59)$$

la cui deviazione standard delle altezze può essere calcolata come:

$$s = rms = (\overline{z^2} - \bar{z}^2)^{1/2} = \int_{-\infty}^{+\infty} z^2 p(z) dz \quad (3.60)$$

le variazioni tra due punti  $P(x,y)$  e  $Q(x',y')$  che stanno sulla superficie possono essere identificati con  $u=x-x'$  e  $v=y-y'$ , la cui distanza euclidea risulta pari a:

$$\xi = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3.61)$$

da cui è possibile definire la funzione di correlazione  $\rho(\xi)$  come una misura del grado di correlazione tra il punto posto sulla superficie in  $(x,y)$  e in  $(x',y')$ .

$$\rho(\xi) = \frac{\langle z(x,y)z(x',y') \rangle}{s^2} \quad (3.62)$$

per il caso a una dimensione, che tratteremo nella nostra applicazione, si ottiene:

$$s = \left[ \frac{1}{N-1} (\sum_{i=1}^N z_i^2 - N\bar{z}^2) \right]^{1/2} \quad (3.63)$$

$$\bar{z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i \quad (3.64)$$

$$\rho(\xi) = \frac{\sum_{i=1}^{N+1-j} z_i z_{j+i-1}}{\sum_{i=1}^N z_i^2} \quad (3.65)$$

$$\xi = (j-1)\Delta x; j \geq 1 \quad (3.66)$$

con  $N$  numero dei campioni a disposizione. Il valore di  $\rho(\xi)$  diminuisce all'aumentare di  $\xi$  a prescindere dal tipo di rugosità. La distanza  $\xi$  a partire dalla quale i due punti  $P$  e  $Q$  possono essere considerati statisticamente indipendenti prende il nome di lunghezza di correlazione  $L_c$ . Questa distanza viene considerata come quella per cui  $\rho(\xi) = e^{-1}$ . L'andamento della funzione  $\rho(\xi)$  segue un andamento che generalmente rientra all'interno dei casi:

$$\text{esponenziale} \Rightarrow \rho(\xi) = e^{-|\xi|/l} \quad (3.67)$$

$$\text{gaussiano} \Rightarrow \rho(\xi) = e^{-\xi^2/l^2} \quad (3.68)$$

$$\text{x-esponenziale} \Rightarrow \rho(\xi) = e^{-(|\xi|/l)^x} \quad (3.69)$$

raffigurati nella Fig. 28. In letteratura troviamo questo concetto anche sotto il nome di funzione di autocorrelazione (*acf*), in cui si valuta la somiglianza tra due punti in funzione della distanza.

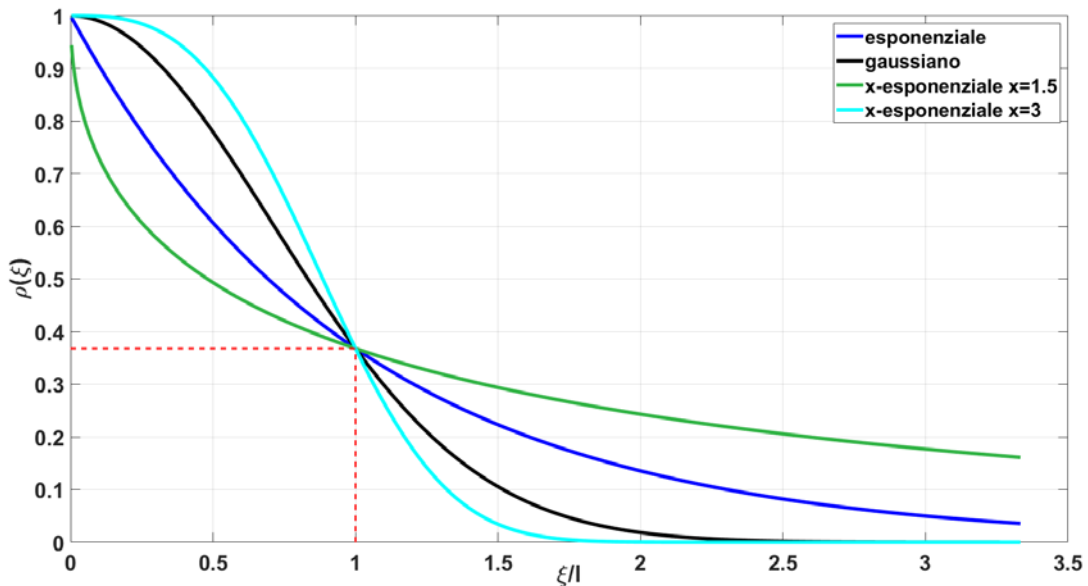


Fig. 28 Andamento delle diverse funzioni di correlazione. Sono stati scelti due valori a piacimento per la casistica x-esponenziale. Ognuna si attenua di un fattore  $e^{-1}$ . Le linee rosse tratteggiate si hanno quando  $\xi=l=L_c$

Nel caso estremo di superficie completamente liscia, ogni punto sulla superficie è correlato con qualsiasi altro portando a  $\rho(\xi)=1$  e  $L_c=\infty$ .

## Criteri per considerare una superficie liscia

Sotto quali condizioni possiamo definire una superficie liscia? Prendiamo come esempio la raffigurazione nella Fig. 29 (a) dove un raggio incide con direzione normale su una superficie. Nel punto B l'onda andrà a comporre una minor distanza rispetto al punto A, portando ad uno sfasamento pari a  $\Delta\varphi=2kh=4\pi h/\lambda$ . Nel caso di un'onda incidente con angolo generico  $\theta$ :

$$\Delta\varphi = 2kh\cos\theta = \frac{4\pi h}{\lambda}\cos\theta \quad (3.70)$$

da cui se  $\Delta\varphi < \pi/2$ :

$$h < \frac{\lambda}{8\cos\theta} \quad (3.71)$$

chiamato criterio di Rayleigh che indica la condizione per la quale una superficie può essere considerata liscia. Per una superficie con deviazione standard delle altezze pari a  $s$  si ottiene:

$$s < \frac{\lambda}{8\cos\theta}; \text{ o } ks < 0.8 \text{ per } \theta = 0 \quad (3.72)$$

il criterio di Rayleigh è utile quando si esegue una classificazione al primo ordine senza tener conto dei diversi fenomeni di scattering e di emissione. Nel campo delle microonde, con  $s \approx \lambda$ , si usa un criterio più stringente denominato di Fraunhofer che stima una differenza di fase rispetto alla sorgente di campo inferiore a  $\pi/8$ :

$$s < \frac{\lambda}{32\cos\theta}; \text{ o } ks < 0.2 \text{ per } \theta = 0 \quad (3.73)$$

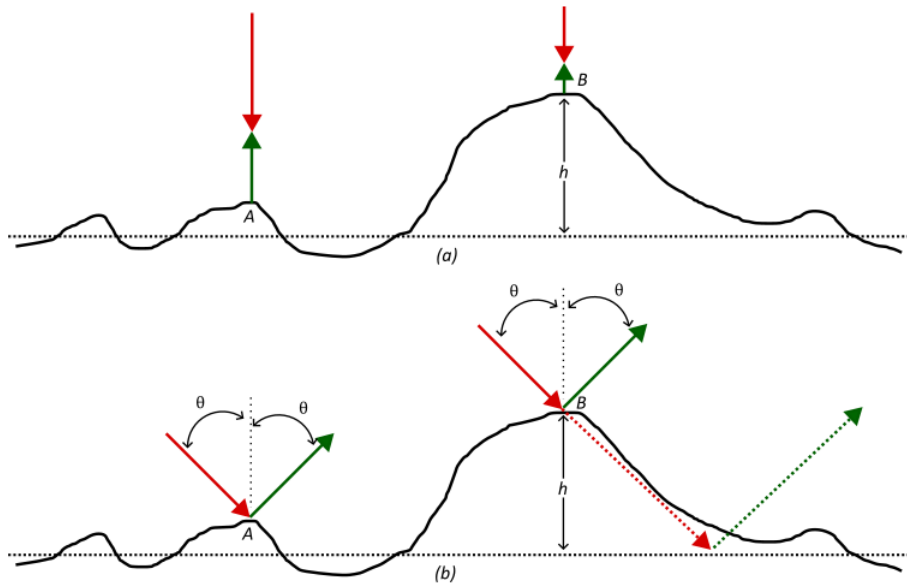


Fig. 29 Nell'immagine in alto (a) la differenza di fase dei campi tra i punti A e B è  $\Delta\varphi=2kh$ , in (b) il campo incide con angolo  $\theta$  e  $\Delta\varphi=2kh\cos\theta$

## Modelli elettromagnetici per un suolo nudo

A partire dagli anni 50 sono stati sviluppati diversi modelli per simulare la risposta elettromagnetica delle superfici rugose <sup>[125]</sup>, validi all'interno di diverse regioni  $ks-kL_c$ , vedi Fig. 30 . Il primo, sviluppato in <sup>[126]</sup> e denominato modello a piccole perturbazioni (small perturbation model, *SPM*) risulta valido per superfici con piccoli valori di  $s$  e  $L_c$ , in particolare per:

$$\begin{cases} ks < 0.3 \\ kL_c < 0.3 \\ \frac{s}{L_c} < 0.3 \end{cases} \quad (3.74)$$

il secondo, sviluppato in <sup>[127]</sup> e denominato modello di scattering di Kirchhoff, risulta valido quando le dimensioni della rugosità sono molto più grandi della lunghezza d'onda del segnale. In particolare, per  $ks \geq 3$  si parla di ottica geometrica (geometric optic, *GO*) dove il modello di scattering è dominato dal fenomeno di riflessione, mentre per  $ks < 3$  si parla di ottica fisica (physical optic, *PO*) dove risultano rilevanti anche i fenomeni di diffrazione. Chiaramente, è necessario un modello che non abbia delle particolari restrizioni sulle dimensioni dei parametri di rugosità superficiale in relazione a  $\lambda$ , dato l'ampio spettro delle lunghezze d'onda delle microonde che varia da pochi mm a decine di cm.

Gli studi nel settore sono culminati con lo sviluppo dell'integral equation model (*IEM*), capace di risolvere i limiti dei precedenti modelli <sup>[128]</sup>. Negli anni successivi, sono stati presentati diversi

aggiornamenti dell'IEM che hanno cercato di per descrivere con maggior precisione le diverse configurazioni e tipologie di rugosità [129]-[135].

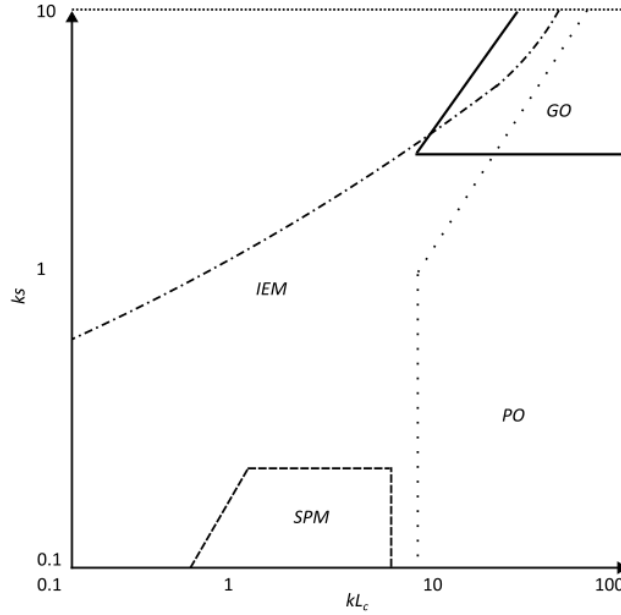


Fig. 30 Intervalli di validità dei modelli SPM, GO, PO e IEM

Per tutti questi modelli [136], sono semplificati i termini legati alla componente di fase all'interno delle funzioni di Green [137] per facilitare la trattazione matematica. Inoltre, i coefficienti di riflessione di Fresnel [124] sono posti indipendentemente dalle variabili spaziali assumendo l'angolo di incidenza pari a quello di riflessione anche nella regione di sovrapposizione dei due mezzi. Ma cosa succede nella regione di intermezzo dove entrambe le considerazioni, in realtà, falliscono? Queste domande sono state risolte grazie allo studio di Wu [138] realizzando un'evoluzione dell'IEM denominata Advanced Integral Equation model (AIEM). La geometria del problema è rappresentata nella Fig. 31. Nell'AIEM il valore del campo elettrico scatterato ( $s$ ) è dato dalla somma di un contributo calcolato tramite il metodo di Kirchhoff ( $k$ ) e un termine complementare ( $c$ ):

$$E_{qp}^s = E_{qp}^k + E_{qp}^c \quad (3.75)$$

dove:

$$E_{qp}^k = CE_0 \int f_{qp} e^{j[k_1(\hat{k}_s - \hat{k}_i) \cdot \vec{r}]} dx dy \quad (3.76)$$

$$E_{qp}^c = E_{qp1,z > z'}^c + E_{qp2,z > z'}^c + E_{qp1,z < z'}^c + E_{qp2,z < z'}^c \quad (3.77)$$

$$E_{qp1,z > z'}^c = \frac{CE_0}{8\pi^2} \int_{z > z'} F_{qp1}^{(+)} \cdot e^{j[u(x-x') + v(y-y') - q_1(z-z') + k_1(\hat{k}_s \cdot \vec{r} - \hat{k}_i \cdot \vec{r}')] } dx dy dx' dy' dudv \quad (3.78)$$

$$E_{qp2,z > z'}^c = \frac{CE_0}{8\pi^2} \int_{z > z'} F_{qp2}^{(+)} \cdot e^{j[u(x-x') + v(y-y') - q_2(z-z') + k_1(\hat{k}_s \cdot \vec{r} - \hat{k}_i \cdot \vec{r}')] } dx dy dx' dy' dudv \quad (3.79)$$

$$E_{qp1,z < z'}^c = \frac{CE_0}{8\pi^2} \int_{z < z'} F_{qp1}^{(-)} \cdot e^{j[u(x-x') + v(y-y') - q_1(z-z') + k_1(\hat{k}_s \cdot \vec{r} - \hat{k}_i \cdot \vec{r}')] } dx dy dx' dy' dudv \quad (3.80)$$

$$E_{qp2,z < z'}^c = \frac{CE_0}{8\pi^2} \int_{z < z'} F_{qp2}^{(-)} \cdot e^{j[u(x-x') + v(y-y') - q_2(z-z') + k_1(\hat{k}_s \cdot \vec{r} - \hat{k}_i \cdot \vec{r}')] } dx dy dx' dy' dudv \quad (3.81)$$

$$C = \frac{-jk_1}{4\pi R} e^{-jk_1 R} \quad (3.82)$$

$$\begin{cases} \hat{k}_s = \hat{x}\sin\theta_s\cos\varphi_s + \hat{y}\sin\theta_s\sin\varphi_s + \hat{z}\cos\theta_s \\ \hat{k}_i = \hat{x}\sin\theta_i\cos\varphi_i + \hat{y}\sin\theta_i\sin\varphi_i - \hat{z}\cos\theta_i \\ \varphi_s = \pi + \varphi_i \end{cases} \quad (3.83)$$

$$q_{1,2} = \sqrt{k_{1,2}^2 - u^2 - v^2} \quad (3.84)$$

con  $u, v$  variabili di integrazione nel dominio di Fourier,  $R$  distanza dalla superficie,  $\vec{r}$  vettore spaziale. Le condizioni  $z > z'$  e  $z < z'$  rappresentano, rispettivamente la propagazione del segnale verso l'alto e verso il basso, identificati anche con gli apici  $+$  e  $-$  all'interno delle funzioni  $F_{qp1,2}^{(+-)}$ , funzioni adimensionali che dipendono dalle condizioni tangenziali dei campi all'interno dei mezzi, così come  $f_{qp}$ . L'indice 1, o 2 indica il primo o il secondo mezzo mentre  $q$  e  $p$  sono le generiche polarizzazioni usate in fase di trasmissione e ricezione. Il valore finale del coefficiente di backscattering può essere ottenuto come:

$$\sigma_{qp}^0 = \sigma_{qp}^0(S) + \sigma_{qp}^0(M) \quad (3.85)$$

dove il primo contributo indica il coefficiente di backscattering dovuto ai singoli contributi diretti mentre il secondo è inerente alle multiple interazioni del segnale.

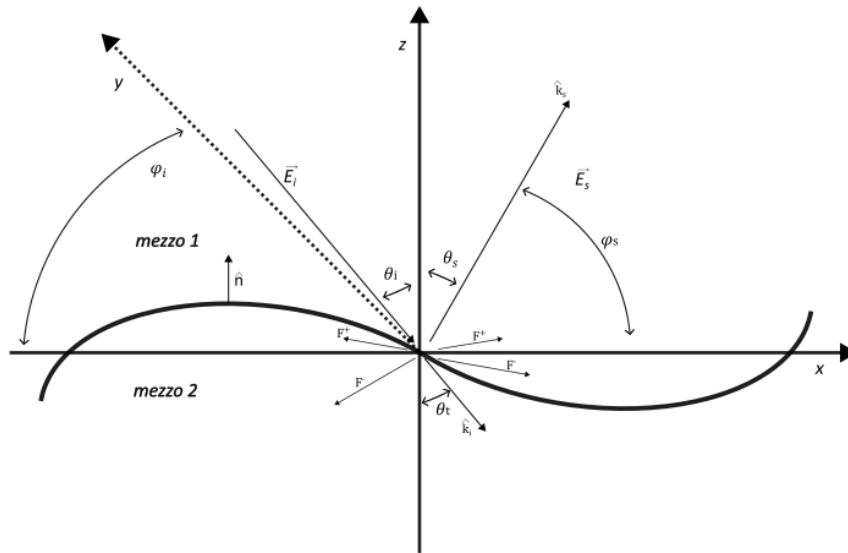


Fig. 31 Geometria nello scattering per una generica superficie rugosa. Con  $F^+$  intendiamo la re-irradiazione verso l'alto, con  $F^-$  verso il basso;  $\hat{n}$  si indica il versore perpendicolare rispetto alla superficie.

I risultati ottenuti con i modelli IEM e AIEM sono molto simili per superfici tendenzialmente lisce mentre le differenze risultano più marcate in presenza di superfici molto rugose dove i contributi di fase non sono più trascurabili <sup>[139]</sup>.

Per capire come i valori di backscattering siano direttamente relazionati alle caratteristiche di rugosità del suolo, Oh <sup>[140]</sup> ha sviluppato un modello di inversione a partire dai dati sperimentali per predire  $s$  o l'umidità del terreno. In questo modello si definisce rapporto di co-polarizzazione:

$$p = \frac{\sigma_{hh}^0}{\sigma_{vv}^0} = \left[ 1 - \left( \frac{2\theta}{\pi} \right)^\alpha e^{-k s} \right]^2 \quad (3.86)$$

dove  $\theta$  è l'angolo di incidenza in radianti,  $k$  numero d'onda e:

$$\alpha = \frac{1}{3\Gamma_0} \quad (3.87)$$

$$\Gamma_0 = \left| \frac{1-\sqrt{\varepsilon}}{1+\sqrt{\varepsilon}} \right|^2 \quad (3.88)$$

$$\sigma_{vv}^0 = 0.7 \left[ 1 - e^{-0.65(ks)^{1.8}} \right] \frac{\cos^3 \theta}{\sqrt{p}} \left[ 1 - e^{-ks} \right] \quad (3.89)$$

con  $\varepsilon$  fortemente dipendente dal contenuto in acqua nel suolo. Parallelamente, si definisce rapporto di cross-polarizzazione:

$$q = \frac{\sigma_{hv}^0}{\sigma_{vv}^0} = 0.23\Gamma_0^2 \left[ 1 - e^{-ks} \right] \quad (3.90)$$

dove nella maggior parte dei problemi elettromagnetici  $\sigma_{hv}^0 \cong \sigma_{vh}^0$ . L'andamento del parametro di cross-polarizzazione è raffigurato nella Fig. 32. Le relazioni (3.86) e (3.90) permettono, così, di determinare il valore di  $\sigma_{xy}^0$  per qualsiasi polarizzazione in fase di trasmissione e ricezione.

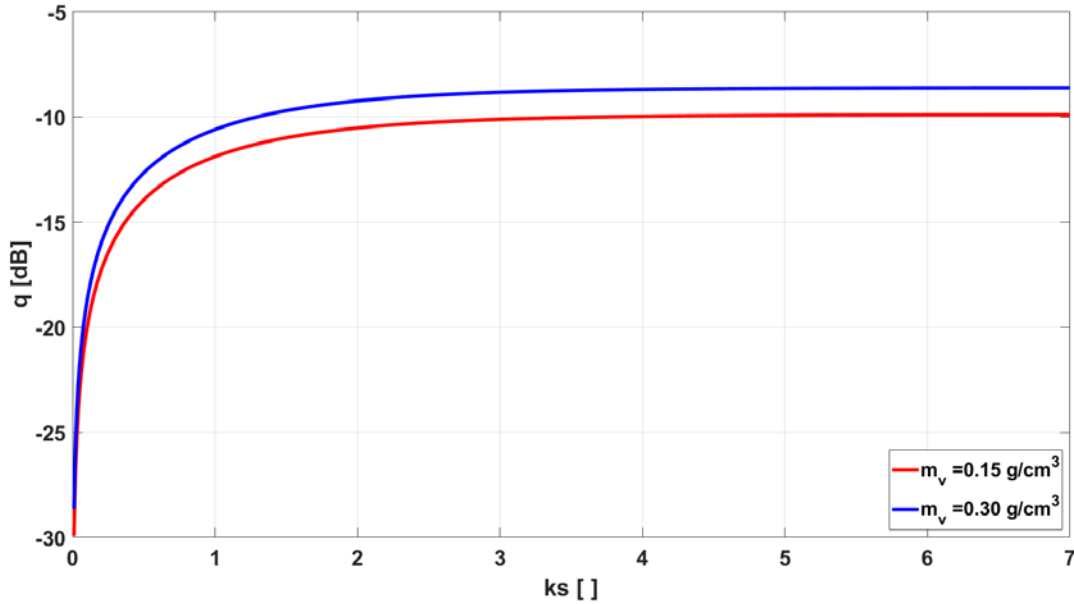


Fig. 32 Andamento del parametro di cross-polarizzazione secondo la relazione in <sup>[139]</sup> per terreno superficialmente secco, in rosso, ed umido, blu.

## Formulazione del WCM utilizzata durante gli esperimenti

A partire dalla formulazione generale del WCM (3.55) sono state create diverse versioni di WCM in base alle variabili utilizzate, dato che  $m_v$  è fortemente relazionato alle diverse condizioni della vegetazione <sup>[141]</sup>. Nell'applicazione che verrà descritta nel successivo capitolo, è stata effettuata un'analisi utilizzando il contenuto in acqua delle singole piante come *PWC* (plant water content single plant) pari a:

$$PWC_{sp} = m_v h = \frac{(m_u - m_s)}{m_u} [\text{Kg}] \quad (3.91)$$

$$PWC = PWC_{sp} \cdot \chi \text{ [Kg/m}^2\text{]} \quad (3.92)$$

$$\sigma_{WCM}^0 = B \cdot PWC \cdot \cos\theta_i \left( 1 - \frac{1}{e^{2APWC \sec\theta_i}} \right) + \frac{\sigma_s^0}{e^{2APWC \sec\theta_i}} \quad (3.93)$$

Per ragioni di comodità, le costanti  $A_1$  e  $B_2$  sono state indicate ora con  $A$  e  $B$ . La variabile  $B$  acquisisce una quantità pari a  $m^{-1}$  come unità di misura rispetto all'equazione (3.53). Questo ci permette di inglobare l'incertezza dell'altezza delle piante inserendola all'interno della variabile  $PWC$ . Inoltre, non sono state calcolate le variabili  $C$  e  $D$ , vedi equazione (3.54), in quanto tali valori sono inglobati all'interno dei modelli elettromagnetici che simulano la risposta del suolo ( $\sigma_s^0$ ) utilizzando sia l'IEM, dato che le superfici in gioco sono risultate tendenzialmente lisce, che il modello di Oh.



## Capitolo 5- Campagne sperimentali e risultati

Durante le estati 2022 e 2023 sono state eseguite due campagne di misura in due campi di sorgo da granella, vedi Fig. 33. e Fig. 34, in cui l'unico apporto idrico era quello piovano (*rainfed agriculture*)<sup>[142]</sup>, entrambi posti in località Campi Bisenzio (FI). I due campi si trovano adiacenti tra di loro (rispettivamente: coordinate campo del 2022 latitudine: 43.829625°, longitudine: 11.151517° e coordinate campo del 2023: latitudine 43.827674°, longitudine 11.149736°) perciò la tipologia di terreno è considerata identica<sup>[143]</sup>. Il passaggio da un campo all'altro è stato reso necessario dal fatto che durante una stagione estiva uno dei due campi è stato tenuto a riposo mentre l'altro è stato seminato a sorgo e viceversa. Le misure sono state eseguite dal 02/07 al 01/09 per l'anno 2022 e dal 02/07 al 02/10 per l'anno 2023. I dati satellitari acquisiti consistono in quelli di S-1 e S-2, rispettivamente del tipo SAR e multispettrali.



Fig. 33. A sinistra: campo di sorgo maturo durante l'estate 2022. A destra: campo di sorgo durante l'estate 2023 in fase di maturazione.



Fig. 34 In alto e color ocra, area dove è stato seminato il sorgo nel 2022, in basso e in verde campo di sorgo del 2023.

## Google Earth Engine

I dati di S-1 e S-2 sono stati ottenuti dalla piattaforma Google Earth Engine (GEE) per poi essere elaborati in una macchina locale con il supporto del software Matlab ®.

GEE <sup>[144]</sup> è una piattaforma di cloud computing per l'elaborazione di immagini satellitari e altri tipi di dati per l'osservazione della Terra. Queste informazioni sono contenute in un catalogo pubblico, con dati opportunamente pre-elaborati, per far sì che tutti gli utenti iscritti alla piattaforma ne possano usufruire. Il catalogo è costantemente aggiornato. Tra questi, sono presenti i dati di S-1 e S-2 che vengono acquisiti da GEE direttamente dal portale dell'ESA Copernicus. GEE ha la capacità di elaborare enormi quantità di dati distribuendo i calcoli sui suoi diversi server, sparsi in tutto il mondo. Gli utenti possono così registrarsi e accedere tramite un ambiente di sviluppo interattivo (IDE) e scrivere programmi utilizzando librerie e funzioni, disponibili in linguaggio Python e Javascript, ottenendo i risultati della propria elaborazione in pochi secondi. La piattaforma consente anche di eseguire panoramiche ed ingrandimenti sulle mappe ottenute durante l'elaborazione delle immagini. Per facilitare questa attività, i calcoli possono essere eseguiti solo per la porzione di immagine necessaria per la richiesta corrente, come un campo agricolo, racchiudendo l'area in appositi rettangoli o poligoni. La piattaforma basata su cloud permette anche di creare grafici, importare ed esportare dati e creare applicazioni personalizzate <sup>[144]</sup>, <sup>[145]</sup>.

In particolare, GEE segue i seguenti passaggi per elaborare il valore di  $\sigma^0$ , per l'elaborazione delle immagini SAR, per ogni singolo pixel dell'immagine (come implementato nel Sentinel-1 Toolbox<sup>[146]</sup>):

### 1. Applicazione del file di orbita

Si aggiornano i metadati dell'orbita di riferimento<sup>[147]</sup>.

## 2. Rimozione del rumore

Viene rimosso il rumore con bassa intensità e i dati ritenuti non validi sul bordo dell'immagine GRD.

## 3. Rimozione del rumore termico

Viene ridotto il rumore nei sub-swaths per aiutare a ridurre le discontinuità tra le diverse scene.

## 4. Applicazione dei valori per la calibrazione radiometrica

Si calcolano le intensità della retrodiffusione utilizzando i parametri di calibrazione del sensore nei metadati GRD.

## 5. Ortorettificazione

Si calcolano i valori di  $\sigma^{\circ}$  utilizzando il Digital Terrain Model (DEM) SRTM a 30 metri<sup>[148]</sup> o l'ASTER DEM<sup>[149]</sup> per alte latitudini (maggiori o minori di 60°)

Inoltre in GEE:

- L'appiattimento radiometrico (Radiometric terrain flattening) dovuto alla presenza di pendii del terreno non viene applicato (nella nostra applicazione i terreni agricoli si presentavano completamente piani).
- Il valore di  $\sigma^{\circ}$  viene convertito in dB.
- Le immagini del tipo SLC non possono essere attualmente importate in GEE in quanto non supporta immagini con valori complessi.
- Non sono presenti le immagini GRD della modalità SM poiché la funzione per la rimozione del rumore sui bordi dell'immagine non supporta la modalità SM.

## Misure in-situ

Le attività hanno richiesto la presenza in-situ di almeno un operatore in corrispondenza di ogni passaggio satellitare considerato per lo studio. Sono state effettuate misure di umidità del terreno (indicata con *SMC* soil moisture content) tramite sonda TDR e riflettanza della vegetazione attraverso il PlantPen PRI210®, strumento volto alla misura dell'indice *PRI*, durante i passaggi di S-1, e S-2. Dal datasheet dello strumento, non sono presenti informazioni relative all'incertezza sulla misura dell'indice<sup>[150]</sup>. Naturalmente, mentre S-1 ha la possibilità di osservare la superficie anche in condizioni meteorologiche avverse ed in assenza di illuminazione, S-2 non può, per ovvie ragioni, misurare durante la presenza di nuvole sopra l'area di interesse.

