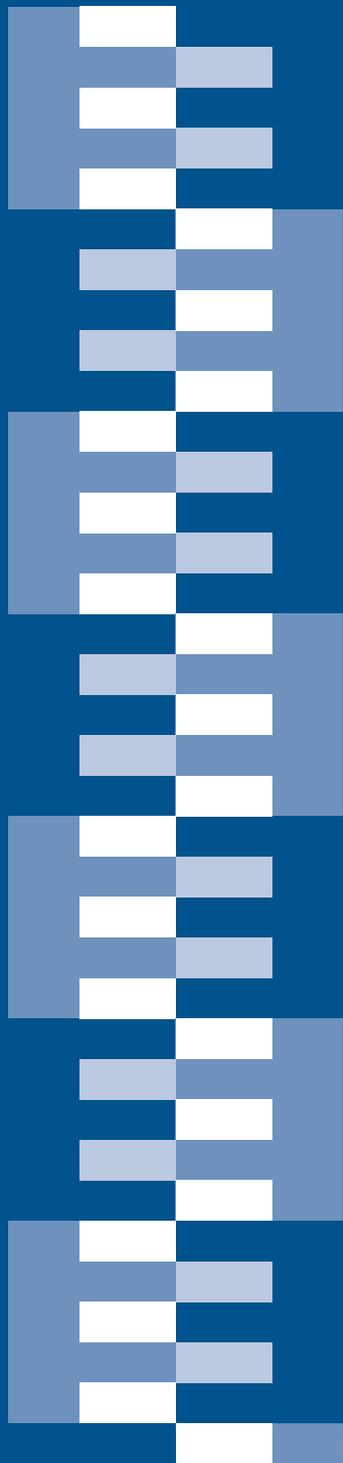


BOLLETTINO

# SIFET

SOCIETÀ ITALIANA DI FOTOGRAMMETRIA E TOPOGRAFIA



# 21

# Bollettino della Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia

ISSN 1721-971X & ISSN 2784-9473 (online)

## Direttore responsabile | Chief Editor

Prof. Andrea Maria Lingua

## Segreteria di Redazione | Publishing Editor

e-mail: redazione@sifet.org



I contributi di tutte le sezioni sono sottoposti a revisione tra pari, se accettati sono condivisi con licenza CC-BY-SA, il copyright rimane all'autore(i).

All the editorial sections are open submissions, peer-reviewed and indexed, copyright remains with the author(s).



## Uso di immagini iperspettrali per l'agricoltura di precisione

Andrea Maria Lingua, Francesca Parizia

1-11

## La modifica delle equazioni di Soldner per l'esecuzione dei calcoli geodetici in coordinate di Gauss nell'ambito del campo sferico - parte 1: principi teorici

Sabatino Di Filippo

12-26

## Il progetto up4dream droni per la realizzazione di cartografia nei paesi in via di sviluppo

Filiberto Chiabrando, Jessica Comino, Andrea Lingua, Paolo Maschio, Tautvydas Juskauskas

27-35

## Identificazione delle aree percorse da incendio mediante dati radar e ottici telerilevati

Joyce Machado Nunes Romeiro, Fillipe Tamiozzo Pereira Torres, Francesco Pirotti

36-56



# USO DI IMMAGINI IPERSPETTRALI PER L'AGRICOLTURA DI PRECISIONE

## USE OF HYPERSPECTRAL IMAGES FOR PRECISION AGRICULTURE

F. Parizia <sup>a</sup>, A. Lingua <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Laboratorio di Geomatica, Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture  
s266412@studenti.polito.it

<sup>b</sup> PIC4SeR (Polito Interdepartmental Centre of Service Robotics), Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino  
andrea.lingua@polito.it

**PAROLE CHIAVE:** agricoltura di precisione, classificazione, immagini iperspettrali, vigneto

**KEY WORDS:** precision agriculture, classification, hyperspectral images, vineyard

### RIASSUNTO

Il tema emergente dell'Agricoltura di Precisione definisce un ambito multidisciplinare di indagine del suolo e dei tessuti vegetali, in cui le informazioni tematiche radiometriche acquisite ben oltre il campo del visibile sono essenziali per sviluppare processi di coltivazione sostenibili, economici ed efficaci. Superando le ben note applicazioni basate su immagini acquisite da piattaforma satellitare, utili in analisi a piccola scala con dimensioni della minima cella di qualche metro (o qualche decina di metri), l'uso di mezzi autonomi terrestri, opportunamente dotati di sensori multi/iperspettrali (piattaforme robotiche), rende possibile l'acquisizione di informazioni a grandissima scala che, mediante procedure anche automatiche, permette lo sviluppo di una grande varietà di approcci differenti al territorio coltivato, promuovendo un'indagine puntuale e non generalizzata. In questo contesto, lo studio descritto si pone l'obiettivo di presentare una particolare applicazione rivolta all'elaborazione e interpretazione di immagini acquisite in un vigneto dell'Astigiano, derivanti dall'uso della camera iperspettrale Rikola direttamente a terra, al fine di sviluppare una stima anticipata della produzione.

In fase di pre-processamento, le immagini acquisite sono state calibrate in termini sia geometrici che radiometrici, generando le immagini calibrate sottoposte a classificazione per estrarre i grappoli mediante tecniche di Intelligenza Artificiale. Tali grappoli sono stati in seguito modellati in termini tridimensionali mediante metodi di fotogrammetria digitale secondo l'approccio della Structure from Motion, procedendo alla valutazione del loro volume: la stima finale della produzione complessiva del vigneto è stata realizzata mediante lo sviluppo di una legge approssimata verificata empiricamente.

### ABSTRACT

The emerging theme of Precision Agriculture defines a multidisciplinary subject of investigation of soil and plant tissues, in which the radiometric thematic information acquired far beyond the visible field is essential to develop sustainable, economical and effective cultivation processes. Overcoming the well-known applications based on images acquired from a satellite platform, useful in small-scale analysis with minimum cell dimensions of a few meters (or a few tens of meters), the use of autonomous terrestrial means, properly equipped with multi/hyperspectral sensors (robotic platforms), makes it possible to acquire information on a very large scale that, also through automatic procedures, allows the development of a great variety of different approaches to the cultivated territory, promoting a precise and not generalized investigation. In this context, the described study aims to present a particular application addressed to the elaboration and interpretation of images acquired in a vineyard in the province of Asti, images derived from the use of the Rikola hyperspectral camera directly on the ground, to estimate beforehand the production.

In the pre-processing, the acquired images were calibrated in both geometric and radiometric terms, generating the calibrated images subjected to classification in order to extract the bunches of grapes using Artificial Intelligence techniques. These bunches of grapes were subsequently modeled in three-dimensional terms using digital photogrammetry methods according to the Structure from Motion approach, proceeding with the evaluation of their volume: the final estimation of the overall production of the vineyard was made through the development of an approximate law empirically verified.

### 1. INTRODUZIONE

L'Agricoltura di Precisione è una delle possibili applicazioni del Telerilevamento: il principio cardine di tale disciplina consiste nel tener conto della variabilità, nel tempo e nello spazio, dei fattori che influiscono sul processo produttivo agricolo (Casa et al., 2016).

Il Telerilevamento è allora sistematicamente impiegato per il monitoraggio della vegetazione e dei parametri ambientali, al

fine di ottimizzare le attività decisionali in ambito agroforestale (Yahui Guo et al., 2019).

L'uso della tecnologia iperspettrale, a differenti scale spaziali, è un aspetto importante nella gestione e nel monitoraggio agricolo, permettendo una quantificazione ottimale di variabili biofisiche del suolo e delle colture (Pascucci et al., 2020): l'analisi iperspettrale va infatti a supporto di tale tecnica, in quanto, dall'acquisizione ed elaborazione di immagini digitali è possibile definire indici e firme spettrali di elementi di interesse, classificando il territorio in esame (Borgogno Mondino et al.,

2015). L'Agricoltura di Precisione così descritta è applicata sia su sistemi erbacei che sistemi arborei e, all'interno di questi ultimi, si distingue la Viticoltura di Precisione, particolarmente importante in Italia (Casa et al., 2016).

Il caso studio qui discusso pone allora l'attenzione sulla valutazione anticipata della produzione in un vigneto: a tal fine, sono impiegate immagini iperspettrali, prodotte con applicazione della camera Rikola (sviluppata dal VTT Technical Research Centre of Finland e prodotta da Senop) direttamente a terra, e fotografie da dispositivo cellulare.

Il materiale prodotto è elaborato in due flussi paralleli: le immagini iperspettrali, una volta calibrate geometricamente e radiometricamente, sono sottoposte a classificazione, tramite applicazione di differenti Intelligenze Artificiali; le fotografie scattate con cellulare sono applicate per la generazione di un modello tridimensionale. Da tale modello, rappresentativo di una porzione di filare, sono estrapolati i singoli grappoli, così analizzati in volume.

Il caso studio vuole inoltre individuare una legge approssimata, utile per la rapida quantificazione dei volumi di interesse, e un possibile automatismo del processo presentato, con acquisizione non manuale delle immagini tramite posizionamento della camera su di una piattaforma robotica.

## 2. FASE DI ACQUISIZIONE

L'acquisizione delle immagini digitali, propedeutica agli stadi successivi di elaborazione e interpretazione, è svolta in un vigneto dell'Astigiano, un vitigno Barbera: esso è localizzato nel comune di Vinchio, frazione Noche, in provincia di Asti, a circa 60 km dalla città di Torino.

Le immagini sono prodotte in data 15 settembre 2020: poiché la vendemmia di questa tipologia di vitigno è eseguita tra la fine del mese di settembre e l'inizio del mese di ottobre, l'acquisizione del dato in tale giornata ha permesso di ottenere un'informazione quanto più completa e vicina a quella reale in termini di grappoli e, conseguentemente, di produzione.

Tale fase del lavoro ha previsto la produzione di immagini iperspettrali e, parallelamente, di fotografie da dispositivo cellulare: queste ultime sono di accompagnamento all'analisi delle immagini iperspettrali, oltre che necessarie per la generazione del modello tridimensionale di una porzione di filare.

Dettagliatamente, il dato iperspettrale consiste in un'immagine telerilevata caratterizzata da un elevato numero di bande spettrali (anche fino a 100 bande), le quali, se confrontate con il dato multispettrale, presentano ampiezze minori, dell'ordine di una decina di nanometri. Date tali caratteristiche, l'informazione ottenuta dal sensore iperspettrale assume perciò un comportamento assimilabile al continuo, ben adatto alla generazione delle firme spettrali, fondamentali in tale studio.

I dati iperspettrali sono prodotti con posizionamento della camera iperspettrale direttamente a terra. La camera impiegata in questo progetto è la camera Rikola, sviluppata dal VTT Technical Research Centre of Finland e prodotta da Senop: essa è uno dei dispositivi più leggeri tra quelli con un'elevata risoluzione spettrale (Musci et al., 2019; Senop, 2018). È basata su filtri in grado di lavorare nel range spettrale compreso tra 500 nm e 900 nm, includendo due sensori: il primo sensore (definito Sensore 1), acquisisce bande nell'infrarosso vicino, tra 659.2 nm e 802.6 nm, mentre il secondo (Sensore 2) catture le bande del visibile, tra 502.8 nm e 635.1 nm (Musci et al., 2019).

In particolare, le immagini acquisite in questo caso studio contengono informazioni relative a 97 bande, la cui lunghezza d'onda varia tra 505.84 nm (banda 1) e 902.39 nm (banda 97), con passo di circa 4 nm tra bande successive. Le immagini

restituite hanno dimensione 1010 x 1010 pixel, con dato in virgola mobile (*floating point*), registrato sotto forma di bande sequenziali (BSQ, *band sequential*)

Per l'acquisizione, la camera iperspettrale è posta a cavallo tra due filari, mantenendola quanto più possibile centrale tra i due: le immagini sono prodotte in sei diversi punti, avanzando sempre di una pari quantità di tre passi in direzione dei filari stessi. A meno di eccezioni, in ciascuna posizione sono prodotte tre immagini: la prima maggiormente rivolta verso il filare di sinistra, la seconda con vista centrale e l'ultima con orientamento verso il filare di destra.

In condizioni di luce simili a quelle del caso studio, il tempo di integrazione richiesto dal sensore per l'acquisizione delle immagini è generalmente posto pari a 5 o 10 ms; inoltre, le immagini iperspettrali sono immediatamente sottoposte a una prima correzione di *Dark Reference*, volta alla rimozione del segnale naturalmente presente all'interno della camera.

In totale sono prodotte diciotto immagini, tutte nell'arco di tempo compreso tra le ore 14.30 e le ore 15.00, mantenendo così delle condizioni abbastanza omogenee di luce, seppur vi siano differenze di soleggiamento tra i due filari. In tempi successivi, due delle immagini prodotte sono scattate, con elaborazione finale di sedici immagini iperspettrali.

In contemporanea all'utilizzo della camera iperspettrale, sono scattate le fotografie con dispositivo cellulare: tali immagini sono prodotte sia occupando la medesima posizione della camera Rikola (Fig. 1), così da avere delle immagini quanto più confrontabili tra loro, sia inquadrando, da differenti punti di vista, una medesima porzione del filare posto a destra. In particolare, i soggetti di queste ultime fotografie, sedici in totale, sono tre piante di vite consecutive, poste all'incirca a metà filare.



Figura 1. Filari del vigneto, utilizzo del pannello MAPIR

Come visibile in Figura 1, in fase di acquisizione è inoltre utilizzato il pannello MAPIR: tale pannello, di dimensioni 31.75 x 25.4 x 3.18 cm (MAPIR Camera, 2021), è costituito da quattro elementi, ciascuno dei quali possiede una curva di riflettanza nota. Il materiale di cui essi sono composti è simile al feltro, montato su di un substrato di plastica: grazie alle proprietà di riflessione totale, esso può essere facilmente catturato da qualsiasi angolazione (MAPIR Camera, 2021).

## 3. ELABORAZIONE DEI DATI

Terminata la fase di acquisizione, la successiva elaborazione dei dati prodotti è ripartita in due flussi paralleli (Fig. 2): i prodotti del pre-processamento delle immagini iperspettrali grezze, derivanti dalle calibrature geometrica e radiometrica, sono sottoposti a classificazione in ENVI e ArcGIS Pro; le fotografie prodotte con cellulare sono invece applicate per la generazione del modello tridimensionale, richiedendo l'uso dei software

Agisoft Metashape e CloudCompare, al fine di valutare la produzione del sistema.



Figura 2. Diagrammi di flusso, elaborazione dei dati

### 3.1 La calibrazione geometrica

La calibrazione geometrica svolta sulle immagini iperspettrali è atta all'eliminazione delle distorsioni caratterizzanti il dato grezzo: in fase di acquisizione, l'obiettivo della camera genera tali distorsioni, deformando l'oggetto ripreso e falsando l'informazione reale.

La correzione in questione richiede allora la conoscenza dei parametri di orientamento interno della camera, ed è svolta secondo il procedimento descritto da (Musci et al., 2019), ripartito in quattro fasi:

1. separazione delle singole bande di ciascuna immagine iperspettrale;
2. calibrazione di ciascuna banda;
3. generazione delle immagini *undistorted* in singola banda;
4. ricostruzione delle nuove immagini iperspettrali corrette (*undistorted*).

Essa è svolta in ENVI e in MATLAB: in particolare, l'ambiente MATLAB fornisce un'applicazione ('*Camera Calibrator*', appartenente al pacchetto '*Image Processing and Computer Vision*') in grado di eseguire essa stessa la calibrazione, richiedendo in ingresso una serie di immagini di una scacchiera di precisione (Fig. 3) e i parametri da analizzare. A partire dal codice fornito dal *tool*, è sviluppata una nuova procedura, ampliata e corretta, per soddisfare le necessità di questo lavoro.

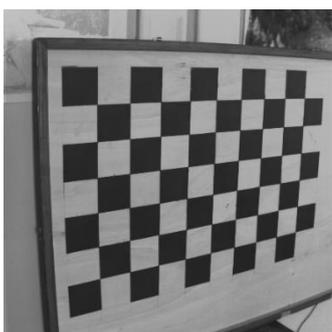


Figura 3. Un esempio di immagine della scacchiera di calibrazione

I parametri da analizzare risultano essere la lunghezza focale, le coordinate del punto principale, lo *skew* e i coefficienti di distorsione, radiale e tangenziale. Tali parametri sono valutati distintamente per i due sensori della camera Rikola (Tab. 1), in quanto presentano delle differenze non trascurabili: come spiegato da (Musci et al., 2019), è il mancato perfetto allineamento tra i due sensori a essere individuato come la causa delle differenze presenti. Per la correzione delle immagini in singola banda, la lunghezza focale, il punto principale e lo *skew*

di ciascun sensore sono inseriti in un'apposita matrice intrinseca, differentemente dai coefficienti di distorsione, utilizzati singolarmente: qualora la banda sia rappresentativa di una lunghezza d'onda compresa negli intervalli spettrali (502.8 nm - 635.1 nm) o (659.2 nm - 802.6 nm), essa è corretta sulla base dei coefficienti calcolati rispettivamente per il Sensore 2 e per il Sensore 1. Le bande calibrate sono riunite nelle nuove immagini iperspettrali corrette.

Parametri	Sensore 1	Sensore 2
Distanza focale (pixel)	1606.050	1591.932
Punto principale, $\epsilon_0$ e $\eta_0$ (pixel)	475.284	476.875
	518.506	522.153
Skew (-)	-10.311	-10.359
$k_1$ (pixel <sup>-2</sup> )	-0.335	-0.304
$k_2$ (pixel <sup>-4</sup> )	0.335	0.343
$k_3$ (pixel <sup>-6</sup> )	-1.086	-1.122
$P_1$ (pixel <sup>-1</sup> )	-0.00082	-0.00119
$P_2$ (pixel <sup>-1</sup> )	-0.00132	-0.00157

Tabella 1. Parametri e coefficienti finali, Sensore 1 e Sensore 2

### 3.2 La calibrazione radiometrica

Le immagini iperspettrali hanno subito una calibrazione radiometrica al fine di trasformare i *Digital Number* (DN) in valori di riflettanza (Yahui Guo et al., 2019).

In fase di acquisizione, il dato misurato dal sensore in ogni banda è convertito da radianza a DN, caratterizzante l'immagine digitale grezza: per facilità di memorizzazione, il segnale incidente è trasformato, per ciascun *pixel*, in tale valore numerico, corrispondente a un livello di grigio, in ogni banda dell'immagine. Si vogliono eliminare tutte le possibili cause di variabilità e influenza sui DN, individuabili nelle caratteristiche del sensore e nelle condizioni esterne di illuminazione.

Numerosi approcci consentono la taratura della riflettanza, convertendo i DN per le superfici di analisi: in questo lavoro è applicata la calibrazione radiometrica tramite il metodo empirico di Regressione Lineare (*Linear Regression Method*, LRM). Come descritto in (Yahui Guo et al., 2019), si basa su tre stadi:

1. misurazione dei DN in regioni note, denominate *Region of Interest* (ROIs), di cui siano noti i valori di riflettività nelle varie lunghezze d'onda;
2. individuazione delle equazioni di calibrazione per ogni banda, dalla relazione tra DN e riflettività delle ROIs;
3. calibrazione dell'immagine in tutte le bande mediante le equazioni sopra definite.

Il metodo LRM è applicato in ENVI, software creato per l'analisi e il processamento di immagini geospaziali. Innanzitutto, per la definizione delle ROI è utilizzato il pannello MAPIR (Fig. 4): come anticipato, è costituito di quattro elementi, rispettivamente di colore bianco, grigio chiaro, grigio scuro e nero, e di cui sono note le curve di riflettività, fornite da (MAPIR Camera, 2021).

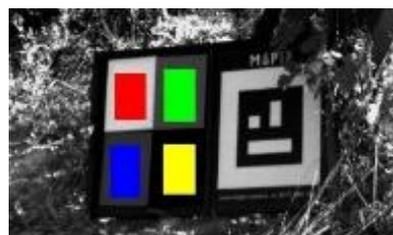


Figura 4. Il pannello MAPIR usato per la calibrazione radiometrica con le ROI individuate

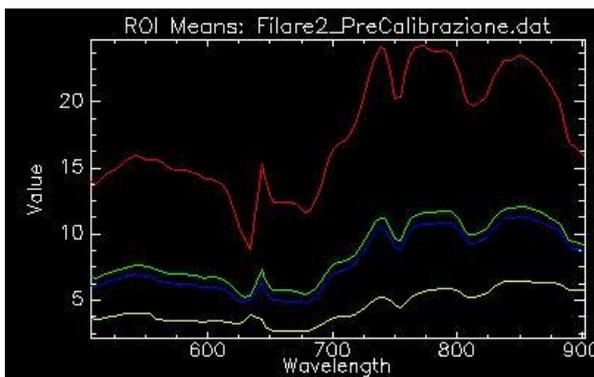


Figura 5. Curve DN-lunghezza d'onda, pre-calibrazione

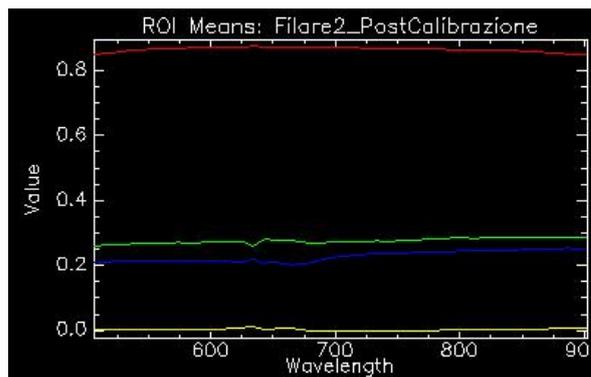


Figura 6. Firme spettrali, post-calibrazione

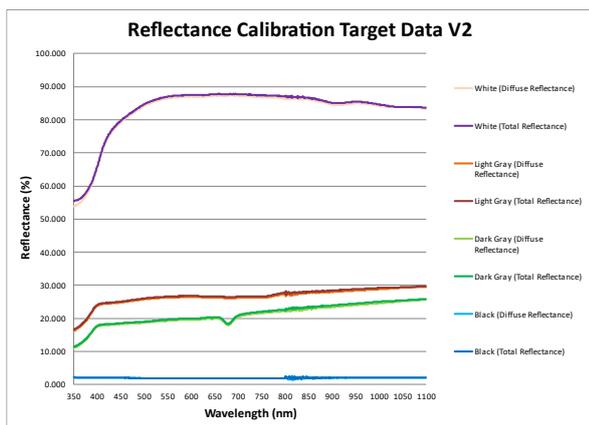


Figura 7. Firme spettrali, MAPIR (MAPIR Camera, 2021)

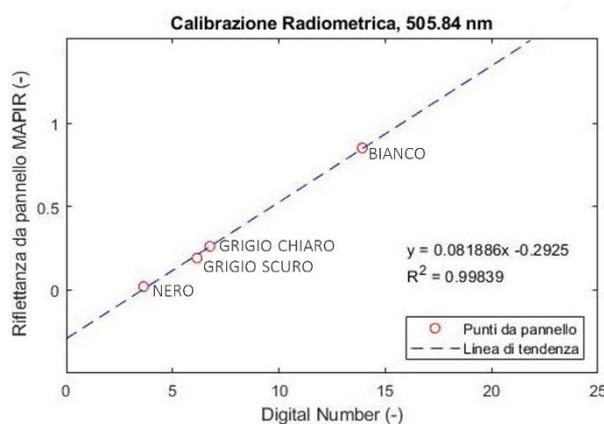


Figura 8. Esempio di retta di interpolazione, banda 1

Per ciascuna immagine, utilizzando il 'ROI Tool' fornito all'utente, sono individuate quattro ROI, una per sezione del pannello; mantenendo una certa distanza dai bordi radiometrici, le ROI sono associate ai seguenti colori: rosso per l'elemento bianco, verde per il grigio chiaro, blu per il grigio scuro e giallo per il nero. Tracciate le ROI, la calibrazione è svolta, immagine per immagine, tramite il tool 'Empirical Line - Compute Factors and Calibrate', fornendo come dati di ingresso due file .txt:

1. il file contenente la riflettività del pannello MAPIR in funzione della lunghezza d'onda, nota a partire da (MAPIR Camera, 2021) e comune a tutte le immagini, inserito nel campo 'Field Spectra';
2. il file contenente i DN del pannello MAPIR in funzione della lunghezza d'onda, inserito nel campo 'Image Spectra'.

Per ogni banda, sulla base di quattro coppie DN - riflettività, il software individua la retta di calibrazione tramite regressione lineare, applicando l'equazione trovata su tutti i *pixel* dell'immagine iperspettrale.

La buona riuscita della calibrazione può essere verificata confrontando le curve DN - lunghezza d'onda delle ROI (Fig. 5), precedenti la correzione, con le nuove firme spettrali a esse associate (Fig. 6): il risultato atteso prevede che le quattro curve riflettività - lunghezza d'onda riproducano, nell'intervallo spettrale di interesse, quelle fornite dal produttore del pannello MAPIR (Fig. 7).

Dieci immagini iperspettrali presentano firme spettrali simili a quelle di riferimento; le restanti sei, invece, esibendo variazioni più o meno significative rispetto all'obiettivo, sono caratterizzate o da picchi anomali solamente in certe lunghezze d'onda, o da uno scostamento dall'andamento teorico nell'intera finestra considerata, seppur minore in valore assoluto.

Un esempio della retta di regressione utilizzata per la banda 1 (relazione tra DN e riflettanza) è visibile in Figura 8 con l'individuazione dei quattro punti DN - riflettività, rappresentativi delle quattro porzioni del pannello MAPIR. Il coefficiente di correlazione  $R^2$  è prossimo allo 0.99 per tutte le bande, dimostrando una efficace modellazione del problema.

### 3.3 Classificazione delle immagini iperspettrali

Le immagini iperspettrali calibrate sono processate tramite classificazione, producendo immagini tematiche: in queste immagini, *pixel* con simili proprietà sono inseriti nella medesima classe, assicurandosi che classi differenti presentino netta dissimilarità.

In tale studio, le immagini tematiche prodotte derivano dall'applicazione di molteplici classificatori spettrali assistiti (*supervised*): l'assegnazione della singola cella alla classe di appartenenza dipende dalla sua firma spettrale, corretta a seguito della calibrazione radiometrica (Boccardo et al., 2007), richiedendo la definizione a priori delle classi di informazione e il riconoscimento di un certo numero di *pixel*, detti di *training*, rappresentativi per ciascuna di esse, con addestramento da parte dell'utente. I *pixel* di *training* di ciascuna classe sono raccolti all'interno di apposite ROI: è importante che, per ogni classe ricercata, il campione sia quanto più possibile rappresentativo, individuando un numero di celle adeguato (Boccardo et al., 2007).

Gli algoritmi di classificazione impiegati sono: *Spectral Angle Mapper* (SAM) in ENVI, *Support Vector Machine*, (SVM) e *Random Trees* (RT) in ArcGIS Pro.

Poiché si vuole massimizzare la bontà di classificazione, valutata con verifica su zone esterne a quelle di addestramento, le immagini da sottoporre a classificazione sono visualizzate in una particolare sintesi a falsi colori, adatta alla distinzione dei

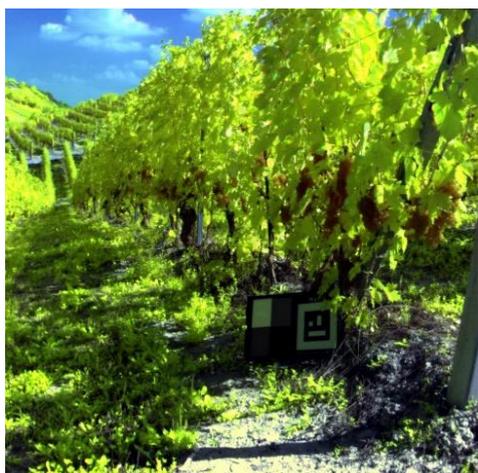


Figura 9. Sintesi a falsi colori, 97-61-36

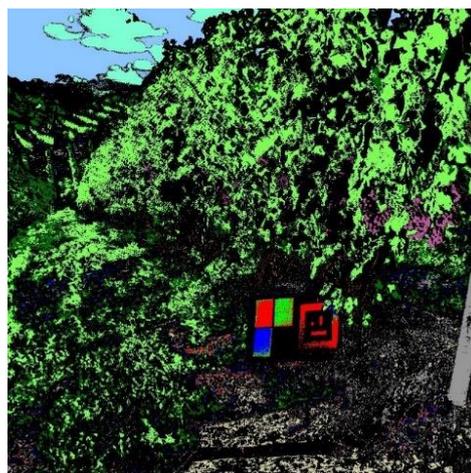


Figura 10. Spectral Angle Mapper, SAM, ENVI

grappoli dalle restanti parti della vite (Fig. 9): essa prevede l'associazione della banda 97 (902.39 nm) al canale del rosso, della banda 61 (750.21 nm) a quella del verde e infine della banda 36 (650.18 nm) al canale del blu.

In ENVI sono svolti due tentativi di classificazione tramite SAM, sulla base di differenti *pixel* di *training*: imponendo dodici classi per la generazione delle immagini tematiche, a cui va a sommarsi la sezione 'Non Classificato' (Tab. 2), generata automaticamente dal software, in entrambi i casi non è superato il 50% di accuratezza totale, ottenendo immagini simili tra loro (in Figura 10 una delle immagini tematiche prodotte). Dall'analisi delle matrici di confusione, la classe 'Grappolo', di maggior interesse al fine dello studio, risulta estremamente sottostimata per mancata classificazione, ma non sovrastimata per errata classificazione di altre ROI.

ROI	ENVI	ArcGIS Pro
Mapir Bianco	Rosso	Giallo
Mapir Grigio Chiaro	Verde	Grigio chiaro
Mapir Grigio Scuro	Blu	Grigio scuro
Mapir Nero	Giallo	Rosso
Grappolo	Viola	Viola
Foglie Vite	Verde chiaro	Verde
Tronco	Marrone	Marrone
Erba	Verde scuro	Verde chiaro
Terreno	Beige	Arancione
Cielo	Azzurro	Azzurro
Nuvole	Verde acqua	Azzurro chiaro
Pilastro	Grigio	Nero
Non Classificato	Nero	-

Tabella 2. Colorazione delle ROI, ENVI e ArcGIS Pro

In ArcGIS Pro, sia il SVM che il RT possono essere applicati con approccio a *pixel* o a oggetti: come spiegato in (ESRI ArcGIS Pro, 2021), la metodologia *pixel-based* esegue una classificazione *pixel* per *pixel*, associando ognuno di essi a una delle classi fornite dall'utente, senza tener conto delle informazioni provenienti dai *pixel* vicini. Differentemente, il metodo *object-based* raggruppa *pixel* adiacenti sulla base di similarità, in colore e forma, degli elementi da essi costituiti, così sottoponendo l'immagine a segmentazione (ESRI ArcGIS Pro, 2021). Il software esegue inoltre il processamento di immagini tramite *Porting*: esso consente di classificare le immagini, non addestrandolo gli algoritmi su di esse, ma applicando i classificatori già addestrati su una precedente immagine. Per tale studio sono trattate due coppie di immagini: all'interno della singola coppia, un'immagine è sottoposta a classificazione

diretta, con applicazione di entrambe le intelligenze artificiali nei due possibili approcci, mentre la seconda è classificata tramite *Porting*, a partire dall'algoritmo generante migliore bontà di classificazione sulla prima immagine. Le due coppie si distinguono per il grado di similarità presente tra le immagini a esse appartenenti: nel primo caso, le immagini iperspettrali sono acquisite con differente posizionamento e orientazione della camera Rikola, causando una maggiore eterogeneità spaziale e nelle condizioni di luce, differenziate dalla seconda coppia, le cui immagini presentano minori variabilità spaziali e temporali di acquisizione, con più simili proprietà spettrali.

Per entrambe le immagini classificate con addestramento, utilizzando le medesime ROI indicate in ENVI (Tab. 2), delle quattro possibili combinazioni la SVM *pixel-based* ha presentato migliore bontà di classificazione, raggiungendo rispettivamente il 94% e il 95% di accuratezza totale (Appendice A, Fig. A1, Fig. A6): la bontà di classificazione, in entrambi i casi, ha risentito di una diminuzione passando dal RT *pixel-based* (87%) (Appendice A, Fig. A2, Fig. A7), al SVM *object-based* (83% e 87%) (Appendice A, Fig. A3, Fig. A8), fino al RT *object-based* (69% e 74%) (Appendice A, Fig. A4, Fig. A9).

I due tentativi di *Porting* hanno allora previsto la classificazione delle immagini tramite SVM *pixel-based*: la minore similarità tra le immagini della prima coppia ha portato a un risultato non adeguato, con accuratezza totale del 46% (Appendice A, Fig. A5), a differenza della seconda coppia, in cui è raggiunto un valore dell'87% (Appendice A, Fig. A10).

Due delle matrici di confusione prodotte sono riportate, a titolo esemplificativo, in Appendice A, in riferimento alle classificazioni svolte tramite SVM *pixel-based* sulle immagini della seconda coppia (Tab. A1 e Tab. A2): sono osservabili i valori di accuratezza totale precedentemente citati (95% e 87%).

### 3.4 Modellazione 3D del filare

Le sedici fotografie prodotte con dispositivo cellulare, inquadranti una medesima porzione di filare, sono invece impiegate per la generazione di un modello tridimensionale in Agisoft Metashape: esse visualizzano tre piante di vite consecutive da differenti punti di vista. Al fine di quantificare la produzione di tale porzione di vigneto, in CloudCompare sono isolati i singoli grappoli in esso contenuti, valutandone il volume. Agisoft Metashape è un software in grado di processare immagini producendo, attraverso l'elaborazione fotogrammetrica, dati spaziali tridimensionali (Agisoft, 2021): il modello 3D voluto è ottenuto in più fasi, generando una prima nuvola sparsa di punti, poi trasformata in nuvola densa, ottimizzando l'allineamento della camera, e infine nel modello,

dotato di *mesh* e *texture*. La nuvola densa si compone di 7,063,965 punti; il modello (Fig. 11) è costituito di 1,411,465 facce e 713,143 spigoli.



Figura 11. Modello 3D, Agisoft Metashape

La nuvola densa di punti e il modello sono scalati note le dimensioni del pannello MAPIR: quest'ultimo presenta altezza pari a 31.75 cm e larghezza, da chiuso, pari a 25.40 cm (MAPIR Camera, 2021). Sono generate due *scale bars* tramite software, individuando su una delle immagini gli estremi delle lunghezze note e fornendone la distanza reale; automaticamente, il software è in grado di individuare i medesimi punti in tutte le fotografie in cui essi siano presenti.

In definitiva, la nuvola densa e il modello presentano larghezza di 3.20 m, altezza di 1.75 m e profondità massima di 0.98 m; l'errore calcolato da Agisoft Metashape è pari a 0.002 m.

La nuvola densa di punti e il modello 3D sono esportati in CloudCompare, rispettivamente nei formati *.e57* e *.obj*: tale software è impiegato principalmente per la gestione di nuvole di punti, pur trattando anche *mesh* tridimensionali. Per l'isolamento dei singoli grappoli, è utilizzato il comando '*Segment*' sul modello tridimensionale: alle porzioni di modello prodotte vengono automaticamente associate dal software le rispettive porzioni di nuvola densa.

Lavorando con la sola porzione del modello compresa tra la pianta sui cui è appoggiato il pannello MAPIR e la vicina pianta a destra, distante un metro, sono isolati dodici grappoli di uva, il cui volume è calcolato come di seguito (Fig. 12):

- ogni nuvola di punti è accompagnata da un piano fittizio longitudinale, posto manualmente a metà della profondità dell'oggetto;
- orientato il grappolo nello spazio, affinché il piano presenti in ogni punto il medesimo valore della *z*, il volume è calcolato sulla base della distanza di ciascun punto della nuvola densa dal piano di riferimento tramite il comando '*Compute 2.5D Volume*';
- poiché riferito a metà oggetto, il volume finale (Tab. 3) è ricavato duplicando il valore ottenuto.

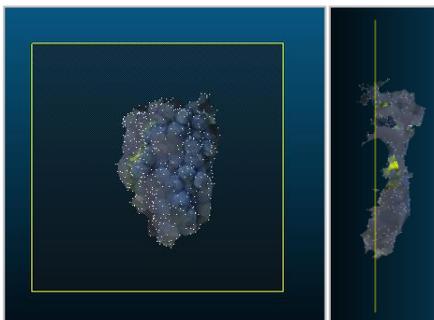


Figura 12. Un esempio di valutazione del volume del grappolo

È da notare che, solamente per una coppia di grappoli, l'ottavo e il nono, il volume è valutato insieme, in quanto posizionati uno davanti all'altro: a differenza di quanto fatto per gli altri grappoli, il piano è in questo caso posizionato in modo tale da generare direttamente il volume complessivo.

	Volume (cm <sup>3</sup> )	
	Metà Grappolo	Grappolo Intero
Grappolo 1	92.575	185.150
Grappolo 2	101.022	202.044
Grappolo 3	108.751	217.502
Grappolo 4	71.068	142.136
Grappolo 5	73.106	146.212
Grappolo 6	78.114	156.228
Grappolo 7	325.770	651.540
Grappoli 8 e 9	-	558.121
Grappolo 10	68.939	137.878
Grappolo 11	167.702	335.404
Grappolo 12	93.891	187.782

Tabella 3. Volumi dei grappoli

In definitiva, la porzione di filare analizzata ha prodotto un volume complessivo di uva pari a 2920 cm<sup>3</sup>, convertito in una produzione di 1.75 kg, in quanto il peso specifico del frutto si aggira intorno ai 600 kg m<sup>-3</sup>.

