

IMPIEGO E GESTIONE DI DRONI NEL SNPA PER IL MONITORAGGIO E IL CONTROLLO AMBIENTALE

Delibera del Consiglio SNPA n.283/25 del 21.05.2025



IMPIEGO E GESTIONE DI DRONI NEL SNPA PER IL MONITORAGGIO E IL CONTROLLO AMBIENTALE

Delibera del Consiglio SNPA n.283/25 del 21.05.2025

PUBBLICAZIONI TECNICHE SNPA 2025

ISBN 978-88-448-1266-9 Roma, Giugno 2025

Il Sistema Nazionale a rete per la Protezione dell'Ambiente (SNPA) è operativo dal 14 gennaio 2017, data di entrata in vigore della legge 28 giugno 2016, n. 132 di "Istituzione del Sistema Nazionale a rete per la Protezione dell'Ambiente e disciplina dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale" (ISPRA).

Il SNPA è composto dall'ISPRA, ente pubblico nazionale di ricerca che ne coordina le attività, e dalle agenzie per la protezione dell'ambiente delle Regioni e delle Province autonome di Trento e Bolzano.

Attraverso la cooperazione a rete, il Sistema lavora per raggiungere prestazioni tecniche ambientali uniformi sull'intero territorio nazionale, a vantaggio della tutela dell'ambiente e a beneficio della popolazione, dell'attività delle imprese e del sistema pubblico in generale. Le prestazioni tecniche riguardano le attività ispettive e di controllo ambientale, il monitoraggio dello stato dell'ambiente, il controllo delle fonti e dei fattori di inquinamento, il supporto alle attività in campo ambientale dello Stato, delle Regioni e degli enti locali, la ricerca finalizzata a tali scopi nonché la raccolta, l'organizzazione e diffusione dei dati e delle informazioni ambientali che sono riferimenti ufficiali dell'attività di tutta la pubblica amministrazione.

Il Sistema produce documenti tecnici quali Report ambientali SNPA, Linee guida SNPA, Pubblicazioni tecniche SNPA e pareri vincolanti in base alla legge. Organo deliberativo del Sistema è, ai sensi dell'art. 13 della legge n. 132/2016, il Consiglio del Sistema Nazionale, presieduto dal Presidente dell'ISPRA e composto dai rappresentanti legali delle agenzie e dal Direttore generale dell'Istituto.

Le persone che agiscono per conto delle componenti del Sistema non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in queste pubblicazioni.

Citare questo documento come segue:

SNPA, Impiego e gestione di droni nel SNPA per il monitoraggio e il controllo ambientale, Pubblicazioni tecniche SNPA, 2025

ISBN 978-88-448-1266-9

© Pubblicazioni tecniche SNPA 2025

La collana Pubblicazioni tecniche SNPA raccoglie elaborazioni prodotte dal Sistema e derivanti dalle attività di approfondimento scientifico e tecnico, anche progettuale, che accrescono la conoscenza su una tematica e sono propedeutiche alla eventuale produzione di Report ambientali SNPA o di Linee guida SNPA.

Riproduzione autorizzata citando la fonte.

Coordinamento della pubblicazione online:

Daria Mazzella – ISPRA

Copertina:

Alessia Marinelli – Ufficio Grafica ISPRA

Giugno 2025

Abstract

I recenti progressi tecnologici degli UAS (*Unmanned aircraft system*), con incremento dell'efficienza, dell'affidabilità e della disponibilità di differenti sensori, ha aperto la strada a molteplici applicazioni in campo ambientale, integrando le tecniche di monitoraggio tradizionali. La ricognizione effettuata sull'uso dei droni nel SNPA è relativa a dotazione strumentale, risorse umane dedicate e relative abilitazioni degli operatori, tecniche di rilievo ed elaborazione, modalità di gestione operativa e ambiti tematici di impiego.

The latest technological advancements in UAS (Unmanned Aircraft Systems), with increased efficiency, reliability and availability of various sensors, have paved the way for multiple applications in the environmental field, complementing traditional monitoring techniques. The survey on the use of drones within the SNPA focuses on instrumental equipment, dedicated human resources and operator certifications, data acquisition and processing techniques, operational management methods and thematic areas of application.

Parole chiave: droni, UAS, monitoraggio ambientale, telerilevamento, osservazione della Terra.

Keywords: drones, UAS, Environmental monitoring, Remote Sensing, Earth Observation.

Autori

TIC III – GdL 3 "Monitoraggio ambientale attraverso gli strumenti dell'osservazione della Terra e tecnologie innovative"

Coordinamento: Serena Geraldini (ISPRA, PRES-PSMA)

Roberto Greco (ARPA Puglia)

Antonio Iengo (ARPA Liguria)

Alessandro Loda (ARPA Lombardia)

Umberto Morra di Cella (ARPA Valle d'Aosta)

Gianluca Ragone (ARPA Campania)

Antonella Zanello (ARPA Friuli Venezia Giulia)

Contributi alla ricognizione sull'uso di droni e alle applicazioni tematiche

per ARTA Abruzzo: Mosè Lamolinara

per APPA Bolzano: Luca Verdi

per ARPA Basilicata: Gaetano Caricato

per ARPA Calabria: Luigi Dattola

per ARPA Campania: Gianluca Ragone

per ARPA Emilia-Romagna: Adele Lo Monaco, Andrea Maroncelli

per ARPA Friuli Venezia Giulia: Antonella Zanello, Federico Pittaluga, Pietro Rossin

per ARPA Lazio: Maila Strappini

per ARPA Liguria: Antonio Iengo, Monica Lazzari

per ARPA Lombardia: Alessandro Loda, Alessandro Menin, Dario Bellingeri, Dario Lombardi

per ARPA Marche: Marco Fanelli

per ARPA Piemonte: Andrea Filipello

per ARPA Puglia: Roberto Greco

per ARPA Sardegna: Antonello Cossu

per ARPA Sicilia: Giuseppe Messina

per ARPA Toscana: Cinzia Licciardello, Antonio di Marco

per ARPA Valle d'Aosta: Umberto Morra di Cella, Federico Grosso

per ARPA Veneto: Andrea Bertolo, Giampaolo Fusato

per ISPRA: Matteo Ciani (BIO-AMC), Claudia Virno Lamberti (BIO-ACAM), Marco Casaioli (BIO-ACAS), Stefano Mariani (BIO-ACAS), Simona Imperio (BIO-AVM), Stefano Volponi (BIO-CFN), Sante Francesco Rende (BIO-HBT), Paolo Maria Guarino (GEO), Luca Olivetta (GEO), Valerio Vitale (GEO), Saverio Romeo (GEO), Fernando Pensosi (VAL-DIR), Serena Geraldini (PRES-PSMA)

Percorso istruttorio

Documento elaborato nell'ambito del Tavolo Istruttorio del Consiglio SNPA III "Potenziamento delle infrastrutture portanti del Sistema", coordinato dall'ARPA Friuli Venezia Giulia, gruppo di lavoro n. 3 "Monitoraggio ambientale attraverso gli strumenti dell'osservazione della Terra e tecnologie innovative", coordinato dall'ISPRA

Documento adottato dal Consiglio SNPA, con Delibera del Consiglio SNPA n. 283/25 del 21/05/2025

Coordinamento editoriale del documento

Serena Geraldini (ISPRA, PRES-PSMA)

SOMMARIO

ACRONIMI	4
PREMESSA	6
SINTESI.....	7
INTRODUZIONE	8
1. SISTEMI AEROMOBILI A PILOTAGGIO REMOTO	9
1.1. INFORMAZIONI GENERALI SULLA TECNOLOGIA	9
1.1.1. Velivoli.....	9
1.1.2. Sensori	10
1.1.3. Sistemi di posizionamento	12
1.2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO	13
2. I RISULTATI DELLA MAPPATURA	17
2.1. LA RICOGNIZIONE	17
2.2. DOTAZIONE STRUMENTALE	20
2.2.1. Velivoli.....	20
2.2.2. Sensori	26
2.2.3. Sistemi di posizionamento	30
2.2.4. Software	32
2.2.5. Risorse umane dedicate	38
2.2.6. Prodotti e scenari operativi	43
2.2.7. I rapporti di collaborazione	47
2.2.8. Gestione Operativa	47
3. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE E PROSPETTIVE FUTURE.....	48
INDICE DELLE FIGURE	49
INDICE DELLE TABELLE	50
APPENDICE: LE APPLICAZIONI TEMATICHE NELL'USO DI DRONI IN AMBITO SNPA	51

ACRONIMI

AI	Artificial Intelligence
AIA	Autorizzazione Integrata Ambientale
AGEA	Agenzia per le erogazioni in agricoltura
AGL	Above Ground Level
ASI	Agenzia Spaziale Italiana
ASV	Autonomous Surface Vehicle
ATO	Above Take Off
BVLOS	Beyond Visual Line of Sight
CF	Centro Funzionale
CHM	Canopy Height Model
CIMA	Centro Internazionale in Monitoraggio Ambientale
CNR	Consiglio Nazionale delle Ricerche
CP	Check Point
CNVVF	Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco
DEM	Digital Elevation Model
DEVSS	Development Vehicle for Scientific Survey
DoD	Difference of DEM
DPC	Dipartimento della Protezione Civile (Nazionale)
DPCM	Decreto del Presidente del Consiglio dei ministri
DSM	Digital Surface Model
DTM	Digital Terrain Model
ENAC	Ente Nazionale per l'Aviazione Civile
ENAV	(ex) Ente Nazionale per l'Assistenza al Volo
FMV	Full Motion Video
GCOS	Global Climate Observing System
GCP	Ground Control Point
GIS	Geographic Information System
GNDVI	Green Normalized Difference Vegetation Index
GSD	Ground Sampling Distance
IGM	Istituto Geografico Militare
IR	Infrared
IRFC	Infrared False Color
ISO	International Standards Organization
HW	Hardware
k-NN	k-Nearest Neighbors
LAI	Leaf Area Index
LARS	Low Altitude Remote Sensing
LiDAR	Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging
M3C2	Multi-scale Model to Model Cloud Comparison
MASAF	Ministero della Sovranità alimentare e delle Foreste

MASE	Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica
MATTM	Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare
MS	Multi Spectral
MTOM	Maximum Take Off Mass
NDMI	Normalized Difference Moisture Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
nRTK	network Real Time Kinematic
OBIA	Object Based Image Analysis
PDRA	Pre-Defined Risk Assessment
PiP	Picture in Picture
PPK	Post Processed Kinematic
PPP	Precise Point Positioning
PSInSAR	Premanent-Scatterer-Interferometric-Side-Aperture-Radar
RGB	Red-Green-Blue
RTK	Real Time Kinematic
SAIL	Specific Assurance and Integrity Level
SBS	Side By Side
SfM	Structure from Motion
SfM-MVS	Structure from Motion - Multi View Stereo matching
SIC	Sito di Importanza Comunitaria
SNPA	Sistema Nazionale Protezione Ambiente
SNPC	Sistema Nazionale Protezione Civile
SORA	Specific Operations Risk Assessment
SPAMI	Specially Protected Areas of Mediterranean Importance
STS	Standard Scenarios
SW	Software
TLS	Terrestrial Laser Scanner
UAS	Unmanned Aerial System
VI	Vegetation Index
VLOS	Visual Line of Site
ZPS	Zona di Protezione Speciale
ZSC	Zona Speciale di Conservazione

PREMESSA

I velivoli a pilotaggio remoto (SAPR - Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto, più comunemente droni o UAS - *Unmanned Aircraft System*) e le tecnologie per il telerilevamento ad alta risoluzione costituiscono una tematica con interessanti margini di sviluppo e applicazione, soprattutto per enti e istituzioni come quelli afferenti al Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA) che operano sul territorio per attività di monitoraggio e controllo.

Il panorama dell'utilizzo dei droni all'interno del SNPA è attualmente frammentario e disomogeneo oltre che in costante e rapida evoluzione e diffusione.

Con il fine di approfondire le potenzialità di questa tecnologia, il Consiglio SNPA ha istituito uno specifico gruppo di lavoro all'interno di uno dei suoi Tavoli istruttori (TIC III GdL 03), per il "potenziamento delle infrastrutture portanti del sistema: monitoraggio ambientale attraverso gli strumenti dell'osservazione della Terra e tecnologie innovative".

Il primo obiettivo del GdL 03 è stato la mappatura dello stato dell'arte dell'impiego di droni all'interno del SNPA al fine di conoscere le risorse impegnate e le procedure metodologiche, operative e gestionali sviluppate in modo indipendente da ogni Agenzia.

Lo scopo ultimo della ricognizione è quello di porre le premesse per la successiva definizione di standard SNPA di utilizzo dei sistemi UAS, che siano scientificamente validi e condivisi, che forniscano risultati compatibili con le attività istituzionali, omogenei, confrontabili e, nel caso dei controlli, opponibili con sicurezza in sede di giudizio o di contenzioso con terze parti. Tale azione vuole migliorare l'efficienza e l'efficacia del monitoraggio e del controllo ambientale, nelle competenze specifiche e di sistema, esplorando le possibilità offerte dalla nuova tecnologia degli UAS, attraverso lo sviluppo di procedure e tecniche di osservazione della Terra e l'integrazione con altri dati.

Confrontare e mettere a sistema le diverse competenze e le esperienze già acquisite è in linea con l'obiettivo prioritario della Legge istitutiva del SNPA, n. 132 del 28 giugno 2016, di raggiungimento dei livelli essenziali delle prestazioni tecniche ambientali (LEPTA), che costituiscono il livello minimo omogeneo delle attività che il Sistema nazionale è tenuto a garantire su tutto il territorio nazionale.

SINTESI

I recenti progressi tecnologici degli UAS, in relazione soprattutto all'incremento dell'efficienza e dell'affidabilità e alla disponibilità di differenti sensori, ha aperto la strada a molteplici applicazioni in campo ambientale, integrando le tecniche di monitoraggio tradizionali, basate sui rilievi in campo e sull'utilizzo di dati satellitari o aerei.

Poiché questa tecnologia si sta diffondendo in modo autonomo nelle diverse Agenzie ambientali e ISPRA, si è ritenuto opportuno eseguire una ricognizione sull'uso degli UAS all'interno di tutte le diverse articolazioni del SNPA.

L'importanza di un confronto tecnico su strumenti e procedure utilizzate dalle varie Agenzie e ISPRA e la necessità di definire metodologie operative condivise e standardizzate a livello nazionale, per la gestione, l'uso in campo, l'elaborazione e l'analisi dei dati rilevati, ha reso opportuno effettuare prioritariamente una mappatura nazionale dello stato dell'arte dell'impiego degli UAS nel SNPA. Questa indagine, da aggiornare periodicamente, in relazione alla rapidità con cui evolve la tecnologia, ha permesso di conoscere, qualitativamente e quantitativamente, le attrezzature disponibili e le risorse umane impiegate, fornendo altresì un quadro conoscitivo sulle procedure di gestione utilizzate da ciascuna Agenzia, anche in considerazione dell'aggiornamento della normativa in materia.

La ricognizione ha riguardato tutti gli aspetti relativi all'utilizzo di questa nuova tecnologia, ovvero: la dotazione strumentale, le risorse dedicate, le abilitazioni e le competenze teoriche e pratiche degli operatori e le modalità di gestione amministrativa, le tecniche di rilievo ed elaborazione, nonché gli ambiti di impiego. Le informazioni acquisite al 2024, hanno portato alla conoscenza della consistenza delle attrezzature, dei software e delle risorse umane dedicate.

INTRODUZIONE

Come previsto dagli obiettivi specifici del Tavolo Istruttorio del Consiglio SNPA TIC III GdL 03 (Potenziamento delle infrastrutture portanti del sistema: monitoraggio ambientale attraverso gli strumenti dell'osservazione della Terra e tecnologie innovative), è stato redatto uno schema di indagine (survey) per la mappatura dello stato dell'arte delle competenze ed esperienze esistenti nel SNPA in materia di UAS.

A seguito della delibera del Consiglio SNPA del 1° dicembre 2022, è stato richiesto ai Direttori Generali delle Agenzie del SNPA di fornire il nominativo del "referente droni" con cui il GdL 03 potesse interfacciarsi per la mappatura e a cui è stato inviato un questionario elaborato nell'ambito del GdL stesso. Nel corso dei mesi successivi, si è provveduto a raccogliere ed organizzare i diversi contributi, nonché a richiedere eventuali integrazioni ed aggiornamenti alle informazioni già trasmesse. Tale processo, facilitato anche dalle esercitazioni svolte in Emilia-Romagna (novembre 2023) e in Toscana (maggio 2024), ha consentito di ampliare il numero delle Agenzie coinvolte e dei relativi dati acquisiti, raccogliendo informazioni da 7 strutture di ISPRA e da 18 Agenzie per l'Ambiente, rendendo la ricognizione rappresentativa del SNPA.

In particolare, hanno risposto al questionario: ISPRA, ARTA Abruzzo, APPA Bolzano, ARPA Basilicata, ARPA Calabria, ARPA Campania, ARPAE Emilia-Romagna, ARPA Friuli-Venezia Giulia, ARPA Lazio, ARPA Liguria, ARPA Lombardia, ARPA Marche, ARPA Piemonte, ARPA Puglia, ARPA Sardegna, ARPA Sicilia, ARPA Toscana, ARPA Valle d'Aosta, ARPA Veneto.

Il questionario condiviso con i referenti droni di tutte le Agenzie e ISPRA è stato strutturato in diverse sezioni. Nello specifico: la Sezione A raccoglie informazioni generali sul soggetto compilante ed il nominativo del "referente droni", in modo da porre i presupposti per la creazione di una rete di contatti/esperti in materia. Le sezioni successive (B, C, D, E) prevedono risposte strutturate e precise per la raccolta di informazioni prettamente tecniche per una ricognizione sulle dotazioni strumentali e di personale, sui tematismi di monitoraggio ambientale di interesse e sulle modalità di gestione operativa. Le ultime due sezioni (F e G) hanno invece una struttura aperta, finalizzata all'individuazione di problematiche riscontrate, punti di forza nell'utilizzo di tali strumenti e prospettive future.

Il presente documento, dopo una prima introduzione generale sui sistemi aeromobili a pilotaggio remoto riguardante la tecnologia, i sistemi di posizionamento e la normativa di riferimento (capitolo 1), presenta i risultati della ricognizione suddivisi nelle varie sezioni (A, B, C, D, E, F, G) sopra illustrate (capitolo 2) e contiene nelle conclusioni alcune valutazioni e suggerimenti per supportare la diffusione, coordinata a livello di Sistema, di questa tecnologia nei prossimi anni (capitolo 3).

Infine, nell'Appendice al documento "Le applicazioni tematiche nell'uso di droni in ambito SNPA", sono riportate alcune schede contenenti casi applicativi su specifici tematismi di monitoraggio ambientale, eseguiti da ISPRA e da alcune Agenzie ambientali.

1. SISTEMI AEROMOBILI A PILOTAGGIO REMOTO

1.1. INFORMAZIONI GENERALI SULLA TECNOLOGIA

I sistemi UAS sono aeromobili (velivoli) a pilotaggio remoto, privi cioè di pilota a bordo, in grado di trasportare diversi apparati o un carico utile. Ad oggi sono differenti le tipologie di droni che in funzione dello scopo, civile o militare, hanno caratteristiche diversificate.

Il presente rapporto si riferisce unicamente ai droni usati nell'ambito delle attività del SNPA: droni per impiego civile, facilmente trasportabili, in grado di decollare/atterrare senza bisogno di particolari infrastrutture al suolo, di peso comunque inferiore ai 25 kg e il cui scopo è il trasporto di sensori per il telerilevamento ad alta risoluzione della superficie terrestre.

1.1.1. Velivoli

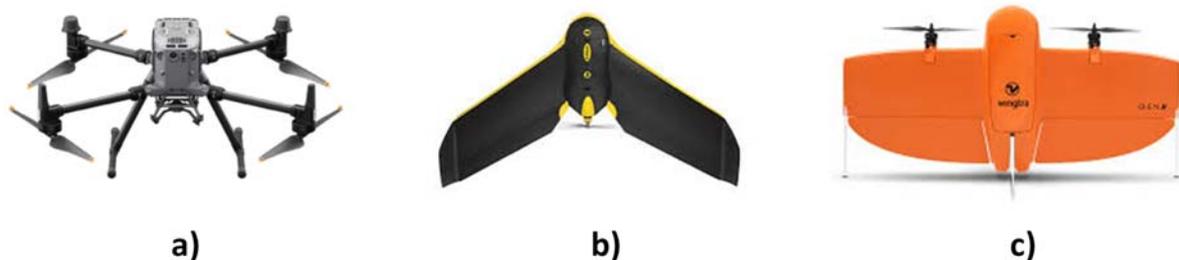
Da un punto di vista del sostentamento e della propulsione, gli UAS utilizzati dal SNPA sono distinguibili in due categorie: i multi-rotori e i sistemi ad ala fissa (Figura 1). Entrambe le categorie sfruttano per il movimento motori elettrici alimentati a batterie, più raramente motori a scoppio, il cui peso è uno dei principali fattori che influiscono sull'autonomia di volo e sulla capacità di trasporto di un carico utile.

I multi-rotori utilizzano (in modo simile agli elicotteri) la forza di sostentamento (portanza) generata da un numero variabile di eliche orizzontali. Sono sistemi caratterizzati da elevata manovrabilità e possibilità di utilizzo in molteplici scenari operativi, non ultima la possibilità di fermarsi in quota mantenendo una posizione fissa. Un ulteriore aspetto positivo si riferisce alla possibilità di essere equipaggiati con diverse tipologie di sensori, utilizzabili singolarmente e anche in modo congiunto, oltre alla facilità di gestione delle operazioni di decollo e di atterraggio, che avvengono in verticale, senza necessità di ampi spazi di manovra. Per la loro versatilità e adattabilità a quasi tutte le applicazioni, questi droni sono quelli più diffusi sul mercato e più adottati in ambito SNPA.

I droni ad ala fissa, paragonabili a piccoli aerei, sono caratterizzati da una minore versatilità, sia in termini di manovrabilità in volo sia di equipaggiamento di acquisizione (tipologie di sensori che possono essere montati a bordo) e necessitano di adeguati spazi per la gestione delle operazioni di decollo e di atterraggio. Tuttavia, la presenza delle ali permette di mantenersi in volo con un minore consumo di energia, rendendoli particolarmente adatti al rilievo di ampie superfici con un unico volo, riducendo i tempi di acquisizione.

Esiste infine una ulteriore tipologia di UAS, i VTOL (Vertical Take Off and Landing), che fondono le caratteristiche di durata di volo dei droni ad ala fissa con il vantaggio del decollo e atterraggio in verticale, tipico dei multi-rotori. In questa categoria le ali, su cui sono montati i motori, o i motori stessi, possono ruotare da un orientamento verticale, utile in fase di atterraggio e decollo, ad un orientamento orizzontale, utile nella fase di volo. Pur essendo soluzioni interessanti dal punto di vista operativo, la loro diffusione in Italia è al momento molto limitata.

Figura 1: tipologie di UAS: a) Multirottore, b) ala fissa e c) VTOL.



1.1.2. Sensori

Per quanto riguarda i sensori trasportabili a bordo dei droni, attualmente le tecnologie più consolidate sono quelle relative al rilevamento passivo di onde elettromagnetiche di frequenza compresa nell'intervallo visibile (sensori RGB), del visibile e dell'infrarosso vicino (sensori multispettrali e iperspettrali) e dell'infrarosso lontano (sensori termici).

I costi delle camere variano in funzione della qualità del sensore (riferibile ad elementi connessi alla elettronica del sistema, in primis la risoluzione) e dell'ottica di acquisizione. Generalmente, all'aumentare della qualità della sensoristica, aumenta il suo peso e, di conseguenza, le dimensioni del drone necessario per il suo trasporto. Questo aspetto vale a maggior ragione per le camere multispettrali e iperspettrali che necessitano di più componenti ottici ed elettronici.

Un ulteriore componente connesso alla qualità del sistema di acquisizione è il sistema di collegamento/sospensione del sensore alla piattaforma finalizzato alla riduzione delle vibrazioni trasmesse dal volo e alla stabilizzazione del punto di ripresa, oltre che all'orientamento del sensore stesso.

Le principali applicazioni dei sistemi UAS in campo ambientale prevedono l'impiego di tecniche riconducibili alla fotogrammetria aerea per l'elaborazione di dataset acquisiti da sensori fotografici (Figura 2) tramite approcci *image-based* e alla *computer vision*, con risultati rappresentati da strati informativi ad alta risoluzione 2D-planare (DSM e ortomosaici) e 3D-volumetrica (nuvole di punti), analizzabili e visualizzabili in diversi ambienti software.

I sensori ottici multispettrali e iperspettrali sono invece usati per il riconoscimento e la classificazione degli oggetti al suolo, sfruttando il diverso livello di riflettanza della radiazione solare da parte dei materiali osservati (firma spettrale). Sono impiegati soprattutto in campo agricolo o per il monitoraggio della vegetazione naturale, per mezzo di specifici indici spettrali.

Figura 2: sensori passivi disponibili per l'uso con i sistemi UAS. A sinistra: fotocamera RGB per acquisizioni di immagini a scopo di documentazione o per fotogrammetria; a destra: sensore multispettrale.



I recenti sviluppi tecnologici hanno reso disponibili a costi relativamente contenuti sensori LiDAR (*Light Detection and Ranging* o *Laser Imaging Detection and Ranging*) compatibili con i sistemi UAS. Si tratta in questo caso di una tecnica di monitoraggio attiva in cui la misura del tempo di ritorno di un impulso laser permette di calcolare la distanza dell'oggetto riflettente dalla sorgente emittente. La registrazione del tempo di riflessione di decine di migliaia di impulsi indirizzati ogni secondo verso il terreno fornisce nuvole di punti che permettono la ricostruzione 3D delle superfici rilevate, ovvero l'ottenimento di modelli digitali della superficie del terreno (DSM, *Digital Surface Model*) e di modelli digitali del terreno (DTM, *Digital Terrain Model*). Questa tecnica risulta particolarmente utile anche nello studio della vegetazione, in genere caratterizzata dalla presenza di più strati non rilevabili con la fotogrammetria classica. In questo caso la maggior parte degli impulsi laser emessi è riflessa da foglie e rami della chioma, ma una parte di questi impulsi può raggiungere il suolo ed essere riflessa da questo. Si ottiene così una stratificazione delle riflessioni: l'insieme di quelle generate dal suolo, più lontane, forniscono il DTM, quelle più vicine al sensore descrivono, invece, la struttura della vegetazione (stratificazione, forma e dimensione dei tronchi e delle chiome, ecc.).

Figura 3: sensori attivi LiDAR utilizzabili con i sistemi UAS. A sinistra il modello RIEGEL VUX-1UAV²; a destra il modello Dji Zenmuse L2.



I recenti progressi tecnologici degli UAS, in relazione soprattutto all'incremento dei livelli di efficienza e di affidabilità e alla disponibilità di differenti tipologie di sensori hanno aperto la strada a molteplici e nuove applicazioni in campo ambientale. Questi sistemi offrono infatti elevata versatilità, adattabilità e flessibilità rispetto ai sistemi di telerilevamento classici (da satellite o da aereo) ed hanno il potenziale per essere utilizzati in modo diffuso per l'acquisizione di dati ad alta risoluzione spaziale e temporale, integrando vantaggiosamente le prassi tradizionali di ispezione e/o monitoraggio in campo. Attualmente sono molte le sperimentazioni basate sull'utilizzo di sensori per il monitoraggio, ad esempio, della qualità dell'aria, del rumore, degli odori, di specifici gas, dei campi elettro-magnetici e per le misure di radioattività. Si tratta per lo più dello sviluppo prototipale e test di sistemi di campionamento e misura, non ancora utilizzabili operativamente al pari di altre tecniche e per i quali sono ancora necessarie azioni di consolidamento o la definizione di specifiche procedure standard per un impiego diffuso e scientificamente riconosciuto.

Lo sviluppo tecnologico ha interessato non solo velivoli e sensori, ma ha portato anche all'identificazione di specifiche procedure operative e di approcci multidisciplinari in fase di pianificazione e gestione delle missioni di volo, del processo di post-produzione, ovvero l'elaborazione dei dati acquisiti e l'interpretazione dei risultati, al fine di definire processi operativi standardizzati nell'ambito delle attività di monitoraggio ambientale. Si segnalano interessanti sviluppi nel campo dei software di elaborazione dati per migliorare e velocizzare la restituzione delle informazioni raccolte, prevalentemente indirizzati a sistemi cloud e supportati da tecniche di intelligenza artificiale. Ulteriori approcci innovativi si riferiscono alle potenzialità della *Full Motion Video*, tecnica che permette di analizzare i video acquisiti con UAS in ambiente GIS, per applicazioni nell'ambito delle attività di monitoraggio nei contesti marino-costieri.

La rapidissima evoluzione tecnologica in atto giustifica ancora di più l'importanza per SNPA di dedicare risorse e seguire gli sviluppi di questo settore.

Le potenzialità di un rilievo con drone sono direttamente connesse al tipo di sensore utilizzato. Da questo punto di vista la dotazione censita può essere distinta in tre gruppi differenti, definite in funzione delle caratteristiche dei sensori:

- a. UAS con solo telecamera RGB per la ripresa di immagini/video, con sensore di piccole dimensioni e risoluzione e zoom elettronico, utilizzabili come supporto per ispezioni e/o a fini documentali. In tutti i casi i sensori sono integrati nella struttura del drone e non sono intercambiabili e i velivoli afferiscono alla categoria di peso < 250 g.
- b. UAS con telecamera RGB per la ripresa di immagini/video, con sensori di maggiore risoluzione. In questo caso le ottiche sono raramente intercambiabili e possono essere presenti sensori termici o multispettrali. Frequentemente questa tipologia di sistemi UAS è dotata di un sistema in grado di utilizzare la tecnica RTK per garantire accuratezza centimetrica in fase di rilievo. Sono sistemi particolarmente idonei per le applicazioni fotogrammetriche e la produzione di informazioni planimetriche e per la quantificazione di volumi. Si tratta di UAS, multi-rotori o ad ala fissa, versatili nel loro impiego e generalmente con peso < 2 kg.
- c. UAS con payload intercambiabile. Si tratta di aeromobili di dimensioni maggiori, in grado di trasportare sensori più pesanti. Appartengono a questa categoria velivoli compatibili con sensori fotogrammetrici, multispettrali e sistemi LiDAR. Il loro impiego è dedicato principalmente per rilievi nell'ambito delle attività di monitoraggio ambientale. In questo gruppo possono essere compresi anche i droni a decollo verticale anch'essi equipaggiabili con diverse tipologie di sensori.

Tabella 1: principali tipologie di sensori e relative applicazioni compatibili con i sistemi UAS.

Sensori passivi	Sensori attivi	Tecnologia	Applicazioni
Optical camera		Optical RGB	Aerial photogrammetry, detection, 3D modeling and reconstruction
Thermal		Resistive bolometers, pyroelectric devices	Thermography, heat mapping, water temperature, level of soil water
Multispectral		Filtering, infrared and ultraviolet sensors	Wildfire detection, soil classification, vegetation mapping, water analysis
Hyperspectral		Modular spectrometer	Wildfire detection, soil classification, materials analysis, water analysis environmental mapping
	LiDAR	Pulsed laser	3D mapping, wildfire verification, erosion analysis, forestry analysis

Fonte: Fascista A. (2022). Toward integrated large-scale environmental monitoring using WSN/UAV/Crowdsensing: A review of applications, signal processing, and future perspectives, modificata).

1.1.3. Sistemi di posizionamento

Diversi prodotti ottenibili tramite impiego di UAS, in particolare quelli legati alla fotogrammetria per la ricostruzione di oggetti e per il monitoraggio multi-temporale di fenomeni di interesse, richiedono accuratezza centimetrica del loro posizionamento. Tale requisito non può essere garantito dal solo GNSS di bordo, utilizzato per il posizionamento del velivolo e la navigazione. È possibile quindi utilizzare tre diversi metodi di posizionamento di precisione che permettono di migliorare l'accuratezza della georeferenziazione degli output dei rilievi:

- il posizionamento al suolo, nell'area oggetto di indagine, di segnali riconoscibili nelle immagini acquisite dal sensore (punti di controllo a terra - GCP) e le cui coordinate sono determinate per mezzo di tecniche topografiche (frequentemente ricevitori GNSS di precisione), in modo indipendente rispetto al sistema di posizionamento presente sul drone. Assegnando ai GCP presenti nelle immagini le corrette coordinate rilevate a terra è possibile scalare e georeferenziare il modello ricostruito tramite fotogrammetria e i prodotti da esso derivato;
- il sistema RTK che consente di correggere, in tempo reale, le imprecisioni del sistema GNSS dell'aeromobile utilizzando un flusso di dati proveniente da una base fissa in prossimità dell'area della missione oppure un flusso di dati di correzione fornito da appositi servizi, pubblici o privati, distribuito via web (nRTK);
- la tecnica PPK, applicabile al termine delle attività di rilievo. Prevede la combinazione dei dati GNSS relativi alla traiettoria di volo e le informazioni di posizione del sensore al momento dell'acquisizione con i dati acquisiti nello stesso intervallo temporale da stazioni di riferimento nelle vicinanze dell'area delle operazioni o stazioni virtuali appositamente ricostruite.

1.2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Per ciò che riguarda la regolamentazione del settore droni i riferimenti sono europei e nazionali. Gli attuali regolamenti europei in vigore sono il "Regolamento (EU) 2019/947" e il "Regolamento (EU) 2019/945" e successivi approfondimenti, relativi a norme, procedure e disposizioni tecniche per l'esercizio degli aeromobili senza equipaggio nel territorio dell'Unione Europea. Tali norme stabiliscono le disposizioni di dettaglio per l'utilizzo dei sistemi UAS, nonché le competenze di Operatori e Piloti necessarie per l'esecuzione delle operazioni.

Gli elementi principali che caratterizzano un'operazione sono: l'operatore, l'ambiente operativo, il pilota e il sistema UAS utilizzato. I Regolamenti precedentemente citati si basano, per la definizione della tipologia di operazione, sul livello di rischio dell'operazione stessa. In particolare, il Reg. 2019/947 distingue le operazioni UAS nelle categorie "Open", "Specific" e "Certified", in relazione al crescente livello di rischio.

Tutti gli scenari di impiego dei droni nel SNPA rientrano nelle categorie "Open" e "Specific". La categoria "Certified", invece, comprende le operazioni che comportano rischi elevati ed è disciplinata da requisiti simili a quelli dell'aviazione civile tradizionale quali certificazioni aeronautiche per i velivoli, licenza di volo per i piloti e il riconoscimento di operatore aereo per le organizzazioni. Si applica nel caso di trasporto di persone, di sostanze pericolose e sorvolo di assembramenti, operazioni che non riguardano gli ambiti di impiego nel SNPA; pertanto, tale categoria non viene approfondita in questo rapporto.

La Figura 4 riporta le caratteristiche delle operazioni "Open", che si dividono in tre sottocategorie: Open A1, Open A2 e Open A3.

Nella

Figura 5 sono riportate le procedure previste per l'ottenimento di autorizzazione per le operazioni "Specific".

Il recepimento in Italia dei Regolamenti europei ha previsto la pubblicazione del Regolamento ENAC "UAS-IT", del 04/01/2021, ulteriormente aggiornato e integrato da Circolari e Linee Guida, disponibile, unitamente a tutte informazioni e materiale di interesse sul sito web di ENAC all'indirizzo: <https://www.enac.gov.it/sicurezza-aerea/#droni>.

In generale, per operare con i sistemi UAS è necessario:

- procedere alla registrazione dell'Operatore sul portale predisposto da D-flight SpA (<https://www.d-flight.it/web-app/>), società del gruppo ENAV che si occupa dell'erogazione di servizi per la gestione del traffico aereo a bassa quota di aeromobili a pilotaggio remoto;
- apporre chiaramente il proprio numero di identificazione operatore UAS (QR code) sul drone;
- acquisire le abilitazioni e gli attestati necessari per operare con sistemi UAS;
- disporre di una copertura assicurativa per la responsabilità civile, adeguata alla tipologia di operazioni.

Figura 4: riepilogo delle caratteristiche delle operazioni "Open".

Operation			Drone Operator / pilot			
C-Class	Max Take off mass	Subcategory	Operational restrictions	Drone Operator registration?	Remote pilot qualifications	Remote pilot minimum age
Privately build	<250g 	A1 Not over assemblies of people (can also fly in subcategory A3)	Operational restrictions on the drone's use apply (follow the QR code below)	Yes No if toy or not fitted with camera/sensor 	Read user's manual	No minimum age (certain conditions apply)
legacy < 250g						
C0						
C1	<900g 					
C2	<4kg 	A2 Fly close to people (can also fly in subcategory A3)		Yes	Check out the QR code below for the necessary qualifications to fly these drones	16
C3	<25kg 					
C4						
Privately build Legacy drones (art 20)		A3 Fly far from people				


#EASAdrones

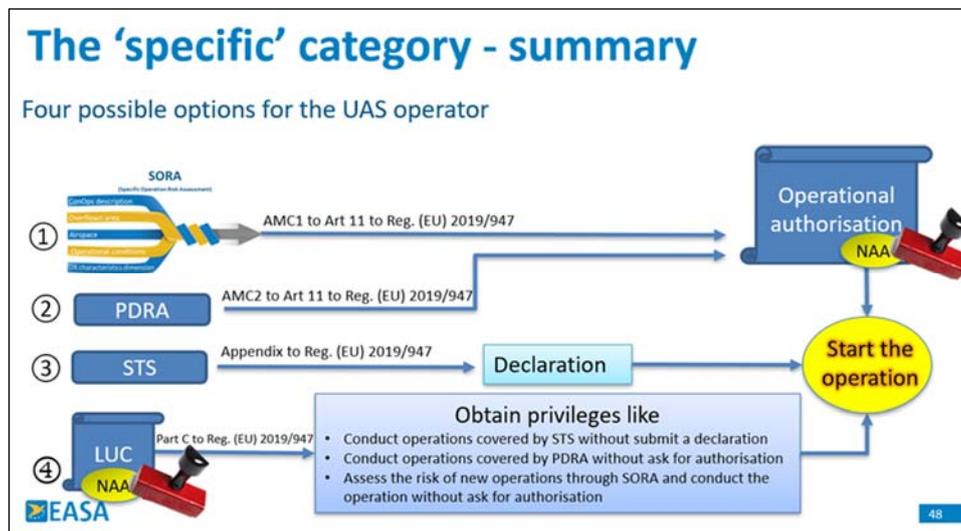


For more details go to: <https://www.easa.europa.eu/drones/civil-drones-epas>



Fonte: <https://www.easa.europa.eu>.

Figura 5: riepilogo delle procedure per l'ottenimento delle autorizzazioni alle operazioni "Specific".



Fonte: <https://www.easa.europa.eu>.

Per quanto riguarda l'utilizzo di UAS con massa operativa al decollo inferiore a 25 kg il pilota deve essere in possesso di un "Attestato di competenza di Pilota remoto".

Per poter operare nella categoria "Open" (sottocategoria A1, A2 e A3), che non prevede dichiarazioni o autorizzazioni preventive alle operazioni, tale attestazione è rilasciata a seguito del superamento di un esame online svolto sul portale web ENAC dedicato, o ottenuto presso una scuola europea e poi riconosciuto da ENAC.

Operazioni di volo più complesse rientrano invece nella categoria "Specific" e non richiedono un'autorizzazione preventiva, se svolte nel rispetto delle limitazioni definite per gli Scenari Standard Europei (STS) o nazionali (IT-STS). Nel caso in cui invece le operazioni di rilievo non rientrino negli scenari standard predefiniti, si rende necessario ottenere, per la singola attività, un'autorizzazione operativa preventiva rilasciata dall'ENAC a seguito di specifica domanda comprensiva di analisi dei rischi (SORA o PDRA) e altra documentazione obbligatoria.

Il parametro che differenzia le attività dal punto di vista operativo ed autorizzativo è il livello di rischio, definito dal SAIL (*Specific Assurance and Integrity Level*). Tale parametro rappresenta il livello di confidenza con il quale le operazioni UAS rimangono sotto il pieno controllo del pilota ed è espresso da un numero romano tra I e VI. Per ogni singola operazione il SAIL è determinato dalla combinazione tra il rischio residuo di colpire terze parti al suolo e il rischio residuo di collisione con terze parti in volo: maggiore è il SAIL e più sono stringenti i requisiti per poter svolgere le operazioni in sicurezza, secondo il principio di rischio accettabile.

Per le operazioni con SAIL compreso fra I e IV e non rientranti nella categoria "Open" sono stati definiti appositi scenari standard. Uno scenario standard (STS)¹ consiste in un insieme di specifiche condizioni e limitazioni che devono essere rispettate dall'operatore nella conduzione delle operazioni e il cui rispetto e la corretta implementazione sono dichiarate dall'operatore stesso all'ENAC, senza la necessità di effettuare una specifica analisi di rischio. Le condizioni e le limitazioni riportate nello scenario standard comprendono: il tipo di operazioni (ad esempio in VLOS), le caratteristiche del volume operativo e del buffer a terra e in volo in cui esse possono essere svolte, il tipo di UAS che può essere utilizzato e le relative caratteristiche tecniche e operative nonché le competenze del pilota. L'analisi di rischio relativa agli scenari standard nazionali è stata preventivamente effettuata dall'ENAC sulla base della metodologia SORA e pertanto non è richiesto che sia effettuata dall'operatore. Per l'utilizzo degli scenari nazionali l'operatore deve rendere "dichiarazione di assunzione di responsabilità" a operare in uno o più Scenari Standard, attraverso il portale d-flight. Inoltre, il pilota deve essere in possesso di idonea attestazione rilasciata da scuole riconosciute da ENAC a seguito di specifica formazione teorica e pratica che, oltre a consolidare la conoscenza tecnica relativa al volo dei droni, fornisce al pilota competenze sulle comunicazioni aeronautiche, sulla gestione della squadra e sull'analisi dei rischi a terra e in volo

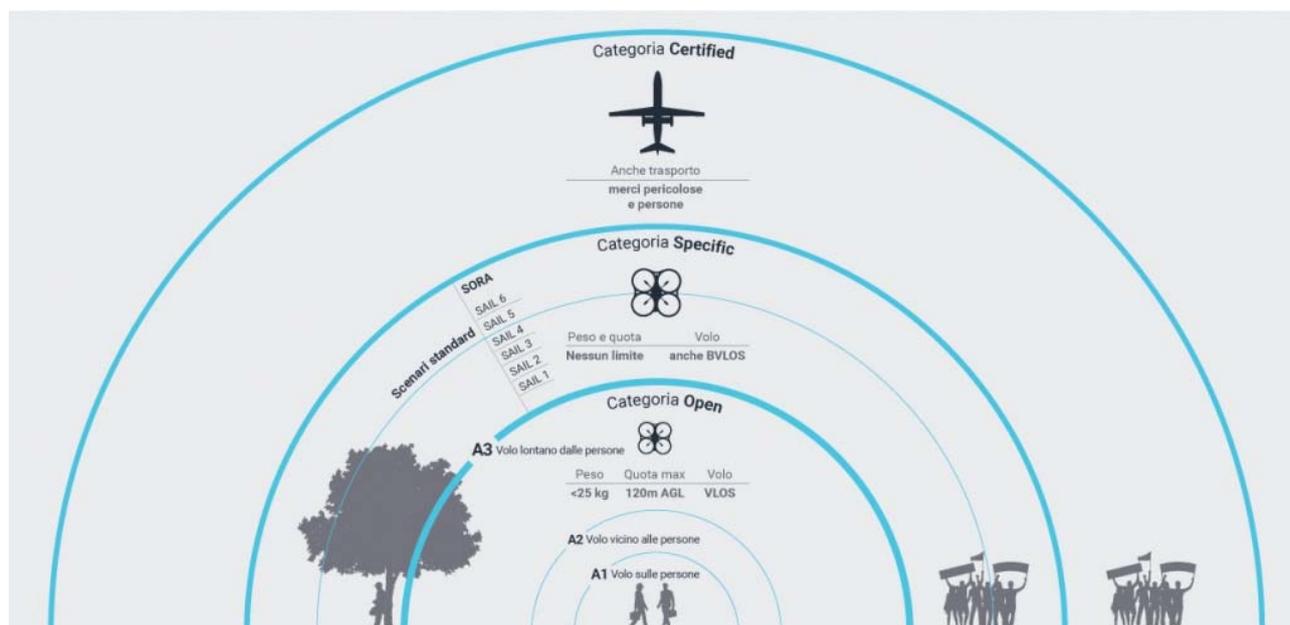
¹ Tratto dal sito ENAC (www.enac.gov.it/sicurezza-aerea/droni/categoria-specifica-specific-category/scenari-standard-nazionali/)

introdotti dalla realizzazione delle operazioni. In ogni caso l'operatore deve produrre un Manuale delle operazioni finalizzato a dare evidenza della strutturazione della organizzazione in termini di ruoli, responsabilità, competenze, procedure e documentazione relativi all'uso degli UAS.

Per le operazioni con un alto livello di rischio, cioè con un livello di SAIL maggiore o uguale a V, gli scenari standard non sono applicabili e, come detto, si rende necessario l'ottenimento di una autorizzazione operativa. Inoltre, come indicato nell'art. 16 del Reg. ENAC relativo alla "Organizzazione dell'operatore nel caso di operazioni con SAIL maggiore o uguale a V", l'operatore, ai fini del rilascio dell'autorizzazione, deve dimostrare di:

- a) disporre di una organizzazione tecnica ed operativa adeguata all'attività che intende effettuare e alla consistenza e tipologia della flotta. I piloti impiegati dall'operatore devono avere qualificazioni richieste per condurre l'attività prevista;
- b) avere nominato un Responsabile Tecnico per la gestione delle operazioni, dell'aeronavigabilità e dell'addestramento;
- c) disporre di UAS in possesso di Permesso di Volo ed equipaggiati, nella configurazione prevista per lo svolgimento delle operazioni richieste;
- d) disporre di piloti con qualificazioni adeguate al tipo di UAS da impiegare;
- e) avere predisposto il "Manuale delle Operazioni", contenente le istruzioni o procedure necessarie per la gestione delle operazioni in condizioni normali e di emergenza, Regolamento UAS - IT Ed. 1 pag. 12 di 20 dell'aeronavigabilità e dell'addestramento e renderlo disponibile a tutto il personale coinvolto nelle attività;
- f) essere in grado di condurre le operazioni in accordo alle limitazioni e condizioni previsti per la richiesta dell'autorizzazione.