Dato che il satellite sorvola l'area in una frazione di secondo, per avere le misure più accurate possibili, quest'ultime sono iniziate a partire da 20 minuti prima del passaggio satellitare fino a 20 minuti dopo. I valori di *PRI* sono stati acquisiti effettuando 3 misure per foglia ripetute su 4 foglie diverse su un campione di 10 piante di sorgo scelte fra quelle ritenute rappresentative dello stato attuale del campo. Le 4 foglie utilizzate erano le prime 2 foglie superiori e le 2 subito sottostanti, vedi Fig. 35. In questo modo è stato possibile associare i valori di *PRI* alle 2 foglie superiori rispetto ai dati multispettrali di S-2 che hanno una penetrazione molto limitata. I dati di S-1, invece, avendo una penetrazione maggiore, risentono anche delle condizioni e caratteristiche del terreno sottostante. Il valore di *SMC* è stato ottenuto misurando per 3 volte uno stesso campione in 10 aree distinte del campo.

Data l'ampiezza della superficie dei due campi (6.5 ha per il campo di sorgo dell'estate 2022 e circa 5 ha per quello del 2023) si è scelto di associare un singolo valore di *PRI* e *SMC* rispetto ad ogni passaggio satellitare. Per limitare l'influenza di eventuali outliers nelle misure a terra e telerilevate, i valori di  $\sigma^0$ , della riflettanza nelle bande di S-2 e di *PRI* sono stati pre-processati utilizzando come stimatore la mediana mentre il valore di *SMC* è stato ottenuto utilizzando la media, data la forte omogeneità spaziale delle misure rispetto alle diverse zone del campo. Conseguentemente, per ogni passaggio satellitare è stato associato un valore di  $\sigma^0$  e di riflettanza rispetto alle misure in-situ.

Inoltre, sono state inoltre misurate:

- i) la rugosità dei terreni, utilizzando un profilometro ad aghi di proprietà IFAC in condizione di suolo nudo, misurando la lunghezza di correlazione ( $L_c$ ) e la deviazione standard nelle altezze della rugosità ( $HSTD$ ,  $s$ ) attraverso un apposito codice Matlab®.
- ii) l'altezza delle piante ( $h$ )
- iii) il contenuto in acqua di quest'ultime (plant water content, *PWC*, in  $Kg/m^2$ )

In particolare il *PWC* è stato ottenuto misurando in campo il peso fresco ( $m_u$ ) di un campione costituito da tre piante successivamente seccate in un apposito forno ( $m_s$ ), mantenendo il campione a 80°C per 24 ore<sup>[151]</sup>,<sup>[152]</sup>, in modo da eliminare l'acqua presente all'interno delle piante. Il valore di *PWC* è stato calcolato seguendo l'equazione (3.92). Il numero delle piante a  $m^2$  era di circa 33 per il 2022 e 40 per il 2023. Il contenuto in acqua è stato misurato per l'anno 2023 una sola volta rispetto ad ogni coppia di passaggi consecutivi del tipo descending-ascending, vedi Tabella 6, perché in sole 36 ore la variazione di *PWC* è trascurabile<sup>[153]</sup> e comparabile con le incertezze intrinseche degli strumenti (meno di 5 grammi). Invece durante l'anno 2022, a differenza della campagna estiva del 2023, non sono stati acquisiti i valori di *PWC* ogni settimana ma solo in due occasioni: il 27/07 durante la fase di maturazione del sorgo e il 1/09 durante la fase di senescenza per calibrare il WCM per la singola stagione estiva<sup>[154]</sup>.



Fig. 35 Pianta di sorgo presente nel campo di riferimento per l'anno 2022. Le foglie su cui è stato misurato il PRI sono le prime due superiori e le due che si trovano subito sotto.

Tabella 6 Date dei passaggi di S-1 Descending e Ascending. Legenda: \* immagine satellitare non disponibile su GEE e sul portale Copernicus, \*\* date in cui il PlantPen PRI210® era indisponibile.

<b>Date passaggi Descending (5:00 GMT)</b>	<b>Date passaggi Ascending (17:00 GMT)</b>
02/07/2022	03/07/2022
07/07/2022	08/07/2022
14/07/2022	15/07/2022
19/07/2022	20/07/2022
26/07/2022	27/07/2022
31/07/2022	01/08/2022
07/08/2022*	08/08/2022
12/08/2022	13/08/2022
19/08/2022*	20/08/2022
24/08/2022*	25/08/2022
31/08/2022	01/09/2022
02/07/2023	03/07/2023
09/07/2023	10/07/2023
14/07/2023	15/07/2023
21/07/2023	22/07/2023
26/07/2023	27/07/2023
02/08/2023	03/08/2023
07/08/2023**	08/08/2023**
14/08/2023**	15/08/2023**
19/08/2023**	20/08/2023**
26/08/2023	27/08/2023
31/08/2023	01/09/2023
07/09/2023	08/09/2023
12/09/2023	13/09/2023
19/09/2023**	20/09/2023
24/09/2023	25/09/2023
01/10/2023	02/10/2023

## Scelta della *acf* per la stima del backscattering del suolo

Il termine  $\sigma_s^0$  è stato calcolato utilizzando l'IEM per la componente co-polare (VV) mentre il contributo in cross-polare (VH) è stato ottenuto grazie all'integrazione dell'IEM. con il modello di Oh. Grazie a questi modelli è stato possibile ottenere il valore di  $\sigma_s^0$  del solo terreno nudo partendo dalla conoscenza di alcune informazioni di quest'ultimo come il valore di *SMC*, di rugosità (con parametri *Lc*, *s* e funzione  $\rho(\xi)$  di permittività dielettrica ( $\epsilon_{suolo}$ )).

Il valore di  $\epsilon_{suolo}$  è stato ottenuto seguendo il modello di Dobson, vedi equazioni (2.5)-(2.12), partendo dalle informazioni di *SMC* e dalla frequenza del segnale elettromagnetico di S-1 pari a 5.4 GHz. Per l'applicazione in uso i parametri di fit utilizzati sono stati:

$$\begin{aligned}\rho_b &= 1.18 \\ \alpha &= 0.65 \\ \beta &= 0.99\end{aligned}$$

Mentre le temperature del terreno sono state ottenute tramite TDR350<sup>[155]</sup>, che fornisce, tra le varie informazioni, anche quella sulla temperatura del terreno. Lo strumento presenta una accuratezza dello 0.1% e una incertezza del 3%.

Il valore di autocorrelazione all'interno dei parametri di rugosità è generalmente una funzione isotropa e per rappresentare il comportamento elettromagnetico dei suoli in genere vengono utilizzati o il modello esponenziale oppure quello gaussiano<sup>[156]</sup>. La caratterizzazione della rugosità superficiale richiede la parametrizzazione di *s* e *Lc*. Per le superfici agricole i valori *s* variano tra 0.25 cm ( per campi seminati) e 4 cm ( per campi arati) mentre la lunghezza di correlazione *Lc*, che va a descrivere la distanza orizzontale su cui il profilo della superficie è autocorrelato per un valore maggiore di  $1/e$  ( $\cong 0,368$ ), per i terreni agricoli varia tra 2 e 20 cm<sup>[157]</sup>.

Rispetto all'*acf* gaussiano, quello esponenziale è caratterizzato da correlazioni minori per piccole distanze. Ciò fa sì che gli *acf* del tipo esponenziali descrivano meglio la microrugosità nel profilo rispetto a quelli gaussiani e per i suoli agricoli l'*acf* esponenziale approssima bene le caratteristiche del target da studiare. Tuttavia, poiché questi modelli teorici non riescono sempre a simulare la rugosità delle superfici naturali, Li et al. <sup>[158]</sup> hanno sviluppato un insieme di leggi che copre entrambi i tipi di *acf*. Dato il forte impatto di questi parametri sul valore di  $\sigma^0$  <sup>[157]</sup> per capire quale modello di *acf* utilizzare nella nostra applicazione è stata simulata la risposta elettromagnetica del terreno utilizzando il caso esponenziale, gaussiano e misto di Li mettendoli in relazione rispetto ai valori di  $\sigma^0$  che le varie orbite di S-1 hanno misurato sull'area quando il terreno era completamente nudo prima della crescita delle piante.

Dalla Tabella 7 si può notare come i valori in polarizzazione VH siano compresi intorno ai -18 e -20 dB mentre in VV siano compresi tra -9 e -12 dB. La variabilità delle misure in queste date è causata sia da un diverso angolo di incidenza ma anche da una variabilità nel valore di *SMC* nel tempo, parametro che non è stato misurato fino a quando non sono emerse le piante. Dalle Fig. 36- Fig. 41 si può notare come la VH sia stimata con maggior precisione utilizzando una *acf* del tipo esponenziale mentre la VV risulta simulata meglio utilizzando una *acf* del tipo misto, all'interno di un range di valori di *SMC* compresi tra 10-20%.

Tabella 7 Valori mediани di  $\sigma^0$  sul campo di sorgo tra la data di semina del campo e l'emersione delle colture dal terreno. L'angolo di incidenza a parità di orbita varia da un anno al successivo in quanto i campi sono distinti seppur vicini, con un diverso numero di pixel tra il campo del 2022 e quello del 2023.

Data	$\sigma^0_{VH}$ [dB]	$\sigma^0_{VV}$ [dB]	Orbita	$\Theta$ [deg]
20/05/2022	-20.316	-9.977	D168	33.20
21/05/2022	-20.032	-12.214	A15	43.82
27/05/2022	-20.562	-10.71	D95	43.18
28/05/2022	-19.308	-10.778	A117	34.20
01/06/2022	-20.311	-10.349	D168	33.20
16/06/2023	-18.594	-9.467	A117	34.61
20/06/2023	-19.156	-9.908	D168	33.08
21/06/2023	-19.531	-11.281	A15	44.10
27/06/2023	-19.972	-10.904	D95	42.99
28/06/2023	-19.155	-10.783	A117	34.61

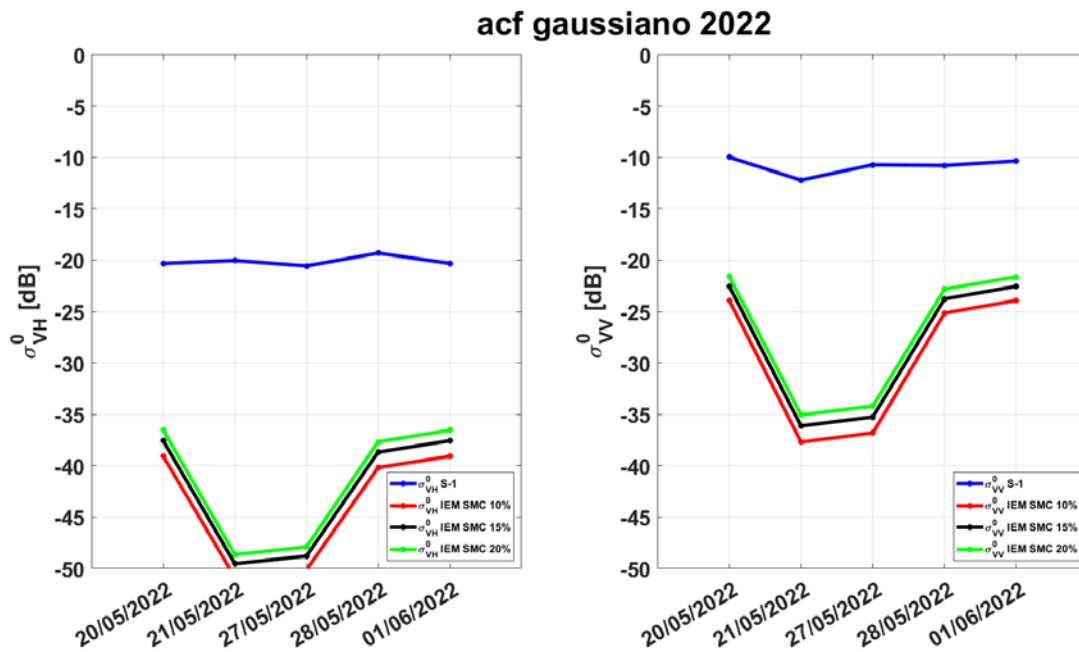


Fig. 36 Backscattering misurato da S-1 per terreno nudo rispetto ai valori di  $\sigma^0$  stimati dal modello IEM per l'anno 2022, utilizzando una funzione di autocorrelazione del tipo gaussiana per polarizzazione VH (a sinistra, RMSE=-20.09 dB per SMC 10%, RMSE=-20.11 dB per SMC 15%, RMSE=-20.12 dB per SMC 20%) e VV (a destra, RMSE=-10.82 dB per SMC 10%, RMSE=-10.87 dB per SMC 15%, RMSE=-10.91 dB per SMC 20%).

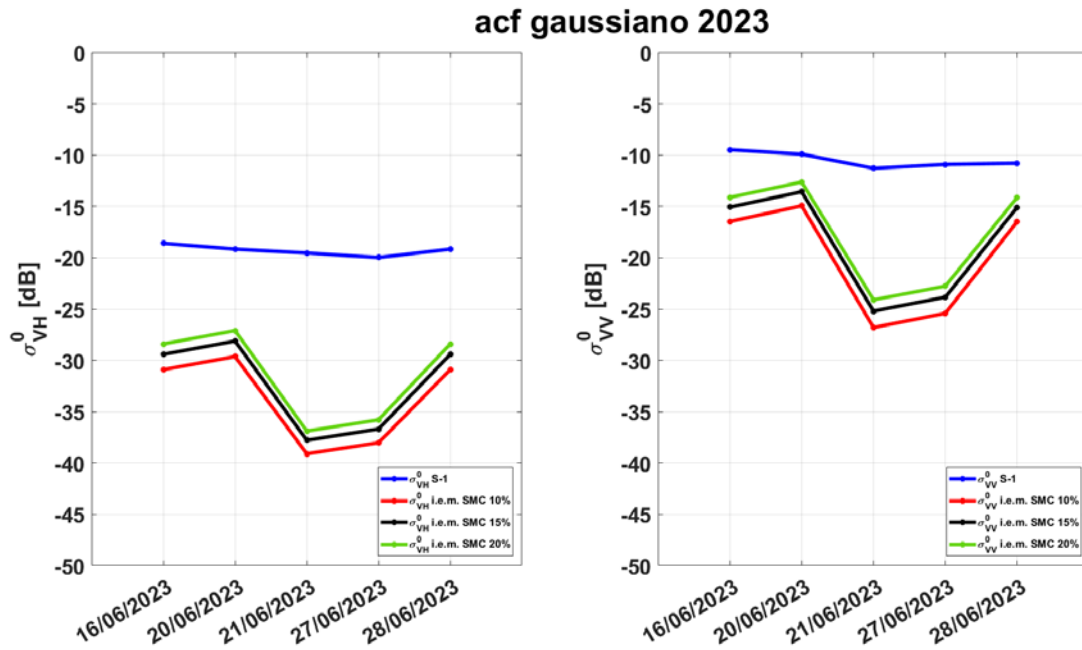


Fig. 37 Backscattering misurato da S-1 per terreno nudo rispetto ai valori di  $\sigma^0$  stimati dal modello IEM per l'anno 2023, utilizzando una funzione di autocorrelazione del tipo gaussiana per polarizzazione VH (a sinistra, RMSE=-19.47 dB per SMC 10%, RMSE=-19.56 dB per SMC 15%, RMSE=-19.93 dB per SMC 20%) e VV (a destra, RMSE=-11.24 dB per SMC 10%, RMSE=-11.60 dB per SMC 15%, RMSE=-11.94 dB per SMC 20%).

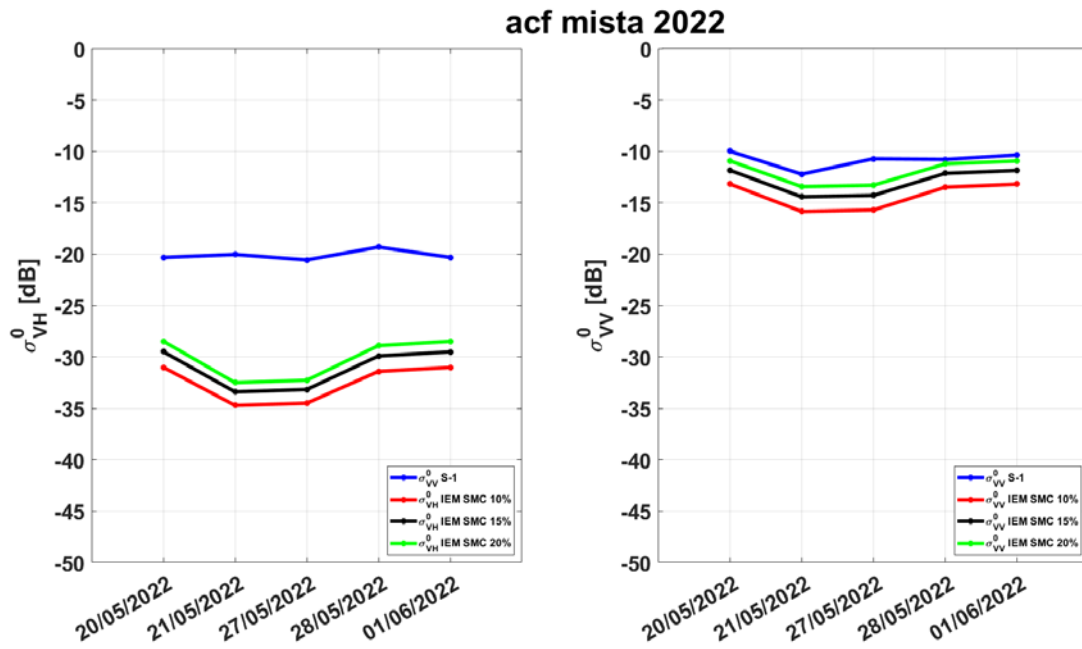


Fig. 38 Backscattering misurato da S-1 per terreno nudo rispetto ai valori di  $\sigma^0$  stimati dal modello IEM per l'anno 2022, utilizzando una funzione di autocorrelazione del tipo mista per polarizzazione VH (a sinistra, RMSE=-20.33 dB per SMC 10%, RMSE=-20.45 dB per SMC 15%, RMSE=-20.55 dB per SMC 20%) e VV (a destra, RMSE=-13.34 dB per SMC 10%, RMSE=-14.88 dB per SMC 15%, RMSE=-16.74 dB per SMC 20%).

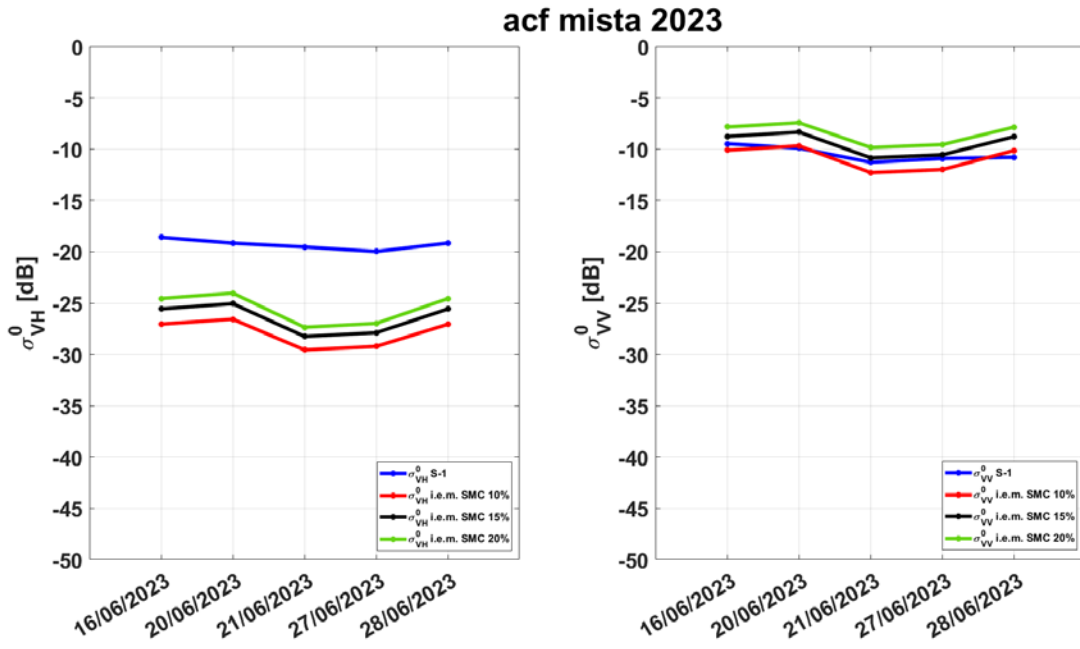


Fig. 39 Backscattering misurato da S-1 per terreno nudo rispetto ai valori di  $\sigma^0$  stimati dal modello IEM per l'anno 2023, utilizzando una funzione di autocorrelazione del tipo mista per polarizzazione VH (a sinistra, RMSE=-19.90 dB per SMC 10%, RMSE=-20.20 dB per SMC 15%, RMSE=-20.49 dB per SMC 20%) e VV (a destra, RMSE=-18.44 dB per SMC 10%, RMSE=-15.04 dB per SMC 15%, RMSE=-12.31 dB per SMC 20%).

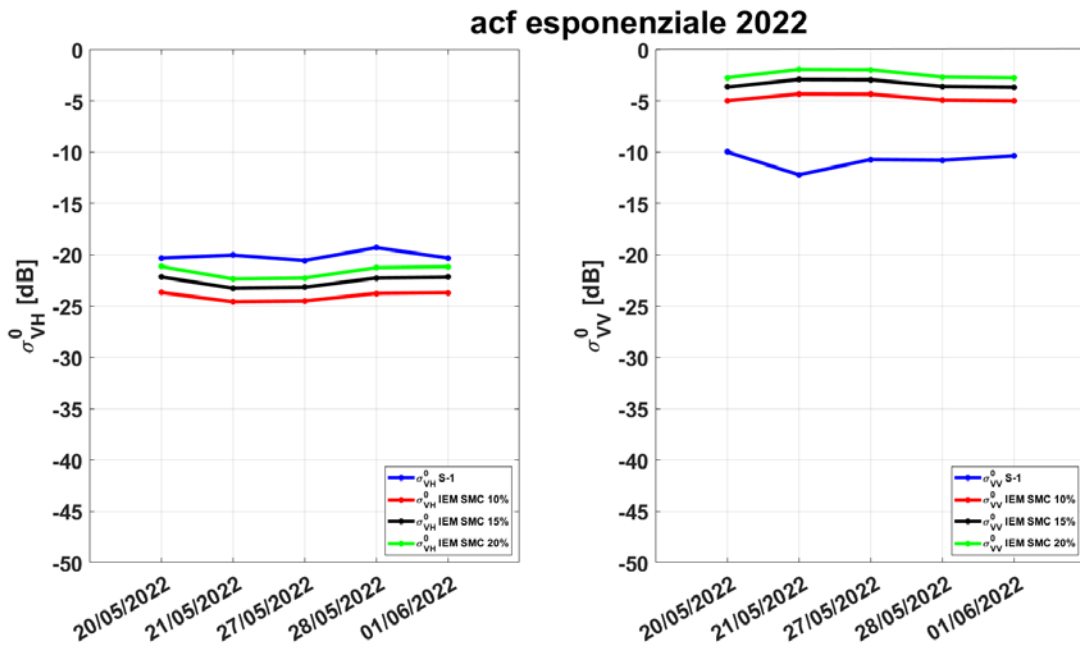


Fig. 40 Backscattering misurato da S-1 per terreno nudo rispetto ai valori di  $\sigma^0$  stimati dal modello IEM per l'anno 2022, utilizzando una funzione di autocorrelazione del tipo esponenziale per polarizzazione VH (a sinistra, RMSE=-22.27 dB per SMC 10%, RMSE=-23.55 dB per SMC 15%, RMSE=-25.07 dB per SMC 20%) e VV (a destra, RMSE=-5.91 dB per SMC 10%, RMSE=-4.18 dB per SMC 15%, RMSE=-3.05 dB per SMC 20%).

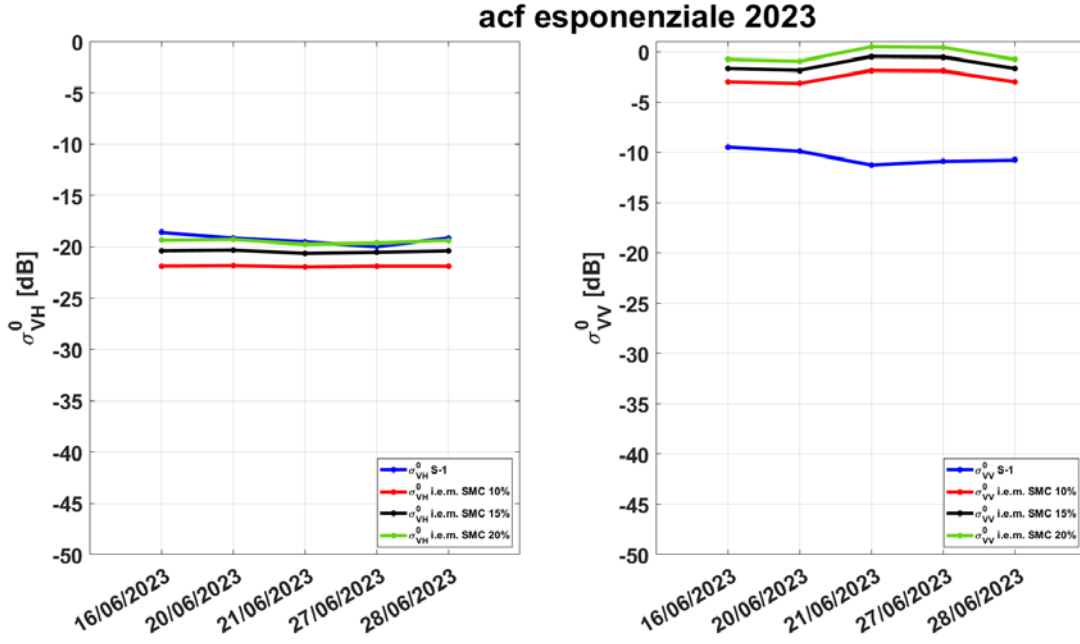


Fig. 41 Backscattering misurato da S-1 per terreno nudo rispetto ai valori di  $\sigma^0$  stimati dal modello IEM per l'anno 2023, utilizzando una funzione di autocorrelazione del tipo esponenziale per polarizzazione VH (a sinistra, RMSE=-22.57 dB per SMC 10%, RMSE=-25.12 dB per SMC 15%, RMSE=-29.37 dB per SMC 20%) e VV (a destra, RMSE=-3.28 dB per SMC 10%, RMSE=-1.70 dB per SMC 15%, RMSE=-0.64 dB per SMC 20%).

## Determinazione dei coefficienti A e B nel WCM

L'equazione (3.93) per la determinazione del  $\sigma_{WCM}^0$  si presenta in una forma indeterminata in quanto nonostante siano noti i valori del PWC misurato in campo, dell'angolo di incidenza  $\theta_i$  e di  $\sigma_s^0$  risultano incogniti i termini A e B. Per stimare tali parametri si è determinato per ogni singola coppia di valori A e B (A, B) la minor differenza tra il valore di  $\sigma^0$  misurato da S-1 ( $\sigma_{S-1}^0$ ) e quello stimato dal WCM,  $\sigma_{WCM}^0$ . L'idea è rappresentata geometricamente nella Fig. 42. Dato che A e B devono essere stimati all'interno di un insieme ammissibile di valori. Dato che tali parametri indicano i caratteristici comportamenti di assorbimento e/o scattering presenti all'interno del materiale, come valori numerici possono essere unicamente positivi. Tali variabili sono state, così rappresentate attraverso gli array  $A = [A_1, A_2 \dots A_M]$ ;  $B = [B_1, B_2 \dots B_N]$ . Conseguentemente, per ogni associazione tra gli elementi dei due insiemi,  $(A_1, B_1), (A_1, B_2) \dots (A_1, B_N); (A_2, B_1) (A_2, B_2) \dots (A_2, B_N); \dots (A_M, B_N)$ , è stata calcolata la differenza, in modulo, tra i valori di backscattering  $\sigma_{S-1}^0$  e  $\sigma_{WCM}^0$ , in lineare, per ogni  $(A_i, B_j)$ ,  $i = \{1, 2 \dots M\}$ ,  $j = \{1, 2 \dots N\}$ .

$$\Delta\sigma_{lin}^0(A_i, B_j) = \left| \sigma_{S-1_{lin}}^0(A_i, B_j) - \sigma_{WCM_{lin}}^0(A_i, B_j) \right| \quad (4.1)$$

In questo modo si è ottenuta una matrice di differenze di backscattering con tante colonne quanti sono gli elementi di B (N) e tante righe quante sono gli elementi di A (M). La cella a cui corrisponde il valore più piccolo indica, così, la coppia (A, B) per cui si ha la minor distanza tra  $\sigma_{S-1}^0$  e  $\sigma_{WCM}^0$ .