Tuttavia, poiché la valutazione volumetrica presenta una forte dipendenza dalle scelte dell'utente, a causa del posizionamento manuale dei piani longitudinali di riferimento in CloudCompare, si è cercata una legge approssimata in grado di fornire il volume dei grappoli sulla base di parametri facilmente valutabili.

La legge è prodotta, tramite Regressione Lineare Multipla (Viglione, 2006), a partire dai volumi dei dodici grappoli precedentemente isolati: l'ottavo e il nono grappolo, per le differenze sopraesposte, non vengono utilizzati. La legge individuata è verificata su quattro nuovi grappoli.

Sono individuate quattro possibili variabili indipendenti: lunghezza e larghezza massime del grappolo, dispersione dei punti della nuvola densa attorno alla media (in riferimento alla profondità, direzione *z*), angolo di punta del grappolo. Quest'ultima grandezza vuole riprodurre l'angolo che avrebbe il grappolo se equiparato a un cono rovesciato, osservandolo frontalmente: è calcolata in ambiente MATLAB, con individuazione delle rette rappresentanti i lati del triangolo comprendenti l'angolo di interesse (Fig. 13). Il parametro in questione è dimensionalmente reso una lunghezza, per omogeneità con le restanti variabili, moltiplicandolo per una quantità pari a 10 cm, rappresentativa dell'ordine di grandezza tipico della lunghezza dei grappoli.

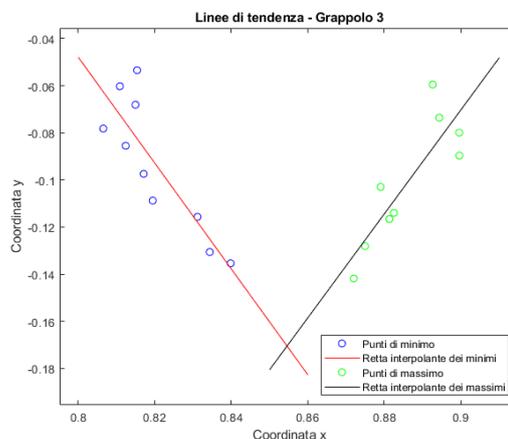


Figura 13. Angolo di punta del grappolo, MATLAB



Definite le quattro possibili variabili indipendenti, la legge ricercata, teoricamente, è espressa nella forma:

$$V = a + b \cdot D + c \cdot Lu + d \cdot La + e \cdot \alpha_L \quad (1)$$

ove  $V$  (cm<sup>3</sup>): volume del grappolo  
 $D$  (cm): dispersione dei punti della nuvola densa  
 $Lu$  (cm): lunghezza massima del grappolo  
 $La$  (cm): larghezza massima del grappolo  
 $\alpha_L$  (cm): angolo di punta del grappolo, in lunghezza  
 $a, b, c, d, e$  (cm<sup>2</sup>): coefficienti

Tuttavia, in fase di sperimentazione, si è applicata la rimozione della variabile  $D$  dall'equazione ricercata, in quanto risultante meno significativa, concentrandosi sulle rimanenti,  $Lu, La$  e  $\alpha_L$ . In definitiva, la legge approssimata individuata risulta essere:

$$V = -84.812 + 0.100 \cdot Lu^3 + 0.302 \cdot La^3 + 0.053 \cdot \alpha_L \quad (2)$$

L'R<sup>2</sup> della legge raggiunge lo 0.85. La media delle variazioni percentuali è dell'11.97% per i dodici grappoli di analisi (volumi stimati e residui in riferimento a CloudCompare in Tab. 4), del 25.26% per i grappoli di verifica (Tab. 5).

Un numero maggiore di grappoli avrebbe consentito di eseguire delle prove e verifiche più sicure: ciononostante, i grappoli utilizzati presentano un livello di eterogeneità tale da considerare soddisfacente la legge individuata, nonostante la lieve sovrastima.

	V CC (cm <sup>3</sup> )	V stimato (cm <sup>3</sup> )	Residuo (cm <sup>3</sup> )	$\Delta$ %
Grap. 1	185.150	199.911	-14.761	7.973
Grap. 2	202.044	149.458	52.586	-26.027
Grap. 3	217.502	319.606	-102.104	46.944
Grap. 4	142.136	174.041	-31.905	22.447
Grap. 5	146.212	173.320	-27.108	18.540
Grap. 6	156.228	284.823	-128.595	82.312
Grap. 7	651.540	477.059	174.481	-26.780
Grap. 10	137.878	108.969	28.909	-20.967
Grap. 11	335.404	160.189	175.215	-52.240
Grap. 12	187.782	314.500	-126.718	67.482

Tabella 4. Volumi e residui, grappoli di analisi

	V CC (cm <sup>3</sup> )	V stimato (cm <sup>3</sup> )	Residuo (cm <sup>3</sup> )	$\Delta$ %
Grap. 1	47.546	44.040	3.506	-7.374
Grap. 2	228.976	359.900	-130.924	57.178
Grap. 3	102.352	151.049	-48.697	47.578
Grap. 4	351.646	364.538	-12.892	3.666

Tabella 5. Volumi e residui, grappoli di verifica

#### 4. CONCLUSIONI

L'elaborazione delle immagini iperspettrali, una volta calibrate, si è conclusa con la loro classificazione, ottenuta applicando molteplici intelligenze artificiali: dal confronto dei risultati ottenuti, l'algoritmo *Support Vector Machine*, disponibile in ArcGIS Pro, è risultato essere il più preciso, così come la massima bontà in fase di *Porting* (accuratezza totale: 87%) è stata raggiunta tra immagini con minori discrepanze spaziali e temporali in fase di acquisizione.

Parallelamente, a partire dal modello tridimensionale generato con fotografie da dispositivo cellulare, si è valutata la produzione

in un metro di filare: il volume complessivo dei dodici grappoli isolati è risultato pari a 2920 cm<sup>3</sup>. Considerato che il peso specifico del frutto si aggira intorno ai 600 kgm<sup>-3</sup>, pur dipendendo dalla tipologia e dalla stagione, la produzione è di 1.75 kg: poiché, specificatamente per l'uva Barbera, in (Novello, 2005) è indicata una grammatura del grappolo variabile tra 148 g e 181 g, considerati dodici elementi di grammatura media, la produzione arriverebbe a 1.97 kg.

Dal confronto tra il valore ottenuto e quello atteso, ben vicini tra loro, quanto elaborato in questo lavoro può considerarsi adeguato.

La valutazione della produzione è inoltre accompagnata dall'individuazione di una legge approssimata, da applicare per la stima del volume del grappolo, funzione di tre grandezze rappresentative: tale legge, frutto di un'analisi sperimentale e ottenuta sulla base di un piccolo campione statistico, ha generato una lieve sovrastima della produzione per l'area di interesse, rivelandosi abbastanza rappresentativa per tale porzione di filare e vitigno.

I quattro grappoli di verifica sono stati misurati in seguito a vendemmia determinando un volume complessivo di 840 cm<sup>3</sup>, molto simile a quello determinato con l'algoritmo empirico (920 cm<sup>3</sup>). Risultati più precisi sarebbero raggiungibili qualora l'individuazione della legge riguardasse un campione statistico più ampio.

In conclusione, un possibile automatismo di quanto esposto prevederebbe l'acquisizione delle immagini iperspettrali non manualmente, ma tramite fissaggio della camera su di una piattaforma robotica: essa, muovendosi tra i filari, eseguirebbe delle catture con visione a tutto campo. Le immagini prodotte, una volta calibrate e classificate, potrebbero essere direttamente utilizzate per la generazione del modello tridimensionale dell'intero vigneto, senza utilizzo in parallelo di fotografie da dispositivo cellulare: la nuvola densa e il conseguente modello tridimensionale, infatti, sarebbero prodotti sulla base dei punti comuni di immagini tematiche vicine, e successivamente utilizzati per l'individuazione dei grappoli presenti e valutazione della produzione del sistema.

#### RICONOSCIMENTI

Il lavoro presentato, riportante i risultati di un tesi di laurea magistrale del Politecnico di Torino, è reso possibile grazie al Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) e al PoliTO Interdepartmental Centre for Service Robotics (PIC4SeR), che ha fornito la camera iperspettrale Rikola utilizzata.

#### Contributi dei singoli autori

Idea e concezione: A. Lingua; acquisizione: A. Lingua, F. Parizia; metodologia: F. Parizia, A. Lingua; software: F. Parizia; validazione: F. Parizia; analisi: F. Parizia; revisione: A. Lingua; supervisione: A. Lingua.

Tutti gli autori hanno letto e sono in accordo con quanto scritto nella versione dell'articolo pubblicata.

#### Fonti di finanziamento

Questo lavoro è stato in parte finanziato con fondi dell'Interdepartmental Centre for Service Robotics (PIC4SeR)

#### Ringraziamenti

Un sincero ringraziamento va all'azienda agricola 'Brevi Pendii', proprietaria del terreno messo a disposizione per tale studio.



## BIBLIOGRAFIA

- Agisoft, 2021. Discover intelligent photogrammetry with Metashape.  
<https://www.agisoft.com/>
- Boccardo P., Borgogno Mondino E., Disabato F., Giulio Tonolo F., Perez F., 2007. Laboratorio di Telerilevamento, guida all'utilizzo del software Envi. Versione 2. Politecnico di Torino, 2007.
- Borgogno Mondino E., Lessio A., 2015. Telerilevamento per l'agricoltura di precisione.
- Bouguet J. Y., 2015. Camera Calibration Toolbox for Matlab. Computational Vision at the California Institute of Technology. Camera Calibration Toolbox for MATLAB.
- Casa R., Pisante M., 2016. Agricoltura di Precisione. Metodi e tecnologie per migliorare l'efficienza e la sostenibilità dei sistemi colturali. 1.1 Definizione ed evoluzione storica dell'Agricoltura di Precisione, pp. 1-2. In: Collana Edagricole Università e Formazione. 1<sup>a</sup> Edizione, novembre 2016.
- ESRI ArcGIS Pro, 2021. Overview of image classification.  
<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/image-analyst/overview-of-image-classification.htm>
- Gara T.W., Darvishzadeh R., Skidmore A.K., Wang T., Heurich, M., 2019. Evaluating the performance of PROSPECT in the retrieval of leaf traits across canopy throughout the growing season. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 2019, 83, 101919.
- MAPIR Camera, 2021. MAPIR Camera Reflectance Calibration Ground Target Package (V2)  
<https://www.mapir.camera/products/mapir-camera-reflectance-calibration-ground-target-package-v2>
- Musci M. A., Aicardi I., Dabove P., Lingua A. M., 2019. Reliability of the geometric calibration of an hyperspectral frame camera. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLII-2/W13. *ISPRS Geospatial Week 2019, Enschede, The Netherlands, 10–14 June 2019*.
- Novello, V. 2005. Lo stato delle conoscenze viticole sul 'Barbera'. n: Infowine: Rivista internet di Viticoltura ed Enologia, n. 2/2,  
<https://www.infowine.com/intranet/libretti/libretto2941-01-1.pdf>
2006. 1° *Convegno Internazionale sul Barbera, Alessandria, 2-3 dicembre 2005*.
- Pascucci S., Pignatti S., Casa R., Darvishzadeh R., Huang W., 2020. Special Issue "Hyperspectral Remote Sensing of Agriculture and Vegetation". *Remote Sens.* 2020, 12, 3665; [doi:10.3390/rs12213665](https://doi.org/10.3390/rs12213665)  
[www.mdpi.com/journal/remotesensing](http://www.mdpi.com/journal/remotesensing)
- Senop, n.d Rikola Hyperspectral camera, 2018, Optron, Hyperspectral  
<http://senop.fi/optronicshyperspectral#hyperspectralCamera>
- Viglione A., 2006. Metodi statistici non-supervised per la stima di grandezze idrologiche in siti non strumentati. Tesi di Dottorato, Politecnico di Torino, Capitolo 2: Regionalizzazione delle grandezze indice, pp. 19-24.
- Yahui Guo, Senthilnath J., Wenxiang Wu, Xueqin Zhang, Zhaoqi Zeng, Han Huang, 2019. Radiometric Calibration for Multispectral Camera of Different Imaging Conditions Mounted on a UAV Platform. *Sustainability* 2019, 11, 978; [doi:10.3390/su11040978](https://doi.org/10.3390/su11040978). [www.mdpi.com/journal/sustainability](http://www.mdpi.com/journal/sustainability)
- Weiss M., Jacob F., Duveiller G., 2020. Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote Sens. Environ.* 2020, 236, 111402.

### APPENDICE A: Risultati delle classificazioni in ArcGIS Pro



Figura A1: SVM, *pixel-based*, coppia 1



Figura A2: RT, *pixel-based*, coppia 1



Figura A3: SVM, *object-based*, coppia 1

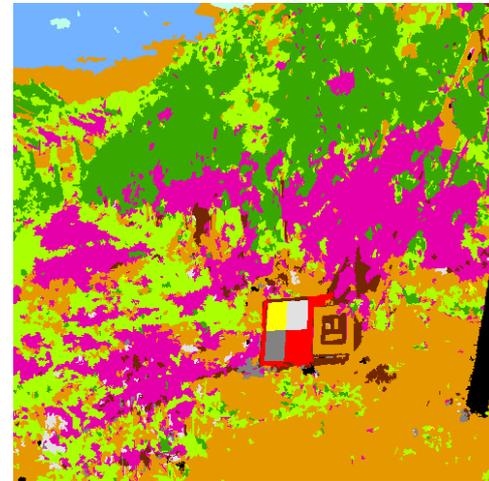


Figura A4: RT, *object-based*, coppia 1

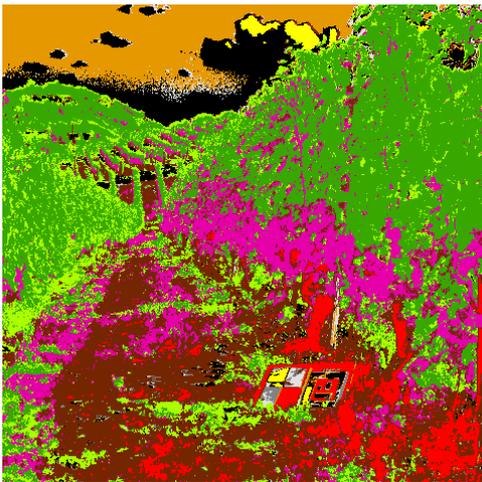


Figura A5: Porting, SVM, *pixel-based*, coppia 1



Figura A6: SVM, *pixel-based*, coppia 2

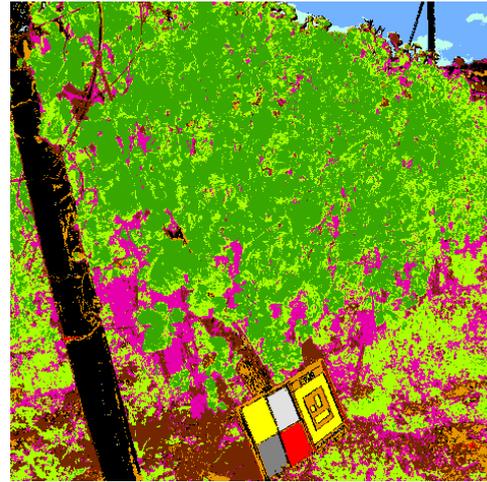


Figura A7: RT, *pixel-based*, coppia 2



Figura A8: SVM, *object-based*, coppia 2

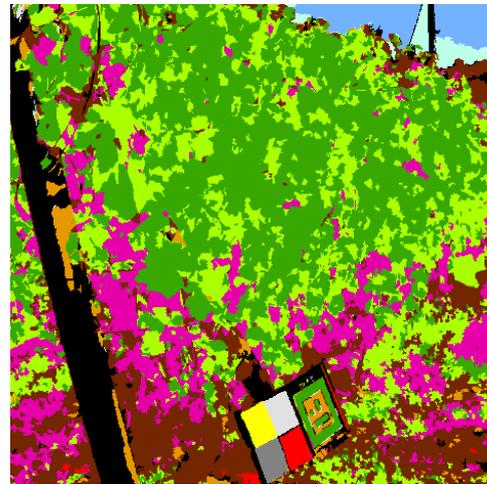


Figura A9: RT, *object-based*, coppia 2

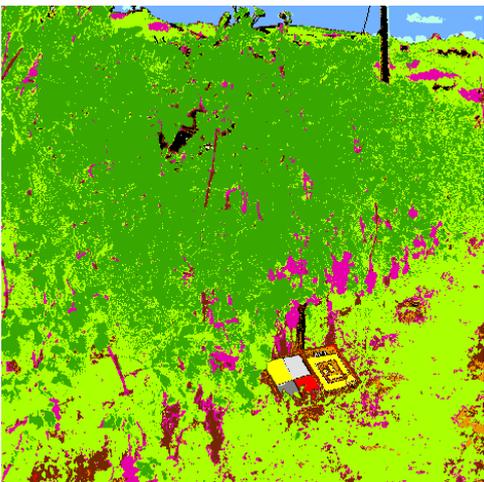


Figura A10: Porting, SVM, *pixel-based*, coppia 2



	Mapir bianco	Mapir g. chiaro	Mapir g. scuro	Mapir nero	Grappolo	Foglie vite	Tronco	Erba	Terreno	Cielo	Nuvole	Pilastro	Totale	User Accuracy	Kappa
Mapir bianco	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	1	0
Mapir g. chiaro	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	102	0.98	0
Mapir g. scuro	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	2	102	0.98	0
Mapir nero	0	0	0	100	0	0	0	0	3	0	0	0	103	0.97	0
Grappolo	0	0	0	0	99	0	9	0	0	0	0	0	108	0.92	0
Foglie vite	0	0	0	0	1	85	0	0	0	0	0	0	86	0.99	0
Tronco	0	0	0	0	0	0	91	0	15	0	0	11	117	0.78	0
Erba	0	0	0	0	0	15	0	100	0	0	0	0	115	0.87	0
Terreno	0	0	0	0	0	0	0	0	75	0	0	0	75	1	0
Cielo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	100	1	0
Nuvole	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	1	101	0.99	0
Pilastro	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	84	91	0.92	0
Totale	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	1200	0	0
Prod. Accuracy	1	1	1	1	0.99	0.85	0.91	1	0.75	1	1	0.84	0	0.95	0
Kappa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.94

Tabella A1. Matrice di Confusione, SVM *pixel-based*, coppia 2, ArcGIS Pro

	Mapir bianco	Mapir g. chiaro	Mapir g. scuro	Mapir nero	Grappolo	Foglie vite	Tronco	Erba	Terreno	Cielo	Nuvole	Pilastro	Totale	User Accuracy	Kappa
Mapir bianco	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	1	0
Mapir g. chiaro	0	100	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	101	0.99	0
Mapir g. scuro	0	0	99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99	1	0
Mapir nero	0	0	0	100	0	0	0	0	6	0	0	0	106	0.94	0
Grappolo	0	0	0	0	94	0	31	0	0	0	0	0	125	0.75	0
Foglie vite	0	0	0	0	1	71	1	4	0	0	0	0	77	0.92	0
Tronco	0	0	0	0	0	0	67	0	48	0	0	17	132	0.51	0
Erba	0	0	0	0	5	29	1	96	1	0	0	0	132	0.73	0
Terreno	0	0	0	0	0	0	0	0	45	0	0	8	53	0.85	0
Cielo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	2	0	102	0.98	0
Nuvole	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	98	0	98	1	0
Pilastro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	75	75	1	0
Totale	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	1200	0	0
Prod. Accuracy	1	1	0.99	1	0.94	0.71	0.67	0.96	0.45	1	0.98	0.75	0	0.87	0
Kappa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.86

Tabella A2. Matrice di Confusione, SVM *pixel-based*, Porting coppia 2, ArcGIS Pro



# LA MODIFICA DELLE EQUAZIONI DI SOLDNER PER L'ESECUZIONE DEI CALCOLI GEODETICI IN COORDINATE DI GAUSS NELL'AMBITO DEL CAMPO SFERICO – PARTE 1: TEORIA

## MODIFICATION OF SOLDNER EQUATIONS FOR SOLVING GEODETIC PROBLEMS USING THE GAUSS COORDINATE SYSTEM IN THE LOCAL SPHERICAL FIELD – PART 1: THEORY

S. Di Filippo <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Responsabile dell'Area Servizi Cartografici dell'Agenzia del Territorio (a.r.)

**PAROLE CHIAVE:** Soldner, campo sferico, Gauss, calcoli geodetici

**KEY WORDS:** Soldner equations, geodesy, Gauss coordinates, local sphere, spherical geometry

### RIASSUNTO:

Il presente lavoro trae origine da considerazioni di trigonometria sferica la quale, ricordiamo, definisce le relazioni esistenti tra i lati e gli angoli di un triangolo sferico. Al riguardo, le equazioni di Soldner, che si fondano proprio su teoremi di trigonometria sferica, mettono in relazione le coordinate geodetiche rettangolari di due punti della sfera, quando siano conosciute la lunghezza della linea geodetica che li unisce e l'azimut piano da questa formato nel primo dei due vertici considerati. Nel suddetto sistema di coordinate trovano quindi soluzione i due problemi fondamentali della geodesia.

Le citate equazioni trovano generale impiego nella rappresentazione di Cassini-Soldner, dove le coordinate geodetiche rettangolari coincidono con le coordinate plano-cartografiche, poiché consentono di risolvere i problemi geodetici senza dover passare per il calcolo del modulo di deformazione lineare, nonché della riduzione alla corda e della deformazione angolare (la suddetta rappresentazione infatti non è conforme).

La modifica delle equazioni di Soldner, proposta in questo studio, permette di applicare la medesima modalità operativa, quando occorra affrontare gli stessi problemi geodetici, utilizzando il sistema di coordinate di Gauss. In quest'ultimo caso, poiché la larghezza dei fusi supera di molto quella del campo sferico, le formule di Soldner possono cadere progressivamente in difetto, quando si operi a notevole distanza (maggiore di 180km) dal meridiano centrale e quindi per mantenere immutato il rigore dei risultati è necessario diminuire la lunghezza della linea geodetica rispetto a quella ammessa nel campo sferico.

A questo documento segue una seconda parte dedicata ad applicazioni numeriche e complementi di quanto qui trattato.

### ABSTRACT:

The present work originates from considerations of spherical trigonometry which, we recall, defines the relations existing between the sides and angles of a spherical triangle. In this regard, Soldner's equations, which are based precisely on spherical trigonometry theorems, relate the rectangular geodesic coordinates of two points of the sphere, when the length of the geodesic line that joins them and the plane azimuth from this format are known. in the first of the two vertices considered. The two fundamental problems of geodesy are therefore solved in the aforementioned coordinate system.

The aforementioned equations are generally used in the Cassini-Soldner representation, where the rectangular geodetic coordinates coincide with the plano-cartographic coordinates, since they allow to solve geodetic problems without having to go through the calculation of the linear deformation modulus, as well as of the reduction to the chord. and of the angular deformation (the aforementioned representation is in fact not compliant).

The modification of the Soldner equations, proposed in this study, allows to apply the same operative modality, when it is necessary to face the same geodetic problems, using the Gauss coordinate system. In the latter case, since the width of the spindles greatly exceeds that of the spherical field, Soldner's formulas can progressively fall into defect, when operating at a considerable distance (greater than 180km) from the central meridian and therefore to maintain the rigor unchanged. of the results it is necessary to decrease the length of the geodesic line with respect to that allowed in the spherical field.

This document is followed by a second part dedicated to numerical applications and complements of what is treated here.



## 1. INTRODUZIONE

Come è noto dalla cartografia teorica, per procedere alla costruzione della rappresentazione di una zona della superficie terrestre, occorre stabilire relazioni matematiche tra coordinate dei punti dell'ellissoide di riferimento, superficie obbiettiva, e punti immagine corrispondenti del piano, superficie subbiettiva. In tal modo si definiscono le equazioni della rappresentazione che permettono di risalire dalle proprietà analitiche o geometriche dell'immagine cartografica alle corrispondenti proprietà della figura rappresentata.

Il fine geodetico di una rappresentazione è quello di consentire la trattazione sul piano dei problemi geodetici, così da poter utilizzare i teoremi della trigonometria piana nell'esecuzione dei calcoli.

Naturalmente possiamo sempre eseguire i calcoli sulla superficie dell'ellissoide di rotazione, applicando le procedure date dalla geodesia, che però comportano il ricorso alla trigonometria ellissoidica assai più complessa.

Trasferendo il problema sul piano della rappresentazione, si ha il grande vantaggio di poter calcolare con estrema semplicità la lunghezza dei segmenti di retta che uniscono i vari punti immagine e gli angoli tra questi formati; tuttavia la determinazione degli elementi del triangolo piano non è che il primo passo verso la soluzione del problema geodetico.

Infatti il legame che occorre stabilire è tra elementi dell'ellissoide, archi di geodetica e azimut, e le corrispondenti immagini sul piano cartografico come scaturiscono dall'applicazione delle equazioni della carta.

In generale gli archi di geodetica si proiettano in immagini di curve di grado superiore al primo, dette trasformate, e gli angoli restano individuati dall'incontro delle trasformate nei diversi vertici.

La considerazione di triangoli piani sulla rappresentazione cartografica non è allora che una posizione di comodo, che si sovrappone all'immagine cartografica, senza tuttavia farne parte, solo per fornire, in via di prima approssimazione, la grandezza dei lati e degli angoli dei triangoli ellissoidici.

A tale riguardo la cartografia teorica fornisce i metodi di calcolo per definire le differenze di lunghezza tra archi di geodetica ellissoidici e segmenti rettilinei, o corde, tra gli stessi punti immagine della rappresentazione, nonché le differenze tra azimut delle trasformate e delle corde. Siamo così in grado di definire, basandoci sulla rappresentazione cartografica, le relazioni esistenti tra punti dell'ellissoide terrestre.

Naturalmente per le applicazioni geodetiche conviene utilizzare rappresentazioni cartografiche che offrono la maggiore semplicità possibile nel calcolo delle differenze tra elementi dei triangoli piani e delle immagini cartografiche degli elementi ellissoidici corrispondenti.

Ora è noto che le rappresentazioni che meglio rispondono alle esigenze di calcolo per le applicazioni geodetiche, sono le rappresentazioni isogone o conformi, che offrono la maggiore semplicità possibile per il calcolo dei moduli di deformazione lineari e delle riduzioni angolari, o alle corde.

In Italia, in particolare, a far tempo dall'anno 1946, è stata adottata la rappresentazione conforme di Gauss, secondo i canoni dati dal prof. Boaga, denominata per questa rappresentazione di Gauss-Boaga, che realizza la proiezione dell'ellissoide di Hayford (o internazionale) con orientamento Roma M. Mario – M. Soratte.

Quando il problema geodetico non supera i limiti del campo sferico, è possibile però affrontare la ricerca della soluzione operando sulla superficie sferica, nella fattispecie quella della sfera locale.

Perseguendo questo tipo di soluzione, tutti i problemi di calcolo ora, per sommi capi, richiamati, non si pongono dal momento che, in buona sostanza, il triangolo sferico e quello ellissoidico sono coincidenti e sovrapponibili senza che si verifichino alterazioni dell'uno o dell'altro.

Ciò significa che la soluzione fornita dal triangolo sferico si può applicare al triangolo ellissoidico istituito tra gli stessi vertici. La soluzione del triangolo sferico si presenta particolarmente comoda utilizzando le equazioni di Soldner che mettono in relazione le coordinate geodetiche polari con le coordinate geodetiche rettangolari.

Queste ultime coincidono con le coordinate plano-cartografiche della rappresentazione di Cassini-Soldner. Appare quindi naturale chiedersi se è possibile applicare questa procedura anche quando si devono trattare le coordinate di Gauss. La risposta positiva a questo quesito passa attraverso la definizione delle relazioni esistenti tra coordinate di Gauss e coordinate di Cassini-Soldner. Se infatti riusciamo, in funzione delle coordinate di Gauss, ad esprimere le coordinate di Cassini-Soldner, inserendo tali espressioni nelle equazioni di Soldner, riusciamo a risolvere il triangolo sferico operando sulle coordinate di Gauss. In questo modo si evita innanzitutto il passaggio sul piano della rappresentazione conforme, con tutto ciò che comporta per il calcolo delle riduzioni delle distanze e degli angoli come sopra richiamato, ma soprattutto si dispone di una metodologia di calcolo in più che permette di eseguire un controllo dei risultati.

D'altra parte questa è una situazione ben nota quando si opera sulla cartografia catastale in proiezione di Cassini-Soldner, dove i problemi geodetici, del campo sferico, possono essere affrontati sulla sfera locale attraverso le equazioni di Soldner, oppure riducendo il problema al piano della rappresentazione, procedendo attraverso la determinazione delle deformazioni lineari e delle variazioni angolari.

Nel seguito quindi si ricercheranno innanzitutto le relazioni tra coordinate di Cassini-Soldner e di Gauss per poi esaminare la modifica delle equazioni di Soldner per renderle idonee alla trattazione delle coordinate di Gauss.

## 2. LA SOSTITUZIONE DELL'ELLISSOIDE DI ROTAZIONE CON LA SFERA LOCALE

E' noto che nel caso in cui il problema geodetico ricada in una regione di territorio, intorno a un punto assunto come origine O, di raggio non superiore a 150 km, la superficie dell'ellissoide di rotazione può essere sostituita da una sfera (locale) di raggio:

$$R = (\rho \cdot N_0)^{1/2}$$

dove  $\rho_o, N_o$  sono i raggi di curvatura principali dell'ellissoide nell'origine  $O(\varphi_o, \lambda_o)$ .

Operando questa sostituzione, le linee geodetiche ellissoidiche vengono ad essere sostituite da archi di cerchio massimo della sfera di uguale lunghezza e di uguale azimuth, poiché risultano trascurabili, nell'ambito suddetto, le variazioni lineari e angolari, che non producono alterazione della precisione geodetica dei calcoli.

Si ottiene così una notevolissima semplificazione, poiché operando nel campo sferico, come sopra delimitato, è possibile far ricorso ai teoremi della trigonometria sferica in luogo dei teoremi assai più onerosi e complicati della trigonometria ellissoidica.

Si tratta di una semplificazione assai significativa sia per le notevoli facilitazioni dei calcoli, sia perché nell'ambito del campo sferico ricade la maggior parte dei problemi geodetici che si presentano nelle applicazioni.

### 3. LA TRATTAZIONE DEI PROBLEMI GEODETICI IN COORDINATE DI CASSINI-SOLDNER

#### 3.1 Richiami del sistema di rappresentazione Cassini-Soldner

Come è noto, nella rappresentazione di Cassini-Soldner, le coordinate plano-cartografiche  $p(x, y)$  di un punto immagine  $p$

della carta (superficie subbiettiva  $\Sigma'$ ) coincidono con le coordinate geodetiche-rettangolari  $P(X, Y)$  del corrispondente punto  $P$  della sfera (superficie obbiettiva  $\Sigma$ ), cosicché le equazioni della carta sono (v. fig. 1):

$$x = X;$$

$$y = Y;$$

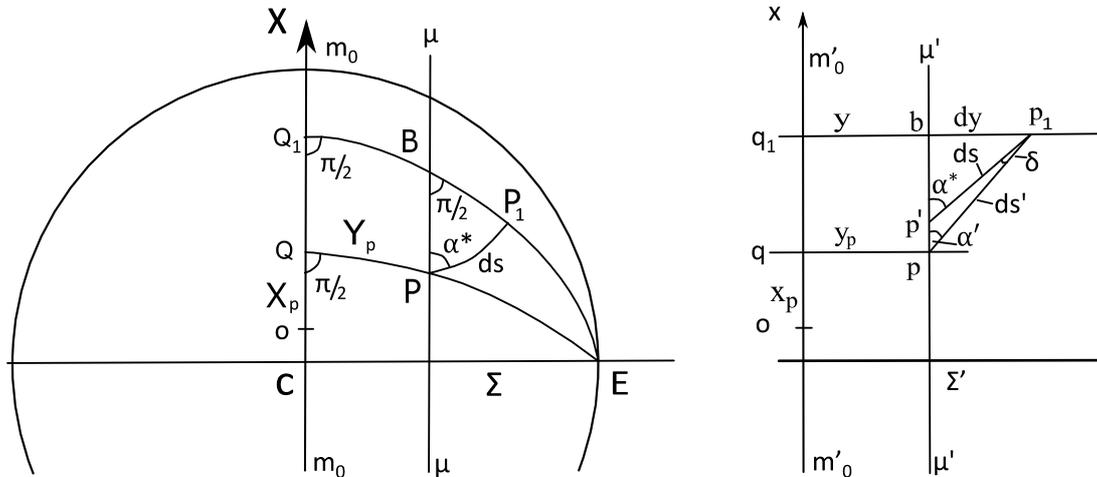
e così per un punto  $P$  della sfera corrispondente al punto  $p$  del piano cartografico si ha:

$$x_p = X_P;$$

$$y_p = Y_P;$$

Per quanto riguarda le proprietà differenziali della carta, rinviando per la dimostrazione a testi specializzati (v. bibliografia), ricordiamo che il modulo di deformazione lineare  $m$  in un punto  $p(x, y)$  della rappresentazione vale:

$$m = ds'/ds = 1 + [y^2/(2R^2)] \cos^2\alpha'$$



- $m_0$ - $m_0$  = meridiano principale
- $\mu$ - $\mu$  linea geodeticamente parallela a  $m_0$ - $m_0$

- $q_1$ - $q = Q_1$ - $Q$
- $m_0$   $bp = q_1$ - $q > BP$

- $E$  = polo di  $m_0$ - $m_0$
- $BP < Q_1Q$
- $O$  = origine del sistema di riferimento
- $C$  = centro della sfera

- $bp' = BP$
- $ds' \geq ds$
- $\delta \neq 0$  deformazione angolare
- $\alpha' = \alpha^* - \delta$

Figura 1. Schema della concezione e delle proprietà differenziali della rappresentazione di Cassini-Soldner.

Ora si vede subito che  $m$  raggiunge il valore massimo per  $\cos^2 \alpha' = 1$ , in direzione quindi dell'asse  $X$  e minimo per  $\cos^2 \alpha' = 0$ , cioè in direzione dell'asse  $Y$ .

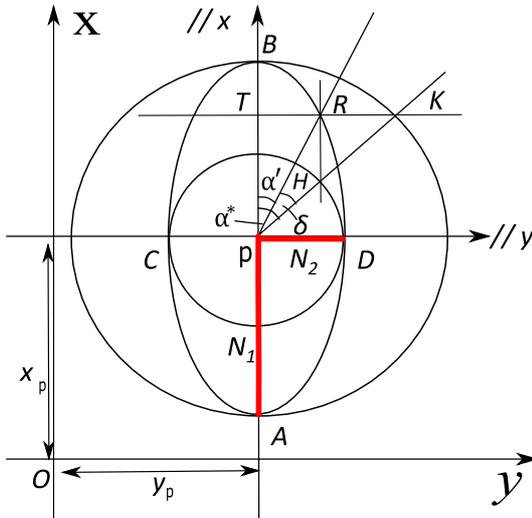


Figura 2. Ellisse del modulo di deformazione lineare  $m$  e di origine della deformazione angolare.  $N_1$ ,  $N_2$ , moduli principali di deformazione lineare.

Quindi per i moduli principali di deformazione lineare  $N_1$ ,  $N_2$  relativi al punto  $p$  si ha (v. fig. 2):

$$N_1 = 1 + y^2/(2R^2) \text{ nella direzione dell'asse } X; (\cos^2 \alpha' = 1)$$

$$N_2 = 1 \text{ nella direzione dell'asse } Y; (\cos^2 \alpha' = 0)$$

Sul meridiano principale  $Y = 0$ , quindi  $N_1 = N_2 = 1$  cioè il meridiano principale si proietta sulla carta in vera lunghezza.

Il fatto che le direzioni dei moduli principali di deformazione lineare coincidono con le direzioni degli assi cartografici, costituisce una proprietà notevole del sistema di rappresentazione Cassini-Soldner, proprietà essenziale per i successivi sviluppi di questo studio, come verranno illustrati più avanti.

Definiti i moduli principali di deformazione lineare  $N_1$ ,  $N_2$ , è semplice definire il modulo di deformazione superficiale  $\eta$ . E' noto infatti che:

$$\eta = d\sigma'/d\sigma = N_1 \cdot N_2$$

dove  $d\sigma'$ ,  $d\sigma$  sono areole infinitesime nell'intorno di  $p$  (su  $\Sigma'$ ) e di  $P$  (su  $\Sigma$ ) rispettivamente.

Nel nostro caso si ha:

$$\eta = d\sigma'/d\sigma = N_1 \cdot N_2 = [1 + y^2/(2R^2)] \cdot 1 = 1 + y^2/(2R^2) \neq 1$$

quindi in definitiva  $\mu \neq 1$ , cosicché si conclude che la rappresentazione di Cassini-Soldner non conserva le aree, non è pertanto una rappresentazione equivalente (se non nei punti del meridiano principale dove  $y = 0$  e  $\eta = 1$ ).

Infine, per quanto riguarda gli azimut,  $\alpha'$ , azimut cartografico dell'elemento di corda  $ds'$ , e  $\alpha^*$ , azimut piano dell'elemento di linea geodetica  $ds$ , sussiste, come è noto la relazione:

$$\text{tg} \alpha' = (N_2/N_1) \text{tg} \alpha^*$$

e considerando la deformazione angolare:

$$\delta = \alpha' - \alpha^*$$

sussiste la relazione:

$$\text{tg} \delta = \text{tg}(\alpha' - \alpha^*) =$$

$$\{[(N_2/N_1) - 1] \text{tg} \alpha^*\} / [1 + (N_2/N_1) \text{tg}^2 \alpha^*]$$

se esplicitiamo le precedenti relazioni nel caso della rappresentazione di Cassini-Soldner introducendo le espressioni di  $N_1$ ,  $N_2$ , si perviene infine alle espressioni:

$$\text{tg} \alpha' = [(N_2/N_1) \text{tg} \alpha^*] \approx [1 - y^2/(2R^2)] \text{tg} \alpha^*$$

e:

$$|\delta| = |[y^2/(4R^2)] \text{sen} 2\alpha^*|$$

le quali pongono in evidenza che  $\alpha' \neq \alpha^*$ , ovvero anche che  $\delta \neq 0$ ; quindi la rappresentazione non conserva gli angoli, non è pertanto una rappresentazione isogona o conforme. Fanno eccezione i punti del meridiano principale, dove  $y = 0$ , e perciò  $\alpha' = \alpha^*$ , ovvero  $\delta = 0$ .