Figura 6: riepilogo delle tipologie di operazioni e delle relative prescrizioni ed attestazioni necessarie.



Fonte: <https://www.easa.europa.eu>.

2. I RISULTATI DELLA MAPPATURA

2.1. LA RICOGNIZIONE

Il primo obiettivo del GdL 03 del TIC III è la redazione di un "Rapporto inerente alla ricognizione sull'utilizzo dei sistemi UAS nelle Agenzie Regionali/Provinciali ed ISPRA per il monitoraggio ambientale. Mappatura dello stato dell'arte delle competenze e delle attività in essere e in programma".

A tal fine è stata predisposta un'indagine, sottoposta all'attenzione delle Agenzie Ambientali e di ISPRA, con la finalità di descrivere la situazione di utilizzo dei droni da parte del SNPA.

L'indagine è stata organizzata in due parti: la prima parte è costituita da un questionario strutturato, pensato per ottenere l'inventario dettagliato della dotazione tecnica e delle modalità di gestione dei droni all'interno di ogni Agenzia; la seconda parte è destinata a raccogliere in modo aperto le esperienze e i prodotti derivanti dall'utilizzo dei sistemi UAS in ambito SNPA.

Il questionario è stato suddiviso in sette sezioni (da "A" a "G"), ognuna delle quali dedicata a uno specifico aspetto dell'utilizzo dei droni, come riportato nell'introduzione al presente documento e dettagliato nei successivi paragrafi.

Per la parte di raccolta delle esperienze, insieme al questionario è stato inviato un modello di scheda sintetica con cui riassumere le attività svolte ed i relativi prodotti ottenuti utilizzando i sistemi UAS. Si è scelto di lasciare massima libertà nella presentazione dei contenuti, in modo da cercare di fare emergere le eventuali sfumature d'impiego nel caso di applicazione analoghe svolte da più agenzie.

I risultati della prima parte sono stati elaborati e sono presentati nei paragrafi successivi. L'insieme delle schede raccolte è stato armonizzato, in modo da arrivare a sintetizzare, seppur mantenendo le diverse sfumature, esperienze simili di uso dei droni. Le schede tipo contenenti le applicazioni tematiche SNPA sono raccolte in appendice. Il presente rapporto, quindi, oltre ad essere una rassegna di quello che è lo stato attuale dell'utilizzo dei droni in SNPA, fornisce anche un repertorio di pratiche e soluzioni già applicate, a cui Agenzie meno avanzate sul tema potranno attingere in termini di approccio operativo, esperienza o richiesta di supporto.

Il rapporto, infine, potrà essere lo strumento per indirizzare le iniziative di approfondimento, confronto di esperienze e formazione, sulla base dell'evoluzione delle attività, tecnologie e contesto di riferimento in vista della definizione di standard operativi del sistema.

Tabella 2: struttura del questionario per la mappatura dell'uso di droni nel SNPA.

Sezione A - Informazioni generali	
A.1	Agenzia
A.2	Nome compilatore scheda
A.3	Referente UAS per l'Agenzia
A.4	Contatto mail
A.5	Recapito telefonico
A.6	Indirizzo e sede
Sezione B - Dotazione strumentale	
B.1	UAS multirottore posseduti (indicare ditta, modello e relativa numerosità)
	UAS ad ala fissa/VTOL posseduti (indicare ditta, modello e relativa numerosità)
B.2	Payload: n. Camere RGB e modello
	Payload: n. Camere multispettrali e modello
	Payload: n. Camere termiche e modello
	Payload: n. Camere LIDAR e modello
	Payload: n. Altro:
B.3	Tipologia Sistemi GNSS
B.4	Tipologia e numero di prodotti
B.5	Software di pianificazione dei rilievi e/o software di gestione di volo
B.6	Software di analisi ed elaborazione dati
B.7	Strati informativi e mappe prodotte dal Post processing

Sezione C - Risorse umane dedicate	
C.1	Registrazione dell'Ente come Operatore UAS sul Portale d-flight
C.2	N. totale di piloti
C.3	N. piloti con attestato di Pilota UAS sottocategoria OPEN A1-A3
C.4	N. piloti con attestato di Pilota UAS sottocategoria OPEN A2
C.5	N. di piloti con Certificazione di Competenza per Operazioni con SAIL (Specific Assurance and Integrity Level) inferiore a V (art. 20 Reg. UAS-IT)
C.6	N. di Piloti con Certificazione di Competenza per Operazioni con SAIL (Specific Assurance and Integrity Level) uguale o superiore a V (art. 21 Reg. UAS-IT)
C.7	Altre specifiche competenze accessorie/aggiuntive
C.8	Altre figure utilizzate
Sezione D - Scenari operativi	
D.1	Sono state svolte operazioni in categoria Open (S/N):
D.2	Sono state svolte operazioni in categoria Specific (S/N):
D.3	Sono state svolte operazioni sottoposte a dichiarazione (S/N):
D.4	Adozione e competenza dell'analisi del rischio basata sul SORA (Specific Operation Risk Assessment)
D.5	Tematismi e matrici indagate
D.6	N. di campagne/anno per tematismo
D.7	Rapporti con altri Enti e strutture PP.AA. (per es. Regione, Procura...) ed elaborazioni specifiche richieste
D.8	Altre esperienze interessanti promosse dalle Agenzie ma portate avanti da Enti esterni (servizi acquistati o collaborazioni con altri Enti o Università ma non gestite direttamente dalle Agenzie)
Sezione E - Gestione operativa	
E.1	Documentazione di riferimento e struttura organizzativa (Accountable Manager, Responsabile delle operazioni, Responsabile dell'addestramento, Responsabile tecnico)
E.2	Protocolli di rilievo e manuale delle operazioni di volo
E.3	Procedure esistenti (gestione missione, piani volo, Check List pre e post operazioni, comunicazioni, richieste NOTAM, ecc.)
E.4	Procedure specifiche per rischio (condivisione con RSPP)
E.5	Privacy: come si gestisce il tema se non vi è incarico da parte della procura?
E.6	Regolamento ENAC (in caso di emergenza)
E.7	Frequenza di aggiornamento normativo e addestramenti specifici
E.8	Tipologia di operazioni effettuate: Open, Specific, IT-STS "Urban" e "Non Urban"
E.9	Ipotesi e necessità di sviluppo
Sezione F – Osservazioni	
Sezione G - Punti di forza e criticità del Nucleo UAS agenziale	

Al questionario hanno risposto 18 Agenzie Ambientali Regionali/Provinciali su 21 e l'ISPRA. Delle Agenzie che hanno risposto risultano non possedere ed utilizzare propri UAS l'ARPA Campania, l'ARPA Toscana e l'APPA Bolzano, sebbene abbiano esperienza del loro utilizzo, basato però su collaborazioni con società di servizi esterne (Figura 7).

2.2. DOTAZIONE STRUMENTALE

L'applicazione della tecnologia dei droni nel campo del monitoraggio e controllo ambientale è una tematica abbastanza recente e in continua evoluzione, che necessita di velivoli con caratteristiche e sensori diversi in funzione del settore di applicazione e dei prodotti che si vogliono ottenere. Inoltre, la veloce evoluzione, tipica dei settori tecnologici emergenti, comporta rapide obsolescenze e la necessità di sostituire i prodotti tecnicamente superati o non più mantenuti.

La combinazione di questi fattori rende il quadro della dotazione strumentale delle Agenzie articolato e in continua evoluzione.

2.2.1. Velivoli

Al 2024 la dotazione complessiva di UAS del sistema SNPA è di n. 87 droni, molto diversificati per tipologia, sensoristica e capacità di trasporto al decollo. Complessivamente sono presenti n. 84 droni multi-rotore, n. 3 droni ad ala fissa, in possesso solo di Arpa Lombardia e Valle d'Aosta.

All'interno del SNPA circa il 97% del parco velivoli (n. 84 su 87) sono forniti dalla stessa ditta, la cinese DJI, leader mondiale nella produzione di droni per usi civili. Sono invece del tutto residuali o assenti le attrezzature prodotte da altre case (senseFly, ora AgEagle, società specializzata negli UAS ad ala fissa, Parrot e Autel Robotics). La maggior parte dei droni afferisce alla categoria di massa massima al decollo (MTOM) compresa fra 250 gr e 5 Kg (n. 56 unità), n. 9 unità appartengono alla classe < 250 gr e n. 22 unità alla categoria superiore. Tale distribuzione numerica ha dirette ripercussioni sulle tipologie di attività svolte dalle Agenzie nei diversi scenari operativi rispetto ai quali la massa del velivolo costituisce una limitazione significativa. Ad esempio, il sorvolo di persone non coinvolte dalle operazioni e/o in zone urbane è consentito con UAS di peso < 250 gr, mentre in altri casi si rende necessaria l'adozione di specifiche misure di mitigazione del rischio in caso di inconveniente tecnico, proprio in relazione al danno che può causare un'apparecchiatura più pesante precipitando al suolo, come indicato dalla normativa di riferimento (paragrafo 1.3).

Circa un quarto dei droni è costituito da modelli più recenti, quali ad esempio i Dji Mavic della serie 3 e i Dji M300/350 o M30 Serie; sono però ancora ampiamente utilizzati quelli della generazione precedente, fra i quali i Dji Phantom 4 nelle versioni Pro, Multispectral e RTK. La numerosità dei velivoli nelle strutture del SNPA dipende da fattori diversi ed è frequentemente associata all'esistenza di specifiche iniziative progettuali piuttosto che a esigenze peculiari ed è evidente di come tale tecnologia non sia ancora considerata ed utilizzata come strumento consolidato di monitoraggio. Si evidenzia, infine, come circa il 50% dei velivoli (n. 43 su 86) sia equipaggiato con sistema RTK in grado di ricevere correzioni RTK/nRTK utilizzate per migliorare l'accuratezza di posizionamento e di georeferenziazione plano-altimetrica dei prodotti di elaborazione ottenuti (paragrafo 1.2).

Per una prima classificazione della distribuzione della dotazione di droni nel SNPA sono state considerate le tre tipologie di massa massima totale al decollo (MTOM), indicando rispettivamente 1 per MTOM < 0,25 kg, 2 per 0,25 kg < MTOM < 5 kg e 3 per MTOM > 5 kg (Tabella 3 e Figura 8).

Il quadro completo della dotazione tecnica delle Agenzie è riportato nella Tabella 4. La classificazione si ferma al livello di "famiglia", marca e modello, in quanto, data la varietà di modelli presenti all'interno di SNPA, le possibilità di allestimento dei singoli velivoli sono molto varie e possono mutare nel tempo.

Tabella 3: distribuzione nel SNPA dei velivoli con le tre tipologie di massa massima totale al decollo (MTOM).

Componente del SNPA	MTOM < 0,25 kg (1)	0,25 kg<MTOM<5 kg (2)	MTOM > 5 kg (3)	TOTALE
Abruzzo	-	2	4	6
Alto Adige	-	-	-	-
Basilicata	-	-	1	1
Calabria	-	1	3	4
Campania	-	-	-	-
Emilia-Romagna	-	4	1	5
Friuli Venezia Giulia	-	2	-	2
Lazio	-	1	1	2
Liguria	-	2	-	2
Lombardia	2	14	2	18
Marche	1	1	-	2
Piemonte	1	-	-	1
Puglia	-	2	1	3
Sardegna	3	-	3	6
Sicilia	-	1	1	2
Toscana	-	-	-	-
Valle d'Aosta	-	5	1	6
Veneto	1	2	1	4
ISPRA	2	19	2	23
TOTALE	8	56	22	86

Figura 8: distribuzione nel SNPA dei velivoli con le tre tipologie di massa massima totale al decollo (MTOM).

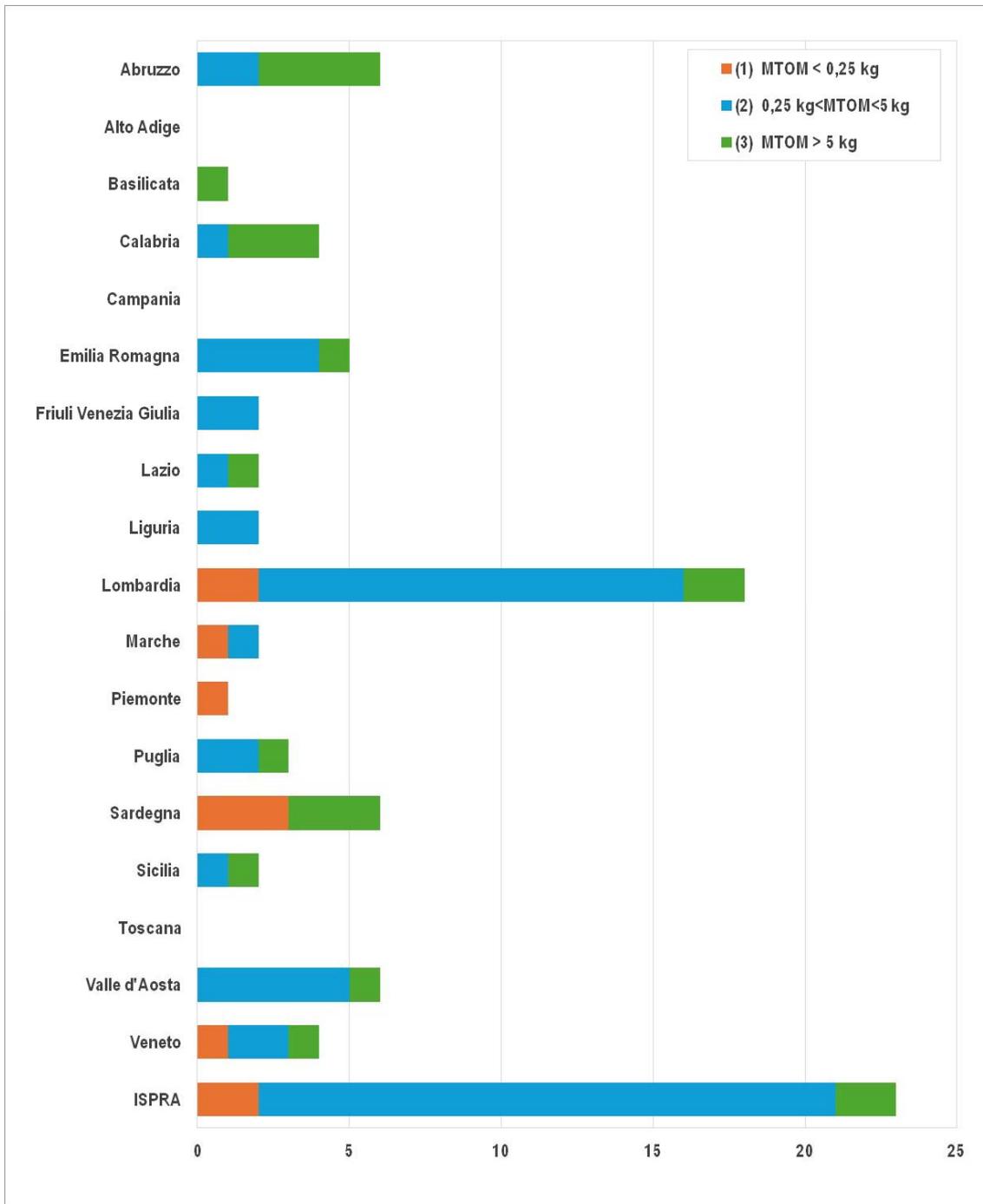
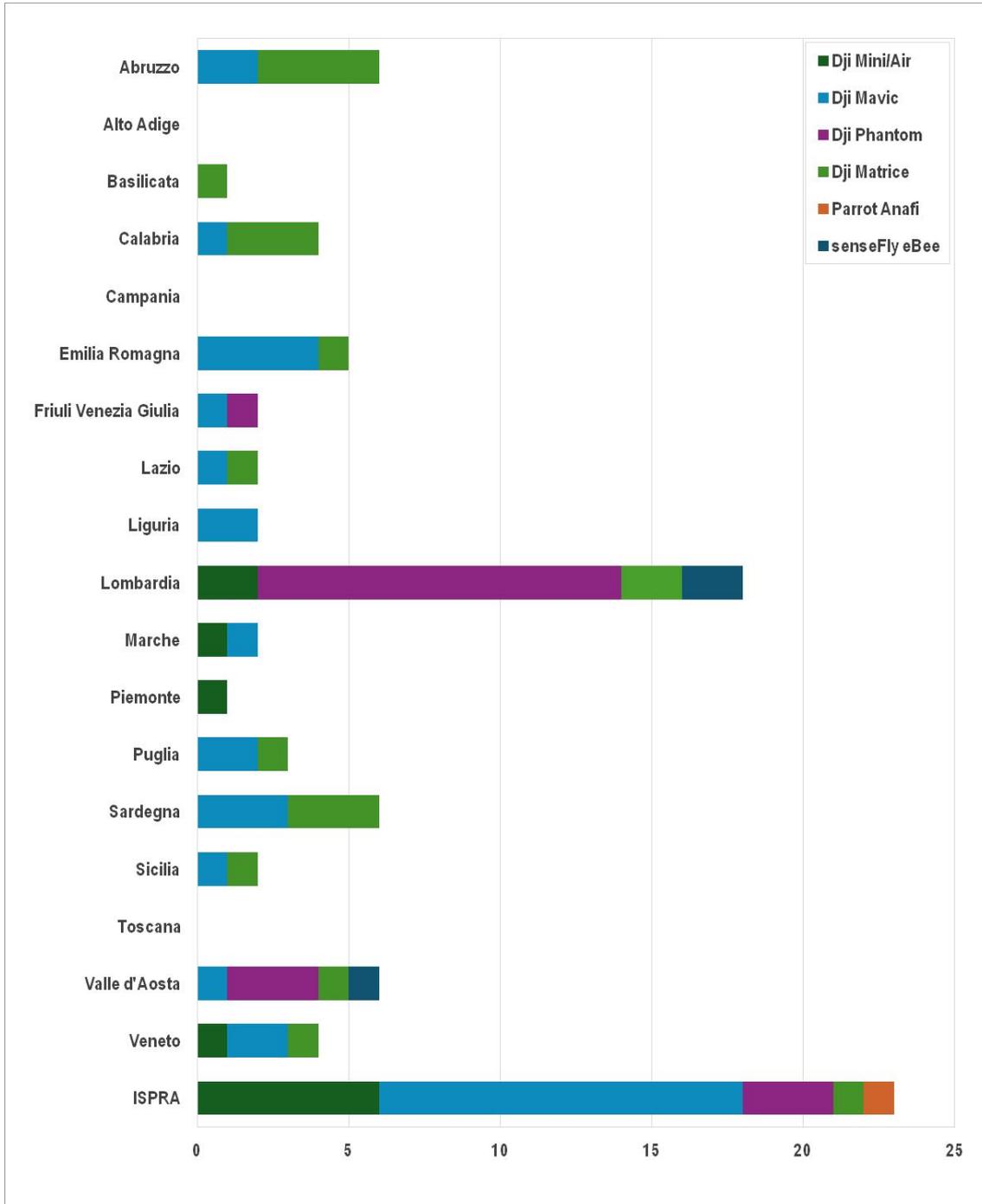


Tabella 4: tipologie di sistemi UAS disponibili presso le diverse Agenzie e l'ISPRA.

Componente del SNPA	MTOM 1: MTOM < 0,25 kg 2: 0,25 kg<MTOM<5 kg 3: MTOM > 5 kg	Tipo M: Multirotore A: Ala Fissa	Marca e modello	Numerosità	RTK
Abruzzo	3	M	Dji Matrice 30T	2	2
	3	M	Dji Matrice 300 RTK	2	2
	2	M	Dji Mavic 2 Enterprise dual	1	
	2	M	Dji Mavic 2 Enterprise zoom	1	
Alto Adige	-	-	-	-	-
Basilicata	3	M	Dji Matrice 300 RTK	1	1
Calabria	3	M	Dji Matrice 600	2	
	3	M	Dji Matrice 300 RTK	1	1
	2	M	Dji Mavic 2 Enterprise Advanced	1	1
Campania	-	-	-	-	-
Emilia Romagna	3	M	Dji Matrice 350 RTK	1	1
	2	M	Dji Mavic 2 Enterprise Advanced	4	4
Friuli Venezia Giulia	2	M	Dji Mavic 2 Enterprise Advanced	1	
	2	M	Dji Phantom 4 Multispectral	1	1
Lazio	3	M	Dji Matrice 300 RTK	1	1
	2	M	Dji Mavic 3 Enterprise	1	1
Liguria	2	M	Dji Mavic 2 Pro	1	
	2	M	Dji Mavic 3 Enterprise Multispectral	1	1
Lombardia	2	A	senseFly eBee RTK	1	1
	2	A	SenseFly eBee X	1	1
	3	M	Dji Matrice 210 RTK V2	1	1
	3	M	Dji Matrice 350 RTK	1	1
	1	M	Dji Mini 2	2	
	2	M	Dji Phantom 4 Pro	1	
	2	M	Dji Phantom 4 RTK	11	11
Marche	1	M	Dji Mini 3 Pro	1	
	2	M	Dji Mavic 3 Enterprise Thermal	1	1
Piemonte	1	M	Dji Mini 3	1	-
Puglia	3	M	Dji Matrice 300 RTK	1	1
	2	M	Dji Mavic 2 Pro	2	
Sardegna	3	M	Dji Matrice 210 RTK V2	3	3
	1	M	Dji Mini 2	3	

Componente del SNPA	MTOM 1: MTOM < 0,25 kg 2: 0,25 kg<MTOM<5 kg 3: MTOM > 5 kg	Tipo M: Multirotores A: Ala Fissa	Marca e modello	Numerosità	RTK
Sicilia	3	M	Dji Matrice 210 RTK V2	1	1
	2	M	Dji Mavic 2 Pro	1	
Toscana	-	-	-	-	-
Valle d'Aosta	2	A	senseFly eBee X	1	1
	3	M	Dji Matrice 300 RTK	1	1
	2	M	Dji Mavic 3 Enterprise	1	1
	2	M	Dji Phantom 4 Pro	1	
	2	M	Dji Phantom 4 RTK	1	1
	2	M	Dji Phantom 4 Pro V2	1	
Veneto	3	M	Dji Matrice 350 RTK	1	1
	1	M	Dji Mini 3 Pro	1	
	2	M	Dji Mavic 2 Pro	1	
	2	M	Dji Mavic 3 Enterprise Thermal	1	1
ISPRA	2	M	Parrot Anafi Work	1	
	2	M	Dji Mavic Air 2	3	
	2	M	Dji Mavic 2 Pro	6	
	2	M	Dji Phantom 4	2	
	2	M	Dji Phantom 4 Pro	1	
	2	M	Dji Mavic 3 Pro	1	
	2	M	Dji Mavic 2 Enterprise dual	1	
	2	M	Dji Mavic 3 Enterprise Multispectral	1	
	3	M	Dji Matrice 300 RTK	1	1
	1	M	Dji Mini 2	2	
	2	M	Dji Mavic 3 Classic	2	
	2	M	Dji Mavic 3 Cine Premium	1	
	1	M	Dji Mavic 3 Mini	1	

Figura 9: tipologie di sistemi UAS disponibili presso le diverse Agenzie e l'ISPRA.



2.2.2. Sensori

Il quadro complessivo della sensoristica disponibile presso le diverse Agenzie e Strutture di ISPRA è riportato in Tabella 5 e in percentuale rispetto al totale dei sensori utilizzati in Figura 10.

In Tabella 6 e Tabella 7 si fornisce la consistenza di velivoli e sensori differenziati secondo le categorie precedentemente descritte. Si rammenta che nella tipologia "a e b" ricadono gli UAS di dimensioni più contenute e generalmente equipaggiati con sensori integrati, fatto salvo i modelli con MTOM < 1 kg e camere RGB a 48 MP, mentre nella tipologia "c" rientrano i velivoli di maggiori dimensioni e peso (> 4 kg) con payloads intercambiabili, gli UAS ad ala fissa e il Dji M30T, anch'esso della famiglia Dji Matrice seppure con sensore non intercambiabile.

L'analisi evidenzia una generale predominanza di fotocamere RGB a media risoluzione (fino a 20 Mp), seguita da analoghi sensori con maggiore risoluzione (fino a 48 Mp), ad indicare la prevalenza delle applicazioni di fotogrammetria per le attività di ispezione e acquisizione immagini e video. A seguire, piuttosto allineati in termini numerici, le termocamere (a media e alta risoluzione), i sensori multispettrali fino a 6 bande e quelli basati su tecnologia LiDAR. Occorre inoltre considerare che, a seconda delle soluzioni tecniche adottate in termini di aeromobile, i sensori possono essere intercambiabili (dunque di maggiore qualità) oppure integrati e combinati. In quest'ultimo caso, la necessità di riduzione degli spazi e dei pesi si traduce in sensori di dimensioni più contenute, generalmente inferiori dal punto di vista qualitativo, rispetto a quelli intercambiabili. Una sola Agenzia impiega sensori per la rilevazione dei gas dispersi in atmosfera (metano). Infine, si sottolinea come il mercato rende disponibile sia sensori combinati, sia sensori dedicati a specifiche applicazioni. Nel primo caso è possibile beneficiare di rilievi multisensore (es. termico, RGB e zoom), mentre nel secondo ogni sensore è utilizzato per singole applicazioni. Costituiscono un caso particolare i sensori LiDAR che, normalmente, sono sempre accoppiati ad una camera RGB al fine di acquisire contemporaneamente la nuvola di punti e l'informazione radiometrica associata, utilizzata nella fase di *coloring* della *point cloud*. Discorso simile vale per le camere multispettrali, differenziate in base al numero di bande di acquisizione, che montano sempre sensori nelle bande del rosso, verde e blu, da cui derivare immagini nel visibile utilizzate per applicazioni di fotogrammetria tradizionale, oppure presentano una camera aggiuntiva indipendente nello spettro del visibile, che svolge la stessa funzione.

Tabella 5: sensoristica disponibile presso le diverse Agenzie e l'ISPRA.

Componente del SNPA	Zoom	Camera RGB (MR)	Camera RGB (HR)	Camera termica (MR)	Camera termica (HR)	LiDAR	Multispettrale (4-6 bande)	Multispettrale (>8 bande)	Sensore metano
Abruzzo	3	2	3	1	2	1	-	-	-
Alto Adige									
Basilicata	1	1	1	1			1		
Calabria		1	1	2	2	1		2	
Campania									
Emilia-Romagna		4	1	4		1	1		
Friuli Venezia Giulia		1	1		1		1		
Lazio	1	1	2		1	1	1		1
Liguria		2					1		
Lombardia		19		2	1	1	2		
Marche		1	1	1					
Molise									
Piemonte		1							
Puglia		2	1	1			1		
Sardegna		4			1		1		
Sicilia		2			2				
Toscana									
Trentino									
Umbria									
Valle d'Aosta		5	2		1	2	1		
Veneto		2	1			1			
ISPRA	4	15	2	1	1	1			
Totale	9	64	16	13	12	9	10	2	1

Figura 10: sensoristica disponibile in percentuale nel SNPA.

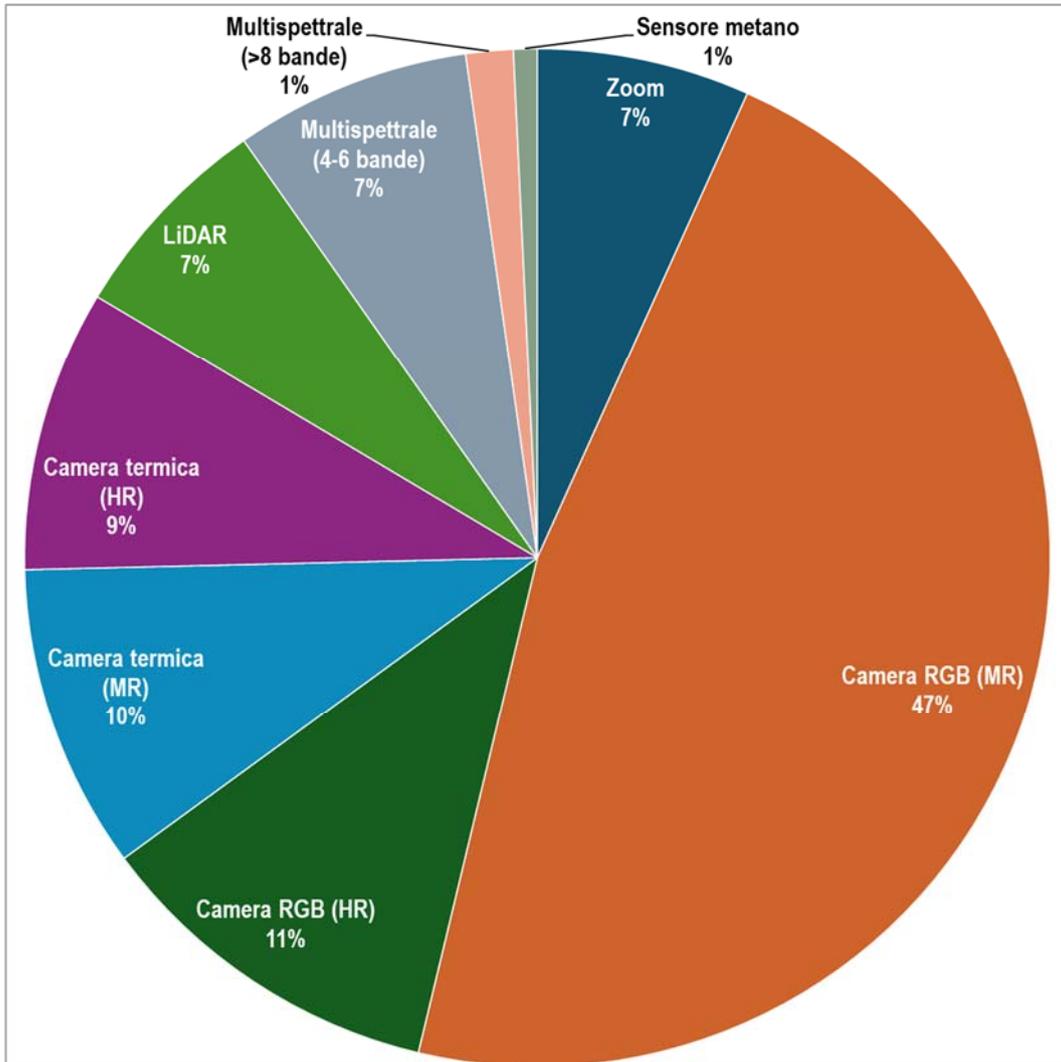


Tabella 6. distribuzione droni di tipo a. e b. Tutti i modelli indicati sono quadricotteri multirotores.

Componente del SNPA	Marca e modello	N.	Sensore integrato A	Sensore integrato B
Abruzzo	Dji Mavic 2 Enterprise Dual	1	RGB 12MP	Termocamera
	Dji Mavic 2 Enterprise Zoom	1	RGB 12MP -Zoom	
Calabria	Dji Mavic 2 Enterprise Advanced RTK	1	RGB 12MP -Zoom	
Campania	-	-	-	-
Emilia-Romagna	Dji Mavic 2 Enterprise Advanced RTK	4	RGB 12MP	Termocamera
Friuli Venezia Giulia	Dji Phantom 4 Multispectral	1	RGB 2.08MP	n. 5 Monocromatic 2.08MP
Lazio	Dji Mavic 3 Enterprise	1	RGB 20MP	
Liguria	Dji Mavic 2 Pro	1	RGB 20MP	
	Dji Mavic 3 Enterprise Multispectral	1	RGB 20MP	n.1 fotocamera multispettrale 5 MP
Lombardia	Dji Mini 2	2	RGB 12MP	
	Dji Phantom 4 Pro	1	RGB 20MP	
	Dji Phantom 4 Pro RTK	11	RGB 20MP	
Marche	Dji Mini 3 Pro	1	RGB 48MP	
	Dji Mavic 3 Enterprise Thermal	1	RGB 20MP	Termocamera
Piemonte	Dji Mini 3	1	RGB 12MP	-
Puglia	Dji Mavic 2 Pro	2	RGB 20MP	
Sardegna	Dji Mini 2	3	RGB 12MP	
Sicilia	Dji Mavic 2 Pro	1	RGB 20MP	
Toscana	-	-	-	-
Valle d'Aosta	Dji Mavic 3 Enterprise	1	RGB 20MP	
	Dji Phantom 4 Pro	2	RGB 20MP	
	Dji Phantom 4 Pro RTK	1	RGB 20MP	
Veneto	Dji Mini 3 Pro	1	RGB 48MP	
	Dji Mavic 2 Pro	1	RGB 20MP	
	Dji Mavic 3 Enterprise Thermal	1	RGB 20MP	Termocamera
ISPRA	Parrot Anafi Work	1	RGB 12 MP	
	Dji Mavic Air 2	3	RGB 12MP 48MP	
	Dji Mavic 2 Pro	6	RGB 20MP	
	Dji Phantom 4 Pro	3	RGB 20MP	
	Dji Mavic 3 Pro	1	RGB 12MP 20MP 48MP	
	Dji Mavic 2 Enterprise Dual	1	RGB 12MP	Termocamera
	Dji Mavic 3 Enterprise Multispectral	1	RGB 20MP	n.4 fotocamere multispettrali 5 MP
	Dji Mini 2	2	RGB 12MP	
	Dji Mavic 3 Classic	2	RGB 20MP	
	Dji Mavic 3 Cine Premium	1	RGB 12MP 48MP	
Dji Mavic 3 Mini	1	RGB 48MP		

Tabella 7. distribuzione droni di tipo c.

Componente del SNPA	Marca e modello	N.	Sensore/i
Abruzzo	Dji Matrice 30T	2	RGB 48 MP - Zoom e Termocamera (integrati)
	Dji Matrice 300 RTK	2	n. 1 Zenmuse P1, n. 1 Zenmuse L1
Basilicata	Dji Matrice 300 RTK	1	n. 1 Zenmuse H20, n. 1 Micasense Altum PT
Calabria	Dji Matrice 600	2	n.1 Sony A6000, n.1 LIDAR S50, n. 1 Flir Vue pro 640, n.1 MAIA WV2
	Dji Matrice 300 RTK	1	n.1 Zenmuse H20T, n.1 MAIA WV2
Campania	-	-	-
Emilia Romagna	Dji Matrice 350 RTK	1	n.1 Zenmuse L1, n. 1 Micasense Rededge P
Friuli Venezia Giulia	Dji Mavic 2 Enterprise Advanced	1	RGB 48 MP e Termocamera (integrati)
Lazio	Dji Matrice 300 RTK	1	n.1 Sony A7R IV, n.1 Zenmuse L1, n.1 Zenmuse H20T, n.1 SENTERA AGX 710, n. 1 Laser Falcon Phergam
Lombardia	senseFly eBee RTK	1	n. 1 sensFly S.O.D.A., n. 1 sensFly Thermomap
	senseFly eBee X RTK	1	n. 1 sensFly S.O.D.A. 3D, n. 1 sensFly Thermomap, n. 1 Micasense rededge-MX
	Dji Matrice 210 RTK V2	1	n. 1 Zenmuse X5S, n.1 Zenmuse Z30, n.1 Zenmuse XT2, n.1 Micasense Altum
	Dji Matrice 350 RTK	1	n. 1 Zenmuse L1
Piemonte	-	-	-
Puglia	Dji Matrice 300 RTK	1	n. 1 Zenmuse P1, n. 1 Micasense Altum PT
Sardegna	Dji Matrice 210 RTK V2	3	n. 1 Zenmuse X5S, n.1 Zenmuse XT2, n. 1 Tetracam Auk
Sicilia	Dji Matrice 210 RTK V2	1	n. 1 Zenmuse Z30, n. 1 Zenmuse X5S, n.2 Zenmuse XT2
Toscana	-	-	-
Valle d'Aosta	senseFly eBee X RTK	1	senseFly S.O.D.A. 3D
	Dji Matrice 300 RTK	1	n. 1 Zenmuse P1, n. 1 Zenmuse L1, n. 1 Zenmuse H20T
Veneto	Dji Matrice 350 RTK	1	n. 1 Zenmuse P1, n. 1 Zenmuse L2
ISPRA	Dji Matrice 300 RTK	1	n. 1 Zenmuse H20, n. 1 Micasense Altum PT

Nella Tabella 7 compaiono anche i 2 Matrice 30T RTK posseduti da ARPA Abruzzo. Sono stati inclusi pur trattandosi di UAS con dotazione di sensoristica fissa, non intercambiabile. Tuttavia, essendo un modello dotato di sensori di alta qualità e di costruzione particolarmente robusta, la ditta produttrice ha comunque deciso di inserirlo nella famiglia "Matrice" che caratterizza aeromobili destinati ad un uso professionale.

Il parco dei sensori intercambiabile presenti negli altri UAS è diversificato e comprende sensori ottici, ottici zoom, LiDAR, termocamere e camere multispettrali. La ricchezza sensoristica in dotazione, anche ampliabile con acquisti successivi, permette l'esecuzione di monitoraggi ambientali complessi: aerofotogrammetria di precisione, rilievi sullo stato della vegetazione, idromorfologia, indagini forestali, ecc. Si segnala in proposito il rilevante numero di LiDAR in dotazione a diverse Agenzie, una tecnologia relativamente economica che permette di mappare densità e struttura della vegetazione arborea e arbustiva, importante elemento ai fini delle indagini naturalistiche e geomorfologiche e, soprattutto, di rilevare il terreno anche in presenza di copertura vegetale di una certa densità.

Tutti i sistemi UAS del terzo gruppo sono dotati di RTK. Rilevante è il fatto che, ad eccezione della Calabria, tutte le agenzie i cui droni sono dotati di ricevitori RTK posseggono anche almeno un'antenna GNSS, indispensabile per acquisire le coordinate di punti di controllo, garantendo così elevati livelli di accuratezza nell'ambito delle applicazioni fotogrammetriche.

2.2.3. Sistemi di posizionamento

L'impiego di sistemi di posizionamento GNSS nelle attività con UAS è piuttosto diffuso nel SNPA dove 15 strutture su 19 ne dichiarano l'uso. Per lo più si tratta di strumentazione direttamente integrata con i droni DJI (DJI D-RTK 2) e utilizzata per le correzioni RTK (Real Time Kinematic) o PPK (Post-processing Kinematic) funzionale al posizionamento accurato del rilievo.

In altri casi sono utilizzate antenne di terze parti (sono diffusi i modelli più comuni nel panorama della topografia) che consentono di acquisire le coordinate di punti di appoggio del rilievo fotogrammetrico, attraverso vari metodi, o di acquisire dati utili per l'applicazione della tecnica PPK.

Tale strumentazione si rende necessaria nelle aree dove non sono disponibili i servizi di correzione nRTK (network Real Time Kinematic), diffusi per mezzo di rete internet e qualora si renda necessario il posizionamento accurato dei prodotti dei rilievi.

Il quadro complessivo dei sistemi di posizionamento GNSS disponibili presso le diverse Agenzie e Strutture di ISPRA è riportato in percentuale rispetto al totale della strumentazione per l'utilizzo con UAS in dotazione al SNPA in Figura 11 e in valore quantitativo numerico in Figura 12.

Figura 11: sistemi di posizionamento GNSS disponibili in percentuale per impiego nelle attività con UAS.

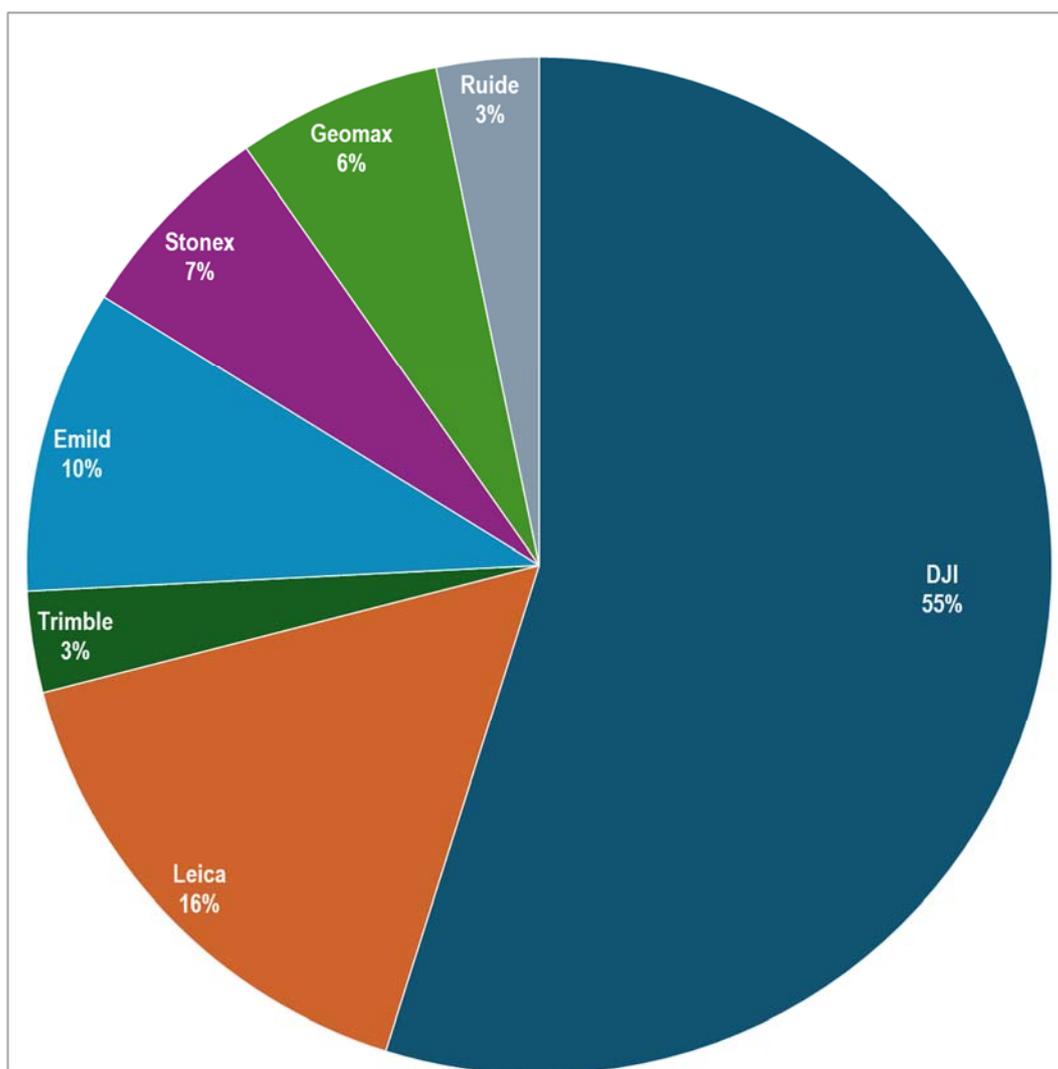
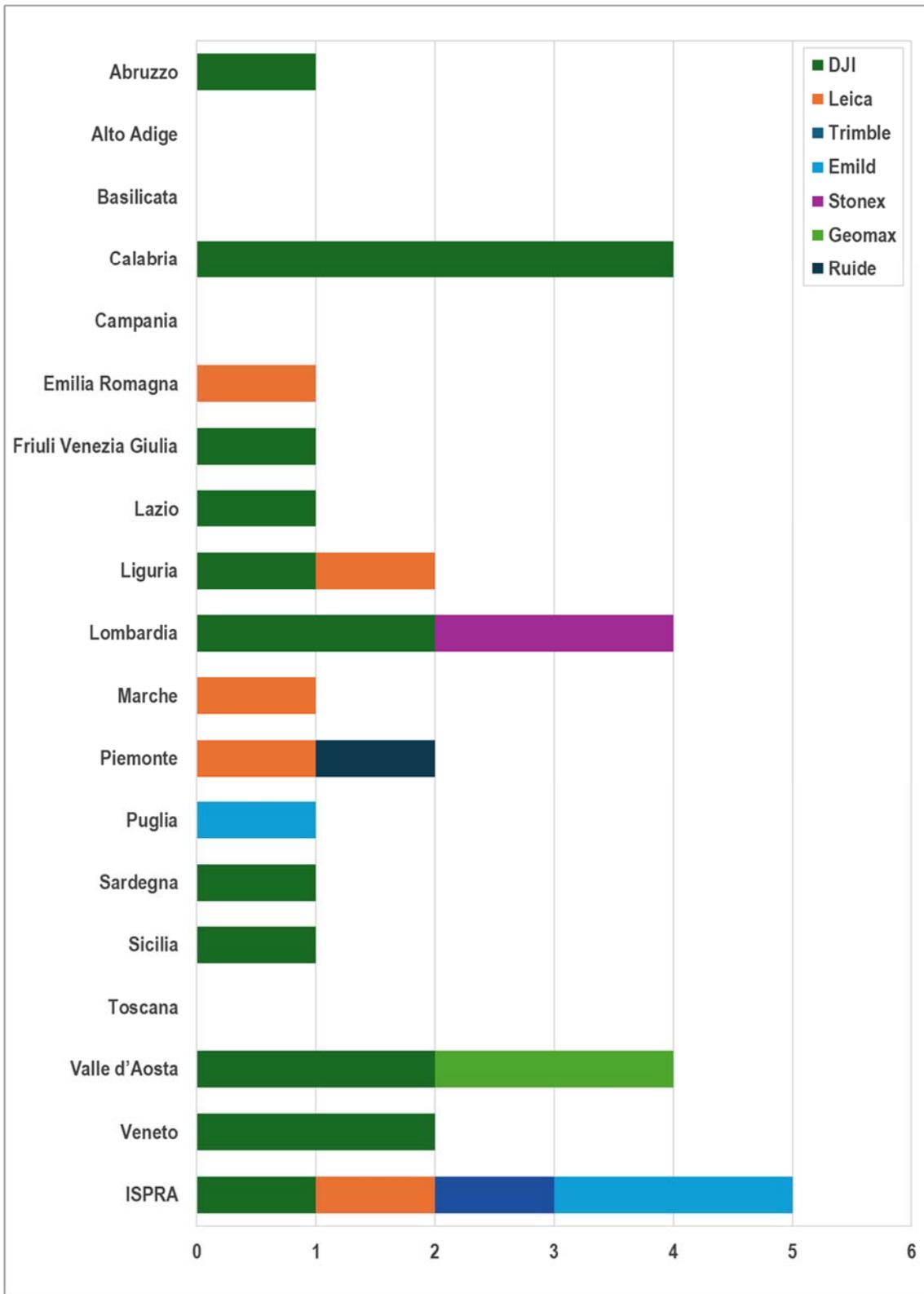


Figura 12: sistemi di posizionamento GNSS impiegati dalle diverse Agenzie e l'ISPRA nelle attività con UAS.