I risultati sono mostrati nella Tabella 8.

	<b>A1</b>	<b>A2</b>	...	...	...	...	...	<b>AM-1</b>	<b>AM</b>
<b>B1</b>									
<b>B2</b>									
...									
...									
<b>BN-1</b>									
<b>BN</b>									

Fig. 42 Idea per determinare il valore i migliori A e B, viene scelto il valore di  $\Delta\sigma_{lin}^0$  più piccolo (cella blu) e si prendono i corrispettivi valori di A e B, nella figura BN-1 e AM-1.

Tabella 8 Valori dei coefficienti A e B ottenuti attraverso la formula (4.1)

Coefficients WCM	acf utilizzata					
	gaussiana		mista		esponenziale	
	VH	VV	VH	VV	VH	VV
<b>A</b>	3.542	0.445	1.069	0.001	0.001	18.235
<b>B</b>	0.006	0.033	0.006	0.582	0.244	0.033

Noti i parametri A e B per le diverse ipotesi di IEM (gaussiano, misto ed esponenziale) è possibile portare la variabile PWC come l'unica incognita nell'equazione (3.93), uguagliando  $\sigma_{S-1}^0$  e  $\sigma_{WCM}^0$ . Dato che l'equazione risulta matematicamente non invertibile, l'unico modo per determinare i valori del PWC è quello di determinare per ciascuna data i valori del PWC che determinano la minima differenza tra valore di  $\sigma_{S-1}^0$  e  $\sigma_{WCM}^0$ . Dato che gli unici modelli che rappresentano significativamente i dati sperimentali sono l'acf esponenziale per la VH e quella mista per la VV, vedi rispettivamente Fig. 41 e Fig. 39, successivamente saranno mostrati solo tali risultati per le due polarizzazioni.

Associando i valori di PWC stimati dal modello ai valori misurati localmente si osserva, vedi Fig. 43, come la VH riesca a stimare il contenuto in acqua della vegetazione in quanto il segnale in questa polarizzazione risulta molto meno influenzato dal contributo del terreno (ovvero a prescindere da quale sia la acf utilizzata) e presenta una miglior linearità rispetto alla stima in polarizzazione VV. Si nota tuttavia un certo errore nella stima del PWC soprattutto per bassi valori di PWC che può essere spiegato sia con una insensibilità di  $\sigma_{S-1}^0$  nella VH quando le colture sono molto piccole, a causa di una bassa intensità del segnale elettromagnetico (vedi ad esempio i valori in polarizzazione VH nella Tabella 7) sia con una difficoltà nello stimare perfettamente il contributo di  $\sigma_S^0$  portando ad una non completa distinzione tra il contributo del contenuto in acqua nella vegetazione rispetto a quello del terreno. Infatti, alcuni punti con elevato backscattering corrispondono a terreni molto bagnati (Fig. 44). In polarizzazione VV, otteniamo una forte variabilità dovuta sia alla difficoltà nello scorporare il contributo di SMC da quello della vegetazione sia, soprattutto, nella maggior sensibilità della polarizzazione VV allo stato idrico del terreno. Conseguentemente, quando

parleremo di *PWC* stimato dai dati di S-1 faremo riferimento a quelli recuperati dalla polarizzazione VH.

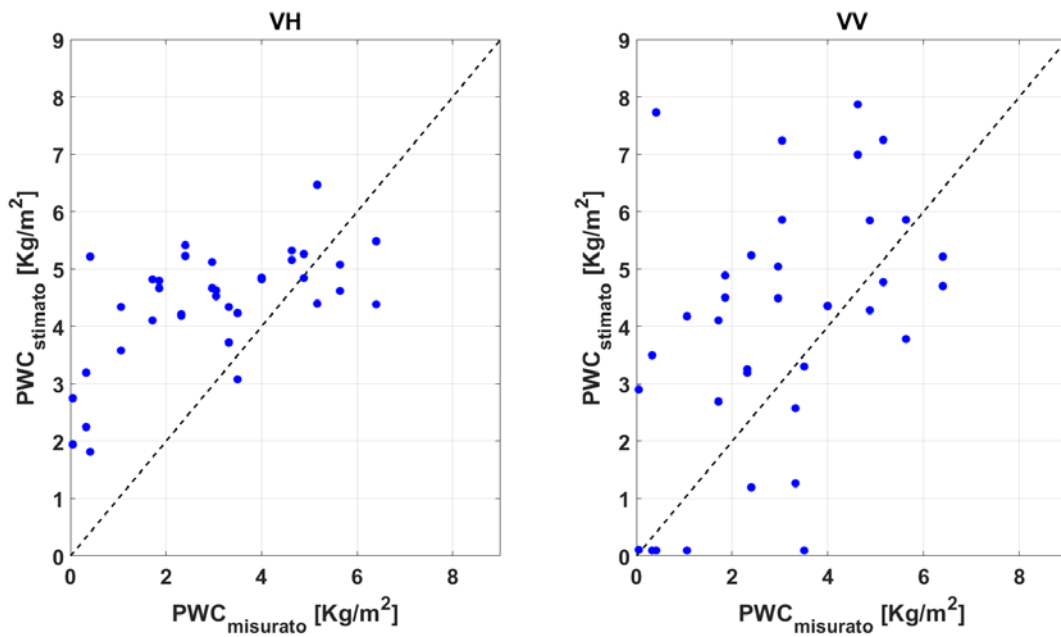


Fig. 43 *PWC* ottenuto a partire dal WCM rispetto alle misure in-situ assumendo una acf esponenziale per polarizzazione VH ( $A=0.001$ ,  $B=0.250$ ;  $R^2=0.38$   $RMSE=2.02$   $Kg/m^2$ ) e VV per acf mista ( $A=0.001$ ,  $B=0.639$   $R^2=0.22$   $RMSE= 2.33$   $Kg/m^2$ ).

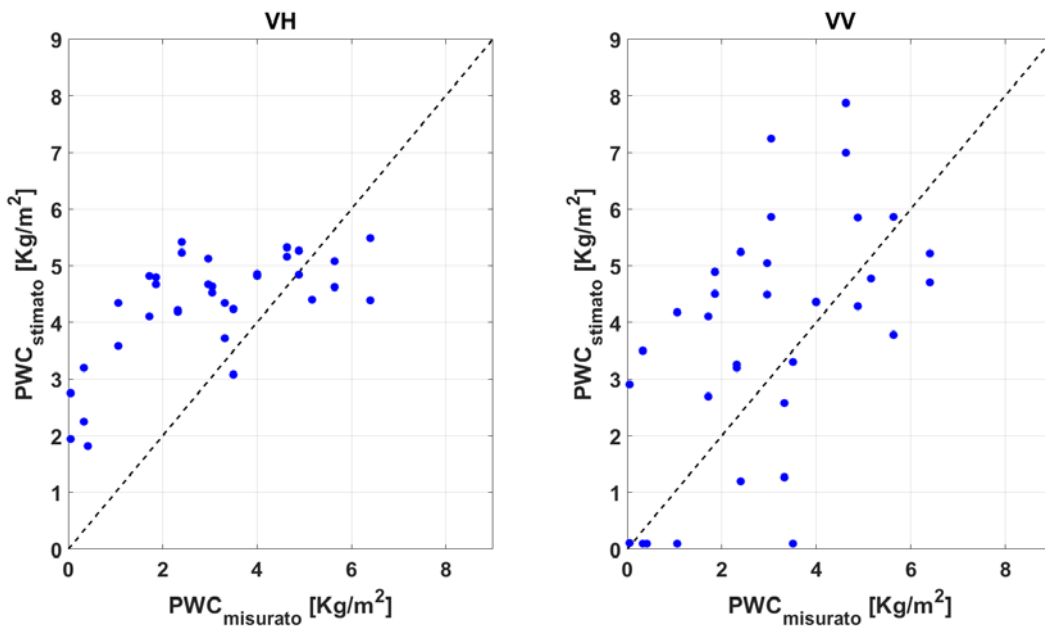


Fig. 44 *PWC* ottenuto a partire dal WCM solo per terreni in condizioni non melmose rispetto alle misure in-situ assumendo una acf esponenziale per polarizzazione VH ( $A=0.001$ ,  $B=0.250$ ;  $R^2=0.43$   $RMSE=1.89$   $Kg/m^2$ ) e VV per acf mista ( $A=0.001$ ,  $B=0.639$   $R^2=0.31$   $RMSE=2.01$   $Kg/m^2$ ).

## Impatto della SMC sul PRI

Inoltre, è stato analizzato l'impatto della SMC, misurata in campo durante i passaggi di S-1, rispetto all'attività del ciclo delle xantofille. L'osservazione ha rivelato che il PRI ha presentato valori di picco inferiori nella stagione estiva del 2022 (che è stata più secca della 2023, come evidenziato nei dati sulle precipitazioni scaricati in <sup>[159]</sup> e illustrati nella Fig. 45, indicando anche una ridotta attività fotosintetica in risposta ad una SMC inferiore. Questo comportamento è illustrato nella Fig. 46 , dove i boxplot del PRI e SMC sono stati confrontati per il 2022 e il 2023. La più forte senescenza del 2023 è dovuta principalmente a un raccolto molto tardivo rispetto alla data di semina (prendendo come giorno 1 la data di semina, la coltura nel 2023 è stata mietuta circa 10 giorni dopo rispetto al raccolto del 2022).

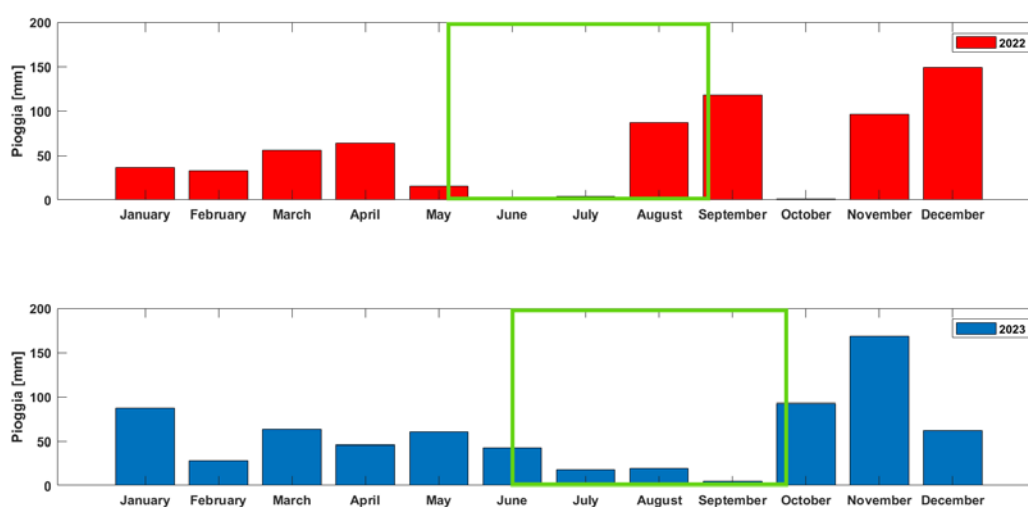


Fig. 47 Pioggia cumulata per il 2022 e 2023. Come raffigurato, l'estate 2022 è stata una stagione molto secca e le precipitazioni sono arrivate pochi giorni prima della raccolta negli ultimi giorni di agosto. Inoltre, a marzo 2022 tutta la pioggia si è concentrata in soli 2 temporali. Invece, nel 2023 si è accumulata più pioggia nel terreno durante i mesi precedenti all'estate e si è verificato un settembre secco ma la coltura era già in fase di senescenza. Il riquadro verde mostra il ciclo di vita del sorgo per ogni anno.

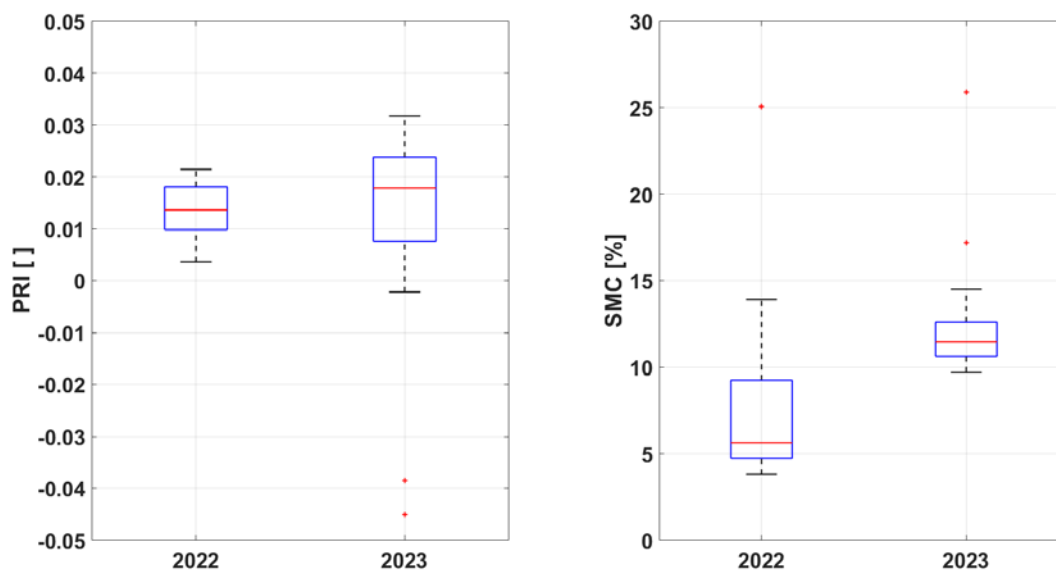


Fig. 48 Andamento di PRI (sinistra) e SMC (destra) nel 2022 e nel 2023. Le intensità di PRI sono solitamente inferiori quando il terreno è in condizioni secche.

## Determinazione degli indici multispettrali dalle bande di S-2

In concomitanza di ogni passaggio di S-1 e S-2 sono state effettuate anche delle misure di *PRI* fogliare per analizzare l'attività fotosintetica delle colture. Lo scopo di queste misure è quello di studiare la relazione tra i valori di *PRI* misurati in campo rispetto ad una serie di indici multispettrali derivabili dalle bande disponibili di S-2, sensibili a diverse condizioni vegetative e idriche delle piante.

Durante la campagna estiva del 2023, sono state eseguite le misure di *PRI* a partire dal momento in cui le colture hanno iniziato ad eseguire una sufficiente attività fotosintetica ben rilevabile attraverso il PlantPen PRI210®, dopo la fase di germinazione. In particolare, le misure sono iniziate dalla data del 12/07 e sono terminate il 30/09. Invece, durante la campagna estiva del 2022 le misure sono partite prima, dal 02/07, in quanto le piante erano già sufficientemente emerse, e terminate il 31/08.

Durante la fase di crescita, è stata misurata la riflettanza nelle diverse bande di S-2, vedi Tabella 4.. A causa delle ridotte dimensioni delle colture, inizialmente il contributo del terreno risultava significativo e di conseguenza, per limitare il contributo del terreno, si è scelto di escludere i punti in cui le piante erano ancora piccole ovvero con una copertura inferiore al 70%<sup>[160], [161], [162]</sup> rispetto all'altezza a regime ( $H_{norm}$ ). Questo è rappresentato nella Fig. 49 dove insieme all'altezza normalizzata delle piante è rappresentato anche il valore del "mean canopy cover" (*MCC*) definito come "la proporzione della vegetazione coperta dalla proiezione verticale delle chiome"<sup>[163]</sup>, misurato per la campagna del 2023 tramite l'applicazione Canopeo<sup>®</sup><sup>[164]</sup>. Il grafico evidenzia infatti che nella fase di crescita i due parametri, *MCC* e  $H_{norm}$  sono ben correlati.

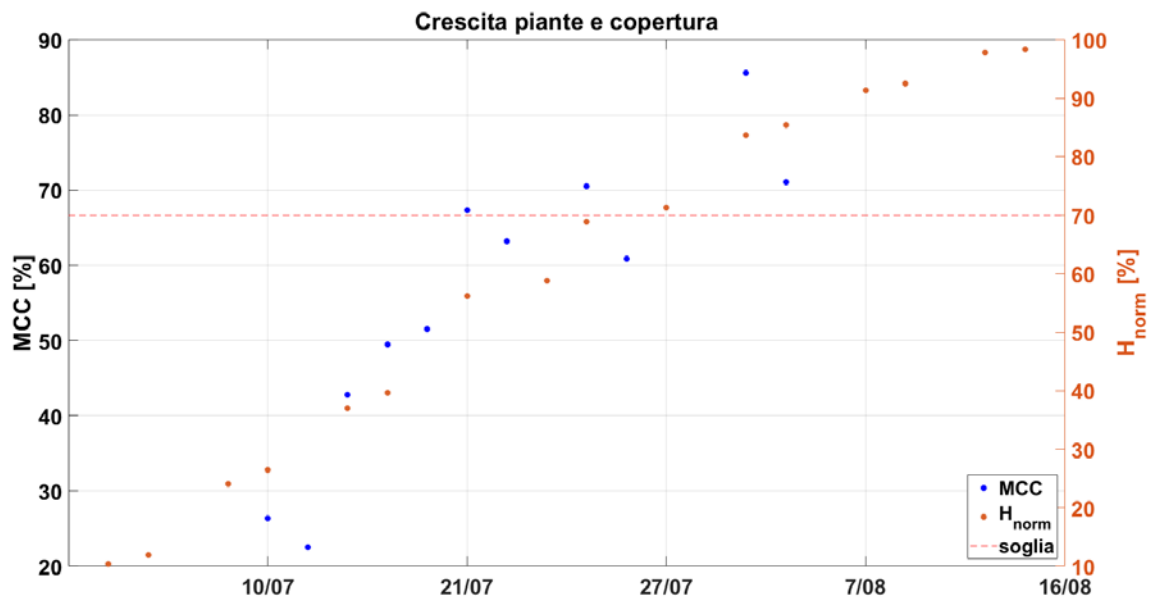


Fig. 49 Valore del MCC in corrispondenza dell'altezza massima normalizzata ( $H_{norm}$ ). All'aumentare dell'altezza delle piante aumenta la copertura della vegetazione sulla scena di osservazione.

Di seguito nella Tabella 9 gli indici utilizzati per questo studio:

Tabella 9 Indici utilizzati

Indice	Formula	Acronimi	Referenza
<i>EVI</i>	$\frac{2.5 * (B_8 - B_4)}{B_8 + 6B_4 - 7.5B_2 + 1}$	Enhanced vegetation index	[165]
<i>NDVI</i>	$\frac{B_8 - B_4}{B_8 + B_4}$	Normalized difference vegetation index	[166]
<i>SAVI</i>	$\frac{(1 + L) * (B_8 - B_4)}{B_8 + B_4 + L}$	Soil Adjusted Vegetation Index	[167]
<i>MSAVI2</i>	$\frac{2B_8 + 1 - \sqrt{(2B_8 + 1)^2 - 8(B_8 - B_4)}}{2}$	Modified Soil Adjusted Vegetation Index	[168]
<i>MSI</i>	$\frac{B_{11}}{B_8}$	Moisture stress index	[169]
<i>NDMI</i>	$\frac{B_8 - B_{11}}{B_8 + B_{11}}$	Normalized Difference Moisture Index	[170]
<i>NDRE</i>	$\frac{B_8 - B_5}{B_8 + B_5}$	Normalized Difference Red Edge Index	[170]
<i>NDWI</i>	$\frac{B_8 - B_3}{B_8 + B_3}$	Normalized Difference Water Index	[171]
<i>NDWI<sub>agriculture</sub></i>	$\frac{B_{8A} - B_{11}}{B_{8A} + B_{11}}$	Normalized Difference Water Index Agriculture	[172]
<i>RGR</i>	$\frac{B_4}{B_3}$	Red to Green	[173][172]
<i>PSRI</i>	$\frac{(B_4 - B_3)}{B_8}$	Plant Senescence Reflectance Index	[174]
<i>SIPI</i>	$\frac{(B_8 - B_2)}{(B_8 + B_4)}$	Structure Insensitive Pigment Index	[175]

Nel dettaglio:

- *EVI* è un indice di vegetazione "ottimizzato", progettato per migliorare il segnale della vegetazione con una sensibilità migliorata nelle regioni ad alta biomassa
- *NDVI* è sensibile al livello di verde e di salute delle colture
- *SAVI* viene usato al posto dell'indice *NDVI* quando la copertura della vegetazione è bassa.
- *MSAVI2* minimizza l'effetto del terreno nudo rispetto al *SAVI*. Nell'applicazione è stato utilizzato l'indice *MSAVI2* invece del *MSAVI* perché non è possibile calcolare il parametro correttivo "L" nella formula originale del *MSAVI* [168] per questo studio.
- *MSI* misura l'aumento del contenuto in acqua delle foglie.
- *NDMI* rileva i livelli di umidità nella vegetazione utilizzando una combinazione di bande spettrali del vicino infrarosso (NIR) e dell'infrarosso a onde corte (SWIR). È un indicatore affidabile dello stress idrico nelle colture.
- *NDRE* permette di valutare il livello di clorofilla e dei carotenoidi nelle piante
- *NDWI* matematicamente è come l'indice *NDVI* ma con la banda del verde invece del rosso. Valori alti e positivi indicano la presenza d'acqua e viene quindi utilizzato per identificare le zone di inondazione

- $NDWI_{agriculture}$  si sostituisce nella formula del  $NDWI$  la banda del verde con lo SWIR, è più sensibile al contenuto in acqua delle piante rispetto al  $NDWI$ .
- $RGR$  risulta utile per svolgere stime sullo sviluppo del fogliame, sullo stress delle foglie o anche per indicare la fioritura in alcune chiome. Il rapporto misura l'espressione relativa del rossore fogliare causato dagli antociani rispetto a quello della clorofilla.
- $PSRI$  è sensibile alla diminuzione di clorofilla e all'aumento di carotenoidi. Un suo aumento può significare uno stress della vegetazione, senescenza o anche la maturazione dei frutti.
- $SIPi$  risulta sensibile alla diminuzione della clorofilla nella copertura vegetale, dovuta a stress o siccità

Come mostrato nella Tabella 4, le diverse bande presentano distinte risoluzioni spaziali. Conseguentemente, alcuni indici sono stati calcolati utilizzando diverse bande con risoluzioni spaziali di 10 e/o 20 metri. Dato che gli indici calcolati a 20 e 10 metri presentavano pochissime differenze e poiché S-1 ha anch'esso una risoluzione di 10 metri si è scelto di utilizzare valori con risoluzione spaziale riportata a 10 metri. Pertanto, per calcolare gli indici con una risoluzione spaziale di 10 metri è stato eseguito un sovra-campionamento per la banda con maggiore risoluzione spaziale. Inoltre, è stato scelto come stimatore il valore mediano, come per S-1.

## Relazioni con il $PRI$

Ottenuti i valori di  $PWC$  da  $\sigma_{S-1}^0$  è stata analizzata la relazione rispetto al valore di  $PRI$  misurato in campo. I grafici nelle Fig. 50 e Fig. 51 sono stati ottenuti nel caso di  $H_{norm} > 70\%$  per non associare bassi valori di  $PWC$  ad alti valori di  $PRI$  (dovuti ad una vegetazione che deve ancora crescere e quindi con basso  $PWC$  ma con già una cospicua attività di fotosintesi). L'analisi è stata svolta sia utilizzando come valore di  $PRI$  quello ottenuto dalla mediana di tutte e 4 le foglie misurate per ciascuna data, sia utilizzando le prime 2 foglie. Il miglior risultato utilizzando tutte e 4 le foglie rispetto alle 2 sole superficiali dimostra come i dati di S-1 siano sensibili alle condizioni di salute su tutta la pianta o comunque non solo rispetto a quelle che si trovano nello strato più in alto. I valori di  $PRI$  tendono ad aumentare rapidamente con l'aumento di  $PWC$  per poi andare verso una saturazione.

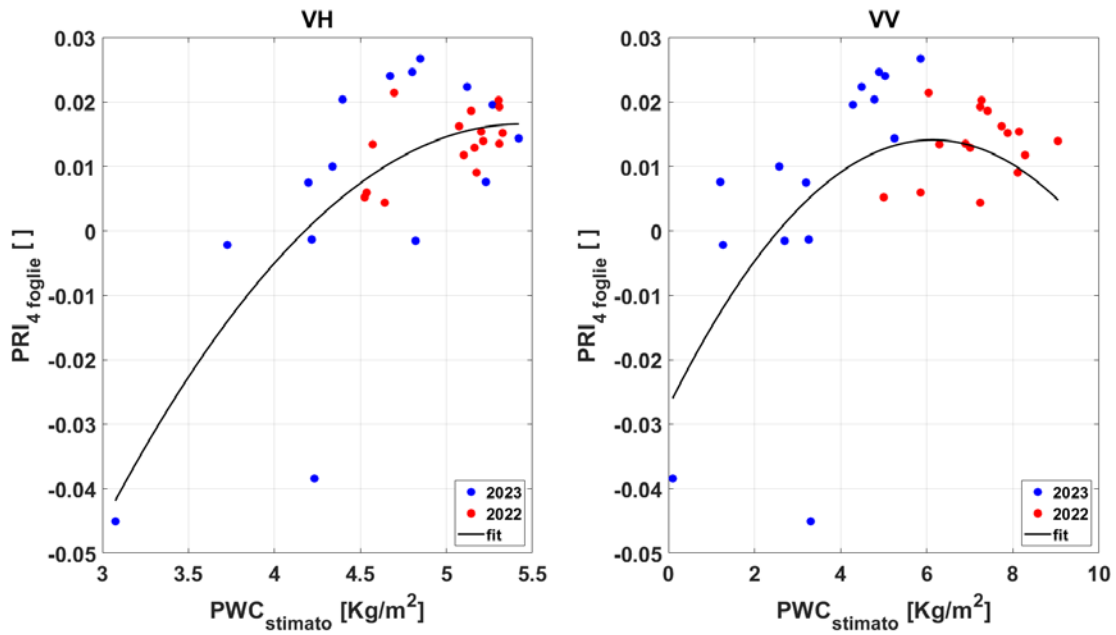


Fig. 50 Scatterplot tra PRI mediano utilizzando tutte e 4 le foglie e PWC ottenuto da S-1 per polarizzazione VH ( $PRI = -0.0105PWC^2 + 0.1141PWC - 0.2934$ ;  $R^2 = 0.56$ ) e VV ( $PRI = -0.0011PWC^2 + 0.0135PWC - 0.0273$   $R^2 = 0.40$ )

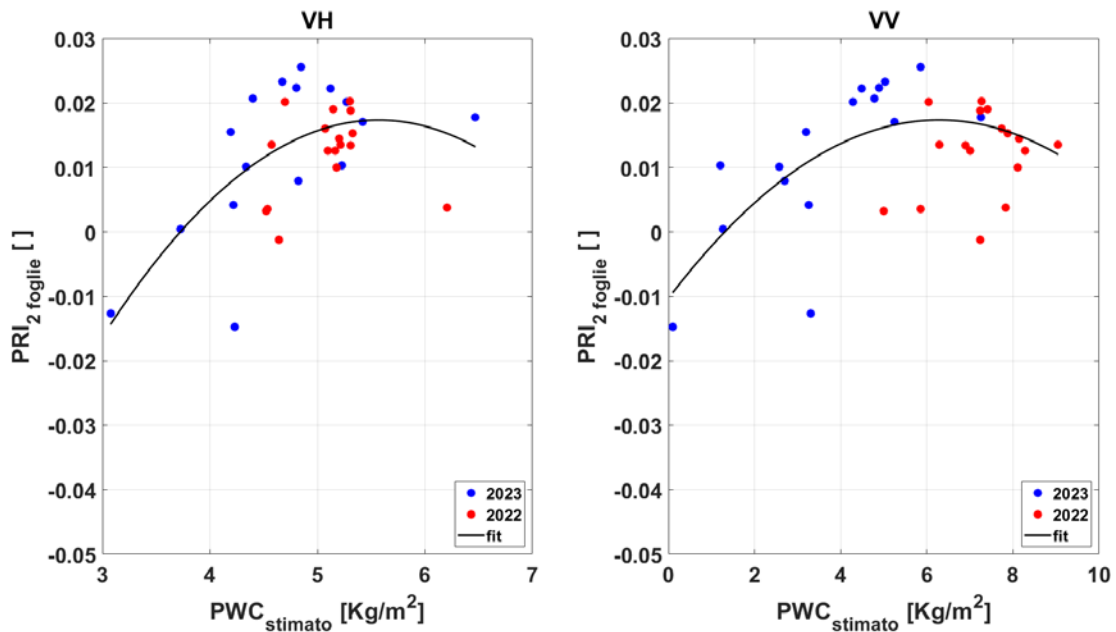


Fig. 51 Scatterplot tra PRI mediano utilizzando solo le prime due 2 della pianta e PWC ottenuto da S-1 per polarizzazione VH ( $PRI = -0.0051PWC^2 + 0.0568PWC - 0.1408$   $R^2 = 0.4$ ) VV ( $PRI = -0.0007PWC^2 + 0.0088PWC - 0.0103$ ;  $R^2 = 0.35$ )

Eliminando i punti in cui il suolo si presentava superficialmente in condizioni di ristagno d'acqua, a causa di piogge nelle precedenti ore, otteniamo le rappresentazioni nelle Fig. 52 e Fig. 53. Da tali grafici è possibile notare come la presenza di date con alto contributo in acqua del terreno introduce una ulteriore incertezza nella determinazione del PWC quando tra date diverse si trovano condizioni del suolo molto distinte tra di loro.