Lungo il meridiano principale ( $y = 0$ ) allora la rappresentazione è equidistante ( $N_1 = N_2 = 1$ ), nonché anche equivalente ( $\eta = 1$ ) e isogona ( $\alpha' = \alpha^*$  ovvero  $\delta = 0$ ).

In tutti gli altri punti della rappresentazione si manifestano deformazioni delle distanze ( $m \neq 1$ ), ad eccezione di quelle parallele all'asse  $Y$  (caratterizzate da  $\cos^2 \alpha' = 0$ ), delle superfici ( $\eta \neq 1$ ) e degli angoli ( $\delta \neq 0$ ). Non conservando né le aree né gli angoli in tutti i punti della rappresentazione, questa si definisce afilattica.

Possiamo ora applicare questi risultati al caso di archi di geodetica non di lunghezza infinitesima  $ds$  o  $ds'$ , bensì di lunghezza finita  $S_{12}$ , tra i punti  $P_1$  e  $P_2$  di  $\Sigma$ , e  $S'_{12}$ , tra i punti immagine  $p_1$  e  $p_2$  di  $\Sigma'$ ; vale come è noto la relazione (v. fig. 3):

$$m_{12} = S'_{12}/S_{12} = 1 + (y_1^2 + y_1 y_2 + y_2^2) \cos^2 \alpha' / (6R^2)$$

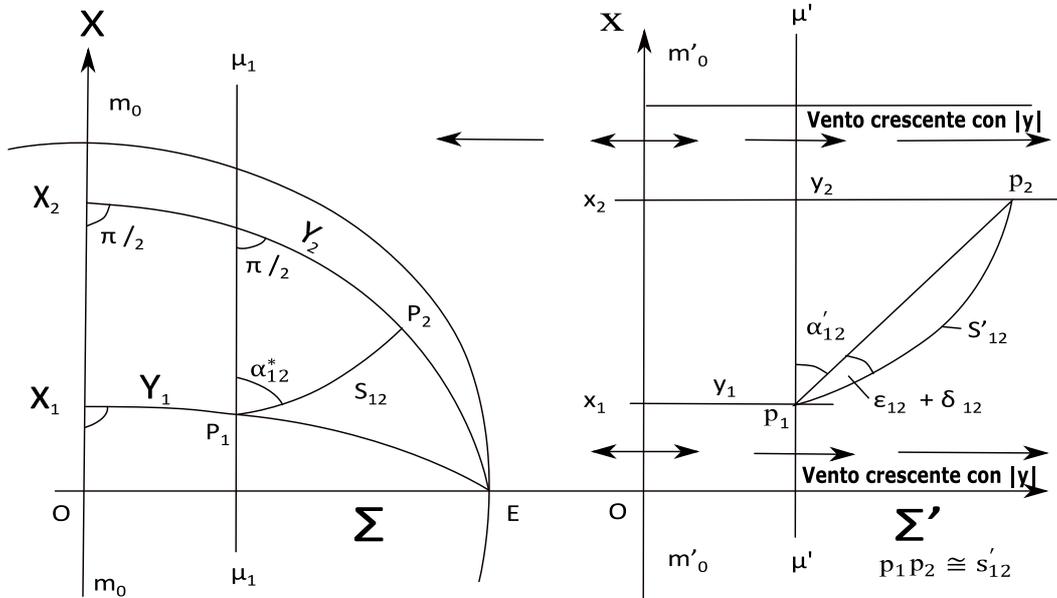


Figura 3. Deformazione lineare e riduzione angolare di archi di geodetica di lunghezza finita.

Mentre per le superfici non infinitesime si ha:

$$\sigma = \int_{\sigma'} \frac{d\sigma'}{\eta} \approx \int_{\sigma'} \left(1 - \frac{y^2}{2R^2}\right) d\sigma'$$

dove, per risolvere l'integrale definito si ricorre alla considerazione di una sommatoria di prodotti.

Infine, per quanto si riferisce alla riduzione angolare dell'azimut di una linea geodetica  $S_{12}$  nel punto iniziale si ha intanto la relazione (v. fig. 3):

$$\alpha'_{12} = \left| \arctg \left| \frac{\Delta y}{\Delta x} \right| + p\pi \right|$$

Con il seguente significato dei simboli:

$$\Delta x = x_2 - x_1; \quad \Delta y = y_2 - y_1;$$

$p$	$\Delta x$	$\Delta y$	Quadrante
0	+	+	I
-1	+	-	II
1	-	-	III
-2	-	+	IV

e quindi:

$$\begin{aligned} \alpha^*_{12} &= \alpha'_{12} + \epsilon_{12} + \delta_{12} \\ &= \alpha'_{12} + (2y_1 + y_2)(x_2 - x_1) / (6R^2) \\ &\quad + (y_1^2 + y_1y_2 + y_2^2) \operatorname{sen} \alpha'_{12} \operatorname{cos} \alpha'_{12} / (6R^2) \end{aligned}$$

Per vedere come si colloca la trasformata  $S'_{12}$  rispetto alla corda  $p_1p_2$  vale la nota regola del vento, per la quale la trasformata giace, rispetto alla corda, dalla parte opposta rispetto all'asse X e rivolge la concavità verso la corda stessa (v. fig. 3). Se la trasformata taglia l'asse X l'andamento della stessa può risultare

più complesso, pur restando valido il principio della regola del vento.

### 3.2 La soluzione del problema geodetico sul piano della rappresentazione

Abbiamo così presentato tutti gli elementi che permettono di trasferire la soluzione del problema geodetico, contenuto nell'ambito del campo sferico, dalla superficie dell'ellissoide di rotazione a quella del piano della rappresentazione di Cassini-Soldner.

### 3.3 La soluzione del problema geodetico sulla sfera locale mediante le equazioni di Soldner

Le equazioni di Soldner si fondano sull'applicazione dei teoremi di trigonometria sferica, che mettono in relazione angoli e lati di un triangolo sferico. In un triangolo sferico ciascun lato è un arco di cerchio massimo della sfera, ovvero dato dall'intersezione della sfera con il piano passante per il centro della stessa, oltreché per i punti estremi del lato considerato. La trigonometria sferica permette di scrivere le relazioni tra angoli e lati del triangolo sferico, a condizione di esprimere questi ultimi in funzione dell'angolo sotteso al centro della sfera e del raggio di questa.

La potenza delle equazioni di Soldner per la risoluzione dei problemi geodetici, limitati al campo sferico, in funzione delle coordinate plano-cartografiche dei punti della rappresentazione di Cassini-Soldner, si impenna sui due punti fondamentali seguenti:

- 1.) la superficie dell'ellissoide di rotazione, superficie obbiettiva  $\Sigma$ , è sostituita da quella della sfera locale;
- 2.) le coordinate plano-cartografiche di ciascun punto (immagine) del piano della rappresentazione,  $p(x,y)$ , superficie subbiettiva  $\Sigma'$ , coincidono con le coordinate geodetiche rettangolari dei punti corrispondenti sulla sfera  $P(X,Y)$  (v. par. 3.1); si hanno cioè le seguenti equazioni di corrispondenza:

$$x = X; \quad y = Y;$$

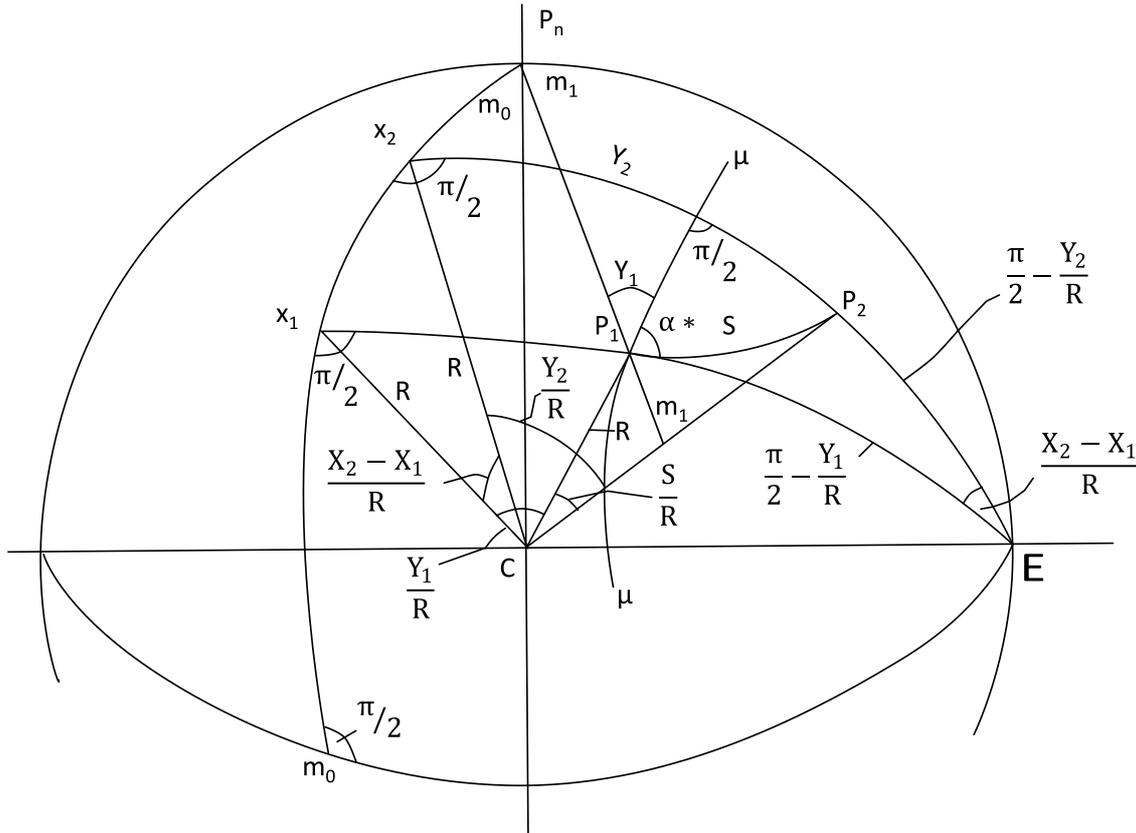
Il primo punto è importante poiché individua il campo sferico come ambito di validità delle relazioni matematiche.

Il secondo punto è addirittura decisivo per evidenziare il valore assoluto delle equazioni di Soldner che, operando in coordinate plano-cartografiche della rappresentazione di Cassini-Soldner, permettono di risolvere il problema geodetico sulla sfera, evitando così tutti i calcoli di variazione delle lunghezze delle trasformate e del valore degli azimut, necessari per riportare il problema tra corde tracciate sul piano della rappresentazione.

Come abbiamo ricordato in premessa, operando all'interno del campo sferico, le lunghezze degli archi di geodetica  $S$  e gli azimut piani  $\alpha^*$  coincidono sostanzialmente con quelli esistenti sull'ellissoide di rotazione.

### 3.4 Richiami sulle equazioni di Soldner

Richiamiamo ora, brevemente, la genesi delle equazioni di Soldner. Con riferimento alla fig. 4, consideriamo dapprima la formula del coseno sferico applicata al triangolo sferico  $P_1P_2E$



$E = \text{polo di } m_0 - m_0; \quad X_2CE = \pi/2; \quad X_1CE = \pi/2;$

Figura 4. Campo sferico di riferimento per lo sviluppo delle equazioni di Soldner.

La richiamata formula fornisce:

$$\cos(\pi/2 - Y_2/R) = [\cos(S/R)] \cdot \cos(\pi/2 - Y_1/R) + [\sin(S/R)] \cdot \sin(\pi/2 - Y_1/R) \cdot \cos(\pi/2 - \alpha^*)$$

da cui si ricava immediatamente:

$$\sin(Y_2/R) = \cos(S/R) \cdot \sin(Y_1/R) + \sin(S/R) \cdot \cos(Y_1/R) \cdot \sin \alpha^*$$

Possiamo ora sostituire alle funzioni trigonometriche degli angoli al centro della sfera, caratterizzati da valori piccoli, tenendo conto della lunghezza dei lati del triangolo sferico rispetto al raggio della sfera, i relativi sviluppi in serie, arrestati ai termini in  $1/R^5$  inclusi; si ha così:

$$Y_2/R - Y_2^3/(6R^3) + Y_2^5/(120R^5) = [1 - S^2/(2R^2) + S^4/(24R^4)][Y_1/R - Y_1^3/(6R^3) + Y_1^5/(120R^5)] + [S/R - S^3/(6R^3) + S^5/(120R^5)][1 - Y_1^2/(2R^2) + Y_1^4/(24R^4)] \sin \alpha^*$$

Moltiplichiamo ora entrambi i membri per  $R$  e svolgiamo le parentesi, tralasciando i termini in  $1/R^5$  e superiori. Si ha:

$$Y_2 - Y_2^3/(6R^2) + Y_2^5/(120R^4) = Y_1 - Y_1 S^2/(2R^2) + Y_1 S^4/(24R^4) - Y_1^3/(6R^2) + Y_1^3 S^2/(12R^4) + Y_1^5/(120R^4) - [S^3/(6R^2) + Y_1^2 S^3/(12R^4) - S^5/(120R^4) - S + Y_1^2 S/(2R^2) - Y_1^4 S/(24R^4)] \sin \alpha^*$$

Poiché la formula deve riuscire valida operando nel campo sferico, poniamo in essa:

$$Y_1 = Y_2 = Y = S = 150 \text{ km e } R = 6300 \text{ km}$$

cosicché risulta:

$$\begin{aligned} Y S^2/(2R^2) &= Y^2 S/(2R^2) && \leq 42,52 \text{ m;} \\ Y^3/(6R^2) &= S^3/(6R^2) && \leq 14,17 \text{ m;} \end{aligned}$$



$$Y^3S^2/(12R^4) = Y^2S^3/(12R^4) \leq 4 \text{ mm};$$

$$YS^4/(24R^4) = Y^4S/(24R^4) \leq 2 \text{ mm};$$

$$Y^5/(120R^4) = S^5/(120R^4) \leq 0,4 \text{ mm}.$$

Nel campo sferico è quindi lecito tralasciare i termini in  $1/R^4$  cosicché si ha infine:

$$Y_2 - Y_2^3/(6R^2) = Y_1[1 - S^2/(2R^2) - Y_1^2/(6R^2)] + [1 - Y_1^2/(2R^2) - S^2/(6R^2)]S \cdot \text{sen}\alpha^*$$

Si dovrebbe ora procedere alla risoluzione di un'equazione di terzo grado, o cubica, nell'incognita  $Y_2$ . Tuttavia questo calcolo non è necessario; risulta infatti dalla precedente:

$$Y_2 = Y_1 + S \cdot \text{sen}\alpha^* - Y_1[S^2/(2R^2) + Y_1^2/(6R^2)] - [Y_1^2/(2R^2) + S^2/(6R^2)]S \cdot \text{sen}\alpha^* + Y_2^3/(6R^2)$$

E quindi tralasciando i termini di ordine pari a  $1/R^4$  o superiori, come già fatto in precedenza, nello sviluppo di  $Y_2^3$  dato dalla precedente espressione, potremo scrivere, senza perdita di precisione:

$$Y_2^3/(6R^2) \approx (Y_1 + S \cdot \text{sen}\alpha^*)^3/(6R^2)$$

Introducendo questa espressione nell'equazione cubica, si ottiene dopo facili passaggi:

$$Y_2 = Y_1 + S_{12} \cdot \text{sen}\alpha^*_{12} - Y_1 S_{12}^2 \cdot \cos^2\alpha^*_{12}/(2R^2) - S_{12}^3 \cdot \text{sen}\alpha^*_{12} \cdot \cos^2\alpha^*_{12}/(6R^2)$$

Se ora al medesimo triangolo sferico  $P_1P_2E$  applichiamo la formula del seno e procediamo in maniera analoga otteniamo la relazione:

$$X_2 = X_1 + S_{12} \cdot \cos\alpha^*_{12} + Y_2^2 \cdot S_{12} \cdot \cos\alpha^*_{12}/(2R^2) - S_{12}^3 \cdot \text{sen}^2\alpha^*_{12} \cdot \cos\alpha^*_{12}/(6R^2)$$

Per il calcolo dell'azimut piano reciproco si trova infine la relazione:

$$\alpha^*_{21} = \alpha^*_{12} - Y_1 \cdot S_{12} \cdot \cos\alpha^*_{12}/R^2 - S_{12}^2 \cdot \text{sen}\alpha^*_{12} \cdot \cos\alpha^*_{12}/(2R^2) \pm \pi$$

Ricordando ora le equazioni di corrispondenza della rappresentazione di Cassini-Soldner (v. p. 16) e ponendo altresì:

$$S_{12} \cdot \cos\alpha^*_{12} = u; \quad S_{12} \cdot \text{sen}\alpha^*_{12} = v;$$

Dalle precedenti si hanno le espressioni:

$$y_2 = y_1 + v - y_1 \cdot u^2/(2R^2) - u^2v/(6R^2)$$

$$x_2 = x_1 + u - y_2^2 \cdot u/(2R^2) - uv^2/(6R^2)$$

$$\alpha^*_{21} = \alpha^*_{12} - y_1 \cdot u/R^2 - uv/(2R^2) \pm \pi$$

Si vede così che le equazioni di Soldner mettono in relazione le coordinate geodetiche rettangolari  $P(X,Y)$  con le coordinate geodetiche polari  $P(\alpha^*, S)$  dei punti della sfera. Poiché le coordinate geodetiche rettangolari coincidono con le coordinate piano-cartografiche dei punti della rappresentazione di Cassini-Soldner, le precedenti mettono anche in relazione le coordinate

dei punti della rappresentazione  $p(x, y)$  con le coordinate geodetiche polari dei punti della sfera  $P(\alpha^*, S)$ .

Se utilizziamo le equazioni di Soldner per la soluzione del problema geodetico attraverso gli elementi della rappresentazione cartografica, questa circostanza si traduce in un sostanziale snellimento e alleggerimento dei calcoli, con conseguente riduzione dei rischi di errore, non dovendosi più eseguire la riduzione del problema al piano della rappresentazione, con la necessità di dover procedere alla determinazione dei moduli di deformazione delle distanze o delle variazioni degli azimut delle trasformate rispetto alle corde.

Le precedenti possono essere facilmente invertite per il calcolo di  $u, v$  note le coordinate piano-cartografiche dei punti  $p_1(x_1, y_1), p_2(x_2, y_2)$ .

Basta porre dapprima:

$$\Delta x = x_2 - x_1; \quad \Delta y = y_2 - y_1;$$

e quindi:

$$u = x_2 - x_1 - y_2^2 u/(2R^2) + uv^2/(6R^2) = \Delta x - y_2^2 u/(2R^2) + uv^2/(6R^2);$$

$$v = y_2 - y_1 + y_1 u^2/(2R^2) + u^2 v/(6R^2) = \Delta y + y_1 u^2/(2R^2) + u^2 v/(6R^2);$$

Introducendo queste espressioni di  $u, v$  nei secondi membri delle precedenti, svolgendo le parentesi e tralasciando i termini in  $1/(R^4)$  si ricavano subito, senza perdita di precisione, le relazioni:

$$u = \Delta x - y_2^2 \Delta x/(2R^2) + \Delta x \Delta y^2/(6R^2) = S_{12} \cos^2\alpha^*_{12};$$

$$v = \Delta y + y_1 \Delta x^2/(2R^2) + \Delta x^2 \Delta y/(6R^2) = S_{12} \text{sen}^2\alpha^*_{12};$$

In tal modo le equazioni di Soldner permettono di ricavare gli elementi ellissoidici  $\alpha^*_{12}, S_{12}$  direttamente dalle coordinate piano-cartografiche dei punti della rappresentazione  $p_1(x_1, y_1), p_2(x_2, y_2)$ . Basta porre infatti:

$$S_{12} = (u^2 + v^2)^{1/2};$$

Mentre l'azimut piano, nel vertice  $P_1$ , dell'arco di geodetica  $S_{12}$  vale:

$$\alpha^*_{12} = \left| \arctg \left| \frac{v}{u} \right| + p\pi \right| \quad \text{con } p = (\text{v. p. 16})$$

A questo punto si può applicare la terza equazione di Soldner per il calcolo dell'azimut  $\alpha^*_{21}$  della  $S_{12}$  nel vertice  $P_2$ .

Infine se si vuole determinare il valore dell'azimut  $\alpha_{12}$  della  $S_{12}$  nel vertice  $P_1(\varphi_1, \lambda_1)$ , contato a partire dal meridiano passante per il punto  $P_1$ , occorre determinare la convergenza  $\gamma_1$  del meridiano di  $P_1$  rispetto al meridiano passante per l'origine  $O(\varphi_0, \lambda_0)$  del sistema di riferimento (v. fig. 4); operando nell'ambito del campo sferico, per il calcolo della convergenza  $\gamma_1$  vale la relazione:

$$\gamma_1 = (\lambda_1 - \lambda_0) \cdot \text{sen}\varphi_1 + [(\lambda_1 - \lambda_0)^3/3] \cdot \text{sen}\varphi_1 \cdot \cos^2\varphi_1$$

si pone infine:

$$\alpha_{12} = \alpha^*_{12} + \gamma_1$$

#### 4. LA RELAZIONE TRA COORDINATE DI CASSINI-SOLDNER E DI GAUSS

##### 4.1 La trasformazione della rappresentazione afilattica di Cassini-Soldner nella rappresentazione conforme di Gauss

Abbiamo visto che nella rappresentazione di Cassini-Soldner i moduli principali di deformazione lineare  $N_1$ ,  $N_2$ , valgono rispettivamente (v. p. 15):

$$N_1 = 1 + y^2/(2R^2) \quad \text{nella direzione dell'asse X; } (\cos^2 \alpha' = 1);$$

$$N_2 = 1 \quad \text{nella direzione dell'asse Y; } (\cos^2 \alpha' = 0);$$

Tanto premesso, possiamo modificare leggermente le leggi di corrispondenza della rappresentazione di Cassini-Soldner in modo da far subire alle ordinate  $y$  dei punti, lo stesso allungamento unitario subito dall'ascissa  $x$  (v. fig. 5); otteniamo in tal modo che i due moduli principali di deformazione lineare  $N_1$ ,  $N_2$ , assumono lo stesso valore, pari a quello di  $N_1$ , e si ha:

$$N_1 = N_2 = N = 1 + y^2/(2R^2) = m$$

Espressione di  $m$  che, come è noto, caratterizza la rappresentazione conforme di Gauss.

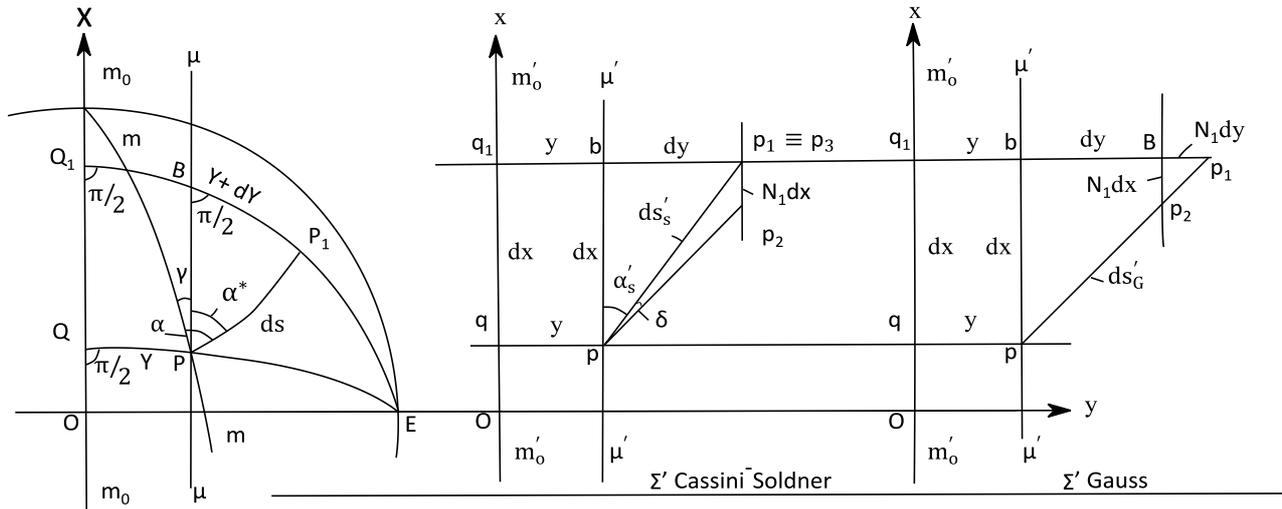


Figura 5. Immagine grafica del passaggio dalla rappresentazione di Cassini-Soldner alla rappresentazione di Gauss

Per una maggiore intelligibilità degli sviluppi che seguono, contrassegniamo con l'indice "S" gli elementi relativi alla rappresentazione di Cassini-Soldner e con l'indice "G" quelli relativi alla rappresentazione di Gauss.

In questa esposizione i due sistemi di riferimento cartografico hanno, per ipotesi, la stessa origine e assi coincidenti. Da quanto precede, l'ascissa  $x_G$  coinciderà con l'ascissa  $x_S$ , mentre l'ordinata  $y_G$  risulterà più lunga dell'ordinata  $y_S$  in ragione del modulo di deformazione  $m = N_1 \geq 1$ . Possiamo quindi scrivere le seguenti relazioni tra coordinate di Gauss e di Cassini-Soldner:

$$x_G = x_S$$

$$y_G = \int_0^{y_S} m dy$$

$$= \int_0^{y_S} [1 + y^2/(2R^2)] dy$$

$$= \int_0^{y_S} dy + [1/(2R^2)] \int_0^{y_S} y^2 dy$$

$$= y_S + y_S^3/(6R^2)$$

$$= y_S [1 + y_S^2/(6R^2)]$$

Riepilogando si hanno le relazioni:

$$x_G = x_S$$

$$y_G = y_S [1 + y_S^2/(6R^2)]$$

Risulta così che nel passaggio dalla rappresentazione afilattica di Cassini-Soldner alla rappresentazione conforme di Gauss, della sfera, su piani riferiti alla stessa origine e con assi coincidenti, le

ascisse  $x_G$  assumono lo stesso valore delle ascisse  $x_S$  mentre le ordinate  $y_G$  della proiezione conforme di Gauss si possono ottenere aggiungendo il valore  $y_S^3/(6R^2)$  alle ordinate  $y_S$  di Cassini-Soldner.

Le precedenti si invertono facilmente ponendo nell'espressione delle ordinate, a meno di termini trascurabili in  $1/R^4$ :

$$x_S = x_G$$

$$y_S = y_G - y_S^3/(6R^2) \approx y_G - y_G^3/(6R^2) = y_G [1 - y_G^2/(6R^2)]$$

Riepilogando si hanno le relazioni:

$$x_S = x_G$$

$$y_S = y_G [1 - y_G^2/(6R^2)]$$

Relazioni che permettono, tra l'altro, di passare dalle coordinate plano-cartografiche dei punti immagine  $p(x_G, y_G)$  della rappresentazione conforme di Gauss alle coordinate geodetiche rettangolari dei corrispondenti punti  $P(\varphi, \lambda)$  dell'ellissoide di rotazione (v. pp. 17-18).

Nel seguito indicheremo le coordinate plano-cartografiche della rappresentazione conforme di Gauss semplicemente con  $x$ ,  $y$  a meno di diverso esplicito avviso.

#### 4.2 Richiami del sistema di rappresentazione conforme di Gauss

Come è evidente da quanto precede, la proiezione di Gauss della sfera sul piano è conforme poiché, per le modalità costruttive che la caratterizzano, in ogni punto della rappresentazione risulta rispettata la condizione:

$$N_1 = N_2 = m = 1 + y^2/(2R^2)$$

L'ellisse che fornisce l'immagine geometrica del modulo di deformazione lineare  $m$ , ha quindi i semiassi principali  $N_1, N_2$ , uguali tra loro, cosicché assume la forma di un cerchio di raggio  $m = N_1 = N_2$  (v. fig. 6).

Se quindi prendiamo in esame sulla sfera un triangolo elementare  $PP_1B$  e sul piano della rappresentazione il corrispondente triangolino immagine  $pp_1b$  (v. fig. 7) si avrà che:

$$pp_1/PP_1 = p_1b/P_1B = bp/BP = m = ds'/ds = 1 + y^2/(2R^2)$$

Cioè i due triangoli elementari  $pp_1b$  e  $PP_1B$  sono legati da un rapporto di similitudine o di conformità e pertanto hanno gli angoli corrispondenti uguali (condizione di isogonia).

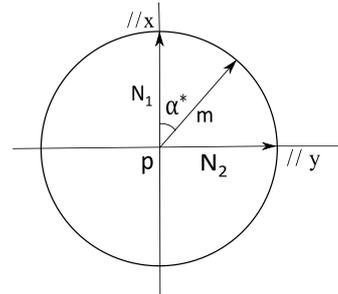


Figura 6. Modulo di deformazione lineare  $m$  in una rappresentazione conforme come quella di Gauss.

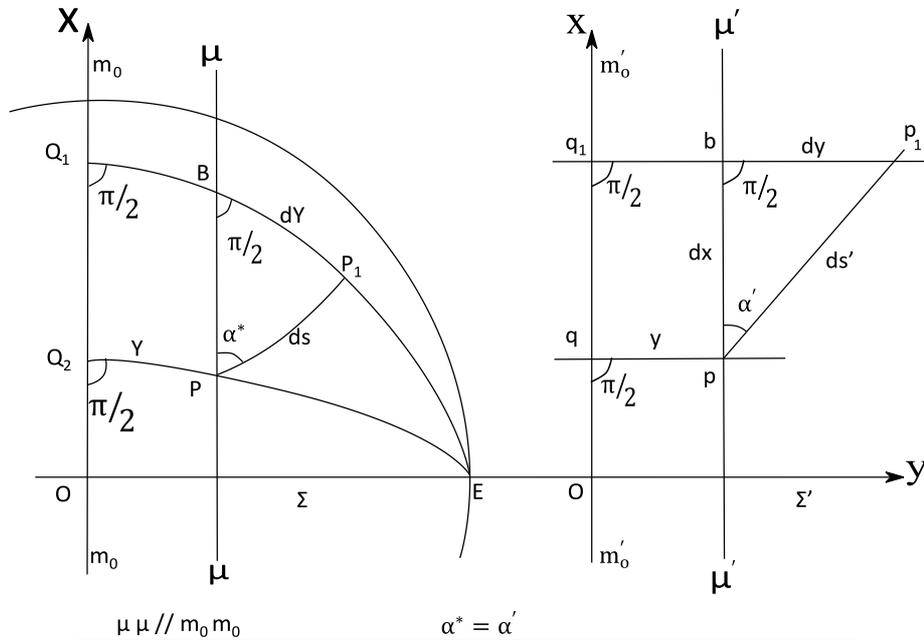


Figura 7. Immagine sullo sferoide e sul piano di Gauss di un triangolo elementare per lo studio delle proprietà differenziali della rappresentazione.

In particolare, per quanto riguarda gli azimut degli elementi lineari  $ds$  e  $ds'$ , risulta  $\alpha^* = \alpha'$ .

Rimane così assicurato lo scopo fondamentale delle rappresentazioni isogone o conformi.

Definiti i moduli principali di deformazione lineare, si ottiene facilmente il modulo di deformazione superficiale  $\eta$ . Basta porre infatti:

$$\eta = d\sigma'/d\sigma = N_1 \cdot N_2 = [1 + y^2/(2R^2)]^2 = 1 + y^2/R^2 + y^4/4R^4 \approx 1 + y^2/R^2$$

essendo trascurabili in campo sferico i termini in  $1/R^4$ .

Per quanto riguarda gli angoli, si ha ( $N_1 = N_2$ ):

$$\text{tg}\alpha' = N_2/N_1 \text{tg}\alpha^* = \text{tg}\alpha^*$$

ovvero anche:

$\text{tg}\delta = \text{tg}(\alpha' - \alpha^*) = [(N_2/N_1)\text{tg}\alpha^* - 1]/[1 + (N_2/N_1)\text{tg}^2\alpha^*] = 0$   
 relazioni che pongono in evidenza che  $\alpha' = \alpha^*$ , ovvero anche  $\delta = 0$ ; quindi, con riguardo alle proprietà differenziali, la rappresentazione conserva gli azimut, è pertanto una rappresentazione isogona o conforme, mentre non conserva le superfici poiché  $\eta \neq 1$ .

Passiamo ora ad esaminare la situazione nel caso di archi di geodetica non di lunghezza infinitesima  $ds$  o  $ds'$ , ma finita ovvero  $S_{12}$  tra i punti  $P_1P_2$  di  $\Sigma$  e  $S'_{12}$  tra i punti  $p_1, p_2$  di  $\Sigma'$  (v. fig. 8).

Valgono, come è noto, le relazioni:

$$p_1p_2 \approx S'_{12} = [(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2]^{1/2}$$

$$m_{12} = 1 + (y_1^2 + y_1y_2 + y_2^2)/(6R^2)$$

$$S_{12} = S'_{12}/m_{12}$$

Mentre per le superfici finite si ha, per noti sviluppi in serie

$$\sigma = \int_{\sigma'} d\sigma' / \eta = \int_{\sigma'} (1 - y^2/R^2) d\sigma'$$

dove per risolvere l'integrale definito si ricorre alla considerazione di una sommatoria di prodotti.

Infine, per quanto si riferisce alla variazione dell'azimut della trasformata  $S'_{12}$  rispetto alla corda  $p_1p_2$  si ha intanto:

$$\Delta x = x_2 - x_1; \quad \Delta y = y_2 - y_1;$$

$$\alpha'_{12} = \left| \arctg \left| \frac{\Delta y}{\Delta x} \right| + p\pi \right| \quad p = (\text{v. p. 16})$$

e altresì:

$$\varepsilon_{12} = (2y_1 + y_2)(x_2 - x_1)/(6R^2)$$

relazione anche questa valida nel campo sferico

Infine si pone:

$$\alpha^*_{12} = \alpha'_{12} + \varepsilon_{12}$$

Per vedere come si colloca la trasformata  $S'_{12}$  rispetto alla corda  $p_1p_2$  vale la nota regola del vento per la quale la trasformata giace, rispetto alla corda, dalla parte opposta rispetto all'asse X e rivolge la concavità verso la corda stessa (v. fig. 8). Nel caso la trasformata intersechi la corda in prossimità dell'asse X, ivi l'andamento della trasformata può essere anche più complesso, pur restando valido il richiamo alla regola del vento.

Abbiamo così richiamato tutti gli elementi che permettono di conseguire la soluzione del problema geodetico, contenuto nell'ambito del campo sferico, operando sulla superficie del piano della rappresentazione di Gauss, invece che su quella dell'ellissoide.

Vedremo, nella seconda parte della trattazione, un esempio di calcolo al riguardo.

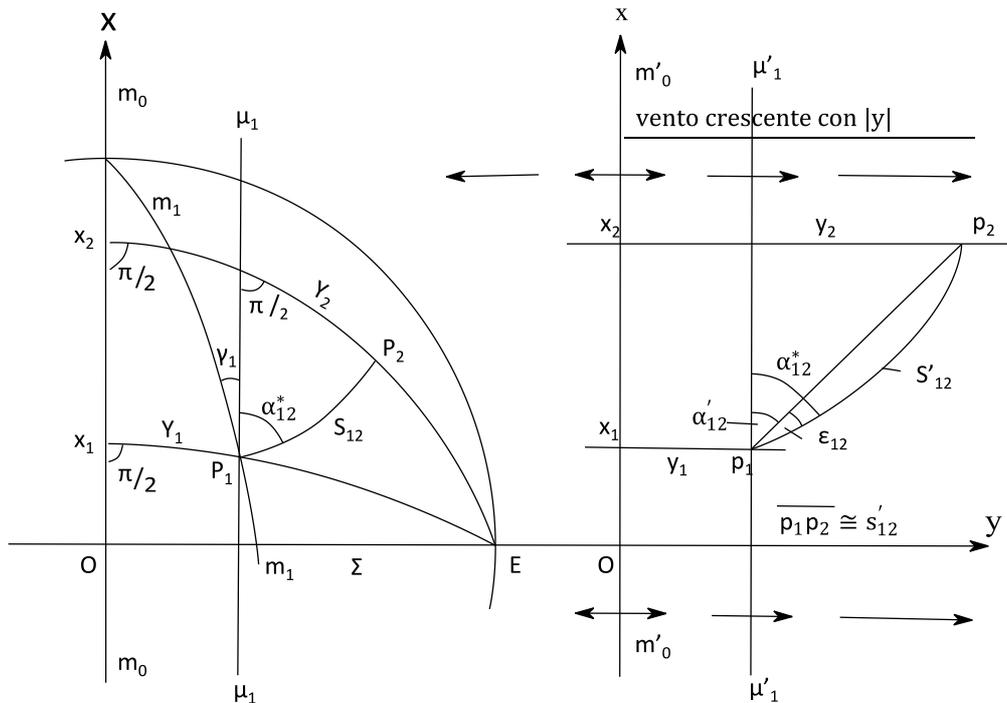


Figura 8. Immagine sullo sferoide e sul piano della rappresentazione di un triangolo finito per la risoluzione del problema geodetico sul piano di Gauss.