2.2.4. Software

Se nel campo dei velivoli esiste di fatto il dominio della ditta DJI, più articolata è invece la dotazione di software utilizzati per la pianificazione, la gestione delle missioni di volo e l'elaborazione dei dati acquisiti. I software utilizzati sono stati classificati in tre gruppi, i primi due destinati alla preparazione ed esecuzione delle missioni di volo e il terzo all'elaborazione dei dati acquisiti e alla produzione dei risultati.

I software per la gestione delle missioni di volo possono essere utilizzati sia in modalità manuale (es. per ispezioni e ricognizioni), sia per la pianificazione e la conduzione delle missioni automatiche. Tali software, che possono essere distribuiti dal produttore del velivolo ovvero sviluppati da terze parti e consentire la gestione di velivoli differenti, hanno subito negli ultimi anni un miglioramento rilevante e sono ormai caratterizzati da elevati livelli di efficienza, garantendo stabilità nel loro funzionamento e una ottima versatilità rispetto alle necessità operative.

Il primo gruppo di *"Software per il volo manuale"* è quello meno diversificato; su otto pacchetti censiti solo due non sono commercializzati dallo stesso produttore del drone. La motivazione risiede nel fatto che i prodotti sono venduti o consegnati in genere insieme ai velivoli e ad essi specificatamente dedicati; in particolare la maggior parte di applicativi sono della DJI, in ragione della prevalenza di droni di questa ditta tra quelli in dotazione alle diverse agenzie.

Anche nel secondo gruppo *"Software per la pianificazione di volo"* si registra ancora una cospicua presenza di programmi forniti dalle ditte che producono UAS; in questa categoria compaiono però anche software di terze parti.

Un aspetto particolarmente apprezzato dagli utilizzatori di queste soluzioni è rappresentato dalla possibilità di pianificare la missione, o modificarne una precedentemente utilizzata, in modo semplice e senza dover obbligatoriamente operare in ufficio. Maggiormente diffusi sono gli applicativi Pilot e Pilot 2 della DJI che vengono forniti insieme ai velivoli della stessa casa e che rappresentano lo standard per il volo e la programmazione di diverse tipologie di missioni, consentendo l'operatività delle squadre UAS nella maggior parte delle applicazioni. Non è stato rilevato l'impiego di strumenti afferenti alla categoria open source. La presenza di differenti soluzioni adottate dipende anche dall'adeguamento del parco velivoli nel tempo.

La sezione più interessante è quella relativa al terzo gruppo dei *"Software di post produzione"* dedicati all'elaborazione delle informazioni raccolte durante il volo. Occorre distinguere innanzitutto fra i software di elaborazione dei dati grezzi acquisiti dai sensori e quelli utilizzati per l'analisi dei dati e la produzione delle informazioni di interesse. Relativamente ai primi si tratta di: (i) SW fotogrammetrici, basati sulla tecnica di SfM - *Structure from Motion* che ricostruiscono la struttura tridimensionale dell'oggetto dalle sequenze bidimensionali delle immagini; (ii) SW per la gestione delle nuvole di punti acquisite da sensore LiDAR; (iii) SW specifici dedicati alle immagini termiche, multi o iperspettrali o di altro tipo ancora. L'analisi dei dati, invece, si realizza in ambiente GIS, attraverso soluzioni open (es. webODM, QGIS) o commerciali (ArcGIS), e può prevedere l'uso di software di classificazione e segmentazione di point clouds o dati raster, anche in questo caso free o a pagamento. È infine possibile prevedere, anche se non ancora molto diffuso in ambito SNPA, applicazioni basate su codici appositamente realizzati (es. Python o R) o condivisi nelle relative community secondo la logica dell'open source.

Per le applicazioni più diffuse si segnala la prevalenza dei prodotti commerciali Dji Terra Pro e Agisoft Metashape e delle soluzioni open Cloud Compare e QGIS. Per la scelta dei software di elaborazione/analisi dati da parte delle Agenzie e di ISPRA i criteri considerano sia gli aspetti economici, sia le competenze tecniche necessarie per il loro impiego, in riferimento allo scopo e all'obiettivo dei rilievi. Oltre ai consueti prodotti realizzati dalle case madri di droni risultano utilizzati anche numerosi software commerciali di terze parti e software gratuiti open source. In tale gruppo sono raccolti prodotti di impiego più generale, utilizzabili anche su dati non necessariamente acquisiti con UAS. Per questo motivo sono resi disponibili differenti soluzioni spesso sviluppate per specifiche applicazioni e con potenzialità in genere superiori a quelle degli applicativi forniti dai produttori. Proprio la generalità delle soluzioni fornite dai software giustifica la presenza di prodotti open source che possono contare su un bacino di utenti superiore a quello dei soli utilizzatori di droni.

Il livello altamente professionale dei prodotti disponibili e la presenza di alternative open source rende questo gruppo di software quello su cui è possibile prevedere lo sviluppo di soluzioni condivise a livello SNPA.

Nella Tabella 8 sono riportati i software utilizzati dalle diverse Agenzie e strutture di ISPRA per effettuare il volo con UAS, sia in modalità manuale sia per la pianificazione delle missioni. Nella Figura 13 sono indicate le percentuali di utilizzo dei vari software di volo riferite al totale delle Agenzie in possesso di droni.

In riferimento ai software di elaborazione dei dati acquisiti, nella Tabella 9 sono riportati i software utilizzati dalle diverse Agenzie e strutture di ISPRA per l'elaborazione e nella Figura 14: sono indicate le percentuali di utilizzo dei vari software di elaborazione dati riferite al totale delle Agenzie che utilizzano software di processamento.

Tabella 8: software per la gestione volo e la pianificazione delle missioni utilizzati dalle diverse Agenzie e l'ISPRA.

Componente del SNPA	DJI Go	DJI Fly	Free Flight 6	DJI Pilot / DJI Pilot 2	DJI Terra	Dronelink	Drone Harmony	Pix4D Capture	AgEagle eMotion	UGCS	UAV Flymap	Maps Made Easy / Map Pilot	Litchi	Site Scan for ArcGis	Drone Deploy
Abruzzo	X			X											
Alto Adige															
Basilicata				X											
Calabria	X			X	X					X			X		
Campania															
Emilia Romagna				X	X						X		X		
Friuli Venezia Giulia				X	X										
Lazio				X											
Liguria	X														X
Lombardia				X	X				X						
Marche				X										X	
Piemonte		X													
Puglia	X			X		X								X	
Sardegna				X											
Sicilia	X			X											
Toscana															
Valle d'Aosta	X			X	X			X	X			X			
Veneto	X			X	X	X		X		X					
ISPRA	X	X	X	X		X	X	X					X		
Totale dei componenti del SNPA che usano il software	7	2	1	14	6	3	1	3	2	2	1	1	3	2	1
Totale in % dei componenti del SNPA che usano il software rispetto al totale avente UAS	50%	13%	6%	88%	38%	19%	6%	19%	13%	13%	6%	6%	19%	13%	6%

Figura 13: percentuali di utilizzo dei vari software per la gestione volo e la pianificazione delle missioni riferite al totale dei componenti del SNPA in possesso di droni.

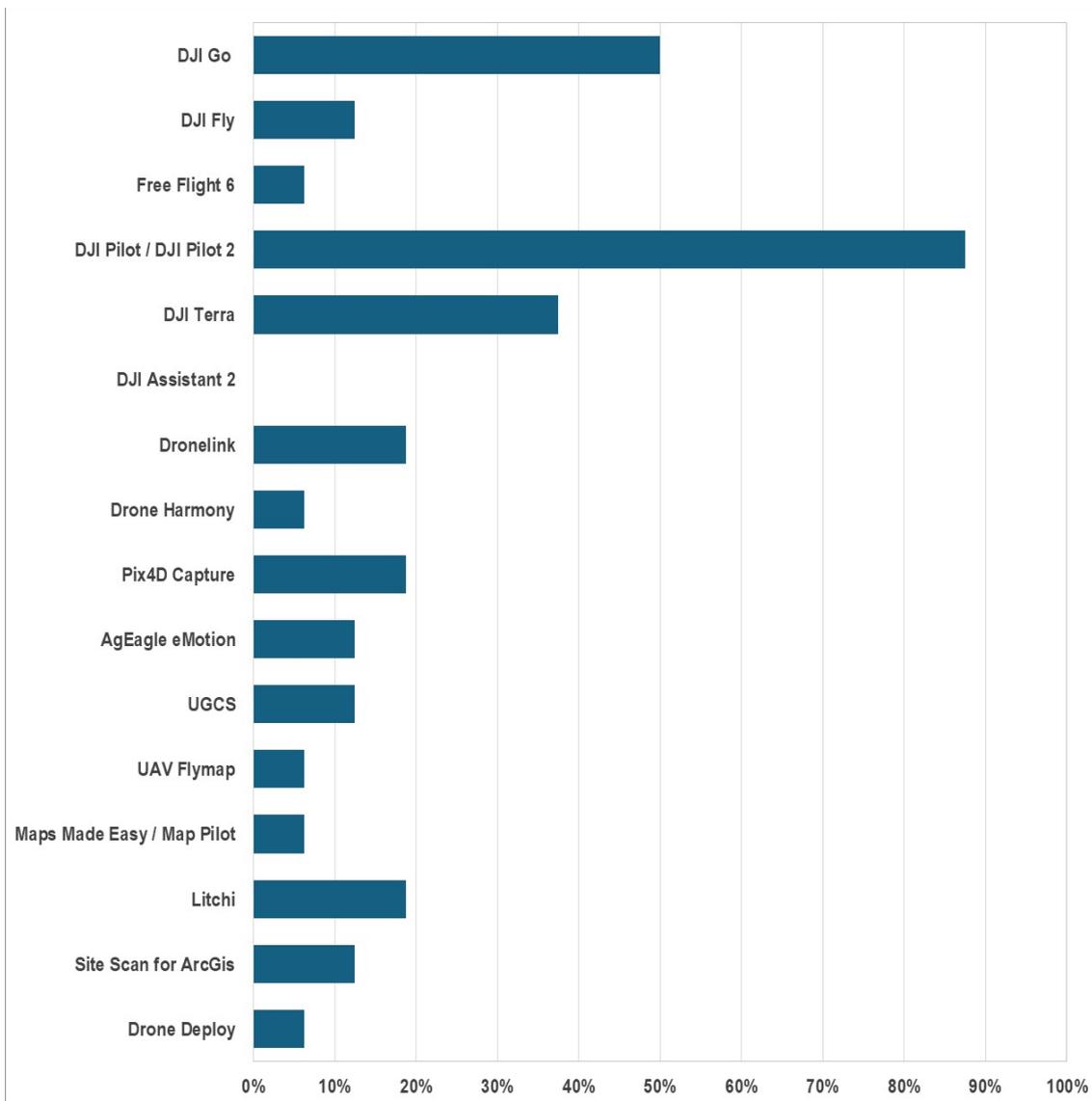


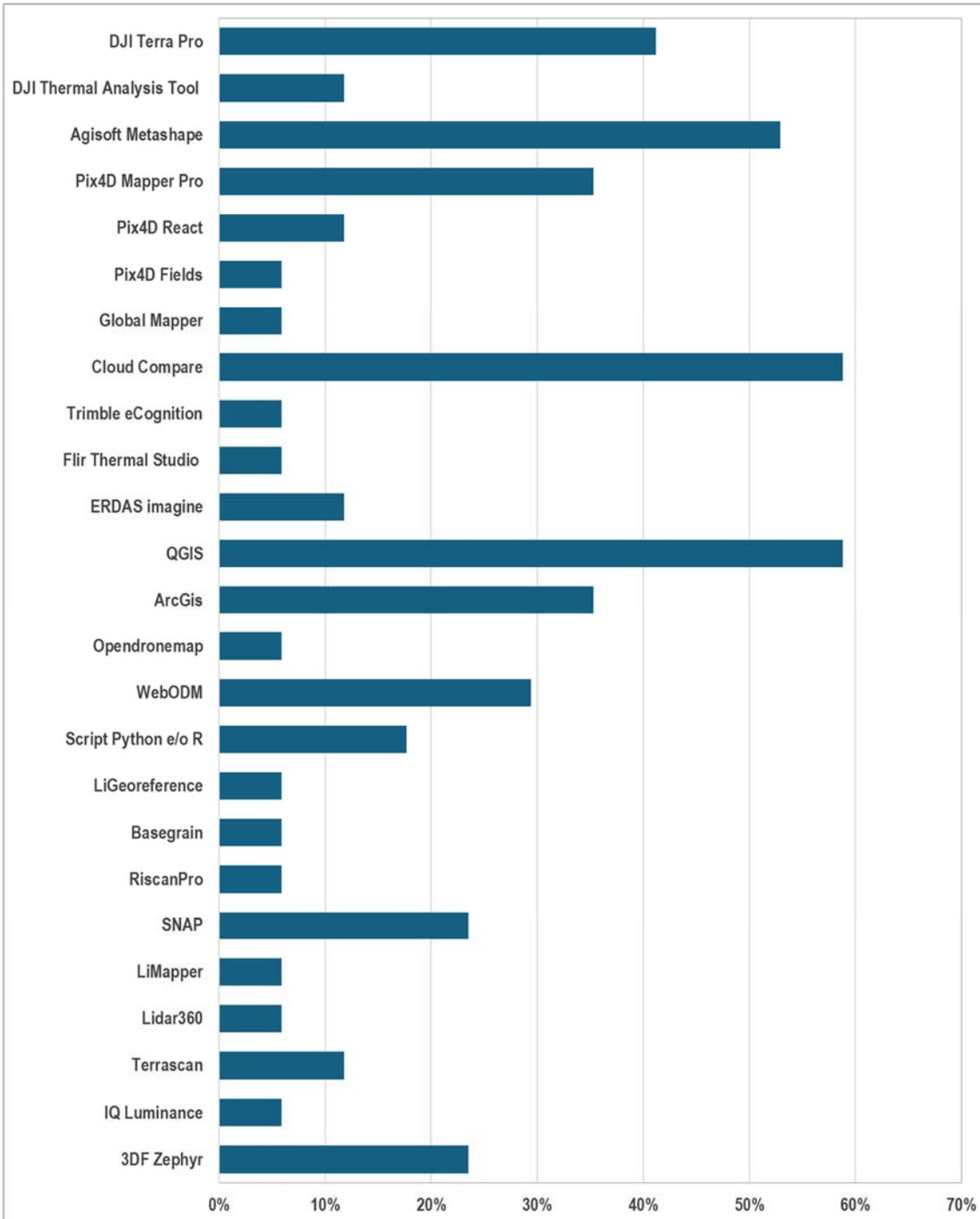
Tabella 9: software di elaborazione dati utilizzati dalle diverse Agenzie e l'ISPRA.

Componente del SNPA	DJI Terra Pro	DJI Thermal Analysis Tool	Agisoft Metashape	Pix4D Mapper Pro	Pix4D React	Pix4D Fields	Global Mapper	Cloud Compare	Trimble eCognition	Flir Thermal Studio	ERDAS imagine	QGIS	ArcGis	Opendronemap	WebODM	Script Python e/o R	LiGeoreference	Basegrain	RiscanPro	SNAP	LiMapper	Lidar360	Terrascan	IQ Luminance	3DF Zephyr
Abruzzo	X																								
Alto Adige																									
Basilicata			X																						
Calabria			X						X	X	X									X					
Campania																									
Emilia Romagna	X	X		X			X					X	X		X	X									X
Friuli Venezia Giulia	X											X													
Lazio			X				X																		
Liguria			X				X					X							X						
Lombardia	X			X			X				X	X	X							X					
Marche	X		X									X													
Piemonte			X				X					X	X		X	X									
Puglia				X		X							X												
Sardegna			X	X			X																X		
Sicilia																									X

PUBBLICAZIONI TECNICHE | SNPA 2025

Componente del SNPA	DJI Terra Pro	DJI Thermal Analysis Tool	Agisoft Metashape	Pix4D Mapper Pro	Pix4D React	Pix4D Fields	Global Mapper	Cloud Compare	Trimble eCognition	Flir Thermal Studio	ERDAS imagine	QGIS	ArcGis	OpendroneMap	WebODM	Script Python e/o R	LiGeoreference	Basegrain	RiscanPro	SNAP	LiMapper	Lidar360	Terrascan	IO Luminance	3DF Zephyr
Toscana								X				X	X		X					X					X
Valle d'Aosta			X	X	X			X															X		
Veneto	X	X						X				X		X	X									X	X
ISPRA	X		X	X	X		X	X	X			X	X		X	X	X	X		X	X	X			
Totale dei componenti del SNPA che usano il software	7	2	9	6	2	1	1	10	1	1	2	10	6	1	5	3	1	1	1	4	1	1	2	1	4
Totale in % dei componenti del SNPA che usano il software rispetto al totale avente UAS	41 %	12 %	53 %	35 %	12 %	6 %	6 %	59 %	6 %	6 %	12 %	59 %	35 %	6 %	29 %	18 %	6 %	6 %	6 %	24 %	6 %	6 %	12 %	6 %	24 %

Figura 14: percentuali di utilizzo dei vari software di elaborazione dati riferite al totale dei componenti SNPA che usano software di processamento.



2.2.5. Risorse umane dedicate

La Sezione C del questionario ha raccolto informazioni sulle risorse umane messe a disposizione da ogni Agenzia e ISPRA per l'utilizzo di sistemi UAS. Le informazioni non riguardano solo la numerosità del personale dedicato, inteso come numero di piloti abilitati all'utilizzo di droni, ma anche il livello di formazione raggiunto, in termini di competenze teoriche acquisite; si tratta di un elemento importante per valutare la possibilità di gestire differenti scenari operativi, caratterizzati da livelli di rischio variabili.

Relativamente alla formazione ed alle categorie di operazioni, in Tabella 10 è riportato il numero di piloti per ciascuna Agenzia ambientale e ISPRA, con indicazione delle abilitazioni e competenze teoriche conseguite, necessarie per effettuare le operazioni in categoria "Open" e "Specific".

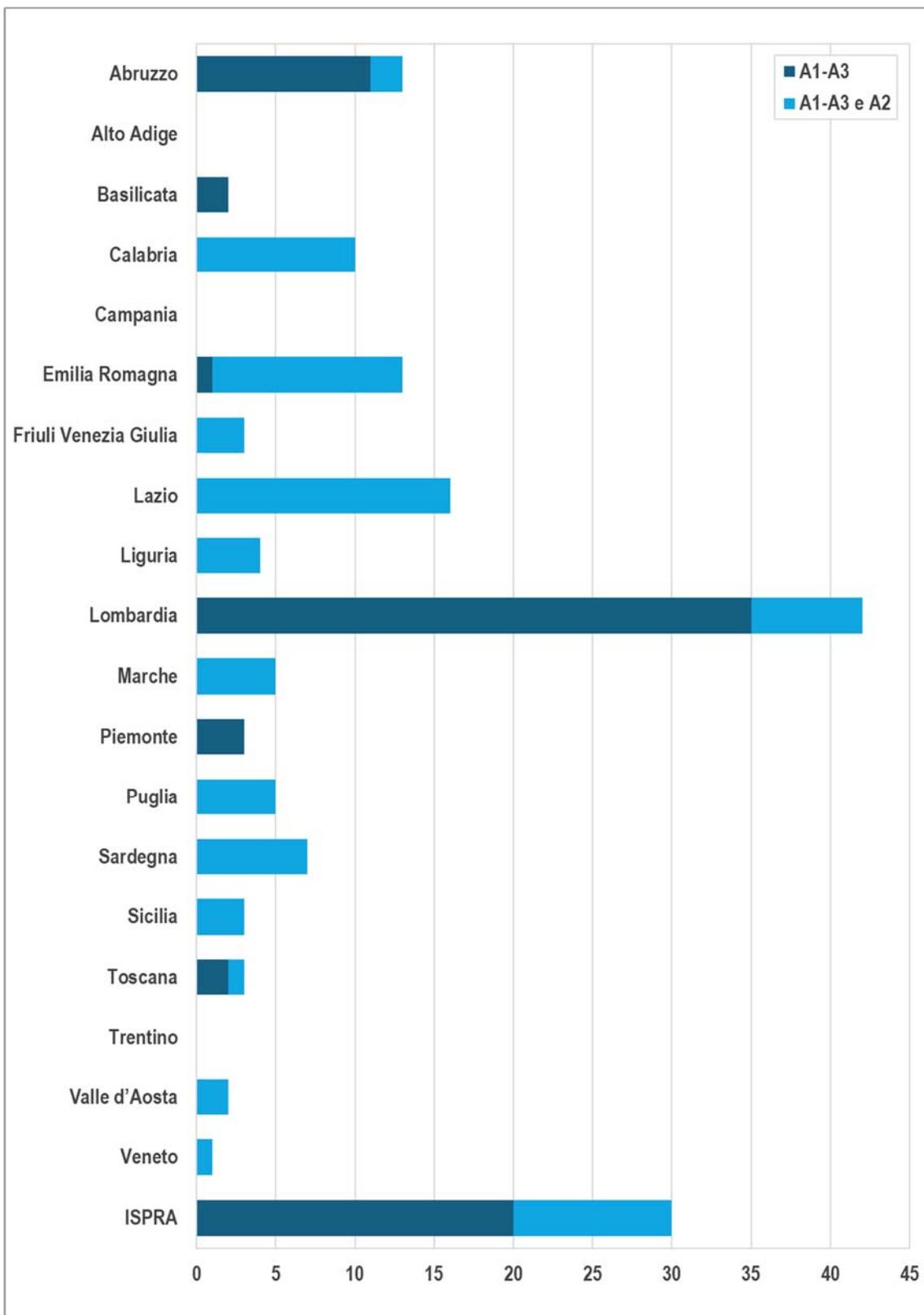
Le abilitazioni teoriche A1/A3 e A2 sono quelle previste per effettuare operazioni in categoria "Open", caratterizzata da un basso livello di rischio; questa categoria è stata concepita per facilitare l'uso dei droni senza la necessità di autorizzazioni, pur mantenendo un elevato livello di sicurezza attraverso il rispetto di determinate condizioni previste dalle normative in vigore. L'abilitazione A2 è conseguente all'acquisizione dell'abilitazione A1-A3. Le abilitazioni "Open" hanno una durata di cinque anni.

Nel grafico in Figura 15 è rappresentata la distribuzione dei piloti nelle Agenzie ambientali, con indicazione delle relative abilitazioni per le operazioni "Open".

Tabella 10: numero di piloti per ciascuna Agenzia ambientale e l'ISPRA, con indicazione delle attestazioni conseguite, necessarie per effettuare le operazioni in categoria "Open" e "Specific".

Componente del SNPA	N. piloti	Operazioni OPEN		Operazioni SPECIFIC		
		A1/A3 Open sub category	A2 Open sub category	Crew Resource Management (CRM)	Gestione Comunicazioni Aeronautiche (GCA)	Specific Operations Risk Assessment (SORA)
Abruzzo	13	13	2	-	-	-
Alto Adige	-	-	-	-	-	-
Basilicata	2	2	-	-	-	-
Calabria	10	10	10	10	10	-
Campania	-	-	-	-	-	-
Emilia Romagna	13	13	12	-	-	-
Friuli Venezia Giulia	3	3	3	-	-	-
Lazio	16	16	16	-	-	-
Liguria	4	4	4	-	-	-
Lombardia	42	42	7	5	6	3
Marche	5	5	5	-	-	5
Piemonte	3	3	-	-	-	-
Puglia	5	5	5	5	5	2
Sardegna	7	7	7	2	2	2
Sicilia	3	3	3	-	-	1
Toscana	3	3	1	-	-	-
Valle d'Aosta	2	2	2	2	2	1
Veneto	1	1	1	1	1	1
ISPRA	30	30	10	2	2	6

Figura 15: numero di piloti con abilitazioni e competenze teoriche conseguite in categoria OPEN A1/A3 e A2, per ciascuna Agenzia e l'ISPRA.



I criteri per l'utilizzo dei droni nelle operazioni "Open", correlato all'acquisizione di specifiche abilitazioni e alle caratteristiche dell'aeromobile (identificate dal marchio CE), sono schematizzati nella Figura 16.

Figura 16: criteri per l'utilizzo dei sistemi UAS nelle operazioni "Open" (Fonte: <https://www.easa.europa.eu>; <https://www.enac.gov.it>. Modificato).



Le operazioni in categoria "Specific" non rientrano nei criteri della categoria "Open" e richiedono una valutazione del rischio e procedure di autorizzazione più rigorose.

Per operare in categoria "Specific" è sempre richiesta un'autorizzazione operativa, a meno che l'operazione non venga eseguita secondo uno Scenario Standard Europeo (STS), nazionale (IT-STS), oppure l'operatore possieda un certificato di operatore di UAS leggero (LUC), rilasciato dall'Autorità competente.

Le attestazioni *Crew Resource Management* (CRM) e la Gestione Comunicazioni Aeronautiche (GCA), quest'ultima sottoinsieme della fonia aeronautica per i piloti di velivoli *manned*, sono competenze teoriche obbligatorie per effettuare attività in categoria "Specific".

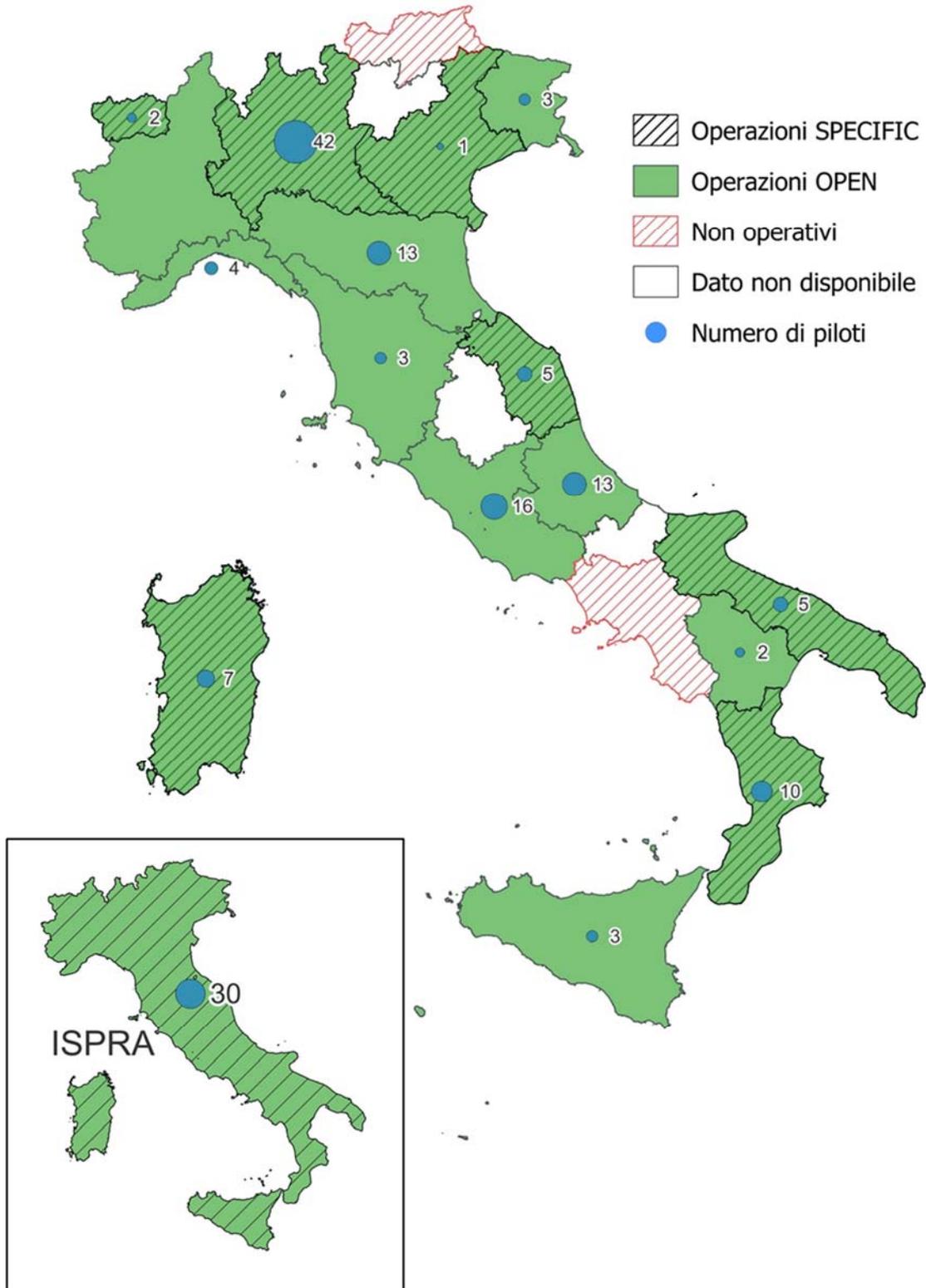
L'abilitazione "SORA" (*Specific Operations Risk Assessment*) è relativa alla metodologia sviluppata dalla *Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems* (JARUS) per la valutazione del rischio associato alle operazioni UAS e fornisce una base per la definizione di requisiti di sicurezza adeguati. Tale metodo serve ad analizzare la frequenza e la gravità di un evento potenzialmente dannoso in un determinato scenario operativo e a misurarne il livello di rischio.

In Italia le operazioni "Specific", svolte fuori dagli scenari standard (IT-STS-01 e IT-STS-02), devono svolgersi su autorizzazione di ENAC previa approvazione dell'analisi dei rischi.

Nella Figura 17 è rappresentato l'attuale assetto delle Agenzie ambientali e dell'ISPRA, in termini di numero di piloti e di tipologia di operazione realizzabile.

Nel complesso sono presenti 162 piloti con abilitazione "Open" in categoria A1 e A3. Tra i piloti, il numero di quelli autorizzati a operazioni in categoria A2 è poco più della metà. Tutte le agenzie hanno formato piloti in entrambe le categorie rendendo possibile l'esecuzione di operazioni nelle sottocategorie A1, A2 e A3. Per ciò che riguarda la possibilità di effettuare operazioni "Specific", solo alcune Agenzie e l'ISPRA sono attualmente abilitate. Ciò evidenzia la necessità di uniformare, a livello nazionale, le competenze dei tecnici coinvolti, tenendo conto che molte attività istituzionali in cui l'utilizzo dei droni potrebbe costituire un valido supporto operativo si configurano come operazioni "Specific". Particolare è la situazione della Toscana che pur essendo priva di droni ha investito nella formazione di tre piloti, ritenendo comunque strategico dotarsi di competenze interne in tale settore, vista la crescente necessità di interfacciarsi con consulenti e aziende che operano nel settore dei droni.

Figura 17: distribuzione del personale dedicato (piloti) e il tipo di scenario in cui possono operare.



2.2.6. Prodotti e scenari operativi

Nella sezione D del questionario sono raccolte le informazioni relative alla tipologia delle operazioni (Tabella 11), alle attività svolte sulle diverse matrici ambientali e ai prodotti realizzati dalle Agenzie e ISPRA con l'ausilio dei droni.

Con il termine prodotti si intendono i risultati ottenuti dalle operazioni di rilievo attraverso le diverse elaborazioni eseguite su immagini, video e altri tipi di acquisizioni (Tabella 12).

Nella stessa sezione sono inoltre indicati i tematismi e le matrici indagate dalle Agenzie e ISPRA, con la finalità di evidenziare le potenzialità e le diverse applicazioni tematiche per il monitoraggio con il supporto dei sistemi UAS (Tabella 13).

Tabella 11: tipologia di operazioni svolte dalle diverse Agenzie e l'ISPRA.

Componente del SNPA	Operazioni in categoria Open	Operazioni in categoria Specific	Operazioni sottoposte a dichiarazione
Abruzzo	-	-	-
Alto Adige	-	-	-
Basilicata	-	-	-
Calabria	X	X	-
Campania	-	-	-
Emilia Romagna	X	-	-
Friuli Venezia Giulia	X	-	-
Lazio	X	-	-
Liguria	X	-	-
Lombardia	X	X	X
Marche	X	X	-
Piemonte	X	-	-
Puglia	X	X	X
Sardegna	X	X	-
Sicilia	X	X	X
Toscana	X	-	-
Valle d'Aosta	X	X	-
Veneto	X	X	-
ISPRA	X	X	X

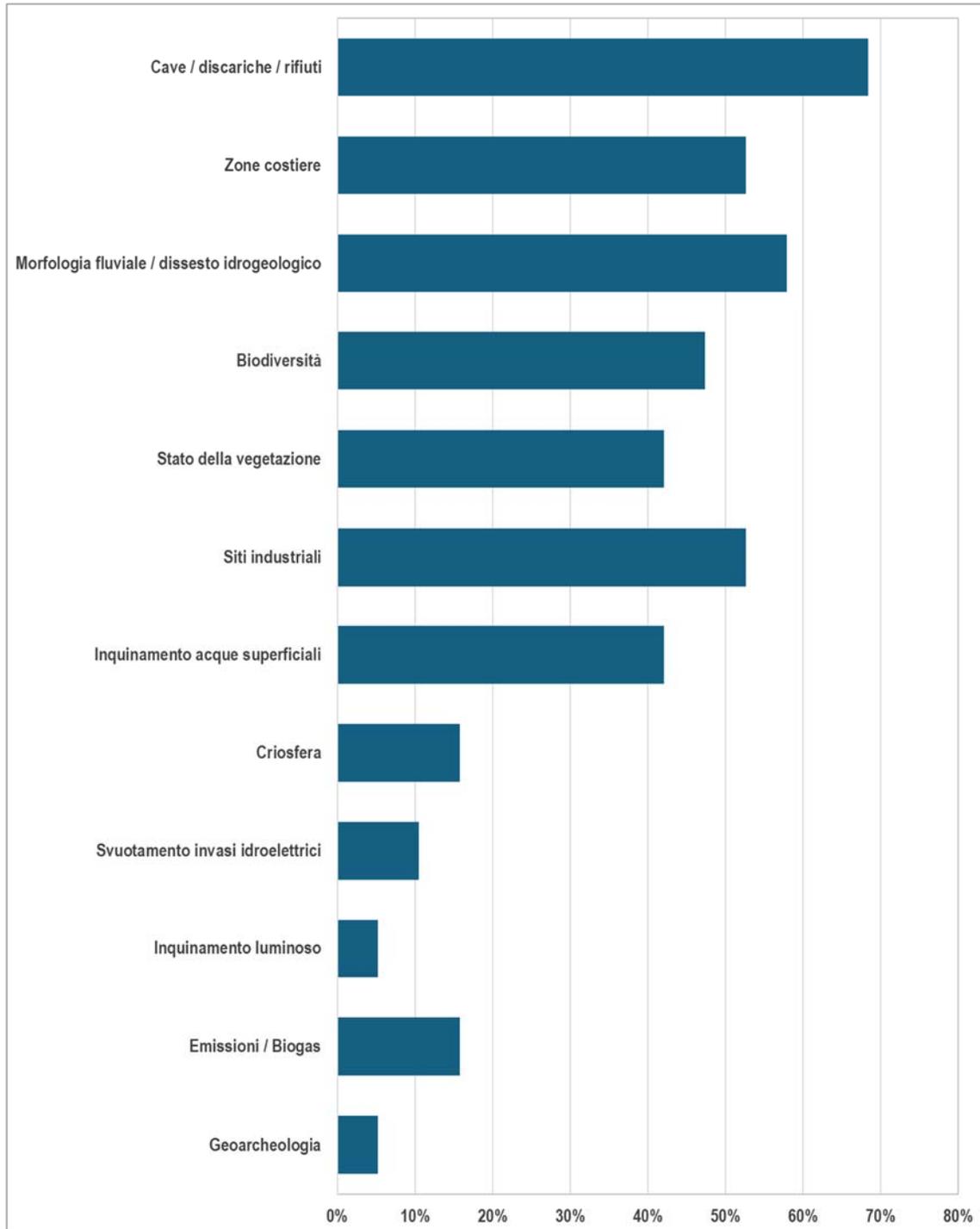
Tabella 12: prodotti realizzati dalle diverse Agenzie e l'ISPRA.

Componente del SNPA	Foto/Video	Ortomosaici	Cloud Points	LIDAR	Termografia	Analisi multitemporali	Calibrazione immagini satellitari	Full Motion Video
Abruzzo								
Alto Adige								
Basilicata								
Calabria	X	X	X	X				
Campania								
Emilia Romagna	X	X	X	X	X			
Friuli Venezia Giulia	X	X			X			
Lazio	X	X	X	X	X			
Liguria	X	X	X					
Lombardia	X	X	X	X	X	X	X	
Marche	X	X			X			
Piemonte	X	X	X					
Puglia	X	X	X					X
Sardegna	X	X	X		X			
Sicilia	X	X	X					
Toscana	X	X	X					
Valle d'Aosta	X	X	X	X			X	
Veneto	X	X	X	X	X			
ISPRA	X	X	X	X		X	X	X

Tabella 13: tematismi e matrici ambientali indagate dalle diverse Agenzie e l'ISPRA.

Componente del SNPA	Cave / discariche / rifiuti	Zone costiere	Morfologia fluviale / dissesto idrogeologico	Biodiversità	Stato della vegetazione	Siti industriali	Inquinamento acque superficiali	Criosfera	Svuotamento invasi idroelettrici	Inquinamento luminoso	Emissioni / Biogas	Geoarcheologia
Abruzzo												
Alto Adige												
Basilicata												
Calabria	X	X	X			X	X					
Campania												
Emilia Romagna	X	X			X	X	X					
Friuli Venezia Giulia	X	X		X	X		X					
Lazio	X					X	X				X	
Liguria	X	X	X									
Lombardia	X		X	X	X	X		X	X			
Marche	X	X	X	X		X	X		X			
Piemonte			X								X	
Puglia	X	X		X	X	X					X	
Sardegna	X	X	X	X	X		X					
Sicilia	X	X	X	X	X	X	X					
Toscana	X		X			X						
Valle d'Aosta			X	X	X			X				
Veneto	X	X	X	X	X	X	X	X		X		
ISPRA	X	X	X	X		X						X

Figura 18: tematismi e matrici ambientali indagate in percentuale nel SNPA.



2.2.7. I rapporti di collaborazione

Le numerose e articolate collaborazioni tra SNPA ed Enti esterni evidenziano l'esistenza di una significativa rete di rapporti fra soggetti diversi finalizzata, da un lato, allo svolgimento di attività specifiche relative a compiti della pubblica amministrazione (es. monitoraggi ambientali o interventi in emergenza) e, dall'altro, ad iniziative di ricerca e sviluppo prevalentemente finalizzate al miglioramento delle competenze tecnico-operative per il monitoraggio del territorio mediante l'uso di strumenti, tecnologie e metodi di osservazione della Terra. Si tratta in questo ultimo caso di progetti di ricerca o di sperimentazione che vedono impegnato il SNPA in collaborazioni con Università o centri di ricerca nel campo dell'innovazione tecnologica. È infine da sottolineare la costituzione sempre più frequente di collaborazioni interdisciplinari sul tema, fra soggetti pubblici e privati.

Attualmente più del 50% delle Agenzie e ISPRA collabora con Amministrazioni regionali, provinciali o con parchi ed aree protette. Diverse Agenzie sono impegnate a supporto delle autorità giudiziarie nell'ambito di attività di controllo e ispezione e numerose sono le iniziative finanziate da progetti europei e collaborazioni con enti di ricerca (es: Consiglio Nazionale delle Ricerche, Università, Centro Internazionale in Monitoraggio Ambientale, ecc.).

Tra le collaborazioni esterne si evidenziano anche le attività svolte con il Dipartimento di Protezione Civile, il Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, l'Agenzia Spaziale Italiana, il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, il Ministero della Sovranità alimentare e delle Foreste, i Centri funzionali regionali, i Carabinieri Forestali e il Corpo forestale delle regioni e province autonome.

2.2.8. Gestione Operativa

La sezione analizza le modalità con cui gli UAS sono gestiti all'interno degli Enti del SNPA. L'impiego di questa tecnologia richiede la costruzione di un nucleo gestionale in grado di garantirne il corretto ed efficace utilizzo. A tal fine è necessario definire: il modello organizzativo, identificando chiaramente i ruoli e le responsabilità dei soggetti coinvolti; le modalità di gestione e di manutenzione dell'attrezzatura; le procedure di registrazione dell'operatore, della flotta e dei piloti attraverso la piattaforma "d-flight"; la stipula delle polizze assicurative; la formazione teorico-pratica e l'aggiornamento periodico degli operatori e dei piloti, nonché l'eventuale ottenimento di qualifiche aggiuntive per la gestione degli scenari complessi; l'interazione con gli enti competenti in materia di aviazione civile (ENAC e ENAV). È inoltre fondamentale garantire la disponibilità e l'accesso a strumenti e competenze per l'elaborazione e l'analisi dei dati raccolti e la produzione delle informazioni di interesse.

Le situazioni emerse dalla ricognizione effettuata evidenziano un assetto organizzativo nell'ambito delle diverse Agenzie riconducibile a due distinti modelli, in relazione alla dimensione e natura delle singole strutture, nonché alla tipologia di impiego degli UAS:

- risorse centralizzate, con i droni affidati a una struttura specialistica che supporta le varie strutture interne che ne facciano richiesta;
- risorse distribuite, con i droni allocati tra i singoli soggetti e strutture che li utilizzano per obiettivi specifici.

Nelle strutture di ridotta dimensione le due situazioni tendono a convergere.

3. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE E PROSPETTIVE FUTURE

La tematica dei droni e più in generale del telerilevamento ad alta risoluzione, costituisce una valida opportunità e un efficace supporto operativo per le attività istituzionali delle Agenzie Ambientali e dell'ISPRA. Gli attuali livelli di efficienza degli aeromobili disponibili e la possibilità di utilizzare molteplici tipologie di sensori rappresentano una risorsa tecnologica rilevante per incrementare l'efficienza delle attività di monitoraggio ambientale.

Recenti studi evidenziano l'interesse della comunità scientifica sulle potenzialità dei sistemi UAS, soprattutto in campo ambientale, con lo sviluppo di iniziative rivolte a creare "network" per promuovere strategie di monitoraggio e condividere i progressi tecnologici del telerilevamento ad alta risoluzione².

L'utilizzo dei sistemi UAS nelle attività istituzionali prevede l'organizzazione operativa da parte di ciascuna Agenzia e l'ISPRA ed una efficace attività di coordinamento in ambito SNPA, con l'obiettivo principale di armonizzare ed ottimizzare gli approcci metodologici nei diversi ambiti applicativi di monitoraggio ambientale e di garantire livelli di formazione e di aggiornamento adeguati agli scenari in cui si opera.

La ricognizione condotta, i cui risultati sono stati esposti nei precedenti capitoli, evidenzia che la maggioranza delle Agenzie ambientali si sono dotate o si stanno dotando di sistemi UAS. In diverse Agenzie e strutture di ISPRA è attualmente previsto l'utilizzo di aeromobili e sensori nell'ambito di applicazioni complesse a supporto delle attività di controllo e di monitoraggio ambientale, seppur con dotazioni molto eterogenee, ed evidenziando così un graduale aggiornamento degli approcci operativi classici. I droni consentono infatti di superare il divario esistente tra le osservazioni sul campo e il tradizionale telerilevamento aereo e spaziale, rendendo disponibili dati ad alta risoluzione spaziale e temporale, integrabili con gli altri dati.

Le applicazioni tematiche, esposte nelle schede allegate, si riferiscono a molteplici utilizzi nell'ambito dei contesti terrestri, marino-costieri e antropizzati, evidenziando le potenzialità degli aeromobili a pilotaggio remoto e delle diverse tipologie di sensori disponibili (camere fotogrammetriche, camere multispettrali e LiDAR), nonché dei sistemi di gestione e di elaborazione dei dati acquisiti.

Le attuali potenzialità dei sistemi UAS possono così determinare un miglioramento, in termini di efficienza e di qualità, delle attività di rilievo e produzione delle informazioni di monitoraggio ambientale. A tal fine, risulta importante mettere a sistema procedure operative strutturate e condivise in ambito SNPA, che fungano da riferimento per ciò che riguarda le fasi di pianificazione delle missioni di volo, di acquisizione dei dati e di elaborazione degli stessi.

In un'ottica di efficace utilizzo dei droni in campo ambientale, risulta quindi essenziale prevedere periodiche attività di confronto ed aggiornamento fra le diverse Agenzie e l'ISPRA che operano sul territorio nazionale, al fine di favorire la formazione dei tecnici coinvolti e la diffusione delle conoscenze sviluppate, prevedendo inoltre il confronto tecnico con gli Enti che operano sul territorio con l'ausilio dei droni. Ciò consentirebbe di supportare le Agenzie che stanno avviando attività di controllo e monitoraggio ambientale con uso di droni beneficiando delle esperienze e degli approcci metodologici e operativi sviluppati in ambito SNPA.