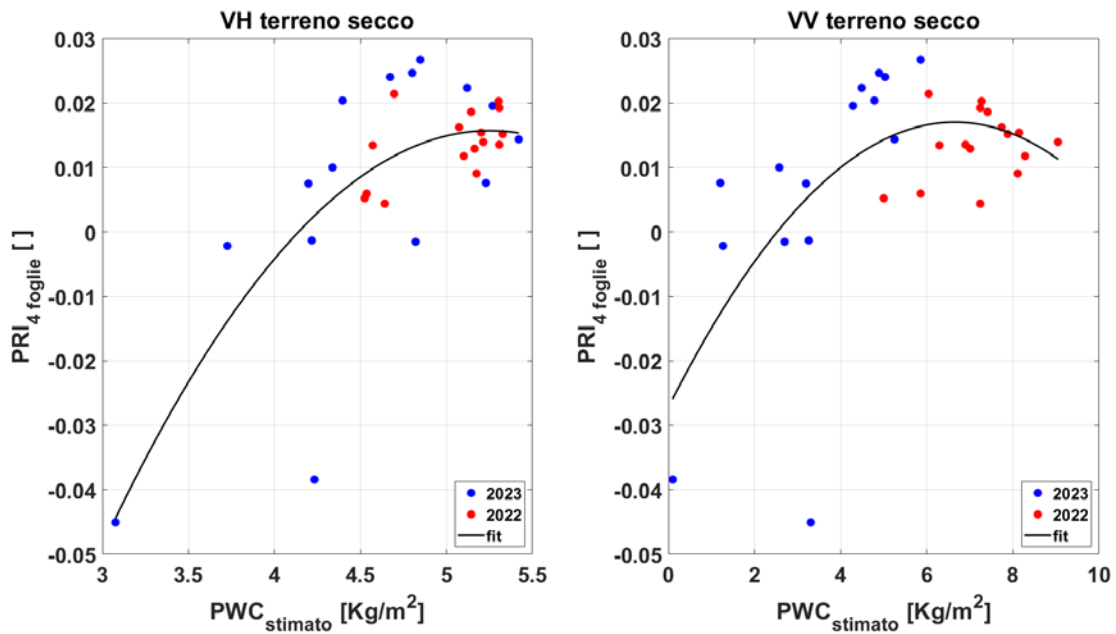


Fig. 52 Scatterplot tra PRI mediano utilizzando tutte e 4 le foglie e PWC ottenuto da S-1 per polarizzazione VH ( $PRI = -0.0127PWC^2 + 0.1334PWC - 0.3346$ ;  $R^2 = 0.58$ ) e VV ( $PRI = -0.001PWC^2 + 0.0133PWC - 0.0272$   $R^2 = 0.41$ ) per condizioni simili del terreno tra una data e l'altra, sempre con bassi valori di umidità (massimo 12%)

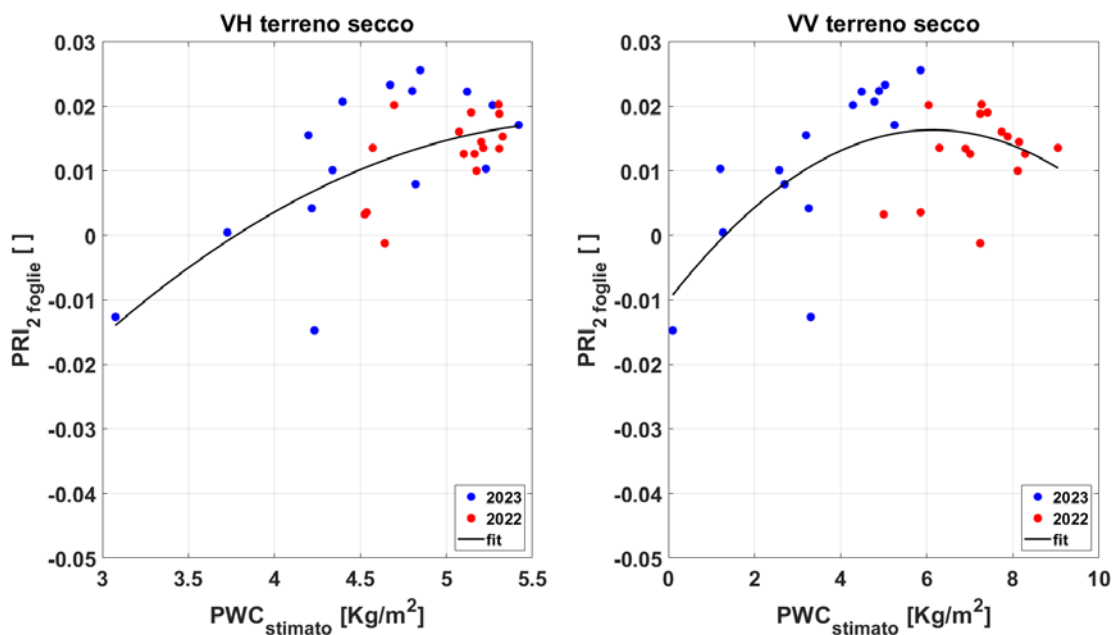


Fig. 53 Scatterplot tra PRI mediano utilizzando tutte e 2 le foglie e PWC ottenuto da S-1 per polarizzazione VH ( $PRI = -0.0041PWC^2 + 0.048PWC - 0.1228$ ;  $R^2 = 0.4306$ ) e VV ( $PRI = -0.0007PWC^2 + 0.0086PWC - 0.0101$   $R^2 = 0.3632$ ) per condizioni simili del terreno tra una data e l'altra, sempre con bassi valori di umidità (massimo 12%)

In particolare, risulta interessante vedere come inserendo la variabile temporale per i punti del grafico sulla sinistra della Fig.52, per la polarizzazione VH, quest'ultimi si muovono lungo la curva di fitting seguendo il cambio di stato nella pianta, come indicato nella Fig. 54.

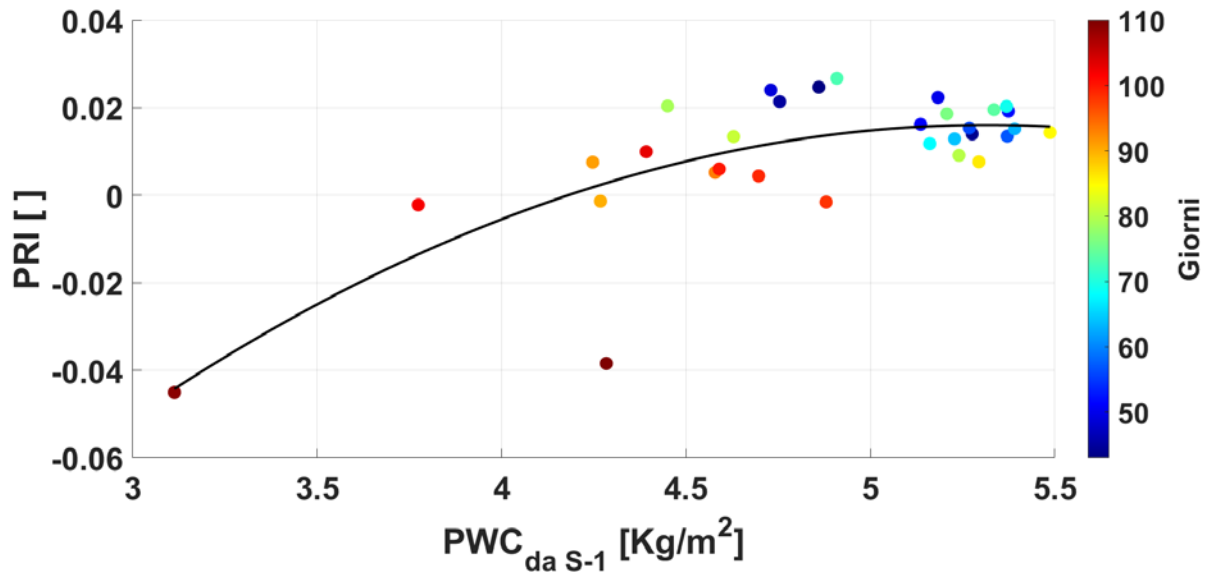


Fig. 54 Immagine relativa alla Fig. 52 sinistra con l'informazione temporale. Nella barra colorata, i giorni a partire dalla data di semina.

Parallelemente, sono stati confrontati i dati dalle bande di S-2 con le misure locali di *PRI*. I risultati per le due stagioni 2022 e 2023 sono rappresentati nelle Fig. 55, utilizzando come valori di *PRI* quelli relativi alle prime 2 foglie nella pianta, e Fig. 56 utilizzando tutte e 4 le foglie. Data la penetrazione scarsa delle bande ottiche all'interno della vegetazione, i risultati della Fig. 55 tendono ad essere migliori rispetto a quelli della Fig. 56. Le funzioni di fitting che sono state utilizzate sono quelle che interpolano meglio i dati relativi alle prime 2 foglie.

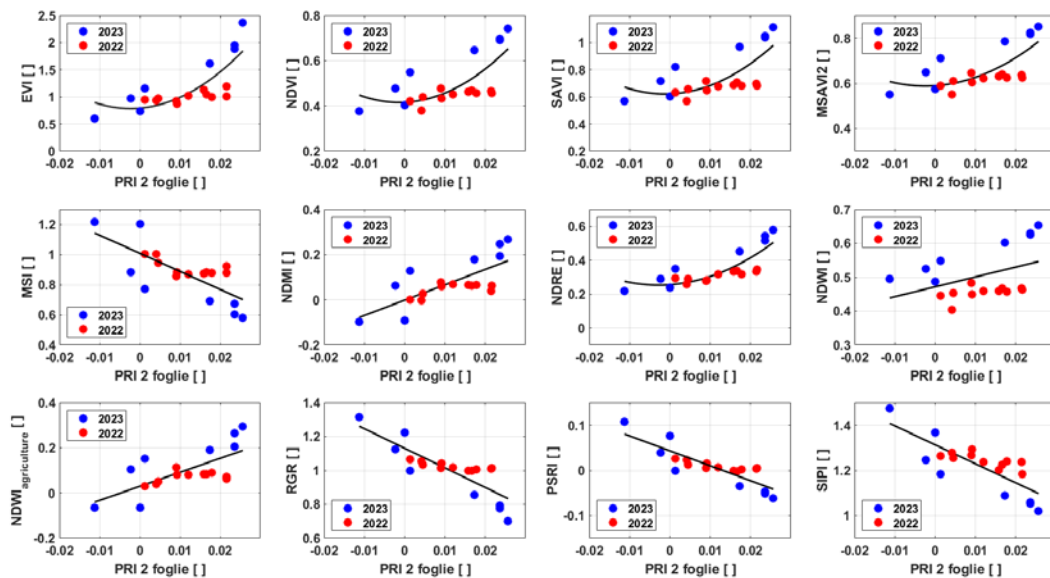


Fig. 55 Valori degli indici ottenuti dalle bande di S-2 rispetto al PRI fogliare misurato in campo per le prime due foglie della pianta. Dati relativi alle stagioni 2022, in rosso, e 2023, in blu, per  $H_{norm} > 70\%$ . Relazioni:  $EVI (R^2=0.63; EVI= 1361.5PRI^2 + 6.192PRI + 0.7941)$ ,  $NDVI (R^2=0.52; NDVI=328.03PRI^2 + 0.843PRI + 0.4159)$ ,  $SAVI (R^2=0.52; SAVI=497.34PRI^2 + 1.1994PRI + 0.6229)$ ,  $MSAVI2 (R^2=0.52; MSAVI2=249.61PRI^2 + 1.2106PRI + 0.5898)$ ,  $MSI (R^2=0.56; MSI= -11.994PRI + 1.0091)$ ,  $NDMI (R^2=0.54; NDMI= 6.8018PRI - 0.0014)$ ,  $NDRE (R^2=0.69; NDRE=309.78PRI^2 + 1.7379PRI + 0.2564)$ ,  $NDWI (R^2=0.18; NDWI= 2.9114PRI + 0.4718)$ ,  $NDWI_{agricoltura} (R^2=0.49; NDWI_{agricoltura} = 6.2053PRI + 0.0296)$ ,  $RGR (R^2=0.70; RGR= -11.571PRI + 1.1308)$ ,  $PSRI (R^2=0.73; PSRI= -3.3099PRI + 0.0434)$ ,  $SIPI (R^2=0.64; SIPI=-8.4102PRI + 1.3135)$

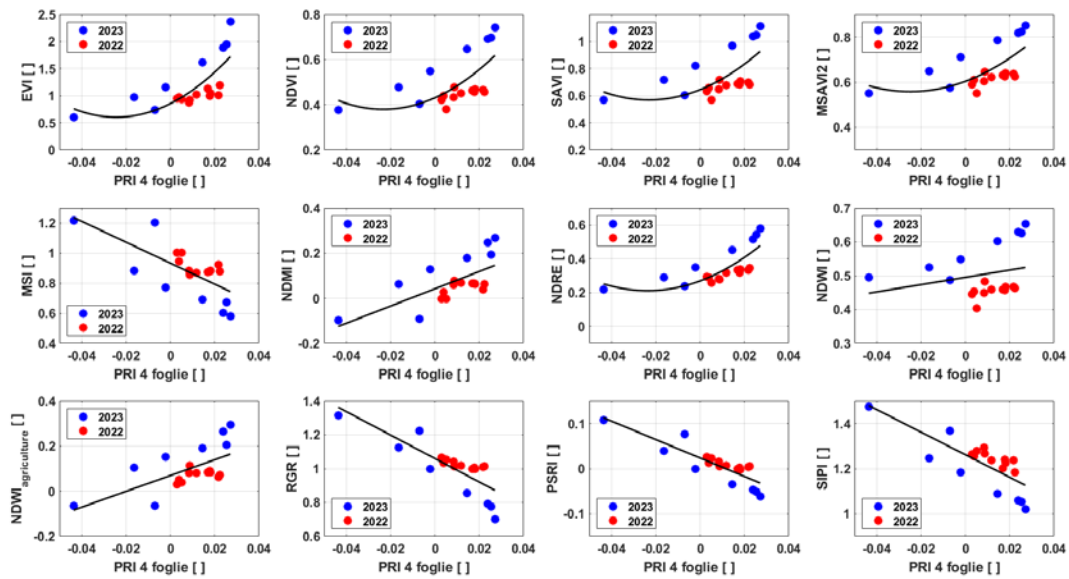


Fig. 56 Valori degli indici ottenuti dalle bande di S-2 rispetto al PRI fogliare misurato in campo per tutte e 4 le foglie misurate. Dati relativi alle stagioni 2022, in rosso, e 2023, in blu, per  $H_{norm} > 70\%$ . Relazioni:  $EVI (R^2=0.54; EVI=423.41PRI^2 + 20.635PRI + 0.854)$ ,  $NDVI (R^2=0.41; NDVI= 94.252PRI^2 + 4.382PRI + 0.4307)$ ,  $SAVI (R^2=0.41 ;SAVI=142.61PRI^2 + 6.5948PRI + 0.645)$ ,  $MSAVI2 (R^2=0.41; MSAVI2=73.774PRI^2 + 3.6645PRI + 0.6039)$ ,  $MSI (R^2=0.50; MSI= -6.9769PRI + 0.9338)$ ,  $NDMI (R^2=0.46; NDMI=3.8341PRI + 0.0423)$ ,  $NDRE (R^2=0.60; NDRE=103.14PRI^2 + 4.8915PRI + 0.2697)$ ,  $NDWI (R^2=0.06; NDWI=1.0754PRI + 0.4953)$ ,  $NDWI_{agricoltura} (R^2=0.41; NDWI_{agricoltura} =3.5082x + 0.0694)$ ,  $RGR (R^2=0.67; RGR= -6.9413PRI + 1.06)$ ,  $PSRI (R^2=0.75 ; PSRI= -2.0475PRI + 0.0236)$ ,  $SIPI (R^2=0.61;SIPI= -5.0091PRI + 1.2618)$

Un'ulteriore analisi è stata effettuata mettendo in relazione i valori di *PWC* ottenuti dai dati di S-1 con i dati multispettrali di S-2. Per far questo vanno integrate le informazioni dei due diversi tipi di sensori raccolte sopra l'area di interesse in momenti distinti anche se temporalmente vicini. Alcune volte, infatti, S-1 e S-2 hanno acquisito durante la stessa giornata, seppure ad orari diversi, ma nella maggior parte delle volte è presente una differenza temporale di qualche giorno. Nonostante ciò, grazie all'alta risoluzione temporale di S-2 (5 giorni) la massima differenza tra i due passaggi risulta al massimo di 3 giorni. Nella Tabella 10 sono raffigurate le associazioni temporali tra i passaggi di S-1 e S-2 considerate per entrambe le stagioni 2023 e 2022 dove sono state prese in esame solo date con terreno secco, per non introdurre ulteriori incertezze dovute al contributo dell'acqua del terreno rispetto a quello della vegetazione. Risultano assenti alcune misure di *PRI* svolte nel periodo del 7-20 Agosto 2023 a causa di un danneggiamento momentaneo dello strumento, della polvere entrata all'interno del PlantPen PRI210® che falsava le misure a causa di una diffrazione non corretta della luce all'interno della lente interna (unica misura di *PRI* valida il 16/08 durante il passaggio di S-2).

Tabella 10 Associazioni temporali tra passaggi di S-1 e S-2 per l'anno 2023 e 2022.

Data passaggio S-1	Data passaggio S-2
07/07/2022	07/07/2022
14/07/2022	12/07/2022
19/07/2022	17/07/2022
20/07/2022	22/07/2022

27/07/2022	27/07/2022
01/08/2022	01/08/2022
08/08/2022	06/08/2022
13/08/2022	16/08/2022
25/08/2022	26/08/2022
31/08/2022	31/08/2022
27/07/2023	27/07/2023
15/08/2023	16/08/2023
26/08/2023	26/08/2023
07/09/2023	05/09/2023
12/09/2023	10/09/2023
13/09/2023	15/09/2023
25/09/2023	25/09/2023
01/10/2023	30/09/2023

Sono stati quindi associati gli indici ottenuti da S-2 con i valori di *PWC* corrispondenti alle date in Tabella 10. Dalla Fig. 57 si nota come la correlazione sia però meno forte rispetto alle funzioni *PRI*(*PWC*) ed “Indici-S2”(PRI). Questo fenomeno è dovuto alla sensibilità sulla prima superficie della vegetazione degli indici di S-2 rispetto ai dati di S-1 che invece osservano la totalità della pianta. Tra questi, si nota come gli indici *PSRI* e *SIPI* siano tra quelli con i migliori risultati, in quanto sensibili al cambiamento di stato idrico della coltura.

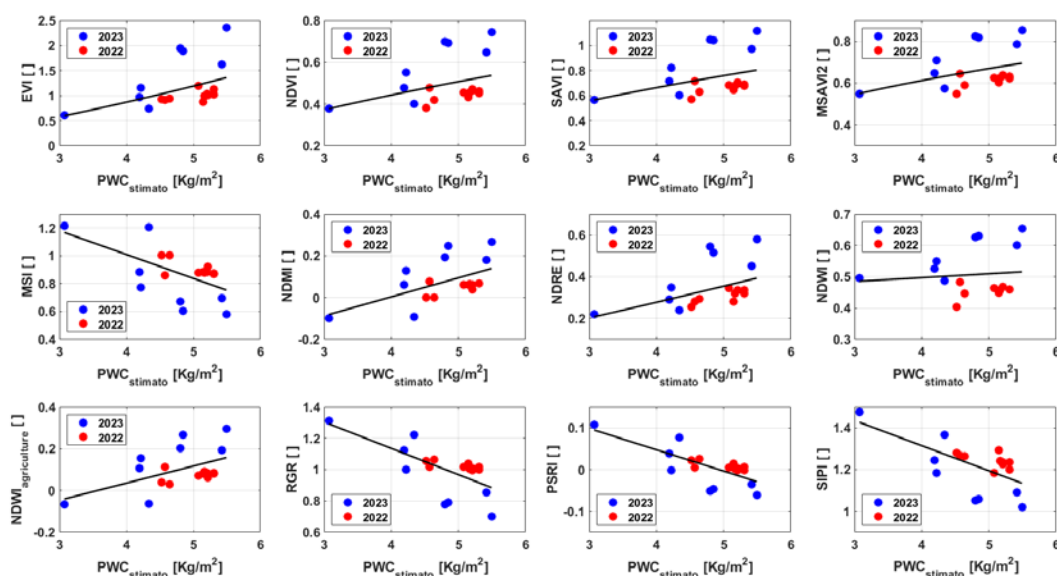


Fig. 57 Indici ottenuti dalle bande di S-2 rispetto al contenuto in acqua delle piante ottenuto dai dati di S-1. In rosso i dati del 2022 e in blu quelli del 2023 per  $H_{norm} > 70\%$ . Relazioni: *EVI* ( $R^2=0.32$ ;  $EVI = 0.1235PWC^{1.4088}$ ), *NDVI* ( $R^2=0.16$ ;  $NDVI = 0.191PWC^{0.6068}$ ), *SAVI* ( $R^2=0.16$ ;  $SAVI = 0.2868PWC^{0.6057}$ ), *MSAVI2* ( $R^2=0.17$ ;  $MSAVI2 = 0.3505PWC^{0.4025}$ ), *MSI* ( $R^2=0.35$ ;  $MSI = -0.1713PWC + 1.6947$ ), *NDMI* ( $R^2=0.30$ ;  $NDMI = 0.0911PWC - 0.3608$ ), *NDRE* ( $R^2=0.31$ ;  $NDRE = 0.0607PWC^{1.097}$ ), *NDWI* ( $R^2=0.01$ ;  $NDWI = 0.0124PWC + 0.4475$ ), *NDWI\_agriculture* ( $R^2=0.26$ ;  $NDWI_{agriculture} = 0.0819PWC - 0.2923$ ), *RGR* ( $R^2=0.46$ ;  $RGR = -0.1683PWC + 1.8094$ ), *PSRI* ( $R^2=0.54$ ;  $PSRI = -0.0511PWC + 0.252$ ), *SIPI* ( $R^2=0.41$ ;  $SIPI = -0.1206PWC + 1.7974$ )

L'indice *PRI* riflette l'attività diurna nel ciclo delle xantofille ed è influenzato anche dalla quantità dei carotenoidi che cambiano stagionalmente. Sia i cambiamenti dei pigmenti che delle xantofille contribuiscono alla fotoprotezione delle piante ma, operando in momenti diversi, il loro contributo rispetto al segnale *PRI* è ancora oggetto di analisi. Nonostante questo, è comprovato che misurare il

*PRI* in momenti diversi della giornata, per le diverse stagioni, comporta dei cambiamenti nel suo valore <sup>[175], [176]</sup>.

Conseguentemente, è stato investigato se il mantenimento di un orario costante per la misura del *PRI* comportasse una minor variabilità tra *PWC* e *PRI*, dato che l'attività fotosintetica varia molto durante l'arco della giornata mentre il *PWC* può avere solo delle lievi variazioni. Sono state prese in considerazione solo date con terreno secco.

Dalle Fig. 58-Fig. 60 possiamo notare come mantenere costante l'orario nella misurazione del *PRI*, per  $H_{norm} > 70\%$ , permetta di ottenere una correlazione generalmente più alta (per le misure svolte nella prima mattinata e alle ore 12:00, in particolare vedi associazioni in Tabella 11, mentre per le misure pomeridiane i risultati sono paragonabili a quelli mostrati nelle Fig. 52 e Fig. 53) tra *PRI* e *PWC*. In particolare, il miglior risultato misurando tutte e 4 le foglie rispetto alle sole due superficiali dimostra come i dati di S-1 siano sensibili alle condizioni di salute di tutta la pianta o comunque non solo a quelle dello strato più alto.

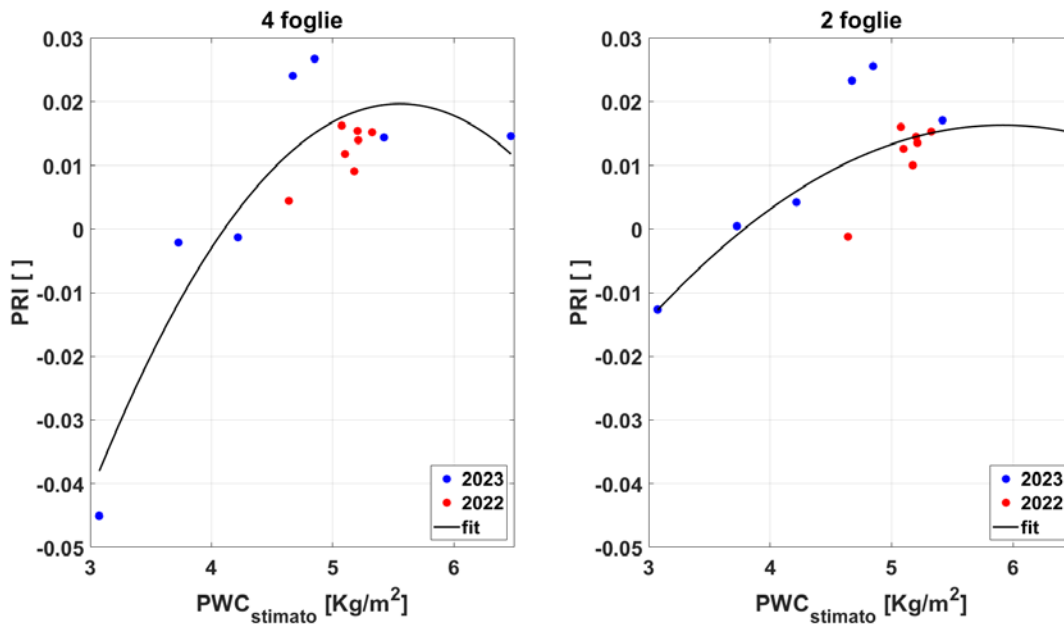


Fig. 58 *PRI* misurato in concomitanza con i passaggi descending (orario 5:00 GMT circa) per  $H_{norm} > 70\%$  con i valori di *PWC* ottenuti a partire dai dati di S-1. A sinistra *PRI* ottenuto misurando tutte e 4 le foglie ( $PRI = -0.0094PWC^2 + 0.1044PWC - 0.2702$ ;  $R^2 = 0.83$ ) a destra utilizzando le prime 2 foglie ( $PRI = -0.0036PWC^2 + 0.0426PWC - 0.1097$ ;  $R^2 = 0.64$ )

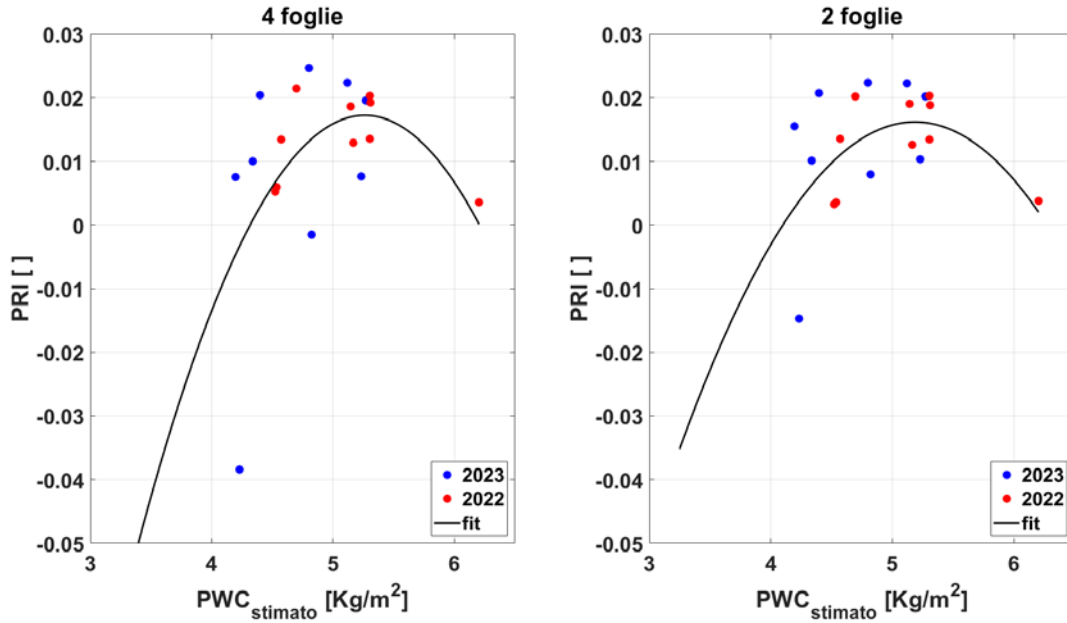


Fig. 59 PRI misurato in concomitanza con i passaggi ascending (orario 17:00 GMT circa) per  $H_{norm} > 70\%$  con i valori di PWC ottenuti a partire dai dati di S-1. A sinistra PRI ottenuto misurando tutte e 4 le foglie ( $PRI = -0.0193PWC^2 + 0.2031PWC - 0.5171$ ;  $R^2=0.31$ ) a destra utilizzando le prime 2 foglie ( $PRI = -0.0137PWC^2 + 0.1421PWC - 0.3523$ ;  $R^2=0.30$ )

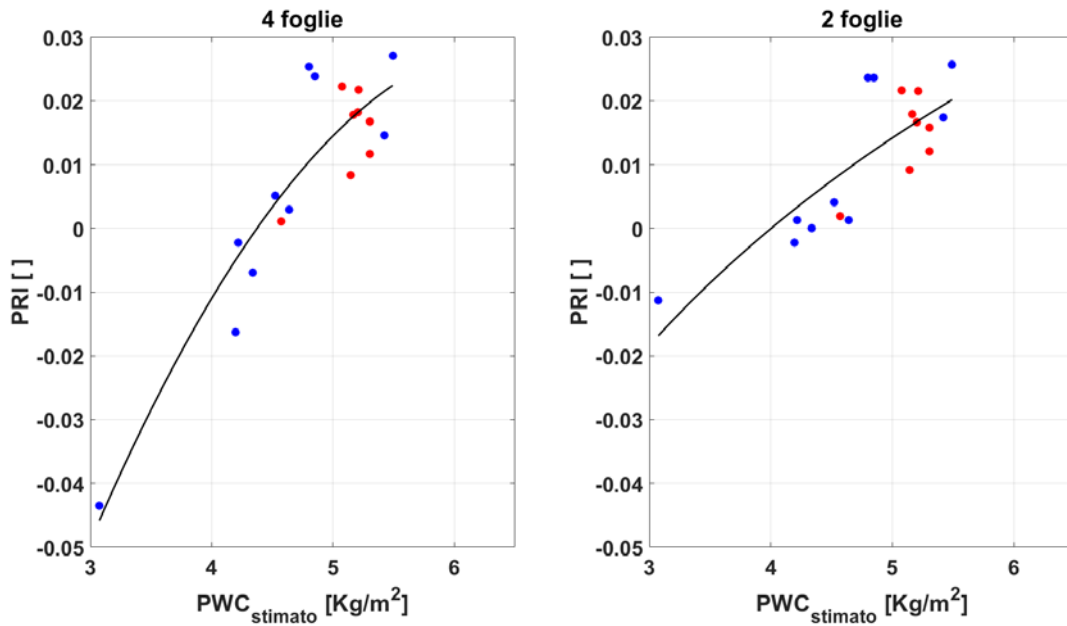


Fig. 60 PRI misurato in concomitanza con i passaggi di S-2 (orario 12:00 GMT circa) per  $H_{norm} > 70\%$  con i valori di PWC ottenuti a partire dai dati di S-1 rispetto alle associazioni di Tabella 11. A sinistra PRI ottenuto misurando tutte e 4 le foglie ( $PRI = -0.0063PWC^2 + 0.0822PWC - 0.2391$ ;  $R^2 = 0.84$ ) a destra utilizzando le prime 2 foglie con fit logaritmico in quanto il fitting con polinomio di 2° grado viene con la concavità rivolta verso il basso ( $PRI = 0.0638\ln(PWC) - 0.0885$ ;  $R^2 = 0.67$ ).