## 5. LA MODIFICA DELLE EQUAZIONI DI SOLDNER PER L'APPLICAZIONE ALLA RAPPRESENTAZIONE CONFORME DI GAUSS

### 5.1 Ricerca delle equazioni modificate

Ricordiamo che le equazioni di Soldner stabiliscono le relazioni tra coordinate geodetiche rettangolari dei punti della sfera  $P(X,Y)$  e le corrispondenti coordinate polari dei punti  $P(\alpha^*, S)$ , definite cioè in funzione dell'azimut piano  $\alpha^*$  e dell'arco di geodetica  $S$ .

Queste equazioni (v. p. 18) possono trovare diretta applicazione nella rappresentazione di Cassini-Soldner che, rispetto alle coordinate geodetiche rettangolari, è caratterizzata dalle seguenti leggi di corrispondenza:

$$x_s = X; \quad y_s = Y;$$

dove  $x_s, y_s$  sono le coordinate plano-cartografiche dei punti della rappresentazione Cassini-Soldner.

Le equazioni di Soldner, incardinate sui punti già evidenziati (v. sezione 3 p. 17), hanno la facoltà di risolvere i problemi geodetici sulla superficie ellissoidica, approssimata dalla sfera locale, e di presentare i risultati direttamente sul piano della rappresentazione di Cassini-Soldner evitando l'onere di indagare sulle trasformate delle linee geodetiche e delle variazioni degli azimut rispetto alle rispettive corde, a cui si va inevitabilmente incontro operando sul piano della rappresentazione, analisi che

semmai possono essere ottenute come semplici differenze, a valle della risoluzione del problema geodetico (v. pp. 18 - 19).

Naturalmente anche operando in coordinate di Cassini-Soldner è possibile trasferire la soluzione del problema geodetico sul piano della rappresentazione (v. pp. 14 - 16), che però si traduce in un ingiustificato aumento di operazioni di calcolo.

Riconosciuti così i vantaggi offerti dall'impiego delle formule di Soldner nella risoluzione dei problemi geodetici contenuti nell'ambito del campo sferico, operando in coordinate di Cassini-Soldner, ovvero in coordinate geodetiche rettangolari della sfera, appare naturale chiedersi se si può adottare un'analoga procedura anche utilizzando le coordinate plano-cartografiche della rappresentazione conforme di Gauss.

In effetti questa soluzione appare certamente perseguibile, disponendo delle relazioni che permettono di passare con facilità dalle coordinate di Gauss alle coordinate di Cassini-Soldner e viceversa (v. p. 19).

La soluzione del problema geodetico tra punti dati in coordinate di Gauss si può così sviluppare nelle tre fasi seguenti:

- 1) passaggio dalle coordinate di Gauss dei punti,  $p(x_G, y_G)$ , alle coordinate di Cassini-Soldner,  $p(x_S, y_S)$ , riferite a sistemi di assi coincidenti per origine e orientamento;
- 2) risoluzione del problema geodetico mediante l'applicazione delle equazioni di Soldner;
- 3) passaggio dalle coordinate di Cassini-Soldner,  $p(x_S, y_S)$ , risultato dei calcoli della fase 2), alle coordinate di Gauss  $p(x_G, y_G)$ .

Però, giacché le relazioni tra coordinate di Gauss e di Cassini-Soldner sono alquanto semplici (sempre che siano riferite a sistemi di assi coincidenti per origine e orientamento), si può pensare di inserire nelle equazioni di Soldner le coordinate di Cassini-Soldner dei punti  $p(x_S, y_S)$  espresse in funzione delle corrispondenti coordinate di Gauss ( $x_G, y_G$ ) e risolvere direttamente le equazioni così risultanti.

Nella sostanza non rimane allora che esaminare la forma assunta dalle tre equazioni di Soldner per effetto della accennata sostituzione di coordinate. Riprendiamo a tal fine le equazioni di Soldner (v. p. 18) dove si pone innanzitutto:

$$u = S_{12} \cdot \cos \alpha^*_{12}; \quad v = S_{12} \cdot \sin \alpha^*_{12};$$

e quindi:

$$y_{S2} = y_{S1} + v - y_{S1}u^2/(2R_2) - u^2v/(6R_2)$$

$$x_{S2} = x_{S1} + u + y_{S2}u/(2R_2) - uv^2/(6R_2)$$

$$\alpha^*_{21} = \alpha^*_{12} - y_{S1}u/(R_2) - uv/(2R_2) \pm \pi$$

e ricordiamo altresì le relazioni tra coordinate di Soldner e coordinate di Gauss (v. p. 19):

$$x_S = x_G$$

$$y_S = y_G[1 - y_G^2/(6R^2)]$$

Possiamo ora inserire nelle precedenti equazioni le coordinate di Soldner espresse in funzione delle coordinate di Gauss; trascurando i termini in  $1/R^4$  si ha per la prima di esse:

$$y_{S2} = y_{S1} + v - y_{S1}u^2/(2R^2) - u^2v/(6R^2) =$$

$$y_{G2} - y_{G2}^3/(6R^2) = y_{G1} - y_{G1}^3/(6R^2) + v -$$

$$[y_{G1} - y_{G1}^3/(6R^2)]u^2/(2R^2) - u^2v/(6R^2) \approx$$

$$y_{G1} + v - y_{G1}u^2/(2R^2) - u^2v/(6R^2) - y_{G1}^3/(6R^2)$$

Si dovrebbe ora procedere alla risoluzione di un'equazione di 3° grado nell'incognita  $y_{G2}$ ; però in considerazione del fatto che  $y_{G2}^3/(6R^2)$  è un termine correttivo, molto piccolo rispetto a  $y_{G2}$ , possiamo porre, a meno di termini in  $1/R^4$  e quindi senza perdita di precisione:

$$y_{G2}^3/(6R^2) \approx (y_{G1} + v)^3/(6R^2)$$

cosicché otteniamo dalla precedente:

$$y_{G2} - y_{G2}^3/(6R^2) = y_{G2} - (y_{G1} + v)^3/(6R^2) =$$

$$y_{G1} + v - y_{G1}u^2/(2R^2) - u^2v/(6R^2) - y_{G1}^3/(6R^2)$$

infine:

$$y_{G2} = y_{G1} + v - y_{G1}u^2/(2R^2) - u^2v/(6R^2) - y_{G1}^3/(6R^2) +$$

$$(y_{G1} + v)^3/(6R^2)$$

Per la seconda equazione di Soldner si ha, procedendo con analoghi criteri:

$$x_{S2} = x_{S1} + u + y_{S2}u/(2R^2) - uv^2/(6R^2) =$$

$$= x_{G2} = x_{G1} + u + [y_{G2} - y_{G2}^3/(6R^2)]u/(2R^2) - uv^2/(6R^2)$$

ovvero anche:

$$x_{G2} = x_{G1} + u + y_{G2}u/(2R^2) - uv^2/(6R^2)$$

Infine per la terza equazione si ha:

$$\alpha^*_{21} = \alpha^*_{12} - y_{S1}u/(R^2) - uv/(2R^2) \pm \pi =$$

$$\alpha^*_{12} - [y_{G1} - y_{G1}^3/(6R^2)]u/(R^2) - uv/(2R^2) \pm \pi =$$

$$\alpha^*_{21} = \alpha^*_{12} - y_{G1}u/(R^2) - uv/(2R^2) \pm \pi$$

Raccogliendo insieme i risultati ottenuti e togliendo ora l'indice "G", con l'intesa di riferirci alle coordinate di Gauss, si ha il seguente sistema di equazioni di Soldner modificate:

$$y_2 = y_1 + v - y_1u^2/(2R^2) - u^2v/(6R^2) - y_1^3/(6R^2) +$$

$$(y_1 + v)^3/(6R^2)$$

$$x_2 = x_1 + u - y_2^2u/(2R^2) - uv^2/(6R^2)$$

$$\alpha^*_{21} = \alpha^*_{12} - y_1u/(R^2) - uv/(2R^2) \pm \pi$$

Ricordando le espressioni delle equazioni per il calcolo in coordinate di Cassini-Soldner, si vede che la modifica da introdurre per poter eseguire gli stessi calcoli operando in

coordinate del sistema di rappresentazione conforme di Gauss, riguarda soltanto la prima equazione di Soldner.

Le tre precedenti equazioni possono essere facilmente invertite per risolvere il 2° problema fondamentale della geodesia, concernente il calcolo delle coordinate geodetiche polari di un punto  $P_2(\alpha^*_{12}, S_{12})$  sull'orizzonte di un punto  $P_1$ , note le coordinate di Gauss dei corrispondenti punti immagine  $p_1(x_1, y_1)$  e  $p_2(x_2, y_2)$  della rappresentazione cartografica.

A tal fine poniamo le prime due equazioni nella forma:

$$u = x_2 - x_1 - y_2^2 u / (2R^2) + uv^2 / (6R^2)$$

$$v = y_2 - y_1 + y_1 u^2 / (2R^2) + u^2 v / (6R^2) + y_1^3 / (6R^2) - (y_1 + v)^3 / (6R^2)$$

Per i termini correttivi ai secondi membri possiamo porre, a meno di termini in  $1/R^4$  e quindi senza perdita di precisione:

$$u = S_{12} \cos \alpha^*_{12} \approx \Delta x = x_2 - x_1;$$

$$v = S_{12} \sin \alpha^*_{12} \approx \Delta y = y_2 - y_1;$$

cosicché risulta:

$$u = \Delta x - y_2^2 \Delta x / (2R^2) + \Delta x \Delta y^2 / (6R^2)$$

$$v = \Delta y + y_1 \Delta x^2 / (2R^2) + \Delta x^2 \Delta y / (6R^2) + y_1^3 / (6R^2) - y_2^3 / (6R^2)$$

Determinati in tal modo i valori di  $u, v$ , possiamo scrivere (v. p. 18):

$$S_{12} = (u^2 + v^2)^{1/2}$$

$$\alpha^*_{12} = \left| \arctg \left| v/u \right| + p\pi \right| \quad p = (\text{v. p. 16})$$

Infine per la terza equazione si ottiene con facili passaggi:

$$\alpha^*_{21} = \alpha^*_{12} - [\Delta x / (2R_2)](y_1 + y_2) \pm \pi$$

Ricapitolando, operando in coordinate di Gauss nell'ambito del campo sferico, per la risoluzione del 1° problema fondamentale della geodesia, valgono le relazioni:

$$u = S_{12} \cos \alpha^*_{12}; \quad v = S_{12} \sin \alpha^*_{12};$$

$$y_2 = y_1 + v - y_1 u^2 / (2R_2) - u^2 v / (6R_2) - y_1^3 / (6R_2) + (y_1 + v)^3 / (6R_2)$$

$$x_2 = x_1 + u + y_2^2 u / (2R^2) - uv^2 / (6R^2)$$

$$\alpha^*_{21} = \alpha^*_{12} - y_1 u / (R_2) - uv / (2R_2) \pm \pi$$

mentre per la risoluzione del 2° problema fondamentale della geodesia, valgono le relazioni:

$$\Delta x = x_2 - x_1; \quad \Delta y = y_2 - y_1;$$

$$u = \Delta x - y_2^2 \Delta x / (2R^2) + \Delta x \Delta y^2 / (6R^2)$$

$$v = \Delta y + y_1 \Delta x^2 / (2R^2) + \Delta x^2 \Delta y / (6R^2) + y_1^3 / (6R^2) - y_2^3 / (6R^2)$$

$$S_{12} = (u^2 + v^2)^{1/2}$$

$$\alpha^*_{12} = \left| \arctg \left| v/u \right| + p\pi \right| \quad p = (\text{v. p. 16})$$

$$\alpha^*_{21} = \alpha^*_{12} - [\Delta x / (2R^2)](y_1 + y_2) \pm \pi$$

## 5.2 Nuova forma delle equazioni di Soldner modificate per la programmazione di calcolo su elaboratori elettronici

Le precedenti relazioni sono state ottenute rispettando la forma originale delle equazioni di Soldner, che ben si prestava all'esecuzione dei calcoli per mezzo dei logaritmi. Si ritiene utile suggerire adesso una loro nuova forma, ottenuta facilmente dalla precedente, che meglio si adatta alla programmazione su elaboratori elettronici o all'esecuzione dei calcoli con una semplice calcolatrice elettronica.

Tanto premesso, per il sistema di equazioni relative al 1° problema fondamentale della geodesia, possiamo scrivere:

$$y_2 = y_1 + v - y_1 u^2 / (2R^2) - u^2 v / (6R^2) - y_1^3 / (6R^2) + (y_1 + v)^3 / (6R^2) = y_1 + v - [1 / (6R^2)] [(3y_1 + v)u^2 + y_1^3 - (y_1 + v)^3]$$

$$x_2 = x_1 + u + y_2^2 u / (2R^2) - uv^2 / (6R^2) = x_1 + u \{ 1 + [1 / (6R^2)] (3y_2^2 - v^2) \}$$

$$\alpha^*_{21} = \alpha^*_{12} - y_1 u / (R_2) - uv / (2R_2) \pm \pi = \alpha^*_{12} - [u / (2R_2)] (y_1 + y_2) \pm \pi$$

Mentre per la risoluzione del 2° problema fondamentale della geodesia possiamo scrivere:

$$u = \Delta x - y_2^2 \Delta x / (2R^2) + \Delta x \Delta y^2 / (6R^2) =$$

$$\Delta x \{ 1 - [1 / (6R^2)] (3y_2^2 - \Delta y^2) \}$$

$$v = \Delta y + y_1 \Delta x^2 / (2R^2) + \Delta x^2 \Delta y / (6R^2) + y_1^3 / (6R^2) - y_2^3 / (6R^2) =$$

$$\Delta y + [1 / (6R^2)] [\Delta x^2 (2y_1 + y_2) + y_1^3 - y_2^3]$$

$$S_{12} = (u^2 + v^2)^{1/2}$$

$$\alpha^*_{12} = \left| \arctg \left| v/u \right| + p\pi \right| \quad p = (\text{v. p. 16})$$

$$\alpha^*_{21} = \alpha^*_{12} - [\Delta x / (2R_2)] (y_1 + y_2) \pm \pi$$

Ricapitolando la forma delle equazioni di Soldner, che si ritiene più comoda per l'esecuzione dei calcoli, è la seguente:

- per la risoluzione del 1° problema fondamentale della geodesia si pone:

$$u = S_{12} \cos \alpha^*_{12}; \quad v = S_{12} \sin \alpha^*_{12};$$

$$y_2 = y_1 + v - [1 / (6R^2)] [(3y_1 + v)u^2 + y_1^3 - (y_1 + v)^3]$$

$$x_2 = x_1 + u \{ 1 + [1 / (6R^2)] (3y_2^2 - v^2) \}$$

$$\alpha^*_{21} = \alpha^*_{12} - [u / (2R_2)] (y_1 + y_2) \pm \pi$$

- per la risoluzione del 2° problema fondamentale della geodesia si pone:

$$\Delta x = x_2 - x_1; \quad \Delta y = y_2 - y_1;$$

$$u = \Delta x \{ 1 - [1 / (6R^2)] (3y_2^2 - \Delta y^2) \}$$

$$v = \Delta y + [1 / (6R^2)] [\Delta x^2 (2y_1 + y_2) + y_1^3 - y_2^3]$$

$$S_{12} = (u^2 + v^2)^{1/2}$$

$$\alpha^*_{12} = \left| \arctg \left| v/u \right| + p\pi \right| \quad p = (\text{v. p. 16})$$

Nell'esempio di calcolo proposto nella seconda parte, utilizzeremo le equazioni di Soldner modificate, nella forma qui suggerita.

Le equazioni ottenute dalla modifica delle equazioni di Soldner, operano, per la risoluzione del problema geodetico, diretto o inverso, sulla superficie dell'ellissoide di rotazione (approssimato dalla sfera locale), ma per la determinazione della posizione dei punti accettano o restituiscono le coordinate di Gauss relative al piano della rappresentazione conforme.

## 6. MODALITA' APPLICATIVE DELLE FORMULE DI SOLDNER MODIFICATE PER LA RAPPRESENTAZIONE CONFORME DI GAUSS-BOAGA

Nel corso dell'esposizione che precede, abbiamo, a più riprese, evidenziato che lo studio ha per oggetto la ricerca di equazioni valide per l'esecuzione di calcoli geodetici nelle applicazioni ricadenti nell'ambito del campo sferico.

Ciò significa che le ordinate dei punti immagine  $p(x, y)$  devono soddisfare la condizione  $|y| \leq 150$  km; in questo caso le relazioni di calcolo forniscono risultati validi per archi di geodetica  $S \leq 150$  km (v. p. 17).

La validità delle relazioni di calcolo quindi dipende sia dalla lunghezza dell'arco di geodetica trattato, sia dalla distanza degli estremi di tale arco dal meridiano passante per l'origine delle coordinate.

Se ci si allontana da questo meridiano di una distanza superiore a 150km, limite convenzionale del campo sferico, per mantenere immutato il livello di precisione dei risultati, è necessario diminuire progressivamente, al crescere di  $|y|$ , la lunghezza dell'arco di geodetica che può essere considerato nel calcolo.

Per quanto riguarda il valore dell'ascissa  $x$ , osserviamo che nelle formule interviene sempre il valore  $\Delta x$  e quindi deve risultare comunque  $|\Delta x| \leq 150$ km, per restare nell'ambito del campo sferico. Questa situazione si presenta sia per le formule che permettono di riportare il problema geodetico sul piano della rappresentazione conforme, quali quelle relative al calcolo del modulo di deformazione lineare  $m_{12}$  e della riduzione angolare  $\varepsilon_{12}$  (v. p. 20-21), sia per le formule di Soldner modificate, che eseguono la trattazione del problema sulla superficie ellissoidica (approssimata dalla sfera locale) (v. par. 5).

In sostanza, come è lecito attendersi, i due gruppi di formule hanno lo stesso campo di applicabilità. Le osservazioni svolte rivelano tutto il loro valore quando si deve operare sulla rappresentazione di Gauss-Boaga e devono essere tenute in debita considerazione. Ricordiamo al riguardo che nella rappresentazione di Gauss-Boaga, il territorio dell'Italia è stato suddiviso in due fusi, nel senso dei meridiani, dell'ampiezza in longitudine di  $6^\circ$  ciascuno, che vanno sotto il nome di fuso Ovest e di fuso Est, oppure di fuso 1 e di fuso 2 rispettivamente.

Le coordinate geografiche sono definite sull'ellissoide di Hayford (o internazionale) con orientamento Roma M. Mario - Monte Soratte.

Le longitudini estreme dei due fusi sono:

fuso 1:  $6^\circ 00' 00'', 000$  e  $12^\circ 27' 08'', 400$  Est di Greenwich;  
fuso 2:  $11^\circ 57' 08'', 400$  e  $18^\circ 30' 00'', 000$  Est di Greenwich;

quindi con una zona di sovrapposizione di  $30'$  fra i due fusi.

Ciascun fuso è stato riferito al proprio meridiano centrale; i due meridiani centrali sono caratterizzati rispettivamente dalle longitudini  $9^\circ$  e  $15^\circ$  Est di Greenwich (v. fig. 9). Un fuso si estende quindi per  $3^\circ$  ad Ovest e  $3^\circ$  ad Est del proprio meridiano centrale. La zona di sovrapposizione dei due fusi è utile per ridurre gli inconvenienti relativi alla discontinuità tra i due fusi che presentano, come detto, due diversi sistemi di riferimento. Occorre inoltre tener conto del fatto che l'I.G.M. fornisce le longitudini dei punti trigonometrici, indicate con  $\omega$ , rispetto al meridiano di Roma M. Mario, di longitudine:

$$\omega_0 = 12^\circ 27' 08'', 400 \text{ Est di Greenwich.}$$

Quindi per ottenere la longitudine  $\lambda$  di un punto riferita al meridiano centrale del fuso si deve porre:

$$\lambda = \omega - \omega^* \quad (i = 1, 2)$$

con  $\omega^*$  longitudine del meridiano centrale del fuso (1 o 2) rispetto a Roma M. Mario e quindi:

$$\begin{aligned} \omega^* = & - 3^\circ 27' 08'', 400 \text{ per il fuso Ovest (o fuso 1)} \\ & + 2^\circ 32' 51'', 600 \text{ per il fuso Est (o fuso 2)} \end{aligned}$$

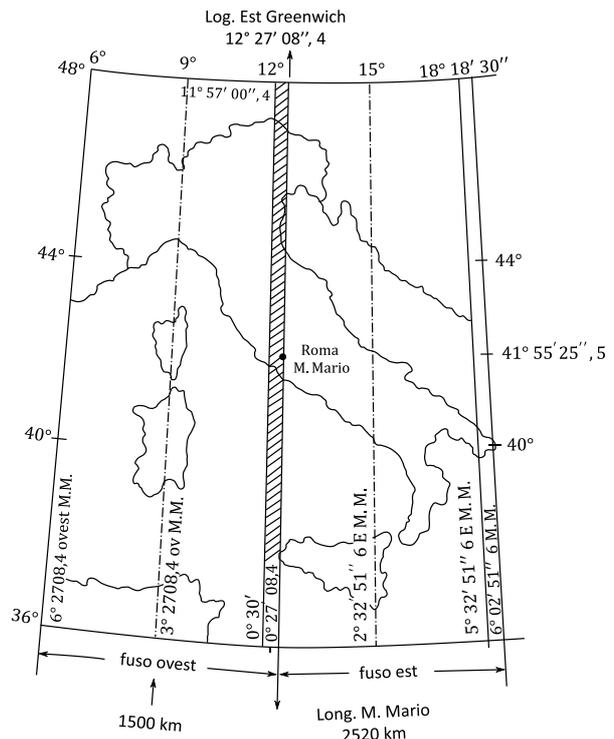


Figura 9. Suddivisione del territorio italiano in due fusi nella rappresentazione di Gauss-Boaga.

Allo scopo di limitare le deformazioni lineari della rappresentazione, si è adottato l'artificio di ridurre il valore delle coordinate plano-cartografiche di Gauss per il coefficiente  $m_0 =$

0,9996; in ragione di ciò, il modulo di deformazione lineare varia da un valore minimo di 0,9996 ad un valore massimo di 1,0004.

Per evitare i valori negativi delle ordinate  $y$  dei punti ad Ovest dei rispettivi meridiani centrali ed altresì per distinguere i punti appartenenti al primo fuso e quelli appartenenti al secondo fuso, si è attribuito un valore convenzionale  $f_0$  alla  $y$  del meridiano centrale di ciascun fuso, del valore  $f_0 = 1500\text{km}$  per il fuso 1 e di  $f_0 = 2520\text{km}$  per il fuso 2. L'ordinata risultante viene indicata con  $E$ .

La relazione tra ordinata  $E$  della rappresentazione di Gauss-Boaga e ordinata  $y$  di Gauss è quindi:

$$E = y \cdot m_0 + f_0$$

E con riferimento ai due fusi si ha:

$$E = \begin{cases} 1'500'000 \text{ nel fuso Est (fuso 1)} \\ y \cdot 0,9996 + 2'520'000 \text{ nel fuso Ovest (fuso 2)} \end{cases}$$

Per quanto riguarda l'ascissa  $x$ , essa varia da circa 4'000'000 m a circa 5'300'000 m per un'estensione in latitudine da  $36^\circ \text{ N}$  a  $48^\circ \text{ N}$ . L'ascissa  $x$  moltiplicata per il coefficiente 0,9996 è indicata con  $N$ . La relazione tra ascissa  $N$  nella rappresentazione di Gauss-Boaga e ascissa  $x$  di Gauss è pertanto:

$$N = x \cdot m_0 = x \cdot 0,9996$$

In definitiva quindi risulta che l'ordinata  $y$  copre una differenza di longitudine:

$$\Delta\lambda = \pm 3^\circ = \pm 0,0523598776\text{rad}$$

rispetto al meridiano centrale del fuso; ora il raggio del parallelo di latitudine  $\varphi = 36^\circ$  vale:

$$\begin{aligned} r_{36^\circ} &= [a/(1 - e \cdot \text{sen}^2\varphi)] \cos\varphi = \\ &= [6.378.388 / (1 - 0,006722670 \text{sen}^2 36^\circ)] \cos 36^\circ \\ &= 5.166.227,37\text{m} \end{aligned}$$

da cui segue:

$$|y| = r_{36^\circ} \cdot |\Delta\lambda| = 5.166.227,37 \cdot 0,0523598776 =$$

$$270.503,033\text{m} \approx 270\text{km}$$

Ci troviamo quindi con un valore delle ordinate del fuso che supera addirittura il doppio del limite del campo sferico. Nelle suddette condizioni, per mantenere invariato il livello di precisione dei risultati, occorre ridurre, a volte anche fortemente, la lunghezza degli archi di geodetica che è possibile introdurre nei calcoli, lunghezza che, alla periferia dei fusi può essere limitata anche a un terzo di quella ammessa nel campo sferico.

Ricerche sperimentali condotte dallo scrivente (v. bibliografia anno 2007), hanno messo in evidenza sostanzialmente che (v. fig. 10):

1) conviene definire innanzitutto un valore  $y_m$  in funzione delle ordinate degli estremi della trasformata  $S'_{12}$  dell'arco di geodetica  $S_{12}$  da trattare, mediante la relazione:

$$y_m = \left| [y_1^2 + y_1 y_2 + y_2^2] / 3 \right|^{1/2}$$

2) le formule di riduzione di distanze e angoli al piano della rappresentazione, quelle cioè comunemente utilizzate per il calcolo di  $m_{12}$  e  $\varepsilon_{12}$ , risultano valide, con archi di geodetica di lunghezza fino a  $S_{\max} = 150\text{km}$ , entro una fascia, intorno al meridiano centrale, di ampiezza pari a 2/3 dell'ampiezza del fuso, cioè finché è soddisfatta la condizione.  $y_m \leq 180\text{km}$ ;

3) quando l'ordinata  $y_m$  supera tale valore, la lunghezza dell'arco di geodetica che le formule sono in grado di trattare, mantenendo immutato il livello di precisione dei risultati, si riduce rapidamente fino a scendere al valore  $S_{\max} = 50\text{km}$ , cioè ad 1/3 di quella ammessa nel campo sferico, nelle zone periferiche dei fusi ( $180\text{km} < y_m \leq 270\text{km}$ );

4) la legge con la quale diminuisce la lunghezza  $S_{\max}$  al crescere della ordinata  $y_m$  è una parabola di 2° grado, cioè di espressione:

$$S_{\max} = a_0 + a_1 y_m + a_2 y_m^2$$

In cui i valori dei coefficienti sono da determinare, conoscendo le coppie di valori ( $y_m, S_{\max}$ ) di almeno tre punti della parabola;

5) si calcola quindi il valore di  $S_{\max}$  e si verifica che risulti verificata la condizione  $S/S_{\max} \leq 1$ ;

6) la ricerca del valore di  $S_{\max} = S_{\max}(y_m)$  si semplifica moltissimo, senza significativa perdita di precisione, se alla parabola si sostituisce la retta passante per i punti  $A=(180, 150)$ ,  $B=(270, 50)$  (v. fig. 10).

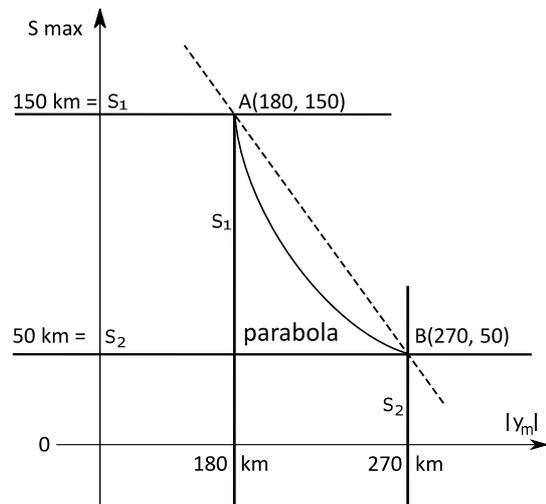


Figura 10. Grafico dei valori di  $S_{\max}$  in funzione di  $|y_m|$  ammissibili per assicurare la validità delle formule di Soldner adattate alla rappresentazione di Gauss per fusi di  $6^\circ$ . Nella valutazione di  $S_{\max}$  la parabola può essere sostituita dalla retta senza apprezzabile perdita di precisione.

Applicando noti risultati di geometria analitica, l'equazione di tale retta si può ottenere facilmente sviluppando il seguente determinante:

$$\begin{vmatrix} y_m & S_{\max} & 1 \\ y_1 & S_1 & 1 \\ y_2 & S_2 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} y_m & S_{\max} & 1 \\ 180 & 150 & 1 \\ 270 & 50 & 1 \end{vmatrix}$$

$$= y_m(150 \cdot 1 - 50 \cdot 1) - S_{\max}(180 \cdot 1 - 270 \cdot 1) + (180 \cdot 50 - 150 \cdot 270) = 0$$

da cui segue:

$$100 \cdot y_m + 90 \cdot S_{\max} - 31500 = 0$$

e infine:

$$S_{\max} = -(10/9) \cdot y_m + 350 \quad (\text{in chilometri})$$

valide per:

$$270 \text{ km} \geq y_m > 180 \text{ km};$$

assumendo

$$S_{\max} = 150 \text{ km per } 0 \leq y_m \leq 180 \text{ km}$$

## 7. CONCLUSIONI

In questa nota sono state illustrate le relazioni tra coordinate di Cassini-Soldner e di Gauss, ed è stata trattata la modifica delle equazioni di Soldner per renderle idonee alla trattazione delle coordinate di Gauss, per la risoluzione dei due problemi fondamentali della geodesia, nell'ambito del campo sferico.

Le equazioni di Soldner, modificate nel modo qui presentato, forniscono lo strumento idoneo per la risoluzione dei due problemi fondamentali della geodesia, nell'ambito del campo sferico, operando mediante le coordinate della rappresentazione conforme di Gauss.

La soluzione offerta si realizza sulla superficie della sfera locale, cosa che costituisce un considerevole vantaggio rispetto alla procedura tradizionale che si sviluppa sul piano della rappresentazione. E' noto infatti che rimanendo nel campo sferico, il triangolo sferico e quello ellissoidico possono considerarsi con grandissima approssimazione coincidenti e sovrapponibili senza che si verificano alterazioni rilevabili dell'uno e dell'altro. Ciò significa che le coordinate geodetiche polari dei lati del triangolo sferico si possono applicare ai lati del triangolo ellissoidico, come chiaramente mostrato infine dall'esempio di calcolo proposto nella seconda parte del lavoro.

Questa favorevole circostanza si traduce, attraverso le equazioni di Soldner modificate, in una soluzione diretta, stringata ed essenziale, scevra dalla necessità di ricercare elementi di passaggio intermedi che, oltre ad appesantire il processo di calcolo, elevano il rischio di errori nei risultati finali.

Per questi motivi la procedura tradizionale, unica a tutt'oggi disponibile, appare al confronto con quella nuova ora proposta, tortuosa, gravosa e insidiosa, potenzialmente capace di indurre, più facilmente, in errori di calcolo.

Nel nuovo quadro profilato essa può assumere un ruolo di controllo dei risultati ottenuti con l'applicazione delle formule di Soldner nella forma modificata e integrata, come risulta dal presente studio.

Modifica e integrazione, tra l'altro, che poi riguarda fondamentalmente una sola equazione, ovvero quella relativa all'ordinata  $y$ , poiché le modifiche delle altre equazioni sfociano nella costituzione di termini di ordine  $1/R^4$  o superiore, trascurabili, come è ben noto, in campo sferico.

Appare infine sempre opportuno, se non addirittura indispensabile, eseguire un controllo del campo di applicabilità delle relazioni di calcolo, indipendentemente dal metodo seguito, secondo le modalità qui descritte, quando si opera nelle zone periferiche dei fusi della rappresentazione di Gauss-Boaga.

## RICONOSCIMENTI

### Contributi dei singoli autori

Idea, concezione, metodologia, supervisione: S. Di Filippo.

### Fonti di finanziamento

Nessuna

### Conflitti di interessi

L'autore dichiara di non avere alcun conflitto di interesse.

## BIBLIOGRAFIA

Aquilina, C., Ferrara, E., Giannoni, U., 1973. Lezioni di topografia, Cedam.

Bezoari, G., Monti, C., Selvini, A., 1993. Fondamenti di rilevamento generale, Hoepli.

Birardi, G., 1980. Corso di topografia, Pitagora.

Boaga, G., 1948. Trattato di geodesia, topografia con elementi di fotogrammetria, Cedam.

Di Filippo, S., 1995. Sulla trasformazione delle coordinate planocartografiche dalla rappresentazione di Cassini-Soldner alla rappresentazione di Gauss-Boaga e viceversa, Rivista del Dipartimento del Territorio, n. 3.

Di Filippo, S., 1996. Sulla trasformazione delle coordinate planocartografiche dalla rappresentazione di Cassini-Soldner alla rappresentazione di Gauss-Boaga e viceversa, Rivista del Dipartimento del Territorio, n. 1.

Di Filippo, S., 2007. Riflessioni sull'utilizzazione della rappresentazione piana conforme di Gauss per la trasformazione delle coordinate catastali in campo sferico, Rivista dell'Agenzia del Territorio, n. 2.

Franchi, N., 1950. Elementi di cartografia, Istituto Geografico Militare.

Inghilleri G., 1974. Topografia Generale, UTET.

Jordan, W., 1923, Handbuch der Vermessungskunde, Metzlersche.

Maffiotti, G.B., 1899. I sistemi di proiezione nei rilevamenti catastali moderni, Rivista di Topografia e Catasto.

Paroli A., Triangolazioni topografiche e del Catasto, Hoepli, 1948.



# IL PROGETTO UP4DREAM: DRONI PER LA REALIZZAZIONE DI CARTOGRAFIA NEI PAESI IN VIA DI SVILUPPO

A. Calantropio<sup>1</sup>, F. Chiabrando<sup>1</sup>, J. Comino<sup>1</sup>, A. M. Lingua<sup>2</sup>, P. F. Maschio<sup>2</sup>, T. Juskauskas<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali (LabG4CH), Dipartimento di Architettura e Design (DAD), Politecnico di Torino, Viale Pier Andrea Mattioli, 39, 10125 Torino (TO) – (alessio.calantropio, filiberto.chiabrando, jessica.comino)@polito.it

<sup>2</sup> Laboratorio di Fotogrammetria, Geomatica e GIS, Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, Territorio e Infrastrutture, Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi, 24, 10129 Torino (TO) – (andrea.lingua, paolo.maschio)@polito.it

<sup>3</sup> UNICEF Supply Division, Copenhagen – tjuskauskas@unicef.org

**PAROLE CHIAVE:** Formazione e Capacity Building, Paesi in via di Sviluppo, Fotogrammetria UAV, Cooperazione Internazionale.

## ABSTRACT:

UP4DREAM (UAV Photogrammetry for Developing Resilience and Educational Activities in Malawi) è un progetto di cooperazione internazionale co-finanziato da ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) insieme al Politecnico di Torino e ad UNICEF (United Nations Children Fund) Malawi, con il supporto di due università locali (la Lilongwe University of Agriculture e Natural Resources, e la Mzuzu University) e di Agisoft LLC. Il Malawi è un paese particolarmente soggetto ad inondazioni, altamente soggetto a rischi naturali e sanitari, che ne impediscono lo sviluppo socio-economico in maniera sostenibile. Frequenti sono gli eventi naturali che hanno interessato l'approvvigionamento di cibo di diverse comunità. Lo stesso Malawi soffre inoltre di uno dei più elevati tassi di HIV, così come di malaria endemica. Il progetto UP4DREAM ha avuto come obiettivo la creazione di iniziative di *capacity-building*, e sviluppo di competenze sul campo legate ai metodi ed alle tecniche della Geomatica, in linea con altri progetti legati alla realizzazione di cartografia già attivi nei paesi in via di sviluppo. Il progetto UP4DREAM ha come obiettivo principale la divulgazione di competenze legate alle tecniche fotogrammetriche (dall'acquisizione alla gestione dei dati) ed all'utilizzo di sistemi GNSS (Global Navigation Satellite System) per la misura sul campo. I dati sono stati non solo acquisiti ed elaborati/georeferenziati, ma anche implementati in un geodatabase spaziale. Tali attività sono state condotte sul corridoio destinato alle operazioni umanitarie che UNICEF ha aperto nel 2017, coinvolgendo le istituzioni locali, le università, le società di servizi e le organizzazioni umanitarie che operano sul territorio del Malawi utilizzando la tecnologia UAV.

## 1. INTRODUZIONE

L'impiego dei droni nella raccolta di dati aerei ad alta risoluzione in aree remote e difficilmente accessibili si è dimostrato particolarmente rilevante, anche grazie alla possibilità di integrazione di questi dati nelle attività di previsione e mitigazione dei disastri naturali, per la realizzazione di piani dettagliati volti alla prevenzione delle emergenze, per la modellazione 3D delle aree sorvolate, l'identificazione di potenziali hotspot per focolai di malattie, e per la valutazione dello stato di salute delle colture (Boccardo, et al., 2015; Bravo & Leiras, 2015). Mentre alcune organizzazioni hanno soltanto recentemente iniziato ad impiegare l'utilizzo dei droni nelle loro prassi operative, altre ne hanno già incrementato l'impiego in contesti umanitari (Triche, et al., 2020) ed in particolare nei paesi in via di sviluppo (Lalrochunga, et al., 2020; Mugala, et al., 2020).