Tenendo conto della rilevanza e costante evoluzione degli aspetti normativi relativi alla gestione delle operazioni con i sistemi UAS risulta altrettanto importante avviare l'interlocuzione con le Autorità aeronautiche nazionali, per ciò che riguarda gli aspetti normativi ed autorizzativi, e con gli attori della cosiddetta "Drone Industry".

Alla luce delle considerazioni sopra esposte si ritiene strategico avviare la definizione di uno standard SNPA, per la realizzazione di rilievi, l'elaborazione dei dati e l'analisi delle informazioni di interesse ambientale in modo allineato e omogeneo, definendo linee guida condivise, operative e scientificamente robuste e riconosciute utili anche in caso di contenzioso con terze parti o di accertamenti giudiziari. Risulta pertanto necessario rafforzare le competenze di sistema attraverso l'organizzazione di sessioni di formazione SNPA e interconfronti periodici, con il fine di garantire un livello omogeneo di conoscenza e applicazione di tali tecnologie, molto promettenti per il monitoraggio dell'ambiente e del territorio.

² Unmanned Aerial Systems for Monitoring Soil, Vegetation, and Riverine Environments / Manfreda, Salvatore; BEN-DOR, Eyal. - (2023). [10.1016/C2020-0-02177-8]

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: tipologie di UAS: a) Multirottore, b) ala fissa e c) VTOL.....	9
Figura 2: sensori passivi disponibili per l'uso con i sistemi UAS. A sinistra: fotocamera RGB per acquisizioni di immagini a scopo di documentazione o per fotogrammetria; a destra: sensore multispettrale.....	10
Figura 3: sensori attivi LiDAR utilizzabili con i sistemi UAS. A sinistra il modello RIEGEL VUX-1UAV ²² ; a destra il modello Dji Zenmuse L2.....	11
Figura 4: riepilogo delle caratteristiche delle operazioni "Open".	14
Figura 5: riepilogo delle procedure per l'ottenimento delle autorizzazioni alle operazioni "Specific".....	15
Figura 6: riepilogo delle tipologie di operazioni e delle relative prescrizioni ed attestazioni necessarie.	16
Figura 7: operatività UAS delle strutture del SNPA.	19
Figura 8: distribuzione nel SNPA dei velivoli con le tre tipologie di massa massima totale al decollo (MTOM).....	22
Figura 9: tipologie di sistemi UAS disponibili presso le diverse Agenzie e l'ISPRA.	25
Figura 10: sensoristica disponibile in percentuale nel SNPA.	27
Figura 11: sistemi di posizionamento GNSS disponibili in percentuale per impiego nelle attività con UAS.....	30
Figura 12: sistemi di posizionamento GNSS impiegati dalle diverse Agenzie e l'ISPRA nelle attività con UAS.	31
Figura 13: percentuali di utilizzo dei vari software per la gestione volo e la pianificazione delle missioni riferite al totale dei componenti del SNPA in possesso di droni.....	34
Figura 14: percentuali di utilizzo dei vari software di elaborazione dati riferite al totale dei componenti SNPA che usano software di processamento.	37
Figura 15: numero di piloti con abilitazioni e competenze teoriche conseguite in categoria OPEN A1/A3 e A2, per ciascuna Agenzia e l'ISPRA.	39
Figura 16: criteri per l'utilizzo dei sistemi UAS nelle operazioni "Open" (Fonte: https://www.easa.europa.eu ; https://www.enac.gov.it . Modificato).	40
Figura 17: distribuzione del personale dedicato (piloti) e il tipo di scenario in cui possono operare.	42
Figura 18: tematismi e matrici ambientali indagate in percentuale nel SNPA.	46

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: principali tipologie di sensori e relative applicazioni compatibili con i sistemi UAS.	12
Tabella 2: struttura del questionario per la mappatura dell'uso di droni nel SNPA.	17
Tabella 3: distribuzione nel SNPA dei velivoli con le tre tipologie di massa massima totale al decollo (MTOM).	21
Tabella 4: tipologie di sistemi UAS disponibili presso le diverse Agenzie e l'ISPRA.	23
Tabella 5: sensoristica disponibile presso le diverse Agenzie e l'ISPRA.	26
Tabella 6: distribuzione droni di tipo a. e b. Tutti i modelli indicati sono quadricotteri multirotores.	28
Tabella 7: distribuzione droni di tipo c.	29
Tabella 8: software per la gestione volo e la pianificazione delle missioni utilizzati dalle diverse Agenzie e l'ISPRA.	33
Tabella 9: software di elaborazione dati utilizzati dalle diverse Agenzie e l'ISPRA.	35
Tabella 10: numero di piloti per ciascuna Agenzia ambientale e l'ISPRA, con indicazione delle attestazioni conseguite, necessarie per effettuare le operazioni in categoria "Open" e "Specific".	38
Tabella 11: tipologia di operazioni svolte dalle diverse Agenzie e l'ISPRA.	43
Tabella 12: prodotti realizzati dalle diverse Agenzie e l'ISPRA.	44
Tabella 13: tematismi e matrici ambientali indagate dalle diverse Agenzie e l'ISPRA.	45

LE APPLICAZIONI TEMATICHE NELL'USO DI DRONI IN AMBITO SNPA

APPENDICE ALLA PUBBLICAZIONE TECNICA SNPA

Impiego e gestione di droni nel SNPA per il monitoraggio e il controllo ambientale

SOMMARIO

LE APPLICAZIONI TEMATICHE.....	54
1. AMBITO TERRESTRE.....	56
1.1 COPERTURE.....	56
Scheda n. 1 - Habitat terrestri.....	56
Scheda n. 2 - Foreste: incendi boschivi.....	59
Scheda n. 3 – Foreste: fattori perturbanti biotici e a biotici.....	62
Scheda n. 4 - Morfologia fluviale.....	64
Scheda n. 5 - Dinamica idromorfologica.....	66
1.2 DISSESTI.....	68
Scheda n. 6 – Frane.....	68
Scheda 7 - Colate detritiche.....	71
Scheda 8 – Scenari emergenziali complessi da disastri naturali.....	74
Scheda n. 9 – Valanghe.....	76
1.3 CRIOSFERA.....	79
Scheda n. 10 - Ghiacciai.....	79
Scheda n. 11 - Permafrost.....	82
2 AMBITO MARINO, MARINO-COSTIERO E LAGUNARE.....	84
2.1 HABITAT.....	84
Scheda n. 12 - <i>Posidonia oceanica</i> : limite superiore delle praterie.....	84
Scheda n. 13 - <i>Posidonia oceanica</i> : impiego integrato di UAS e ASV.....	87
Scheda n. 14 - <i>Posidonia oceanica</i> : banquettes.....	89
2.2 BIODIVERSITA'.....	91
Scheda n. 15 – Avifauna acquatica.....	91
2.3 IMPIANTI.....	94
Scheda n. 16 - Acquacoltura.....	94
2.4 MORFODINAMICA.....	96
Scheda n. 17 - Morfologia e linea di costa.....	96
Scheda n. 18 - Ambienti dunali.....	99
2.5 INQUINAMENTO.....	101
Scheda n. 19 - Sversamento idrocarburi.....	101
Scheda n. 20 - Rifiuti plastici.....	104
3 AMBIENTE ANTROPIZZATO.....	106
3.1 CONTROLLI.....	106
Scheda n. 21 - Processi produttivi e impianti.....	106
Scheda n. 22 - Gestione dei rifiuti.....	107
Scheda n. 23 - Cave.....	110

Scheda n. 24 - Operazioni di svaso delle dighe	112
3.2 EMERGENZE	114
Scheda n. 25 - Sversamenti in corpi idrici superficiali	114
Scheda n. 26 - Incendi e abbruciamenti in ambito industriale o urbano	116
3.3 AGENTI FISICI	118
Scheda n. 27 - Luminanza (ambiente notturno)	118
Scheda n. 28 - Livello di campo elettrico a radio frequenza	120
3.4 ARIA	122
Scheda n. 29 - Qualità dell'aria	122

LE APPLICAZIONI TEMATICHE

Le tecniche di osservazione da UAS aprono nuove possibilità di monitoraggio sia dal punto di vista geometrico (altissima risoluzione) sia sotto l'aspetto informativo (qualità e tipologia di dati), massimizzandone l'efficacia. Possono essere utilizzati in modo indipendente o a integrazione di altre misure o osservazioni, *remote* o *ground-based*. A seconda dell'obiettivo specifico, del tipo e dinamica del fenomeno da monitorare e delle caratteristiche del sito si utilizzano tecniche, strumenti e metodologie di monitoraggio differenti (tabella 1).

In ambiente terrestre, gli UAS, equipaggiati con camere RGB e multispettrali, sono impiegati per il monitoraggio della superficie e dello stato di conservazione degli habitat, nonché per il monitoraggio di eventi impattanti, quali incendi o fitopatie forestali, anche grazie alla flessibilità nel momento di acquisizione in funzione dello stadio fenologico e, mediante l'uso di sensore LiDAR, per la possibilità di descrivere dettagliatamente la struttura della vegetazione.

L'impiego nel campo della morfologia fluviale è finalizzato al monitoraggio dello stato e della dinamica dell'alveo, come nel caso della valutazione degli impatti e la gestione dei sedimenti a seguito di eventi estremi, trattandosi di sistemi caratterizzati da elevata flessibilità di uso in contesti morfologicamente complessi e/o con diffusa vegetazione.

Per lo studio dei fenomeni franosi, colate detritiche, crolli in roccia, deformazioni e dissesti di versante, ad integrazione dei metodi geotecnici tradizionali e delle tecniche remote quali interferometria radar, il drone viene applicato per la realizzazione di sopralluoghi in aree inaccessibili o pericolose e per l'analisi multi-temporale pre e post-evento, anche a supporto del sistema di Protezione Civile.

In territorio montano, la ricostruzione tridimensionale delle valanghe effettuata tramite UAS consente di delimitare le aree di deposito, stimare i volumi di neve accumulati e, più in generale, rilevare gli elementi caratteristici di ogni singolo evento, analizzarne la dinamica, calibrare e validare la modellistica di propagazione. Similmente, per il monitoraggio dell'evoluzione dei ghiacciai e della degradazione del permafrost i droni integrano le tecniche più tradizionali con vantaggi significativi per la riduzione dell'esposizione degli operatori ai rischi in ambiente impervio e la possibilità di ottenere dati distribuiti nei bacini di alta quota.

In ambiente marino-costiero, vengono impiegati per la mappatura ed il monitoraggio delle praterie di *Posidonia oceanica*, in acque molto basse e con elevata trasparenza, prevalentemente mediante fotogrammetria e recentemente anche con la tecnica *Full Motion Video* (FMV), mediante interpretazione ed analisi dei video in ambiente GIS. Possono essere monitorate anche le *banquettes*, cioè gli accumuli dei residui della pianta sulla terra ferma.

L'impiego di UAS trova inoltre applicazione in attività finalizzate alla pianificazione, monitoraggio e controllo dei siti di acquacoltura, in acque dolci e marine.

L'analisi della morfodinamica costiera e dell'evoluzione degli elementi naturali e antropici può beneficiare di DTM e ortomosaici ad altissima risoluzione ottenuti attraverso tecniche di fotogrammetria da UAS o tramite dati LiDAR. Particolare interesse riveste il monitoraggio dei sistemi dunali, con quantificazioni plano-altimetriche abbinate alla mappatura degli habitat naturali o all'analisi di pressioni antropiche quali, ad esempio, quelle derivanti dal trasporto dei rifiuti sulla costa da parte delle correnti marine (*marine litter*).

La ricerca e il monitoraggio di sversamenti di idrocarburi in mare, nella gestione delle situazioni emergenziali e post-emergenza, può essere ottimizzata grazie ad uno strumento a rapido dispiegamento e basso costo operativo, capace di lavorare sia con decollo da terra che da imbarcazione, in grado di spingersi in aree difficilmente raggiungibili e, qualora si utilizzino delle termocamere, idoneo anche in condizioni di scarsa visibilità.

Nelle attività connesse al monitoraggio della biodiversità animale, come l'avifauna, l'impiego di UAS rappresenta un sensibile miglioramento nella capacità di osservazione in ambienti a difficile percorribilità ed ecosistemi ad elevata sensibilità, quali canneti, zone umide, saline e lagune, riducendo i tempi di accesso e di sosta (interferenze), consentendo il riconoscimento delle unità di interesse, valutazioni circa la distribuzione spaziale e analisi sul comportamento di individui e popolazioni.

Nella vigilanza ambientale e controllo i droni permettono di monitorare processi produttivi e impianti soggetti ad Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA), mappare discariche, con stima delle volumetrie e delle quote massime di conferimento, identificare eventuali punti di fuga di biogas nonché definire lo stato dei luoghi di stoccaggio illegale dei rifiuti.

Per quanto riguarda le attività estrattive è possibile effettuare verifiche delle variazioni plano-altimetriche e stime volumetriche di elevata precisione, con costi e tempi ridotti rispetto ad altri metodi di misura, garantendo inoltre maggiore sicurezza agli operatori e fornendo elementi a supporto della pianificazione delle attività di coltivazione e del monitoraggio delle azioni di rinaturalizzazione.

L'impiego di sensori specifici, come termocamere, rappresenta una metodologia promettente per il monitoraggio esteso ed efficace dei corpi idrici superficiali e l'individuazione di scarichi abusivi.

Sperimentazioni sono in atto anche per la misura della luminanza, consentendo un controllo mirato, veloce ed accurato di tutte le fonti di inquinamento luminoso notturno. Inoltre, in ambienti urbanizzati, vengono effettuate misure speditive del campo elettrico a radio frequenza per la verifica dell'osservanza dei limiti di esposizione della popolazione e al fine di identificare potenziali criticità da approfondire con misurazioni condotte secondo protocolli standard.

Tabella 1: Ambiti tematici applicativi nell'uso di droni nel SNPA.

Ambito	Dominio applicativo	Tematismo	Numero scheda	Contributo alla scheda (ISPRA/ARPA)
Terrestre	Coperture	Habitat terrestri	1	Valle d'Aosta
		Foreste: incendi boschivi	2	Lombardia, Valle d'Aosta
		Foreste: fattori perturbanti biotici e abiotici	3	Lombardia, Valle d'Aosta
		Morfologia fluviale	4	Lombardia
		Dinamica idromorfologica	5	ISPRA
	Dissesti	Frane	6	Lombardia
		Colate detritiche	7	Valle d'Aosta
		Scenari emergenziali complessi da disastri naturali	8	ISPRA
		Valanghe	9	Valle d'Aosta, Veneto
	Criosfera	Ghiacciai	10	Valle d'Aosta
		Permafrost	11	Valle d'Aosta
Marino, marino-costiero e lagunare	Habitat	<i>Posidonia oceanica</i> : limite superiore delle praterie	12	Puglia
		<i>Posidonia oceanica</i> : impiego integrato di UAS e ASV	13	ISPRA
		<i>Posidonia oceanica</i> : banquettes	14	ISPRA
	Biodiversità	Avifauna acquatica	15	ISPRA
	Impianti	Acquacoltura	16	ISPRA
	Morfodinamica	Morfologia e linea di costa	17	Emilia-Romagna, Toscana, ISPRA
		Ambienti dunali	18	Emilia-Romagna, Toscana
	Inquinamento	Sversamento idrocarburi	19	Friuli Venezia Giulia, Sardegna, ISPRA
Rifiuti plastici		20	Toscana, Liguria, Puglia	
Ambiente antropizzato	Controlli	Processi produttivi e impianti	21	ISPRA
		Gestione dei rifiuti	22	Lombardia, Emilia-Romagna, Liguria
		Cave	23	Toscana
		Operazioni di svaso delle dighe	24	Lombardia
	Emergenze	Sversamenti in corpi idrici superficiali	25	Sardegna
		Incendi e abbruciamenti in ambito industriale o urbano	26	Emilia-Romagna
	Agenti fisici	Luminanza (ambiente notturno)	27	Veneto
		Livello di campo elettrico a radio frequenza	28	Valle d'Aosta
	Aria	Qualità dell'aria	29	Emilia-Romagna

1. AMBITO TERRESTRE

1.1 COPERTURE

Scheda n. 1 - Habitat terrestri

Finalità

L'estensione degli habitat (superficie) è uno dei parametri fondamentali indicati da ISPRA (Manuali per il monitoraggio di specie e habitat di interesse comunitario in Italia: Direttiva 92/43/CEE Habitat) per la valutazione del loro stato di conservazione e per la conseguente individuazione di specifici obiettivi e misure di conservazione. Pertanto, la verifica periodica della superficie occupata dall'habitat permette di valutarne la stabilità nel tempo oppure di individuare eventuali processi di contrazione o espansione, anche in risposta a pressioni negative in atto. Lo stesso manuale individua nella fotointerpretazione da immagini aeree o satellitari lo strumento preferenziale per la delimitazione degli habitat e per una loro accurata restituzione cartografica. Le nuove tecniche di osservazione di prossimità, basate su riprese aeree da UAS, aprono nuove possibilità di monitoraggio sia dal punto di vista geometrico (altissima risoluzione), sia sotto l'aspetto semantico (qualità e tipologia di informazione), massimizzando l'efficacia dell'osservazione, soprattutto per gli habitat caratterizzati da superfici estremamente ridotte o in formazioni a mosaico. Di rilevante e recente interesse è l'uso di LiDAR da UAS per la descrizione della struttura verticale della vegetazione (habitat forestali pluristratificati o disetanei e formazioni ecotonali o di macchia).

Metodologia di rilievo e strumentazione

Il rilievo degli habitat naturali e semi-naturali dei siti di interesse è realizzato con modalità differenti a seconda dell'obiettivo e della tipologia di ecosistemi. Frequentemente gli UAS, equipaggiati con camere RGB, multispettrali o con sensore LiDAR, sono utilizzati per la mappatura di elementi specifici per i quali l'elevata risoluzione geometrica o la possibilità di penetrare la *canopy* vegetale, rappresentano il valore aggiunto rispetto ad altre metodologie, così come la flessibilità nel periodo di acquisizione, che può tenere conto, ad esempio, della fenologia delle diverse formazioni. Nel caso di rilievi effettuati per la mappatura degli habitat, basati su fotocamere nel visibile o multispettrale (in particolare dotate di canali nel *Near Infrared* o nel *Red-Edge*), è opportuno scegliere con cura il periodo ottimale (presenza/assenza di foglie, colore delle chiome, ...) per massimizzare la capacità di discriminazione delle comunità o forme di interesse. Generalmente si opera a quota variabile da 40 a 120 m, con missioni automatiche, quota di volo relativa costante e sovrapposizione laterale mai inferiore a 70%. Ove vi fosse predominanza di strutture vegetali allineate (es. vegetazione perfluviale) occorre prestare attenzione all'orientamento delle strisciate in modo da ridurre la difficoltà nella ricostruzione degli strati inferiori. Sono inoltre da evitare giornate ventose che, modificando la geometria degli oggetti, possono compromettere la qualità del rilievo. Per l'impiego di sensore multispettrale, sono da prevedere rilievi con ottimo irraggiamento solare ed ombre ridotte e con GSD > 5cm/px.

Viceversa, il sensore LiDAR è utilizzato, eventualmente accoppiato a RGB, per la caratterizzazione della struttura della vegetazione e la descrizione accurata dei diversi piani (erbaceo, arbustivo e arboreo – dominato/dominante).

Elaborazione e output

I dataset ottici (RGB e MS) sono elaborati tramite le classiche tecniche della fotogrammetria aerea per ottenere DSM, ortomosaici e mappe di indice, mentre le acquisizioni LiDAR restituiscono direttamente nuvole di punti. Di rilevante interesse la possibilità di impiego dei rilievi UAS ad integrazione di analisi basate su immagini satellitari.

Tipologie di analisi

Gli output ottenuti dai rilievi UAS sono utilizzati per produrre mappe di habitat funzionali al monitoraggio della loro evoluzione o degrado e per supportare le valutazioni sulla stabilità ecologica degli ecosistemi. L'analisi multi-temporale dei diversi dataset (es. mappe di indice) consente di evidenziare anomalie strutturali degli habitat e, in alcuni casi, variazioni funzionali delle diverse componenti degli ecosistemi.

Figura 1: ZSC/ZPS IT1205070 - Les Iles di Saint-Marcel (Saint-Marcel, AO). Evoluzione dei canneti a cannuccia di palude (*Phragmites*) nel 2015 (a sx, su base ortomosaico IR falsi colori), 2020 (centro) e 2021 (a dx).



Figura 2: ZSC/ZPS IT1205070 - Les Iles di Saint-Marcel (Saint-Marcel, AO). Incremento di superficie del fragmiteto dal 2015, derivata dalla mappatura UAS del sito.

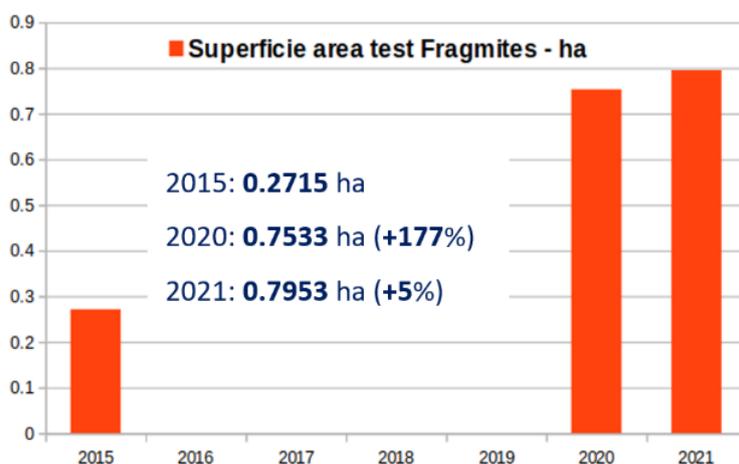


Figura 3: fenomeni di ricolonizzazione (ingressione di arbusti) di prateria alpina (Torgnon, AO). Valutazione di diverse tecniche di classificazione basate su ortomosaici UAS: (a) immagine originale a 1 cm/px, (b) fotointerpretazione manuale, (c) classificazione *pixel-based*, (d) classificazione *object-based*.

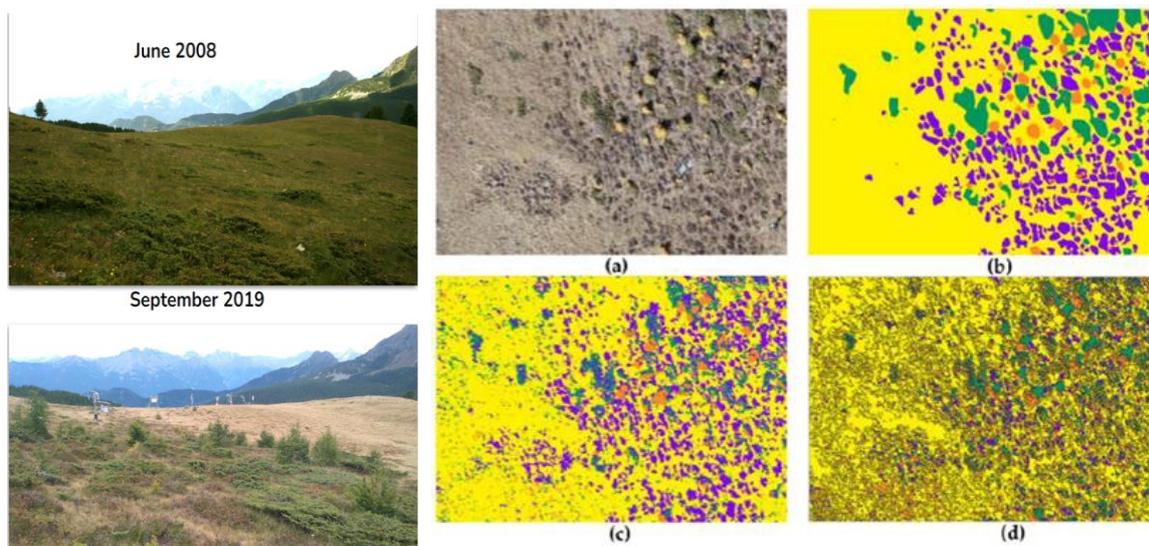
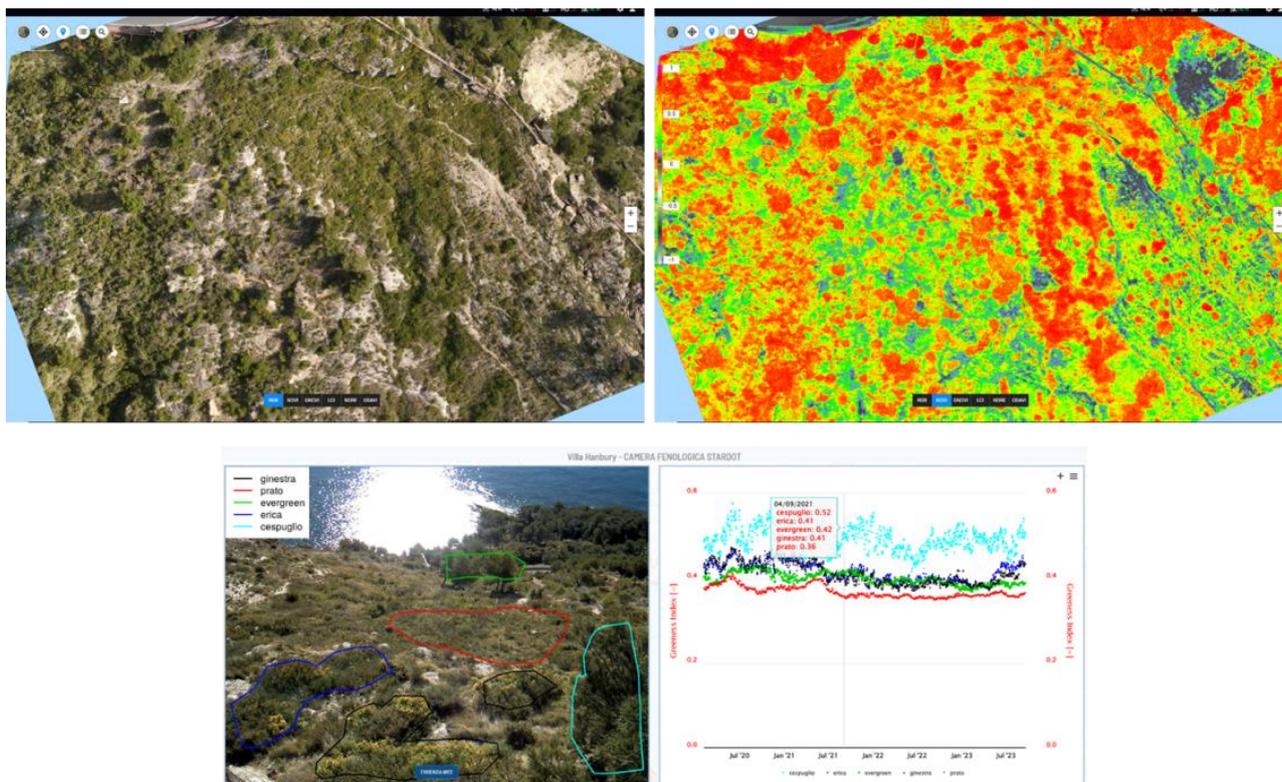


Figura 4: i dati acquisiti con LiDAR forniscono una dettagliata descrizione della struttura delle formazioni vegetali e permettono di derivare i principali parametri dendrometrici dei soprassuoli forestali (altezza delle piante, diametro delle chiome, diametro dei tronchi). Il monitoraggio di tali variabili consente di analizzare in modo distribuito ampie superficie e rappresenta un ottimo supporto per il controllo del territorio e degli ecosistemi terrestri.



Figura 5: SIC IT1316118 - Capo Mortola (Ventimiglia, IM). Caratterizzazione della copertura vegetale (da ortomosaico RGB – in alto a sx - e mappa di indice NDVI – in alto a dx) a supporto della perimetrazione degli habitat. Il monitoraggio regolare dello stato della vegetazione, tramite phenocam automatiche (in basso) le cui target region sono definite anche sulla base della mappatura degli habitat, consente di tracciare l'andamento fenologico delle diverse componenti l'ecosistema e rilevare anomalie stagionali.



Scheda n. 2 - Foreste: incendi boschivi

Finalità

L'ambito applicativo riguarda la valutazione dell'impatto degli incendi boschivi sulle foreste, indipendentemente dalla causa di origine e come elemento di disturbo della stabilità strutturale ed ecologica dei boschi. Inoltre, le aree percorse dal fuoco sono facilmente soggette a problematiche secondarie quali schianti, patologie e fenomeni di erosione del suolo. L'input per effettuare tali rilievi a scala locale con UAS può derivare da analisi multi-temporali delle anomalie condotte periodicamente a più ampia scala (tipicamente su base satellitare), oppure a seguito di specifiche richieste da altri Enti o a seguito di situazioni di criticità.

Metodologia di rilievo e strumentazione

La tipologia di drone ottimale per questa applicazione varia molto a seconda dell'estensione e della morfologia dell'area e della tipologia di acquisizione necessaria. Generalmente gli UAS utilizzati più frequentemente sono di tipo multirottore (Dji Phantom 4 RTK, Dji Matrice 210 RTK, Dji Matrice 350 RTK), soprattutto per la maggiore flessibilità nell'esecuzione dei rilievi in contesti morfologicamente complessi (elevati dislivelli e pendenze o pareti verticali). Per rilievi su aree forestali particolarmente estese sono preferibili i droni ad ala fissa, ovviamente laddove le condizioni operative lo consentano.

Generalmente i sensori più utilizzati sono camere digitali RGB, per applicazioni di tipo aerofotogrammetrico tradizionale. In alcuni casi sono effettuati rilievi anche con camere multispettrali, utili per enfatizzare i diversi livelli di impatto sulla vegetazione o con sensore LiDAR per la caratterizzazione della struttura dell'ecosistema post-evento.

L'attività non richiede un accurato posizionamento, per cui generalmente l'impiego del solo GNSS di navigazione è sufficiente per garantire una adeguata georeferenziazione dei prodotti cartografici finali. Nei casi in cui sia necessario un posizionamento più accurato, la possibilità di acquisire dati nativamente corretti con sistemi RTK esclude la necessità di una rete di appoggio a terra, la cui misura risulta particolarmente difficoltosa in contesti forestali. In casi di assenza di servizi di posizionamento nRTK, garantiti da connettività Internet, è possibile utilizzare una antenna GNSS esterna per la correzione del dato.

Si consideri infine il rilevante supporto fornito dagli UAS per il supporto in corso di evento: la possibilità di ottenere informazioni dettagliate da un punto di vista privilegiato e dotato di elevata versatilità è di particolare efficacia per la Direzione delle Operazioni di Spegnimento che possono ottenere, rapidamente e in totale sicurezza, informazioni sullo scenario operativo, ed organizzare al meglio le azioni di lotta attiva, di presidio e di bonifica.

Elaborazione e output

I prodotti tipici dei rilievi di queste applicazioni sono ortomosaici nelle bande RGB o mappe di indici di vegetazione, DSM, DTM, derivati tramite aerofotogrammetria, o attraverso rilievi LiDAR. Le successive fasi di analisi dei dati cartografici prodotti vengono svolte in ambiente GIS.

Tipologie di analisi

Le applicazioni tipiche riguardano la valutazione locale dei danni provocati dall'incendio sul soprassuolo forestale e sugli altri comparti dell'ecosistema (strati arbustivi ed erbaceo, esposizione del suolo) ovvero supportare il monitoraggio di azioni di ripristino o le dinamiche di *recovery* naturale. I dati ad alta risoluzione derivati da rilievi UAS integrano e migliorano quanto evidenziato da analisi a più ampia scala (es. da analisi satellitare): in questi casi, in cui le anomalie rilevabili da satellite si possono esprimere spesso solo in termini qualitativi, i rilievi da drone possono fornire contributi efficaci nella quantificazione del danno (es. mortalità percentuale in specifici areali), nel riconoscimento delle tipologie maggiormente impattate o nella valutazione della ripresa della vitalità dell'ecosistema dopo l'evento. Particolarmente utile è l'uso di prodotti ad alta risoluzione geometrica ed acquisiti in specifici periodi del ciclo vegetativo per la discriminazione dei contributi dei diversi piani di vegetazione al segnale rilevato dai satelliti, per distinguere ad esempio il ricaccio di fogliame dallo strato arboreo dallo sviluppo vigoroso del cotico erboso stimolato dal passaggio del fuoco.

Rilievi da UAS multi-temporali, adeguatamente co-registrati, consentono inoltre analisi delle variazioni dello stato dei popolamenti forestali e della loro biomassa.

Figura 6: mappa di danno percentuale stimato su tutta l'area colpita dall'incendio nel Parco Regionale del Campo dei Fiori (VA), risultante dall'elaborazione delle immagini da satellite, calibrate con i rilievi locali da drone.

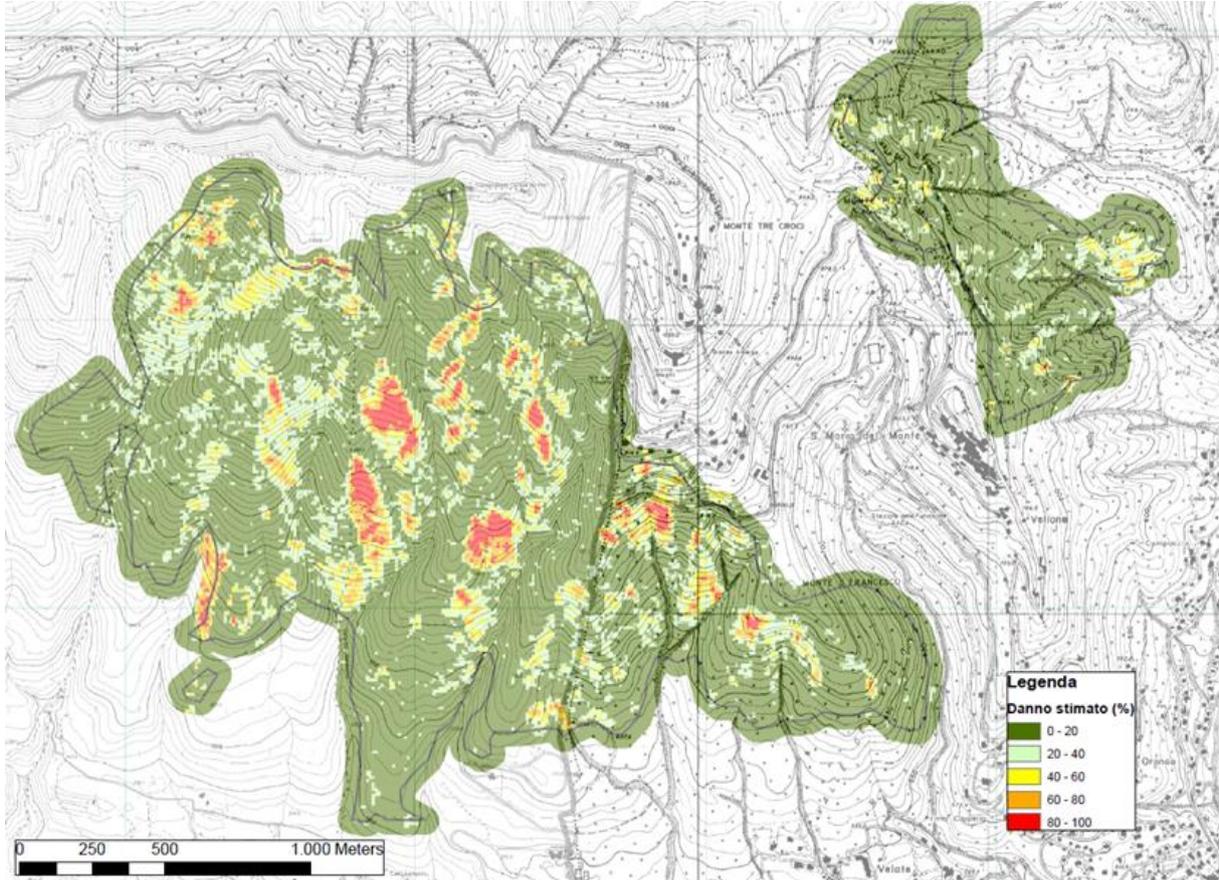


Figura 7: esempio relativo alle analisi post-evento degli incendi forestali al Parco Regionale del Campo dei Fiori (VA) con integrazione di monitoraggio dei disturbi della vegetazione sia a scala satellitare che con rilievi locali da drone. A sinistra, mappa di anomalia di vegetazione (differenza di NDVI) da Sentinel-2 di Copernicus all'interno delle aree percorse da incendio (poligoni nero). La mappa tematica esprime in colori convenzionali la differenza dell'indice di vegetazione in periodi fenologici confrontabili pre-post incendio. A destra, areali oggetto di approfondimento con UAS caratterizzati da diverso livello di danno.

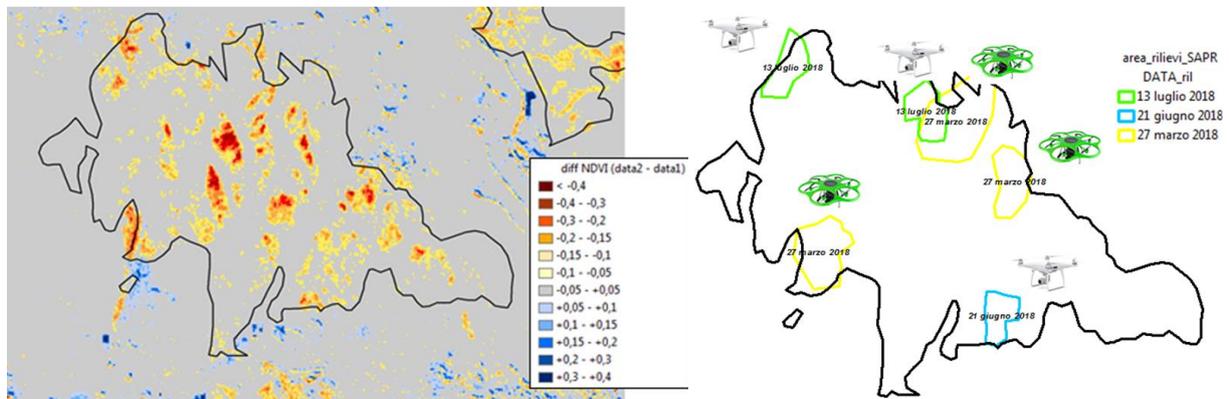


Figura 8: oltre alla mappatura dell'area percorsa dal fuoco, gli UAS (equipaggiati con camere RGB o con sensore termico) consentono di acquisire la posizione del fronte di fiamma in modo ripetuto durante l'evento, dato fondamentale per la validazione dei modelli di propagazione del fuoco, impiegati a supporto delle attività di estinzione (a dx, run del simulatore PROPAGATOR in Comune di Spotorno, SV).

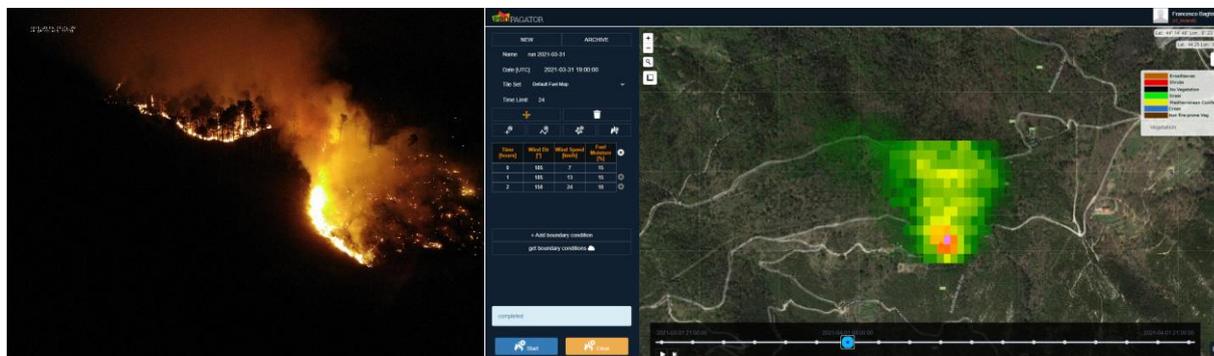
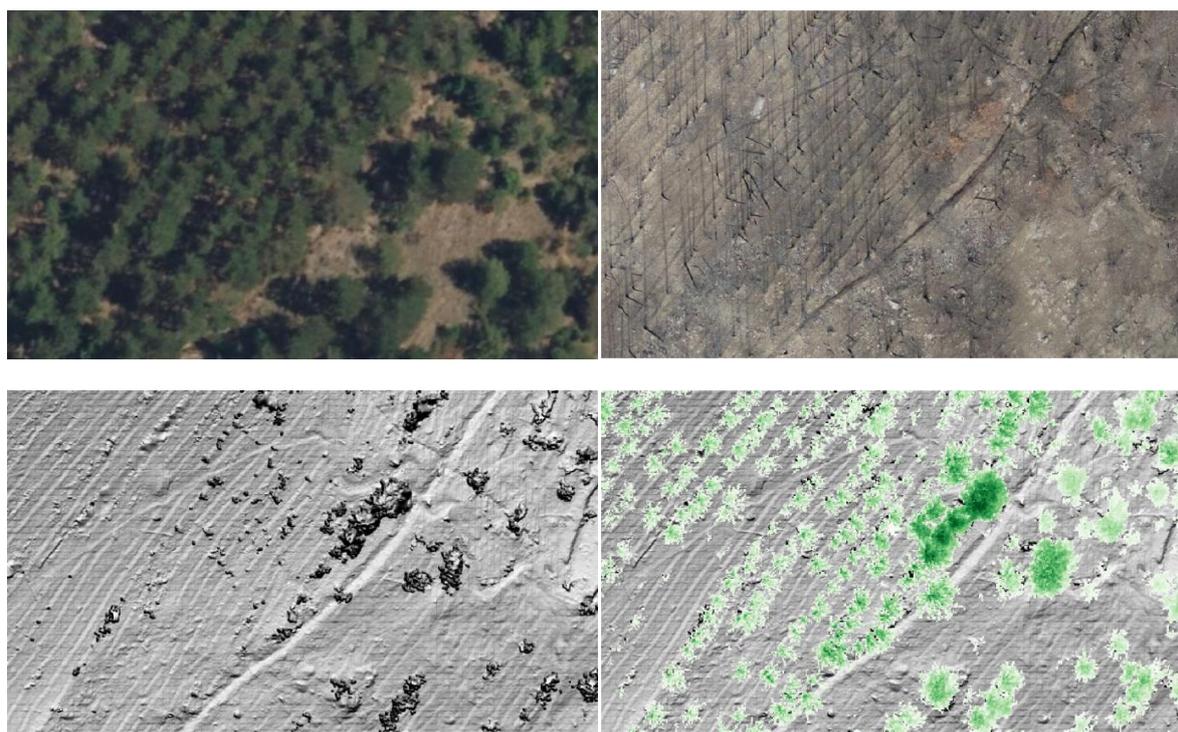


Figura 9: incendio di Aymavilles, AO, luglio 2023. Mappatura dell'area, valutazione della copertura residua e delle priorità di intervento e di ripristino sulla base di prodotti derivati da rilievi UAS. In alto: (a sx) lo stato dei luoghi prima dell'evento (ortomosaico AGEA, 2023), (a dx) post evento (ortomosaico a colori UAS, dicembre 2023). In basso: (a sx) DSM (10 cm/px) derivato da elaborazione fotogrammetrica, (a dx) Canopy Height Model ottenuto da rilievo LiDAR.



Scheda n. 3 – Foreste: fattori perturbanti biotici e a biotici

Finalità

Il monitoraggio dei fattori perturbanti la stabilità o la dinamica evolutiva degli habitat naturali e semi-naturali si avvantaggia delle tecniche di osservazione remota basate sull'impiego di UAS. Gli impatti generati dalle fonti di pressione, infatti, possono determinare variazioni più o meno evidenti di alcune caratteristiche degli ecosistemi: riduzione della densità di copertura, variazioni della superficie di un habitat per asportazione o distruzione di parte di esso, decolorazioni o disseccamenti, modifiche strutturali, ...

I rilievi basati sull'uso di droni consentono di valutare questi cambiamenti beneficiando della produttività, della esaustività e della risoluzione del metodo e possono essere utilizzati in modo indipendente o ad integrazione di altre misure o osservazioni, *remote o ground based*.

Metodologia di rilievo e strumentazione

La scelta della strumentazione e della metodologia di rilievo è fortemente influenzata dal fenomeno che occorre indagare e da come questo interferisca con le caratteristiche strutturali e funzionali degli habitat. Gli UAS, inoltre, sono particolarmente adatti nel caso in cui (i) occorra una risoluzione geometrica elevatissima (da pochi cm fino a un metro) e (ii) sia importante acquisire le informazioni in momenti specifici, rispetto alla fenologia di specie o formazioni di interesse. Altre tecniche di telerilevamento, infatti, basate su piattaforme aeree, satellitari o da elicottero, mostrano limitazioni oppure richiedono risorse economiche significative per il loro impiego. Per gli eventi che impattano a scala macroscopica, quali gli incendi o le fitopatie forestali, generalmente si impiegano fotocamere RGB o sensori multispettrali (con bande nel *Near InfraRed* o *Red Edge*), più raramente iperspettrali o termici, montati su velivoli multirotori o ad ala fissa per acquisizioni nadirali. Per il rilievo di vegetazione arborea (es. foreste vetuste) occorre attentamente considerare la geometria di acquisizione (quota relativa di volo, inclinazione della camera e sovrapposizione delle immagini) e prevedere di effettuare il rilievo in condizioni ambientali adatte (per lunghezza delle ombre e ventosità). I sensori LiDAR, infine, sono insostituibili per il rilievo e la caratterizzazione della struttura orizzontale e verticale degli ecosistemi. In tal caso la missione dovrà essere pianificata per ottenere una nuvola di punti con elevata densità, assenza di "ombre" e ridotta rumorosità. La georeferenziazione del rilievo è un aspetto da considerare con attenzione soprattutto qualora i rilievi debbano essere ripetuti nel tempo e sia necessario poter confrontare lo stato degli habitat a distanza di tempo.