Tabella 11 Associazioni temporali tra passaggi di S-1 e S-2 per l'anno per associare i valori di PWC, recuperati dai dati di S-1, rispetto ai valori di PRI misurati in corrispondenza dei passaggi di S-2

Data passaggio S-1	Data passaggio S-2
07/07/2022	07/07/2022
14/07/2022	12/07/2022
19/07/2022	17/07/2022
20/07/2022	22/07/2022
27/07/2022	27/07/2022
01/08/2022	01/08/2022
08/08/2022	06/08/2022
13/08/2022	11/08/2022
25/08/2022	26/08/2022
31/08/2022	31/08/2022
27/07/2023	27/07/2023
15/08/2023	16/08/2023
26/08/2023	26/08/2023
07/09/2023	05/09/2023
12/09/2023	10/09/2023
13/09/2023	15/09/2023
25/09/2023	25/09/2023
01/10/2023	30/09/2023

## Variazioni nello stato della coltura rispetto ai differenti passaggi satellitari

Infine, è stata effettuata un'analisi per valutare se le variazioni del contenuto in acqua della pianta, stimate da S-1 in polarizzazione VH con *acf* esponenziale, rilevino effettivamente anche dei cambiamenti nel *PRI*. Per tale analisi, abbiamo valutato se eventuali differenze tra i passaggi ascending (pomeridiani) e descending (mattutini) fossero associati a cambiamenti nello stato fotosintetico della pianta, attraverso l'indice *PRI*. In particolare, è stata condotta una analisi per valutare quant'è la variazione di *PWC* necessaria per indurre un cambiamento nel *PRI* che ecceda sensibilmente le normali variazioni dell'indice dovute all'intensità e all'angolazione dei raggi solari [177][178]. Sono stati presi in considerazione solo i dati per  $H_{norm} > 70\%$ , per escludere eventuali piante di piccole dimensioni, in quanto considerare quest'ultime nell'analisi comporterebbe la rilevazione di ampie variazioni nel *PWC*. Infatti, quando le colture sono piccole ma hanno iniziato a fare attività fotosintetica, nelle differenze si andrebbe ad associare un alto valore di *PWC* che però è dovuto alla semplice crescita della pianta e non ad una variazione nella sua attività fotosintetica.

Sono state eseguite le seguenti operazioni, descritte nella Tabella 12:

1. Differenza fra i valori in contenuto in acqua (*PWC*) e fra i valori di *PRI* riscontrati per tutte le date esaminate, sottraendo tutti i distinti passaggi satellitari sia ascending (A) che descending (D) (differenze del tipo A-A; A-D; D-D), vedi Fig. 61.
2. Rispetto al punto 1 le sottrazioni sono state effettuate solo tra passaggi A e D (A-D), vedi Fig. 62.

3. Si è ripetuta l'analisi precedentemente descritta al punto 1 escludendo però i passaggi in cui è stato riscontrato un alto valore di *SMC*, prendendo in considerazione solo date caratterizzate dalle stesse condizioni del terreno, vedi Fig. 63.
4. Si è ripetuta l'analisi precedentemente descritta al punto 2 escludendo però i passaggi in cui è stato riscontrato un alto valore di *SMC*, vedi Fig. 64.

Tabella 12 Casistiche considerate per valutare la differenza tra diversi passaggi satellitari

	Tutti i punti sono considerati, anche quelli con terreno umido	Sono considerati solo i punti con terreno secco
Differenze tra tutti i passaggi	A-D; A-A;D-D	A-D;A-A;D-D
Differenze pomeriggio-mattina	A-D	A-D

1. Tutte le date con differenze A-A; A-D; D-D

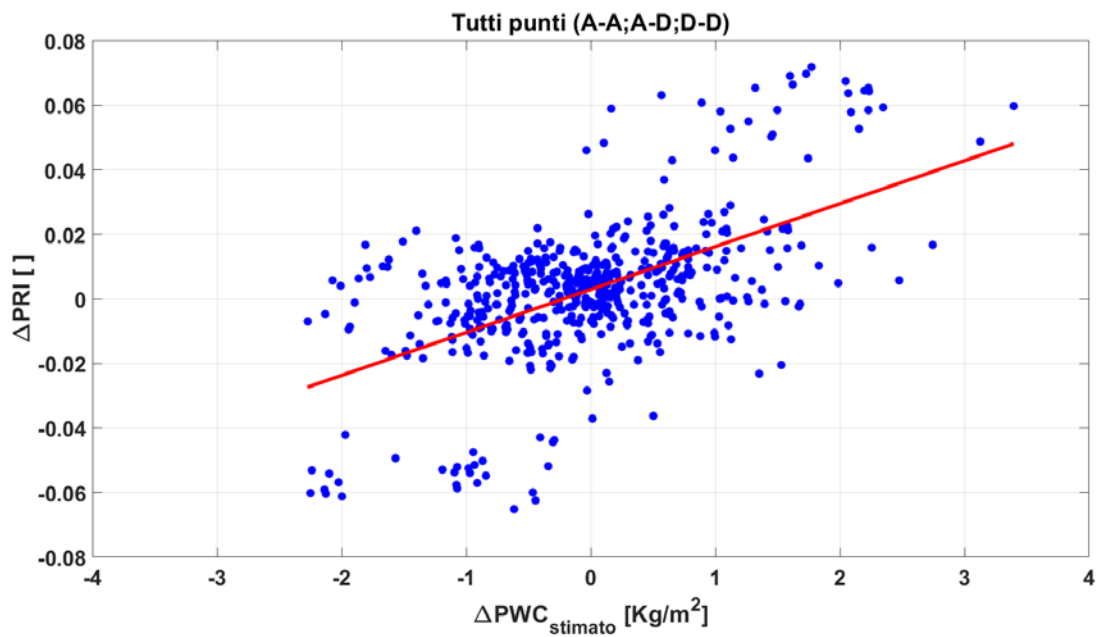


Fig. 61 Variazioni di PRI e PWC fra orbite diverse (A e D) considerando tutte le date, anche quelle con terreno umido, ( $R^2=0.31$ ;  $\Delta PRI = 0.0133\Delta PWC + 0.0029$ )

2. Tutte le date con sole differenze A-D

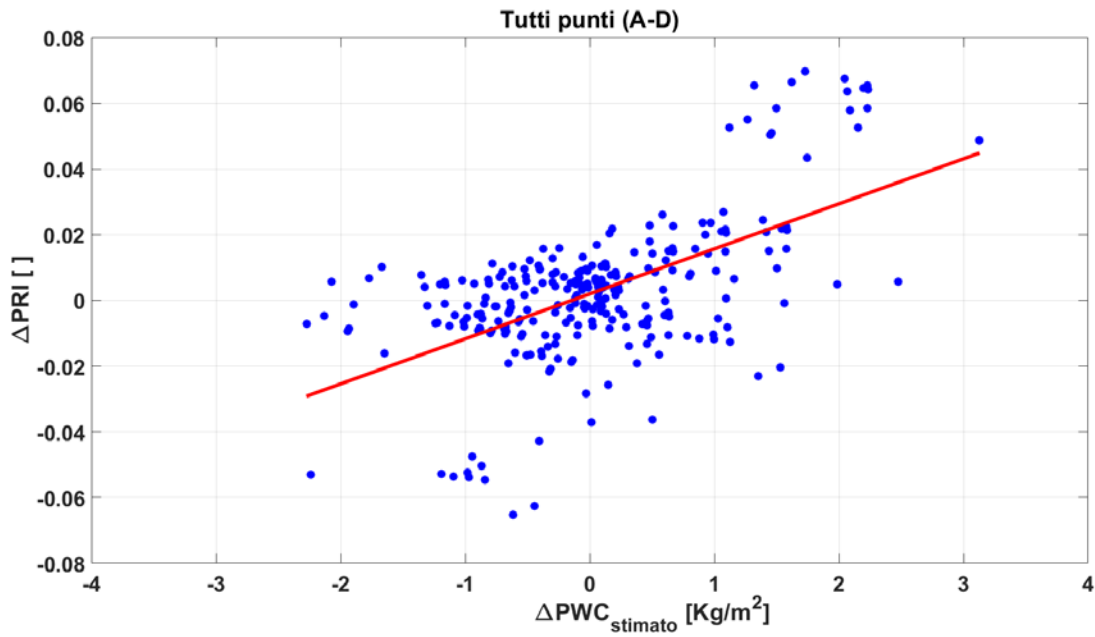


Fig. 62 Variazioni di PRI e PWC considerando tutte le date, anche quelle con terreno umido, sottraendo i passaggi satellitari "pomeriggio-mattina" tra di loro ( $R^2=0.34$ ;  $\Delta PRI = 0.0137 \Delta PWC + 0.002$ )

3. Solo date con terreno secco con differenze tra passaggi A-A; A-D; D-D

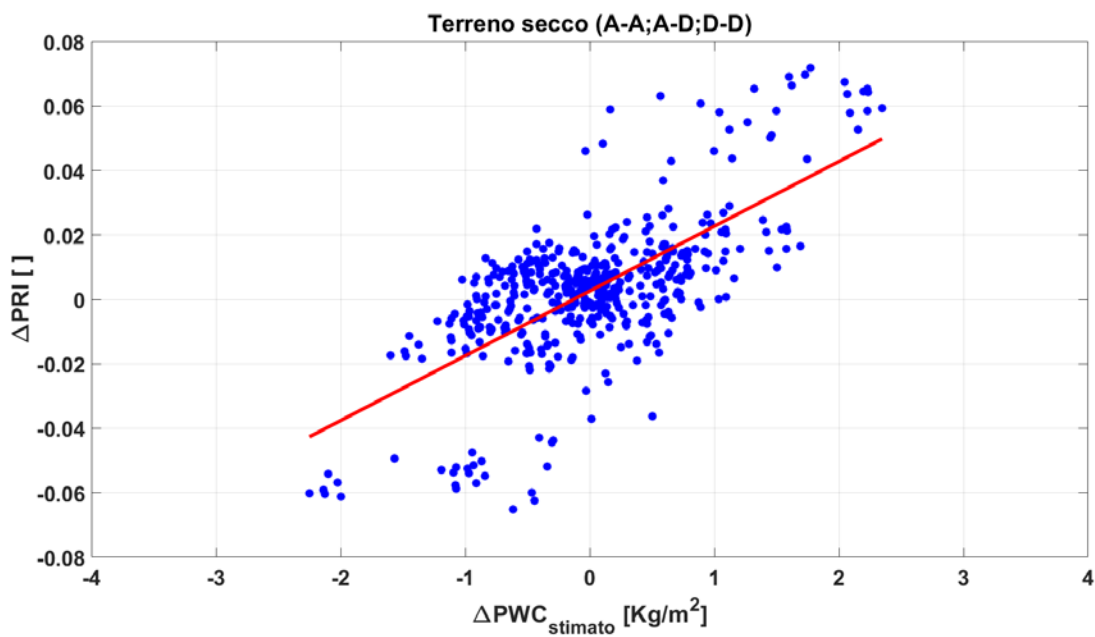


Fig. 63 Variazioni tra PRI e PWC considerando le date con terreno secco, sottraendo tutti i passaggi satellitari tra di loro ( $R^2=0.47$ ;  $\Delta PRI = 0.0201 \Delta PWC + 0.0026$ )

4. Solo date con terreno secco con differenze del tipo A-D

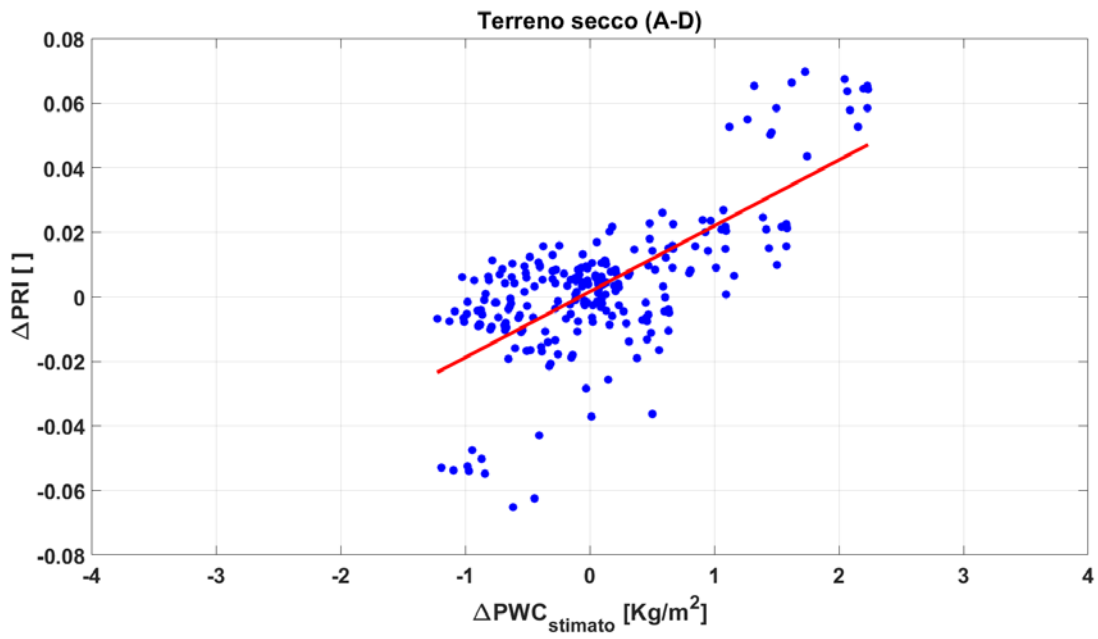


Fig. 64 Variazioni tra PRI e PWC considerando le date con terreno secco, sottraendo i passaggi satellitari "pomeriggio-mattina" ( $R^2=0.50$ ;  $\Delta PRI = 0.0204\Delta PWC + 0.0016$ )

## Capitolo 6 - Discussioni

E' stato ampiamente discusso l'uso di sensori ottici per valutare lo stato fisiologico delle piante, grazie alla loro sensibilità ai pigmenti vegetali e ai processi fotosintetici. Ad esempio, indici ottici famosi in letteratura come l'*NDVI* sono stati tradizionalmente utilizzati per stimare la qualità della fotosintesi e il vigore <sup>[179]</sup>. In questo contesto il *PRI* ha dimostrato di essere un indicatore precoce della risposta delle piante allo stress idrico, come sottolineato in Penuelas et al. <sup>[175]</sup>, ma il suo utilizzo su larga scala è stato spesso limitato dalla mancanza di piattaforme con bande spettrali dedicate e risoluzioni spaziali consone. Ad esempio, è stata fornita una banda apposita centrata a 531 nm sul satellite Modis per poter calcolare il *PRI* ma con una risoluzione spaziale che non può essere ritenuta consona per monitorare le singole variazioni che si presentano su un singolo campo agricolo mentre si presenta maggiormente adatto a monitorare aree più ampie come, ad esempio, foreste o aree nazionali <sup>[180]</sup>.

I risultati ottenuti in questa ricerca hanno dimostrato il potenziale dell'integrazione tra dati satellitari ottici e a microonde per il monitoraggio dello stato della vegetazione. Questa integrazione ha fornito una visione più completa delle dinamiche vegetative, superando limitazioni note per ciascun sensore che può essere usato singolarmente.

L'analisi delle variazioni del *PRI* misurato in loco ha mostrato che, durante la stagione più secca del 2022, i valori sono risultati generalmente più bassi rispetto al 2023, riflettendo una minore attività fotosintetica dovuta alla scarsità d'acqua nel suolo. Questo risultato è stato ulteriormente supportato dalle misurazioni in-situ del contenuto di acqua nel suolo, che erano significativamente ridotte nel 2022, sottolineando l'impatto della disponibilità idrica sulla fisiologia delle piante. Il confronto tra le stagioni ha messo in luce l'importanza di monitorare le condizioni ambientali e le risposte delle colture ad eventuali stress idrici, in particolare in contesti di agricoltura non irrigua <sup>[117]</sup>.

Un contributo importante per questa ricerca risiede nell'uso sinergico dei dati di S-2 e di S-1 per un monitoraggio più completo delle colture. Da un lato, indici ottici come *NDRE*, *RGR*, *PSRI* e *SIPI*, derivati dai dati di S-2, si sono dimostrati efficaci nel riflettere le condizioni di salute delle piante, soprattutto quando analizzati in relazione al *PRI*. Questi indici hanno evidenziato forti correlazioni, indicando la loro utilità nel rilevare variazioni nella fotosintesi e nello stato di salute vegetativo. Tuttavia, la limitazione intrinseca dei sensori ottici alla loro incapacità di penetrare coperture vegetali dense e la loro sensibilità alle condizioni atmosferiche può ostacolare l'acquisizione dei dati.

Dall'altro lato, i dati radar di S-1 hanno offerto un approccio complementare, con la capacità di penetrare la vegetazione e rilevare il contenuto idrico della pianta (*PWC*) anche in condizioni meteorologiche avverse. L'uso dei modelli elettromagnetici, in particolare con l'uso del Water Cloud Model (*WCM*) <sup>[123]</sup> e dell'Integral Equation Model (*IEM*), che è stato utilizzato rispetto all'Advanced Integral Equation Model (*AIEM*) dato che per superfici tendenzialmente lisce i risultati tra i due modelli sono molto simili ma l'*IEM* presenta un minor dispendio computazionale <sup>[139]</sup>, ha permesso di stimare il *PWC* con maggiore precisione, considerando le interazioni complesse tra la radiazione a microonde e la struttura vegetale. La capacità dei dati SAR di rilevare le variazioni del *PWC* si è rivelata cruciale per comprendere meglio le dinamiche idriche e la risposta delle piante relazionando questi dati, anche, rispetto a quelli forniti da S-2. Inoltre, grazie all'acquisizione di queste informazioni è stato possibile osservare come l'intensità dell'attività fotosintetica sia relazionata

rispetto alla quantità di biomassa presente seguendo un andamento del tipo curvilineo secondo i naturali cambiamenti di stato della pianta nel tempo.

Un aspetto innovativo è stato sicuramente fornito dallo studio delle variazioni del *PRI* rispetto al *PWC* stimato da satellite, sfruttando le acquisizioni nelle orbite ascendenti (pomeridiane) e discendenti (mattutine). Questa idea era stata suggerita da Ouaddi et al. <sup>[181]</sup> ipotizzando che le variazioni sul valore di backscattering tra un passaggio e l'altro siano dovute a un cambiamento nelle condizioni della coltura. L'approccio della nostra ricerca, invece, ha messo in evidenza come i cambiamenti nel contenuto idrico, stimato a partire dal backscattering tramite una serie di modelli matematici, si riflettano in variazioni del *PRI*. In particolare, le osservazioni suggeriscono che sia i sensori a microonde che ottici possono essere usati congiuntamente per monitorare in tempo reale, o quasi, lo stato di salute delle colture. La relazione tra il *PRI* e i dati radar di S-1 ha confermato che l'integrazione di queste due fonti di dati può quindi migliorare la comprensione delle relazioni tra fotosintesi e contenuto idrico delle piante, evidenziando l'andamento dello stato della pianta nel tempo. Questa integrazione offre nuove prospettive per l'ottimizzazione delle pratiche di gestione agricola, specialmente in regioni vulnerabili agli effetti del cambiamento climatico con conseguente rischio sulla perdita di resa e/o qualità del prodotto agricolo <sup>[182]-[184]</sup>. Le metodologie sviluppate possono così contribuire a una migliore gestione delle risorse idriche e a una maggiore resilienza dei sistemi agricoli, rendendo più efficiente l'uso dell'acqua in contesti dove quest'ultima è una risorsa scarsa. Le campagne sperimentali hanno anche sottolineato l'importanza della selezione dei campi e delle condizioni di misurazione. I dati sono stati raccolti in campi non irrigati, dove la disponibilità idrica era interamente determinata dalle precipitazioni. Questo contesto ha permesso di studiare gli effetti del deficit idrico naturale, offrendo uno scenario realistico per applicazioni future nell'agricoltura del tipo arido.

## Capitolo 7 - Conclusioni

Questa ricerca si è posta l'obiettivo di esaminare e valutare la correlazione fra dati di telerilevamento satellitare sia a microonde (SAR da Sentinel-1) che multispettrali (Sentinel-2) e le condizioni vegetative, nonché lo stato idrico delle piante. I dati satellitari sono stati confrontati con misure in situ dei parametri della vegetazione e del suolo e inoltre con misure sempre in loco di *PRI* fogliare. Al fine di garantire una piena riproducibilità delle metodologie sviluppate, sono stati utilizzati esclusivamente dati e prodotti open source quali quelli forniti dalla piattaforma europea Copernicus (<https://dataspace.copernicus.eu/>) dell'Agenzia Spaziale Europea.

L'uso di modelli elettromagnetici quali il WCM e l'IEM aventi come input i dati acquisiti da Copernicus ha permesso di analizzare, interpretare e confrontare le informazioni ottenute. I dati fra passaggi a intervalli ravvicinati di S-1 e di S-2, hanno permesso di confrontare i valori degli indici ottici con la variazione del contenuto in acqua delle piante misurato direttamente in campo. Questi confronti hanno ben messo in evidenza rapporti e variazioni fra valori dei diversi indici multispettrali analizzati e contenuto in acqua della vegetazione e quindi con il relativo stato di salute.

Il confronto fra i dati acquisiti dai diversi sensori ed i valori di *PRI* fogliare misurati in campo, ha inoltre evidenziato una associazione tra la variazione del contenuto in acqua delle piante e lo stato nel ciclo delle xantofille che caratterizza lo stato fotosintetico. L'analisi focalizzata sulla relazione tra *PRI* e dati derivati da sensori a microonde, rappresenta una innovazione rispetto allo stato dell'arte al momento della stesura di questa tesi. Data la sensibilità del *PRI* allo stato di salute e stress delle piante, è stato messo in evidenza che una variazione del *PRI* corrisponda ad una variazione corrispondente del contenuto in acqua misurato tramite i sensori satellitari. I valori di *PRI* sono stati successivamente associati anche a diversi indici di S-2, riscontrando una sinergia tra le due variabili, così come era lecito aspettare in base a quanto emerso dagli studi presenti in letteratura

Sono state infine analizzate le variazioni del contenuto in acqua delle piante rispetto alle variazioni di *PRI* fogliare misurato in campo tra i diversi passaggi satellitari mattutini e pomeridiani, assumendo che soprattutto per condizioni difficili possono esserci delle relazioni tra le molteplici variabili in gioco che possono portare ad un possibile stress idrico. È stato osservato che mentre tra passaggi satellitari ravvicinati la variazione dell'indice *PRI* è di una certa entità, principalmente a causa dell'orario della misura, l'analoga variazione del contenuto in acqua nelle piante risulta trascurabile. Se si amplia l'intervallo temporale di analisi, le dinamiche di variazione di *PRI* e i cambiamenti del contenuto in acqua e dello stato di salute delle piante risultano di maggior interesse, ampiezza e sincronizzazione. Inoltre, la maggior biomassa e attività fotosintetica presente durante l'anno 2023, rispetto al 2022, fornisce una ulteriore informazione per quanto riguarda la possibilità di una maggior resa agricola sull'intero raccolto.

Infine, questo studio suggerisce come possibili ulteriori sviluppi la validazione della metodologia su scale più ampie, ad esempio utilizzando come valori di *PRI* quelli ottenibili dalla piattaforma satellitare Modis (con risoluzioni spaziali di 500 metri o 1 Km) oppure analizzare il problema dal punto di vista della radiometria a microonde, nonché la possibilità di migliorare la parametrizzazione della vegetazione utilizzando modelli elettromagnetici più complessi ed eventualmente utilizzando anche frequenze di lavoro differenti. Pertanto, saranno necessari ulteriori dati sperimentali ed elaborazioni per il proseguimento di questa ricerca.



# Appendice

Di seguito, sono mostrati i principali codici utilizzati per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati.