L'elevato potenziale degli UAS (Uncrewed Aerial Systems, chiamati anche UAV - Unmanned Aerial Vehicles) e del loro utilizzo nella realizzazione di cartografia per la prevenzione e risposta alle emergenze è stato ampiamente testato, risultando una tecnologia rapida, efficiente, e di grande interesse, da adottare al fine di individuare i pericoli prima che possano evolversi in disastri (UNICEF Kazakhstan, 2019). In questi contesti gli UAV sono stati utilizzati non solo per la realizzazione di cartografia (Bonte-Grapentin, et al., 2017), ma anche impiegati per il trasporto di farmaci e vaccini in diverse aree del mondo, (Strieckland, 2018). Spesso l'elaborazione dei dati e la raccolta degli stessi avvengono in contesti remoti (Meier, 2018) introducendo iniziative di addestramento di piloti e operatori che utilizzano i sistemi aerei e ne elaborano i dati<sup>1</sup>. Nella maggior

parte dei casi tali attività sono promosse da ONG (Organizzazioni non governative) che collaborano con le università locali.

La forza di tali progetti di riduzione del rischio risiede spesso negli approcci di *capacity building* che mirano a fornire alle comunità locali le conoscenze e gli strumenti adeguati senza fare affidamento permanente su risorse e competenze che arrivano dall'estero (*Back to the Future: Drones in Humanitarian Action - WeRobotics Blog*, 2019; Bonte- Grapentin et al., 2017). Lo sviluppo di competenze locali è, per l'appunto, essenziale quando si tratta di territori fragili; l'intervento immediato degli attori che operano sul territorio può diminuire il tempo di risposta all'evento, ovvero mettere in atto una rapida localizzazione dello stesso, giungendo ad un'efficace valutazione del danno, delle vite in pericolo e della potenziale perdita di risorse. Tale aspetto è essenziale non solo in fase di acquisizione dei dati ma anche per le fasi di ricostruzione, che solitamente risultano carenti in questo aspetto.

## 2. IL PROGETTO UP4DREAM

Diversi sono i progetti già realizzati per la generazione di cartografia su larga scala nei paesi in via di sviluppo (Koeva, et al., 2018), come lo Zanzibar Mapping Initiative<sup>2</sup>, il cui scopo è fornire una serie complementare di dati ad altissima risoluzione ad integrazione di quelli già esistenti provenienti da immagini satellitari, e attualmente disponibili su OpenStreetMap. Alla luce di queste esperienze è stato concepito il progetto UP4DREAM (UAV Photogrammetry for Developing Resilience and Educational Activities in Malawi)<sup>3</sup>, un progetto di formazione e sviluppo finanziato dall'ISPRS che si pone come obiettivo quello di rispondere a molteplici questioni quali: la generazione di

<sup>1</sup> <https://flyinglabs.org/>

<sup>2</sup> <http://www.zanzibarmapping.org/>

<sup>3</sup> <https://www.up4dream.com>

cartografia a grandissima scala tramite l'utilizzo di UAV a supporto della prevenzione delle emergenze, la valutazione delle potenzialità dell'utilizzo di sistemi aerei non convenzionali per la consegna di carichi essenziali (come i vaccini), la predisposizione di strumenti utili alla gestione dei dati acquisiti e soprattutto al rafforzamento della comunità locale attraverso l'implementazione e la partecipazione ad iniziative già in essere per la formazione legata all'uso dei dati acquisiti da UAV per la generazione di elaborati metrici 2D e 3D (ortofoto, Digital Surface Model – DSM e modelli 3D).

In accordo con gli obiettivi sopra esposti la prima parte del progetto UP4DREAM ha interessato un'attività di formazione organizzata appositamente per gli studenti dell'ADDA (The African Drone and Data Academy)<sup>4</sup>. I principali argomenti trattati all'interno del seminario hanno riguardato sia temi teorici (cenni di fotogrammetria digitale e topografia), sia aspetti pratici relativi all'utilizzo di software per l'elaborazione delle immagini digitali ed all'impiego di strumentazione GNSS (Global Navigation Satellite System) per la misura dei punti di controllo a terra (GCPs - Ground Control Points). Il seminario ha dunque seguito l'approccio del *learning by doing* ed ha contribuito a supportare ADDA con lo sviluppo strutturale del curriculum accademico, in particolare per quanto riguarda l'acquisizione e l'elaborazione delle immagini acquisite da UAV.

Successivamente è stato organizzato un secondo seminario che ha avuto come partecipanti i componenti delle agenzie governative e le istituzioni pubbliche. Tale momento di confronto è stato focalizzato sull'importanza dei dati geospaziali per il processo decisionale in caso di emergenza. Successivamente ai seminari, una parte delle attività del progetto si è concentrata sull'acquisizione dei dati all'interno del corridoio dedicato ai droni, istituito dall'UNICEF Malawi nel 2017<sup>5</sup>. Tale corridoio è stato predisposto per consentire ad aziende private, organizzazioni e università di testare le loro tecnologie legate al mondo dei droni e fornire soluzioni di sviluppo innovative nel contesto del Malawi. Le acquisizioni durante le attività del Politecnico di Torino in Malawi sono state eseguite nel distretto di Nsanje, un'area nel sud del Paese, fortemente colpita dalle inondazioni del 2019. Le attività sul campo nel distretto di Nsanje hanno avuto come obiettivo quello di valutare ed analizzare le potenzialità offerte dai prodotti ottenibili per varie applicazioni, quali il *flood modelling* (monitoraggio dei bacini idrografici) e l'identificazione dei siti di riproduzione delle zanzare (Hardy, et al., 2017).

## 2.1 Contesto e obiettivi del progetto

La prevenzione delle emergenze e i sistemi di allerta sono fondamentali per garantire che le comunità eventualmente colpite da un disastro naturale possano ricevere prontamente tutto il supporto e i materiali necessari in tempi rapidi. Attualmente in Malawi si stanno sviluppando sempre di più i sistemi di allarme per le attività di prevenzione delle catastrofi; tuttavia, molte delle informazioni utilizzate per prendere decisioni sono scarse, non ottimizzate e non raccolte in sistemi che permettono di gestire le informazioni geografiche in modo strutturato (GIS). Ciò rende il processo di prevenzione complicato e incoerente, portando le comunità più vulnerabili a non ricevere in caso di calamità naturale il necessario aiuto umanitario.

Il progetto UP4DREAM, realizzato in collaborazione tra Politecnico di Torino, la Lilongwe University of Agriculture and Natural Resources, la Mzuzu University, UNICEF e con il supporto di Agisoft Metashape, mira a sviluppare strategie e strumenti di rafforzamento delle competenze nel campo

dell'acquisizione, elaborazione e analisi dei dati derivanti da fotogrammetria UAV, per garantire che i partner coinvolti nel progetto ricevano un'istruzione e una formazione attiva e costante, sia in loco che da remoto.

UP4DREAM è stato ideato come uno studio pilota che, se pienamente adottato dal governo locale e applicato in modo programmatico, può espandersi attraverso vari partner e creare un impatto tangibile e positivo in Malawi, contribuendo in modo più ampio al miglioramento della qualità della vita della popolazione.

## 2.2 Il contesto: il corridoio per droni in Malawi

Il Fondo delle Nazioni Unite per l'infanzia (UNICEF) Malawi ha promosso attivamente l'impiego dei droni nel contesto umanitario e di sviluppo. In collaborazione con il governo del Malawi, l'UNICEF Malawi è stato il primo a istituire un corridoio umanitario per i droni, ossia uno spazio aereo integrato compatibile con tale tecnologia, dove aziende, organizzazioni e università possono testare le piattaforme sviluppate e fornire soluzioni di sviluppo per un utilizzo attivo di questi sistemi nel contesto del Malawi.

Il corridoio consiste in uno spazio aereo dedicato, con il centro nell'aeroporto di Kasungu (Figura 1). La sua dimensione è di quasi 5000 km<sup>2</sup> ed ha una forma circolare con un raggio di 40 km.



**Figura 1.** L'aeroporto di Kasungu, al centro dell'area designata per il passaggio dei droni impiegati in attività umanitarie in Malawi nel 2017.

Diversi test sono stati eseguiti da ditte private ed istituti di ricerca con piattaforme che consentono di raccogliere dati utili per lo studio ed il training di algoritmi di Intelligenza Artificiale (AI) e/o per analisi territoriali a larga scala. Tuttavia, non c'è mai stato alcun progetto per la realizzazione di una documentazione cartografica su larga scala. Solo un'area molto piccola e non uniforme è stata coperta da voli utili alla realizzazione di ortofoto.

Il distretto di Kasungu (7000 km<sup>2</sup>, ± 500.000 abitanti), area nella quale è localizzato il corridoio, presenta due grandi fiumi che lo attraversano, un centro urbano principale, alcuni villaggi remoti e difficilmente raggiungibili, un parco naturale, un piccolo aeroporto, scuole, piccole strutture sanitarie e molti altri elementi che sono di interesse dal punto di vista dell'attività umanitaria e durante la prevenzione/mitigazione delle catastrofi. Stagionalmente, il distretto deve far fronte a problemi di

<sup>4</sup> <https://adda-malawi.org/>

<sup>5</sup> <https://www.unicef.org/stories/humanitarian-drone-corridor-launched-malawi>

inondazioni e siccità che portano a malnutrizione, mancanza di acqua e cibo, oppure a focolai di malattie (come il colera) e altri problemi correlati. Inoltre, come qualsiasi altro distretto del Malawi, è esposto alla malaria.

Alla luce di tali considerazioni sono state stabilite dall'ufficio UNICEF del Malawi i seguenti aspetti come priorità chiave del corridoio:

- *imagery*: acquisizione e analisi di immagini aeree per la gestione dello sviluppo territoriale e/o delle crisi umanitarie, compreso il monitoraggio della situazione in caso di emergenza e calamità naturali, come inondazioni e terremoti;
- *connectivity*: esplorazione della possibilità per i Droni di estendere i segnali Wi-Fi o dei telefoni cellulari in aree difficili da raggiungere, in particolare in caso di emergenza o dopo un disastro naturale;
- *transport*: consegna di piccole scorte di peso ridotto come forniture mediche di emergenza, vaccini e campioni per diagnosi di laboratorio, compreso il test HIV.

Il progetto UP4DREAM si incentra sulla prima priorità del corridoio (immagini). Come già segnalato in precedenza, ha avuto come obiettivo quello di avviare un'iniziativa di *capacity building*, in linea con missioni già sviluppate in altri paesi in via di sviluppo, concentrandosi sulla realizzazione e gestione di cartografia su larga scala ad alto livello di dettaglio, con l'impiego di strumenti GIS - Geographic Information Systems per la gestione di dati 3D e 2D generati grazie a processi fotogrammetrici condotti attraverso l'uso di immagini acquisite da droni.

Il progetto prevede un coinvolgimento attivo degli enti locali che consentirà, se implementato in modo programmatico, di creare un impatto tangibile e positivo in Malawi e, più in generale, contribuirà al miglioramento della popolazione del Malawi.

### 3. FASI DEL PROGETTO E ANALISI SVOLTE

Il progetto, della durata di un anno, ha avuto come obiettivo principale quello legato alla formazione ed al trasferimento tecnologico, svolto attraverso momenti di formazione ed attività sul campo utili alla definizione di strategie condivise per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati raccolti.

Dal 23 febbraio al 5 marzo 2020 una delegazione del Dipartimento di Architettura e Design (Filiberto Chiabrando e Alessio Calantropio) e del Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (Andrea Lingua e Paolo Maschio) si è recata in Malawi per la prima fase del progetto UP4DREAM<sup>6</sup>. L'esperienza è stata condivisa con i colleghi del team di soccorso e risposta alle emergenze Amazon per l'identificazione di obiettivi comuni nell'ambito del progetto. In generale il progetto UP4DREAM si è sviluppato attraverso sei fasi principali: il test di prassi e procedure, la formazione dei partner locali, l'acquisizione dei dati aerei da drone, l'elaborazione con approccio fotogrammetrico, l'analisi dei dati elaborati ed infine la gestione e la condivisione dei risultati ottenuti.

#### 3.1 Fase di sperimentazione

La prima parte delle attività di test si è concentrata sull'acquisizione di dati su un'area limitata del corridoio, utilizzando le tecnologie disponibili in Malawi per definire gli

standard operativi e l'estensione delle operazioni di mappatura per l'intero corridoio.

L'esercitazione condotta ha previsto due giorni di attività sul campo ed è stata svolta nel distretto di Nsanje, un luogo nel sud del paese fortemente soggetto a inondazioni, pesantemente colpito da un'alluvione nel 2019 (Figura 2). Diversi dati sono disponibili nella zona in quanto eventi alluvionali significativi sono ricorrenti con una cadenza quinquennale. Le attività svolte hanno avuto anche come obiettivo quello di fornire un supporto per la preparazione/prevenzione e risposta alle emergenze.

La prima parte delle attività svolte si è concentrata sulla sperimentazione nell'acquisizione di dati con la piattaforma VTOL (Vertical Take Off and Landing) sviluppata da Swoop Aero (Figura 3).



**Figura 2.** In alto: l'area del corridoio umanitario, con al centro l'aeroporto di Kasungu; in basso: l'area del distretto di Nsanje (indicata con apposita campitura) dove sono state svolte le acquisizioni UAV.

Tale società, che ha vinto una gara commerciale e sta attualmente lavorando nel corridoio per conto dell'UNICEF Malawi, avrebbe dovuto svolgere missioni programmatiche di acquisizione dati fotogrammetrici con droni organizzate e automatizzate per acquisire grandi quantità di dati, adatti alla generazione di ortofoto per la documentazione su larga scala del territorio. Le applicazioni si sono limitate solo ad alcuni voli fotogrammetrici, mentre la maggior parte dei voli hanno riguardato missioni operative di *payload delivery*. Questa fase del progetto è stata condotta considerando sempre il Codice di condotta UAV umanitario<sup>7</sup> e altri regolamenti e disposizioni etiche inerenti al volo di tali piattaforme in questi contesti.

<sup>6</sup>[https://www.isprs.org/news/newsletter/2020-02/61\\_UP4DREAM\\_first\\_report\\_updated.pdf](https://www.isprs.org/news/newsletter/2020-02/61_UP4DREAM_first_report_updated.pdf)

<sup>7</sup> <https://uavcode.org>



**Figura 3.** Il drone VTOL utilizzato da Swoop Aero nel distretto di Nsanje.

Il volo eseguito ha consentito l'acquisizione di immagini con un GSD (Ground Sample Distance) di 3 cm con 80% di sovrapposizione longitudinale e 60% di sovrapposizione laterale. Oltre all'acquisizione delle immagini e prima delle operazioni di volo, diversi marker artificiali sono stati distribuiti in modo omogeneo sull'area. I marker sono stati successivamente utilizzati come GCPs (Ground Control Points) o Check Points (CPs) nell'elaborazione fotogrammetrica eseguita per ottenere risultati con precisioni controllate.

I punti sono poi stati misurati utilizzando un sistema GNSS (Global Navigation Satellite Systems), in modalità Real-Time Kinematik (RTK) per ottenere coordinate 3D con una precisione di circa 2-3 cm (Figura 4).



**Figura 4.** Rilievi GNSS per l'acquisizione dei GCPs nel distretto di Nsanje.

### 3.2 Attività di formazione attraverso l'analisi e l'elaborazione dei dati acquisiti per la definizione di strategie funzionali alla mappatura del corridoio umanitario.

Un ulteriore obiettivo di UP4DREAM è lo sviluppo di attività di formazione tecnica dei futuri operatori di droni con un approccio di sviluppo delle competenze applicando la logica del *learning by doing*. I discenti di questa esperienza formativa sono stati gli studenti dell'African Drone and Data Academy (ADDA), ricercatori e professori delle università locali (Lilongwe University of Agriculture and Natural Resources e Mzuzu University), e altre istituzioni e organizzazioni umanitarie e governative come COOPI e il DODMA (Department of Disaster Management Affairs - Malawi).

L'obiettivo della fase di formazione è stato quello di garantire che i partner locali potessero comprendere le fasi principali del processo di acquisizione ed elaborazione dei dati per portare

avanti le operazioni di mappatura senza specialisti provenienti dall'estero, nel modo più semplice e standardizzato possibile.

Il primo momento di formazione è stato svolto con gli studenti di ADDA. Tale attività ha introdotto gli aspetti relativi all'acquisizione di dati da drone, strategie di georeferenziazione utilizzando sistemi GNSS, elaborazioni fotogrammetriche, gestione di file di grandi dimensioni ed infine archiviazione e visualizzazione delle informazioni spaziali attraverso appositi software e strumenti GIS.

Una parte consistente del momento di formazione è stata dedicata all'apprendimento del software Metashape, partner del progetto, analizzato in tutti i suoi aspetti: dal primo allineamento delle immagini, passando per la collimazione dei punti di controllo, le fasi di calibrazione della camera, la valutazione dei residui ed infine la generazione dei prodotti finali quali nuvole di punti 3D, mesh DSM (Digital Surface Model) e ortofoto (Figura 5).

Sono inoltre state svolte attività sul campo che hanno riguardato l'acquisizione di GCPs con l'ausilio di strumentazione GNSS e la progettazione e l'esecuzione del volo fotogrammetrico sia con drone ad ala fissa (Figura 6) che con drone multi-rotore.



**Figura 5.** Momento di formazione sull'utilizzo dei programmi di fotogrammetria all'interno della ADDA Academy.



**Figura 6.** Acquisizione dati sul campo con piattaforma ad ala fissa.

Un secondo momento legato alle attività di *capacity building* condotte in Malawi è stato organizzato in collaborazione con ricercatori e docenti delle Università locali, quali la Malawi University of Science and Technology, la Lilongwe University of Agriculture and Natural Resources e la MZUZU University. Ai partner accademici si sono aggiunti tecnici di organizzazioni umanitarie (COOPI e UNICEF) e di enti governativi del Malawi come ad esempio il DODMA (Department of Disaster Management Affairs) (Figura 7).



**Figura 7.** Attività svolte con i rappresentanti delle istituzioni e organizzazioni locali, UNICEF, DODMA, COOPI, e le università partner del progetto.

Alla luce dei riscontri ottenuti al termine delle attività e nei mesi seguenti è possibile affermare che il risultato delle attività didattiche di *capacity building* è stato apprezzato sia da parte degli studenti dell'ADDA sia dai docenti e ricercatori delle università locali e dai tecnici di UNICEF, COOPI e DODMA. In funzione delle risorse disponibili si prevede un'ulteriore attività da svolgere nel corso del 2021 o 2022.

### 3.3 Acquisizione dei dati

Questa fase è stata progettata inizialmente per l'acquisizione di dati su larga scala con l'utilizzo di droni, con l'obiettivo di coprire l'intero territorio del corridoio con la raccolta di informazioni utili alla generazione di una cartografia fotografica dell'intera area. I partner locali avrebbero dovuto eseguire missioni di acquisizione dati organizzate e automatizzate al fine di rilevare ampie zone di territorio, per poi elaborare i dati con il software Metashape messo a disposizione per il progetto. Tali dati avrebbero creato la base di riferimento per ulteriori analisi su diversi ambiti quali la modellazione delle inondazioni, l'identificazione dei siti di riproduzione delle zanzare, e il monitoraggio dei bacini idrografici.

Tale fase, che doveva essere svolta in autonomia dai partner locali appositamente formati durante le attività didattiche precedentemente esposte, avrebbe previsto l'acquisizione di dati da droni già presenti sul territorio ed il posizionamento e la misura di GCPs e CPs con strumentazione GNSS donata ad UNICEF grazie al finanziamento ISPRS e Politecnico di Torino per l'acquisto di una coppia di ricevitori.

Sfortunatamente a causa dello scoppio della crisi COVID-19, non è stato impossibile raggiungere questo risultato, poiché l'operazione con i partner sul campo è stata interrotta e tutt'ora le difficoltà legate alla pandemia sul territorio del Malawi non hanno consentito ulteriori attività.

### 3.4 Elaborazione dei dati

L'elaborazione dei dati è stata eseguita grazie alla disponibilità di 10 licenze di rete gentilmente concesse da Agisoft Metashape. L'obiettivo è stato quello di estrarre ortofoto e prodotti 3D come DSM (Digital Surface Models) e mesh 3D per meglio comprendere e documentare l'area oggetto della sperimentazione.

Agisoft Metashape ha fornito licenze software della durata di un anno per permettere la continuazione del progetto. Oltre alla possibilità di utilizzare tali licenze per l'elaborazione dei dati Amazon ha donato tre unità del suo supercomputer (Amazon Snowball Edge) ad UNICEF Malawi. Tali dispositivi sono stati e verranno utilizzati per l'elaborazione dei dati già acquisiti e di

futura acquisizione e per l'archiviazione delle immagini e la condivisione dei file elaborati su un server cloud, sempre messo a disposizione da Amazon. Questa opportunità consentirà ad UNICEF, oltre agli aspetti già precedentemente analizzati, di migliorare la conoscenza del territorio necessaria per una migliore modellazione delle inondazioni ed anche nella mappatura dei siti di riproduzione delle zanzare.

### 3.5 Condivisione dei dati

Per la condivisione dei dati in fase di progetto era previsto l'utilizzo di licenze open per la creazione di un geodatabase spaziale dedicato, utile a rendere accessibili i dati raccolti a tutti i potenziali utenti, come ad esempio quelli legati alla comunità ISPRS, al mondo accademico, agli enti di ricerca, alle organizzazioni non governative ed infine gli enti locali preposti alla tutela e conoscenza del territorio. L'idea originale era quella di coinvolgere la comunità internazionale ISPRS anche per la fase di elaborazione e per cercare di contenere i costi e fornire alla comunità scientifica un ampio set di dati per i più diversi scopi. Tuttavia, poiché sono stati eseguiti solo piccoli test di acquisizione a causa di problemi relativi al COVID-19, è stato possibile realizzare esclusivamente un'esperienza di studio pilota per mettere a punto una strategia operativa condivisa a livello locale.

### 3.6 Gestione e analisi dei dati

L'ultima parte del progetto si è sviluppata su un'attenta analisi dei prodotti realizzati. Tale studio ha coperto diversi aspetti di ricerca ed è stato utilizzato per diversi scopi: la realizzazione di cartografia a grandissima scala, il monitoraggio dei corpi idrici, la generazione di modelli di allagamento/siccità ed in un prossimo futuro, previa l'ulteriore disponibilità di dati, il progetto potrà essere esteso ed impiegato per ulteriori analisi quali ad esempio la mappatura su larga scala delle colture (agricoltura di precisione), il monitoraggio dei processi di deforestazione, il rilevamento dei punti d'acqua e qualsiasi altro tipo di analisi relativa alle infrastrutture situate nell'area analizzata (strade, scuole, strutture sanitarie, mercati o altri luoghi cruciali che sono essenziali per l'agricoltura / la risposta alle emergenze / nutrizione / altro).

Tali aspetti potranno essere analizzati da più enti con interessi scientifici / di ricerca / sviluppo nella collaborazione con il governo del Malawi. Come già precedentemente riportato alcuni aspetti sono già stati trattati e sono riportati nel capitolo successivo.

## 4. DEFINIZIONE DI UN GEODATABASE SPAZIALE PER L'ANALISI DI RISCHIO

Al termine di una attenta e approfondita ricerca, svolta all'interno dei differenti geoportali esistenti per il Malawi, sono stati riscontrati numerosi problemi relativi all'uniformità e attendibilità dei dati ottenibili dalle diverse fonti consultate. In particolare, le prime analisi delle informazioni rinvenute relative alla valutazione del rischio risultavano poco chiare e rendevano pressoché incompatibile una corretta lettura delle informazioni stesse. Per cercare di migliorare la fruizione e lettura dei dati reperiti ed acquisiti sul campo si è deciso di sviluppare un geodatabase che funga da unico contenitore e che permetta il confronto e l'elaborazione di dati finora presenti su geoportali diversi e non connessi tra di loro.

Alla luce di tali aspetti, qui di seguito sono riportate le diverse fasi utilizzate per la creazione del geodatabase, il quale può essere inteso non solo come strumento cartografico di riferimento, bensì come strumento base per eventuali future

attività di prevenzione/preparazione all'emergenza ed in situazioni di emergenza stessa.

Per l'applicazione della metodologia proposta sono state selezionate due aree nel sud del Malawi (Nsanje e Bangula). Parallelamente a tali attività il progetto UP4DREAM ha costituito occasione per la sperimentazione di un approccio basato su algoritmi di intelligenza artificiale (AI), che verrà descritto più nel dettaglio in seguito, finalizzato all'estrazione di dati spaziali utili alla rappresentazione del territorio.

La prima sperimentazione è stata condotta nel distretto di Nsanje ed ha previsto l'utilizzo dei dati acquisiti da drone durante le attività di campagna del progetto.

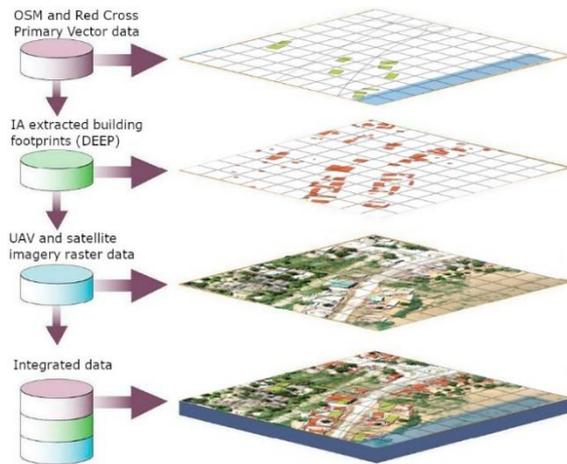
La seconda ha invece riguardato il distretto di Bangula, dove è stato possibile reperire una serie di immagini satellitari multi-temporali (2013, 2015 e 2019), alcuni voli da drone e informazioni tematiche armonizzate relative a precedenti eventi catastrofici e resi disponibili da UNICEF, Netherlands Red Cross, OSM (Open Street Map) come ad esempio l'estensione delle acque esondate dai corsi d'acqua.

A causa della molteplicità delle fonti (OSM<sup>8</sup>; UNICEF 2019<sup>9</sup>; Netherlands Red Cross 2019<sup>10</sup>; COOPI 2018<sup>11</sup>; EMS Copernicus<sup>12</sup>; EO Browser Sentinel data<sup>13</sup>), si è optato dunque per la realizzazione di un nuovo geodatabase comprensivo di tutte le informazioni disponibili attraverso l'impiego di un sistema informativo geografico (ArcGIS Pro) con l'obiettivo di fornire un chiaro e completo set di dati (Figura 8) facilmente accessibile. Nella definizione del nuovo geodatabase sono stati svolti i seguenti passaggi:

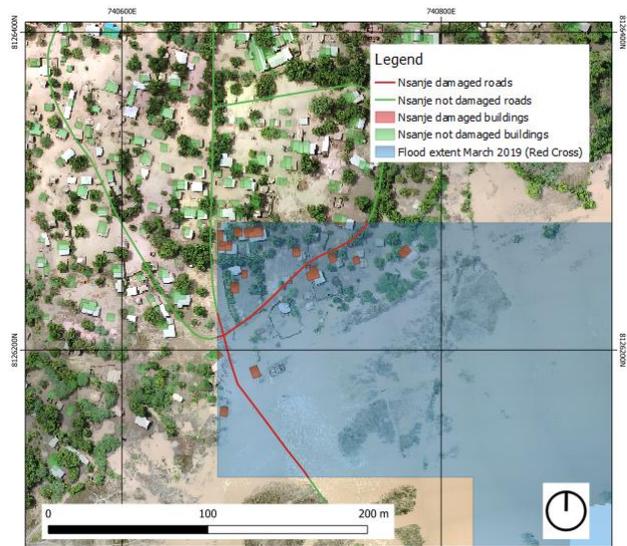
- Definizione del Sistema di riferimento, EPSG:32736 WGS84/UTM zone 36S;
- La creazione di un Feature Dataset, all'interno del nuovo file geodatabase, comprensivo di tutte le informazioni vettoriali di base:
  - sistema delle infrastrutture e dell'edificato estratto da Open Street Map;
  - corpi idrici estratto da Open Street Map;
  - estensione delle acque durante le inondazioni del ciclone Idai nei giorni 7, 10, e 14 marzo 2019 (Red Cross Netherlands);
- La costruzione di due diversi Mosaic Dataset:
  - raster UAV (ortofoto e DSM) degli elaborati relativi al distretto di Nsanje;
  - immagini satellitari (Landsat 8) nel distretto di Bangula, volto ad esplorare e confrontare precedenti eventi catastrofici (2013, 2015, e 2019);

#### 4.1 Nsanje

Nell'analisi svolta sul distretto di Nsanje, le informazioni estratte da OSM relative agli edifici ed alle infrastrutture sono state sovrapposte a quelle corrispondenti all'estensione delle inondazioni rilevate della Croce Rossa olandese (marzo 2019), al fine di ottenere una prima stima delle aree che avevano subito l'allagamento e che potenzialmente potrebbero nuovamente subire danni a seguito di un ulteriore alluvione. I risultati di questa analisi sono riportati in Figura 9.



**Figura 8.** Sistema di organizzazione dei layer impiegati su GIS. (Immagine tratta e riadattata da nationalgeographic.org)



**Figura 9.** Ortofoto UAV di Nsanje (UNICEF 2019); con sovrapposizione del layer di estensione delle acque (blu) con evidenziazione delle strade e degli edifici colpiti (in rosso) a seguito dell'inondazione dovuta al ciclone Idai nel 2019.

La possibilità di realizzare cartografia georeferenziata a grandissima scala risulta essere in linea con quanto specificato nelle linee guida del IWG-SEM : “Flood impact mappings” infatti “[...] requires the availability of reference geo-information layers and the crisis/disaster flood extent mapping to support semi-automatic identification of the potentially affected infrastructures and suitable post-event optical imagery at an adequate level of detail to estimate a potential damage grade” (IWG-SEM, 2014). Seguendo questa metodologia, è stata eseguita una prima classificazione del livello di potenziale danno sul sistema delle infrastrutture e degli edifici nell'area di Nsanje. Questi due dati vettoriali sono stati sovrapposti con l'estensione degli allagamenti forniti dalla Croce Rossa olandese e classificati utilizzando i seguenti valori: 1- Strade / edifici interamente allagati; 2- Strade / edifici potenzialmente interessati, in quanto anche parzialmente intersecati con i dati relativi all'alluvione; 3-

<sup>8</sup> <https://download.geofabrik.de/africa/malawi.html>

<sup>9</sup> <https://malawi.4p2c.org/portal/apps/webappviewer/index.html?id=bb5820e275ab4d44ab2f9c4bec9f2b1e>

<sup>10</sup> <https://data.humdata.org/dataset/floods-malawi-2019>

<sup>11</sup> <https://gis-malawi.com>

<sup>12</sup> <https://emergency.copernicus.eu/mapping/ems/copernicus-ems-monitors-floods-malawi>

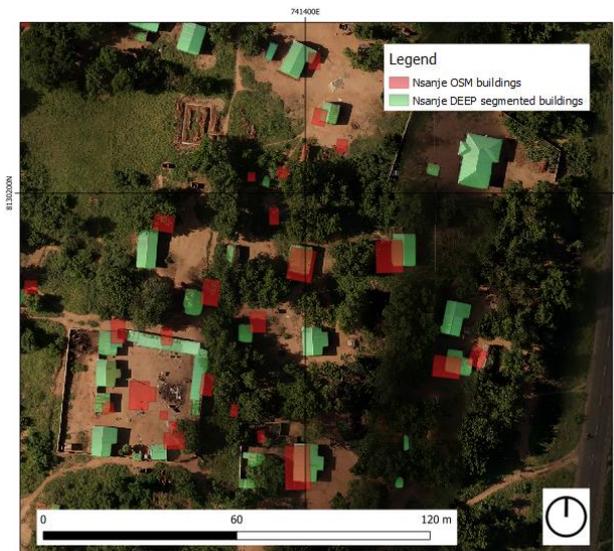
<sup>13</sup> <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser>

Strade potenzialmente percorribili e edifici potenzialmente sicuri, come risultato dell'assenza di intersezioni tra l'estensione delle aree alluvionate e i layer vettoriali. Questo tipo di analisi, tuttavia, presenta alcune criticità di coerenza con il danno effettivo in quanto la bassa risoluzione delle immagini utilizzate (immagini satellitari) non ha consentito di verificare accuratamente l'effettiva portata delle inondazioni. È stato possibile ottenere una migliore valutazione dei danni potenziali che potrebbero subire gli edifici nei pressi dei corsi d'acqua grazie alle immagini UAV che il team del Politecnico ha raccolto durante la spedizione UP4DREAM del 2020.

Grazie a tali dati è stato possibile identificare informazioni relative allo stato attuale dell'ambiente costruito e del sistema infrastrutturale in modo più accurato.

Inoltre, come accennato in precedenza, poiché il ruolo dell'intelligenza artificiale si è già dimostrato efficace in combinazione con i dati UAV nelle operazioni umanitarie (Oren & Verity, 2020), è stato sperimentato un approccio innovativo per l'estrazione dei contorni degli edifici presenti nell'ortofoto di Nsanje (Figura 10) utilizzando un modello di segmentazione automatica degli edifici implementato in DEEP (Digital Engine for Emergency Photo-analysis), un algoritmo basato sulle reti neurali (Calantropio, et al., 2021).

Questa operazione ha consentito di valutare due aspetti decisamente importanti: la non corretta posizione degli edifici riportati in OSM, probabilmente non aggiornati di recente, che potrebbe essere migliorata attraverso una maggiore disponibilità di ortofoto da drone utili per una più completa documentazione del territorio che risulta necessaria in queste aree fragili. Inoltre tale documentazione risulterebbe fondamentale per una più precisa identificazione degli edifici che potrebbero subire danni in caso di evento calamitoso e dunque strumento prezioso per la prevenzione/preparazione alle emergenze.

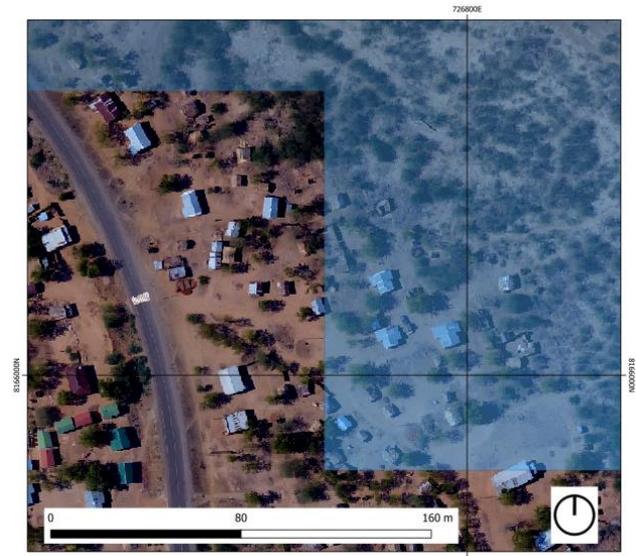


**Figura 10.** Ortofoto UAV di Nsanje (UP4DREAM 2020); sovrapposizione dell'impronta degli edifici generati attraverso le tecniche AI (in verde), e quelle OpenStreetMap (in rosso).

#### 4.2 Bangula

Un'analisi simile a quella precedentemente descritta è stata sviluppata nel distretto di Bangula attraverso la creazione di un set di immagini satellitari (dati EMS Copernicus e EO Browser Sentinel) acquisite con diversa cadenza temporale (2013, 2015 e 2019). Tali immagini sono legate a precedenti eventi calamitosi che hanno colpito la zona di interesse nel corso degli anni. L'obiettivo è stato quello di visualizzare l'estensione delle aree allagate nel corso del tempo, e raggiungere una maggiore

comprensione relativa la frequenza e all'evoluzione degli eventi manifestatisi nell'area. Questo tipo di analisi permette una prima interpretazione del livello di danno nell'area, grazie all'analisi delle aree allagate che sono chiaramente visibili dalle immagini satellitari ad infrarossi. Come è possibile osservare nelle seguenti figure 11 e 12, le immagini ed i prodotti realizzabili grazie alle acquisizioni da drone possono fornire informazioni più accurate e affidabili (su scala urbana) rispetto invece a quelli acquisiti da satellite (principalmente impiegati nella valutazione a scala territoriale).



**Figura 11** Ortofoto da drone relativa all'inondazione nel distretto di Bangula (COOPI 2018); sovrapposta all'estensione delle acque del marzo 2019 (Netherlands Red Cross).



**Figura 12.** Ortofoto UAV a seguito dell'inondazione nel distretto di Bangula (UNICEF 2019).

Sulla base dei risultati ottenuti, è possibile dunque affermare che l'impiego di immagini UAV non sostituisce, bensì fornisce un supporto complementare alle immagini satellitari, utile per una più completa e accurata definizione del territorio, particolarmente utile per la localizzazione degli edifici e delle principali infrastrutture in caso di emergenze. Questo maggiore livello di dettaglio diventa efficace nella realizzazione di cartografia a grandissima scala, e di fondamentale importanza quando si



affrontano situazioni straordinarie, dalla prevenzione/preparazione dell'emergenza alla gestione e valutazione della stessa.

Prendendo in considerazione gli obiettivi e le sfide dichiarati nel Malawi Country Strategic Plan 2019-2023 (World Food Programme, 2019), l'utilizzo delle immagini UAV nella mappatura ordinaria e straordinaria potrebbe incoraggiare l'analisi dell'uso del suolo, finalizzata non solo alla determinazione del terreno allagato ma anche alla più specifica identificazione della tipologia di risorse compromesse. Una più precisa conoscenza e rappresentazione del suolo da parte dei droni e la conseguente analisi potrebbe portare inoltre all'individuazione dei potenziali *safe spots* o punti sicuri, punti di raduno della popolazione e di distribuzione di cibo, acqua e farmaci in situazioni di emergenza.