Elaborazione e output

Le immagini RGB e multispettrali sono elaborate con la tecnica fotogrammetrica per ottenere ortomosaici RGB, DSM e mappe di indici di vegetazione (tipicamente NDVI, SAVI, EVI, ...). Le nuvole di punti derivate da acquisizioni LiDAR, a valle delle fasi di pre-pocessamento comuni a tutte le applicazioni, vengono elaborate con specifici algoritmi per la classificazione dei diversi oggetti e per l'estrazione delle informazioni di interesse. Tipicamente si applicano tecniche di segmentazione per l'individuazione dei singoli oggetti (es. alberi) e per l'individuazione di specifiche categorie di elementi nello spazio tridimensionale.

Tipologie di analisi

Il monitoraggio degli impatti a carico degli habitat si realizza confrontando lo stato pre e post-evento ovvero si ricercano parametri correlabili a variazioni funzionali o strutturali dell'ecosistema. In caso di impatti evidenti (schianti, frane superficiali, ...) è spesso sufficiente analizzare le differenze sulla base di ortomosaici RGB, DSM o mappe di indice e, attraverso fotointerpretazione manuale o tecniche di classificazione e/o segmentazione, evidenziare i cambiamenti. Con l'avvento delle tecniche di AI è ora possibile velocizzare e migliorare tale processo. Per il riconoscimento precoce di fitopatie o la valutazione di variazioni strutturali gli UAS possono essere vantaggiosamente impiegati per calibrare algoritmi di classificazione e analisi di immagini satellitari.

Figura 10: deperimento e disseccamento di pinete montane di pino silvestre (Pollein, AO). I dati UAS ad alta risoluzione (a sx ortomosaico RGB, a dx mappa di NDVI derivato da rilievo UAS MS) consentono di validare metodologie di analisi basate su dati satellitari (es. NDVI da Sentinel2 del Programma EU Copernicus) per una applicazione a larga scala. In blu foresta sana, in rosso, soggetti deperiti. Tonalità intermedie evidenziano la transizione fra i due estremi.

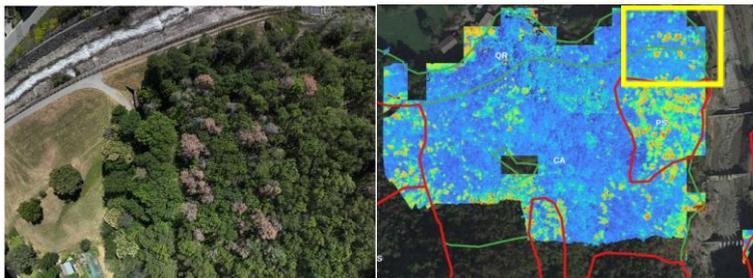


Figura 11: i rilievi UAS (a sx) rappresentano la verità a terra utilizzata per valutare la capacità di detection del fenomeno attraverso l'uso di prodotti/immagini satellitari ad altissima (al centro, immagini Planet a 3 m/px) e ad alta risoluzione (a dx, Sentinel2 a 10 m/px). Lo studio si basa sull'analisi di anomalie a scala mensile di NDVI da Sentinel2 per ridurre l'effetto dello sviluppo fenologico sul segnale.

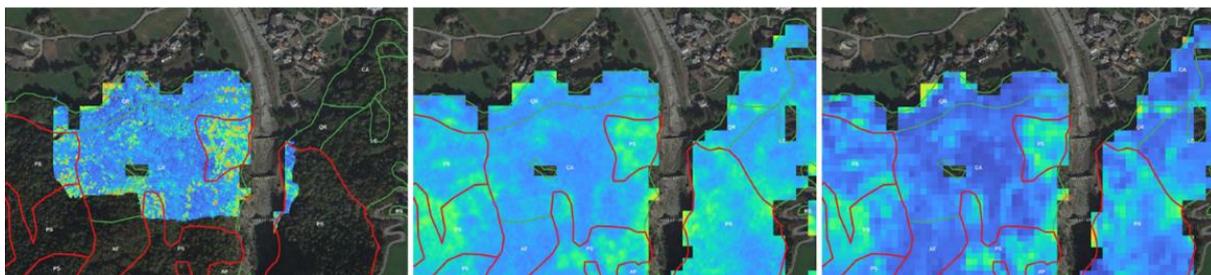


Figura 12: esempio di rilievo da drone ad ala fissa (Valtrompia, BS), con evidenziata la traiettoria e i punti di scatto, in una vasta area forestale con estesi danneggiamenti a seguito della tempesta Vaia. L'areale di rilievo fu selezionato anche sulla base dell'analisi delle anomalie vegetazionali risultanti da analisi satellitari (identificati con i poligoni arancioni sovrapposti alla mappa di base).

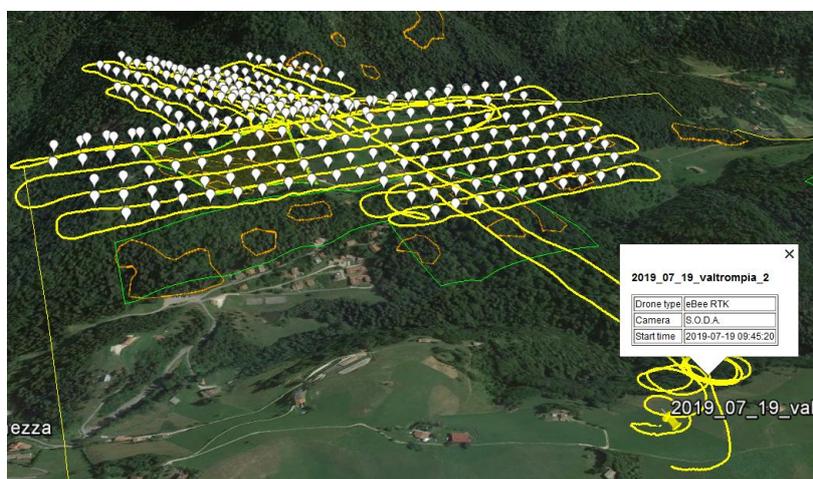


Figura 13: esempio di prodotto cartografico e analisi del rilievo da drone ad ala fissa (Valtrompia, BS) in una vasta area forestale con estesi danneggiamenti a seguito della tempesta Vaia. Si riporta una porzione estratta dall'ortomosaico realizzato (con risoluzione a terra 3 cm), con identificazione di areali forestali con diverso livello di impatto.



Scheda n. 4 - Morfologia fluviale

Finalità

Le attività basate sull'impiego di UAS nel campo della morfologia fluviale sono indirizzate al monitoraggio e quantificazione dello stato e delle modifiche plano-altimetriche dell'alveo, ad esempio a seguito di eventi di piena eccezionale, anche ai fini di valutazioni connesse al rischio idraulico residuo.

Oggetto dell'attività sono soprattutto i torrenti montani interessati da elevato trasporto solido, a rapida dinamica di apporto o rimozione dei sedimenti, con ridotte porzioni di alveo bagnato in gran parte dell'anno.

Metodologia di rilievo e strumentazione

Per questo tipo di applicazioni sono in genere utilizzati UAS di tipo multirottore che forniscono un'ottima flessibilità nell'esecuzione di rilievi in contesti morfologicamente articolati quali i fondovalle montani e/o con consistente vegetazione spondale. Nel caso di lunghi tratti fluviali, quando le condizioni orografiche e di sicurezza lo permettono, sono impiegabili anche velivoli ad ala fissa.

Per applicazioni di tipo aerofotogrammetrico tradizionale sono utilizzate camere digitali RGB e sensori LiDAR, questi ultimi soprattutto al fine di determinare la dinamica della vegetazione in alveo e ricostruire al meglio il DTM sotto chioma.

Ove possibile il rilievo sfrutta la tecnica di correzione della posizione in tempo reale da rete (nRTK), eliminando la necessità di rilievi GNSS di appoggio a terra.

In caso di scarsa connettività Internet è tuttavia utilizzato un ricevitore esterno fisso per la correzione del dato in tempo reale o in modalità PPK. Per migliorare ulteriormente l'accuratezza altimetrica delle restituzioni, le misure sono ancorate a punti di appoggio di coordinate note, acquisiti con rilievi GNSS al suolo eseguite in corrispondenza di elementi artificiali appositamente posizionati (*marker*) o di manufatti fissi. Quest'ultima condizione è preferita in caso di analisi multi-temporale.

I rilievi sono svolti con modalità mista (volo automatico e manuale), con riprese a quota generalmente variabili da 50 metri (riprese nadirali) a 30 metri (in particolare per le riprese oblique). Non potendo ottenere dalla ricostruzione aerofotogrammetrica la morfologia del fondo bagnato, i rilievi sono di preferenza eseguiti durante i periodi di magra in cui la sezione bagnata è minima.

Elaborazione e output

I prodotti tipici dei rilievi di queste applicazioni sono: nuvole di punti, ortomosaici e DSM, tutti ottenuti tramite aerofotogrammetria. Rilievi multi-temporali, adeguatamente co-registrati, consentono (i) l'analisi delle variazioni idro-morfologiche e altimetriche degli alvei, (ii) l'analisi delle variazioni altimetriche su transeiti di interesse, (iii) le stime di variazioni del volume dei sedimenti in specifici tratti di interesse.

L'acquisizione di dati di elevato dettaglio su questa tipologia di torrente può essere connesso alla necessità di impostare un monitoraggio morfologico (evoluzione dell'andamento plano-altimetrico del corso d'acqua) e per la valutazione periodica della dinamica dei sedimenti, anche a supporto di piani di gestione delle Autorità di distretto. A tale scopo si realizzano rilievi successivi della porzione di interesse ponendo attenzione ad escludere periodi di morbida o di piena idrologica.

Tipologie di analisi

In relazione alla risoluzione geometrica e all'accuratezza di posizionamento, i rilievi UAS RGB consentono una valutazione periodica delle variazioni morfologiche in alveo, in particolare nelle porzioni di alveo non bagnato, una analisi della dinamica dei sedimenti e la stima locale o su aree più ampie dei volumi degli stessi a supporto di eventuali interventi di disalveo.

Figura 14: torrente Zebrù (Alta Valtellina, SO). Localizzazione dell'areale di interesse dei rilievi aerofotogrammetrici lungo la porzione terminale dell'alveo del torrente Zebrù.



Figura 15: esempio di transetto trasversale del Torrente Zebrù, con la restituzione dei profili altimetrici ottenuti da 6 rilievi aerofotogrammetrici successivi; l'immagine RGB riportata è l'ortomosaico relativo all'ultimo rilievo del settembre 2023. È evidente l'entità dell'erosione e del deposito che raggiunge anche i 2 m di spessore nei diversi periodi

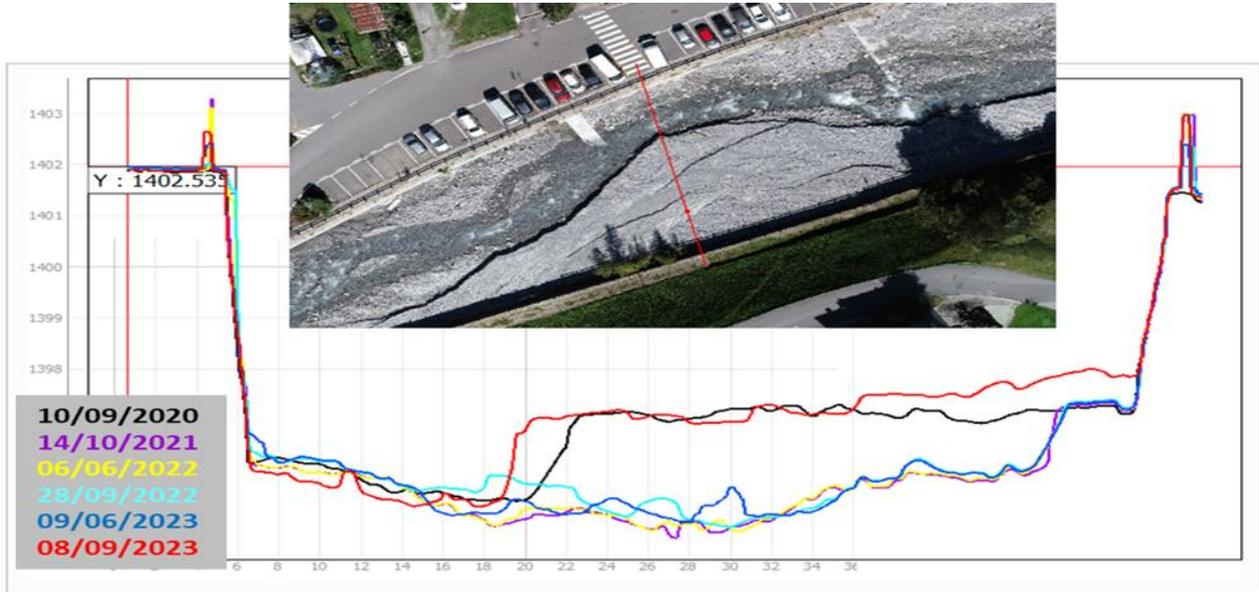
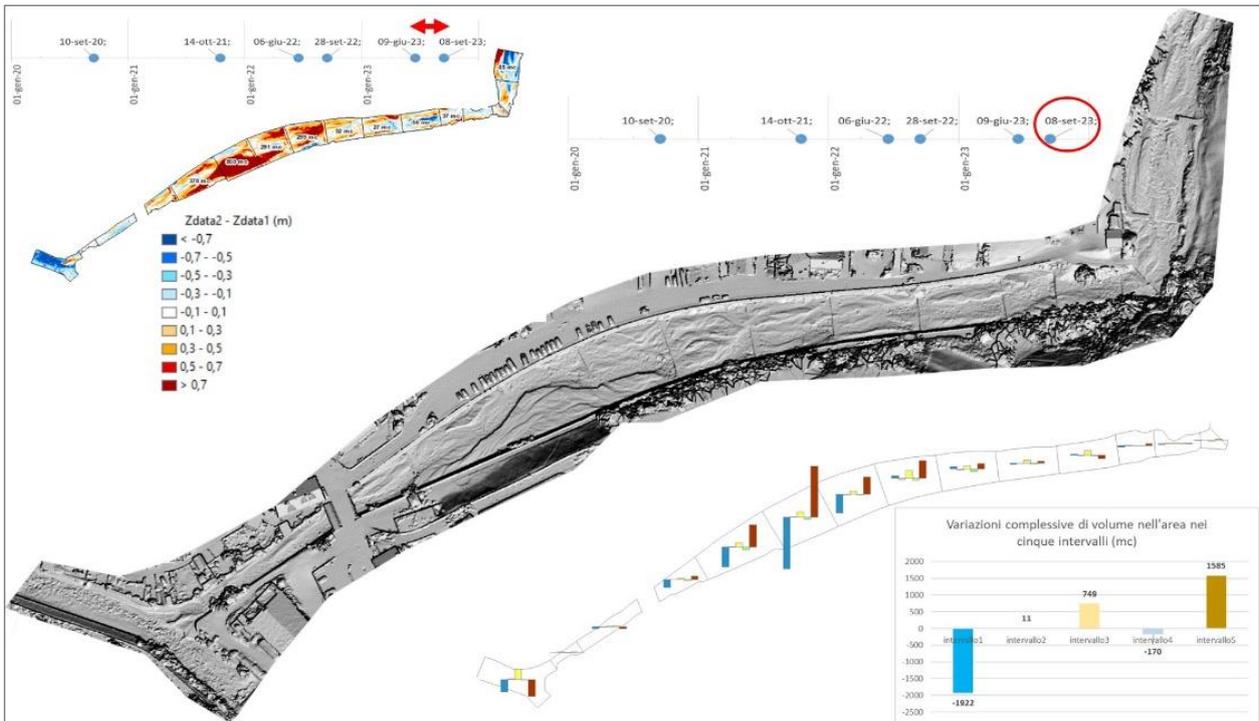


Figura 16: esempio di analisi multi-temporale sui dati cartografici prodotti a valle di rilievo UAS; l'immagine centrale rappresenta la mappa delle ombreggiature riferita al DSM dell'ultimo rilievo del 8/9/23; l'immagine in alto a sinistra rappresenta la differenza fra i due ultimi DSM (quote 8/9/23 meno quote 9/6/23), con quantificazione areale delle variazioni volumetriche (in m3) per singoli tratti; l'immagine in basso a destra visualizza la sintesi delle variazioni volumetriche complessive riferite ai cinque differenti intervalli di monitoraggio disponibili sull'area



Scheda n. 5 - Dinamica idromorfologica

Finalità

Nell'ambito del monitoraggio degli alvei fluviali gli UAS vengono impiegati per specifiche campagne di osservazione e a supporto dello sviluppo di prototipi di servizi operativi finalizzati alla valutazione dello stato e della dinamica morfologica dei corsi d'acqua, per la gestione dei sedimenti, e per la valutazione degli impatti degli estremi del ciclo idrologico (siccità e alluvioni), nel contesto della Direttiva Quadro Acque 2000/60/CE e della Direttiva Alluvioni 2007/60/CE. Le acquisizioni da UAS sono inoltre utilizzate per costruire dataset di verità a terra utilizzati nella calibrazione e validazione di algoritmi per la generazione, a partire da dati satellitari (es. Copernicus Sentinel-1 e Sentinel-2), di indicatori idromorfologici a supporto degli Enti territoriali preposti alla valutazione dello stato morfologico dei corpi idrici fluviali, secondo i protocolli nazionali.

Metodologia di rilievo e strumentazione

Per le attività di rilievo sono utilizzati velivoli multirotores con camera integrata, camere multispettrali e sistemi GNSS per misure topografiche che consentono di generare mappe con risoluzione centimetrica sui tratti fluviali da monitorare. Generalmente le aree di interesse, di estensione media di circa un kmq, sono coperte con rilievi a diverse quote (da 50 a 80 m) e con camera a diversa inclinazione, per mezzo di missioni automatiche. È sempre prevista la realizzazione di una rete di punti di appoggio a terra (10-15 punti), misurati con antenna GNSS; a questa rete si aggiunge un centinaio di "punti rapidi", acquisiti in modo speditivo. Per l'indagine granulometrica (*photoseiving*), le immagini UAS sono acquisite sulle barre di sedimento a bassa quota (5–20 m), con presenza a terra di un riferimento di scala.

Elaborazione e output

I dati acquisiti da UAS sono elaborati con i software fotogrammetrici convenzionali per ottenere il modello 3D ad alta precisione del tratto fluviale monitorato e generare, successivamente, DEM e ortomosaici e calcolare DoD. Sulla base degli ortomosaici, con procedura *expert-based*, si ottengono i raster di classificazione dell'alveo in termini delle tre macro-unità morfologiche canale bagnato, sedimenti e vegetazione. Tali raster sono impiegabili anche come verità a terra per la calibrazione e validazione degli algoritmi di *machine learning* sviluppati ed in corso di ingegnerizzazione operativa che consentono, a partire da dati satellitari (es. Copernicus Sentinel-1 e Sentinel-2), di generare mappe del corridoio fluviale classificato in termini di macro-unità. Dalle serie storiche di tali mappe, si ottengono mappe di frequenza delle tre classi e diagrammi utili per la creazione di indicatori secondo il protocollo nazionale IDRAIM - Sistema di valutazione idromorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d'acqua e per lo studio dei processi di dinamica morfologica. Il *photoseiving*, realizzato tramite software specifico (Basegrain), permette la classificazione della distribuzione granulometrica delle barre di sedimento rilevate con UAS.

Tipologie di analisi

Le mappe e gli indicatori derivati, integrati con informazioni da satellite, da dati in situ e da modellistica, forniscono utili informazioni sulle variazioni morfologiche dei corsi d'acqua, anche in seguito a eventi di piena o di siccità. Lo studio sull'impatto della recente siccità del Po in Piemonte ne è un esempio: confrontando la frequenza media delle tre macro-unità nel periodo siccitoso e negli anni precedenti è stato possibile osservare come nel 2022 il canale bagnato non si è mai espanso oltre il suo minimo e non si siano verificate piene, neanche di modesta entità. Inoltre, attraverso i diagrammi di distribuzione delle classi nel tempo e/o lungo l'asta fluviale si evidenziano le variazioni spazio-temporali del rapporto tra area delle unità sommerse e somma delle aree di unità sommerse e unità emerse: con rapporto pari a zero, l'alveo è asciutto; se è 1, le barre di sedimento sono completamente sommerse.

Figura 17: sulla base del DSM (a) e ortomosaico RGB (b) ottenuto da rilievo UAS si produce, per fotointerpretazione, la mappa delle macro-unità morfologiche del tratto analizzato: canale bagnato, sedimenti e vegetazione (c)

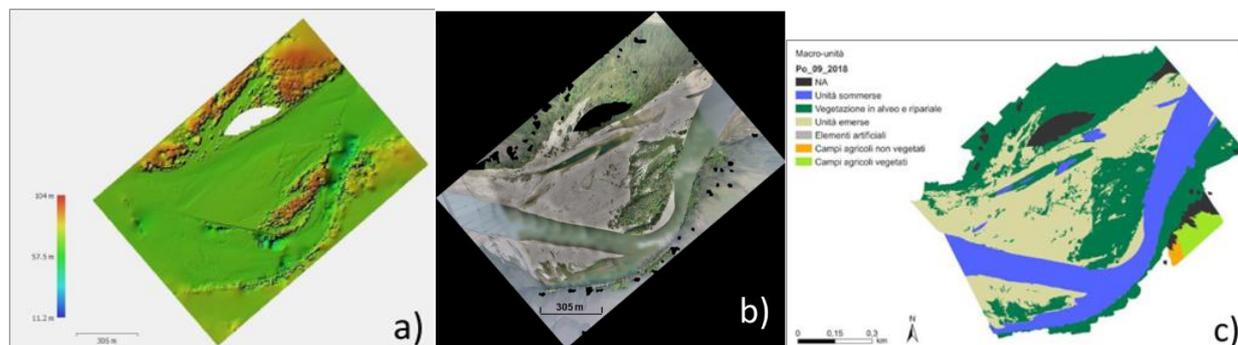
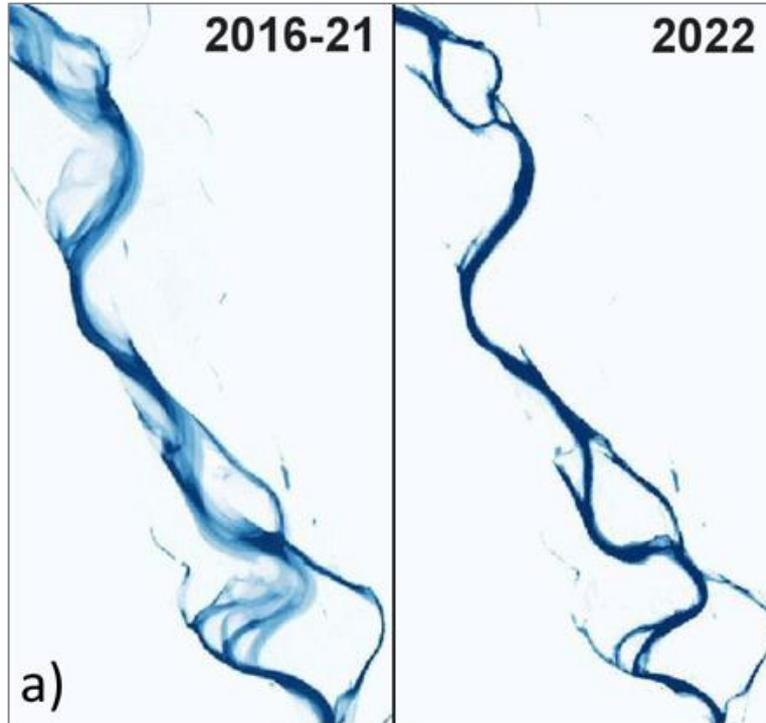


Figura 18: Mappe di frequenza del canale bagnato derivate da processore basato su acquisizioni UAS e dati da Copernicus Sentinel-2 sul tratto del Po tra Valmacca e Bozzole (AL): media dal 2016 al 2021 vs. media gennaio-luglio 2022.



1.2 DISSESTI

Scheda n. 6 – Frane

Finalità

L'uso di UAS per lo studio dei fenomeni franosi è da intendersi ad integrazione e completamento dei metodi tradizionali di monitoraggio geotecnico. Viene in genere applicato per la realizzazione di sopralluoghi in aree inaccessibili o pericolose, nell'analisi pre e post-evento, nel monitoraggio multi-temporale e nell'acquisizione di dati di input per la modellazione e lo studio dei fenomeni.

Le caratteristiche attuali dei velivoli e dei sensori ne consentono un impiego efficace per dissesti di piccole e medie dimensioni (normalmente su aree < 1 kmq) a seconda del contesto territoriale e della tipologia di fenomeno: colate detritiche, crolli in roccia, deformazioni e dissesti di versante, ecc. In alcuni casi il rilievo tramite UAS è realizzato per una valutazione preliminare del fenomeno e dei suoi impatti sul territorio, a supporto della progettazione e predisposizione di specifici sistemi di monitoraggio puntuale in situ o ad integrazione e a supporto di altre tecniche remote quali l'interferometria radar terrestre (PSInSAR).

Metodologia di rilievo e strumentazione

A seconda dell'obiettivo specifico, del tipo di dissesto, delle caratteristiche del sito e della dinamica da monitorare si utilizzano tecniche di monitoraggio differenti: generalmente sono utilizzati UAS multirotori (più raramente velivoli ad ala fissa, efficaci per monitorare dissesti estesi) equipaggiati con sensori RGB per il rilievo fotogrammetrico o sensori LiDAR, questi ultimi in aree con copertura vegetale significativa. In taluni casi è possibile utilizzare termocamere in grado di rilevare anomalie termiche della superficie riconducibili, soprattutto, alla circolazione dell'acqua (es. venute di acqua) e di interesse per l'analisi del fenomeno.

La necessità di produrre informazioni con elevata accuratezza di posizionamento plano-altimetrico richiede l'uso di droni in grado di operare con correzioni RTK (da rete o con base fisica) o l'applicazione di tecniche PPK. Generalmente sono posizionati dei punti di appoggio o di controllo per l'analisi degli errori e l'eventuale loro correzione, in prossimità delle aree di interesse e in zone sicure e stabili. Poiché le frane interessano terreni con pendenze significative, il piano di volo deve tenere conto dello sviluppo altimetrico del rilievo e della necessità di mantenere il contatto visivo con il velivolo. Le acquisizioni sono condotte secondo un piano di volo ad una quota costante dal terreno, al fine di garantire la massima omogeneità geometrica del dato elaborato. Più raramente si opera con rilievo di tipo manuale.

Elaborazione e output

I dataset acquisiti con sensori ottici sono elaborati tramite tecniche proprie della fotogrammetria aerea (con riprese nadirali o oblique) o proprie della tecnologia LiDAR e consentono di restituire nuvole di punti, ortomosaici a colore, modelli digitali della superficie e modelli digitali del terreno.

Le caratteristiche geometriche degli elaborati dipendono dal tipo di sensore impiegato e dai parametri delle missioni (quota di volo, ricoprimenti delle strisciate adiacenti e, per il LiDAR, la velocità di acquisizione e la strategia di campionamento). Si tratta sempre di output con risoluzione centimetrica (ortomosaici), decimetrica (DTM e DSM) e con elevata densità (alcune centinaia di punti/mq) per le nuvole di punti, ampiamente sufficienti per la descrizione dello scenario e per le finalità di monitoraggio. Il valore aggiunto dei rilievi da drone è dato dalla possibilità di ottenere informazioni distribuite ed omogenee rispetto all'area di interesse ed avere contezza della distribuzione spaziale delle dinamiche di interesse.

Tipologie di analisi

Sulla base delle acquisizioni da drone vengono condotte analisi di diversa tipologia in funzione delle necessità e delle caratteristiche del fenomeno. Per effettuare confronti multi-temporali è fondamentale produrre nel tempo dataset geometricamente omogenei e adeguatamente co-registrati; in questo caso è possibile procedere con analisi delle (i) variazioni plano-altimetriche delle aree tramite differenze di DEM, (ii) variazioni altimetriche su transeetti o zone di specifico interesse (es. nicchia di distacco), (iii) variazioni volumetriche pre e post-evento, (iv) stime di materiale accumulato, (v) variazioni nella circolazione idrica superficiale.

Figura 19: frana del Ruinon (SO). Progressivo avanzamento (2016-2020) della zona di accumulo terminale della frana tramite confronto di ortomosaici RGB.



Figura 20: frana del Ruinon (SO). Analisi della dinamica evolutiva con individuazione degli spostamenti superficiali di singoli blocchi individuati nelle diverse date di rilievo.

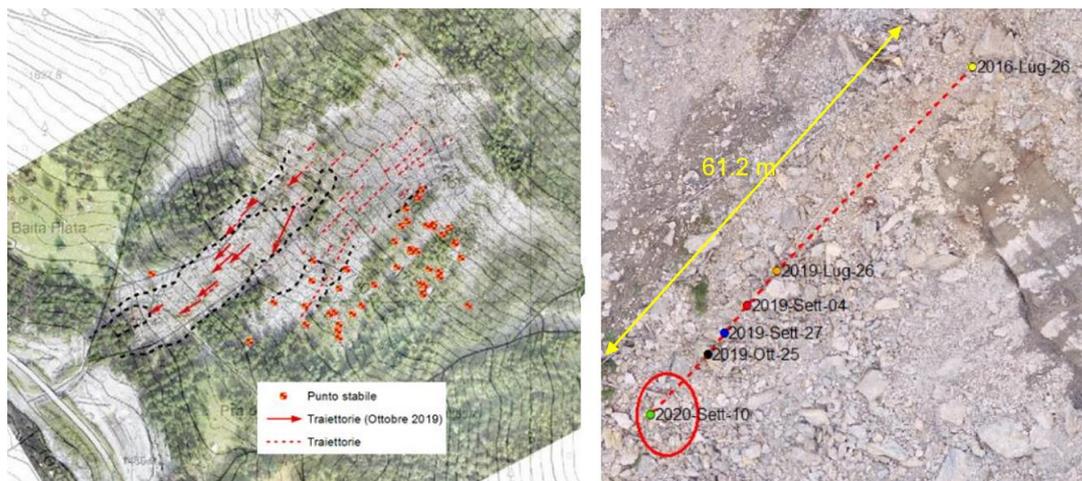


Figura 21: del Ruinon (SO). Individuazione di venute d'acqua superficiali con sensore termico.

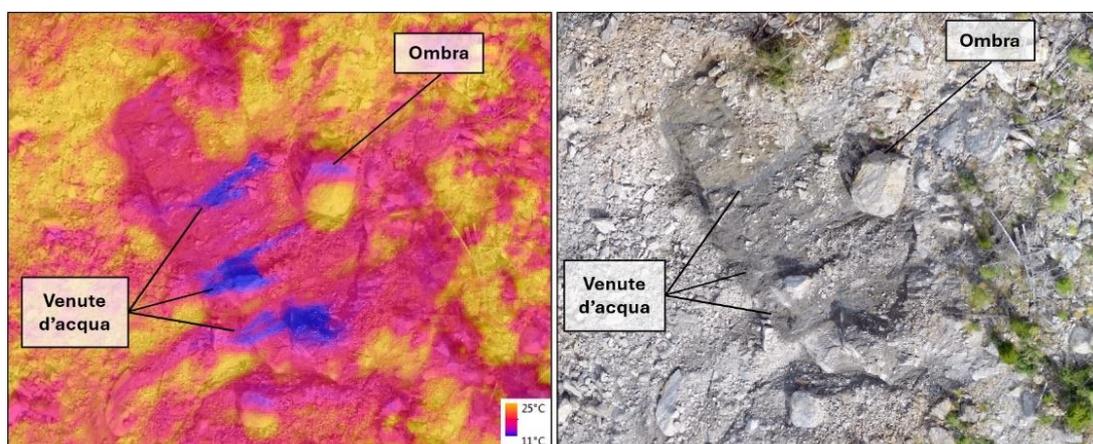


Figura 22: frana del Ruinon (SO). Evoluzione temporale del profilo di una porzione del corpo di frana, derivato dal confronto di DSM successivi. In questo caso l'accuratezza di posizionamento è elemento essenziale per una corretta interpretazione del dato.

Confronto fra :

- DSM LIDAR 2010
- DSM SAPR 2016
- DSM SAPR 2019 (26/7)
- DSM SAPR 2019 (4/9)
- DSM SAPR 2019 (27/9)

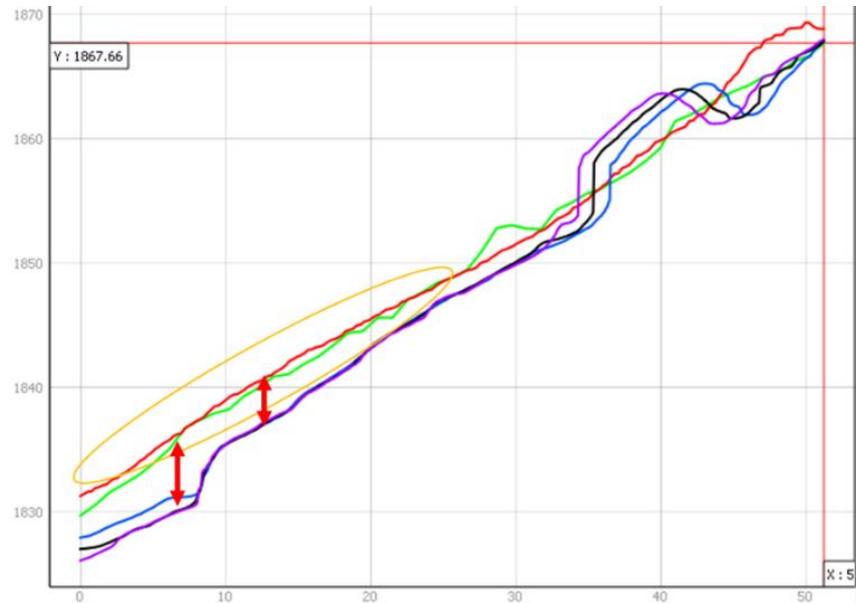
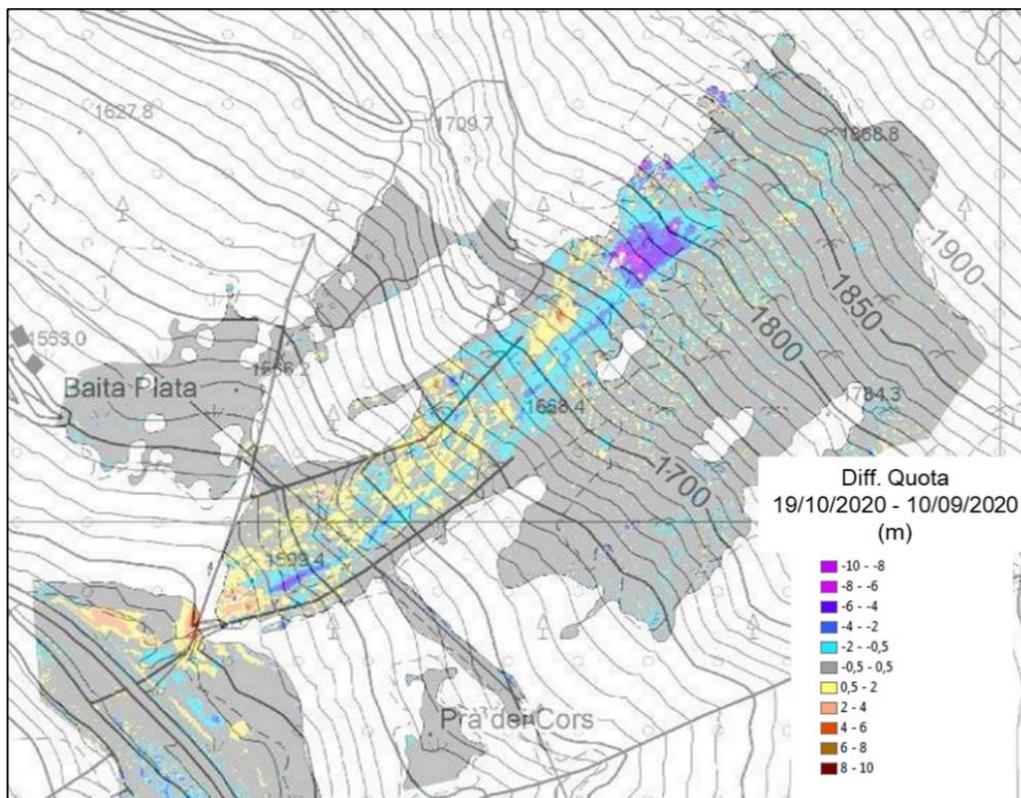


Figura 23: frana del Ruinon (SO). La differenza di DTM evidenzia le porzioni del corpo di frana caratterizzate da diverse dinamiche di erosione o accumulo, e la stima periodica delle variazioni volumetriche.



Scheda 7 - Colate detritiche

Finalità

Fra le varie tipologie di dissesto che possono interessare i versanti vi sono le colate detritiche, composte da materiale terroso e lapideo, anche di notevoli dimensioni e solitamente accompagnato da una notevole quantità di acqua, che fluisce verso valle lungo un versante o nel greto di un torrente. La loro pericolosità è dovuta alla elevata velocità e alla notevole forza di impatto, capace di arrecare danni in caso di collisione con infrastrutture e edifici.

Le intense precipitazioni e la disponibilità di materiale mobilizzabile favoriscono l'innescio di tali fenomeni, che possono prodursi in modo diffuso ed interessare i centri abitati, viabilità e altre strutture antropiche.

Il rilievo in post-emergenza, realizzato da UAS, ha la finalità di valutare l'impatto delle colate sul territorio (estensione del fenomeno e danni arrecati) e di supportare il sistema di protezione civile nella gestione degli interventi e nella valutazione del rischio residuo ed è tanto più efficace ed utile quanto più rapido ed accurato.

Metodologia di rilievo e strumentazione

Per il rilievo delle colate detritiche si utilizzano generalmente UAS multirottore equipaggiati con sensore RGB di qualità standard (camera da 20 Mpx o più) per la realizzazione di rilievi aerofotogrammetrici. I sensori LiDAR risultano utili unicamente in contesti particolari dove il transito del materiale non determina l'asportazione dei soprassuoli arborei sotto i quali si deposita materiale generalmente di pezzatura medio-piccola. La morfologia dei territori sui quali si sviluppano le colate impongono rilievi a quota relativa costante e generalmente con missioni di forma articolata: per lo più, infatti, i dissesti si originano in zone di ridotta estensione, si incanalano ed incidono strutture preesistenti (alvei o tracce di alveo) e tendono ad aprirsi nei fondivalle o sui conoidi. Le accuratezze di posizionamento, tali da consentire confronti con la situazione pre-evento, sono garantite dall'impiego di tecniche nRTK, RTK o PPK. In taluni casi, dove l'interesse maggiore risiede nella valutazione dell'estensione di eventi particolarmente diffusi per l'organizzazione di interventi urgenti di ripristino, sono preferibili rilievi speditivi a minore risoluzione (quote di volo > 120 m), senza particolari necessità connesse ad una georeferenziazione accurata (*rapid mapping*).

Elaborazione e output

A seconda delle necessità, i dati acquisiti con UAS, possono essere elaborati con le tecniche della fotogrammetria aerea per la produzione di ortomosaici RGB, DSM e nuvole di punti. La risoluzione dei prodotti deve consentire il riconoscimento delle aree impattate dal fenomeno e la stima dei volumi di materiale depositato (ortomosaici a 3-5 cm/px e DSM a 10-20 cm/px). Eventuali analisi di maggiore dettaglio (es. condizione di deflusso dei corsi d'acqua sottoattraversamenti, danneggiamenti di opere di difesa in alveo, ...) possono richiedere specifiche integrazioni con rilievi di prossimità e geometria di acquisizione variabile, realizzati con missioni manuali. In caso di eventi con deposito significativo di materiale sotto copertura vegetale per i quali si è proceduto con acquisizioni LiDAR saranno derivati DTM previa classificazione della nuvola di punti per l'eliminazione degli strati arborei.

Per le attività di *rapid mapping* è da prevedere l'impiego di software dedicati o l'uso di software fotogrammetrici tradizionali con parametrizzazione adeguata, a vantaggio della celerità nella fase di elaborazione.

Tipologie di analisi

La stima del volume di materiale depositato (es. dimensionamento del cantiere di ripristino e l'individuazione dei siti di stoccaggio del materiale) è possibile tramite il confronto fra i DSM generati post-evento e la condizione altimetrica pregressa. Dagli ortomosaici RGB, anche dai prodotti del *rapid mapping*, si può determinare l'estensione delle aree interessate, l'impatto sulle infrastrutture e lo stato di accesso all'area. Specifiche valutazioni puntuali o la stima dei danni alle infrastrutture si basano, viceversa, sull'analisi di immagini e video appositamente acquisiti e interpretati da operatori esperti.

Figura 24: colata detritica del 2019 sul Torrente Margueraz in Val Ferret (Courmayeur, AO). Originatasi a oltre 2.100 m di quota ha interessato la strada di fondovalle, alcune automobili e ponti. Il rilievo rapido ed accurato tramite UAS, oltre a consentire il *rapid assessment* dell'evento per la riduzione del rischio residuo, ha permesso la stima del volume del materiale da rimuovere.



Figura 25: colata detritica sul Torrente Montitaz (2024) in Val Ferret (Courmayeur, AO). Per la valutazione dell'impatto sulle strutture o il censimento dei danni e lo stato delle opere si ricorre a rilievi di dettaglio con UAS multirotori tramite missioni manuali.



Figura 26: l'impiego di sensore LiDAR per i rilievi di colate detritiche consente di limitare l'interferenza della vegetazione arborea nella valutazione dello stato degli elementi di interesse come le arginature e stimare i depositi di materiale sotto copertura.

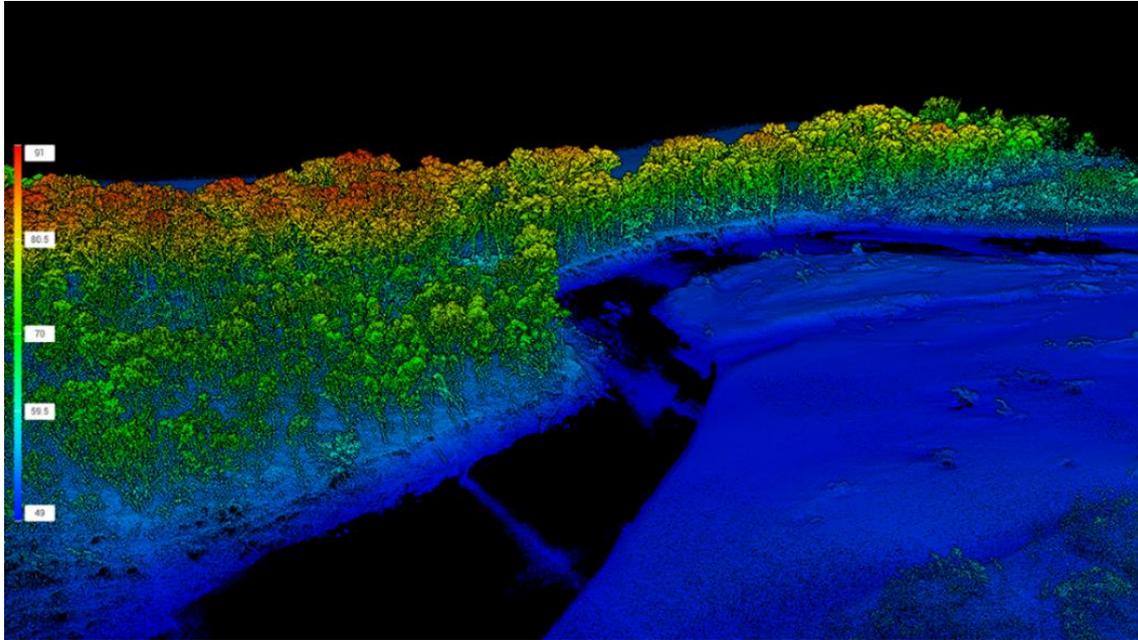
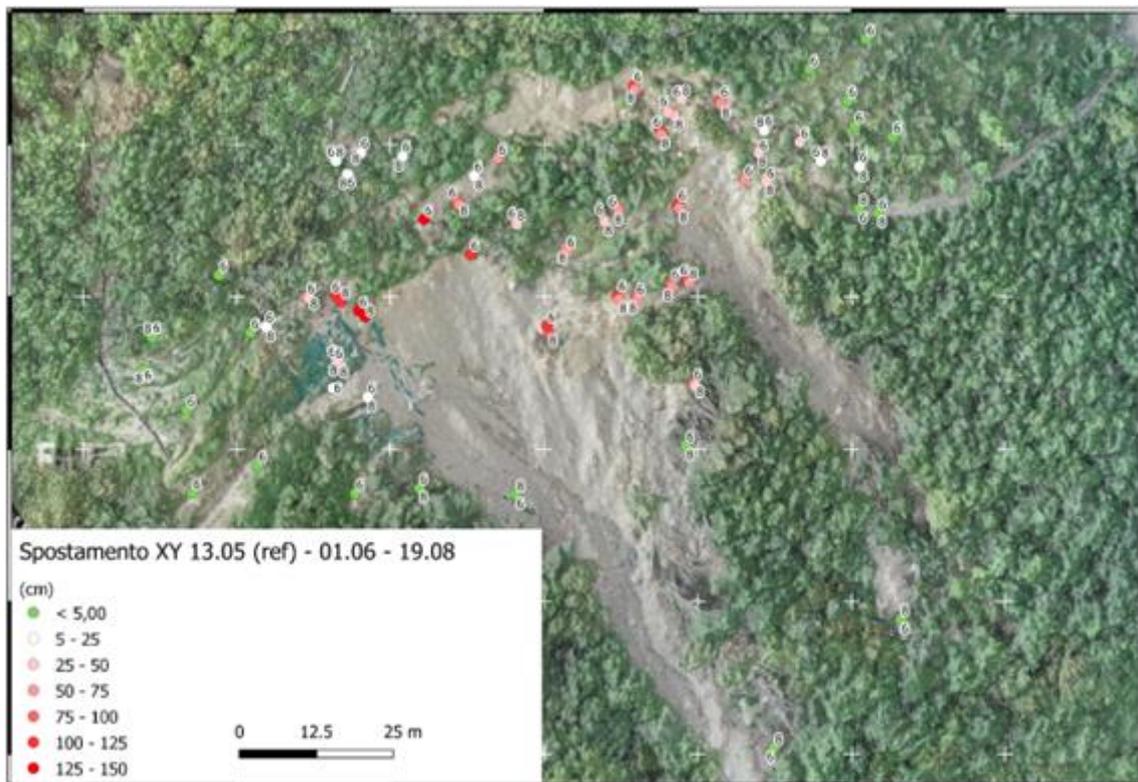


Figura 27: il rilievo ripetuto con UAS e il confronto multi-temporale di DSM e ortomosaici RGB derivati da UAS consentono di valutare il rischio residuo connesso alla presenza di materiale ancora instabile (Cenova di Rezzo, IM).