## Codice utilizzato in Google Earth Engine (Javascript)

Anno 2022

### **Variabili importate:**

```
var S1 = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S1_GRD"),
var Sorgo_2022 = /* color: #0dbd4b */ ee.Geometry.Polygon(
  [[ [11.149014505087388, 43.82922566347957],
    [11.150774034201158, 43.82849811236272],
    [11.15122464531566, 43.82901668693895],
    [11.151771815954698, 43.828792229839586],
    [11.15123537415172, 43.82814981347633],
    [11.151761087118638, 43.82794857319338],
    [11.15244773262645, 43.82872257056814],
    [11.152823241888536, 43.82919470403824],
    [11.15297344559337, 43.83016991872604],
    [11.152753504454148, 43.83100580434753],
    [11.152351173101914, 43.83157853403315],
    [11.152227706694058, 43.8317014202613],
    [11.151149458670071, 43.830795887530556] ] ] ],
var S2 = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED");
```

### **Inizio del codice:**

```
var inizio='2022-01-01'
var fine='2022-12-31'
Map.addLayer(Sorgo_2022, {}, 'Area_sorgo')
//Map.addLayer(angolo_orbita95, {}, 'LIA orbit95')

//import del DEM
var dataset = ee.Image('USGS/SRTMGL1_003');
print(dataset)
var elevation = dataset.select('elevation');
var slope = ee.Terrain.slope(elevation);
//Map.setCenter(-112.8598, 36.2841, 10);
Map.addLayer(slope, {}, 'slope');
Map.addLayer(elevation, {}, 'dem 30m');
```

```

#####Sentinel2#####
var S2_filtrate=S2
.filterBounds(Sorgo_2023)
.filterDate(inizio,fine)
.filter(ee.Filter.lte('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE',100));

var cloudFree = function(image) {
  return image.updateMask(image.select('QA60').eq(0)); //Selezionami sull'immagine tutti i pixel che sono a 0
}

var S2_filtrate_nocloud=S2_filtrate.map(cloudFree)

var NDVI = function (image){
  return image.addBands(image.normalizedDifference(['B8','B4']).rename('NDVI'))
}

var NDMI = function (image){
  return image.addBands(image.normalizedDifference(['B8','B11']).rename('NDMI'))
}

var NDWI = function (image){
  return image.addBands(image.normalizedDifference(['B8','B3']).rename('NDWI'));
};

var NDWI_AGRICULTURE = function (image){
  return image.addBands(image.normalizedDifference(['B8A','B11']).rename('NDWI_AGRICULTURE'));
};

var NDRE = function (image){
  return image.addBands(image.normalizedDifference(['B8','B5']).rename('NDRE'));
};

var RGR = function (image){

```

```

var RGR=image.expression(
  'RED/GREEN',
  {
    'RED':image.select('B4'),
    'GREEN':image.select('B3'),
  });
return image.addBands(RGR.rename('RGR'));
};

```

```

var EVI = function (image){
  var EVI=image.expression(
    '2.5*(B8-B4)/(B8+6*B4-7.5*B2+1)',
    {
      'B8':image.select('B8'),
      'B4':image.select('B4'),
      'B2':image.select('B2'),
    });
  return image.addBands(EVI.rename('EVI'));
};

```

```

var SAVI = function (image){
  var SAVI=image.expression(
    '((NIR-RED)*(1+L))/(NIR+RED+L)',
    {
      'NIR':image.select('B8'),
      'RED':image.select('B4'),
      'L':0.5,
    });
  return image.addBands(SAVI.rename('SAVI'));
};

```

```

var MSAVI2 = function (image){
  var MSAVI2=image.expression(
    '(2 * NIR + 1 - sqrt(pow((2 * NIR + 1), 2) - 8 * (NIR - RED))) / 2',

```

```

{
  'NIR':image.select('B8'),
  'RED':image.select('B4'),
});
return image.addBands(MSAVI2.rename('MSAVI2'));
};

```

```

var MSI = function (image){
var MSI=image.expression(
  'MIR/NIR',
  {
    'NIR':image.select('B8'),
    'MIR':image.select('B11'),
  });
return image.addBands(MSI.rename('MSI'));
};

```

```

var SIPI = function (image){
var SIPI=image.expression(
  '(NIR*0.0001-BLUE*0.0001)/(NIR*0.0001-RED*0.0001)',
  {
    'NIR':image.select('B8'),
    'RED':image.select('B4'),
    'BLUE':image.select('B2'),
  });
return image.addBands(SIPI.rename('SIPI'));
};

```

```

var PSRI = function (image){
var PSRI=image.expression(
  '(RED*0.0001-GREEN*0.0001)/(NIR*0.0001)',
  {
    'NIR':image.select('B8'),

```

```

'RED':image.select('B4'),
'GREEN':image.select('B3'),
});
return image.addBands(PSRI.rename('PSRI'));
};

var
S2_filtrate_nocloud=S2_filtrate.map(cloudFree).map(NDVI).map(NDWI).map(EVI).map(SAVI).map(MSAVI2).map
(MSI).map(NDRE).map(RGR).map(NDMI).map(SIPI).map(PSRI).map(NDWI_AGRICULTURE)

//Per tutte le immagini della mia collezione (S2_filtered) applico l'algoritmo che metto in ingresso. Il .map è come un
ciclo for

//Stampa a video solo gli indici desiderati

var
S2_filtrate_nocloud_onlyIndexes=S2_filtrate_nocloud.select('EVI','MSI','NDMI','NDRE','RGR','NDVI','NDWI','SAV
I','MSAVI2','SIPI','PSRI','NDWI_AGRICULTURE')

var S2_filtrate_nocloud_onlyIndexes_first=S2_filtrate_nocloud_onlyIndexes.first()
print(S2_filtrate_nocloud_onlyIndexes_first,'S2_sorgo');

//Map.addLayer(S2_filtrate_nocloud_onlyIndexes,{},'S2_filtrate_nocloud_e_onlyIndexes');

//Faccio un grafico di un parametro come nel tempo si comporta

var graficoIndexes_Sentinel2= ui.Chart.image.series(S2_filtrate_nocloud_onlyIndexes, Sorgo_2022,
ee.Reducer.median(), 10)
.setSeriesNames(['EVI','MCARI','MSAVI2','MSI','NDMI','NDRE','NDVI','NDWI','NDWI_AGRICULTURE','PSRI','
RGR','SAVI','SIPI'])
print(graficoIndexes_Sentinel2,'Sentinel-2 Indexes')

#####Sentinel 1#####
var S1_filtrate= S1
.filterBounds(Sorgo_2022)
.filterDate(inizio,fine)
.filterMetadata('transmitterReceiverPolarisation','equals',['VV',"VH"])
.filterMetadata('instrumentMode','equals','SM')

```

```

var S1_filtrate_ascending=S1_filtrate.filterMetadata('orbitProperties_pass','equals','ASCENDING');
var S1_filtrate_descending=S1_filtrate.filterMetadata('orbitProperties_pass','equals','DESCENDING');

var S1_filtrate_ascending_15=S1_filtrate_ascending.filter(ee.Filter.eq('relativeOrbitNumber_start', 15));
var S1_filtrate_ascending_117=S1_filtrate_ascending.filter(ee.Filter.eq('relativeOrbitNumber_start', 117));
var S1_filtrate_descending_168=S1_filtrate_descending.filter(ee.Filter.eq('relativeOrbitNumber_start', 168));
var S1_filtrate_descending_95=S1_filtrate_descending.filter(ee.Filter.eq('relativeOrbitNumber_start', 95));

var S1_filtrate_ascending_15_first=S1_filtrate_ascending_15.first();
var S1_filtrate_ascending_117_first=S1_filtrate_ascending_117.first();
var S1_filtrate_descending_95_first=S1_filtrate_descending_95.first();
var S1_filtrate_descending_168_first=S1_filtrate_descending_168.first();

print(S1_filtrate_ascending_15_first);
print(S1_filtrate_ascending_117_first);
print(S1_filtrate_descending_95_first);
print(S1_filtrate_descending_168_first);

//***** Stampa andamento backscatter *****
var chart_orbit15=ui.Chart.image.series({
  imageCollection:S1_filtrate_ascending_15.select('VV','VH'),
  region:Sorgo_2022, //Regione che vuoi usare
  reducer:ee.Reducer.median(), //Riduttore che vuoi usare per l'immagine
  scale:10, //Risoluzione dell'immagine in gioco o comunque che risoluzione vuoi usare
}).setOptions({
  title: 'Orbita Ascending 15'
});

var chart_orbit117=ui.Chart.image.series({
  imageCollection:S1_filtrate_ascending_117.select('VV','VH'),

```

```
region:Sorgo_2022, //Regione che vuoi usare
reducer:ee.Reducer.median(), //Riduttore che vuoi usare per l'immagine
scale:10, //Risoluzione dell'immagine in gioco o comunque che risoluzione vuoi usare
}).setOptions({
  title: 'Orbita Ascending 117'
});
```

```
var chart_orbit95=ui.Chart.image.series({
  imageCollection:S1_filtrate_descending_95.select('VV','VH'),
  region:Sorgo_2022, //Regione che vuoi usare
  reducer:ee.Reducer.median(), //Riduttore che vuoi usare per l'immagine
  scale:10, //Risoluzione dell'immagine in gioco o comunque che risoluzione vuoi usare
})
.setOptions({
  title: 'Orbita Descending 95'
});
```

```
var chart_orbit168=ui.Chart.image.series({
  imageCollection:S1_filtrate_descending_168.select('VV','VH'),
  region:Sorgo_2022, //Regione che vuoi usare
  reducer:ee.Reducer.median(), //Riduttore che vuoi usare per l'immagine
  scale:10, //Risoluzione dell'immagine in gioco o comunque che risoluzione vuoi usare
}).setOptions({
  title: 'Orbita Descending 168'
});
```

```
print(chart_orbit15);
print(chart_orbit117);
print(chart_orbit95);
print(chart_orbit168);
```

***Chiusura codice***

Anno 2023

Variabili importate

```
var S1 = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S1_GRD"),
var Sorgo_2023 =
  ee.Geometry.Polygon(
    [[ [11.147973070248902, 43.828212869316026],
      [11.148176918134034, 43.828138371869066],
      [11.148296276435197, 43.82828349667987],
      [11.148482689961732, 43.82820512932585],
      [11.148366013869584, 43.82805323181583],
      [11.147959659203828, 43.828204161827024],
      [11.14726413800779, 43.82760851766067],
      [11.147666469360024, 43.8274459760108],
      [11.147988334441811, 43.82733761466499],
      [11.148417487884194, 43.82712089138323],
      [11.148573056007058, 43.827028009735876],
      [11.148786524422722, 43.82686050562578],
      [11.149241127794308, 43.82664226722784],
      [11.1493296406918, 43.82663259198544],
      [11.150002875154538, 43.82660937139718],
      [11.150555372137543, 43.826484468814336],
      [11.151708762527498, 43.82752556990637],
      [11.148732944950224, 43.82891301196239]] ]],
var S2 = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED"),
```

**Inizio codice:**

```
var inizio='2023-01-01'
```

```
var fine='2023-12-31'
```

```
Map.addLayer(Sorgo_2023, {}, 'Area_sorgo')
```

```
//Map.addLayer(angolo_orbita95, {}, 'LIA orbit95')
```

```
//import del DEM
```

```
var dataset = ee.Image('USGS/SRTMGL1_003');
```

```
print(dataset)
```

```
var elevation = dataset.select('elevation');
```

```
var slope = ee.Terrain.slope(elevation);
```

```
//Map.setCenter(-112.8598, 36.2841, 10);
```

```
Map.addLayer(slope, {}, 'slope');
```

```
Map.addLayer(elevation, {}, 'dem 30m');
```

```
//#####Sentinel2#####
```

```

var S2_filtrate=S2
.filterBounds(Sorgo_2023)
.filterDate(inizio,fine)
.filter(ee.Filter.lte('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE',100));

var cloudFree = function(image) {
  return image.updateMask(image.select('QA60').eq(0)); //Selezionami sull'immagine tutti i pixel che sono a 0
}

var S2_filtrate_nocloud=S2_filtrate.map(cloudFree)

var NDVI = function (image){
  return image.addBands(image.normalizedDifference(['B8','B4']).rename('NDVI'))
}

var NDMI = function (image){
  return image.addBands(image.normalizedDifference(['B8','B11']).rename('NDMI'))
}

var NDWI = function (image){
  return image.addBands(image.normalizedDifference(['B8','B3']).rename('NDWI'));
};

var NDWI_AGRICULTURE = function (image){
  return image.addBands(image.normalizedDifference(['B8A','B11']).rename('NDWI_AGRICULTURE'));
};

var NDRE = function (image){
  return image.addBands(image.normalizedDifference(['B8','B5']).rename('NDRE'));
};

var RGR = function (image){
  var RGR=image.expression(

```

```

'RED/GREEN',
{
  'RED':image.select('B4'),
  'GREEN':image.select('B3'),
});
return image.addBands(RGR.rename('RGR'));
};

```

```

var EVI = function (image){
var EVI=image.expression(
'2.5*(B8-B4)/(B8+6*B4-7.5*B2+1)',
{
  'B8':image.select('B8'),
  'B4':image.select('B4'),
  'B2':image.select('B2'),
});
return image.addBands(EVI.rename('EVI'));
};

```

```

var SAVI = function (image){
var SAVI=image.expression(
'((NIR-RED)*(1+L))/(NIR+RED+L)',
{
  'NIR':image.select('B8'),
  'RED':image.select('B4'),
  'L':0.5,
});
return image.addBands(SAVI.rename('SAVI'));
};

```

```

var MSAVI2 = function (image){
var MSAVI2=image.expression(
'(2 * NIR + 1 - sqrt(pow((2 * NIR + 1), 2) - 8 * (NIR - RED))) / 2',
{

```

```

    'NIR':image.select('B8'),
    'RED':image.select('B4'),
  });
  return image.addBands(MSAVI2.rename('MSAVI2'));
};

```

```

var MSI = function (image){
  var MSI=image.expression(
    'MIR/NIR',
    {
      'NIR':image.select('B8'),
      'MIR':image.select('B11'),
    });
  return image.addBands(MSI.rename('MSI'));
};

```

```

var SIPI = function (image){
  var SIPI=image.expression(
    '(NIR*0.0001-BLUE*0.0001)/(NIR*0.0001-RED*0.0001)',
    {
      'NIR':image.select('B8'),
      'RED':image.select('B4'),
      'BLUE':image.select('B2'),
    });
  return image.addBands(SIPI.rename('SIPI'));
};

```

```

var PSRI = function (image){
  var PSRI=image.expression(
    '(RED*0.0001-GREEN*0.0001)/(NIR*0.0001)',
    {
      'NIR':image.select('B8'),
      'RED':image.select('B4'),

```

```

    'GREEN':image.select('B3'),
  });
  return image.addBands(PSRI.rename('PSRI'));
};

var
S2_filtrate_nocloud=S2_filtrate.map(cloudFree).map(NDVI).map(NDWI).map(EVI).map(SAVI).map(MSAVI2).map
(MSI).map(NDRE).map(RGR).map(NDMI).map(SIPI).map(PSRI).map(NDWI_AGRICULTURE)

//Per tutte le immagini della mia collezione (S2_filtered) applico l'algoritmo che metto in ingresso. Il .map è come un
ciclo for

//Stampa a video solo gli indici desiderati

var
S2_filtrate_nocloud_onlyIndexes=S2_filtrate_nocloud.select('EVI','MSI','NDMI','NDRE','RGR','NDVI','NDWI','SAV
I','MSAVI2','SIPI','PSRI','NDWI_AGRICULTURE')

var S2_filtrate_nocloud_onlyIndexes_first=S2_filtrate_nocloud_onlyIndexes.first()
print(S2_filtrate_nocloud_onlyIndexes_first,'S2_sorgo');

//Map.addLayer(S2_filtrate_nocloud_onlyIndexes,{},'S2_filtrate_nocloud_e_onlyIndexes');

//Faccio un grafico di un parametro come nel tempo si comporta

var graficoIndexes_Sentinel2= ui.Chart.image.series(S2_filtrate_nocloud_onlyIndexes, Sorgo_2023,
ee.Reducer.median(), 10)
.setSeriesNames(['EVI','MCARI','MSAVI2','MSI','NDMI','NDRE','NDVI','NDWI','NDWI_AGRICULTURE','PSRI','
RGR','SAVI','SIPI'])
print(graficoIndexes_Sentinel2,'Sentinel-2 Indexes')

#####Sentinel 1#####
var S1_filtrate= S1
.filterBounds(Sorgo_2023)
.filterDate(inizio,fine)
.filterMetadata('transmitterReceiverPolarisation','equals',['VV',"VH"])
//.filterMetadata('instrumentMode','equals','SM')

```

```

var S1_filtrate_ascending=S1_filtrate.filterMetadata('orbitProperties_pass','equals','ASCENDING');
var S1_filtrate_descending=S1_filtrate.filterMetadata('orbitProperties_pass','equals','DESCENDING');

var S1_filtrate_ascending_15=S1_filtrate_ascending.filter(ee.Filter.eq('relativeOrbitNumber_start', 15));
var S1_filtrate_ascending_117=S1_filtrate_ascending.filter(ee.Filter.eq('relativeOrbitNumber_start', 117));
var S1_filtrate_descending_168=S1_filtrate_descending.filter(ee.Filter.eq('relativeOrbitNumber_start', 168));
var S1_filtrate_descending_95=S1_filtrate_descending.filter(ee.Filter.eq('relativeOrbitNumber_start', 95));

var S1_filtrate_ascending_15_first=S1_filtrate_ascending_15.first();
var S1_filtrate_ascending_117_first=S1_filtrate_ascending_117.first();
var S1_filtrate_descending_95_first=S1_filtrate_descending_95.first();
var S1_filtrate_descending_168_first=S1_filtrate_descending_168.first();

print(S1_filtrate_ascending_15_first);
print(S1_filtrate_ascending_117_first);
print(S1_filtrate_descending_95_first);
print(S1_filtrate_descending_168_first);

/***** Stampa andamento backscatter *****/
var chart_orbit15=ui.Chart.image.series({
  imageCollection:S1_filtrate_ascending_15.select('VV','VH'),
  region: Sorgo_2023, //Regione che vuoi usare
  reducer:ee.Reducer.median(), //Riduttore che vuoi usare per l'immagine
  scale:10, //Risoluzione dell'immagine in gioco o comunque che risoluzione vuoi usare
}).setOptions({
  title: 'Orbita Ascending 15'
});

var chart_orbit117=ui.Chart.image.series({
  imageCollection:S1_filtrate_ascending_117.select('VV','VH'),
  region: Sorgo_2023, //Regione che vuoi usare

```

```
reducer:ee.Reducer.median(), //Riduttore che vuoi usare per l'immagine
scale:10, //Risoluzione dell'immagine in gioco o comunque che risoluzione vuoi usare
}).setOptions({
  title: 'Orbita Ascending 117'
});
```

```
var chart_orbit95=ui.Chart.image.series({
  imageCollection:S1_filtrate_descending_95.select('VV','VH'),
  region: Sorgo_2023, //Regione che vuoi usare
  reducer:ee.Reducer.median(), //Riduttore che vuoi usare per l'immagine
  scale:10, //Risoluzione dell'immagine in gioco o comunque che risoluzione vuoi usare
})
.setOptions({
  title: 'Orbita Descending 95'
});
```

```
var chart_orbit168=ui.Chart.image.series({
  imageCollection:S1_filtrate_descending_168.select('VV','VH'),
  region: Sorgo_2023, //Regione che vuoi usare
  reducer:ee.Reducer.median(), //Riduttore che vuoi usare per l'immagine
  scale:10, //Risoluzione dell'immagine in gioco o comunque che risoluzione vuoi usare
}).setOptions({
  title: 'Orbita Descending 168'
});
```

```
print(chart_orbit15);
print(chart_orbit117);
print(chart_orbit95);
print(chart_orbit168);
```

***Chiusura codice***

## Stima PWC(Matlab)

```
tic %Serve per capire quanto tempo impiega per eseguire tutti i comandi

%superficie alla base (matematicamente h sta dentro PWC). Quindi A e B sono
%sempre due costanti
clear all
close all
addpath('functions/')
fontsize=14; % font size
for the plot
lowlim=-40; % lower
axis limit for the plot
uplim=10; % upper
axis lim for the plot
acf=2; % ACF for
IEM
freq=5.4;
%offset=0.0049;
inpath='DataIN/'; %

% File matlab da cui prendere i dati in ingresso
infile='Sorgo_Asmana2_Estate_2023.mat';

plottitle='WCM vs. S1';
xlabel1='S1 \sigma° VV pol. (dB)';
ylabel1='WCM simulated \sigma° VV pol. (dB)';
xlabel2='S1 \sigma° VH pol. (dB)';
ylabel2='WCM simulated \sigma° VH pol. (dB)';

%Ascending tutte date e descending. Inserisci il numero progressivo dei passaggi
ascending e descending. Valori riferiti al 2023.
ascending=[2:2:32];
descending=[1:2:31];

%Possibili di A e B. Scegliere questi valori se si vuole determinare qual è la miglior
coppia di valori di A e B, altrimenti va dato un valore finito.
A1VVvec=0.001:0.001:1;
B2VVvec=0.001:0.001:1;

%A1VVvec=0.005 %esempio di valore finito

%Mettere i valori di PWC misurati

PWC_measured=[ ];

indice_figura=1;
for indice_B2=1:length(B2VVvec)
for indice_A1=1:length(A1VVvec)

%Forniamo un vettore di possibili valori di PWC [Kg/m^2] delle piante da un
%valor minimo a uno massimo con un certo passo che scegliamo noi
PWCvec=0.1:0.001:10;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%loading experimental dataset %%%%%%%%%%%%%%
load([inpath infile], 'VV', 'VH', 'LIA', 'SMC', 'HSTD', 'LC')

APWC=A1VVvec;
BPWC=B2VVvec;

SMC=SMC*100;
%Uso il modello di Dobson
epsi=csoil(freq,SMC);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% starting simulation %%%%%%%%%%%%%%
%Contributo in backscattering del terreno, o usi il modello iem
[~,soilvv,soilvh]=iem(HSTD,epsi,LC,LIA,freq,acf); % to use IEM for
simulating the soil contribution

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% running the final simulation %%%%%%%%%%%%%%

%Metto in lineare i backscattering e l'angolo in radianti
soilvvlin=10.^(soilvv/10);
soilvhlin=10.^(soilvh/10);
costheta=cos(deg2rad(LIA));
VV_lin=10.^(VV./10);
VH_lin=10.^(VH./10);

%Per ogni data (indice) vado a calcolarmi quanto impatta il contributo del
%terreno attenuato opportunamente per ogni valore di PWC.
%Si crea cosi una matrice di M colonne (una per ogni data) e tante righe
%quanti sono gli intervalli con cui ho diviso PWC. Per quanto riguarda A1 e
%B2 i valori utilizzati sono quelli del ciclo attuale, non si tiene conto
%qui del valore di A1 e B2, per ora non ci servono
%Indice deve essere lungo quante sono le date a nostra disposizione
for indice=1:length(VH_lin)
    %Calcolo quanto vale il contributo del terreno attenuato per la
    %vegetazione. Ho per ogni data tanti valori quanti sono i possibili PWC
    contributo_terreno_attenuatoVV_lin(:,indice)=soilvvlin(indice)*exp(-
    2.*APWC(indice_A1).*PWCvec'./costheta(indice));
    contributo_terreno_attenuatoVH_lin(:,indice)=soilvhlin(indice)*exp(-
    2.*APWC(indice_A1).*PWCvec'./costheta(indice));
end
%Metto in un formato più adatto il contributo del terreno attenuato per la
%vegetazione. Così faccio tante righe quante sono le date e tante colonne quanti sono
i PWC
contributo_terreno_attenuatoVV_lin_trasposto=contributo_terreno_attenuatoVV_lin';
contributo_terreno_attenuatoVH_lin_trasposto=contributo_terreno_attenuatoVH_lin';

%Sottraggo il valore misurato da satellite con quello del terreno attenuato
%dalla vegetazione. In teoria, quindi, il valore che ottengo è il contributo
%della vegetazione sul valore di backscattering. Ho tante colonne quanti
%sono i possibili PWC della vegetazione
contributo_veg_VVlin=VV_lin-contributo_terreno_attenuatoVV_lin_trasposto;
contributo_veg_VHlin=VH_lin-contributo_terreno_attenuatoVH_lin_trasposto;

%Calcolo quando dovrebbe essere il valore di backscattering dovuto alla

```

```

% sola vegetazione in base al water cloud model
for indice=1:length(VH_lin)
provaVV(indice,:)=BPWC(indice_B2).*PWCvec.*costheta(indice).*(1-exp(-
2*APWC(indice_A1).*PWCvec./costheta(indice)));
provaVH(indice,:)=BPWC(indice_B2).*PWCvec.*costheta(indice).*(1-exp(-
2*APWC(indice_A1).*PWCvec./costheta(indice)));
end

%A questo punto faccio la differenza tra il contributo della vegetazione
% ottenuto dai valori sperimentali meno quello che fornirebbe il
% modello water cloud. so il valore assoluto perché altrimenti lui prenderebbe solo i
% valori negativi (e magari c'è in realtà una forte ampiezza rispetto ai
% valori sperimentali)
differenzaVV=abs(contributo_veg_VVlin-provaVV);
differenzaVH=abs(contributo_veg_VHlin-provaVH);

% Per ognuna delle date si trova, singolarmente per ogni data, qual'è
% l'elemento per cui vi è un minimo nella differenza tra il valore di
% backscattering della vegetazione ottenuto dai valori sperimentali e quello
% che fornirebbe il water cloud.
% Si ottengono così i "migliori PWC" che minimizzano l'errore tra i dati
% sperimentali e quelli ottenuti da water cloud
for indice=1:length(VH_lin)
[valVV(indice),posVV(indice)]=min(differenzaVV(indice,:));
[valVH(indice),posVH(indice)]=min(differenzaVH(indice,:));
end

% Metti i valori di PWC (sono tanti quante sono le date) in una forma più comoda da un
% punto di
% vista visivo
PWC_dateVV=PWCvec(posVV)';
PWC_dateVH=PWCvec(posVH)';

%% Valori di PRI misurati, uno per ogni data
PRI_tutte_date=[ ];

% Calcolo del R2 tra i dati sperimentali e quelli ottenuti dal fitting che
% scelgo. Il tipo di fitting scelto è dentro la funzione R2_fitting
[R2_VH,R2_VV,aVH,aVV,mv_fittingVH,mv_fittingVV]
=R2_fitting(PRI_tutte_date,PWC_dateVH,PWC_dateVV);

% Faccio degli array con tante colonne quanti sono i valori di B2 e tante
% righe quanti sono i valori di A1 dove nelle celle metto il corrispondente
% valore di R2 per quella polarizzazione scelta
arrayVH_PWC_PRI_tutte_date(indice_B2,indice_A1)=R2_VH;
arrayVV_PWC_PRI_tutte_date(indice_B2,indice_A1)=R2_VV;
% Queste due matrici sono uguali a quelle sopra ma dentro c'è solo R2, in
% "arrayVH_PWC_PRI_tutte_date" e "arrayVV_PWC_PRI_tutte_date" aggiungeremo
% anche una 3a dimensione con all'interno i corrispondenti valori di PWC per
% quei B2 e A1.
arrayVH_singoli_PWC(indice_B2,indice_A1)=R2_VH;
arrayVV_singoli_PWC(indice_B2,indice_A1)=R2_VV;

% Ci aggiungo la 3a dimensione dei corrispondenti mv
arrayVV_PWC_PRI_tutte_date(indice_B2,indice_A1,2:length(PWC_dateVV)+1)=PWC_dateVV;
arrayVH_PWC_PRI_tutte_date(indice_B2,indice_A1,2:length(PWC_dateVV)+1)=PWC_dateVH;

```

```

%determino RMSE e R2 migliori tra PWC misurato in campo e da modello e li
%metto in una matrice
RMSE_PWC_measured_PWC_modello_VH_matrice(indice_B2,indice_A1)=sqrt(immse(PWC_measured'
,PWC_dateVH));

fit_PWC_VH=fitlm(PWC_measured',PWC_dateVH);
R2_PWC_VH=fit_PWC_VH.Rsquared.Ordinary;

R2_PWC_measured_PWC_modello_VH_matrice(indice_B2,indice_A1)=R2_PWC_VH;
clear R2_PWC_VH fit_PWC_VH

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%SEZIONE per migliore R^2 tra delta PWC e delta PRI ascending-descending
%In questa sezione calcoliamo la differenza di PWC e la differenza di PRI
%tra:
%1) Tutti gli ascending meno tutti i descending (anche date distanti tra
%loro)
%2) Tutti i punti sottratti tra di loro anche ascending-ascending e
%descending- descending.