## 5. PROSPETTIVE FUTURE E PRIMI RISULTATI DEL PROGETTO

I principali risultati del progetto hanno riguardato un'intensa attività di formazione in situ, la realizzazione di cartografia a grandissima scala di una porzione del territorio di Nsanje e la creazione di un geodatabase armonizzato contenente i dati disponibili su alcune aree di interesse per gli enti locali. Tali primi sviluppi del progetto UP4DREAM hanno consentito di mettere a punto strategie condivise per la documentazione e gestione delle informazioni territoriali a scale diverse. I possibili sviluppi futuri sono riportati nel dettaglio nei successivi paragrafi.

### 5.1 Utilizzo di sistemi UAV per acquisizioni su larga scala

Finora, il numero di aree rilevate e mappate dai droni in Africa risulta ancora decisamente ridotto; in quest'ottica l'obiettivo principale del progetto è stato dunque quello di fornire una metodologia semplice, capace di predisporre una serie di strumenti per la raccolta di dati aerei nel territorio malawiano, volta a supportare la popolazione e soprattutto gli enti preposti al controllo ed alla tutela del territorio nell'acquisizione, elaborazione e corretta gestione delle informazioni acquisite. La corretta realizzazione di una mappatura del territorio amplia la conoscenza dello stesso e promuove lo sviluppo della resilienza della popolazione, offrendo un potente strumento che, insieme al geodatabase sviluppato, consentirà una precisa analisi spaziale per la prevenzione/preparazione o risposta alle calamità naturali. Questo progetto ha posto le basi verso la completa mappatura del Malawi e delle sue aree vulnerabili, consentendo ai partner locali di continuare con l'acquisizione dati da drone e misure sul campo con strumenti GNSS, seguendo procedure e standard condivisi a livello internazionale. Tali dati potranno essere poi condivisi con la comunità scientifica e con associazioni e organizzazioni nazionali ed internazionali.

### 5.2 Perfezionamento delle strategie di *early warning* ed *emergency preparedness* tramite gli strumenti e piattaforme GIS

Alla luce delle sperimentazioni eseguite e delle attività svolte a livello nazionale ed internazionale è ormai assodato che i droni possano certamente essere impiegati sia come strumento di risposta all'emergenza<sup>14</sup>, ma anche come strumenti essenziali nella prevenzione, previsione e valutazione di scenari che precedono un disastro. Ottenere informazioni da sistemi aerei non convenzionali ad alta risoluzione e creare mappe di vulnerabilità aumenterebbe la capacità delle autorità soprattutto

in paesi con aree a rischio come quelle analizzate sul territorio del Malawi, di istituire sistemi di allarme rapido efficienti e migliorare dunque la preparazione alle emergenze. Comprendere i rischi del territorio è il primo passo per aumentare la resilienza della popolazione; per poter migliorare la conoscenza degli spazi abitati, i dati raccolti sono stati implementati in un geodatabase spaziale che sarà messo a disposizione degli attori che si occupano di prevenzione e monitoraggio del rischio quali enti governativi e associazioni umanitarie presenti in Malawi. Tale strumento potrà essere un utile supporto per la valutazione del rischio ed inoltre per eventuali attività di pianificazione territoriale, come la proprietà fondiaria e il monitoraggio ambientale. È ormai chiaro che le operazioni di riduzione, risposta all'evento catastrofico e ripristino rapido delle normali attività richiedono dati tempestivi e affidabili per agire in modo corretto<sup>15</sup>. Una delle possibili prosecuzioni di questo progetto è l'identificazione e conseguente implementazione di soluzioni politiche e di coordinamento, soluzioni tecniche e di analisi dei dati mirate a ridurre la dispersione delle informazioni tra le piattaforme GIS già sviluppate precedentemente e supportare gli sforzi umanitari dei nostri partner in Malawi.

Infine, i partner locali del progetto stanno esplorando, come possibilità, nuovi modi per supportare il governo del Malawi, quali lo sviluppo di una piattaforma GIS nazionale e l'impiego della geomatica nell'agricoltura automatizzata e di precisione (volta a monitorare e migliorare la qualità delle colture).

### 5.3 Attività di sensibilizzazione e ricerca scientifica

Alcune aree di collaborazione future sono state delineate come passaggi successivi del progetto, tra cui l'interesse mostrato da parte di ricercatori e colleghi del mondo accademico per possibili programmi di scambio con il Politecnico di Torino. Alla luce di queste richieste si prevede la scrittura e stipula di un protocollo d'intesa con i partner locali (e non) interessati, al fine di esplorare la possibilità di scambio di personale e la redazione e pubblicazione di articoli scientifici su riviste e conferenze nazionali ed internazionali.

In funzione dei futuri finanziamenti è prevista una ulteriore attività di formazione in loco o on-line per una valutazione esplicita delle attività svolte dagli attori coinvolti nelle prime attività. Il team del Politecnico è inoltre in contatto e continua a supportare ADDA nello sviluppo dei propri curricula accademici relativi all'acquisizione dati (GNSS e droni), elaborazione e gestione dei prodotti finali. Tali attività saranno gestite in cooperazione con Virginia Tech (il partner accademico UNICEF nel progetto ADDA) e con le università locali.

Uno dei risultati finali di questo lavoro congiunto sarà la predisposizione di linee guida e buone prassi operative per l'ulteriore sviluppo di operazioni di rilievo e realizzazione di cartografia a grandissima scala con l'impiego dei droni all'interno del Paese.

## 6. CONCLUSIONI

È ormai chiaro che la Geomatica ed il telerilevamento sono metodi fondamentali nei paesi in via di sviluppo per la documentazione, misura e gestione del territorio. Uno degli aspetti più importanti deriva dall'interoperabilità tra dati acquisiti da drone con le immagini satellitari provenienti da diverse fonti che permettono di eseguire analisi multi scala utili a valutare possibili pericoli naturali anche in paesi dove le risorse sono limitate. Nell'esperienza condotta i prodotti derivati dalle immagini UAV si sono effettivamente dimostrati un supporto

<sup>14</sup> <https://blogs.unicef.org/blog/flying-drone-malawi-my-first-emergency-deployment/>

<sup>15</sup> <https://werobotics.org/aidrobotics/>



affidabile nell'organizzazione di piani di prevenzione/preparazione alle emergenze. L'approccio di *capacity building* su cui si basa UP4DREAM garantisce inoltre attraverso la formazione professionale la possibilità di formare persone in loco che possono gestire tutte le fasi del processo, dall'acquisizione alla gestione dell'informazione spaziale, senza dover ricorrere all'intervento di personale dall'estero. Infine, l'approccio di rafforzamento delle capacità locali sicuramente migliora la resilienza dell'area, aumentando la capacità di risposta alle possibili calamità naturali che potrebbero presentarsi nel futuro. Il modello adottato permette di perseguire gli obiettivi prefissati per progetti di formazione delle comunità locali, utili al miglioramento delle attività educative a diversi livelli. Il progetto è tuttora in fase di sviluppo ed in continuo aggiornamento, per qualunque informazione è possibile consultare il sito web di UP4DREAM: [www.up4dream.com](http://www.up4dream.com).

### RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare ISPRS per il sostegno economico che ha reso possibile questa iniziativa. Grazie all'United Nations Children Fund - UNICEF Malawi per aver cofinanziato il progetto e averci sostenuto, soprattutto nelle fasi iniziali del progetto. Grazie ad Agisoft LLC, specialmente a Liubov Rozhkova, per aver reso disponibili 10 licenze Agisoft Metashape Pro per i partner di questo progetto durante l'intera durata dello stesso. Grazie agli altri colleghi coinvolti in questa iniziativa scientifica: Mavuto Denis Tembo, Rochelle H. Holm, Brighton Austin Chunga, Joshua Mchenga della Mzuzu University e Daud Jones Kachamba della Lilongwe University of Agriculture and Natural Resources. Gli autori desiderano ringraziare anche Emmanuel Chinkaka e Dickson Mbeya (Malawi University of Science and Technology), Jonathan Chambers (COOPI), James Devine e Cayce Pack (Amazon), Morgan Mayani, Innocent Manyera e Lyford Chipukunya (Department of Disaster Management Affari - Malawi), Brian Kamamia e Robert Hedman (African Drone and Data Academy), Matthew Zafir e Sabrina Ravail (Swoop Aero).

### BIBLIOGRAFIA

Back to the Future: Drones in Humanitarian Action - WeRobotics Blog. (2019). Retrieved from <https://blog.werobotics.org/2019/11/12/back-to-the-future-drones-in-humanitarian-action/>

Boccardo, P., Chiabrando, F., Dutto, F., Tonolo, F. G., & Lingua, A. (2015). UAV deployment exercise for mapping purposes: Evaluation of emergency response applications. *Sensors*, *15*(7), 15717-15737.

Bonte-Graptin, M., Meier, P., & Saito, K. (2017). Lessons From Mapping Geeks: How Aerial Technology is Helping Pacific Island Countries Recover From Natural Disasters. World Bank Blogs. Retrieved from <https://blogs.worldbank.org/eastasiapacific/lessons-mapping-geeks-how-aerial-technology-helping-pacific-island-countries-recover-natural>

Bravo, R., & Leiras, A. (2015). Literature review of the application of UAVs in humanitarian relief. *Proceedings of the XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Producao, Fortaleza, Brazil*, 13-16.

Calantropio, A., Chiabrando, F., Codastefano, M., Bourke, E. (2021). Deep Learning for automatic building damage

assessment: application in post-disaster scenarios using UAV Data. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, (on press).

Hardy, A., Makame, M., Cross, D., Majambere, S., & Msellem, M. (2017). Using low-cost drones to map malaria vector habitats. *Parasites & vectors*, *10*(1), 1-13.

International Working Group on Satellite-based Emergency Mapping (IWG-SEM) VA (2014). Emergency mapping guidelines. Working Paper (v1.0). Retrieved from [http://www.un-spider.org/sites/default/files/IWG\\_SEM\\_EmergencyMappingGuidelines\\_A4\\_v1\\_March2014.pdf](http://www.un-spider.org/sites/default/files/IWG_SEM_EmergencyMappingGuidelines_A4_v1_March2014.pdf)

Koeva, M., Muneza, M., Gevaert, C., Gerke, M., & Nex, F. (2018). Using UAVs for map creation and updating. A case study in Rwanda. *Survey review*, *50*(361), 312-325.

Lalrochunga, D., Parida, A., & Choudhury, S. (2020). Sustainability of UAVs in developing countries: Prospects and challenges. *Journal of Discrete Mathematical Sciences and Cryptography*, *23*(1), 237-248.

Meier, P. (2018). Empowering Youths in Fiji to Explore their Islands with Aerial and Marine Robotics | iRevolutions. Retrieved from <https://irevolutions.org/2018/02/22/aerial-marine-robotics-fiji/>

Mugala, S., Okello, D., & Serugunda, J. (2020). Unmanned aerial vehicles: Opportunities for developing countries and challenges. *In 2020 IST-Africa Conference (IST-Africa)* 1-10.

Oren, C., Verity, A. (2020). Artificial Intelligence (AI) Applied to Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and its impact on Humanitarian Action, *Digital Humanitarian Network*.

Strickland, E. (2018). Drone Delivery Becomes a Reality in Remote Pacific Islands - *IEEE Spectrum*. Retrieved from <https://spectrum.ieee.org/the-human-os/medical/devices/drone-delivery-becomes-a-reality-in-remote-pacific-islands>

Triche, R. M., Greve, A. E., & Dubin, S. J. (2020). UAVs and Their Role in the Health Supply Chain: A Case Study from Malawi. *In 2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* 1241-1248.

UNICEF Kazakhstan. (2019). UNICEF and the Government of Kazakhstan Begin Test Flights for Emergency Response | UNICEF Office of Innovation. Retrieved from <https://www.unicef.org/innovation/stories/unicef-and-government-kazakhstan-begin-test-flights-emergency-response>

World Food Programme (2019) Malawi Country strategic plan (2019-2023). Retrieved from <https://www.wfp.org/operations/mw01-malawi-country-strategic-plan-2019-2023>



## IDENTIFICAZIONE DELLE AREE PERCORSE DA INCENDIO MEDIANTE DATI RADAR E OTTICI TELERILEVATI

### EVALUATION OF EFFECT OF PRESCRIBED FIRES USING SPECTRAL INDICES AND SAR DATA

J.M.N. Romeiro <sup>a</sup>, F.T.P. Torres <sup>b</sup>, F. Pirotti <sup>c\*</sup>

<sup>a</sup> Faculty of Environmental Sciences and Natural Resource Management, Norwegian University of Life Sciences, Norvegia - joyce.machado.nunes.romeiro@nmbu.no

<sup>b</sup> Department of Forestry Engineering, Federal University of Viçosa, Brasile - tamiozzo@ufv.br

<sup>c</sup> CIRGEO Centro Interdipartimentale di Ricerca di Geomatica, Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-forestali (TESAF), Università degli Studi di Padova, viale dell'Università 16 - francesco.pirotti@unipd.it

**PAROLE CHIAVE:** SAR, telerilevamento, incendi, monitoraggio

**KEY WORDS:** SAR, remote sensing, prescribed fires, fire monitoring

#### RIASSUNTO

In questo lavoro sono stati utilizzati dati satellitari da sensori passivi (~300 immagini Landsat) e attivi radar/SAR (~650 immagini Sentinel-1) per valutare la capacità di identificazione semiautomatica di aree percorse da due differenti tipologie di incendio. I risultati mettono in confronto indici calcolati da dati ottici passivi, noti in letteratura per identificare la presenza e lo stato della vegetazione e la severità dell'incendio (indici NDVI e dNBR), ed un metodo che utilizza unicamente dati attivi radar.

Gli incendi analizzati sono divisi in tre gruppi, incendi prescritti (artificiali, controllati), incendi autunno-invernali e incendi estivi (naturali, non controllati). Si ipotizza che gli incendi estivi naturali abbiano un impatto maggiore rispetto agli altri in quanto la stagione estiva predispone ad impatti maggiori da parte degli incendi. Sono stati analizzati due aspetti: il tempo di recupero, ovvero quanto l'area impiega per tornare ai valori precedenti di NDVI e NBR, e la severità tramite la differenza prima e dopo dei due indici.

I risultati relativi ai dati ottici chiaramente riportano che non sembra esserci differenza significativa, tra i tre gruppi, per quanto riguarda il tempo richiesto per ritornare a valori pre-incendio, anche se si vede un debole segnale che gli incendi estivi sembrano in media richiedere più tempo di recupero. Con NBR sembra che gli incendi prescritti e quelli autunno-invernali richiedano in media ~200 giorni, mentre quelli non controllati estivi 308 giorni. Una differenza significativa è stata identificata riguardo la severità dell'incendi estivi rispetto a quelli prescritti, mentre non sono state trovate differenze di severità tra prescritti vs autunno-invernali e autunno-invernali vs estivi. I dati SAR sono stati analizzati utilizzando valori di soglia con il metodo Smoothed Z-score su una finestra mobile; risultano avere una capacità di identificare le aree percorse da incendio su 19 aree su 39 (48%) usando il 90° percentile dei valori normalizzati di VV e VH sull'area. Questa percentuale aumenta al 95% se si utilizza come riferimento il dato NBR invece che unicamente le date degli incendi.

#### ABSTRACT

In this work, satellite data from passive (~ 300 Landsat images) and active radar / SAR (~ 650 Sentinel-1 images) sensors were used to assess the capability of semi-automatic identification of areas crossed by two different types of fire. The results compare indices calculated from passive optical satellite imagery, known in literature to be related to vegetation status and fire severity (NDVI and dNBR), and a method that uses only active radar data.

The fires analyzed are divided into three groups, prescribed fires (artificial and controlled), autumn-winter fires and summer fires (natural, uncontrolled). An hypothesis to test was that natural summer fires to have a greater impact than others as the season predisposes to greater severity. Two aspects were analyzed: the recovery time, i.e. how long the area takes to return to the previous values of NDVI and NBR, and the severity, that is the difference in vegetation status before and after the fire.

The optical data results clearly show that there appears to be no difference in the time it takes for an area covered by a fire to return to pre-fire values, although there is a faint sign that summer fires appear to take on average more recovery time. With NBR it appears that prescribed fires and autumn-winter fires take an average of ~ 200 days, while uncontrolled summer fires take 308 days. A significant difference was identified regarding the severity of the summer fires compared to those prescribed, while no differences in severity were found between prescribed vs autumn-winter and autumn-winter vs summer. The SAR data were analyzed using threshold values with the Smoothed Z-score method on a moving window, it appears to have an ability to identify areas affected by fire on 19 of 39 areas (48%) using the 90th percentile of normalized values of VV and VH on the area. This percentage increases to 95% if the NBR data is used as a reference instead of using only the dates of the fires reported by the relevant agencies.

## 1. INTRODUZIONE

Il telerilevamento applicato alla superficie terrestre utilizza sensori attivi e passivi per analizzare la riflettanza degli oggetti, e comprendere fenomeni di interesse in vari campi applicativi. I sistemi “passivi” ottici utilizzano il sole come fonte di energia elettromagnetica predominante e registrano riflettanze su frequenze ben definite dello spettro elettromagnetico, comunemente nelle aree del visibile e dell’infrarosso. I sensori “attivi” vengono così definiti perché al tempo stesso emettono e ricevono l’energia che viene intercettata dalla superficie terrestre.

### 1.1 Sensori attivi

L’energia elettromagnetica che, una volta emessa dal sensore attivo, viene intercettata dalla superficie terrestre, è in parte assorbita ed in parte riflessa con due modalità: se la superficie è “liscia” la riflessione è speculare (legge di Fresnel), se la superficie è “scabra” in parte viene riflessa in modo speculare ed in parte in modo diffuso in varie direzioni. Nell’insieme il fenomeno viene definito retrodiffusione o, nel suo termine anglosassone ormai diventato di uso comune, *backscatter*. Useremo in questo contesto il termine *backscatter* per indicare l’intensità dell’energia che arriva da retrodiffusione di un impulso emesso da un sensore attivo.

I sensori attivi radar emettono microonde, ovvero una gamma di lunghezze d’onda tra ~1 cm e ~1 m; la frequenza corrispondente varia tra ~1 e ~100 GHz (tabella 1). I sensori radar su satelliti in orbita impiegati per l’osservazione della terra sono ad apertura sintetica (SAR, da *synthetic aperture radar*) in quanto utilizzano, per aumentare la risoluzione spaziale, il movimento del veicolo per simulare un’antenna di grandi dimensioni. E’ noto infatti che la risoluzione spaziale dipende da quanta energia ritorna al ricevitore, e questa dipende dal rapporto tra lunghezza d’onda impiegata e dimensione dell’antenna. L’equazione di un’antenna monostatica radar è infatti la seguente.

$$P_r = \frac{P_t G_a A_a}{(4\pi)^2 D^4} \sigma \quad (1)$$

Dove  $P_r$  = potenza ricevuta,  $P_t$  = potenza trasmessa,  $G_a$  = guadagno dell’antenna,  $A_a$  = area dell’antenna,  $D$  = distanza tra antenna e oggetto retroriflettente,  $\sigma$  = radar cross-section, ovvero la caratteristica capacità dell’oggetto intercettato di riflettere l’energia ricevuta. A parità di altre condizioni, per aumentare  $P_r$  bisogna aumentare la dimensione dell’antenna. Ci sono limiti fisici all’aumento della dimensione reale dell’antenna, per questa ragione si è passato ai radar ad apertura sintetica che simulano un’antenna di lunghezza superiore sfruttando l’effetto Doppler (Figura 1).

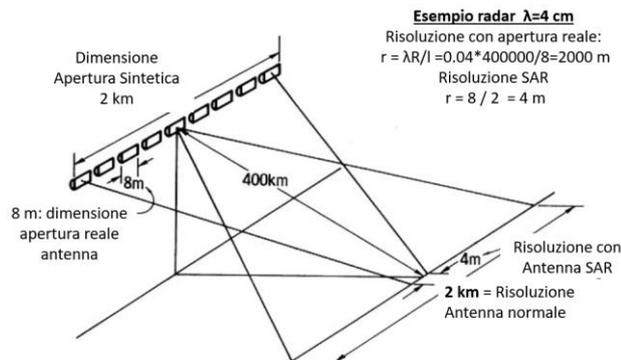


Figura 1. Aumento risoluzione spaziale mediante SAR.

Il valore di  $\sigma$  è formalmente il rapporto tra  $P_t$  e  $P_r$  e, a parità delle altre condizioni in equazione 1, dipende dalla capacità della superficie intercettata dal segnale radar di riflettere l’energia incidente verso la direzione dell’antenna. Questa capacità dipende da diversi fattori, di cui riportiamo quelli più importanti: (i) le caratteristiche geometriche della superficie illuminata, combinate con l’angolo di incidenza dovuto alla geometria dell’ottica del sensore, forniscono l’angolo di incidenza locale (*local incidence angle* – LIA); (ii) la costante dielettrica della superficie, ovvero la capacità del mezzo di condurre un campo elettromagnetico, che a sua volta dipende esclusivamente dalla composizione e struttura della superficie (Pipitone, 2017); (iii) il contributo riflettente di tutte le micro-superfici dell’area illuminata, che, integrato su tutta l’area, fornisce la risultante capacità di *backscatter*.

Tabella 1: Denominazioni delle bande, frequenze e lunghezze d’onda.

Banda	Frequenza (GHz)	Lunghezza d’onda (cm)	Applicazioni
Ka	27–40	1.1–0.8	Raramente usata
K	18–27	1.7–1.1	Raramente usata (Assorbimento acqua)
Ku	12–18	2.4–1.7	rarely used for SAR (satellite altimetry)
X	8–12	3.8–2.4	Monitoraggio urbano, ghiacciai e aree con neve; non penetra le chiome; la coerenza decade velocemente nel tempo in aree con vegetazione.
C	4–8	7.5–3.8	Classificazione; identificazione di cambiamenti di uso suolo; monitoraggio temporale di aree; navigazione; oceanografia; glaciologia
S	2–4	15–7.5	Utilizzo in crescita in ambito SAR: monitoraggio in agricoltura
L	1–2	30–15	SAR a media risoluzione: monitoraggio geofisico; biomassa e mappatura della vegetazione; interferometria
P	0.3–1	100–30	SAR per stima della biomassa della vegetazione. Il primo SAR con banda P dovrebbe essere messo in orbita da ESA ~2023.

E’ utile sottolineare che il *backscatter* della superficie illuminata viene poi rappresentato con un valore numerico nell’immagine restituita. Questi valori di *backscatter* hanno un intervallo molto ampio ed una distribuzione non normale, dunque vengono trasformati in decibel (dB) con la seguente operazione:

$$\sigma_{dB}^0 = 10 \times \log_{10}(\sigma^0) \quad (2)$$

Quello dunque che viene solitamente registrato nel prodotto Sentinel-1 è  $\sigma_{dB}^0$  chiamato anche *sigma-naught*, nelle due componenti polarizzate, VV e VH, rispettivamente verticale-verticale e verticale-orizzontale.

## 1.2 Sensori attivi per analisi degli incendi

Nello studio di Imperatore et al., (2017) sono stati utilizzati i dati Sentinel-1 in banda C per indagare se tale sensore è in grado di rilevare aree bruciate nelle regioni con vegetazione e hanno concluso che la polarizzazione VH ha risposto più efficacemente nell'identificazione dell'area con incendio, diminuendo il suo valore dopo l'evento. Anche Stroppiana et al. (2015) hanno testato il sensore SAR per mappare in modo semi-automatico le aree che potrebbero essere state percorse da incendio, utilizzando integrando il dato SAR con degli indici spettrali ed un algoritmo di dilatazione spaziale dell'area (Haralick, 1979). Il SAR offre un'opportunità unica per rilevare e valutare l'impatto dell'incendio sul paesaggio in tempi brevi anche in presenza di atmosfera coperta da nuvole. Gli studi in tal senso non sono diversi (Imperatore et al., 2017; Ban et al., 2020; Stroppiana et al. 2015).

## 1.3 Sensori passivi per l'analisi degli incendi

I dati satellitari dunque consentono agli utenti di analizzare fenomeni che accadono sulla superficie terrestre. Gli incendi, sia quelli che vengono prescritti che quelli spontanei, sono sicuramente tra i fenomeni di forte interesse che vengono ampiamente analizzati, in particolare nelle aree più a rischio, ovvero vicine ai centri abitati o ad altre zone vulnerabili, in ambienti con clima secco, ventose e con vegetazione. Alcuni studi fatti con sensori passivi nella regione mediterranea hanno testato la capacità di diversi indici, che combinano le regioni del rosso e del vicino infrarosso dello spettro, per distinguere aree percorse da incendi subito dopo l'evento da aree che non hanno subito modifiche.

L'indice NDVI (*normalized difference vegetation index*) è stato uno di quelli più utilizzati, con procedure che coinvolgono sia solo il post-incendio che un'analisi bi-temporale (differenza pre-incendio e post-incendio) (Pereira, 1999; Chuvieco et al., 2002). L'indice NBR (*normalized burn ratio*) era meno utilizzato rispetto a NDVI a causa della mancanza di disponibilità di informazioni sulla regione dell'infrarosso medio (*short wave infrared - SWIR*) nei sensori utilizzati in quel momento, come AVHRR e WIFS. Con LANDSAT TM/ETM e le immagini della regione del medio infrarosso (banda 7 nei sensori TM/ETM), l'NBR è diventato più utilizzato (Escuin et al., 2008).

Anche se gli indici più comuni per valutare la severità degli incendi sono NDVI e NBR (Escuin et al., 2008; Mallinis et al., 2018), diversi studi (Chuvieco et al., 2002; Chen et al., 2011; Veraverbeke et al., 2012) hanno valutato altri indici che possano migliorare le analisi degli incendi boschivi, come BAI (Burnt Area Index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), IFI (integrated forest index), EVI (enhanced indice), e altro ancora, ma nel complesso NBR è ancora considerato il miglior indice per valutare gli effetti del fuoco (Collins et al., 2018).

## 1.4 Integrazione dati per analisi degli incendi

I dati passivi ed attivi, i.e. ottici e SAR, hanno caratteristiche complementari che possono essere integrate per fornire maggiori informazioni a modelli e metodi. I dati SAR della missione Sentinel 1 in banda C (Torres et al., 2012) e i dati multispettrali ottici Landsat e Sentinel 2 (Drusch et al., 2012) forniscono dati aperti (open-data) accessibili nei due ambiti SAR e ottico. I set di dati sono disponibili dalle rispettive piattaforme di distribuzione, ma anche come prodotti in Google Earth Engine (GEE), una piattaforma integrata progettata per potenziare e semplificare l'utilizzo dei dati satellitari (Gorelick et al., 2017). Con la

disponibilità di dati sia ottici che SAR gratuiti e già in parte pre-elaborati in GEE, i dataset del programma *Copernicus* rappresentano uno strumento ottimale e rapido per la identificazione e valutazione dei danni da incendio.

Gli incendi prescritti sono quelli artificialmente applicati da esperti per vari motivi, tra i quali proprio quello di limitare la presenza di materiale infiammabile. Nonostante tutti i progressi relativi all'analisi degli incendi, la valutazione dell'efficacia dei fuochi prescritti, che servono anche a ridurre il rischio di incendi, rimane una questione di grande importanza, specialmente nell'ottica dei cambiamenti climatici che sembrano facilitare incendi più estremi (Fernandes, 2015). Le procedure di pianificazione e monitoraggio degli incendi prescritti devono essere migliorate nell'area di studio (Portogallo), così come nell'intera regione mediterranea, al fine di superare le attuali carenze (Fernandes and Botelho, 2004). Il SAR offre un'opportunità unica per rilevare e valutare l'impatto dell'evento sulla vegetazione immediatamente dopo l'evento.

Questo studio ha l'obiettivo di valutare l'efficacia di alcuni metodi per identificare le aree percorse da incendi boschivi e incendi prescritti utilizzando immagini da sensori passivi ottici e da SAR. Nello specifico, gli obiettivi della presente analisi sono:

- (1) valutare se gli incendi spontanei e gli incendi prescritti portano una differenza significativa dai dati rilevati con SAR Sentinel-1.
- (2) valutare, mediante le immagini satellitari, se gli incendi spontanei hanno una severità significativamente diversa rispetto agli incendi prescritti.

## 2. MATERIALE E METODI

### 2.1 Area di studio

Lo studio è stato condotto nella subregione nordoccidentale del Portogallo chiamata Alto Minho, che copre un'area di 221 mila ettari. Il clima è di tipo mediterraneo, caldo-estivo (Csb) secondo la classificazione climatica di Köppen, con precipitazioni medie che vanno da 28,4 mm di luglio a 228 mm di dicembre e temperatura media da 9,5°C di gennaio a 20,5°C di luglio. La stagione secca va da luglio ad agosto (Figura 2).

La stagione degli incendi in Portogallo si presenta tra giugno e settembre, che corrisponde all'estate calda e secca, tipica dei climi mediterranei (Pereira, 1999). Il sito di studio è stato scelto per la sua elevata frequenza di incendi (Oliveira et al., 2018) e tutte le aree considerate per le analisi di questo studio sono coperte da erba e vegetazione bassa, solitamente arbusti appartenenti alla tribù delle *Genisteae*, e non vengono utilizzate come pascolo.

### 2.2 Aree percorse dal fuoco

I dati sugli incendi sono stati raccolti dal sito web dell'Istituto per la conservazione della natura e le foreste, (ICNF <https://fogos.icnf.pt>). I dati sono in formato vettoriale, poligoni contenenti informazioni associate; in particolare sono registrate la data dell'incendio, l'area totale impattata e la causa dell'evento. Non tutti i poligoni avevano date compilate dettagliatamente – i.e. con giorno, mese e anno - essendo alcuni di essi indicati con solo l'anno di occorrenza. Tali aree sono state eliminate, poiché il giorno esatto in cui si è verificato l'incendio è fondamentale per questa analisi.

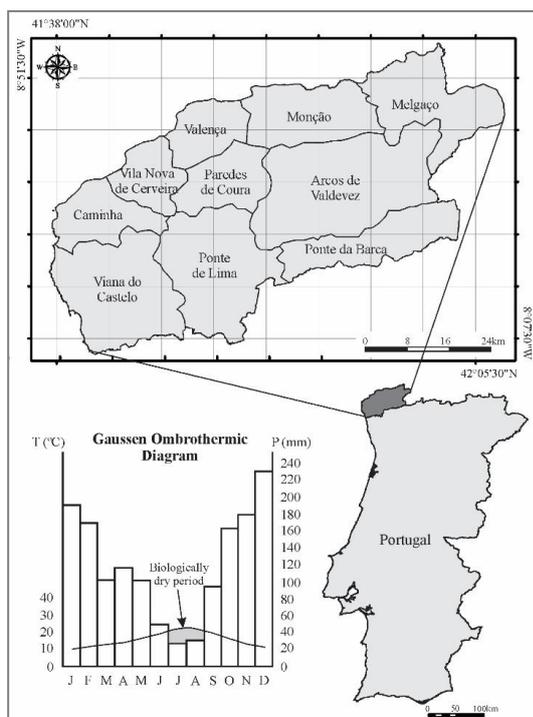


Figura 2. Area di studio e profilo climatico

Sono stati analizzati 70 incendi avvenuti tra il 2013 ed il 2019 (Figura A1 in appendice) con superfici che variavano da 0,19 ha a 32,3 ha. I dati sull'uso del suolo per gli anni 2010 e 2015 (risoluzione 5 metri) sono stati recuperati dall'Istituto Geografico Portoghese (IGP), e insieme alle informazioni sulle aree incendiate, sulla pendenza, esposizione e altitudine. Queste informazioni sono state utilizzate per identificare aree di incendio con le stesse caratteristiche. Sono stati creati due set: aree di incendio prescritto vs. non prescritto. Questi due set assicurano un confronto tra coppie di aree con caratteristiche simili, e.g. lo stesso uso del suolo, quota media sul livello del mare, esposizione e pendenza e che si sono verificati nella stessa stagione o per lo meno lo stesso anno.

A seguito dell'allocatione dei poligoni e della tipologia di incendio (prescritta e non), sono stati creati due scenari, a seconda della data dell'incendio: gli incendi estivi (quando il combustibile è secco e si prevede che la severità dell'incendio sia maggiore) e gli incendi autunno-invernali, quando si prevede che la severità dell'incendio sia inferiore a causa del clima più umido.

### 2.3 Mitigare l'effetto "bordo"

Al fine di minimizzare gli effetti di bordo delle aree di studio sulla raccolta dei dati delle immagini satellitari, sono stati esclusi dall'analisi i poligoni inferiori ad un ettaro e con distanza da bordo a bordo inferiore a 60 metri. Il valore di 60 metri è stato utilizzato in quanto ragionevole rispetto alla risoluzione minima del dato Landsat, di 30 metri. Ai poligoni rimanenti è stato rimosso un margine di 30 m per le analisi con Landsat, mentre per l'analisi Sentinel-1 e Sentinel-2 il margine rimosso era di 10 m. Trattasi praticamente di una contrazione del poligono per evitare un effetto del mescolamento della risposta del pixel dove la copertura è evidentemente molto varia. Dato che ai margini delle aree spesso corrisponde una copertura diversa dalla vegetazione (e.g. strada, corso d'acqua), si vuole limitare l'inclusione di celle contenenti una copertura del suolo "mista", che porta una conseguente alta varianza dei valori di risposta del segnale misurato.

La Figura A2 nel materiale in appendice, mostra l'effetto di questo accorgimento. Si nota una distribuzione dei valori di NBR, espressa tramite percentili, con deviazioni molto ridotte quando viene contratto il poligono con questo accorgimento. Dopo questa contrazione delle aree, è stato verificata la quantità di pixel per ogni poligono e sono stati esclusi dalle analisi i poligoni con meno di venti pixel, in modo da avere una distribuzione rappresentativa e statisticamente affidabile. Alla fine di queste elaborazioni, le aree disponibili per Sentinel erano tutti i 40 poligoni, in quanto avevano più di venti pixel e quindi potevano essere utilizzati, mentre per i dati Landsat si possono analizzare 13 poligoni.

### 2.4 Analisi dati satellitari

La finestra temporale di 5 anni ha restituito circa 650 immagini per Sentinel 1 nel periodo dal 3 ottobre 2014 al 22 maggio 2020. Per Landsat 8 OLI/TIRS sono stati utilizzati 252 immagini dall'11 maggio 2013 al 6 maggio 2020, mentre per Landsat 7 ETM+ c'erano 54 immagini utilizzabili per il periodo dal 27 gennaio 2010 al 19 maggio 2013.

Google Earth Engine (GEE) fornisce prodotti Sentinel-1 "ground range detected" (GRD) pre-elaborati a  $\sigma^0$  (*sigma-naught* – vedi equazione 2). La pre-elaborazione applicata con GEE prevede: (1) la rimozione del rumore termico, (2) la calibrazione radiometrica e (3) la trasformazione del segnale al valore di  $\beta^0$  (Beta-Baught) utilizzando un modello digitale di superficie (DSM) come indicato in (Small, 2011). Il DSM alle latitudini delle aree di studio analizzate proviene dalla Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) avvenuta nel febbraio 2000 (Farr et al., 2007). L'ultima parte di elaborazione, la (3), è stata fatta con un codice GEE creato ad hoc.

Il prodotto GEE utilizzato è stato ulteriormente trasformato per fornire valori di gamma-naught ( $\gamma^0$ ) correggendo l'angolo di incidenza locale usando il prodotto SRTM come in (Small, 2011). Ciò ha rimosso la distorsione tra le orbite ascendenti e discendenti come evidente dal grafico nella seguente Figura 3, che riporta i valori di mediana e intervallo interquartile (25° e 75° percentile) della serie temporale per un'area.

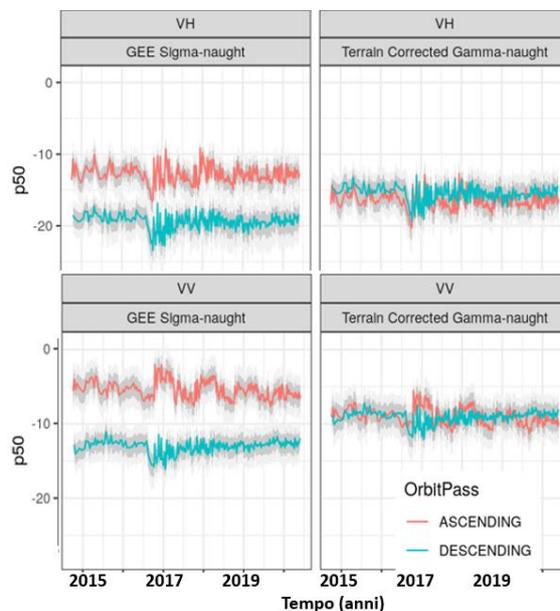


Figura 3. Valori di mediana (p50) ed intervallo interquartile (25° percentile e 75° percentile – banda grigia) per intensità di VV e VH registrati dal sensore.

I valori di riflettanza (sensori ottici passivi) e *backscatter* (sensori attivi radar) possono essere considerati un segnale da analizzare per rilevare una differenza significativa prima e dopo l'evento, e misurare la differenza rispetto al rumore. Si può presumere che il rumore sia la variazione naturale della riflettanza tra rilevamenti diversi. Su ciascuna area sono stati estratti, mediante aggregazione, 5 percentili della distribuzione dei valori contenuti nelle celle di ogni area per ogni immagine. Si può notare che è importante rimuovere i valori anomali; valori anomali e valori nulli possono provenire da aree che cadono al bordo di un'immagine, anche se ricadono all'interno dell'impronta dell'immagine ed all'interno dell'area analizzata, come in Figura 4.