Scheda 8 – Scenari emergenziali complessi da disastri naturali

Finalità

Il settore centro-orientale della regione Emilia Romagna è stato interessato nel maggio 2023 da due eventi meteorologici eccezionali: il primo (2-3 maggio 2023) ha fatto registrare nuovi massimi storici delle precipitazioni e delle piene e ha causato centinaia di fenomeni franosi; il secondo (16-17 maggio 2023) ha raggiunto cumulate di precipitazioni ancora superiori a quelle di inizio mese, aggravando le condizioni di instabilità dei versanti e provocando nuove e più estese esondazioni dei corsi d'acqua. In particolare, l'evento è risultato eccezionale sia dal punto di vista dell'intensità delle precipitazioni, con valori superiori ai 100 mm/giorno il 16 maggio, sia dell'ampiezza del territorio interessato comprendente le province di Bologna, Forlì-Cesena, Ravenna e Rimini, con picchi di cumulata giornaliera di circa 200 mm nei comuni di Modigliana (FC), Brisighella (RA) e Casola Valsenio (RA)¹.

In seguito a tali eventi meteorologici, si sono verificate diffuse condizioni di instabilità di versante, con fenomeni sia di tipo idraulico che franoso, che hanno interessato la fascia collinare e di bassa montagna tra le valli dei fiumi Reno, Setta, Bidente e Savio, dove sono stati censiti centinaia di movimenti franosi che hanno isolato centri abitati e danneggiato infrastrutture, edifici e attività produttive. In tali contesti l'impiego di UAS risulta essere particolarmente utile ed efficace per supportare la valutazione degli impatti sul territorio nell'immediato post-evento. Questa tipologia di intervento si inserisce nelle attività svolte dai Centri di Competenza del DPC e, più in generale delle strutture afferenti al SNPC, a supporto del sistema di gestione dell'emergenza.

In scenari operativi complessi, è frequente la presenza contemporanea di velivoli *manned* impiegati per le diverse finalità (soccorso/forniture urgenti, ripristino reti servizi essenziali, rilievi e mappature), pertanto è particolarmente importante la definizione e il rigoroso rispetto delle procedure stabilite dagli organi e strutture competenti per la gestione e la riduzione delle interferenze nello spazio aereo e, nel caso, la previsione del potenziamento delle funzioni di *aircraft observer* e *airspace observer*.

Metodologia di rilievo e strumentazione

Per la caratterizzazione dei siti interessati dagli eventi si realizzano generalmente rilievi fotogrammetrici e LiDAR, quest'ultimi indispensabili nelle aree con copertura vegetale significativa, condotti con velivoli multirottore o, in caso di aree particolarmente estese, con attrezzatura ad ala fissa e in modalità BVLOS. Il corretto posizionamento spaziale degli elaborati può prevedere, ed è preferibile, l'impiego di correzioni nRTK o RTK, ovvero l'utilizzo di GCPs che possono garantire le necessarie accuratezze di scala e di georeferenziazione anche in assenza di connettività, condizione possibile in occasione di eventi catastrofici

Elaborazione e output

L'elaborazione dei dataset acquisiti, condotta utilizzando la tecnica fotogrammetrica e la restituzione di nuvole di punti, ha l'obiettivo di mappare il fenomeno nel suo complesso ed evidenziare gli elementi di interesse per le attività di censimento e le valutazioni sul rischio residuo. Sono pertanto generati ortomosaici a colori ad altissima risoluzione (< 5 cm/px) e DTM ad alta risoluzione (< 1 m/px) derivati dalla classificazione della nuvola di punti acquisita con densità medio-alta (min 400 punti/mq) per garantire l'ottimale riconoscimento della posizione del terreno anche in condizioni di elevata densità della vegetazione. Tutti i prodotti sono generati utilizzando un sistema di riferimento in coordinate piane (es. WGS 84/UTM zone 32N) e con valori di quota ortometrica al fine di poter garantire la comparazione con altri prodotti cartografici pre-esistenti (es. Cartografia tecnica regionale). Le operazioni di trasformazione delle coordinate e la conversione dei riferimenti altimetrici sono realizzate con software ufficiali disponibili in Italia che utilizzano i grigliati ufficiali dell'IGM (realizzazione ETRF89) (es. ConveRgo o Traspunto).

Tipologie di analisi

Gli interventi di ricognizione e rilievo in scenari emergenziali complessi sono caratterizzati da due obiettivi differenti che rispondono a necessità operative temporalmente consequenziali: nelle attività svolte nelle fasi precoci dell'emergenza (*situational awareness*), l'elemento chiave è la rapidità nella produzione delle informazioni di interesse e il trasferimento delle stesse al Centro di Coordinamento. In un momento successivo, invece, prevale il contributo tecnico-scientifico che può essere fornito con il supporto degli elaborati di dettaglio: ortomosaici, DTM e nuvole di punti classificate, infatti, consentono di analizzare con elevato dettaglio i fenomeni, riconoscerne gli elementi caratteristici (fratture, zone di distacco, scorrimento e accumulo), valutare gli impatti attuali e potenziali sugli esposti eventualmente presenti nell'area.

¹ Fonte: ARPAE Emilia-Romagna, Struttura Idro-Meteo-Clima. Rapporto degli eventi meteorologici di piena e di frana del 16-18 maggio 2023.

Figura 28: areale di intervento (box azzurro) assegnato all'ISPRA dal Coordinamento tra le autorità regionali e il DPC e tipologia di rilievo effettuata (schema a dx).



Figura 29: Nuvola di punti derivata da rilievo LiDAR in località Fontanelice (Villa S. Giovanni, BO). Le frane da crollo sono state innescate dai processi erosivi spondali durante la piena del fiume Santerno.



Scheda n. 9 – Valanghe

Finalità

Le valanghe sono un fenomeno naturale diffuso in ambienti alpini ed appenninici che si verifica quando una massa di neve si mette in moto improvvisamente su un pendio, precipitando con repentino slittamento e/o rotolamento verso valle a causa della forza di gravità e delle variazioni delle condizioni di equilibrio del manto. A seconda della morfologia del versante, della tipologia di neve (fresca o più o meno consolidata) e della massa interessata dal movimento, le dimensioni del fenomeno possono essere puntuali, limitate oppure produrre effetti significativi sul territorio potendo interessare infrastrutture e centri abitati. La frequenza e la magnitudine con cui le valanghe si producono dipendono dall'entità e dal *timing* delle precipitazioni nevose, dall'andamento meteorologico e dalle caratteristiche dei diversi siti.

L'interesse delle Agenzie sul tema è rivolto principalmente agli aspetti di censimento dei fenomeni, ai fini inventariali, alla caratterizzazione dei singoli eventi (mappatura) e degli effetti sulle strutture e allo studio dei siti valanghivi, in alcuni casi anche a supporto delle attività di previsione del rischio.

La ricostruzione tridimensionale delle valanghe effettuata tramite UAS consente di delimitare le aree di deposito, stimare i volumi di neve accumulati e, più in generale, rilevare gli elementi caratteristici di ogni singolo evento. Tali informazioni risultano essere di interesse per l'analisi della dinamica e delle condizioni pre-evento, nonché fondamentali per la calibrazione e validazione della modellistica di propagazione.

Metodologia di rilievo e strumentazione

Il monitoraggio delle valanghe tramite UAS si realizza tramite rilievi con velivoli multirottore o ad ala fissa, equipaggiati con camere RGB o con sensore LiDAR. Tecniche di rilievo e parametri di acquisizione devono tenere conto dell'elemento di interesse (zona di accumulo, normalmente nel fondovalle o sui conoidi, zona di scorrimento, più o meno incanalata, e zona di distacco, nelle porzioni più alte dei versanti), soprattutto per quanto riguarda la risoluzione geometrica a terra e la geometria di presa.

Le missioni finalizzate alla mappatura degli accumuli sono condotte generalmente a quota relativa costante tale da garantire GSD di 3 - 5 cm/px e strisciate parallele alle curve di livello in modo da consentire al pilota una ottimale gestione delle condizioni di VLOS. Viceversa, se l'interesse si concentra maggiormente sull'area di distacco sarà necessaria una risoluzione maggiore e la pianificazione della missione dovrà garantire l'ottimale visibilità della nicchia. In caso di applicazioni fotogrammetriche particolare attenzione sarà da riservare alla qualità fotografica dei dataset trattandosi di immagini per lo più di neve per le quali esposizione e luminosità possono essere elementi critici. Generalmente è previsto il rilievo con tecnica RTK o PPK considerate le accuratezze attese.

Elaborazione e output

Dai dati acquisiti con UAS si derivano ortomosaici RGB, DSM e nuvole di punti georeferenziate con accuratezza adeguata allo scopo. La risoluzione dei prodotti ottenuti è normalmente sovrabbondante rispetto alle necessità informative, fatta eccezione per le analisi di dettaglio del manto nevoso nella zona di distacco che richiedono particolare attenzione. Per tale motivo, a parte l'ultimo caso citato, si tratta in genere di ortomosaici RGB a 5 cm/px e DSM a 15-20 cm/px (eventualmente ricampionato a 50 cm/px).

Tipologie di analisi

La delimitazione dell'area di accumulo si effettua con fotointerpretazione manuale degli ortomosaici RGB mentre la stima dei volumi di neve accumulati presuppone la disponibilità di informazioni relative alle condizioni del terreno pre-evento eventualmente desumibile da coperture regionali a risoluzione 1, 2 o 5 m. Attraverso il computo della differenza di DSM si giunge alla determinazione dei volumi di neve accumulati, alle altezze degli accumuli. Tali valutazioni, ovviamente, risultano più difficili in caso di valanghe di neve asciutta che tende a disperdersi maggiormente e creare minori accumuli nei settori distali.

Figura 30: valanga del Diailley (Morgex, AO), 31 gennaio 2021.



Figura 31: ortomosaico RGB della valanga e stima degli spessori degli accumuli, in prossimità della Fraz. Diailley (Morgex, AO), computati sulla base del DSM derivato in post-evento.

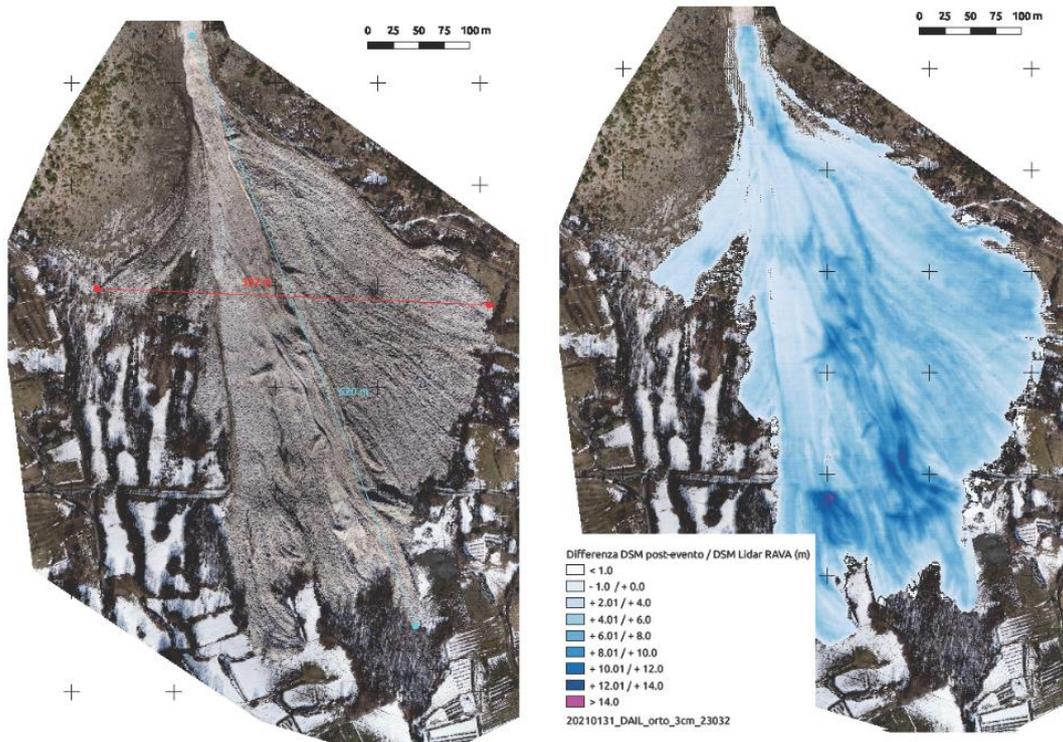


Figura 32: zona di distacco di valanga in prossimità del Passo Pordoi (Arabba, BL). È ben visibile la frattura del manto nevoso, origine della valanga. Il rilievo di dettaglio, condotto con UAS, consente di stimare gli spessori della neve senza misure dirette con operatore, con evidenti vantaggi.



1.3 CRIOSFERA

Scheda n. 10 - Ghiacciai

Finalità

I ghiacciai sono importanti indicatori del cambiamento climatico che, nelle regioni alpine, si manifesta con intensità maggiore rispetto a quanto accade nelle restanti parti del globo. Essi rispondono in modo diretto a queste pressioni modificando la morfologia e la dinamica con la riduzione significativa della massa, il progressivo arretramento delle fronti glaciali, l'incremento delle aree crepacciate, la formazione di depressioni e di laghi, l'aumento dei fenomeni di instabilità. Il monitoraggio delle variazioni glaciali, da un lato, documenta l'impatto del *climate change* e, dall'altro, permette di valutarne gli effetti sul territorio. Inoltre, costituendo importanti riserve di acqua dolce, garantiscono con la loro fusione, l'alimentazione del reticolo superficiali specialmente negli anni poveri di precipitazioni nevose e con stagioni estive secche e calde. I ghiacciai permanenti rappresentano un habitat di interesse prioritario (Codice 8340 dell'allegato "A" DPR 357/97).

Metodologia di rilievo e strumentazione

L'impiego di UAS per il monitoraggio dei ghiacciai si è rapidamente diffuso negli ultimi anni affiancando le tecniche più tradizionali apportando vantaggi significativi per la riduzione dell'esposizione degli operatori ai rischi della movimentazione in ambiente impervio. Inoltre, è possibile ottenere dati distribuiti sugli interi corpi glaciali, integrando o sostituendo misure puntuali. A seconda dell'estensione e della morfologia degli apparati è possibile impiegare velivoli ad ala fissa o multirotori; quest'ultimi rimangono i più diffusi per la loro versatilità nell'uso e la minore sensibilità al vento. I rilievi primaverile e tardo-estivo sono per lo più condotti utilizzando fotocamere RGB, più recentemente ed in minor misura, è stato introdotto l'uso di sensori LiDAR che, rispetto alla tecnica fotogrammetrica tradizionale, consentono di ridurre significativamente il tempo di acquisizione aumentando, di fatto, la produttività.

Per il rilievo dell'accumulo nevoso, in caso di missione fotogrammetrica, è importante tenere conto delle caratteristiche della superficie del manto che dovrà presentare una tessitura sufficiente per il corretto funzionamento degli algoritmi di riconoscimento automatico dei *tie points*, alla base degli algoritmi di SfM. Il rilievo autunnale, invece, che dovrà essere realizzato prima delle nevicate, capaci di mascherare elementi di interesse dell'ablazione, non pone particolari criticità. Tenuto conto del fatto che generalmente nelle aree remote la copertura telefonica può essere carente, è diffuso l'impiego di tecniche RTK (con antenna base in loco) o PPK o, ancora, l'appoggio del blocco tramite ground control points permanentemente materializzati.

Elaborazione e output

Dai dataset ottenuti tramite i rilievi UAS vengono prodotti, tramite elaborazione fotogrammetrica, ortomosaici RGB e DSM. Per le finalità sopra esposte non si rendono necessarie risoluzioni geometriche particolarmente elevate: a 5 cm/px e 10 cm/px, rispettivamente, è possibile cogliere i dettagli degli elementi di interesse. In taluni casi, tuttavia, come la ricerca e il riconoscimento di particolari forme di deposito o rimodellamento delle zone proglaciali, può rendersi necessario incrementare il dettaglio attraverso rilievi integrativi.

Tipologie di analisi

Le variazioni della massa glaciale (bilancio di massa) si calcolano tramite la differenza di DEM rilevati alla fine di due stagioni estive successive e computando, l'abbassamento medio unitario (per mq) della superficie. Le variazioni frontali, espresse in m/anno, sono computate confrontando la posizione della fronte glaciale rispetto all'anno precedente, previa digitalizzazione del limite del ghiaccio su ortomosaico RGB e valutazione di profili longitudinali estratti dal DSM corrispondente.

Figura 33: variazioni superficiali del ghiacciaio del Petit Grapillon, Val Ferret (Courmayeur, AO) nel periodo 2017-2023.

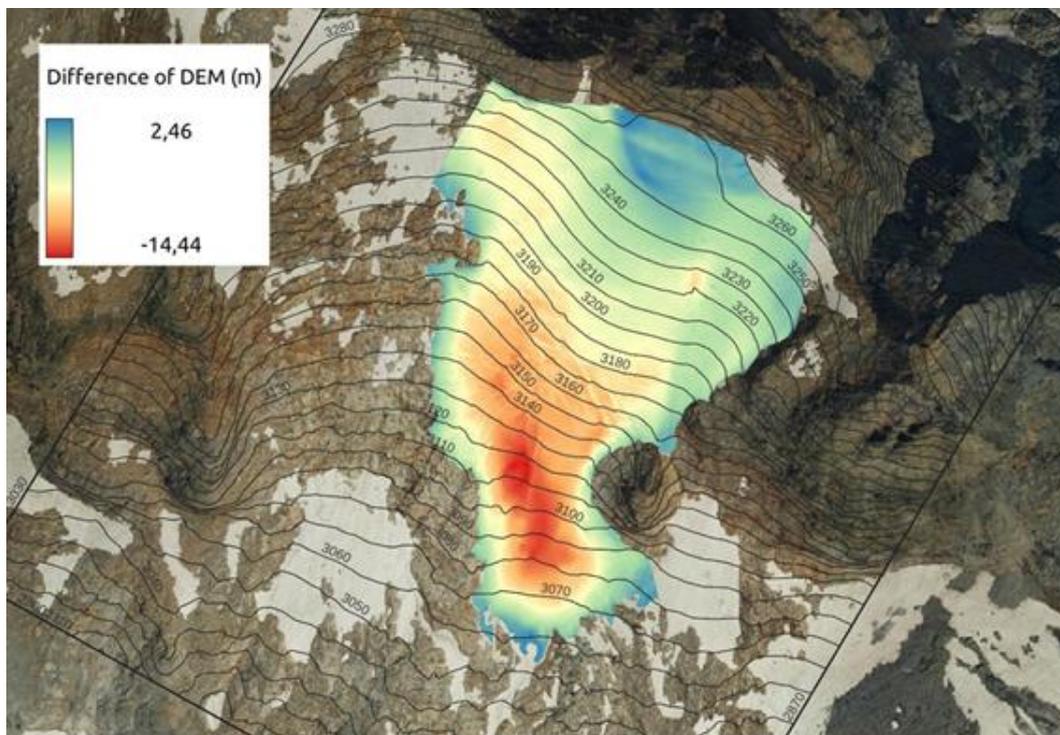


Figura 34: posizione della fronte glaciale del lobo destro del ghiacciaio del Rutor (La Thuile, AO) derivata da fotointerpretazione di ortomosaico RGB da UAS. Ogni linea corrisponde alla posizione al termine di successive stagioni di ablazione (nel riquadro, l'intero ghiacciaio).

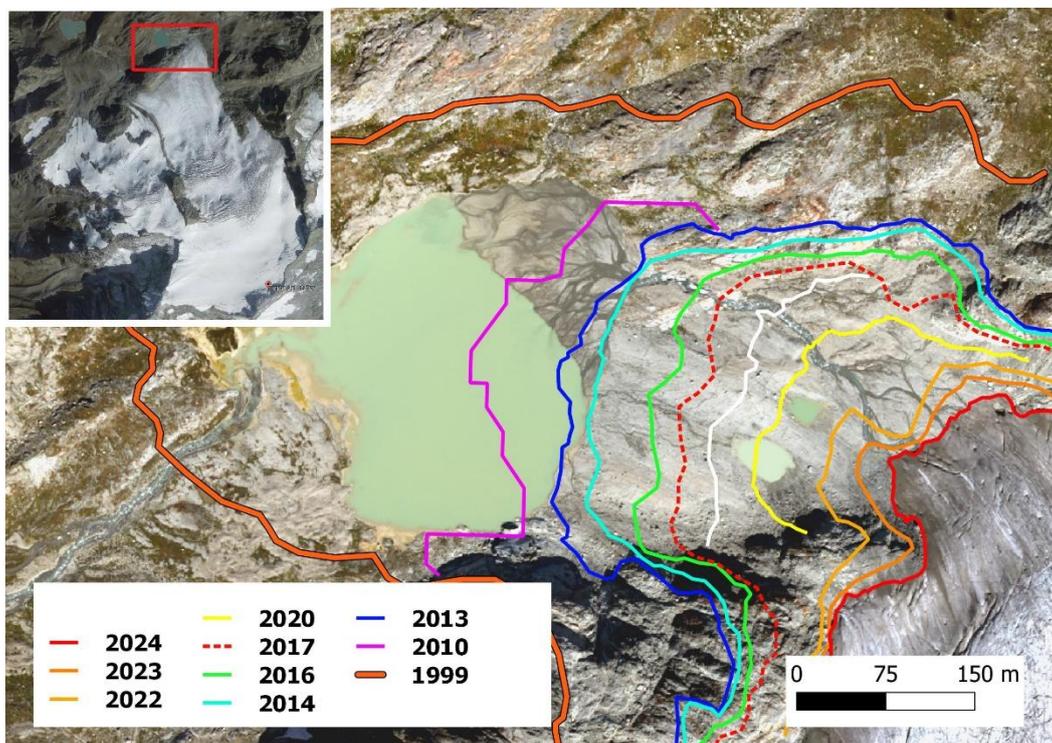
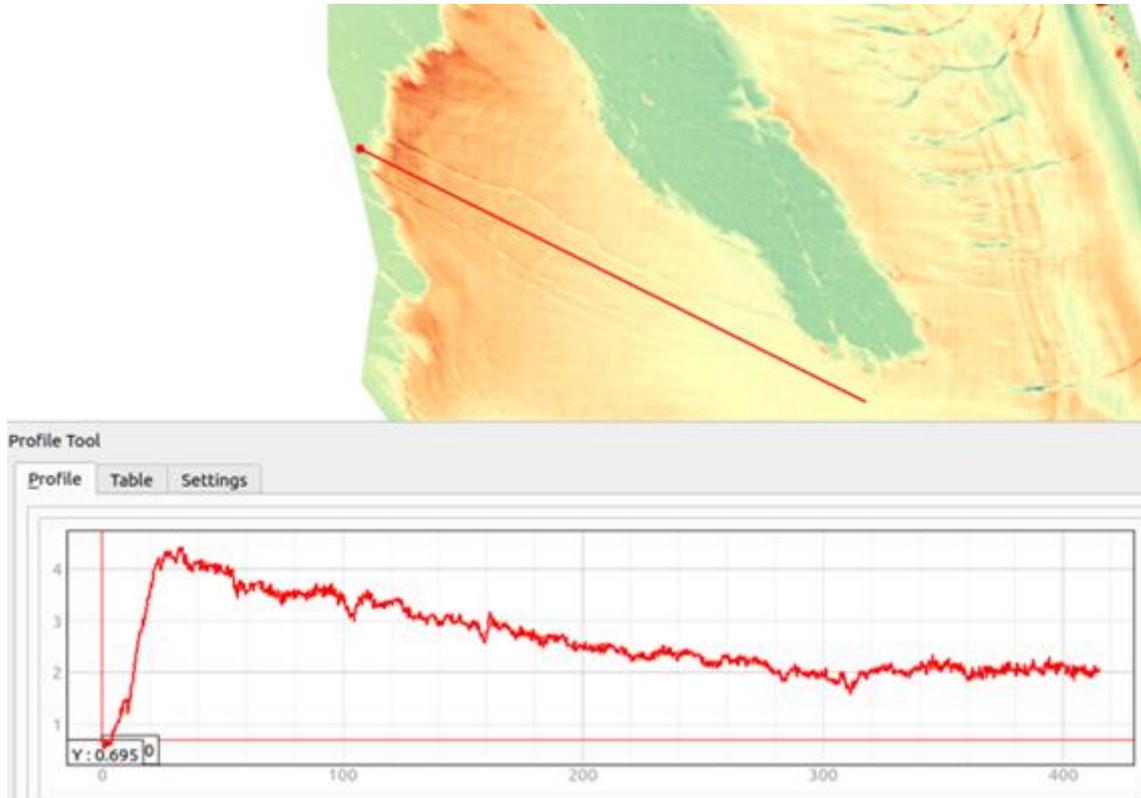


Figura 35: abbassamento, in metri, della superficie del ghiacciaio di Timorion (Valsavarenche, AO) calcolato per differenza di DEM 2022-2023. La curva mostra la capacità delle tecniche basate su UAS di descrivere il fenomeno.



Scheda n. 11 - Permafrost

Finalità

Gli ambienti di alta montagna sono particolarmente sensibili agli effetti del cambiamento climatico. L'incremento della temperatura, unitamente ad una diversa distribuzione delle precipitazioni nevose, ha un impatto rilevante sulla conservazione del permafrost, soprattutto alle quote inferiori dove si trova in aree discontinue e in disequilibrio con le condizioni climatiche attuali. Il progressivo riscaldamento induce l'innalzamento della temperatura, anche in profondità seppure con velocità diverse in funzione del materiale e della topografia del substrato, e può causare la fusione del ghiaccio interstiziale modificando il comportamento del materiale. In alcuni casi la degradazione del permafrost costituisce un elemento di destabilizzazione dei versanti e i ghiacciai rocciosi, particolari forme della criosfera che fluiscono a valle per effetto della gravità e a causa del ghiaccio in essi contenuto, modificano la loro velocità accelerando o rallentando il loro movimento fino addirittura a crollare improvvisamente. Le velocità superficiali di questi apparati sono monitorate con varie tecniche (GNSS su pochi punti segnalati, interferometria satellitare o terrestre e fotogrammetria UAS) e costituiscono parametro di interesse per la variabile climatica essenziale (ECV) "permafrost" del GCOS - *Global Climate Observing System*.

Metodologia di rilievo e strumentazione

Il monitoraggio della velocità superficiale dei ghiacciai rocciosi tramite UAS si realizza attraverso il confronto multi-temporale di ortomosaici RGB e DTM ottenuti utilizzando velivoli mutirotores equipaggiati con camere RGB con risoluzione 20 Mpx o superiore. In ragione della morfologia dei versanti da rilevare, spesso circondati da pareti più o meno ripide, le missioni sono condotte a quota relativa costante tale da garantire GSD di 2-3 cm/px e strisciate generalmente parallele alle curve di livello in modo da consentire al pilota una ottimale gestione delle condizioni di VLOS. Più raramente si impiegano sensori LiDAR che non aggiungono informazioni rispetto alla fotogrammetria classica e risultano logisticamente meno adatti all'impiego in aree per le quali si rende necessario un trasferimento a piedi. Generalmente è prevista una rete di GCPs materializzati in vario modo, esterni e interni all'area in movimento, che consentono il raggiungimento di accuratissime. Talvolta si impiega la tecnica PPK con correzione dei centri di presa tramite acquisizione contemporanea di file RINEX con antenna GNSS installata su punto noto (con vite) in prossimità del *rock glacier*.

Elaborazione e output

Dai dati acquisiti con UAS si derivano ortomosaici RGB, DTM e nuvole di punti correttamente georeferenziati; in alcuni casi, per affinare ulteriormente le analisi, si procede con una co-registrazione degli output con gli analoghi del rilievo precedente. La risoluzione dei prodotti deve consentire da un lato il riconoscimento degli elementi di interesse, dall'altro deve permettere di descrivere la dinamica dell'oggetto riducendo il dettaglio, ove non rilevante. Per tale motivo si tratta normalmente di ortomosaici RGB a 5 cm/px e DTM a 15-20 cm/px.

Tipologie di analisi

L'analisi multi-temporale può essere realizzata considerando le variazioni 2D o 3D della superficie del ghiacciaio roccioso al fine di computare gli spostamenti planimetrici (per descrivere i campi di velocità dell'intera superficie ed osservarne le variazioni periodiche) o quelli plano-altimetrici. A seconda dei casi si procede con applicazione di algoritmi di *image correlation* (es. *Correlation Image Analysis System-CIAS*) o il calcolo della distanza fra nuvole di punti (es. tramite plugin M3C2 di Cloud Compare). I risultati consentono di evidenziare accelerazioni e rallentamenti dei versanti nel periodo di indagine (anno).

Figura 36: *rock glacier* Gran Sometta (Valtournanche, AO). Sono evidenti i due lobi che fluiscono a valle, interessando la strada di accesso al comprensorio, con velocità differenti.



Figura 37: evoluzione delle velocità superficiali (m/a) delle diverse zone del *rock glacier* Gran Sometta (Valtournenche, AO) dal 2013, computata sulla base della posizione di singoli blocchi rilevata verso metà agosto di ogni anno (<https://www.unifr.ch/geo/geomorphology/en/resources/study-sites/gran-sometta.html>).

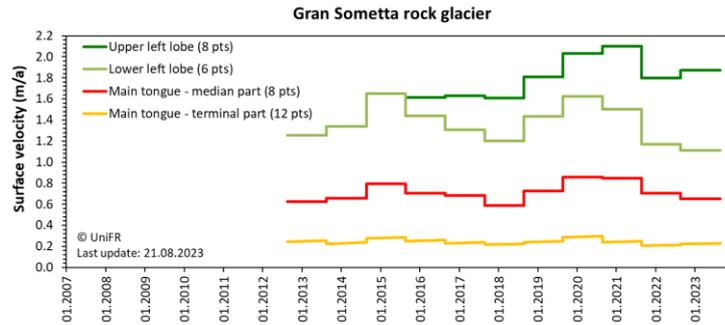


Figura 38: *rock glacier* Gran Sometta (Valtournenche, AO). Variazioni della superficie calcolati tramite plugin M3C2 di Cloud Compare. Si evidenziano le aree con spostamenti fino a 2.25 m nel periodo di osservazione².

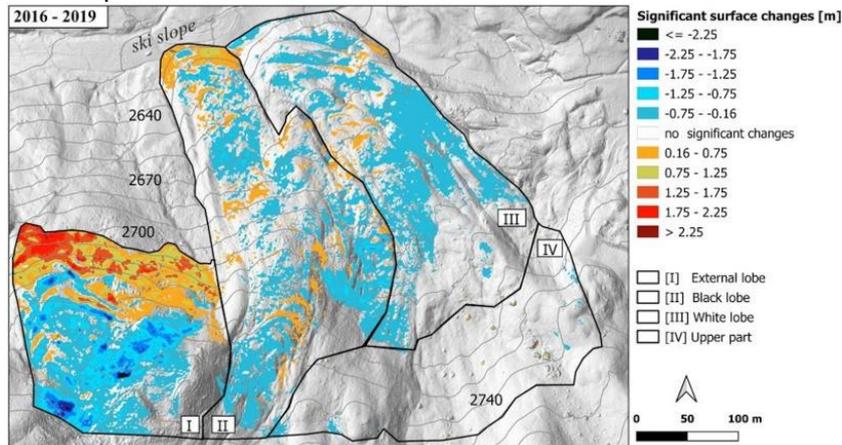
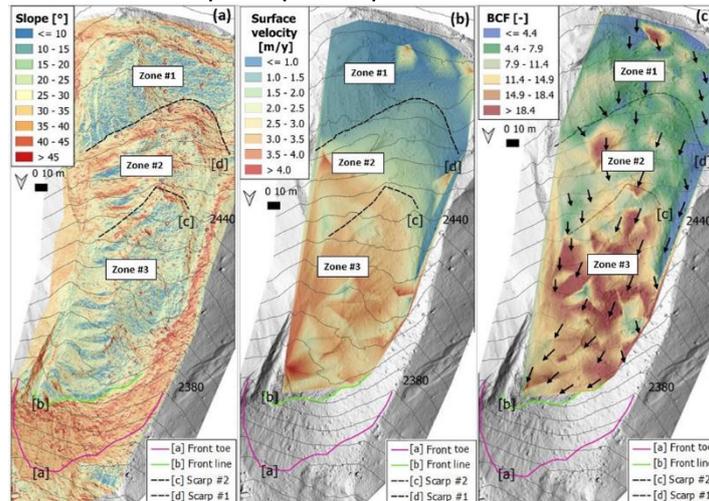


Figura 39: *rock glacier* Plator (Valdidentro, SO). Pendenza della superficie (a), velocità superficiale (b) e *Bulk Creep Factor* (BCF) (c) nel periodo 2019-2020. Il BCF è calcolato per investigare i fattori che controllano i pattern spaziali di spostamento³.



² Tratto da F. Bearzot, R. Garzonio, B. Di Mauro, R. Colombo, E. Cremonese, G.B. Crosta, R. Delaloye, C. Hauck, U. Morra di Cella, P. Pogliotti, P. Frattini, M. Rossini, Kinematics of an Alpine rock glacier from multi-temporal UAV surveys and GNSS data, *Geomorphology*, 2022,108116, ISSN 0169-555X, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108116>.

³ Tratto da Bearzot, F.; Garzonio, R.; Colombo, R.; Crosta, G.B.; Di Mauro, B.; Fioletti, M.; Morra di Cella, U.; Rossini, M. Flow Velocity Variations and Surface Change of the Destabilised Plator Rock Glacier (Central Italian Alps) from Aerial Surveys. *Remote Sens.* 2022, 14, 635. <https://doi.org/10.3390/rs14030635>

2 AMBITO MARINO, MARINO-COSTIERO E LAGUNARE

2.1 HABITAT

Scheda n. 12 - *Posidonia oceanica*: limite superiore delle praterie

Finalità

La *Posidonia oceanica* (L.) Delile rappresenta un habitat prioritario ai sensi della direttiva Europea 92/43/EEC ed è una specie caratterizzante che forma praterie molto estese, colonizzando aree costiere e non, sabbiose e rocciose da 1 metro a circa 45 metri di profondità.

L'utilizzo dei sistemi UAS nell'ambito delle attività di mappatura e di monitoraggio di queste praterie si basa prevalentemente su applicazioni fotogrammetriche, in contesti caratterizzati da acque molto basse, con elevata trasparenza e condizioni meteo-marine particolarmente favorevoli (assenza di vento). Gli algoritmi della *Structure from Motion - Multi View Stereo matching* (SfM-MVS) risultano non sempre applicabili quando si opera a maggiore distanza dalla linea di costa e in condizioni di mare non completamente calmo.

Attualmente è disponibile un approccio metodologico alternativo all'utilizzo della fotogrammetria per l'identificazione dei limiti superiori delle praterie di *Posidonia*, vale a dire la linea lungo la quale ha inizio la colonizzazione della prateria partendo dalla costa. Si tratta della *Full Motion Video* (FMV), una tecnica che consente di interpretare e analizzare i video acquisiti con sistemi UAS in ambiente GIS, con livelli di accuratezza compatibili con analisi speditive e preliminari.

Metodologia di rilievo e strumentazione

La FMV è una procedura che si basa sulla combinazione dei video con i metadati associati al volo dell'aeromobile attraverso un processo di *multiplexing*; ciò consente di visualizzare l'impronta del video (*footprint*) e la posizione dell'aeromobile sulla mappa, con possibilità di estrazione di frame e di identificazione di punti, linee o poligoni sul video e proiettati sulla mappa di riferimento.

La metodologia può essere applicata utilizzando sistemi UAS con sensori RGB, compatibili con l'applicazione Site Scan for ArcGIS - LE, necessaria per generare i file (*Geospatial Video Log*) contenenti i metadati relativi alla localizzazione e all'assetto del drone e del sensore utilizzato. I video sono interpretabili con il software ArcGIS Pro, con l'estensione Image Analyst, identificando a monitor i punti corrispondenti alle zone in cui è presente l'angiosperma marina. Lo schema di rilievo da predisporre consiste nell'individuazione in ciascun sito di indagine di sub-aree, equidistanti fra loro, corrispondenti alle zone in cui effettuare i sorvoli. Le acquisizioni possono essere effettuate a una quota di volo variabile, compresa fra 25 m e 120 m, in relazione alle caratteristiche dell'ambiente operativo, con velocità di avanzamento di circa 4-6 m/s e camera nadirale.

Elaborazione e output

La fase di elaborazione iniziale consiste nella verifica della qualità dei video acquisiti, in termini di eventuale sovraesposizione e/o di problematiche connesse al moto ondoso e ai riflessi del sole, seguita dalla correzione dei dati altimetrici, relativi alla quota del punto di decollo.

Nel workflow della figura sotto riportata sono schematicamente descritte le fasi del rilievo e il primo step di elaborazione, necessario per la corretta visualizzazione dei video in ambiente GIS. Le operazioni di videointerpretazione richiedono il coinvolgimento di un operatore GIS e di personale esperto sulle tematiche relative al monitoraggio delle praterie di *Posidonia*. Al fine di favorire una visualizzazione più chiara dei risultati dell'interpretazione dei video, i punti identificati possono essere riportati su una griglia con dimensione delle celle di 10 m x 10 m.

Tipologie di analisi

I risultati delle analisi riportano la distanza dalla costa dei limiti superiori delle praterie. La stima della distanza può essere effettuata in ambiente GIS utilizzando la funzione "*shortest_line*". I livelli di accuratezza, in termini di geolocalizzazione, sono compresi fra circa 5 e 10 m, con possibilità di miglioramenti utilizzando sistemi UAS dotati di funzionalità RTK.

Le attività condotte, in questa fase, non hanno previsto una valutazione dei risultati tramite dei rilievi in situ di tipo subacqueo, ma sono state rivolte a verificare l'applicabilità della metodologia in ambito marino costiero, nonché i livelli di affidabilità dei sistemi di acquisizione e di elaborazione.

La procedura della FMV ha ampi margini di miglioramento e applicazione, soprattutto come approccio speditivo per differenti tipologie di valutazioni in ambito marino-costiero.

Figura 40: interfaccia di visualizzazione dei video acquisiti in ArcGIS Pro.

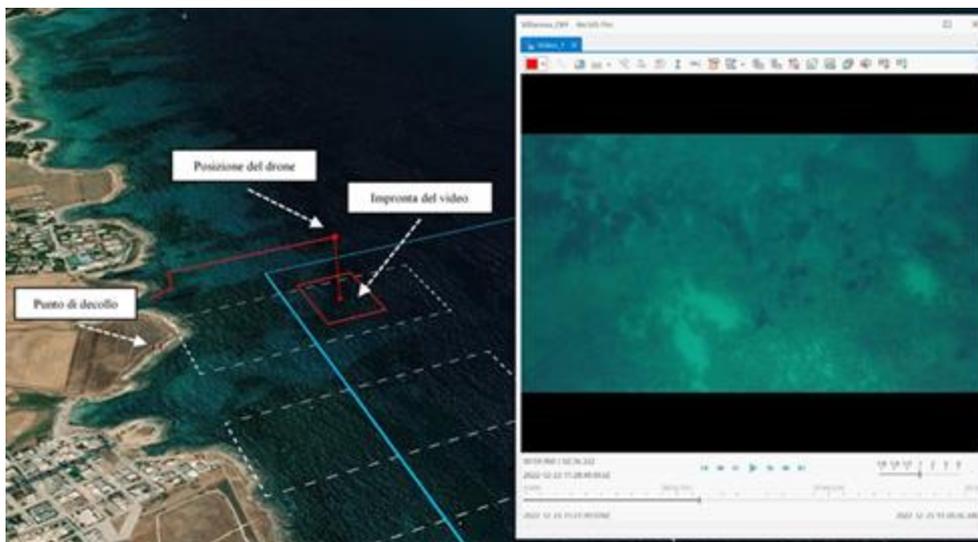


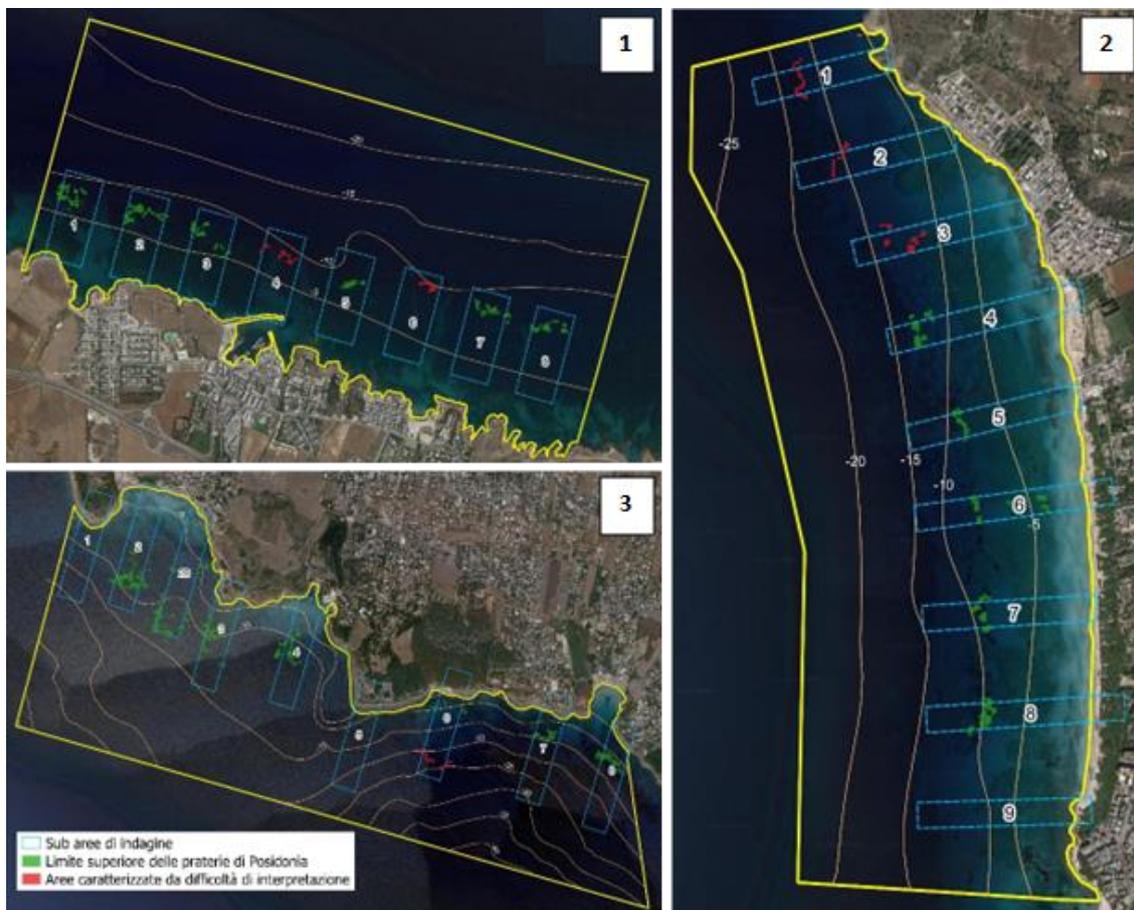
Figura 41: workflow per l'acquisizione e la visualizzazione dei video in ArcGIS Pro.



Figura 42: esempi di immagini acquisite nei siti di indagine, per verificare la visibilità del fondale e per identificare le condizioni meteo-marine e di illuminazione idonee per l'applicazione della metodologia proposta.



Figura 43: risultati dell'interpretazione dei video nei 3 siti di indagine.