```

```

%Sia nel punto 1 che nel punto 2 se facciamo "prima data meno seconda data"
%non faremo "seconda data meno prima data" altrimenti ci ritroveremo un
%punto doppione

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Sezione 1) %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Usi questa sezione quando vuoi sottrarre gli ascending con i descending Se vuoi
usarla decommentala tutta
% ii=1;
%   for i=1:length(ascending)
%       for j=1:length(descending)
%           delta_mv_VH(ii)=mv_dateVH(ascending(i))-mv_dateVH(descending(j));
%           delta_mv_VV(ii)=mv_dateVV(ascending(i))-mv_dateVV(descending(j));
%           delta_PRI(ii)=PRI_tutte_date(ascending(i))-PRI_tutte_date(descending(j));
%           ii=ii+1;
%       end
%   end
% end
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Sezione 2) %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

%Uguale a sopra ma sottrai tutto, ascending e descending anche tra loro. 0
%usi questa parte (2) o usi quella sopra (1)

```

```

%Nuovo codice tutti con tutti i delta per sottrarre tutto anche ascending -ascending e
anche
%descending - descending. In quello scritto precedentemente ci eravamo accorti che
faceva
%elemento 1 - elemento 2 ma anche elemento 2 - elemento 1
ii=1;
for i=1:length(ascending)

```

```

    for j=1:length(descending)
    delta_PWC_VH=PWC_dateVH(ascending(i))-PWC_dateVH(descending(j));
    delta_PWC_VV=PWC_dateVV(ascending(i))-PWC_dateVV(descending(j));
    delta_PRI(ii)=PRI_tutte_date(ascending(i))-PRI_tutte_date(descending(j));
    ii=ii+1;
    end
end
j=1;
for i=1:length(ascending)
j=i;
for jj=j:length(ascending)
if(i ~= jj)
delta_PWC_VH(ii)=PWC_dateVH(ascending(i))-PWC_dateVH(ascending(jj));
delta_PWC_VV(ii)=PWC_dateVV(ascending(i))-PWC_dateVV(ascending(jj));
delta_PRI_(ii)=PRI_tutte_date(ascending(i))-PRI_tutte_date(ascending(jj));
ii=ii+1;
end
end
end
j=1;
for i=1:length(descending)
j=i;
for jj=j:length(descending)
if(i ~= jj)
delta_PWC_VH(ii)=PWC_dateVH(descending(i))-PWC_dateVH(descending(jj));
delta_PWC_VV(ii)=PWC_dateVV(descending(i))-PWC_dateVV(descending(jj));
delta_PRI(ii)=PRI_tutte_date(descending(i))-PRI_tutte_date(descending(jj));
ii=ii+1;
end
end
end
end
% Fine Sezione 2)
end
end

```

### Modello di Dobson (Matlab)

```

% CDSOIL (Dobson)
function [CD]=cdsoil(freq,SMC)

% C PROGRAMMA PER IL CALCOLO DELLA cd NEL CASO DI SUOLO
% C LA cd E' CALCOLATA AL VARIARE DELL'UMIDITA' VOLUMETRICA
% C DA 0 A 60 %
% C LE VARIABILI SONO :
% C -LA TEMPERATURA
% C -LA FREQUENZA
% C -LA DENSITA' DEL SUOLO
% C -LA COMPOSIZIONE DI TESSITURA DEL SUOLO
% C IL CALCOLO DELLA COSTANTE DIELETTRICA SI BASA SUL MODELLO
% C SEMIEMPIRICO PROPOSTO DA DOBSON ED ALTRI
% C SI ASSUMANO VALIDI I SEGUENTI PARAMETRI
% C ALFA = 0.65
% C DENSITA' SPECIFICA = SD =2.65
% C EPSILON SPECIFICA = ES =4.7
% C SI ASSUME UNA PERMEABILITA' PARI A UNO
% C Densita' di volume =1.18

```

```

% C      Temperatura del suolo =23
% C      si assume un suolo del tipo Sandyloam = 0.51 Sand; 0.13 Clay
MV=SMC/100;
ALFA =.65;
DS=2.65;
ESS=4.7;
%T=23;

% qui inserisci le temperature del terreno
T=[ ];

T=T';
DV=1.18;
S=0.95;
Cl=0.03;
B=1.09-0.11*S+0.18*Cl;
sig=-1.645+1.939*DV-0.02013*S+0.01594*Cl;
% C *****
% C      QUESTO pezzo SERVE A CALCOLARE IL VALORE DELLA
% C      COSTANTE DIELETTICA DELL'ACQUA DATA LA TEMPERATURA E
% C      LA FREQUENZA ;SI SUPPONE TRASCURABILE L'EFFETTO DELLA
% C      SALINITA'
% C      LA FORMULA USATA E' QUELLA DI DEBAYE
% C      I PARAMETRI LA TEMPERATURA T LA FREQUENZA F
A=88.045-0.4147.*T+((6.295E-4)*(T.^2))+((1.075E-05)*(T.^3));
BB=1.1109E-10-(3.824E-12).*T+(6.938E-14).*(T.^2);
B1=BB-(5.096E-16).*(T.^3);
C=B1.*(freq*1E+9);
ER=4.9+((A-4.9)./(1+C.^2));
EI=((C.*(A-4.9))./(1+C.^2));
EFW=complex(ER,EI);
% C *****
sig1=sig./(6.28.*(freq*1e+9).*A);
ES= 1+ (DV./DS)*((ESS.^ALFA)-1)+(MV.^B).*((EFW.^ALFA)-1);
es1=(sig1.*((DS-DV)./DS.*MV));
es2=complex(0.,es1);
ES=ES-es2;
CD = (ES).^ (1./ALFA);
end

```

## Modello iem (Matlab)

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% IEM %%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Nel modello le componenti cross-polari sono calcolate con 0h

```

```

function [soil_HH,soil_VV,soil_HV]=iem(esse,epsi,corr,incidence,freq,acf)
%esse=HSTD
%epsi=epsi CDsoil Dobson
%corr=LC
%incidence=LIA
%freq=5.4
%acf=2

```

```

% *****
% Programma per il calcolo dell'emissione del suolo rugoso con IEM
% il modello e' valido per bassi e alti valori di rugosita'
% dati di input:
% E = costante dielettrica del suolo
% kk = frequenza in GHz
% s = deviazione standard del suolo in cm
% lx = lunghezza di correlazione lungo x in cm
% ly = lunghezza di correlazione lungo y in cm
% *****

t1=incidence;
T=t1*pi./180;           %incidence angle
kk=freq;               %frequency
E=epsi;               %dielectric constant of soil
LX=corr;              %correlation length
S=esse;               %standard deviation of heights
corr=acf;             %autocorrelation function
LY=LX;
off=-6;

% validity check =====

L=30./kk;              %c/f
k=2.*pi./L;           %wavenumber
range=S.*LX.*k.^2;
rangemax=1.2.*sqrt(real(E));
if range < rangemax

    rr=0;
else
    rr=1;
end
%=====

TS=-T;
F=0;
FS=0.01;
M=1;
N=200;

%*****
%          CALCOLO DEL COEFFICIENTE BISTATICO
%*****COEFFICIENTI DI RIFLESSIONE DI FRESNEL(COMPLEX)*****
SSS1=sqrt(E-(sin(T).^2));
RP=(E.*cos(T)-SSS1)./(E.*cos(T)+SSS1);
RP1=(cos(T)-SSS1)./(cos(T)+SSS1);
CS1=(sin(T)).*(sin(TS)-sin(T).*cos(FS-F))./cos(TS);

%SI RICHIAMANO LE SUBROUTINE PER IL CALCOLO DEI COEFF. DI CAMPO DI KIRCHHOFF

%*****
%          CALCOLO DEI COEFFICIENTI DI CAMPO F PICCOLI
%*****
R=(RP-RP1)./2;
C1=(1+cos(T).*cos(TS))*cos(FS-F);
FVV=(2.*RP)./(cos(T)+cos(TS)).*(sin(T).*sin(TS)-C1);
FHH=(-2.*RP1)./(cos(T)+cos(TS)).*(sin(T).*sin(TS)-C1);

```

```

FHV=2.*R*sin(FS-F);
FVH=2.*R*sin(F-FS);

%*****
%   CALCOLO DEI COEFFICIENTI DI CALCOLO F GRANDI
%*****
SX1=sqrt(E-(sin(T).^2));
SS1=sqrt(E-(sin(TS).^2));
R=(RP-RP1)./2;
C=(cos(FS-F)-sin(T).*sin(TS))./(SX1.*cos(TS));
CS=(cos(FS-F)-sin(T).*sin(TS))./(SS1.*cos(T));
CS1=(sin(T)).*(sin(TS)-sin(T)*cos(FS-F))./cos(TS);
CS2=(sin(TS)).*(sin(T)-sin(TS)*cos(FS-F))./cos(T);

F1=- (cos(T).*(1-RP)-(SX1).*(1+RP))./E).*((1+RP).*cos(FS-F)+(1-RP).*E.*C)+...
((1-RP).^2-cos(T).*(1+RP).*(1-RP)./SX1).*CS1;

F2=(cos(T).*(1-RP1)-SX1.*(1+RP1)).*((1+RP1).*cos(FS-F)+(1-RP1).*C)-...
((1-RP1).*(1-RP1)-cos(T).*(1+RP1).*(1-RP1)./SX1).*CS1;

F3=(cos(T).*(1-R)-SX1.*(1+R))./E).*((1+R)./cos(TS)+(1-R).*E./SX1).*sin(FS-F)+...
((1-R).*(1-R)-cos(T).*(1-R).*(1+R)./SX1).*(sin(T).^2).*(sin(FS-F));

F4=(cos(T).*(1+R)-SX1.*(1-R)).*((1-R)./cos(TS)+(1+R)./SX1).*sin(FS-F)+...
((1+R).^2-cos(T).*(1-R).*(1+R)./SX1).*(sin(T).^2).*(sin(FS-F));

F5=- (cos(TS).*(1-RP)-SS1.*(1+RP))./E).*((1+RP).*cos(FS-F)+(1-RP).*E.*CS)+...
((1+RP).^2-cos(TS).*(1+RP).*(1-RP)./SS1).*CS2;

F6=(cos(TS).*(1-RP1)-SS1.*(1+RP1)).*((1+RP1).*cos(FS-F)+(1-RP1).*CS)-...
((1+RP1).*(1+RP1)-cos(TS).*(1+RP1).*(1-RP1)./SS1).*CS2;

F7=- (cos(TS).*(1+R)-SS1.*(1-R)).*((1-R)./cos(T)+(1+R)./SS1).*sin(FS-F)-...
((1-R).*(1-R)-cos(TS).*(1-R).*(1+R)./SS1).*sin(TS).*sin(TS).*sin(FS-F);

F8=- (cos(TS).*(1-R)-SS1.*(1+R))./E).*((1+R)./cos(T)+(1-R).*E./SS1).*sin(FS-F)-...
((1+R).*(1+R)-cos(TS).*(1-R).*(1+R)./SS1).*sin(TS).*sin(TS).*sin(FS-F);

%*****CALCOLO TERMINI IVV,IVH,IHV,IHH=====

KX=(2.*pi./L).*sin(T).*cos(F);
KY=(2.*pi./L).*sin(T).*sin(F);
KZ= S*(2.*pi./L).*cos(T);
KSX=(2.*pi./L).*sin(TS).*cos(FS);
KSY=(2.*pi./L).*sin(TS).*sin(FS);
KSZ=S*(2.*pi./L).*cos(TS);
DIFX=KSX-KX;
DIFY=KSY-KY;
QVV=0;
QVH=0;
QHV=0;
QHH=0;
IVV=0;
IVH=0;
IHV=0;
IHH=0;
NN=1;
A2=exp(-KZ.*KSZ);
A3=KSX-KX;

```

```

A4=KSY-KY;
A5=KSZ+KZ;

if((2.*pi./L)*S) <= 10
% h=waitbar(0,'IEM computing....');
for I=1:N
% waitbar(I/N,h);
NN=I.*NN;
%*****
% FUNZIONE DI AUTOCORRELAZIONE GAUSS
%*****
if acf==0
w=((LX.*LY)/(2.*I)).*exp(-((DIFX).^2).*(LX.^2)/(4.*I)).*exp(-
((DIFY).^2).*(LY.^2)/(4.*I));
elseif acf==1

w=(LX.*LY/(I.^2)).*(1+(DIFX.^2).*(LX.^2)/((I.^2)+(DIFY.^2).*(LY.^2)/(I.^2))).^(-
1.5); % controllare!!!
elseif acf==2
w=exp(-I./LX).^1.33;
end
A1=(KSZ+KZ).^I.*sqrt(w./NN);
IVV=A1.*FVW.*A2+((KSZ).^I).*F1.*sqrt(w./NN)+((KZ).^I).*F5.*sqrt(w./NN))./2;
IHH=A1.*FHH.*A2+((KSZ).^I).*F2.*sqrt(w./NN)+((KZ).^I).*F6.*sqrt(w./NN))./2;
IHV=A1.*FHV.*A2+((KSZ).^I).*F3.*sqrt(w./NN)+((KZ).^I).*F7.*sqrt(w./NN))./2;
IVH=A1.*FVH.*A2+((KSZ).^I).*F4.*sqrt(w./NN)+((KZ).^I).*F8.*sqrt(w./NN))./2;

% SI PROCEDE AL CALCOLO DEL COEFF.BISTATICO

QVV=QVV+(IVV.*conj(IVV));
QVH=QVH+(IVH.*conj(IVH));
QHV=QHV+(IHV.*conj(IHV));
QHH=QHH+(IHH.*conj(IHH));
end
% close(h)
B1=((2.*pi./L).^2).*exp(-((KZ.^2)+(KSZ.^2)))./2;
QVV=QVV.*B1;
QVH=QVH.*B1;
QHV=QHV.*B1;
QHH=QHH.*B1;
else
QHH=((2.d0.*pi./L).^2.*FHH.^2)/(4./LY.^2.*A5.^2).*exp((-A3.^2-A4.^2)/...
(4./LY.^2.*A5.^2));
QVV=((2.d0.*pi./L).^2.*FVW.^2)/(4./LY.^2.*A5.^2).*exp((-A3.^2-A4.^2)/...
(4./LY.^2.*A5.^2));
QHV=((2.d0.*pi./L).^2.*FHV.^2)/(4./LY.^2.*A5.^2).*exp((-A3.^2-A4.^2)/...
(4./LY.^2.*A5.^2));
QVH=((2.d0.*pi./L).^2.*FVH.^2)/(4./LY.^2.*A5.^2).*exp((-A3.^2-A4.^2)/...
(4./LY.^2.*A5.^2));
end

%*****
soil_VV=10.*log10(QVV);
soil_HH=10.*log10(QHH);
%***** HV & VH pol from OH model *****
%
aa=0.1;

```

```

bb=1.3;
cc=1.2;
dd=0.9;
ee=0.8;
QHV=QHH.*(aa.*(S./LX+sin(T)).^cc).*(1-exp(-dd.*((2*pi./L.*S).^ee)));
%
freqHz=freq.*10.^9;
mu0=4.*pi.*10.^(-7);
eps0=8.8541878176.*10.^(-12);
k1=2.*pi.*freqHz.*sqrt(eps0.*mu0);
[Rv0,Rh0]=refl_coeff(T,real(eps0),1);

coeff_S1=0.23;
qvv=coeff_S1.*sqrt(Rv0).*(1-exp(-k1.*(S)));
qhh=coeff_S1.*sqrt(Rh0).*(1-exp(-k1.*(S)));

QVH=qvv.*QVV;
QHV=qhh.*QHH;

%semiempirical
% b=-9.1341;
% m=0.8701;
% % QHV=m*QVV+b;
%*****
% iem_crosspol=m*10*log10(real(QHH))+b;
soil_HV=10.*log10(real(QHV))+off;
end

```

### R2\_fitting (Matlab)

```

function [R2_VH,R2_VV,aVH,aVV,mv_fittingVH,mv_fittingVV]
=R2_fitting(PRI_tutte_date,mv_dateVH,mv_dateVV);
%Curva di fitting. Sono esempi di possibili fitting non è detto che siano i migliori
%Fitting 1
fun=@(a,PRI_tutte_date)a(1).*log(PRI_tutte_date)+a(2); %Scelgo la curva di fitting che
userò. Se si usa questa funzione inseriamo degli 0 come PRI quando è presente il
valore di PWC ma è assente quello di PRI, solo per far girare il codice
%Altre possibili curve di fitting da usare (cambiare riga 3 e riga 17-25)
%Fitting 2
% fun=@(a,PRI_tutte_date)a(1)./(1+PRI_tutte_date.*a(2));
%Fitting 3
% fun=@(a,PRI_tutte_date)(a(1).*atan(a(2).*PRI_tutte_date))+a(3);
%Fitting 4
% fun=@(a,PRI_tutte_date)a(1)+(a(2).*PRI_tutte_date)./(1+a(3).*PRI_tutte_date);
%Fitting 5 Polinomiale di 2o grado
% fun=@(a,PRI_tutte_date)a(1).*(PRI_tutte_date.^2)+a(2).*PRI_tutte_date+a(3);

a0=[0.5 4]; % Punti di inizializzazione se usi fitting con due costanti (fitting 1 e
2)
% a0=[0.5 4.5 5]; %Se usi il 3o,4o oppure 5o fitting
% a0=[0.5 210 30]; %Se usi 4o oppure senza 13 e 20 Agosto

aVH=lsqcurvefit(fun,a0,PRI_tutte_date,mv_dateVH'); %Trovo gli a della curva di fitting
che ho scelto
aVV=lsqcurvefit(fun,a0,PRI_tutte_date,mv_dateVV');

```

```

%Ora calcolo R^2

%Fitting 1
mv_fittingVH=aVH(1).*log(PRI_tutte_date)+aVH(2); %Metto i coefficienti calcolati da
Matlab nella curva di fitting che ho scelto di usare
mv_fittingVV=aVV(1).*log(PRI_tutte_date)+aVV(2); %Metto i coefficienti calcolati da
Matlab nella curva di fitting che ho scelto di usare
%Fitting 2
% mv_fittingVH=aVH(1)./(1+PRI_tutte_date.*aVH(2));
% mv_fittingVV=aVV(1)./(1+PRI_tutte_date.*aVV(2));
%PRI_mw=(mv_dateVH-aVH(1))./(aVH(2).*mv_dateVH); %Retrieval
%Fitting 3
% mv_fittingVH=(aVH(1).*atan(aVH(2).*PRI_tutte_date))+aVH(3);
% mv_fittingVV=(aVV(1).*atan(aVV(2).*PRI_tutte_date))+aVV(3);
% PRI_mw=tan((mv_dateVH-aVH(3))./aVH(1))/aVH(2); %Retrieval
%Fitting 4
% mv_fittingVH=aVH(1)+(aVH(2).*PRI_tutte_date)./(1+aVH(3).*PRI_tutte_date);
% mv_fittingVV=aVV(1)+(aVV(2).*PRI_tutte_date)./(1+aVV(3).*PRI_tutte_date);
%PRI_mw=(aVH(1)-mv_dateVH)./(aVH(3).*mv_dateVH-aVH(1).*aVH(3)-aVH(2));
%Fitting 5
% mv_fittingVH=aVH(1).*(PRI_tutte_date.^2)+aVH(2).*PRI_tutte_date+aVH(3);
% mv_fittingVV=aVV(1).*(PRI_tutte_date.^2)+aVV(2).*PRI_tutte_date+aVV(3);
%PRI_mw1=(-aVH(2)-sqrt(aVH(2)^2-4*(aVH(1)*(aVH(3)-mv_dateVH)))./(2*aVH(1)));
%PRI_mw2=(-aVH(2)+sqrt(aVH(2)^2-4*(aVH(1)*(aVH(3)-mv_dateVH)))./(2*aVH(1)));

for i=1:length(mv_dateVH)
    temp_RSS_VH(i)=(mv_dateVH(i)-mv_fittingVH(i))^2;
    temp_RSS_VV(i)=(mv_dateVV(i)-mv_fittingVV(i))^2;

end
RSS_VH=sum(temp_RSS_VH);
RSS_VV=sum(temp_RSS_VV);

for i=1:length(mv_dateVH)
    temp_TSS_VH(i)=(mv_dateVH(i)-mean(mv_fittingVH))^2;
    temp_TSS_VV(i)=(mv_dateVV(i)-mean(mv_fittingVV))^2;
end
TSS_VH=sum(temp_TSS_VH);
TSS_VV=sum(temp_TSS_VV);

R2_VH=1-(RSS_VH/TSS_VH);
R2_VV=1-(RSS_VV/TSS_VV);

end

```

Codice per valutare variazioni del PWC rispetto alle variazioni di PRI (Matlab)

```

clear all
%Valori senza SMC alta
%H soglia 70% Qui inserisci i valori
% PWC2023=[];
% PWC2022=[];
% PRI2023=[];

```

```

% PRI2022=[];

%Ascending tutte date e descending-2022 70% Inserire il numero progressivo del
passaggio satellitare se ascending o descending
% ascending=[];
% descending=[];

%Ascending tutte date e descending-2023 70%. Inserire il numero progressivo del
passaggio satellitare se ascending o descending
% ascending=[];
% descending=[];

%Scegli cosa vuoi vedere come differenza
PWC_dateVH=PWC2022;
PRI_tutte_date=PRI2022;

%Se usi il 2022 altrimenti metti il 2023

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Sezione 1) %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Usi questa sezione quando vuoi sottrarre gli ascending con i descending
% ii=1;
% for i=1:length(ascending)
%     for j=1:length(descending)
%         delta_PWC_VH(ii)=PWC_dateVH(ascending(i))-PWC_dateVH(descending(j));
%         delta_PRI(ii)=PRI_tutte_date(ascending(i))-
PRI_tutte_date(descending(j));
%         ii=ii+1;
%     end
% end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Sezione 2) %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Uguale a sopra ma sottrai tutto, ascending e descending anche tra loro.
%usi questa parte (2) o usi quella sopra (1)

%Nuovo codice tutti con tutti i delta per sottrarre tutto anche ascending -ascending e
anche

```

```

%descending - descending. In quello scritto precedentemente ci eravamo accorti che
faceva
%elemento 1 - elemento 2 ma anche elemento 2 - elemento 1
ii=1;
for i=1:length(ascending)
    for j=1:length(descending)
        delta_PWC_VH(ii)=PWC_dateVH(ascending(i))-PWC_dateVH(descending(j));
        delta_PRI(ii)=PRI_tutte_date(ascending(i))-PRI_tutte_date(descending(j));
        ii=ii+1;
    end
end
j=1;
for i=1:length(ascending)
    j=i;
    for jj=j:length(ascending)
        if(i ~= jj)
            delta_PWC_VH(ii)=PWC_dateVH(ascending(i))-PWC_dateVH(ascending(jj));
            delta_PRI(ii)=PRI_tutte_date(ascending(i))-PRI_tutte_date(ascending(jj));
            ii=ii+1;
        end
    end
end
j=1;
for i=1:length(descending)
    j=i;
    for jj=j:length(descending)
        if(i ~= jj)
            delta_PWC_VH(ii)=PWC_dateVH(descending(i))-PWC_dateVH(descending(jj));
            delta_PRI(ii)=PRI_tutte_date(descending(i))-PRI_tutte_date(descending(jj));
            ii=ii+1;
        end
    end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Fine Sezione 2) %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%FINE SEZIONE per migliore R^2 sui delta %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Calcolo R2 tra i delta PWC e delta PRI stimando una relazione lineare;
R2_deltaPRI_deltaPWC_VH=fitlm(delta_PRI,delta_PWC_VH);
%Faccio una matrice di R2 tra i delta PWC e delta PRI per ogni valore di B2
%e A1

```

```

indice_figura=1;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Sezione per plot delta mv delta PRI%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%POL% VH%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

%Se volessi stampare a video il grafico tra i delta PRI e delta mv
%Stampo tante immagini quanti sono i B2 e A1 che ho impostato
figure(indice_figura)
plot(delta_PRI,delta_PWC_VH, '*b'),xlabel('\DeltaPRI [ ]'),ylabel('\DeltaPWC_{v}
[Kg/m^{2}]'),grid on
hold on
% %Se volessi rifare un fit "che gli diamo noi" come fatto prima altrimenti
% %tenere commentata questa riga di codice sotto
%
aVH_delta(1)=table2array(R2_deltaPRI_deltaPWC_VH.Coefficients(2,1));
aVH_delta(2)=table2array(R2_deltaPRI_deltaPWC_VH.Coefficients(1,1));
x=[min(delta_PRI) max(delta_PRI)];
y=aVH_delta(1).*x+aVH_delta(2);
plot(x,y, '-b');

RMSE_delta_PWC=sqrt(immse(delta_PWC_VH,(aVH_delta(1)*[delta_PRI]+aVH_delta(2))));
hold on,legend('\DeltaPWC(\DeltaPRI)', 'linear
fit', 'Location', 'Northwest'),title(['R^{2}=
',num2str(R2_deltaPRI_deltaPWC_VH.Rsquared.Ordinary), ');
RMSE=',num2str(RMSE_delta_PWC),' [Kg/m^2]')
hold off

RMSE_delta_PWC=sqrt(immse(delta_PWC_VH,(aVH_delta(1)*[delta_PRI]+aVH_delta(2))))

indice_figura=indice_figura+1;