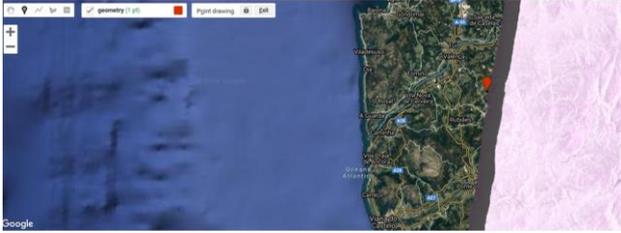


Figura 4. Un'area con valori uguali a zero ai bordi di un'immagine Sentinel 1.

I cinque percentili usati per rappresentare le distribuzioni di riflettanza in un'area sono i seguenti:  $P_n = \{P10, P25, P50, P75, P90\}$ . Questi valori sono calcolati per le riflettanze sia in polarizzazione VV che VH. Da questi valori sono state calcolate anche le seguenti 5 metriche aggiuntive:

$$\begin{aligned} IPr1 &= Y_{p75} - Y_{p25} \\ IPr2 &= Y_{p90} - Y_{p10} \\ NSR-P_n &= \frac{Y_{pn}^{VV} - Y_{pn}^{VH}}{Y_{pn}^{VV} + Y_{pn}^{VH}} \\ RATIO-P_n &= \frac{Y_{pn}^{VV}}{Y_{pn}^{VH}} \\ DIFF-P_n &= Y_{pn}^{VV} - Y_{pn}^{VH} \end{aligned} \quad (3)$$

dove:  $P_n$  è il percentile e  $n = \{10^\circ, 25^\circ, 50^\circ, 75^\circ, 90^\circ\}$ ; NSR è Normalized Signal Ratio (rapporto segnale normalizzato); IPr1 e IPr2 sono intervalli tra percentili rispettivamente del  $25^\circ - 75^\circ$  e  $10^\circ - 90^\circ$ . La combinazione delle metriche e dei valori di percentile fornisce 29 variabili in tutto che vengono testate per valutarne l'efficacia nell'identificare la capacità di identificare gli incendi nelle aree analizzate.

**2.4.1 Metodo di analisi con dati SAR.** Per definire quali variabili hanno dato i migliori risultati nell'identificazione del danno da incendio, è stato utilizzato l'algoritmo *Smoothed Z-score* (SZS) (Brakel, 2014) per identificare anomalie nel segnale, ovvero determinare in modo binario, mediante una soglia adattiva, se la superficie ha subito una modifica significativa o meno. Questo metodo è stato utilizzato per selezionare le variabili che sarebbero state successivamente confrontate con gli indici derivati dalle immagini ottenute con i sensori ottici passivi.

L'algoritmo SZS utilizzato per analizzare i dati, rileva i valori di *backscatter* che cambiano significativamente rispetto ai valori ritenuti "normali", ovvero al segnale registrato prima dell'evento in una finestra temporale definita. Si può presumere che i valori

di *backscatter* registrati dal Sentinel-1 che arrivano da una copertura del suolo che non cambia in modo significativo, forniscano un dato distribuito normalmente con una certa media ed una deviazione standard. Quest'ultima aumenta se la copertura dell'area cambia in modo da cambiare le caratteristiche di risposta rispetto al segnale SAR. Nella sezione dedicata alla discussione si riportano gli ulteriori fattori che influenzano il segnale, come neve e le precipitazioni atmosferiche, che modificano le proprietà della superficie illuminata dal segnale e quindi possono fornire falsi positivi.

L'algoritmo di rilevamento utilizza un punteggio (Z) calcolato utilizzando la media ( $\mu$ ) e la deviazione standard ( $\sigma$ ) su una finestra temporale mobile  $p$  di dimensione N, sfalsata dai valori precedenti il valore da testare. Il punteggio Z del valore testato (Y) nel giorno  $n$  è calcolato come segue:

$$Z_n = \frac{Y_n - \mu_p}{\sigma_p} \quad (4)$$

Dove  $Y_x$  è il valore del pixel al tempo  $n$ ,  $p$  è l'insieme di valori analizzati, ovvero i valori del pixel nella finestra temporale precedente di dimensione N,  $\mu = Y_{n-1}^{n-(N+1)}$ ;  $\sigma$  è la deviazione standard e  $\mu$  è la media dell'insieme  $p$ .

Il valore Z è dunque un valore normalizzato di differenza rispetto alla media dei valori su una timeline precedente al momento analizzato. Se questo valore è al di sopra di una certa soglia, il valore di *backscatter* può essere considerato significativamente diverso dai valori passati. In questo lavoro abbiamo utilizzato una soglia di 3, per raggiungere un livello di confidenza del 99% o migliore. Questo algoritmo è utilizzato in diverse applicazioni che vanno dal rilevamento dell'accelerazione (Esnaola-Gonzalez et al., 2020) all'identificazione di anomalie (Perkins and Heber, 2018).

**2.4.2 Metodo di analisi con dati ottici.** In questa parte dello studio, dalle missioni Landsat 7 e 8 sono stati utilizzati il sensore Enhanced Thematic Mapper Plus - ETM+ (Landsat 7) per la raccolta di dati dal 2010 e il 2013, ed il sensore Operational Land Imager - OLI (Landsat 8) per analizzare i dati dal 2013 al 2020. Le scene ETM+ sono state utilizzate per incendi avvenuti nel 2013 per prendere la media di almeno due anni precedenti l'evento. Gli indici spettrali calcolati sono stati il Normalized Burn Ratio (NBR) (Eq. 2) e il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Eq. 3), poiché sono gli indici più comuni per valutare la severità dell'incendio (Escuin et al., 2008; Mallinis et al., 2018).

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (5)$$

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (6)$$

dove: NIR - near infrared (ETM+: banda 4; OLI: banda 5); SWIR - short wave infrared (ETM+: banda 7; OLI: banda 7).

I valori NDVI e NBR variano da -1 a 1, essendo 1 la maggiore attività vegetativa, e valori prossimi allo zero e negativi indicano poca o nessuna attività (Chuvieco et al., 2002). I valori di 5 percentili degli indici NBR e NDVI di ogni area sono stati estratti su ciascuna area bruciata, quindi sono stati riportati su grafici di distribuzione dei valori (vedi in appendice figura A2), seguendo la stessa metodologia utilizzata da (dos Santos et al., 2018). Questo consente di valutare il tempo di recupero richiesto per far ritornare la vegetazione nell'area e vedere la differenza tra incendi prescritti, incendi autunno-invernali ed incendi estivi.

Dalle serie temporali dei dati Sentinel-1 (SAR) e degli indici NDVI e NBR (dati ottici), è stato effettuato il confronto per verificare se i dati Sentinel-1 forniscono una risposta coerente per identificare gli effetti dell'incendio nella vegetazione. La metodologia di lavoro riassunta è presentata in Figura 5.

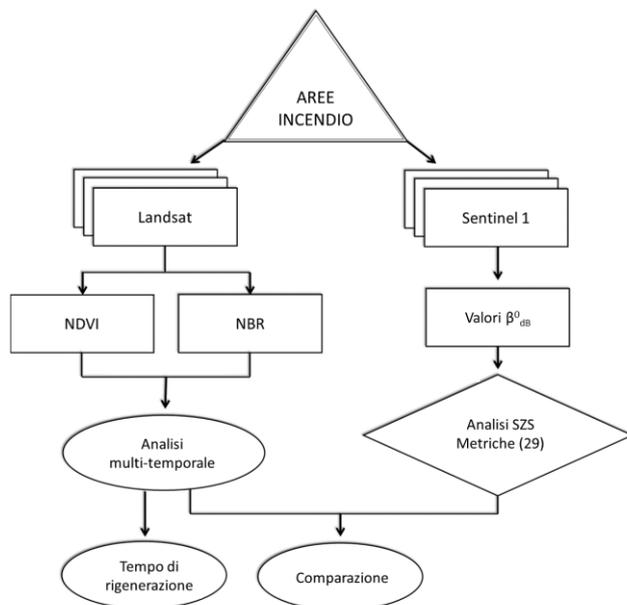


Figura 5. Schema di analisi.

### 3. RISULTATI E DISCUSSIONE

#### 3.1 Sensori ottici passivi - NDVI e NBR

La serie temporale della mediana dei valori nei vari poligoni, è stata analizzata usando una finestra temporale pre- e post-incendio. La mediana è stata scelta in quanto fornisce valori meno influenzati da valori poco rappresentativi, come ad esempio piccole aree non percorse da incendio incluse nell'area marginalmente. La media dei valori nella finestra "pre" è stata usata come valori di riferimento in una situazione normale. Dopo l'evento, il "valore minimo dopo l'incendio" è stato creato utilizzando il valore minimo dei valori di mediana, questa volta nella finestra temporale post-incendio. I "giorni di recupero" sono stati calcolati usando il numero di giorni che impiega l'area a ritornare ai valori precedenti dell'indice. Infine, per quanto riguarda una stima della severità dell'incendio, questa avviene confrontando il valore dell'indice prima e dopo, calcolando la differenza tra il minimo nella finestra post-incendio e la media nella finestra temporale pre-incendio.

**3.1.1 Durata ripresa dal danno.** Come riportato nel grafico in alto in Figura 6, la durata del danno misurata con i valori di NDVI, i.e. il numero di giorni necessari all'area per ritornare a valori di NDVI pre-incendio, per gli incendi che si sono verificati durante l'inverno/autunno è stata in media di 121 giorni, mentre gli incendi che si verificano in estate la media è di 177 giorni e la durata per gli incendi prescritti avevano una media di 152 giorni. In tutti e tre i casi (incendi autunno-invernali, estivi e prescritti) il numero di giorni non è risultato significativamente diverso per nessun caso usando un test di Tukey ( $p < 0,05$ ).

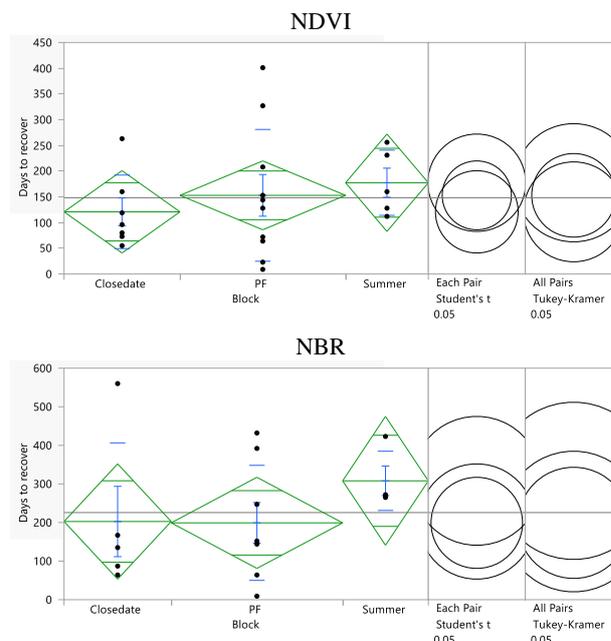
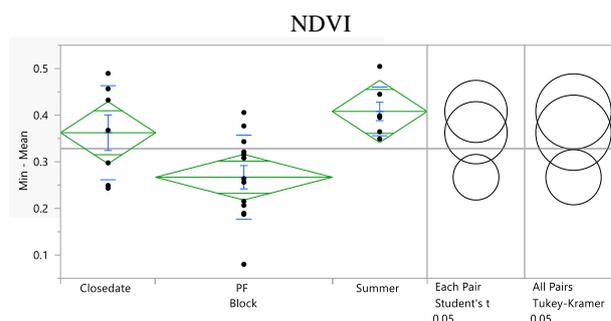


Figura 6. Analisi comparativa dei giorni di recupero dello stato della vegetazione con incendi: *Closedate* = incendi autunno-invernali, *PF*=incendi prescritti e *Summer*=incendi estivi – dai test statistici non risultano differenze significative tra nessuno dei tre gruppi.

Sempre in figura 6 ma nel grafico in basso, il tempo richiesto per ritornare a valori pre-incendio di NBR, per gli incendi autunno-invernali hanno avuto una media di 202 giorni per riprendersi dall'incendio, mentre gli incendi estivi hanno avuto una media di 308 giorni e gli incendi prescritti hanno avuto una media di 199 giorni per riprendersi dall'incendio per tutti e tre i trattamenti è stato considerato uguale dal test di Tukey ( $p < 0,05$ ).

**3.1.2 Stima della severità degli incendi.** Come discusso in precedenza, NDVI e NBR sono spesso utilizzati per valutare la severità degli incendi boschivi. Maggiore è la differenza (pre e post-incendio), maggiore è il grado di severità. Come mostrato nella Figura 7, per la differenza tra le risposte pre-incendio e post-incendio di NDVI, gli incendi boschivi autunno-invernali, gli incendi estivi e gli incendi prescritti hanno avuto una differenza media prima e dopo l'incendio di 0,362, 0,408 e 0,266, rispettivamente. Gli incendi autunno-invernali sono considerati, dal test di Tukey, come non aventi una severità significativamente diversa dagli incendi prescritti. Invece la severità degli incendi estivi differisce significativamente dalla severità degli incendi prescritti, pur essendo non diversa rispetto a quella degli incendi autunno-invernali.



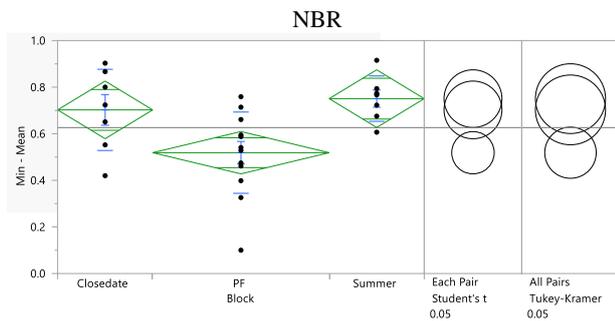


Figura 7. Analisi comparativa della severità misurata come differenza dei valori degli indici prima e dopo (media a valore minimo rispettivamente) della vegetazione con incendi: *Closedate* = incendi autunno-invernali, *PF*=incendi prescritti e *Summer*=incendi estivi

### 3.2 SAR

Le immagini nel materiale in appendice A3 mostrano i risultati nell'applicare il metodo Smoothed Z-Score con soglia 3. Nelle Figure 8, 9 e 10 vengono riportati due esempi confrontando NDVI/NBR e la variabile che risulta avere la risposta migliore: la linea verde è la linea mediana su una finestra di 30 valori, l'area grigia è la deviazione standard. I punti rossi sono tutti segnali considerati significativamente diversi dal segnale passato. Questo è stato definito utilizzando il punteggio Z di ciascun valore calcolato utilizzando la media e la deviazione standard degli ultimi 30 valori; un punteggio Z superiore a 3 è stato definito significativamente diverso.

Per le 29 variabili (equazione 3), analizzate mediante interpretazione visiva senza confrontarle con indici spettrali, la variabile che ha dato i migliori risultati ( $p < 0.01$ ) è stata NSR\_P90 (indice NSR calcolato sul 90° percentile – vedi equazione 3), essendo in grado di rilevare eventi di incendio su 19 delle 39 aree (48% delle risposte corrette). Anche NSR\_p75, RATIO-P75 e RATIO-P90 sono stati considerati significativi ( $p < 0.01$ ), con una media di identificazione di 14,6 volte come risposte corrette al fuoco. Le altre variabili forniscono risposte corrette agli incendi solo 3 volte su 39 aree.

### 3.3 Confronto SAR e indici spettrali

Per questa parte dello studio è stato utilizzato solo il percentile NSR\_P90, nel tentativo di rendere più facile il confronto. Inoltre, sono state utilizzate solo aree con dati NDVI e NBR e dati SAR (20 in totale). Ciò era necessario perché Sentinel-1 A è stato lanciato solo nel 2014, quindi tutte le aree bruciate nel 2013 non possono essere analizzate dal SAR.

I grafici NBR e NDVI sono stati adattati per sembrare più simili ai grafici SAR e per rendere anche l'interpretazione visiva più diretta. Per questo motivo, i grafici ora vengono presentati con il valore medio prima dell'incendio e la sua deviazione standard in verde. La regione grigia è il percentile 10 e 90 per la linea nera rappresenta il percentile 50. La linea rossa indica l'evento incendio che è stato al centro del confronto e la linea rossa tratteggiata, che viene mostrata in alcuni grafici, indica un incendio che è stato identificato dagli indici spettrali e confermata dai dati ufficiali dell'Istituto per la conservazione della natura e le foreste (ICFN).

In alcuni casi è possibile notare che anche se gli indici spettrali si comportano come se si fosse verificato un incendio (es. Summer Wildfire 2019\_18, Winter Wildfire 2018\_1), non vi è alcuna indicazione di incendio – con la linea tratteggiata rossa – perché secondo i dati ufficiali dell'ICFN, quel giorno non c'è stato nessun incendio.

Nelle figure 8 e 10, vengono riportati due esempi di confronti in cui Sentinel-1 ha funzionato correttamente, mentre in figura 9 un esempio in cui il SAR ha risposto in modo errato.

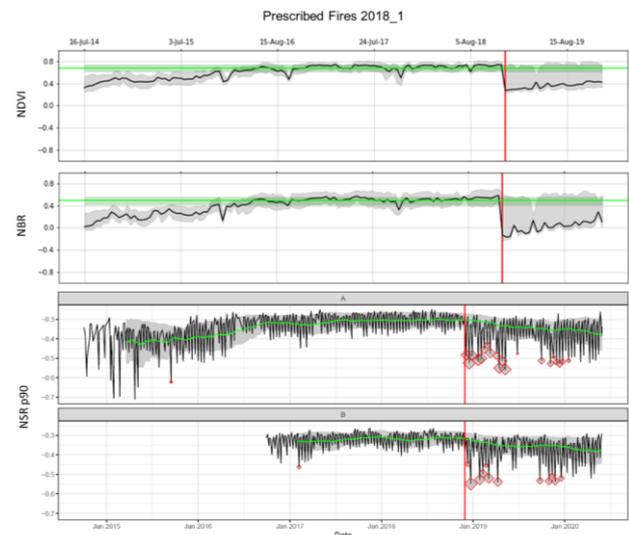


Figura 8. Confronto SAR e indici spettrali; un esempio di corretta identificazione da parte dell'indice SAR (NSR 90° percentile). La linea rossa indica la data dell'incendio.

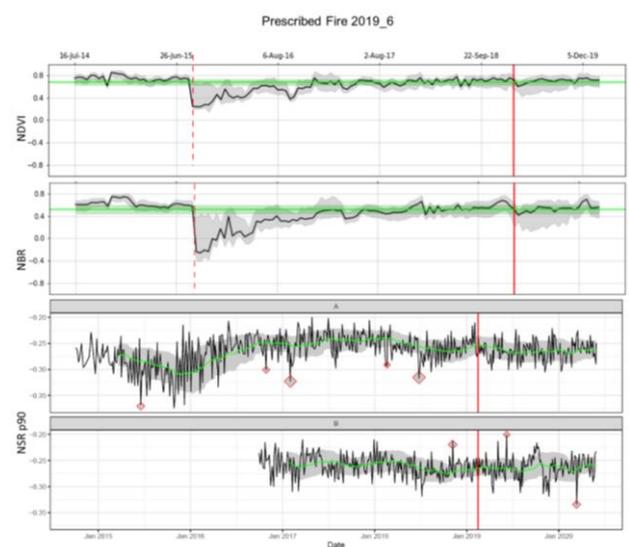


Figura 9. Confronto SAR e indici spettrali; un esempio di identificazione non corretta da parte dell'indice più performante SAR (NSR 90° percentile). La linea rossa indica la data dell'incendio.



Figura 10. Confronto SAR e indici spettrali; un esempio di corretta identificazione da parte dell'indice SAR (NSR 90° percentile) con corrispondenza anche ad un evento precedente non registrato intorno al mese di febbraio. La linea rossa indica la data dell'incendio registrato ufficialmente.

La serie completa di grafici è presentata in appendice A3 dove vengono confrontati l'indice NSR del 90° percentile con gli indici spettrali. La percentuale di corrispondenza migliora considerevolmente: 19 aree identificate da SAR su 20 identificate con NBR (95% delle risposte corrette) – essendo il “Incendio Prescritto del giugno 2019 (19\_6)” l'unico che si discostava sostanzialmente dai valori di NBR e NDVI, ed anche una delle zone con minore severità dell'incendio.

#### 4. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Per la valutazione dell'efficacia nell'utilizzo del SAR Sentinel-1 per i tre gruppi di incendi analizzati (incendi autunno-invernali, incendi estivi e incendi prescritti), l'indice NSR calcolato sul 90° percentile è considerato la migliore tra le 29 metriche SAR analizzate descritte in equazione 3. In contraddizione con Imperatore et al., (2017), la sola polarizzazione VH non sembra rispondere più efficacemente agli eventi di incendio. Inoltre la variabile NSR\_P90 ha identificato il 48% di incendi quando confrontata con i dati ufficiali delle date registrate come incendi sull'area. Confrontando NSR\_P90 con gli indici NBR e NDVI, la percentuale di risposte corrette aumenta in modo significativo. Confrontando le date identificate come percorse da incendio basandosi su NBR/NDVI, la valutazione delle risposte corrette per l'indice NSR\_P90 da SAR migliora notevolmente salendo ad una corrispondenza del 95%. In alcuni casi infatti è possibile notare che anche se gli indici spettrali si comportano come se si fosse verificato un incendio (e.g. vedi appendice A3 Summer Wildfire 2019\_18), non vi è alcuna indicazione di incendio nei dati ufficiali dell'ICFN. Ciò potrebbe essere dovuto a una reale differenza tra NBR e i dati ufficiali sugli incendi dell'ICFN, o potrebbe essere dovuto ad una parziale documentazione degli eventi nella linea temporale. Un'altra ipotesi è che alcuni disturbi non direttamente collegati agli incendi siano stati identificati sia dai dati ottici che dai dati SAR. Questo problema potrebbe rispecchiare un altro caso (dos Santos et al., 2018) in cui i rapporti ufficiali non corrispondono alle risposte degli indici spettrali. Questo implica che la validazione del metodo può essere parzialmente inficiata da mancate registrazioni di aree percorse da incendio in alcune date.

Il confronto SAR – NBR sembra suggerire che se l'NBR è l'indice più utilizzato per stimare indirettamente la data dell'evento, anche il percentile 90 dell'NSR potrebbe essere considerato un buon indice in questo senso. Ulteriori analisi andrebbero fatte per stabilire la sensibilità dell'indice SAR verso la severità dell'incendio.

Un'ulteriore osservazione è che il 90° percentile della metrica NSR sembra essere più efficace quando la severità dell'incendio nell'area è maggiore, come si può vedere dai grafici in appendice A3. Questa è comunque un'ipotesi da avvalorare con dei test specifici, e non è un aspetto affrontato in questo lavoro.

È importante notare che la presente ricerca ha preso in considerazione solo le aree bruciate coperte da erbe e piccoli cespugli, pertanto gli studi futuri dovrebbero concentrarsi sull'uso del SAR e sul confronto dei suoi valori con i valori degli indici spettrali separando diverse coperture del suolo.

Per valutare se gli incendi hanno una severità simile rispetto agli incendi prescritti, anche se il numero di giorni per riprendersi dall'incendio per tutti e tre i gruppi è stato considerato uguale, gli incendi autunno-invernali sono considerati di severità simile rispetto agli incendi prescritti, mentre la severità degli incendi estivi è significativamente diversa da quella degli incendi prescritti, pur essendo simile agli incendi autunno-invernali. Pertanto, si può sostenere che in questo scenario gli incendi estivi hanno un impatto più forte sulla superficie, ma ciò non influisce significativamente sui tempi di recupero della vegetazione.

Il fatto che gli incendi autunno-invernali abbiano una severità simile agli incendi prescritti potrebbe essere un vantaggio per i gestori forestali, poiché la mancanza di risorse rende impossibile trattare ogni anno aree molto estese, rendendo quasi inefficaci gli incendi prescritti su estensione degli incendi (Fernandes, 2015). Pertanto, dal punto di vista gestionale, gli incendi boschivi invernali potrebbero essere utilizzati come trattamento per mitigare il rischio degli incendi boschivi estivi. E' comunque estremamente importante tenere presente che non esiste un confinamento naturale per un qualsiasi incendio e il rischio per le persone e le infrastrutture deve essere preso in considerazione, anche se l'incendio è di bassa severità.

Gli incendi boschivi autunno-invernali hanno una severità vicina a quella degli incendi prescritti, quindi potrebbero essere utilizzati come trattamento per ridurre il rischio degli incendi estivi, ma con cautela poiché ci sono rischi reali legati agli incendi boschivi per le persone e le infrastrutture.

#### RICONOSCIMENTI

##### Contributi dei singoli autori

Idea, concezione, metodologia: J. Romeiro. Revisione, supervisione, metodologia: F. Pirotti e F. Torres.

##### Fonti di finanziamento

Parte del lavoro è stato supportato e finanziato dall'ente Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasile (Capes) – Codice Finanziamento 001 ed in parte dal progetto H2020 FIRE-RES Grant agreement ID: 101037419

##### Conflitti di interessi

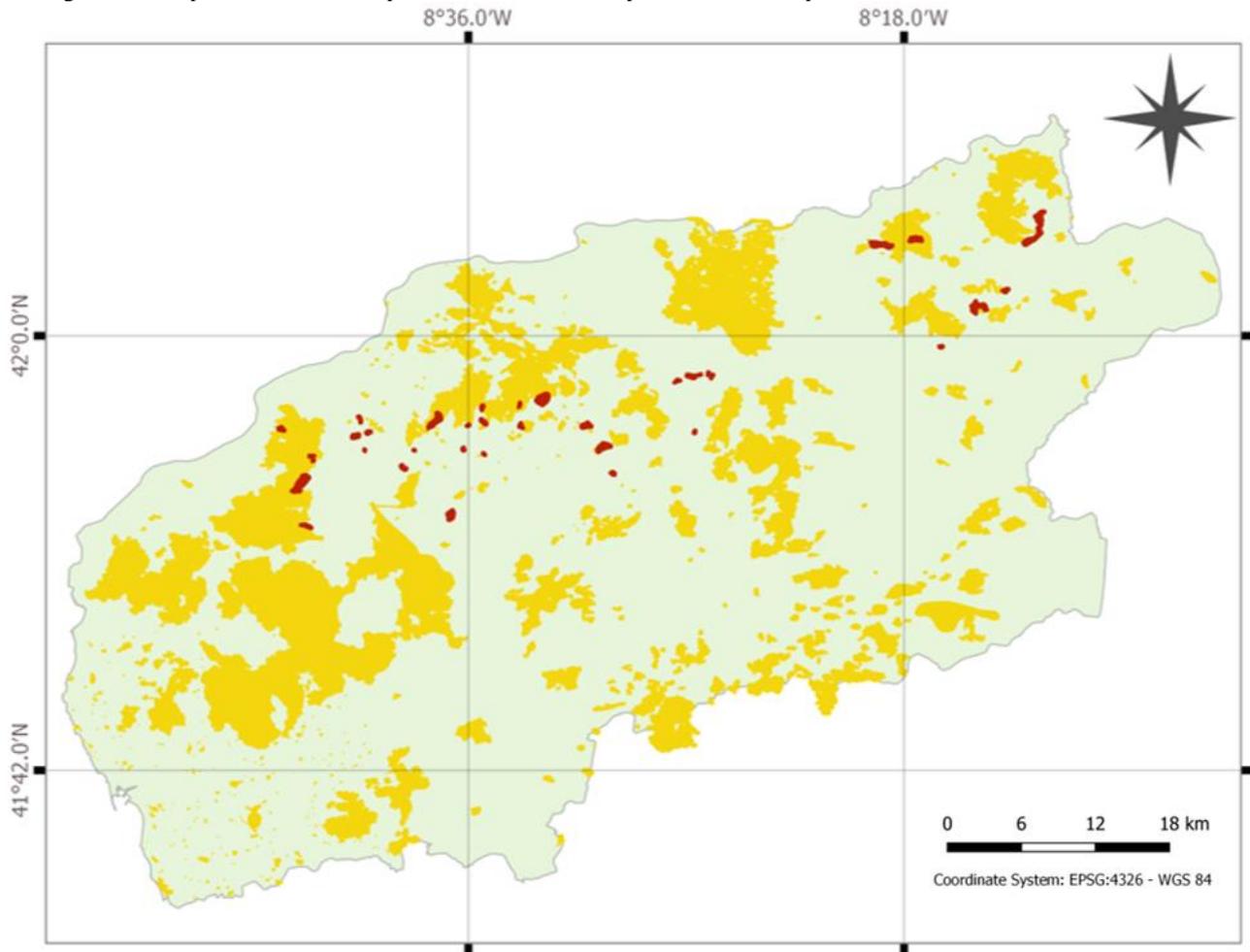
L'autore dichiara di non avere alcun conflitto di interesse.

## BIBLIOGRAFIA

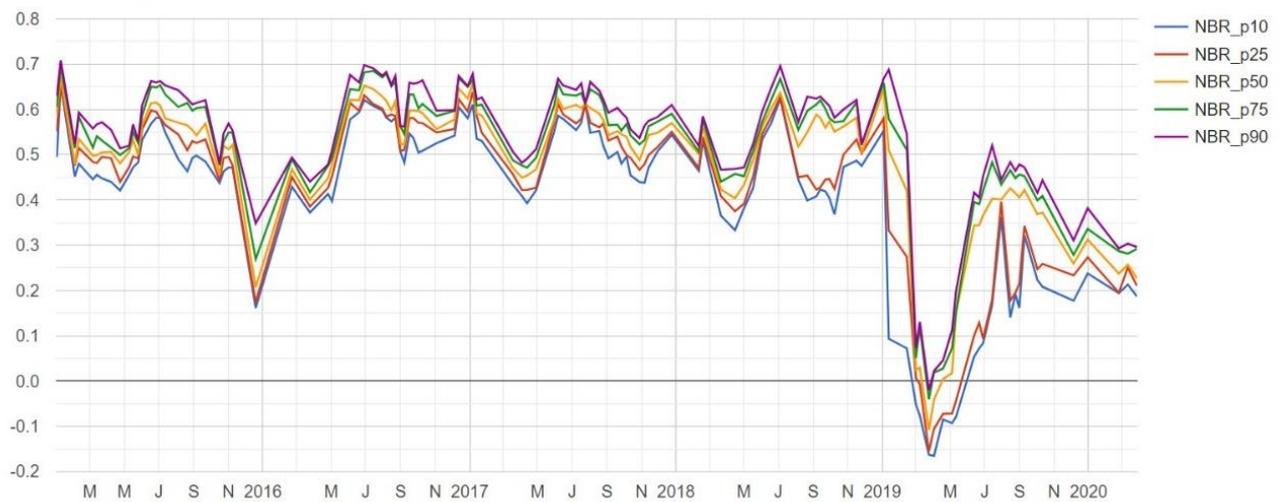
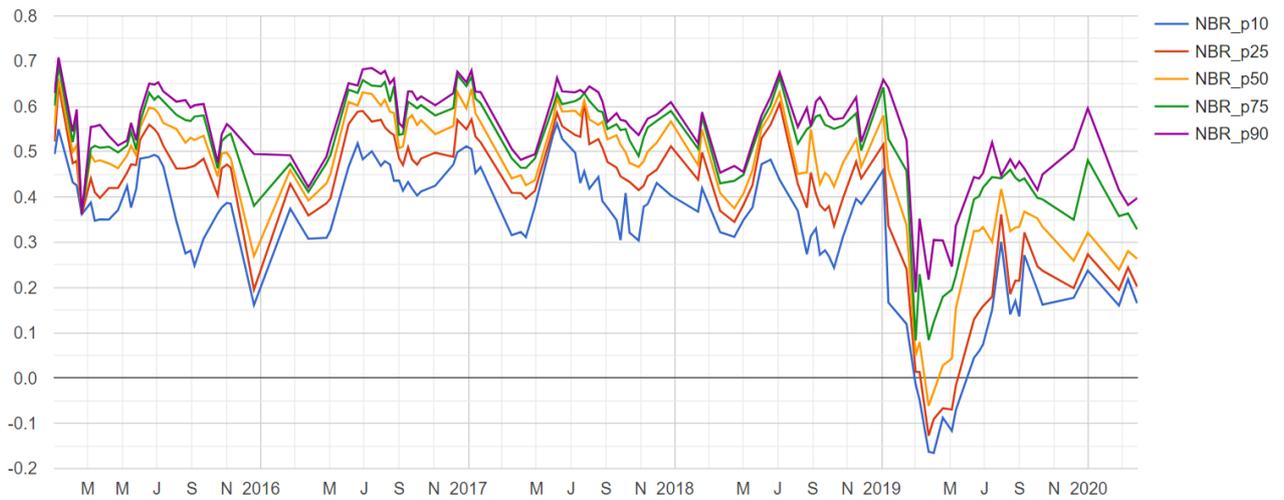
- Ban, Y., Zhang, P., Nascetti, A., Bevington, A.R., Wulder, M.A., 2020. Near Real-Time Wildfire Progression Monitoring with Sentinel-1 SAR Time Series and Deep Learning. *Sci. Rep.* <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56967-x>
- Brakel, J.P.G. van, 2014. Robust peak detection algorithm using z-scores [WWW Document]. Stack Overflow. URL <https://stackoverflow.com/questions/22583391/peak-signal-detection-in-realtime-timeseries-data/22640362#22640362>
- Chen, X., Vogelmann, J.E., Rollins, M., Ohlen, D., Key, C.H., Yang, L., Huang, C., Shi, H., 2011. Detecting post-fire burn severity and vegetation recovery using multitemporal remote sensing spectral indices and field-collected composite burn index data in a ponderosa pine forest. *Int. J. Remote Sens.* 32, 7905–7927. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.524678>
- Chuvieco, E., Martín, M.P., Palacios, A., 2002. Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *Int. J. Remote Sens.* <https://doi.org/10.1080/01431160210153129>
- Collins, L., Griffioen, P., Newell, G., Mellor, A., 2018. The utility of Random Forests for wildfire severity mapping. *Remote Sens. Environ.* 216, 374–384. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.07.005>
- dos Santos, J.F.C., Romeiro, J.M.N., de Assis, J.B., Torres, F.T.P., Gleriani, J.M., 2018. Potentials and limitations of remote fire monitoring in protected areas. *Sci. Total Environ.* 616–617, 1347–1355. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.182>
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., Bargellini, P., 2012. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sens. Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- Escuin, S., Navarro, R., Fernández, P., 2008. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images. *Int. J. Remote Sens.* 29, 1053–1073. <https://doi.org/10.1080/01431160701281072>
- Esnaola-Gonzalez, I., Gómez-Omella, M., Ferreira, S., Fernandez, I., Lázaro, I., García, E., 2020. An IoT platform towards the enhancement of poultry production chains. *Sensors (Switzerland)* 20, 1–20. <https://doi.org/10.3390/s20061549>
- Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., Alsdorf, D., 2007. The Shuttle Radar Topography Mission. *Rev. Geophys.* 45, RG2004. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
- Fernandes, P., Botelho, H., 2004. Analysis of the prescribed burning practice in the pine forest of northwestern Portugal. *J. Environ. Manage.* <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2003.10.001>
- Fernandes, P.M., 2015. Empirical support for the use of prescribed burning as a fuel treatment. *Curr. For. Reports* 1, 118–127. <https://doi.org/10.1007/s40725-015-0010-z>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R., 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sens. Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Haralick, R.M., 1979. Statistical and structural approaches to texture. *Proc. IEEE.* <https://doi.org/10.1109/PROC.1979.11328>
- Imperatore, P., Azar, R., Calò, F., Stroppiana, D., Brivio, P.A., Lanari, R., Pepe, A., 2017. Effect of the Vegetation Fire on Backscattering: An Investigation Based on Sentinel-1 Observations. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 10, 4478–4492. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2717039>
- Mallinis, G., Mitsopoulos, I., Chrysafi, I., 2018. Evaluating and comparing sentinel 2A and landsat-8 operational land imager (OLI) spectral indices for estimating fire severity in a mediterranean pine ecosystem of Greece. *GIScience Remote Sens.* 55, 1–18. <https://doi.org/10.1080/15481603.2017.1354803>
- Oliveira, S., Félix, F., Nunes, A., Lourenço, L., Laneve, G., Sebastián-López, A., 2018. Mapping wildfire vulnerability in Mediterranean Europe. Testing a stepwise approach for operational purposes. *J. Environ. Manage.* <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.10.003>
- Pereira, J.M.C., 1999. A comparative evaluation of NOAA/AVHRR vegetation indexes for burned surface detection and mapping. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 37, 217–226. <https://doi.org/10.1109/36.739156>
- Perkins, P., Heber, S., 2018. Identification of Ribosome Pause Sites Using a Z-Score Based Peak Detection Algorithm. *IEEE Int. Conf. Comput. Adv. Bio Med. Sci. ICCABS 2018-October*, 4–9. <https://doi.org/10.1109/ICCABS.2018.8541902>
- Pipitone, C., 2017. Monitoraggio di opere strategiche mediante tecniche satellitari: il caso studio della diga “Castello sul fiume Magazzolo.” *Boll. della Soc. Ital. di Fotogramm. e Topogr.* 13–18.
- Small, D., 2011. Flattening gamma: Radiometric terrain correction for SAR imagery. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2120616>
- Stroppiana, D., Azar, R., Calò, F., Pepe, A., Imperatore, P., Boschetti, M., Silva, J., Brivio, P., Lanari, R., 2015. Integration of Optical and SAR Data for Burned Area Mapping in Mediterranean Regions. *Remote Sens.* 7, 1320–1345. <https://doi.org/10.3390/rs70201320>
- Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., Potin, P., Rommen, B.Ö., Floury, N., Brown, M., Traver, I.N., Deghaye, P., Duesmann, B., Rosich, B., Miranda, N., Bruno, C., L'Abbate, M., Croci, R., Pietropaolo, A., Huchler, M., Rostan, F., 2012. GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sens. Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028>
- Veraverbeke, S., Gitas, I., Katagis, T., Polychronaki, A., Somers, B., Goossens, R., 2012. Assessing post-fire vegetation recovery using red-near infrared vegetation indices: Accounting for background and vegetation variability. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 68, 28–39. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.12.007>

## APPENDICE

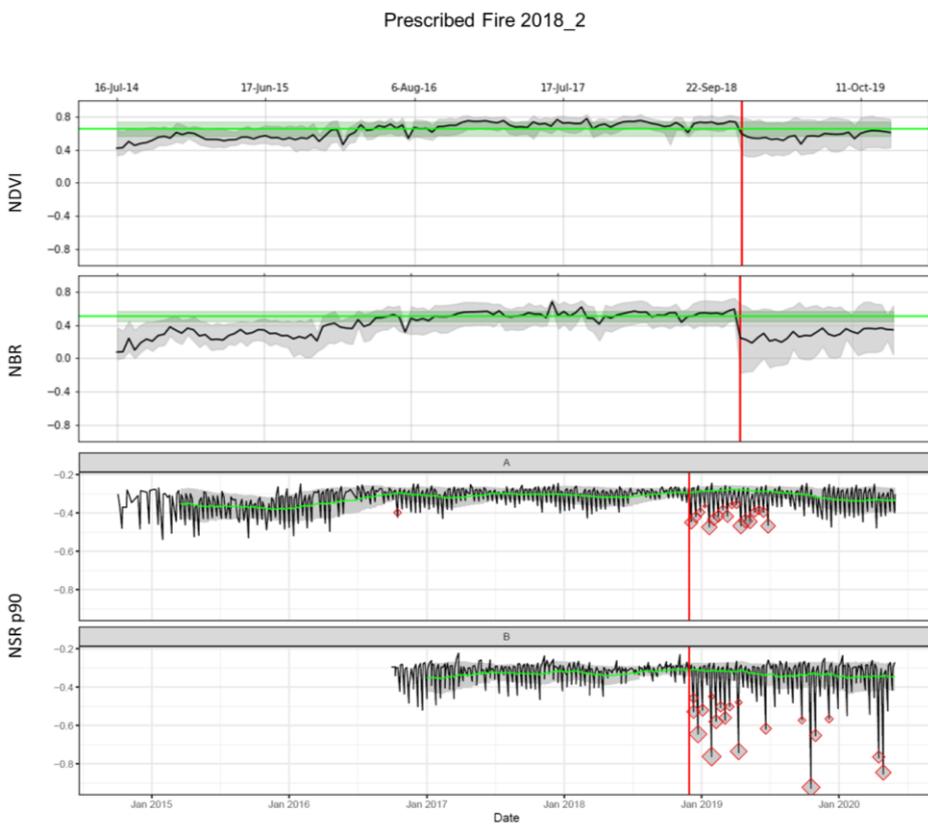
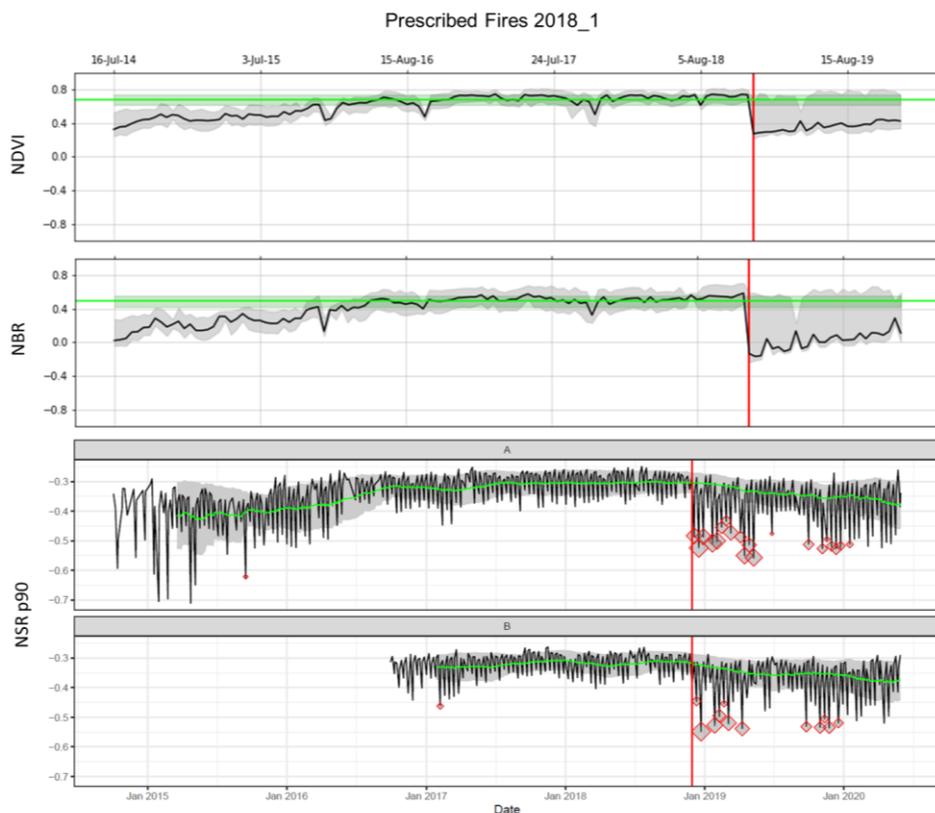
A1. In giallo le aree percorse da incendi spontanei, in rosso le aree percorse da fuochi prescritti.