1 - Sito di indagine di Villanova (versante Adriatico)

Sub area	1	2	3	4*	5	6*	7	8	-	Sito
Distanza media dalla costa (m)	298	334	313	-	377	-	485	496	-	383,83 ± 35.46 ES

2 - Sito di indagine di Montagna Spaccata/Lido Conchiglie (Versante ionico)

Sub area	1*	2*	3*	4	5	6	7	8	9*	Sito
Distanza media dalla costa (m)	-	-	-	543	461	318	447	438	-	441.4 ± 36.03 ES

3 - Sito di indagine di Lido Silvana (Versante ionico)

Sub area	1*	2	2B	3	4	5*	6	7	8	Sito
Distanza media dalla costa (m)	-	338	323	199	248	-	65	124	118	202,14 ± 39,99 ES

(*) difficoltà di interpretazione, a causa dei riflessi del sole sulla superficie del mare e/o della profondità del fondale

Scheda n. 13 - *Posidonia oceanica*: impiego integrato di UAS e ASV

Finalità

Le praterie di *P. oceanica* rappresentano, in termini di estensione e stato di qualità, un indicatore biologico di notevole importanza sia nella definizione del buono stato ambientale per la Direttiva quadro sulla Strategia marina (2008/56/ CE) nonché nella valutazione del buono stato ecologico per la direttiva quadro sulle Acque (2000/60/CE). L'impiego combinato di UAS con i più recenti veicoli autonomi di superficie (ASVs), quest'ultimi equipaggiati con sensori ottici multispettrali e acustici, ha aperto una nuova frontiera applicativa riguardo il monitoraggio dell'ambiente marino costiero basato sul telerilevamento di prossimità o a bassa quota (*Low Altitude Remote Sensing*), soprattutto in aree ritenute critiche.

Recenti attività sperimentali, hanno avuto l'obiettivo di standardizzare le procedure per l'impiego dei droni per l'habitat mapping della fascia costiera e per il monitoraggio delle praterie di *P. oceanica*.

Metodologia di rilievo e strumentazione

Le attività sperimentali sono state condotte con l'ausilio di diverse tipologie di droni (multirottore e ad ala fissa), equipaggiati con payload differenti.

Per quanto riguarda la raccolta dei dati in situ è stata sviluppata una piattaforma autonoma di superficie, denominata DEVSS (*Development Vehicle for Scientific Survey*).

Al fine di sperimentare l'efficacia del telerilevamento ad alta risoluzione nell'ambito dei contesti marino costieri sono stati utilizzati diversi sensori: camera multispettrale MAIA WV (8 bande + RGB, da 395 nm a 950 nm), camera multispettrale Micasense Red Edge-P (5 bande + pancromatica RGB), camera RGB con ottica pre-calibrata, sensore LiDAR e un ulteriore multirottore con sensore multispettrale integrato.

La DEVSS è stata equipaggiata con un sensore acustico Single Beam (Biosonics MX Aquatics) e con Side Scan Sonar (Lowrance HDS 7 Carbon), dotato della funzionalità StructureScan 3D.

In fase di rilievo i dati GNSS acquisiti dai droni dotati di sistema RTK, sono stati corretti tramite un servizio distribuito a livello nazionale.

Elaborazione e output

Le immagini acquisite e i dati LiDAR sono stati elaborati con software fotogrammetrici commerciali ottenendo strati informativi ad alta risoluzione (ortomosaico, DSM e DTM) e nuvole di punti.

Gli ortomosaici sono stati classificati con algoritmi di *machine learning* utilizzando i software Ecognition Developer ed Essential, mentre le nuvole di punti e il DEM relativo alla porzione superficiale delle praterie di *P. oceanica* sono stati elaborati con il software Global Mapper Pro.

Tipologie di analisi

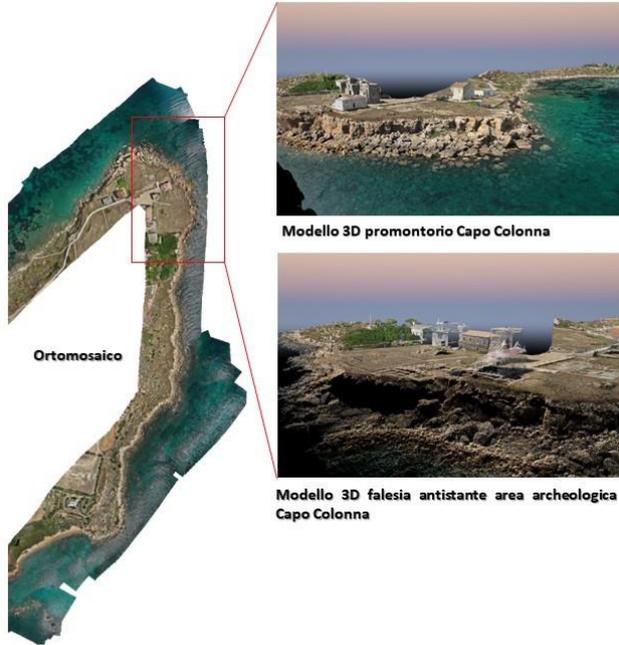
Le informazioni elaborate consentono di ottenere mappe tematiche di dettaglio delle eco-morfosi che caratterizzano le zone con presenza di praterie di *P. oceanica*.

Figura 44: DEVSS "DEvelopment Vehicle for Scientific Survey" - Veicolo di superficie a navigazione autonoma, dotato di un sistema a doppia propulsione elettrica ed elica aerea, controllo remoto e sistema di posizionamento GNSS.

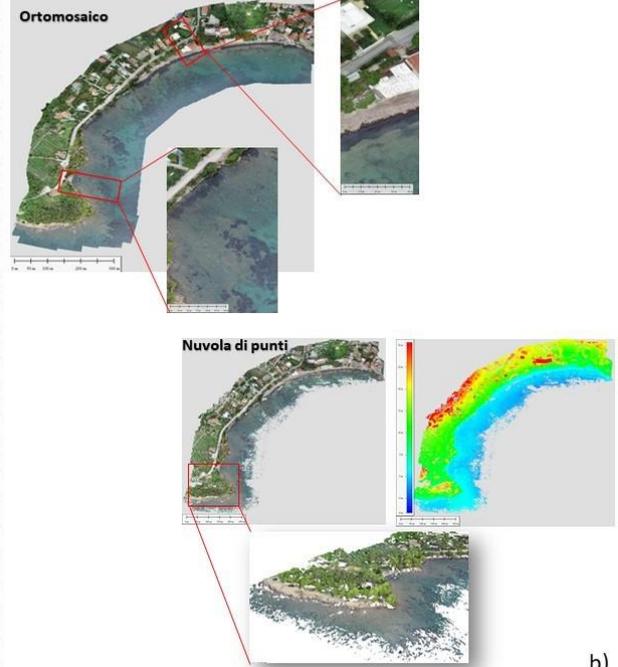


Figura 45: risultati dell'elaborazione dei dati acquisiti con sensore multispettrale (a) e dei dati acquisiti con Dji Matrice 300 RTK (b).

Test eseguito presso l'AMP Capo Rizzuto con drone Mavic 3 Enterprise Multispettrale



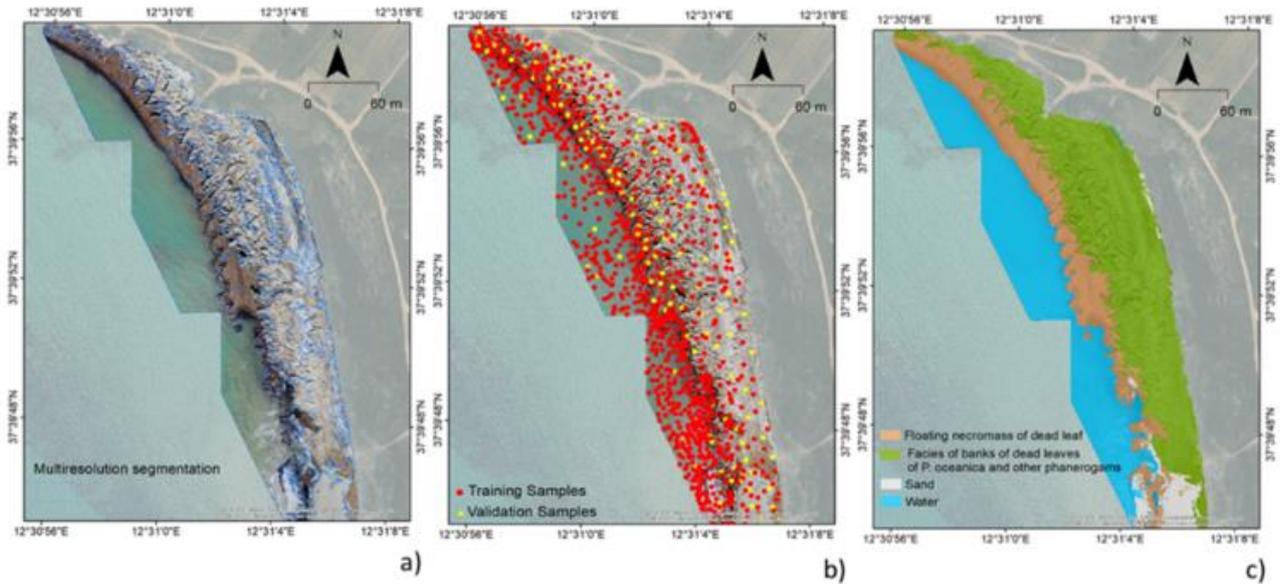
Test eseguito presso l'AMP Santa Maria di Castellabate con drone Matrice 300 RTK



a)

b)

Figura 46: segmentazione multirisoluzione; b) Campioni di verità a terra di addestramento e di validazione; c) Risultati della classificazione KNN per l'area e le classi tematiche.



a)

b)

c)

Scheda n. 14 - *Posidonia oceanica*: *banquettes*

Finalità

In prossimità delle grandi praterie di *Posidonia oceanica*, in seguito alle mareggiate autunnali e invernali, ed in particolari condizioni (legate alle caratteristiche idrodinamiche e alla conformazione della costa), i resti di questa pianta marina danno luogo alla formazione di strutture conosciute con il termine francese di "*banquettes*". Questi accumuli, molto compatti ed elastici, si sviluppano anche per centinaia di metri, con spessori variabili, in funzione dell'assetto geomorfologico della costa. Le *banquettes* sono in grado di assorbire l'energia del moto ondoso riducendone, per l'intera fase di demolizione che si verifica durante l'insorgere di alcune mareggiate, le capacità erosive e contribuendo in tal modo alla stabilità delle spiagge.

I resti di *Posidonia* rappresentano anche un'importante fonte di nutrienti e carbonio, svolgendo un ruolo ecologico di rilievo costituendo un habitat per molte specie di invertebrati.

Le aree soggette a formazione di *banquettes* costituiscono alcuni degli habitat marino-costieri presenti nell'elenco delle biocenosi bentoniche del Mare Mediterraneo e sono considerate elementi "meritevoli di salvaguardia" dal protocollo SPAMI della Convenzione di Barcellona (sulle Aree Specialmente Protette e la Biodiversità in Mediterraneo), per le quali risultano importanti le attività di monitoraggio durante i diversi periodi dell'anno per osservarne l'evoluzione e valutare le pressioni e gli impatti a cui sono sottoposte. Tali attività di monitoraggio sono utilmente supportate dall'impiego di UAS e dall'applicazione delle tecniche di analisi fotogrammetrica.

Metodologia di rilievo e strumentazione

Per l'analisi delle *banquette* stabili di *Posidonia oceanica* dell'Isola di Favignana (TP), in località Cala Pozzo, i rilievi UAS sono stati effettuati utilizzando un multirottore equipaggiato con camera RGB. Le missioni sono state effettuate a una quota variabile fra 20 e 45 m, con una sovrapposizione laterale delle immagini di circa l'80 %. Al fine di aumentare l'accuratezza di posizionamento dei risultati delle elaborazioni fotogrammetriche sono stati individuati nell'area di rilievo n. 12 punti di controllo a terra, identificati con specifici markers, le cui coordinate sono state rilevate con ricevitore GNSS RTK.

Elaborazione e output

I dataset fotografici acquisiti sono stati preliminarmente esaminati, al fine di selezionare le immagini qualitativamente migliori, per poi essere elaborati con tecnica fotogrammetrica, ottenendo nuvola di punti densa, DSM, DTM e relativo ortomosaico.

Tipologie di analisi

L'ortomosaico ottenuto è stato sottoposto a riconoscimento automatico delle *banquette* con software per la segmentazione e classificazione a oggetti (*Object Based Image Analysis* – OBIA). L'algoritmo adoperato per la segmentazione e la classificazione *supervised* dell'immagine è il *k-nearest neighbors algorithm* (k-NN), i cui parametri ottimali risultano essere: 650 per scala, 0,1 per i valori del colore e 0,4 per la levigatezza. La classificazione è stata effettuata utilizzando 106 punti di addestramento. Dall'elaborazione è stato possibile ottenere una mappa tematica accurata della *banquette* oggetto del rilievo con le seguenti classi:

- *Facies* di foglie morte di *Posidonia oceanica* e altre fanerogame,
- Massa galleggiante,
- Sabbia,
- Acqua.

Figura 47: *banquettes* di Cala Pozzo (Isola di Favignana, TP).



Figura 48: (A) Vista frontale del modello 3D elaborato con evidenza della posizione delle immagini che compongono il blocco fotogrammetrico. (B) Sequenza degli output dei diversi step dell'elaborazione (nuvola sparsa, nuvola densa, modello mesh 3D, DTM, ortomosaico). Cala Pozzo (Isola di Favignana, TP).

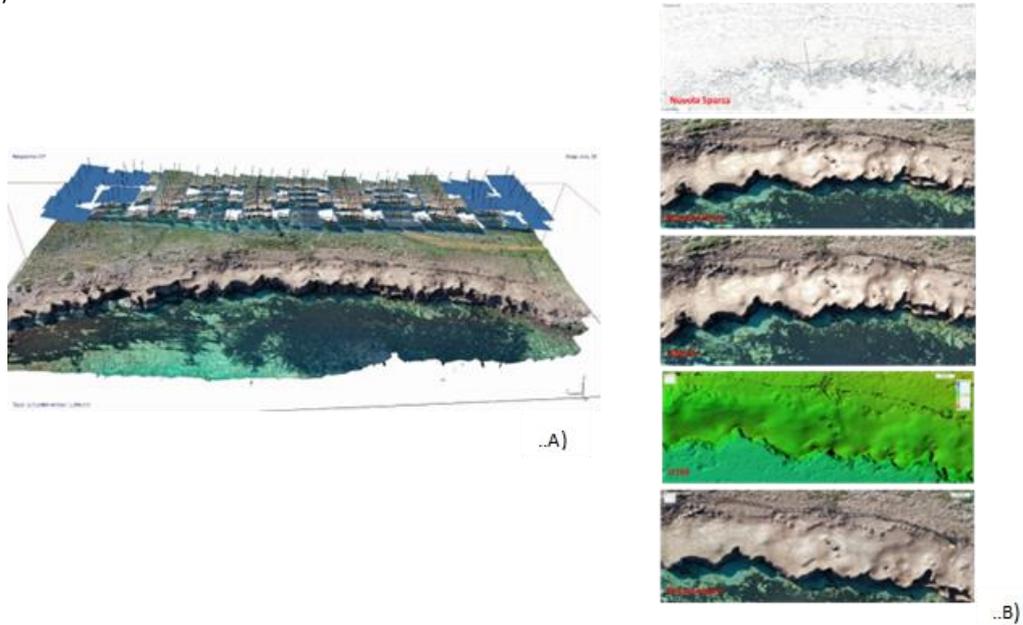


Figura 49: (A) Nube densa con localizzazione dei GCPs. (B) Ortomosaico. “Banquette” di Cala Pozzo (Isola di Favignana, TP).

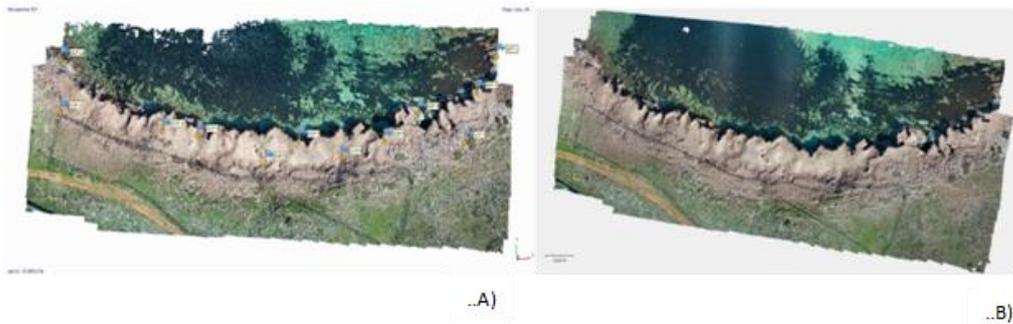
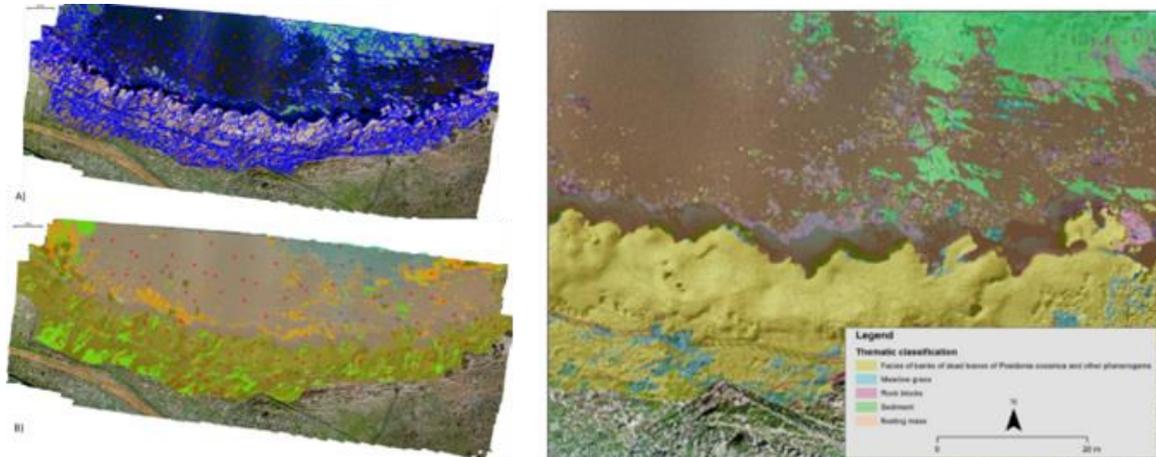


Figura 50: (A) Esempio di segmentazione multirisoluzione. (B) Esempio di classificazione con indicazione dei punti di addestramento per l’algoritmo k-NN. (C) Carta tematica con individuazione dei diversi ambienti di interesse. *banquette* di Cala Pozzo (Isola di Favignana, TP).



2.2 BIODIVERSITA'

Scheda n. 15 – Avifauna acquatica

Finalità

L'impiego di UAS nelle attività connesse alla biodiversità animale rappresenta un sensibile miglioramento nella capacità di osservazione di ambienti a difficile percorribilità e di ecosistemi caratterizzati generalmente da elevata sensibilità alle pressioni antropiche, quali canneti, zone umide allagate, isole e dossi di saline e lagune. Al contempo, riduce tempi di accesso e di sosta nelle aree da monitorare limitando interferenze sulla presenza e il comportamento dell'avifauna target. Per il monitoraggio, i droni risultano essere estremamente utili sia per attività di *pre-survey*, ovvero come ausilio informativo per indirizzare e programmare le attività di rilievo diretto (es. valutazione dell'andamento fenologico della riproduzione, selezione aree da visitare), sia come strumento di raccolta dati di presenza (o assenza) delle specie target e di censimento delle unità di monitoraggio (es. individui, nidi) di interesse. Inoltre, il rilievo fotogrammetrico, restituendo informazioni con contenuto geometrico, permette di raccogliere dati sulla distribuzione spaziale delle unità di censimento e della scelta dell'habitat, informazioni in molti casi non ottenibili attraverso il rilievo diretto per l'impossibilità di avere adeguata visibilità o di accedere ai siti. I droni, infine, consentono di superare anche le difficoltà dovute all'utilizzo di mezzi aerei convenzionali (ultraleggero, deltaplano a motore, elicottero) utilizzati in passato per i medesimi scopi ma con evidenti limitazioni dovute a fattori di disponibilità dei mezzi, flessibilità operativa e costi.

Metodologia di rilievo e strumentazione

A seconda dell'obiettivo specifico, la strumentazione utilizzata e il tipo di rilievo possono variare sensibilmente dall'acquisizione di immagini e video in modalità manuale o realizzazione di rilievi aerofotogrammetrici per la restituzione di informazioni geometricamente corrette e accuratamente georeferenziate. In taluni casi, come per la stima del numero di fenicotteri nidificanti e del successo riproduttivo attraverso il conteggio dei nidi e successivamente dei pulli riuniti nell'asilo (crèche) prima dell'involo, risulta sufficiente il reperimento di immagini nadirali anche ad alta quota e con droni di ridotta dimensione e peso. In altri, come nel caso della valutazione dello stato di occupazione del sito riproduttivo, la localizzazione dell'area e il conteggio dei nidi, si procede con droni < 4 kg di MTOM dotati di camera RGB integrata e possibilità di realizzare rilievo automatico (pianificatore di volo). Mentre nel primo caso è il pilota, o l'esperto ornitologo che l'accompagna, ad effettuare il rilievo, nel secondo si procede pianificando la missione a quota variabile (25-40 m) in funzione dell'ecologia della specie, della dimensione minima degli oggetti da rilevare (adulti, nidi, ...) e dell'estensione dell'area rilevata.

Elaborazione e output

I dati acquisiti sono elaborati con strumenti ed approcci differenti a seconda dei casi. Per le attività basate sul conteggio degli individui, si procede alla composizione delle immagini o di frame estratti da video, per la produzione di uno strato di riferimento successivamente analizzato da esperti con modalità manuale o assistita/semi-automatica (es. DotDotGoose sviluppato dal Center for Biodiversity and Conservation degli Stati Uniti). Per le applicazioni aventi necessità geometriche, si procede con il metodo fotogrammetrico classico applicato a dataset nadirali. In questo caso, considerata la peculiarità degli habitat osservati, saranno da considerare attentamente i parametri di acquisizione (quota di volo, sovrapposizione e posizione relativa camera – sole) in modo da garantire la ricostruzione della scena di interesse anche in presenza di ampi specchi di acqua per i quali il riconoscimento di punti omologhi nelle diverse immagini risulta potenzialmente difficile.

Tipologie di analisi

Si riportano di seguito alcune analisi effettuate per la conta di una colonia di fenicotteri (*Phoenicopterus roseus*) e per la localizzazione e censimento nidi di Ardeidi, cormorani (*Phalacrocorax carbo*), spatola (*Platalea leucorodia*) ed altre specie coloniali in ambienti di canneto e arbusteto allagato.

Figura 51: Valli di Comacchio (FE). Pulli di fenicottero (*Phoenicopterus roseus*). L'elevata mobilità degli individui, la difficoltà di avvicinamento e la prospettiva terrestre rendono impossibile un conteggio completo della colonia.



Figura 52: Valli di Comacchio (FE). Ortomosaico RGB dell'intera crèche di pulli di fenicottero della colonia. I 7425 puntini rossi identificano ogni singolo pullo e derivano da conteggio semiautomatico effettuato con software dedicato applicato a immagini acquisite a 51 m dal livello del suolo.



Figura 53: Punte Alberete (RA). Ortoimmagine di una porzione della garzaia, fra le più importanti di Italia per numero di specie e di coppie nidificanti. All'interno dell'area allagata nidificano diverse centinaia di coppie di cormorano (*Phalacrocorax carbo*), marangone minore (*Microcarbo pygmaeus*), spatola (*Platalea leucorodia*) e mignattaio (*Plegadis falcinellus*). Nell'immagine, acquisita a 41 m di quota relativa, sono ben riconoscibili 4 nidi di airone cenerino (*Ardea cinerea*), 41 nidi di spatola e 119 nidi di marangone minore.



Figura 54: Punte Alberete (RA). Immagine prospettica (acquisita a 20 m di quota relativa) di una porzione di colonia mista di airone bianco maggiore (*Ardea alba*) e airone cenerino in ambiente di canneto; si contano rispettivamente 23 e 2 nidi. Solo una vista dall'alto consente di riconoscere i nidi, altrimenti preclusi alla vista da terra.



2.3 IMPIANTI

Scheda n. 16 - Acquacoltura

Finalità

L'acquacoltura è un settore strategico per l'economia blu e la transizione verde che contribuisce allo sviluppo di sistemi alimentari sostenibili, climaticamente neutri, sani e rispettosi dell'ambiente. L'impiego di UAS trova applicazione in attività finalizzate alla pianificazione, monitoraggio e controllo dell'acquacoltura in acque dolci e marine.

Nell'ambito della pianificazione dello spazio marittimo sono utilizzati a supporto del processo di identificazione di zone idonee da assegnare all'acquacoltura (AZA), per la valutazione delle interazioni terra-mare e dei potenziali conflitti d'uso (es. ambiente, turismo). Essi trovano inoltre applicazione per il monitoraggio ambientale dei siti di produzione, per individuare le sorgenti di impatto, verificare i limiti delle concessioni demaniali marittime etc.

L'acquisizione di informazioni video-fotografiche di aree terrestri, di transizione e marino-costiere su cui insistono impianti di acquacoltura è fondamentale per effettuare mappature e analisi di dettaglio delle attività produttive. Ortomosaici e nuvole di punti sono utilizzate ad esempio per la verifica delle dimensioni e del posizionamento delle strutture di allevamento, per la valutazione delle interazioni acquacoltura-ambiente e analisi dei potenziali impatti.

L'uso di UAS può inoltre coadiuvare le analisi per la valutazione dell'impatto visivo delle strutture d'allevamento nelle zone costiere, migliorando l'integrazione degli impianti d'acquacoltura nel contesto paesaggistico. Il materiale video-fotografico rilevato a diverse altezze e angolazioni è integrato nei modelli di analisi visiva implementati in ambienti GIS e utilizzato per confrontare e validare i risultati dei modelli, rafforzando l'affidabilità delle valutazioni spaziali.

Il materiale video-fotografico acquisito durante le campagne sul campo viene utilizzato anche per la realizzazione di prodotti per la divulgazione e la comunicazione tecnico-scientifica e l'educazione ambientale.

Metodologia di rilievo e strumentazione

A seconda degli obiettivi specifici i rilievi sono effettuati in modalità manuale o con volo pianificato. In quest'ultimo caso si definiscono i parametri ottimali della missione in funzione dell'estensione dell'area e delle condizioni ambientali attese al momento del rilievo. Generalmente si utilizza una missione con strisciate parallele (80% di sovrapposizione laterale).

Vengono per lo più utilizzati multirotori con fotocamera integrata di media risoluzione (12 – 20 Mp) e possibilità di acquisire immagini in formato JPEG e Raw e video in 4K. Viceversa, non risulta particolarmente interessante l'impiego di payload differenti.

Elaborazione e output

Per le elaborazioni delle immagini si impiegano i comuni software di elaborazione fotogrammetrica da cui si generano DEM ad alta risoluzione, ortomosaici e modelli 3D con texture.

Tipologie di analisi

L'analisi del materiale video-fotografico e gli output dei modelli ad alta risoluzione permettono di effettuare diverse tipologie di rilievi a terra, a mare ed in ambienti di transizione, utili all'individuazione di nuove aree idonee all'acquacoltura, all'accertamento dei limiti delle concessioni demaniali-marittime e alla verifica delle distanze tra impianti e della loro disposizione per successive valutazioni di *carrying-capacity*, oltre all'individuazione di eventuali criticità dovute alla vicinanza con zone sensibili sotto il profilo ambientale.

Nel caso di impianti di acquacoltura a terra, già il semplice utilizzo di ortofoto dell'area in esame, consente di identificare informazioni utili di dettaglio quali i flussi delle acque reflue, eventuali canali/bacini di lagunaggio, sistemi di filtraggio e di trattamento.

Figura 55: Laguna di Orbetello. Ricostruzione del percorso di scarico delle acque (in rosso) nei bacini di lagunaggio e canale di scarico (in azzurro) di un impianto di piscicoltura a terra. Posizionamento dei sistemi di ozonizzazione (in verde) e di filtraggio dell'acqua (in giallo).



Figura 56: Mattinata Gargano (FG). Rilievi del posizionamento dei recinti per la piscicoltura a mare finalizzati alla verifica dei limiti delle concessioni demaniali-marittime, della distanza tra i moduli di allevamento e i siti di produzione per successive valutazioni di potenziali impatti cumulativi e di *carrying-capacity*.



Figura 57: Capo Miseno (Bacoli, NA). Rilievi finalizzati alla mappatura dello stato delle concessioni di acquacoltura e ad attività di pianificazione spaziale marittima per l'individuazione di nuove aree idonee alla molluschicoltura.



2.4 MORFODINAMICA

Scheda n. 17 - Morfologia e linea di costa

Finalità

Gli ambienti costieri rappresentano ecosistemi caratterizzati da intrinseca instabilità connessa al delicato equilibrio fra la parte a terra e il mare che, in funzione del suo moto ondoso e degli eventi di mareggiata più o meno intensi e frequenti, ne determina l'evoluzione nel tempo. Inoltre, le attività antropiche, come la realizzazione di opere di difesa, il rimodellamento delle aree di estuario, i dragaggi in aree portuali, ecc. possono incidere in modo significativo sulla dinamica della costa. Le principali attività sono rivolte all'analisi delle coste italiane attraverso l'aggiornamento della digitalizzazione e caratterizzazione ambientale dei litorali nazionali. Tale attività consente il monitoraggio dell'evoluzione degli elementi naturali e antropici che determinano l'assetto costiero. A livello regionale e locale le attività di monitoraggio sono variegata ma accomunate tutte dalla finalità di controllo destinata alla conservazione o ripristino di questi ambienti delicati che, frequentemente, ospitano elevati valori naturalistici.

Metodologia di rilievo e strumentazione

La caratteristica di elevata dinamicità dell'ambiente costiero deve essere tenuta in considerazione nella definizione della metodologia di rilievo e della strumentazione più adatta al reperimento dei dati di interesse. Le Linee Guida per la Difesa della Costa dai fenomeni di Erosione e dagli effetti dei Cambiamenti climatici del MATTM-Regioni (2018) indica la linea di costa: come una "linea dinamica di un ambiente tipico di transizione (terra-mare) che risente di fluttuazioni a diverse scale temporali in relazione alle onde (secondi), alle maree (ore, due cicli giornalieri), stagioni o più ampie scale temporali (mesi, anni, secoli) come ad esempio i cambiamenti del livello medio marino". Ulteriore riferimento è dato dalle linee guida 3178 dell'Istituto Idrografico della Marina Militare, dove si definiscono la linea di riva (*shoreline*) e la linea di costa (*coastline*), intesa come particolare linea di riva riferita al livello medio di alta marea.

Per le finalità operative sopra esposte il riferimento è costituito dalla posizione della berma ordinaria, ovvero il gradino morfologico emerso, posto immediatamente al di sopra della battigia, definito in condizioni di alta marea relativa al giorno del rilievo. A tale scopo, si rende quindi necessario procedere con rilievi capaci di restituire DTM sufficientemente accurati e correttamente posizionati (con camera RGB o con sensore LiDAR). Le tecniche di posizionamento RTK o nRTK consentono di ridurre drasticamente i tempi di misura e di limitare il più possibile le interferenze nel caso in cui le aree oggetto di indagine siano particolarmente sensibili agli effetti del calpestio. Per questi scopi, sono impiegati indifferentemente velivoli ad ala rotante o ad ala fissa., generalmente però più sensibili al vento e meno versatili per tipologia di volo.

Elaborazione e output

Attraverso tecniche di fotogrammetria aerea o tramite processamento di nuvole di punti acquisite con sensore LiDAR si perviene a DTM con risoluzione centimetrica o sub-decimettrica e ortomosaici RGB ad altissima risoluzione (< 5 cm/px). Da tali strati informativi è possibile individuare, mediante algoritmi noti in letteratura, gli elementi morfologici di interesse e caratterizzare, oltre alle forme, anche il grado di copertura vegetale.

Tipologie di analisi

A partire dalla linea della berma ordinaria rilevata in tempi successivi è possibile analizzare le variazioni della posizione della linea di costa evidenziando i tratti soggetti a erosione, quelli stabili e quelli in deposito. Il riconoscimento della berma di tempesta consente di delineare il gradino morfologico relitto formatosi a seguito del più recente evento di tempesta. Il confronto multi-temporale delle superfici delle spiagge, delle dune e delle aree retrodunali consente inoltre di osservare le variazioni spaziali di ampie aree e di monitorare i processi a carico di questi ecosistemi. L'elevata risoluzione geometrica e la versatilità nel momento del rilievo permettono analisi dettagliate e frequenti a supporto del controllo dei processi evolutivi e per la verifica di interventi di gestione attiva, conservazione e tutela. L'impiego di sensori multispettrali, infine, soprattutto se combinato con dati LiDAR, incrementa la capacità descrittiva della componente vegetale in ambienti dove le variazioni di copertura rappresentano un indicatore importante per lo stato di salute degli habitat costieri.

Figura 58: Parco Regionale Migliarino, San Rossore, Massaciuccoli (PI, LU). Rilievo degli elementi di interesse per il monitoraggio costiero (attività effettuata nel corso dell'esercitazione del Gruppo "Droni" - TIC III del SNPA, Maggio 2024). Dati ottenuti tramite rilievo con camera RGB e LiDAR. La linea rossa rappresenta la sezione del terreno.

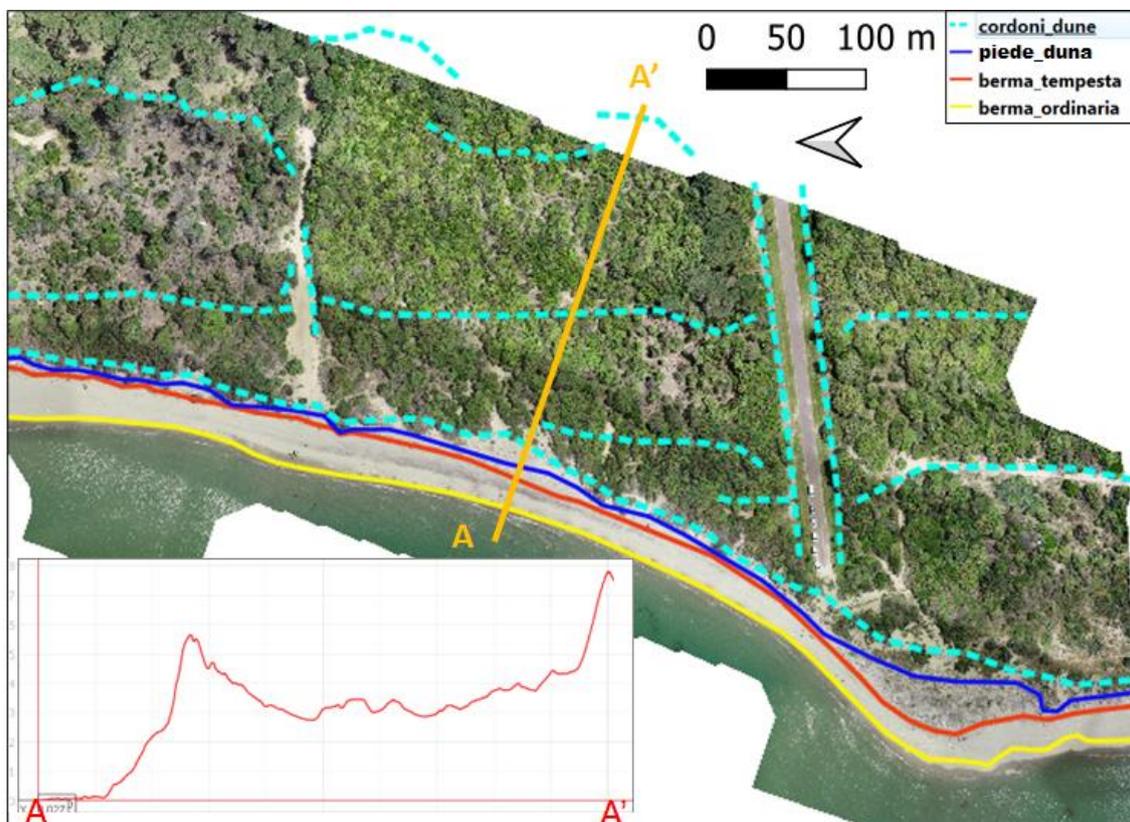


Figura 59: Parco Regionale Migliarino, San Rossore, Massaciuccoli (PI, LU). La mappa dell'altezza della vegetazione (Canopy Height Model), calcolata come differenza fra DSM e DTM fornisce indicazioni importanti sulla struttura delle diverse componenti vegetali evidenziando l'articolazione verticale degli ecosistemi.

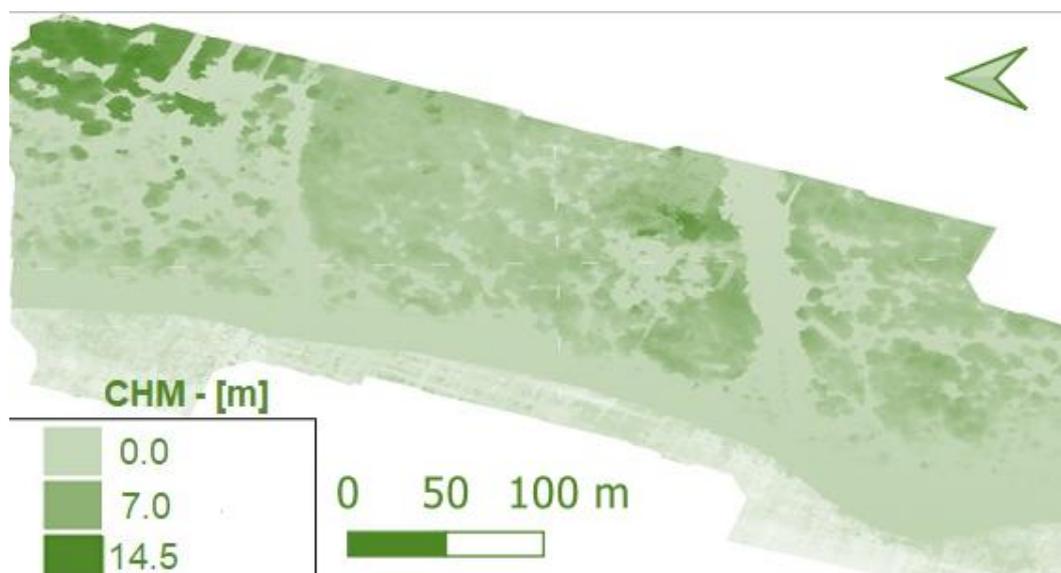


Figura 60: Parco Regionale Migliarino, San Rossore, Massaciuccoli (PI, LU). Il confronto fra mappe di indici di vegetazione, in questo caso NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), ottenuta da dati satellitari (sensore MSI montato su Sentinel2 del Programma UE Copernicus) e da acquisizione UAS, mostra il potenziale informativo dei due strumenti e consente un approccio integrato del monitoraggio che si avvantaggia dell'ampia copertura spaziale del primo e dell'elevata risoluzione geometrica dell'altro.

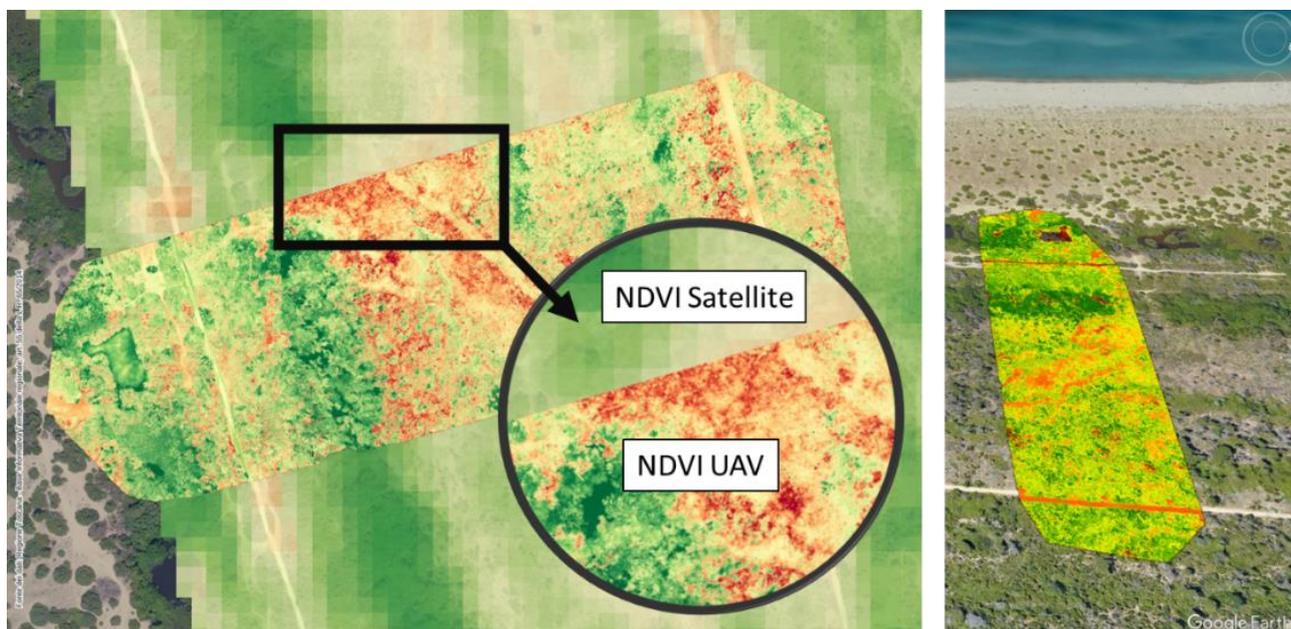


Figura 61: la produzione di ortomosaici RGB ad elevatissima risoluzione (1-2 cm/px), ottenuti tramite rilievi con piattaforme "standard" e quote di volo non superiori a 70-80 m, consente la mappatura dei rifiuti spiaggiati (nei riquadri lettera plastica di diversa tipologia e grandezza) inframezzati da residui legnosi.



Scheda n. 18 - Ambienti dunali

Finalità

L'impiego dei sistemi UAS nel monitoraggio degli ambienti dunali è da ricondursi principalmente agli studi sul movimento dunale, al monitoraggio e al censimento della flora e della fauna. Particolare interesse riveste il monitoraggio di aree protette e zone naturali, oltre che di aree sottoposte a forte pressione antropica o degradate in seguito ad eventi accidentali quali gli incendi. In questi contesti vengono utilizzate quantificazioni plano-altimetriche abbinate a tecniche di monitoraggio e censimento degli habitat naturali; al monitoraggio dello stato degli habitat dunali è opportuno abbinare quello di ulteriori forme di pressione quali quelle derivanti dal trasporto dei rifiuti sulla costa da parte delle correnti marine (*marine litter*).

Metodologia di rilievo e strumentazione

Per le attività di monitoraggio vengono utilizzati UAS multirotores dotati di camere digitali RGB, sensori LiDAR, camere multispettrali e termiche con moduli nRTK per la correzione della posizione in tempo reale tramite servizi in abbonamento. Per il rilievo di punti di appoggio a terra da impiegare nella successiva restituzione aerofotogrammetrica, in numero variabile in base alla morfologia dell'area, vengono utilizzati sistemi GNSS con precisione centimetrica al fine di garantire l'acquisizione di dati utilizzabili nei monitoraggi multi-temporali dei movimenti dunali. In assenza di ricezione del segnale RTK è necessario effettuare rilievi in modalità PPK.

Le modalità di rilievo includono voli automatici programmati e voli in modalità manuale, con riprese nadirali e oblique a quote che variano da 25 m a 50 m a seconda della tipologia di camera e di UAS utilizzati, in modo da garantire una elevata risoluzione geometrica (centimetrica). I dati UAS possono essere integrati con dati ottenuti da altre tipologie di rilievo, quali strumenti LiDAR terrestri e fotocamere Reflex da utilizzare per rilievi di dettaglio.

Elaborazione e output

Dalle elaborazioni aerofotogrammetriche si ottengono modelli 3D delle zone oggetto di studio, nuvole di punti, ortomosaici RGB, multispettrali e termici, DSM e DTM. Dalle fotografie multispettrali è inoltre possibile derivare ulteriori elaborati cartografici consistenti soprattutto in mappe tematiche di indici vegetazionali (NDVI, GNDVI, LAI, NDMI, ecc.).

Sia su modelli 3D che su dati multispettrali e termici possono essere utilizzate tecniche di classificazione spettrale e intelligenza artificiale per il riconoscimento di forme terrestri ed essenze arboree.

L'utilizzo di modelli di trasporto fluviale e meteomarinari e di analisi statistiche su dati meteorologici consente, in abbinamento a rilievi con sensori LiDAR e multispettrali, il monitoraggio e la previsione dei rifiuti spiaggiati. Per la restituzione fotogrammetrica e per l'elaborazione dei dati è possibile utilizzare sia software commerciali che software open source. Tra questi ultimi, per citare i più utilizzati, rientrano Web ODM per la produzione di ortomosaici, la ricostruzione dei modelli 3D (nuvole di punti, mesh e mesh con texture) e l'elaborazione dei dati multispettrali, e Cloud Compare per l'analisi e la classificazione di nuvole di punti. Il software QGIS rappresenta invece la soluzione GIS libera per le analisi multi-temporali e per la segmentazione/classificazione di immagini con tecniche di AI.

Tipologie di analisi

Per l'analisi delle variazioni morfologiche e degli habitat è necessario garantire uniformità nei prodotti ottenuti da rilievi UAS successivi. Dai modelli digitali del terreno, ottenuti da sensori ottici o LiDAR, è possibile derivare informazioni relative a estensione e altimetria degli ambienti monitorati e caratterizzare la struttura degli ecosistemi. I dati delle camere multispettrali possono inoltre essere utilizzati, se opportunamente calibrati radiometricamente, per derivare carte di indici vegetazionali utili nell'analisi della copertura vegetale finalizzata agli studi sulla biodiversità.

Figura 62: esempio di carta tematica rappresentante l'indice NDVI in una zona retrodunale nel Parco naturale di Migliarino San Rossore con risoluzione 5 cm e relativo istogramma.