%%%%Fine sezione plot delta mv delta PRI%%

```

# Bibliografia

- [1] Davis, B., Mane, E., Gurbuzer, L.Y., Caivano, G., Piedrahita, N., Schneider, K., Azhar, N. et al. 2023. Estimating global and country-level employment in agrifood systems. *FAO Statistics Working Paper Series*, No. 23-34. Rome, FAO, <https://www.fao.org/3/cc4337en/cc4337en.pdf>
- [2] FAO. (2023). The State of Food and Agriculture 2023. Revealing the true cost of food to transform agrifood systems. *FAO Documents*.
- [3] Chahine, M. T. (1992). The hydrological cycle and its influence on climate. *Nature*, 359(6394), 373-380.
- [4] Tapete, D., Cigna, F., Paloscia, S., Santi, E., Pettinato, S., Fontanelli, G., Chiarito, E., Notarnicola, C., Cuzzo, G., Jacob, A., De Gregorio, L., Rossi, M. (2020, March). Development of algorithms for the estimation of hydrological parameters combining COSMO-SkyMed and Sentinel time series with in situ measurements. In *2020 Mediterranean and Middle-East Geoscience and Remote Sensing Symposium (M2GARSS)* (pp. 53-56). IEEE.
- [5] Hutjes, R. W. A., Kabat, P., Running, S. W., Shuttleworth, W. J., Field, C., Bass, B., da Silva Dias, M.F., Avissar R., Becker A., Claussen M., Dolman A.J., Feddes R.A., Fosberg M., Fukushima Y., Gash J.H.C., Guenni L., Hoff H., Jarvis P.G., Kayane I., Krenke A.N., & Vörösmarty, C. J. (1998). Biospheric aspects of the hydrological cycle. *Journal of Hydrology*, 212, 1-21.
- [6] Lakhankar, T., Krakauer, N., & Khanbilvardi, R. (2009). Applications of microwave remote sensing of soil moisture for agricultural applications. *International Journal of Terraspace Science and Engineering*, 2(1), 81-91.
- [7] Macelloni, G., Paloscia, S., Pampaloni, P., Santi, E., & Tedesco, M. (2003). Microwave radiometric measurements of soil moisture in Italy. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7(6), 937-948.
- [8] Paloscia, S., Macelloni, G., Pampaloni, P., & Santi, E. (2004). The contribution of multitemporal SAR data in assessing hydrological parameters. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 1(3), 201-205.
- [9] Desa, U. N. (2016). Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development
- [10] Stogryn, A. (1971). Equations for calculating the dielectric constant of saline water (correspondence). *IEEE transactions on microwave theory and Techniques*, 19(8), 733-736.
- [11] Hallikainen, M., Ulaby, F., & Abdelrazik, M. (1986). Dielectric properties of snow in the 3 to 37 GHz range. *IEEE transactions on Antennas and Propagation*, 34(11), 1329-1340.
- [12] Ulaby, F. T., & El-Rayes, M. A. (1987). Microwave dielectric spectrum of vegetation-Part II: Dual-dispersion model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, (5), 550-557.
- [13] Paloscia, S., Pettinato, S., Santi, E., & Valt, M. (2017). COSMO-SkyMed image investigation of snow features in alpine environment. *Sensors*, 17(1), 84.

- [14] Paloscia, S., Fontanelli, G., Pettinato, S., Santi, E., Ramat, G., DaPonte, E., Abdel-Wahab M.M., Essa, Y.H., Khalil, A.A., Ouessar, M., Dhaou, H., Kassouk, Z., & Chabaane, Z. L. (2020, March). ERANET-MED OPTIMED-WATER Project: Results on soil moisture maps of semi-arid environment by using optical/microwave satellite data. In *2020 Mediterranean and Middle-East Geoscience and Remote Sensing Symposium (M2GARSS)* (pp. 216-218). IEEE.
- [15] CCRS, 2015. Tutorial: Fundamentals of Remote Sensing by Canada Centre for Remote Sensing [WWW Document]. Canada Cent. Remote Sens.
- [16] Cloude, S. (2009). *Polarisation: applications in remote sensing*. OUP Oxford.
- [17] Ulaby, F. T., Moore, R. K., & Fung, A. K. (1981). *Microwave remote sensing: Active and passive*. volume 1-microwave remote sensing fundamentals and radiometry.
- [18] Constantine A. Balanis. *Antenna theory: analysis and design*, pages 34-35. John wiley & sons, 2016.
- [19] John D Krauss and Ronald J Marhefka. *Antennas for all applications*, pages 39-40. McGraw-Hill, 2002
- [20] Pilia , S., Nesti, R., 2020. Design of corrugated circular horns [S.l.]: LAP LAMBERT ACADEMIC PUBL.
- [21] Born, M., & Wolf, E. (2013). *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. Elsevier.
- [22] Greenfield, S. A. (2008). *The human brain: A guided tour*. Basic Books.
- [23] Selleri, F. (Ed.). (1992). *Wave-particle duality* (p. 187). New York: Plenum Press.
- [24] Pozar, D. M. (2011). *Microwave engineering*. John wiley & sons. page 1.
- [25] "IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands," in IEEE Std 521-2019 (Revision of IEEE Std 521-2002) , vol., no., pp.1-15, 14 Feb. 2020, doi: 10.1109/IEEESTD.2020.8999849.
- [26] Ramat, G. (2023). Applicazioni di telerilevamento ottico ed a microonde nel settore dell'agroforestry in zone pilota della Tunisia.
- [27] <https://www.asi.it/en/earth-science/prisma/>
- [28] [https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Sentinel-2](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2)
- [29] Alparone, L., Aiazzi, B., Baronti, S., & Garzelli, A. (2015). *Remote sensing image fusion*. Crc Press.
- [30] Goetz, A. F., & Rowan, L. C. (1981). Geologic remote sensing. *Science*, 211(4484), 781-791.
- [31] <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial>
- [32] Wulfmeyer, V., Bauer, H., Di Girolamo, P., & Serio, C. (2005). Comparison of active and passive water vapor remote sensing from space: An analysis based on the simulated performance of IASI and space borne differential absorption lidar. *Remote sensing of environment*, 95(2), 211-230.
- [33] Ansmann, A., & Müller, D. (2005). Lidar and atmospheric aerosol particles. In *Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere* (pp. 105-141). New York, NY: Springer New York.
- [34] Skolnik, M. I. (1970). *Radar handbook*.
- [35] [https://seos-project.eu/marinepollution/images/aircraft\\_slar1.de.png](https://seos-project.eu/marinepollution/images/aircraft_slar1.de.png)
- [36] Curlander, J. C., & McDonough, R. N. (1991). *Synthetic aperture radar* (Vol. 11). Wiley, New York.

- [37] [https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Mission\\_ends\\_for\\_Copernicus\\_Sentinel-1B\\_satellite](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Mission_ends_for_Copernicus_Sentinel-1B_satellite)
- [38] Argenti, F., Lapini, A., Bianchi, T., & Alparone, L. (2013). A tutorial on speckle reduction in synthetic aperture radar images. *IEEE Geoscience and remote sensing magazine*, 1(3), 6-35.
- [39] Bezvesilniy, O. O., & Vavriv, D. M. (2012). Synthetic aperture radar systems for small aircrafts: Data processing approaches. *Recent Advances in Aircraft Technology*, 20, 465-498.
- [40] De Zan, F., & Guarnieri, A. M. (2006). TOPSAR: Terrain observation by progressive scans. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(9), 2352-2360.
- [41] <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar>
- [42] <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/interferometric-wide-swath>
- [43] Arienzo, A. (2022). Multi-sensor Model-based Data Fusion for Remote Sensing Applications.
- [44] [https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/document-library/-/asset\\_publisher/Wk0TKajiISaR/content/sentinel-2a-spectral-responses](https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/document-library/-/asset_publisher/Wk0TKajiISaR/content/sentinel-2a-spectral-responses)
- [45] <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>
- [46] Iannelli, G. C., & Gamba, P. (2018, July). Jointly exploiting Sentinel-1 and Sentinel-2 for urban mapping. In *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 8209-8212). IEEE.
- [47] Saganeiti, L. (2021). Monitoring and modeling urban sprinkling: a new perspective of land take, <https://iris.unibas.it/handle/11563/146670>
- [48] Lapini, A., Fontanelli, G., Pettinato, S., Santi, E., Paloscia, S., Tapete, D., & Cigna, F. (2020, September). Application of deep learning to optical and SAR images for the classification of agricultural areas in Italy. In *IGARSS 2020-2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 4163-4166). IEEE.
- [49] Segarra, J., Buchailot, M. L., Araus, J. L., & Kefauver, S. C. (2020). Remote sensing for precision agriculture: Sentinel-2 improved features and applications. *Agronomy*, 10(5), 641.
- [50] <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-2>
- [51] Lichtenthaler, H. K., Buschmann, C., Döll, M., Fietz, H. J., Bach, T., Kozel, U., Meier, D., & Rahmsdorf, U. (1981). Photosynthetic activity, chloroplast ultrastructure, and leaf characteristics of high-light and low-light plants and of sun and shade leaves. *Photosynthesis research*, 2, 115-141.
- [52] Lichtenthaler, H. K., & Meier, D. (1984). Regulation of chloroplast photomorphogenesis by light intensity and light quality. In *Seminar series-Society for Experimental Biology*.
- [53] Meier, D., & Lichtenthaler, H. K. (1981). Ultrastructural development of chloroplasts in radish seedlings grown at high-and low-light conditions and in the presence of the herbicide bentazon. *Protoplasma*, 107, 195-207.
- [54] Masiello, G., Cersosimo, A., Mastro, P., Serio, C., Venafra, S., & Pasquariello, P. (2020, September). Emissivity-based vegetation indices to monitor deforestation and forest degradation in the Congo basin rainforest. In *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXII* (Vol. 11528, pp. 125-138). SPIE.
- [55] Selye, H. (1956). *The stress of life*.

- [56] Levitt, J. (1980). Responses of plants to environmental stress. *Chilling, freezing, and high temperature stresses*.
- [57] Larcher, W. (1987). Stress bei pflanzen. *Naturwissenschaften*, 74(4), 158-167.
- [58] Lichtenthaler, H. K. (1988). In vivo chlorophyll fluorescence as a tool for stress detection in plants. In *Applications of Chlorophyll Fluorescence in Photosynthesis Research, Stress Physiology, Hydrobiology and Remote Sensing: An introduction to the various fields of applications of the in vivo chlorophyll fluorescence also including the proceedings of the first International Chlorophyll Fluorescence Symposium held in the Physikzentrum, Bad Honnef, FRG, 6–8 June 1998* (pp. 129-142). Springer Netherlands.
- [59] Gull, A., Lone, A. A., & Wani, N. U. I. (2019). Biotic and abiotic stresses in plants. *Abiotic and biotic stress in plants*, 1-19.
- [60] Stephenson, N. L. (1990). Climatic control of vegetation distribution: the role of the water balance. *The American Naturalist*, 135(5), 649-670.
- [61] Francis, B., Aravindakumar, C. T., Brewer, P. B., & Simon, S. (2023). Plant nutrient stress adaptation: A prospect for fertilizer limited agriculture. *Environmental and Experimental Botany*, 105431.
- [62] Porporato, A., Laio, F., Ridolfi, L., & Rodriguez-Iturbe, I. (2001). Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress: III. Vegetation water stress. *Advances in water resources*, 24(7), 725-744.
- [63] Smirnoff, N. (1995). *Environment and plant metabolism: flexibility and acclimation*. BIOS Scientific publishers.
- [64] Dobrota, C. (2007). Energy dependant plant stress acclimation. *Life in Extreme Environments*, 277-285.
- [65] Paloscia, S., & Pampaloni, P. (1984). Microwave remote sensing of plant water stress. *Remote Sensing of Environment*, 16(3), 249-255.
- [66] Lichtenthaler, H. K. (1996). Vegetation stress: an introduction to the stress concept in plants. *Journal of plant physiology*, 148(1-2), 4-14.
- [67] Padisak, J. (1992). Seasonal succession of phytoplankton in a large shallow lake (balaton, Hungary)--A dynamic approach to ecological memory, its possible role and mechanisms. *Journal of ecology*, 217-230.
- [68] Golinski, M., Bauch, C., & Anand, M. (2008). The effects of endogenous ecological memory on population stability and resilience in a variable environment. *ecological modelling*, 212(3-4), 334-341.
- [69] Solomon, B. D. (2023). Intergovernmental panel on climate change (IPCC). In *Dictionary of Ecological Economics* (pp. 302-302). Edward Elgar Publishing.
- [70] Pascual, L. S., Segarra-Medina, C., Gómez-Cadenas, A., López-Climent, M. F., Vives-Peris, V., & Zandalinas, S. I. (2022). Climate change-associated multifactorial stress combination: A present challenge for our ecosystems. *Journal of Plant Physiology*, 153764.
- [71] Zandalinas, S. I., & Mittler, R. (2022). Plant responses to multifactorial stress combination. *New Phytologist*, 234(4), 1161-1167.
- [72] Thenkabail, P. S., Lyon, J. G., & Huete, A. (2011). Hyperspectral remote sensing of vegetation and agricultural crops: Knowledge gain and knowledge gap after 40 years of research.
- [73] Thayer, S. S., & Björkman, O. (1990). Leaf xanthophyll content and composition in sun and shade determined by HPLC. *Photosynthesis research*, 23, 331-343.

- [74] Gamon, J. A., Field, C. B., Bilger, W., Björkman, O., Fredeen, A. L., & Peñuelas, J. (1990). Remote sensing of the xanthophyll cycle and chlorophyll fluorescence in sunflower leaves and canopies. *Oecologia*, 85, 1-7.
- [75] Gamon, J. A., Penuelas, J., & Field, C. B. (1992). A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of environment*, 41(1), 35-44.
- [76] Zhang, Q., Chen, J. M., Ju, W., Wang, H., Qiu, F., Yang, F., Fan W., Huang Q., Wang Y., Feng Y., Wang X., & Zhang, F. (2017). Improving the ability of the photochemical reflectance index to track canopy light use efficiency through differentiating sunlit and shaded leaves. *Remote Sensing of Environment*, 194, 1-15.
- [77] Sims, D. A., Luo, H., Hastings, S., Oechel, W. C., Rahman, A. F., & Gamon, J. A. (2006). Parallel adjustments in vegetation greenness and ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in response to drought in a Southern California chaparral ecosystem. *Remote Sensing of Environment*, 103(3), 289-303.
- [78] Zhang, C., Filella, I., Garbulsky, M. F., & Peñuelas, J. (2016). Affecting factors and recent improvements of the photochemical reflectance index (PRI) for remotely sensing foliar, canopy and ecosystemic radiation-use efficiencies. *Remote Sensing*, 8(9), 677.
- [79] Garbulsky, M. F., Peñuelas, J., Gamon, J., Inoue, Y., & Filella, I. (2011). The photochemical reflectance index (PRI) and the remote sensing of leaf, canopy and ecosystem radiation use efficiencies: A review and meta-analysis. *Remote sensing of environment*, 115(2), 281-297.
- [80] Kováč, D., Veselá, B., Klem, K., Večeřová, K., Kmecová, Z. M., Peñuelas, J., & Urban, O. (2020). Correction of PRI for carotenoid pigment pools improves photosynthesis estimation across different irradiance and temperature conditions. *Remote sensing of environment*, 244, 111834.
- [81] Suárez, L., Zarco-Tejada, P. J., Berni, J. A. J., González-Dugo, V., & Fereres, E. (2009). Modelling PRI for water stress detection using radiative transfer models. *Remote Sensing of Environment*, 113(4), 730-744.
- [82] Suárez, L., Zarco-Tejada, P. J., Sepulcre-Cantó, G., Pérez-Priego, O., Miller, J. R., Jiménez-Muñoz, J. C., & Sobrino, J. (2008). Assessing canopy PRI for water stress detection with diurnal airborne imagery. *Remote Sensing of Environment*, 112(2), 560-575.
- [83] Stagakis, S., González-Dugo, V., Cid, P., Guillén-Climent, M. L., & Zarco-Tejada, P. J. (2012). Monitoring water stress and fruit quality in an orange orchard under regulated deficit irrigation using narrow-band structural and physiological remote sensing indices. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 71, 47-61.
- [84] Zarco-Tejada, P.J.; González-Dugo, V.; Williams, L.E.; Suárez, L.; Berni, J.A.J.; Goldammer, D.; Fereres, E. A PRI-based water stress index combining structural and chlorophyll effects: Assessment using diurnal narrow-band airborne imagery and the CWSI thermal index. *Remote Sens. Environ.* 2013, 138, 38–50.
- [85] Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J., & Pinter Jr, P. J. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water resources research*, 17(4), 1133-1138.
- [86] Parry, C., Blonquist Jr, J. M., & Bugbee, B. (2014). In situ measurement of leaf chlorophyll concentration: analysis of the optical/absolute relationship. *Plant, cell & environment*, 37(11), 2508-2520.
- [87] Kong, J., Ryu, Y., Liu, J., Dechant, B., Rey-Sanchez, C., Shortt, R., Szutu D., Verfaillie J., Houborg R., & Baldocchi, D. D. (2022). Matching high resolution satellite data and flux

- tower footprints improves their agreement in photosynthesis estimates. *Agricultural and Forest Meteorology*, 316, 108878.
- [88] Buareal, K., Kato, T., Morozumi, T., Ono, K., & Nakashima, N. (2023). Red solar-induced chlorophyll fluorescence as a robust proxy for ecosystem-level photosynthesis in a rice field. *Agricultural and Forest Meteorology*, 336, 109473.
- [89] García-Rodríguez, L. D. C., Prado-Olivarez, J., Guzmán-Cruz, R., Rodríguez-Licea, M. A., Barranco-Gutiérrez, A. I., Perez-Pinal, F. J., & Espinosa-Calderon, A. (2022). Mathematical Modeling to Estimate Photosynthesis: A State of the Art. *Applied Sciences*, 12(11), 5537.
- [90] Masiello, G., Ripullone, F., De Feis, I., Rita, A., Saulino, L., Pasquariello, P., Cersosimo, A., Venafra, S & Serio, C. (2022). The iasi water deficit index to monitor vegetation stress and early drying in summer heatwaves: An application to southern italy. *Land*, 11(8), 1366
- [91] Santi, E., Paloscia, S., Pettinato, S., & Fontanelli, G. (2016). Application of artificial neural networks for the soil moisture retrieval from active and passive microwave spaceborne sensors. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 48, 61-73.
- [92] Amato, U., Antoniadis, A., Cuomo, V., Cutillo, L., Franzese, M., Murino, L., & Serio, C. (2008). Statistical cloud detection from SEVIRI multispectral images. *Remote Sensing of Environment*, 112(3), 750-766.
- [93] Amato, U., Antoniadis, A., Carfora, M. F., Colandrea, P., Cuomo, V., Franzese, M., Pignatti S., & Serio, C. (2013). Statistical classification for assessing PRISMA hyperspectral potential for agricultural land use. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(2), 615-625.
- [94] Mastro, P., Cimini, D., Romano, F., Ricciardelli, E., Di Paola, F., Masiello, G., & Serio, C. (2022, October). On the synergic use of satellite microwave and infrared measurements for the estimation of effective radius of ice and liquid water clouds: a regression approach based on random forests. In *Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXVII* (Vol. 12265, pp. 127-136). SPIE.
- [95] Paloscia, S. (2002). A summary of experimental results to assess the contribution of SAR for mapping vegetation biomass and soil moisture. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 28(2), 246-261.
- [96] Fontanelli, G., Paloscia, S., Zribi, M., Chahbi, A., 2013. Sensitivity analysis of X-band SAR to wheat and barley leaf area index in the Merguellil Basin. *Remote Sens. Lett.* 4
- [97] Paloscia, S., Pampaloni, P., Pettinato, S., & Santi, E. (2008). A comparison of algorithms for retrieving soil moisture from ENVISAT/ASAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(10), 3274-3284.
- [98] Paloscia, S., Pettinato, S., Santi, E., Notarnicola, C., Pasolli, L., & Reppucci, A. J. R. S. O. E. (2013). Soil moisture mapping using Sentinel-1 images: Algorithm and preliminary validation. *Remote Sensing of Environment*, 134, 234-248.
- [99] Hasted, J. B. (1973). *Aqueous dielectrics* (Vol. 122). London: Chapman and Hall.
- [100] Debye, P. (1929). Polar molecules. By P. Debye, Ph. D., Pp. 172. New York: Chemical Catalog Co., Inc., 1929. \$3.50. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 48(43), 1036-1037.
- [101] Lane, J. A., & Saxton, J. A. (1952). Dielectric dispersion in pure polar liquids at very high radio frequencies-III. The effect of electrolytes in solution. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 214(1119), 531-545.

- [102] Klein, L., & Swift, C. (1977). An improved model for the dielectric constant of sea water at microwave frequencies. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 25(1), 104-111.
- [103] Long, D., & Ulaby, F. (2015). *Microwave radar and radiometric remote sensing*. Artech.
- [104] Dobson, M. C., Ulaby, F. T., Hallikainen, M. T., & El-Rayes, M. A. (1985). Microwave dielectric behavior of wet soil-Part II: Dielectric mixing models. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, (1), 35-46.
- [105] Dunne, J. (1976). The SEASAT-a project: an overview. *OCEANS'76*, 217-221.
- [106] Knott, E. F., Schaeffer, J. F., & Tulley, M. T. (2004). *Radar cross section*. SciTech Publishing.
- [107] Vreugdenhil, M., Navacchi, C., Bauer-Marschallinger, B., Hahn, S., Steele-Dunne, S., Pfeil, I., Dorigo W., & Wagner, W. (2020). Sentinel-1 cross ratio and vegetation optical depth: A comparison over Europe. *Remote Sensing*, 12(20), 3404.
- [108] Zhang, B., Wdowinski, S., Gann, D., Hong, S. H., & Sah, J. (2022). Spatiotemporal variations of wetland backscatter: The role of water depth and vegetation characteristics in Sentinel-1 dual-polarization SAR observations. *Remote Sensing of Environment*, 270, 112864.
- [109] Paloscia, S., Macelloni, G., Pampaloni, P., & Sigismondi, S. (1999). The potential of C- and L-band SAR in estimating vegetation biomass: the ERS-1 and JERS-1 experiments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(4), 2107-2110.
- [110] Minchella, A., Del Frate, F., Capogna, F., Anselmi, S., & Manes, F. (2009). Use of multitemporal SAR data for monitoring vegetation recovery of Mediterranean burned areas. *Remote Sensing of Environment*, 113(3), 588-597.
- [111] Ferrazzoli, P., Paloscia, S., Pampaloni, P., Schiavon, G., Sigismondi, S., & Solimini, D. (1997). The potential of multifrequency polarimetric SAR in assessing agricultural and arboreous biomass. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(1), 5-17.
- [112] Mastro, P., Masiello, G., Serio, C., & Pepe, A. (2022). Change Detection Techniques with Synthetic Aperture Radar Images: Experiments with Random Forests and Sentinel-1 Observations. *Remote Sensing*, 14(14), 3323.
- [113] Thénot, F., Méthy, M., & Winkel, T. (2002). The Photochemical Reflectance Index (PRI) as a water-stress index. *International Journal of Remote Sensing*, 23(23), 5135-5139.
- [114] Panigada, C., Rossini, M., Meroni, M., Cilia, C., Busetto, L., Amaducci, S., Boschetti, M., Cogliati, S., Picchi, V., Pinto, F., Marchesi, A., & Colombo, R. (2014). Fluorescence, PRI and canopy temperature for water stress detection in cereal crops. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 30, 167-178.
- [115] Flores-Anderson, A. I., Herndon, K. E., Thapa, R. B., & Cherrington, E. (2019). *The SAR handbook: Comprehensive methodologies for forest monitoring and biomass estimation* (No. MSFC-E-DAA-TN67454).
- [116] Assefa, Y., Staggenborg, S. A., & Prasad, V. P. (2010). Grain sorghum water requirement and responses to drought stress: A review. *Crop management*, 9(1), 1-11.
- [117] Rockström, J., Karlberg, L., Wani, S. P., Barron, J., Hatibu, N., Oweis, T., Bruggeman A., Farahani J., & Qiang, Z. (2010). Managing water in rainfed agriculture—The need for a paradigm shift. *Agricultural Water Management*, 97(4), 543-550.
- [118] Paloscia, S., & Pampaloni, P. (1992). Microwave vegetation indexes for detecting biomass and water conditions of agricultural crops. *Remote sensing of environment*, 40(1), 15-26.

- [119] Tsang, L., Kong, J. A., & Shin, R. T. (1985). Theory of microwave remote sensing, pp. 25-31.
- [120] Balanis, C. A. (2012). *Advanced engineering electromagnetics*. John Wiley & Sons.
- [121] Ulaby, F. T., Moore, R. K., & Fung, A. K. (1982). Microwave remote sensing: Active and passive. Volume 2-Radar remote sensing and surface scattering and emission theory.
- [122] Cihlar, J., & Ulaby, F. T. (1974). *Dielectric properties of soils as a function of moisture content* (No. NASA-CR-141868).
- [123] Attema, E. P. W., & Ulaby, F. T. (1978). Vegetation modeled as a water cloud. *Radio science*, 13(2), 357-364.
- [124] Chukhlantsev, A. A. (2006). *Microwave radiometry of vegetation canopies* (Vol. 24). Springer Science & Business Media.
- [125] BROGIONI, M. (2008). Modeling microwave emission from snow covered soil.
- [126] Rice, S. O. (1951). Reflection of electromagnetic waves from slightly rough surfaces. *Communications on pure and applied mathematics*, 4(2-3), 351-378.
- [127] Beckmann, P., & Spizzichino, A. (1987). The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces. *Norwood*.
- [128] Fung, A. K., Li, Z., & Chen, K. S. (1992). Backscattering from a randomly rough dielectric surface. *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing*, 30(2), 356-369.
- [129] Hsieh, C. Y., Fung, A. K., Nesti, G., Sieber, A. J., & Coppo, P. (1997). A further study of the IEM surface scattering model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(4), 901-909.
- [130] Hsieh, C. Y., & Fung, A. K. (2003). Bistatic multiple scattering from randomly rough surfaces. *IEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation*, 150(4), 214-218.
- [131] Chen, K. S., Wu, T. D., Tsay, M. K., & Fung, A. K. (2000). Note on the multiple scattering in an IEM model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(1), 249-256.
- [132] Wu, T. D., Chen, K. S., Shi, J., & Fung, A. K. (2001). A transition model for the reflection coefficient in surface scattering. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(9), 2040-2050.
- [133] Fung, A. K., & Chen, K. S. (2004). An update on the IEM surface backscattering model. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 1(2), 75-77.
- [134] Álvarez-Pérez, J. L. (2001). An extension of the IEM/IEMM surface scattering model. *Waves in Random Media*, 11(3), 307.
- [135] Fung, A. K., Liu, W. Y., Chen, K. S., & Tsay, M. K. (2002). An improved IEM model for bistatic scattering from rough surfaces. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 16(5), 689-702.
- [136] Soja, M. J. (2009). Electromagnetic models of bistatic radar scattering from rough surfaces with Gaussian correlation function.
- [137] Tsang, L., Kong, J. A., & Ding, K. H. (2000). *Scattering of electromagnetic waves: theories and applications* (Vol. 15). John Wiley & Sons.
- [138] Wu, T. D., & Chen, K. S. (2004). A reappraisal of the validity of the IEM model for backscattering from rough surfaces. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(4), 743-753.
- [139] Wu, T. D., Chen, K. S., Shi, J., Lee, H. W., & Fung, A. K. (2008). A study of an AIEM model for bistatic scattering from randomly rough surfaces. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(9), 2584-2598.

- [140] Oh, Y., Sarabandi, K., & Ulaby, F. T. (1992). An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2), 370-381.
- [141] Graham, A. J., & Harris, R. (2003). Extracting biophysical parameters from remotely sensed radar data: A review of the water cloud model. *Progress in Physical Geography*, 27(2), 217-229.
- [142] Molden, D., Vithanage, M., De Fraiture, C., Faures, J. M., Gordon, L., Molle, F., & Peden, D. (2011). 4.21-Water availability and its use in agriculture. *Treatise on water science*, 707-732.
- [143] <https://world-soils.com/>
- [144] 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*, 202, 18-27.
- [145] Clemente, J. P., Fontanelli, G., Ovando, G. G., Roa, Y. L. B., Lapini, A., & Santi, E. (2020, March). Google Earth Engine: Application of algorithms for remote sensing of crops in Tuscany (Italy). In *2020 IEEE Latin American GRSS & ISPRS Remote Sensing Conference (LAGIRS)* (pp. 195-200). IEEE.
- [146] <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/sentinels-toolboxes>
- [147] <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s1-processing>
- [148] [https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/USGS\\_SRTMGL1\\_003](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/USGS_SRTMGL1_003)
- [149] <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>
- [150] [https://handheld.psi.cz/documents/PlantPen%20NDVI%20and%20PRI\\_01\\_2020.pdf](https://handheld.psi.cz/documents/PlantPen%20NDVI%20and%20PRI_01_2020.pdf)
- [151] Jakobsen, I., & Rosendahl, L. (1990). Carbon flow into soil and external hyphae from roots of mycorrhizal cucumber plants. *New Phytologist*, 115(1), 77-83.
- [152] Poorter, H., & Remkes, C. (1990). Leaf area ratio and net assimilation rate of 24 wild species differing in relative growth rate. *Oecologia*, 83(4), 553-559.
- [153] Konings, A. G., Rao, K., & Steele-Dunne, S. C. (2019). Macro to micro: microwave remote sensing of plant water content for physiology and ecology. *New Phytologist*, 223(3), 1166-1172.
- [154] Pilia, S., Fontanelli, G., Santurri, L., Ramat, G., Baroni, F., Santi, E., Lapini, A., Pettinato, S., & Paloscia, S. (2023, November). Data integration of Sentinel-1 and Sentinel-2 for evaluating vegetation biomass and water status. In *2023 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor)* (pp. 694-698). IEEE.
- [155] <https://www.specmeters.com/FieldScout-TDR350-Soil-Moisture-Meter>
- [156] Fung, A. K. (1994). Microwave scattering and emission models and their applications.
- [157] Baghdadi, N., Cerdan, O., Zribi, M., Auzet, V., Darboux, F., El Hajj, M., & Kheir, R. B. (2008). Operational performance of current synthetic aperture radar sensors in mapping soil surface characteristics in agricultural environments: application to hydrological and erosion modelling. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(1), 9-20.
- [158] Li, Q., Shi, J., & Chen, K. S. (2002). A generalized power law spectrum and its applications to the backscattering of soil surfaces based on the integral equation model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(2), 271-280.
- [159] <https://www.lamma.toscana.it/meteo/osservazioni-e-dati/dati-stazioni>

- [160] Verhoest, N. E., Lievens, H., Wagner, W., Álvarez-Mozos, J., Moran, M. S., & Mattia, F. (2008). On the soil roughness parameterization problem in soil moisture retrieval of bare surfaces from synthetic aperture radar. *Sensors*, 8(7), 4213-4248.
- [161] Cai, Y., Zhang, M., & Lin, H. (2020). Estimating the urban fractional vegetation cover using an object-based mixture analysis method and Sentinel-2 MSI imagery. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 341-350.
- [162] Andreatta, D., Gianelle, D., Scotton, M., & Dalponte, M. (2022). Estimating grassland vegetation cover with remote sensing: A comparison between Landsat-8, Sentinel-2 and PlanetScope imagery. *Ecological Indicators*, 141, 109102.
- [163] Jennings, S. B., Brown, N. D., & Sheil, D. (1999). Assessing forest canopies and understorey illumination: canopy closure, canopy cover and other measures. *Forestry*, 72(1), 59-74.
- [164] <https://canopeoapp.com/#/login>
- [165] Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote sensing of environment*, 83(1-2), 195-213.
- [166] KRIEGLER, F. J. (1969). Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition. In *Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment* (pp. 97-131).
- [167] Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*, 25(3), 295-309.
- [168] Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H., & Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. *Remote sensing of environment*, 48(2), 119-126.
- [169] Hunt Jr, E. R., & Rock, B. N. (1989). Detection of changes in leaf water content using near-and middle-infrared reflectances. *Remote sensing of environment*, 30(1), 43-54.
- [170] Gao, B. C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of environment*, 58(3), 257-266.
- [171] Barnes, E. M., Clarke, T. R., Richards, S. E., Colaizzi, P. D., Haberland, J., Kostrzewski, M., Waller, P., Choi, C., Riley, E., Thompson, T., Lascano, R.J., Li, H., Moran, M. S. (2000, July). Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data. In *Proceedings of the fifth international conference on precision agriculture, Bloomington, MN, USA* (Vol. 1619, No. 6).
- [172] McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International journal of remote sensing*, 17(7), 1425-1432.
- [173] Gamon, J. A., & Surfus, J. S. (1999). Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer. *The New Phytologist*, 143(1), 105-117.
- [174] Merzlyak, M. N., Gitelson, A. A., Chivkunova, O. B., & Rakitin, V. Y. (1999). Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiologia plantarum*, 106(1), 135-141.
- [175] Penuelas, J., Baret, F., & Filella, I. (1995). Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica*, 31(2), 221-230.
- [176] Wong, C. Y., & Gamon, J. A. (2015). Three causes of variation in the photochemical reflectance index (PRI) in evergreen conifers. *New Phytologist*, 206(1), 187-195.

- [177] Takala, T. L., & Mõttus, M. (2016). Spatial variation of canopy PRI with shadow fraction caused by leaf-level irradiation conditions. *Remote Sensing of Environment*, 182, 99-112.
- [178] Zhang, C., Filella, I., Liu, D., Ogaya, R., Llusà, J., Asensio, D., & Peñuelas, J. (2017). Photochemical reflectance index (PRI) for detecting responses of diurnal and seasonal photosynthetic activity to experimental drought and warming in a Mediterranean shrubland. *Remote Sensing*, 9(11), 1189.
- [179] Wahab, I., Hall, O., & Jirstrom, M. (2018). Remote sensing of yields: Application of uav imagery-derived ndvi for estimating maize vigor and yields in complex farming systems in sub-saharan africa. *Drones*, 2(3), 28.
- [180] <https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/modis>
- [181] Ouaadi, N., Jarlan, L., Ezzahar, J., Khabba, S., Le Dantec, V., Rafi, Z., Zribi, M., & Frison, P. L. (2020, March). Water stress detection over irrigated wheat crops in semi-arid areas using the diurnal differences of Sentinel-1 backscatter. In *2020 Mediterranean and Middle-East Geoscience and Remote Sensing Symposium (M2GARSS)* (pp. 306-309). IEEE.
- [182] [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/european-and-global-drought-observatories/current-drought-situation-europe\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/european-and-global-drought-observatories/current-drought-situation-europe_en)
- [183] Amiri, M. A., & Gocic, M. (2023). Analysis of temporal and spatial variations of drought over Serbia by investigating the applicability of precipitation-based drought indices. *Theoretical and Applied Climatology*, 154(1), 261-274.
- [184] Edwards, B., Gray, M., & Hunter, B. (2019). The social and economic impacts of drought. *Australian Journal of Social Issues*, 54(1), 22-31.