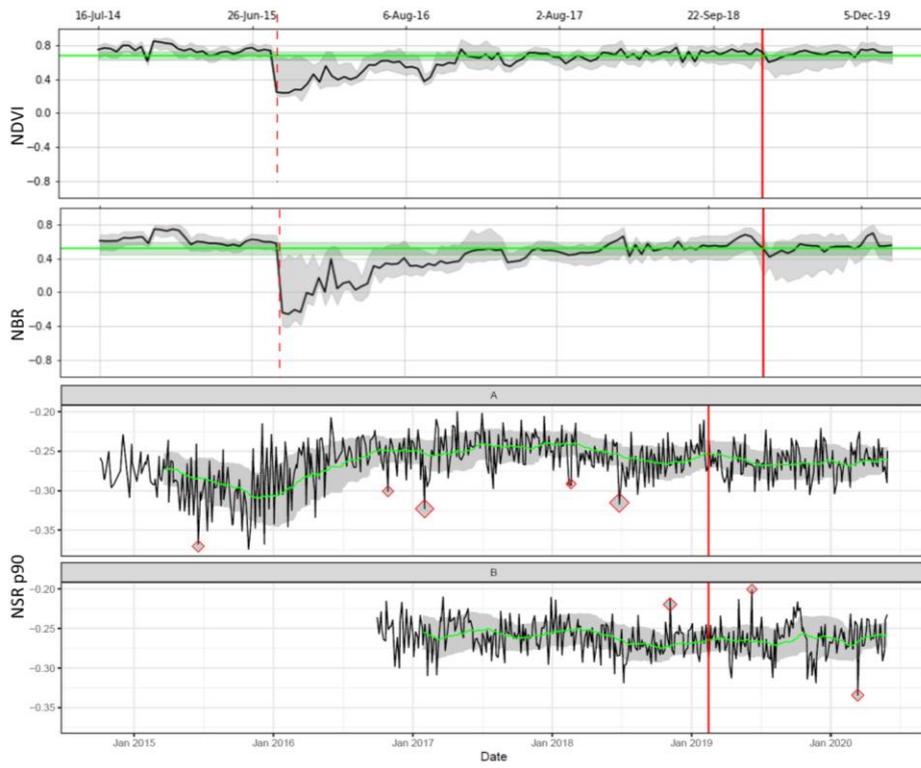
A2. Serie temporale dei valori dell'indice NBR da Landsat-8 su una delle aree – Sopra: senza buffer. Sotto: con contrazione del poligono mediante buffer interno di 30 m ai margini – è evidente la minore varianza. Le scale di colore indicano i vari percentili della distribuzione dei valori dentro l'area.



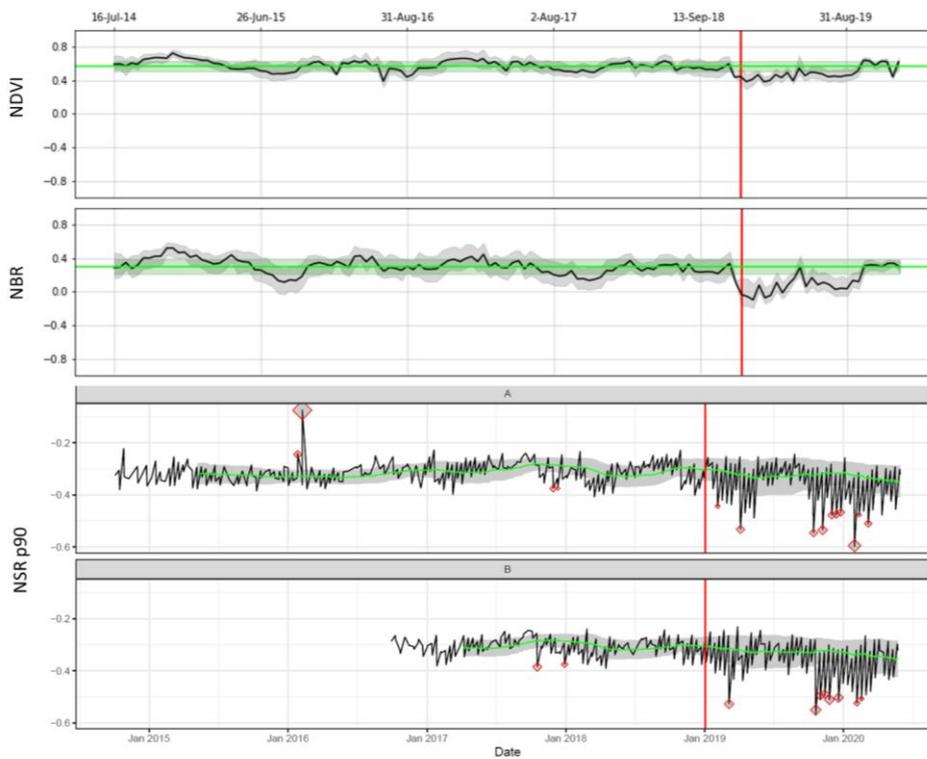
A3. Risultati del metodo Smoothed Z-Score con soglia 3 (sotto con 2 grafici divisi per satellite Sentinel-1 A e B) confrontato con indici da sensori ottici passivi (grafici NDVI e NBR sopra) – i rombi rossi sono i dati sopra soglia, la linea rossa corrisponde alla data dell'incendio. NB – le assi temporale dei dati ottici e SAR non sono allineati – fa riferimento la linea verticale rossa. *Prescribed fires*=incendi prescritti, *Winter wildfires*=incendi autunno-invernali, *Summer wildfires*=incendi estivi.



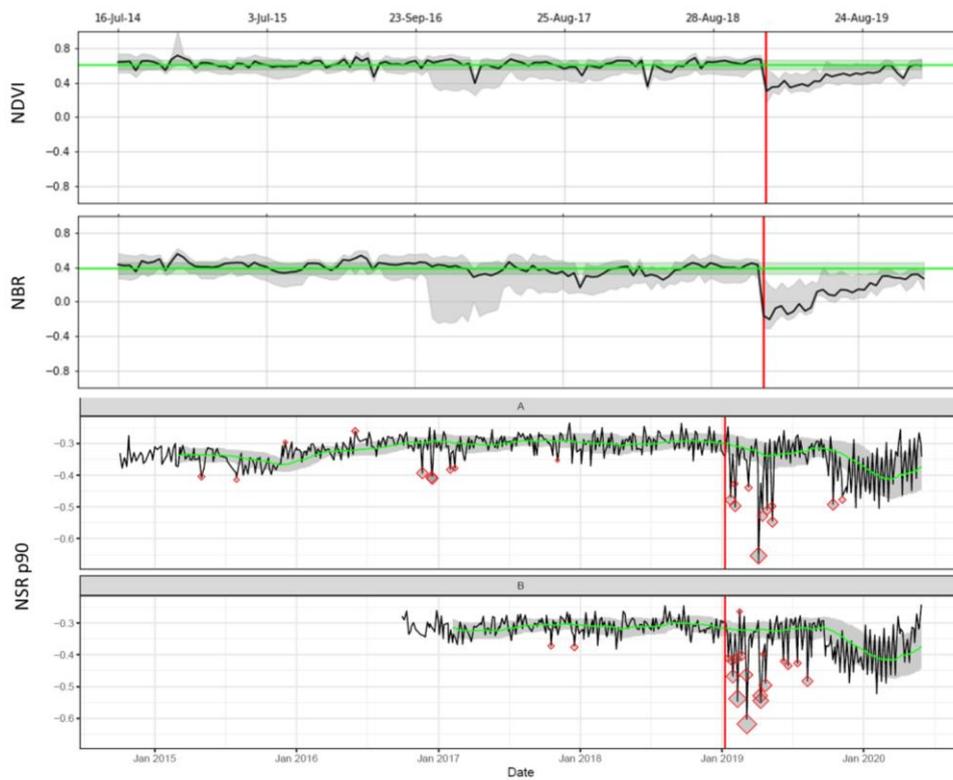
### Prescribed Fire 2019\_6



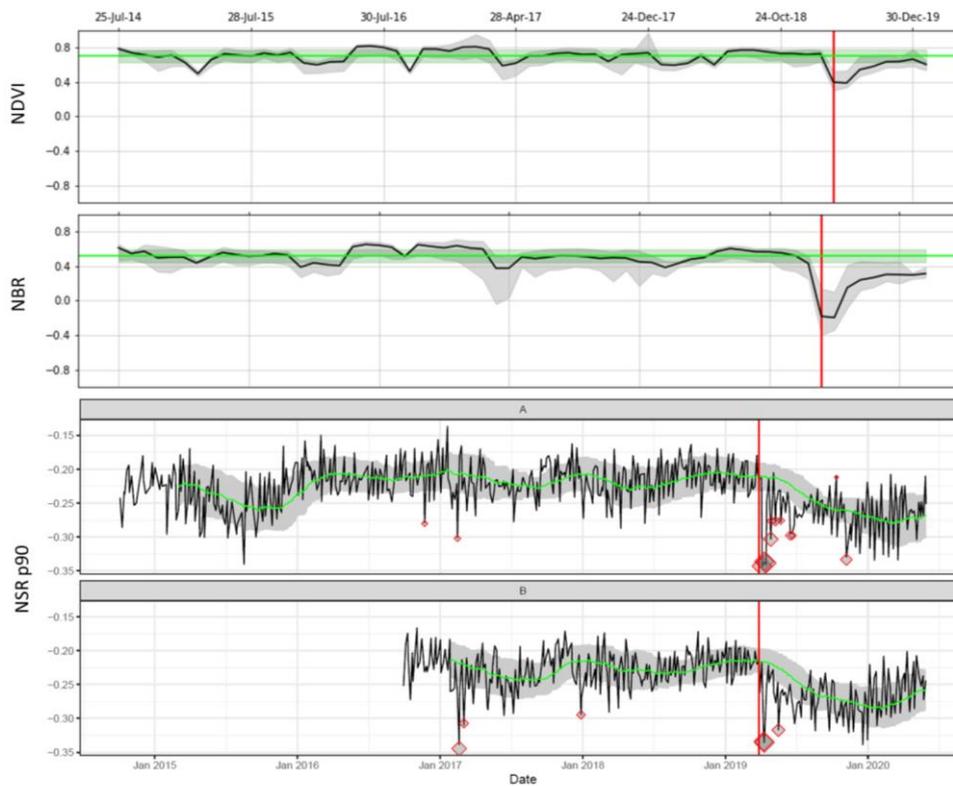
### Prescribed Fire 2019\_8



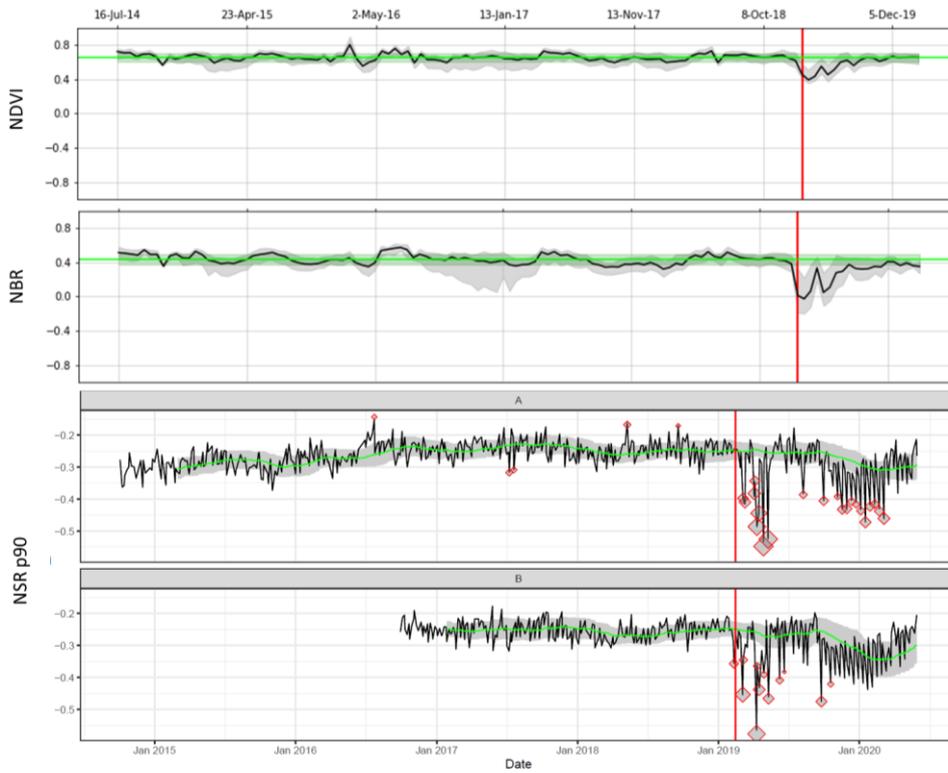
### Prescribed Fire 2019\_11



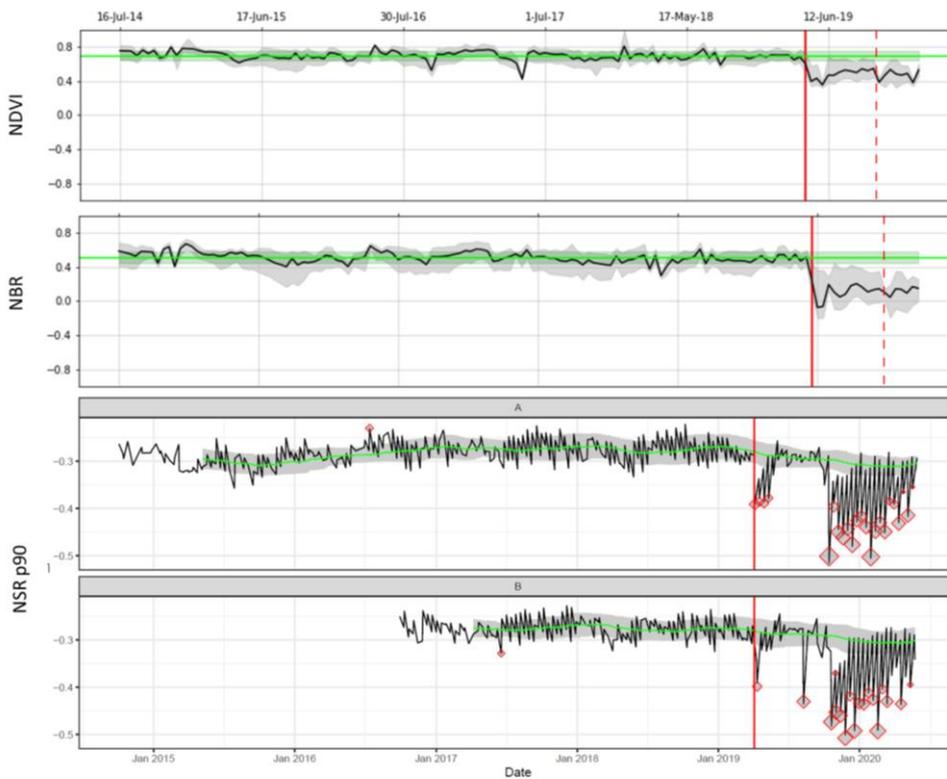
### Prescribed Fires 2019\_12



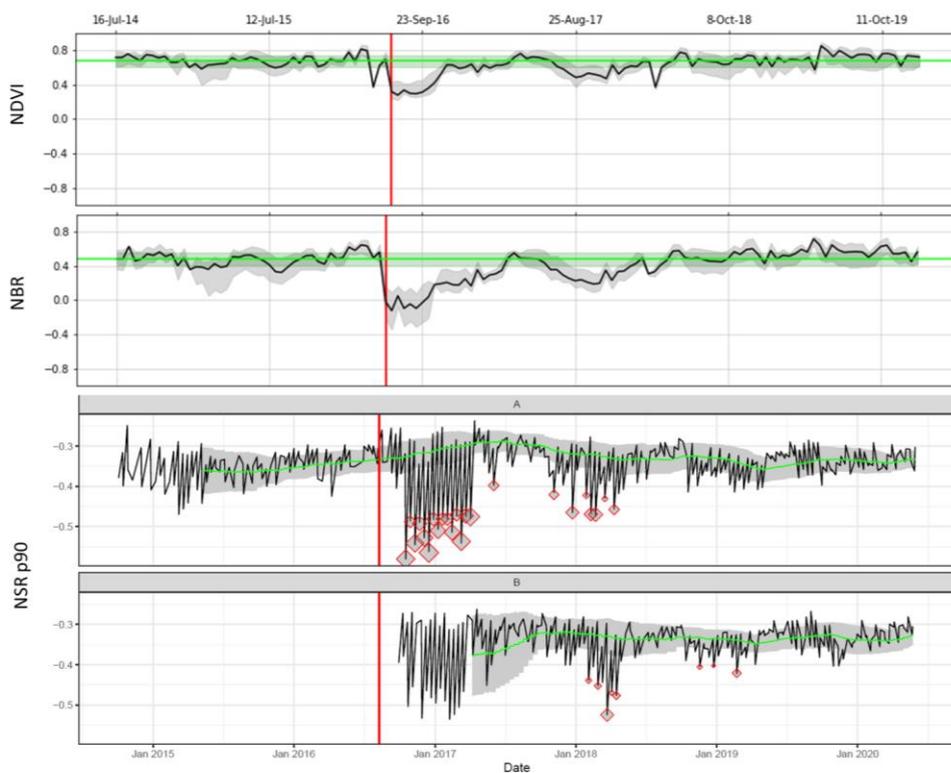
Prescribed Fires 2019\_13



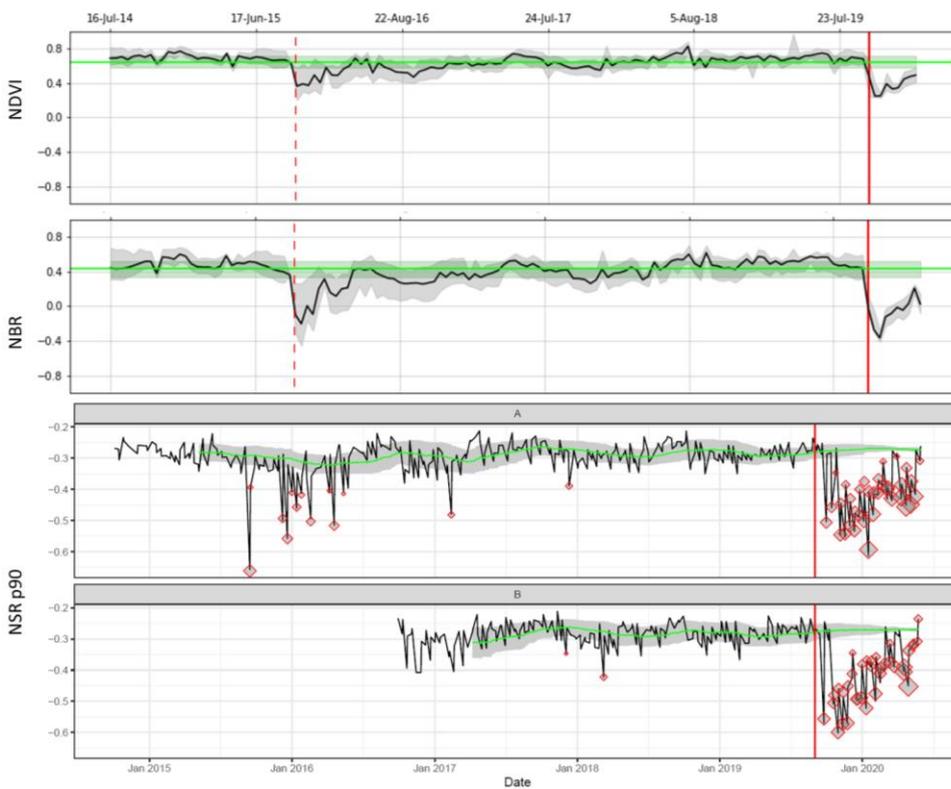
Prescribed Fires 2019\_15



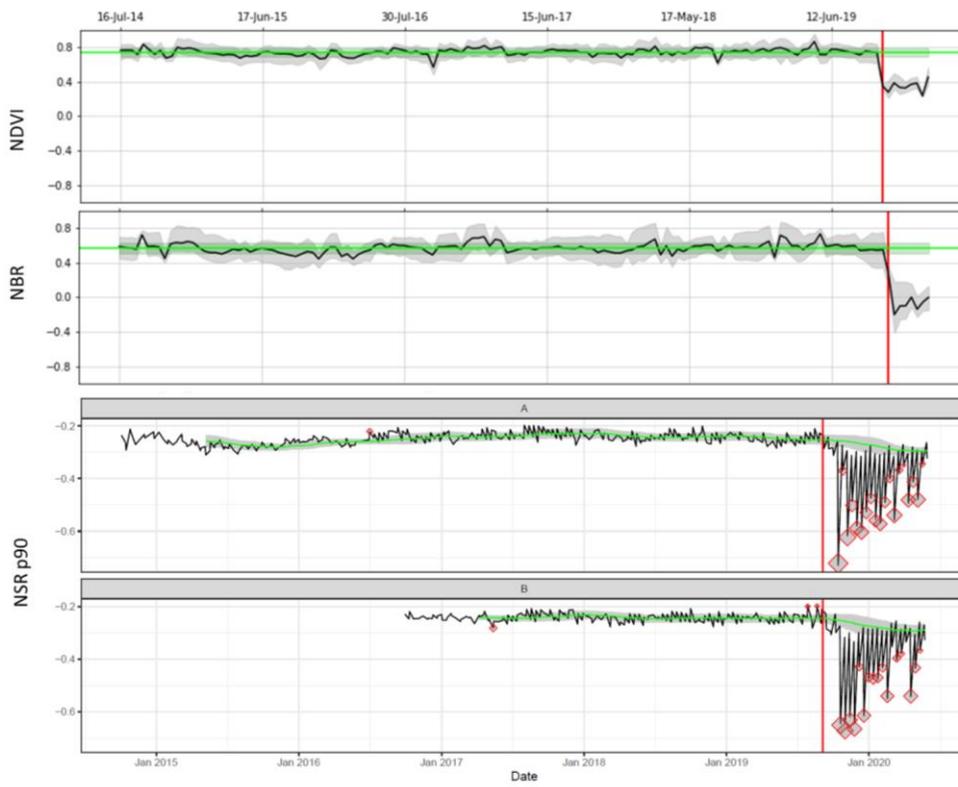
### Summer Wildfire 2016\_1



### Summer Wildfire 2019\_6



### Summer Wildfires 2019\_15



### Summer Wildfire 2019\_18



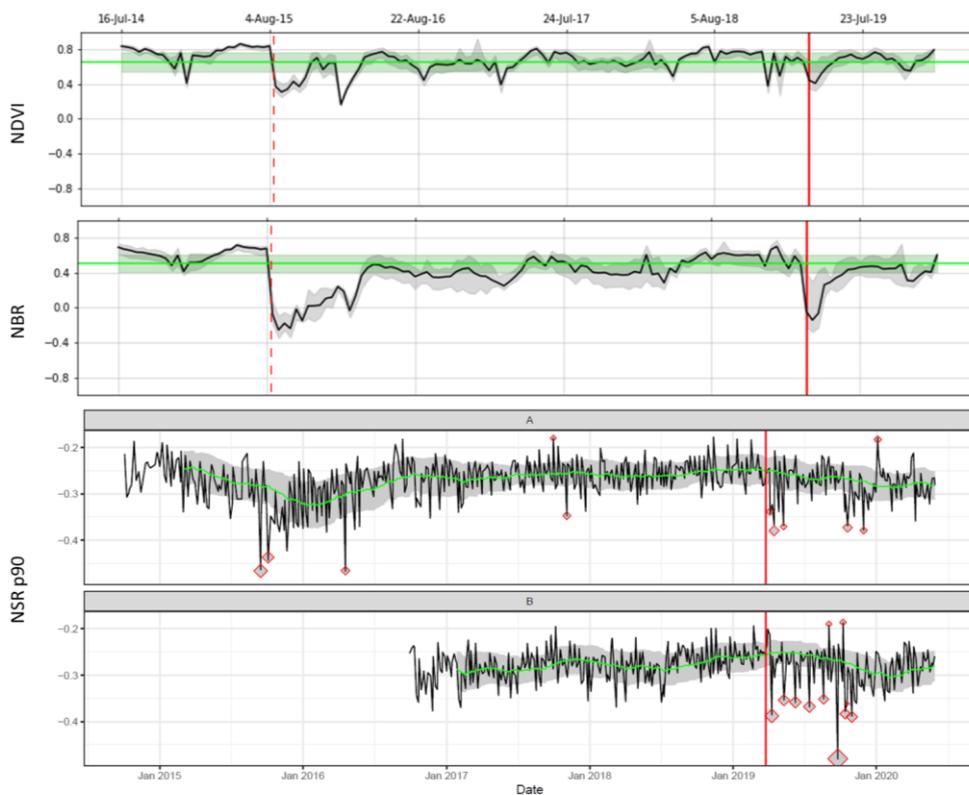
Winter Wildfire 2018\_1



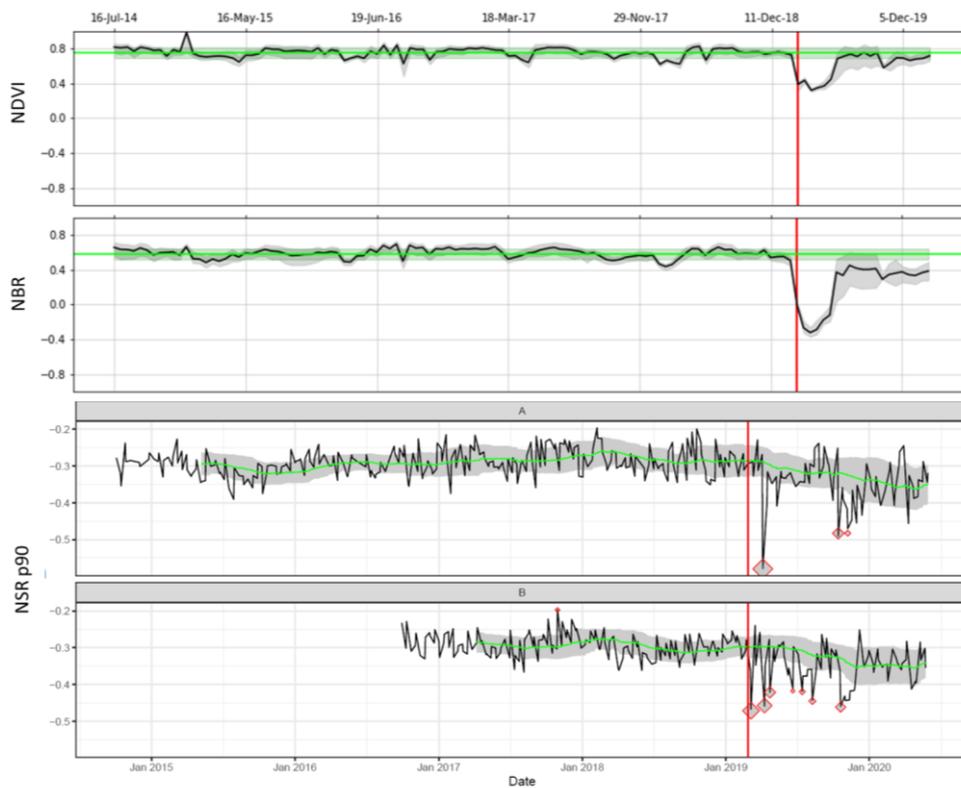
Winter Wildfire 2018\_2



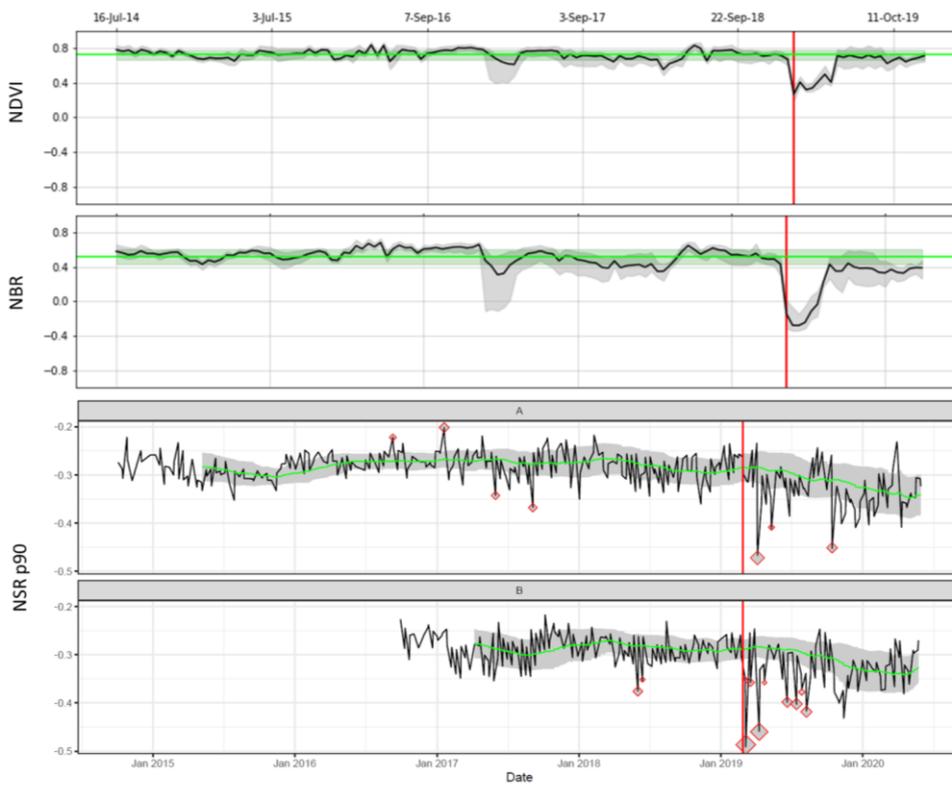
### Winter Wildfire 2019\_6



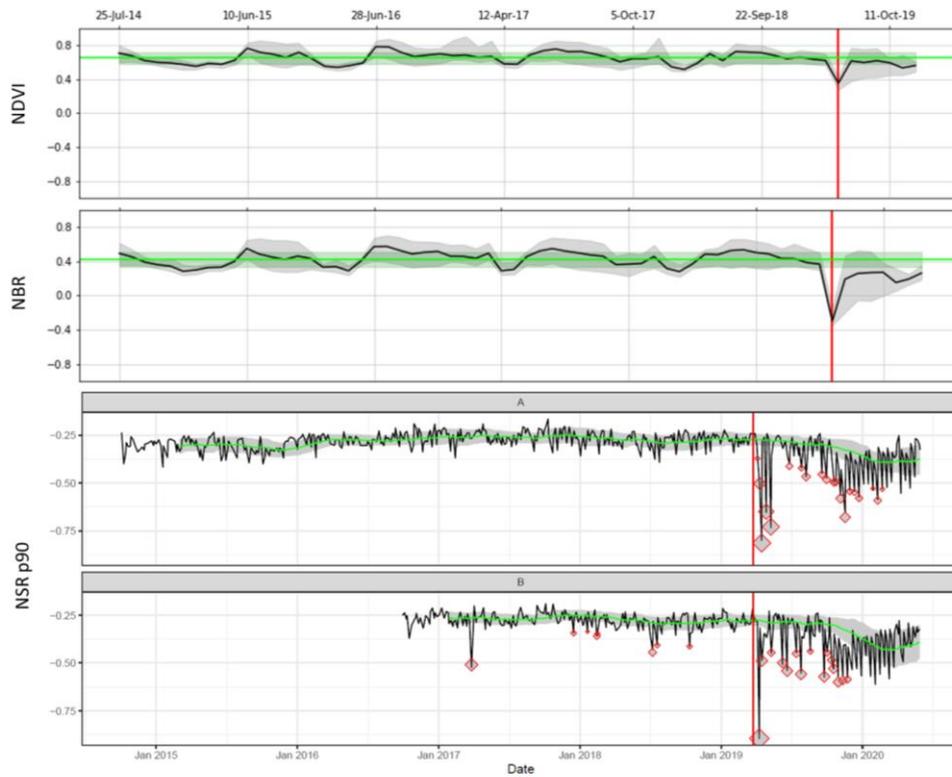
### Winter Wildfire 2019\_8



### Winter Wildfire 2019\_11



### Winter Wildfires 2019\_12



### Winter Wildfires 2019\_13