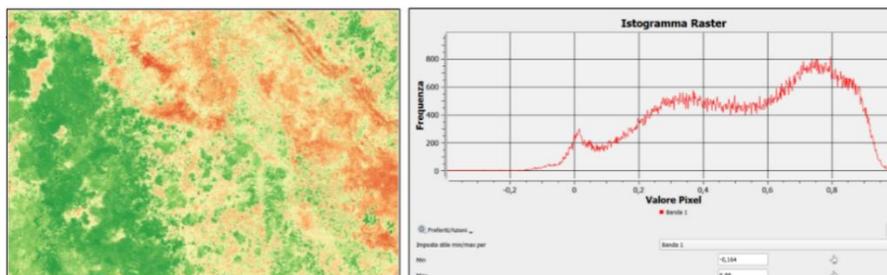


Figura 63: differenze di quota tra modello tridimensionale ricostruito da dati UAS e rilievo GNSS. Zona dunale di Volano con indicazione dei punti rilevati tramite antenna GNSS (a sx), sezioni corrispondenti per l'estrazione dei profili (al centro) e confronto dei profili altimetrici: GNSS e UAS (a dx).

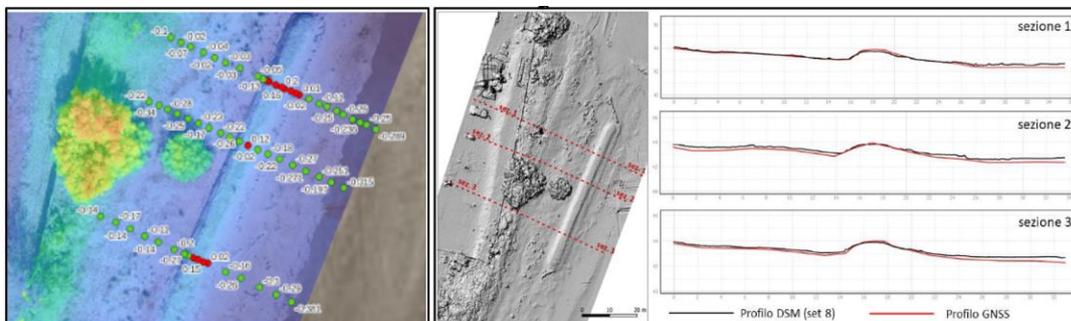


Figura 64: confronto tra i modelli del terreno ottenuti da tre voli svolti con UAS di categoria consumer (a) manuale (a sinistra) (b) nadirale programmato (al centro) (c) ottimizzato (a destra). Il volo nadirale consente di ottenere un modello accurato sul lato sinistro a pendenza elevata, sovrastimando però le quote delle parti superiori. I valori compresi tra -2.5 e 2.5 cm, convenzionalmente assunti come coincidenti, non sono visualizzati.

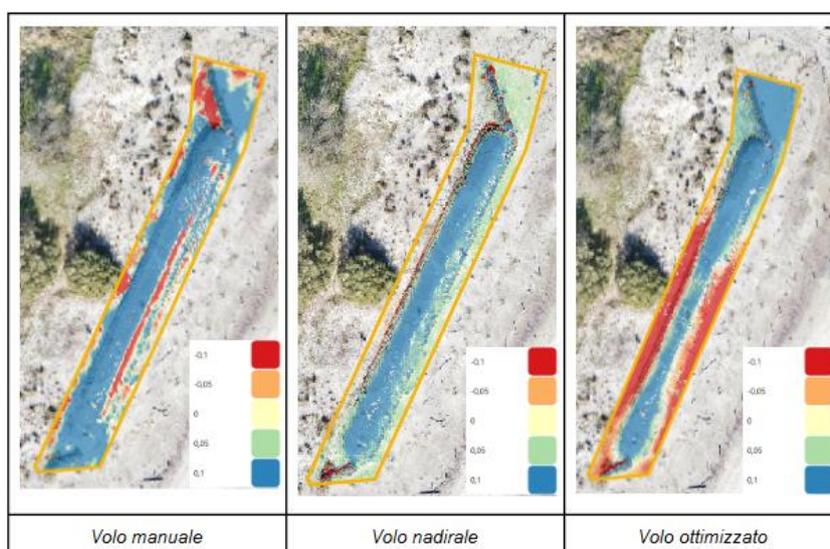
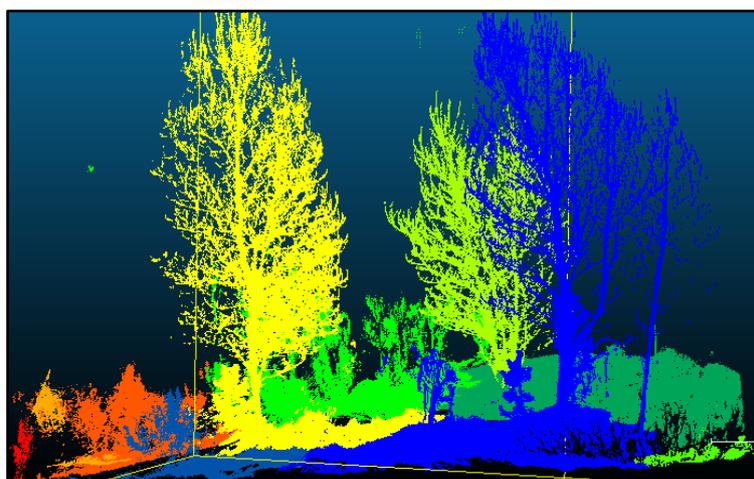


Figura 65: segmentazione di specie arbustive e arboree in *CloudCompare* (plugin *Treelso*) tramite tecniche di intelligenza artificiale applicata alla geomatica (GeoAI) con nuvole di punti rilevate da LiDAR terrestre.



2.5 INQUINAMENTO

Scheda n. 19 - Sversamento idrocarburi

Finalità

L'introduzione dei droni nel monitoraggio e nella ricerca di sversamenti di idrocarburi in mare, nei corpi idrici e sul suolo, può incrementare le capacità delle ARPA nelle attività di tutela ambientale, di prevenzione dei danni e nella gestione delle situazioni emergenziali e post-emergenziali. Il valore dell'impiego di UAS consiste nella possibilità di disporre di uno strumento a rapido dispiegamento e basso costo operativo, capace di lavorare sia partendo da terra che da imbarcazione e in grado di spingersi in aree difficilmente raggiungibili.

I droni risultano inoltre molto efficaci nella ricerca di sversamenti su aree costiere di medie-grandi dimensioni e qualora si utilizzino sensori termici permettono l'individuazione delle chiazze di idrocarburi. In caso di contaminazione delle coste possono risultare molto pratici per ottenere mappe per la valutazione delle operazioni di bonifica e pulizia del litorale nonché per monitorare il loro ripristino e recupero nel tempo fino ritorno alle condizioni originali.

Lungo i corsi d'acqua l'utilizzo del drone può essere fondamentale per individuare tempestivamente il punto di sversamento risalendo verso monte l'asse fluviale ispezionando aree non accessibili o visibili da terra. Si possono ispezionare tratti di svariate centinaia di metri in poco tempo minimizzando rischi per l'operatore e potendo indirizzare in modo efficace personale addetto alla posa delle panne nei punti più indicati e/o facilmente accessibili.

Metodologia di rilievo e strumentazione

In mare le operazioni vengono solitamente eseguite in volo manuale con decollo e atterraggio da imbarcazione. Le applicazioni di fotogrammetria per la conseguente generazione di ortomosaici sono possibili solo nelle aree prossime alla terraferma o in presenza di strutture antropiche, quali moli e pennelli, che garantiscono la ricostruzione della scena.

L'impiego di droni equipaggiati con termocamere risulta particolarmente vantaggioso in relazione alla capacità di questi sensori di rilevare differenze termiche della superficie marina e riconoscere agevolmente gli idrocarburi sull'acqua, elementi con caratteristiche termiche differenti. Un ulteriore vantaggio è la capacità di funzionare anche in condizioni di scarsa visibilità (notte) o, limitatamente, in caso di nebbia. Generalmente le attività di rilievo sono condotte in team composti da due operatori uno addetto alla conduzione del velivolo e un secondo dedicato interamente all'analisi delle immagini eventualmente replicate su schermo esterno al radiocomando e di caratteristiche idonee.

In condizioni di emergenza il supporto fornito da modelli matematici predittivi può simulare le zone dove è maggiormente probabile che l'idrocarburo si sia spostato, riducendo notevolmente l'area di ricerca.

Vista l'elevata qualità e risoluzione delle moderne termocamere montate sui droni e data la necessità di decollo e atterraggio su imbarcazioni (spesso di dimensioni ridotte), vengono solitamente preferiti droni di ridotte dimensioni.

In fase post-emergenziale i rilievi possono essere estesi a più ampie superfici per valutare le misure di risposta e contenimento da attuare e per supportare il monitoraggio dello stato ambientale nelle zone potenzialmente impattate dallo sversamento.

Lungo i corpi idrici interni o sul suolo l'impiego di tecniche di fotogrammetria per la restituzione di ortomosaici permette una rappresentazione completa dell'area interessata dall'evento e consente l'analisi dimensionale del fenomeno e il monitoraggio regolare dell'andamento delle operazioni di bonifica.

Elaborazione e output

Durante le operazioni di ricerca solitamente si osservano le immagini in tempo reale e si registrano ad alta risoluzione per una successiva analisi approfondita a supporto delle operazioni di mitigazione o bonifica.

Nel caso di sversamenti e contaminazioni che colpiscono direttamente la costa o nel caso di aree confinate, è generalmente utile realizzare mappature georeferenziate dell'area interessata dall'evento.

Tipologie di analisi

La maggior parte dei dati raccolti (video e immagini) possono essere usati in emergenza e post-emergenza per supportare la pianificazione degli interventi e per una prima stima dell'estensione e severità della contaminazione in essere. Qualora la scena operativa permetta di creare ortomosaici delle chiazze di idrocarburo in superficie e vi sia in contemporanea un campionamento per lo spessore, è possibile quantificare il volume di idrocarburo sversato. In caso non possa essere fatta una misura diretta la stima del volume può essere condotta applicando il Bonn Agreement Oil Appearance Code (BAOAC), che classifica le chiazze di idrocarburi in mare collegando il colore a spessori standard.

Nel caso in cui la contaminazione raggiunga tratti di costa, la mappatura da drone può fornire mappe di inquadramento del sito colpito e stime delle aree su cui sia necessario operare per il calcolo del danno ambientale. Una campagna di monitoraggio ripetuta nel tempo può seguire con precisione le successive fasi di ripulitura, bonifica e ripristino e valutare l'efficacia degli interventi.

Figura 66: nei rilievi diurni la post-elaborazione delle immagini (aumento contrasto-riduzione dei toni di blu-filtro *highpass*) può evidenziare le aree ad elevata concentrazione di idrocarburo.

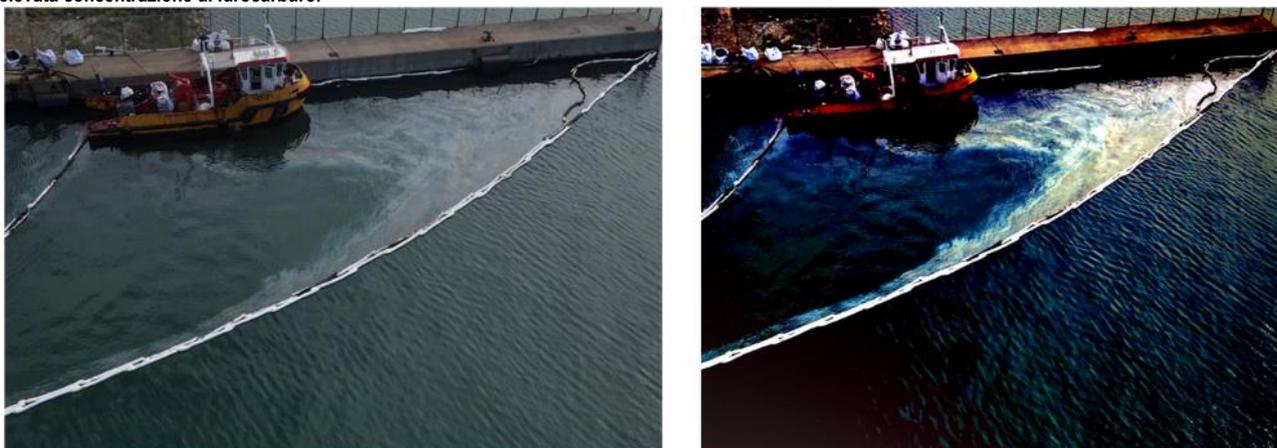


Figura 67: utilizzo del drone a bassa quota per la ricerca lungo le coste per l'individuazione di eventuali residui o chiazze d'idrocarburo.

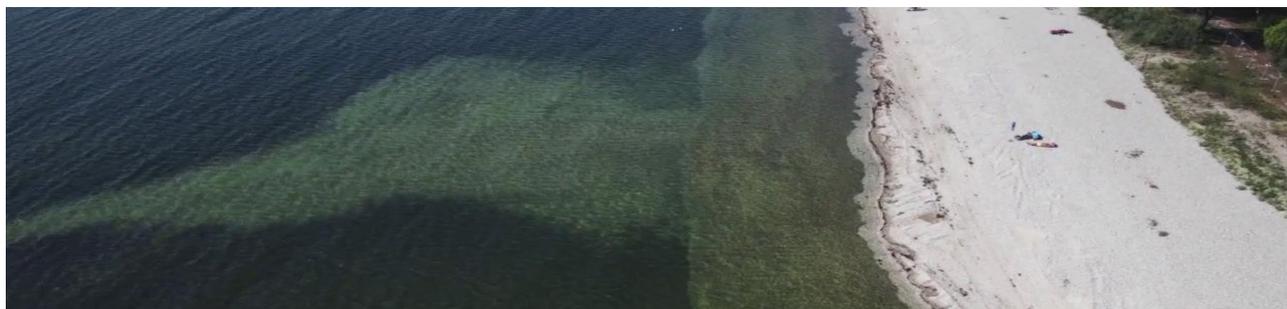


Figura 68: la visualizzazione SBS agevola la ricerca e interpretazione delle immagini termiche e RGB

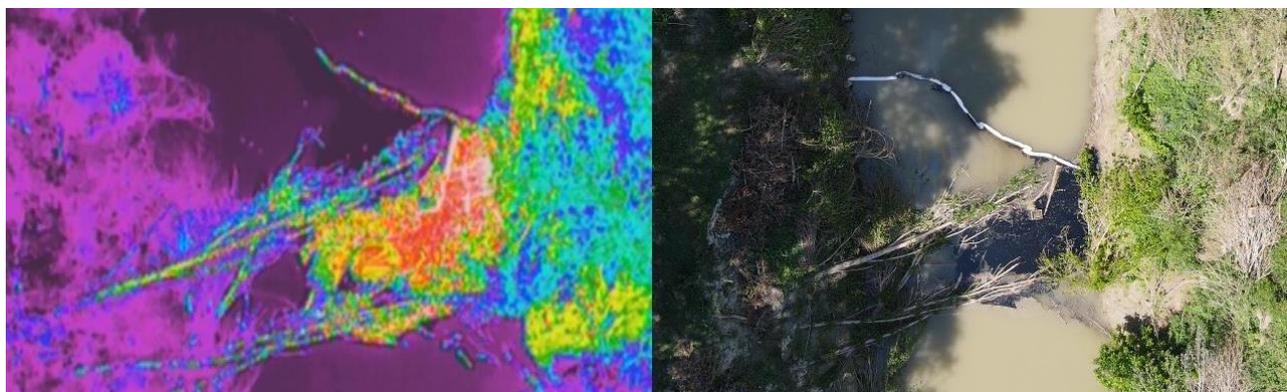
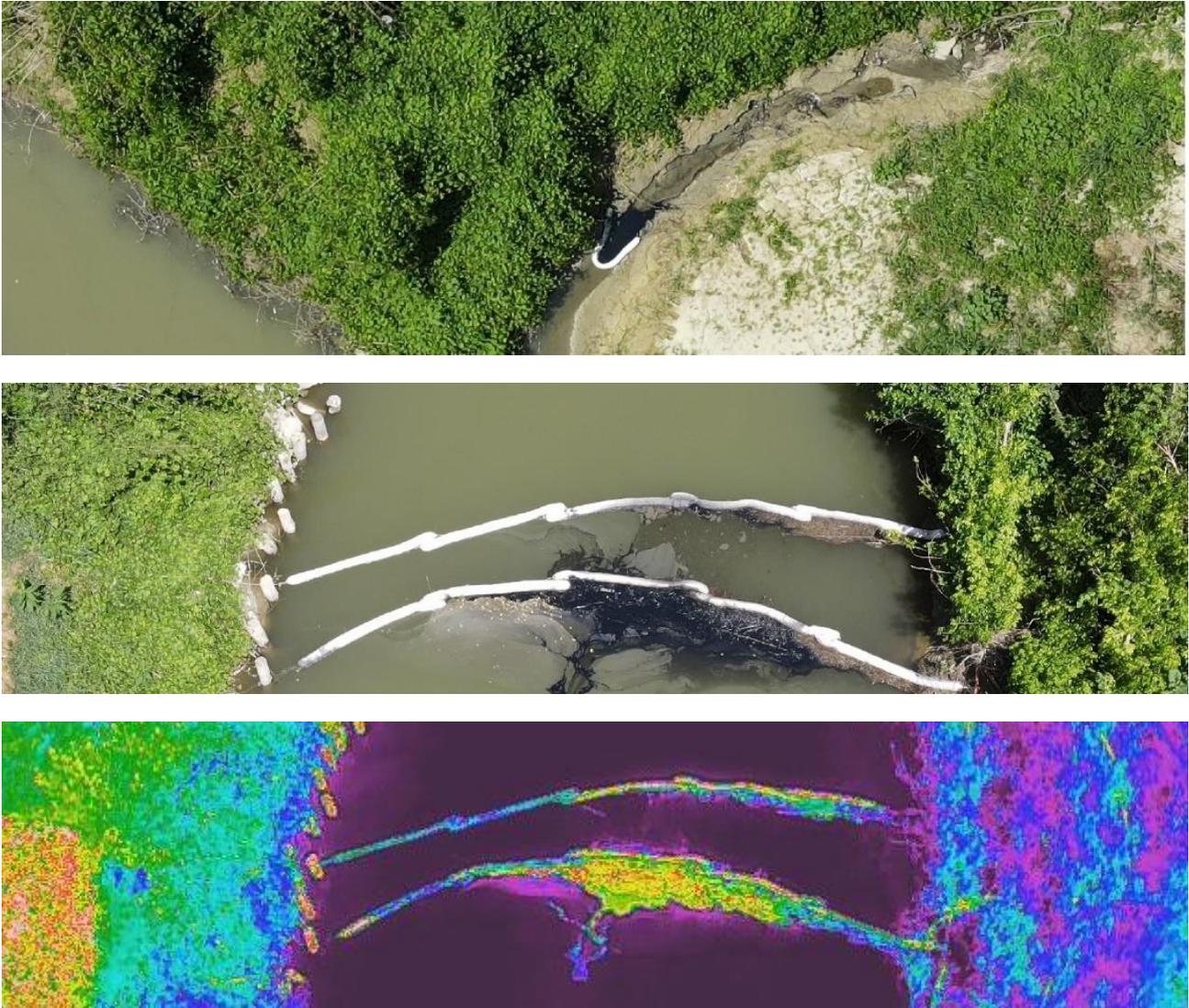


Figura 69: monitoraggio delle fasi di intercettazione dell'idrocarburo e verifica del suo contenimento.



Scheda n. 20 - Rifiuti plastici

Finalità

I rifiuti di plastica, trasportati verso i mari o accumulati lungo le aree costiere, causano gravi effetti biologici, ecologici e chimici sull'ecosistema marino-costiero e sono considerati un problema globale. Al fine di prevenire la degradazione in microplastiche è importante localizzare e monitorare la distribuzione e la presenza di mesoplastiche (4,76-200 mm) o macroplastiche (>200 mm) lungo le spiagge o negli ambienti marino-costieri. I sistemi UAS possono costituire un importante strumento a supporto delle attività di monitoraggio. Il livello di dettaglio delle immagini acquisite dipende fortemente dalle caratteristiche della fotocamera utilizzata e dalla quota di volo del drone e permette di descrivere la distribuzione dei rifiuti e la caratterizzazione delle plastiche individuate. Per una corretta mappatura dei rifiuti plastici è consigliabile coinvolgere operatori con esperienza in materia di mappatura dei rifiuti in aree marino-costiere, anche opportunamente formati per questa tipologia di rilievo. Le procedure di identificazione dei rifiuti possono prevedere lo *screening* e l'analisi a monitor delle immagini aeree acquisite e/o degli ortomosaici ottenuti, nonché lo sviluppo di specifici algoritmi per il riconoscimento automatizzato degli oggetti.

Metodologia di rilievo e strumentazione

La maggior parte dei rilievi in questo ambito prevedono l'applicazione di tecniche di aerofotogrammetria e sfruttano camere digitali RGB con diverse caratteristiche ottiche, geometriche e radiometriche. Per questo tipo di applicazioni sono particolarmente adatti i sistemi UAS multirotores, prevedendo il posizionamento nelle aree oggetto di rilievo di un sufficiente numero di targets di coordinate note (da rilevare con sistemi GNSS) per garantire adeguati livelli di accuratezza di posizionamento. La possibilità di acquisire dati corretti con la modalità nRTK o RTK può eliminare la necessità di rilievi GNSS di appoggio a terra. L'altitudine di volo e il settaggio della telecamera vengono comunemente scelte per ottenere una distanza di campionamento del terreno necessaria a distinguere le tipologie di rifiuti nelle immagini. In generale, per rilievi di questo tipo, le quote di volo sono comprese tra 5m e 40m. Per rifiuti di piccole dimensioni (tra 2 cm e 10 cm) in letteratura vengono riportate quote di volo comprese tra 10m e 20m.

L'utilizzo di sensori multispettrali consente di disporre di immagini che, adeguatamente elaborate, possono favorire lo sviluppo di procedure automatizzate per il riconoscimento dei rifiuti plastici.

Elaborazione e output

La sequenza di immagini acquisite può essere utilizzata per la produzione di ortomosaici, utilizzando sistemi di elaborazione basati sulle tecniche di SfM, oppure per l'analisi manuale delle singole immagini. La procedura di interpretazione dell'ortomosaico ad alta risoluzione può essere effettuata in ambiente GIS identificando i rifiuti plastici ed eventualmente procedendo anche con la loro classificazione in categorie (bocce, bottiglie, contenitori di varia tipologia, cassette in plastica o in polistirolo, ...). Per facilitare la visualizzazione dei risultati i punti identificati sull'ortomosaico possono essere associati a una griglia con dimensioni delle celle variabili (per esempio 2,5 m x 2,5 m).

Più in generale, in letteratura viene riportata un'ampia varietà di tecniche per il rilevamento automatico dei rifiuti plastici in ambiente marino-costiero, come l'approccio basato su soglie, l'apprendimento automatico *Random Forest* basato su pixel, classificatori ad oggetti e l'approccio *deep learning*.

Tipologie di analisi

Il rilievo di rifiuti plastici in ambiente marino-costiero permette, tramite l'identificazione manuale e/o automatica, la classificazione delle tipologie dei rifiuti (tipologia, materiale e dimensioni), insieme alla produzione di mappe di distribuzione. Pertanto, l'uso dei sistemi UAS per il rilievo dei rifiuti può essere considerato non solo come un'alternativa al tradizionale censimento visivo, ma anche come una nuova metodologia per migliorare la conoscenza sulle dinamiche dei rifiuti, svolgendo potenzialmente un ruolo importante nel fornire dati per il rilievo multi-temporale degli stessi rifiuti sulle aree costiere. Per quanto riguarda la potenziale standardizzazione del rilievo dei rifiuti plastici tramite UAS, che consentirebbe un confronto tra le differenti acquisizioni, l'analisi ha rivelato difficoltà nel proporre un set omogeneizzato di parametri di volo, data l'ampia varietà di ambienti costieri e i diversi UAS disponibili. Inoltre, le caratteristiche e la posizione degli oggetti a terra influenzano il rilevamento anche di oggetti grandi e teoricamente facili da identificare. Infine, il livello di esperienza del pilota è da considerare come un'ulteriore variabile che può influenzare i risultati dell'identificazione dei rifiuti.

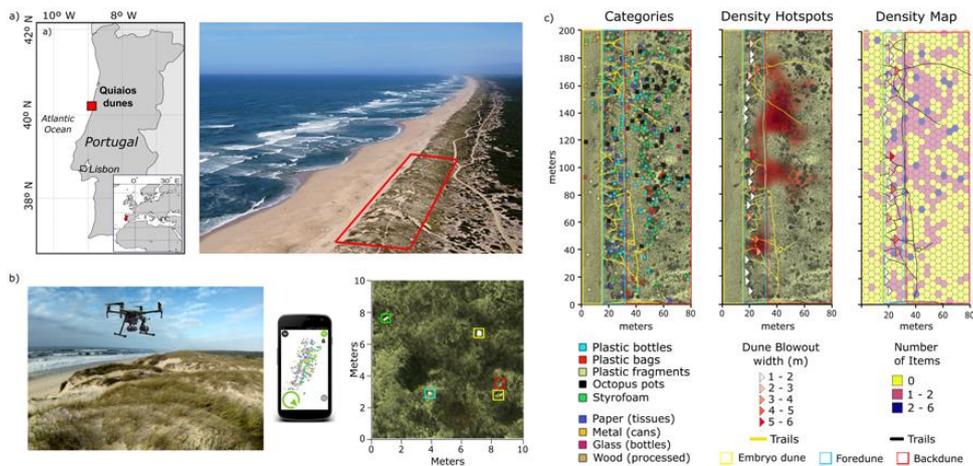
Figura 70: differenti tipologie di rifiuti plastici a seguito di un rilievo e interpretazione su ortomosaico.



Figura 71: risultati dell'elaborazione fotogrammetrica e dell'attività di foto interpretazione.



Figura 72: a) Sito di studio, dune della spiaggia di Quiaios, Portogallo; b) Procedura di mappatura basata su UAS; c) Mappe dei rifiuti marini in base alle loro categorie⁴.



⁴ Tratto da U. Andriolo, G. Gonçalves, P. Sobral, Á. Fontán-Bouzas, F. Bessa, Beach-dune morphodynamics and marine macro-litter abundance: An integrated approach with Unmanned Aerial System, Science of The Total Environment, 2020, 141474, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141474>.

3 AMBIENTE ANTROPIZZATO

3.1 CONTROLLI

Scheda n. 21 - Processi produttivi e impianti

Finalità

All'interno delle prescrizioni previste dal DPCM 29/09/2017 ("Piano delle misure e delle attività di tutela ambientale e sanitaria"), prendendo ad esempio l'impianto siderurgico di Taranto (ex ILVA) spiccano per magnitudo, nonché per l'attesa rilevanza dal punto di vista della mitigazione dell'impatto ambientale, i lavori di adeguamento per la realizzazione delle coperture dei parchi di stoccaggio dei minerali di ferro e di carbon fossile e la chiusura completa dei nastri trasportatori. Per le verifiche di ottemperanza a tali prescrizioni si è reso necessario disporre di strumenti che permettessero di visionare ovvero di riprendere per successive analisi, elementi strutturali aventi peculiari caratteristiche di estensione e di posizione. La rete di nastri trasportatori si sviluppa linearmente per 30 km distribuiti su tutta la superficie del sito, con rilevanti porzioni in quota sopra strade ad elevata percorrenza ed altre non facilmente raggiungibili. Altrettanto complessa la verifica da effettuare sulle 2 coperture dei parchi primari, data la sua importante impronta a terra (500 m di lunghezza per 200 m di larghezza) ma soprattutto la sua altezza (circa 80 m). L'utilizzo di UAS come strumento per l'acquisizione di video e di immagini delle attrezzature oggetto della verifica si è configurato come una soluzione efficace, applicata per la prima volta in attività di Vigilanza Ambientale AIA proprio in questo caso.

Successivamente sono stati svolti controlli per i fumi dell'impianto agglomerato convogliati ad uno specifico camino, così come è stato realizzato un ulteriore controllo, tramite semplici riprese video e fotografiche, per la verifica dell'avanzamento delle opere incluse in altra prescrizione in fase di svolgimento sulle grandi superfici degli sporgenti marittimi III e V del porto di Taranto.

Metodologia di rilievo e strumentazione

Tali controlli, limitati anche in questo caso a delle riprese video e fotografiche dei lunghi ed imponenti condotti nonché impianti connessi, sono stati effettuati mediante l'uso di un drone multirottore. Le operazioni di volo sono state compiute in tipologia "Open" con richiesta ed ottenimento dell'Autorizzazione al sorvolo della zona LI-P27 all'ENAC ed alla Marina Militare di Taranto. La pianificazione di volo è stata effettuata mediante l'utilizzo del software di mappatura GIS della ESRI.

Il Gestore ha in tutti i casi, chiesto di poter visionare il materiale foto/video acquisito e successivamente allegato ai Rapporti di sopralluogo.

Elaborazione e output

In tale specifico utilizzo, per mere riprese video e fotografiche, il drone svolge la funzione di apparecchio fotografico con punti di ripresa da posizioni privilegiate e con ampia estensione spaziale. Di conseguenza le elaborazioni da svolgere consistono solo in operazioni assimilabili a quelle classiche effettuate da fotocamera tradizionale.

Tipologie di analisi

Ribadendo il concetto ora espresso, le analisi riguardano lo stato di avanzamento ovvero il completamento di opere relative a prescrizioni previste all'interno di un DPCM specifico.

Scheda n. 22 - Gestione dei rifiuti

Finalità

Si tratta di un'attività per la quale l'uso degli UAS ha avuto ampia applicazione. Gli interventi sono svolti generalmente a supporto delle attività ordinaria di controllo, nell'ambito di collaborazioni con le Forze dell'Ordine e/o su delega d'indagine da parte della magistratura.

Un primo tipo di rilievi sono quelli svolti nell'ambito dei controlli ordinari alle discariche per valutare le volumetrie e le quote massime di conferimento previste dalle autorizzazioni. In altri casi i rilievi sono svolti nell'ambito dei controlli agli impianti di stoccaggio e trattamento, per la verifica delle prescrizioni e, in particolare, per la misura delle volumetrie dei rifiuti stoccati. Un ulteriore ambito sono i rilievi svolti su siti di potenziale gestione illegale dei rifiuti, emersi durante la sorveglianza del territorio (es. su base satellitare) o segnalati/richiesti dalle autorità.

Lo scopo dei rilievi è affiancare al controllo tradizionale in campo un nuovo punto di vista che permetta la caratterizzazione dei materiali presenti, una stima volumetrica dei quantitativi e in generale fornisca elementi conoscitivi sullo stato dei luoghi. In alcuni casi i rilievi da drone sono svolti prima del controllo diretto sul sito, per acquisire informazioni utili alla preparazione del sopralluogo; utilizzando sensori idonei a seconda dei contesti (es. sorvoli ad alta quota con drone ad ala fissa, ispezioni da distanza con camere ottiche dotate di zoom, termocamera, ecc..). Inoltre, la tecnica proposta, non richiedendo la movimentazione di personale nelle aree di abbancamento, è a vantaggio della sicurezza degli operatori che limitano gli spostamenti in aree a difficile percorrenza.

Metodologia di rilievo e strumentazione

Si utilizza generalmente un drone multirottore di medie dimensioni (es. Dji Phantom 4 RTK), sufficientemente versatile e adatto per caratteristiche tecniche; in casi particolari possono essere utilizzati droni multirottore di categoria superiore (es. Dji Matrice 210 RTK e Dji Matrice 350 RTK) che possono imbarcare sensoristica specifica, o ancora droni ad ala fissa (senseFly eBee RTK e eBeeX RTK).

La maggior parte dei rilievi aerofotogrammetrici sono effettuati utilizzando fotocamere digitale RGB effettuando riprese nadirali ed oblique per garantire una geometria di acquisizione robusta ed evitare zone prive di dati; in alcuni casi, per esigenze specifiche, si possono impiegare termocamere, fotocamere dotate di zoom o sensori LiDAR nel caso in cui la presenza di vegetazione renda non sufficiente l'approccio fotogrammetrico per l'effettiva stima dei volumi di materiale presente sotto chioma. L'uso della termografia consente, inoltre, di ricostruire una mappa del campo termico della superficie della discarica. L'esame di tali immagini, da eseguire direttamente in campo, richiede specifiche competenze dal momento che il segnale rilevato è influenzato sia dalle condizioni del terreno, sia dall'ambiente circostante. Per la massimizzazione delle informazioni rilevate con camera termica è normalmente richiesta la ripetizione delle acquisizioni in stagioni e momenti della giornata differenti.

La possibilità di acquisire dati corretti con la modalità nRTK o RTK può, in alcuni casi, eliminare la necessità di rilievi GNSS di appoggio a terra.

Solo una piccola parte delle operazioni relative a questo ambito applicativo possono essere riconducibili alla categoria "Open" (es. rilievi in aree rurali, o in impianti isolati), mentre la maggior parte sono riconducibili allo scenario "Specific" (per il contesto urbano limitrofo, per la presenza di infrastrutture, ecc..), e spesso in contesti prossimi ad aree soggette a vincoli aeronautici.

Elaborazione e output

I prodotti tipici dei rilievi sono costituiti da nuvole di punti, ortomosaici, DSM e DTM, derivati da aerofotogrammetria. In questi ambiti di utilizzo, il rilievo aerofotogrammetrico da drone rappresenta una soluzione molto pratica e allo stesso tempo accurata, in particolare quando effettuato con correzione RTK. In caso di contraddittorio e controllo di possibili non conformità è importante fornire una stima dell'accuratezza degli elaborati cartografici prodotti e, nel caso di computi volumetrici, dell'incertezza associata. In questi casi è bene prevedere sempre il rilievo di punti di controllo a terra con strumentazione GNSS per valutare in modo indipendente gli errori insiti nei modelli 3D restituiti e nelle successive stime dei volumi.

Tipologie di analisi

Le successive elaborazioni consentono, negli impianti autorizzati, le valutazioni di conformità alle prescrizioni, il computo volumetrico dei cumuli rilevati, la verifica della disposizione delle differenti tipologie di rifiuti, ecc..; nelle situazioni non autorizzate, una prima caratterizzazione dei vari materiali illecitamente stoccati, oltre che le stime volumetriche dei rifiuti presenti.

Figura 73: rilievi effettuati presso un impianto autorizzato al trattamento di rifiuti, sorvolato in due momenti diversi con diversi obiettivi ed approcci; con la prima missione (drone ad ala fissa) è stato realizzato il rilievo complessivo dell'impianto sorvolando l'area in esame a quota di circa 115 m AGL, ma con decollo effettuato ad una congrua distanza dall'impianto (oltre 300 metri di distanza) ed acquisendo dati e informazioni utili a supporto della pianificazione del secondo controllo più mirato a specifiche aree.



Figura 74: un esempio dei risultati di un rilievo da drone effettuato nell'ambito di un controllo ordinario presso un impianto di trattamento di rifiuti: la tecnica fotogrammetrica ha consentito l'individuazione e la stima accurata della disposizione dei diversi cumuli, ed il loro computo volumetrico.

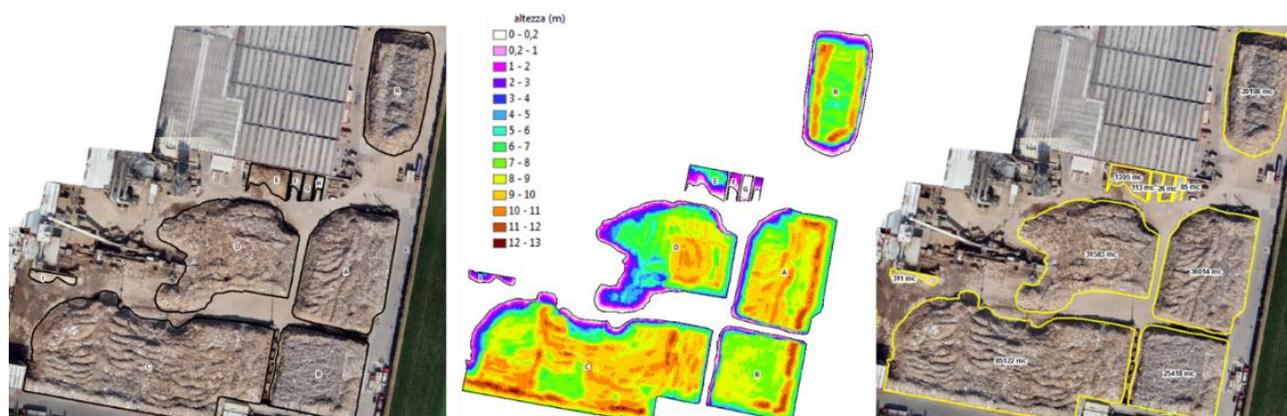


Figura 75: nella immagine termica (a sx) sono evidenziati gli hotspots della discarica, in alcuni casi riconducibili a superfici esposte al sole (in caso di rilievo effettuato durante le ore di luce), in altri riconducibili all'emissione diffusa di biogas o a fenomeni di intensa ossidazione.

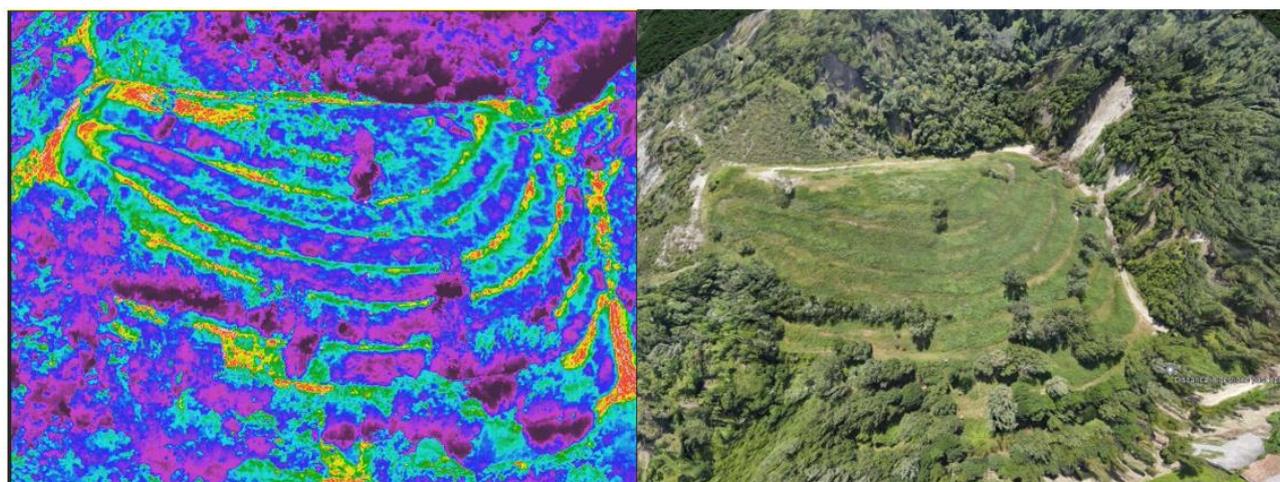
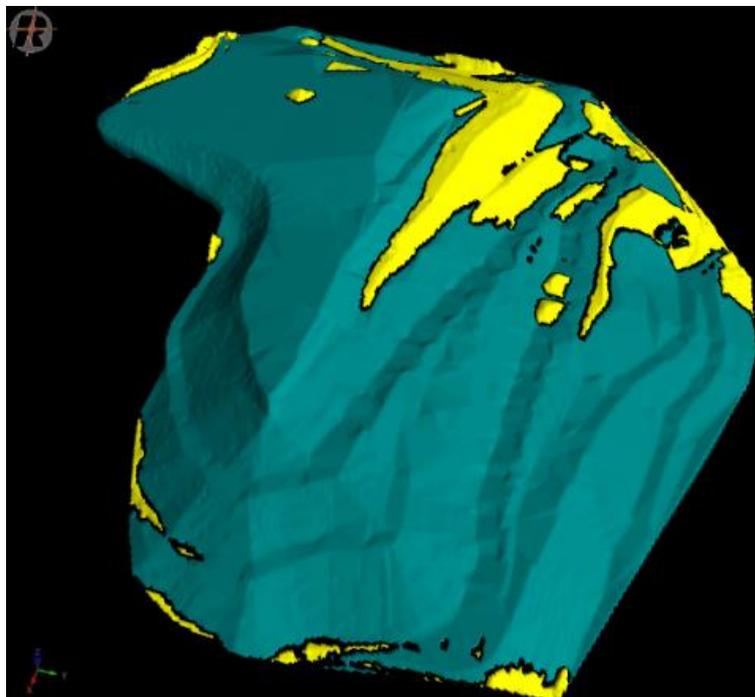


Figura 76: verifica della coerenza fra lo stato attuale della superficie e la superficie di progetto della discarica (in verde scuro). In giallo sono evidenziati i settori ove la quota di rilievo eccede la quota di progetto.



Scheda n. 23 - Cave**Finalità**

L'utilizzo di sistemi UAS nel monitoraggio e nel controllo delle attività estrattive consente di effettuare frequenti verifiche delle variazioni plano-altimetriche e di stimare le volumetrie con elevata precisione, costi e tempi ridotti rispetto ad altre tecnologie di rilievo, garantendo l'accesso in sicurezza agli operatori. Riprese foto e video possono essere condivise con altri attori istituzionali, per l'utilizzo in attività ispettive in materia di salute e sicurezza sui luoghi di lavoro (presenza di fratture, aree aggettanti, stabilità dei versanti e dei fronti di cava, numero di lavoratori presenti), oltre che di pianificazione delle attività di coltivazione (coerenza con i confini di proprietà e delle aree autorizzate, qualità del materiale presenti). Riprese e prodotti derivati rivestono inoltre un importante valore documentale per la storia del territorio e del paesaggio, consentendo la ricostruzione dell'evoluzione dei luoghi e la conservazione della memoria storica in aree di pregio o di interesse storico. Particolare interesse riveste infine il monitoraggio degli habitat naturali, con particolare riferimento all'individuazione di fenomeni di stress vegetazionale legati agli impatti ambientali delle attività estrattive sulle aree e sugli alvei fluviali limitrofi e alla verifica dello stato di avanzamento dei processi di rinaturalizzazione.

Metodologia di rilievo e strumentazione

Per documentare lo stato dei luoghi nelle attività ispettive è sufficiente l'utilizzo di videocamere ottiche a media risoluzione; viceversa, la realizzazione di voli automatici pianificati, l'impiego di un sistema GNSS per il rilievo di punti di controllo a terra con precisione centimetrica e di software di elaborazione fotogrammetrica, consentono la ricostruzione del modello digitale del terreno interessato dalle riprese.

La scelta del tipo di aeromobile dipende dalle caratteristiche e dall'estensione dell'area di interesse: velivoli ad ala fissa consentono il rilevamento speditivo di interi comprensori, mentre velivoli multirotori consentono l'acquisizione di riprese con risoluzione al suolo uniforme anche in ambienti a morfologia complessa quali cave a pozzo o su versanti a pendenza elevata. I rilievi effettuati con UAS possono essere integrati con riprese realizzate con altre tecniche di rilievo (macchine Reflex o TLS), e consentono di rilevare superfici dell'ordine di 400 m x 400 m.

Sensori LiDAR e multispettrali sono utili soprattutto per studi connessi al comparto vegetale. Nei rilievi con sensori multispettrali è bene procedere con la calibrazione radiometrica al fine di valorizzarne al massimo il contenuto informativo.

Elaborazione e output

Riprese UAS e dati GNSS vengono utilizzati per la restituzione di modelli digitali di superficie tramite tecniche classiche di ricostruzione fotogrammetrica. I GCP vengono utilizzati per il miglioramento della precisione dei modelli del terreno e la georeferenziazione dei modelli e degli ortomosaici, rendendoli confrontabili con ulteriori dati territoriali georiferiti.

Sensori LiDAR e multispettrali restituiscono rispettivamente nuvole di punti classificabili per l'eliminazione dello strato vegetale sovrastante e la restituzione del modello digitale del terreno.

Tipologie di analisi

La disponibilità di modelli digitali del terreno consente sia la perimetrazione delle aree soggette a rimodellamento geomorfologico che la stima delle variazioni volumetriche, delle geometrie di scavo e dell'assetto dei fronti di cava in corso d'opera. Confronti multi-temporali tra modelli del terreno consentono di valutare gli impatti dell'attività estrattiva e di verificare gli stadi di avanzamento delle attività di coltivazione o di ripristino post-esercizio, eventualmente integrati con riprese aeree o da terra ad altissima risoluzione.

Gli ortomosaici ottenuti dalle riprese fotografiche consentono, oltre ad una migliore interpretazione del dato altimetrico, l'applicazione di tecniche di elaborazione delle immagini e di intelligenza artificiale per il riconoscimento automatico di piante e oggetti. L'utilizzo congiunto di ortomosaici RGB e di indici spettrali (es. NDVI e LAI) semplifica il monitoraggio dei processi di rinaturalizzazione spontanea o artificiale, la perimetrazione delle aree vegetate caratterizzate da stress o la verifica dell'eventuale rimozione della vegetazione perifluviale a seguito di eventi rilevanti di trasporto solido negli alvei.

Figura 77: integrazione di rilievo UAS nadirale con piano di volo automatico e volo manuale a quote verticali fisse (a sinistra) e riprese fotografiche da terra con camera Reflex di zone con pareti aggettanti (al centro). Integrazione di nuvole di punti da rilievo UAS su cantiere a cielo aperto e rilievo LiDAR terrestre su cantiere sotterraneo (a destra).



Figura 78: analisi multi-temporale delle variazioni di quota. A sinistra: rilievi UAS a cadenza semestrale (07 / 11 2017). A destra: rilievi LiDAR aerei a cadenza quinquennale (2012/2017).

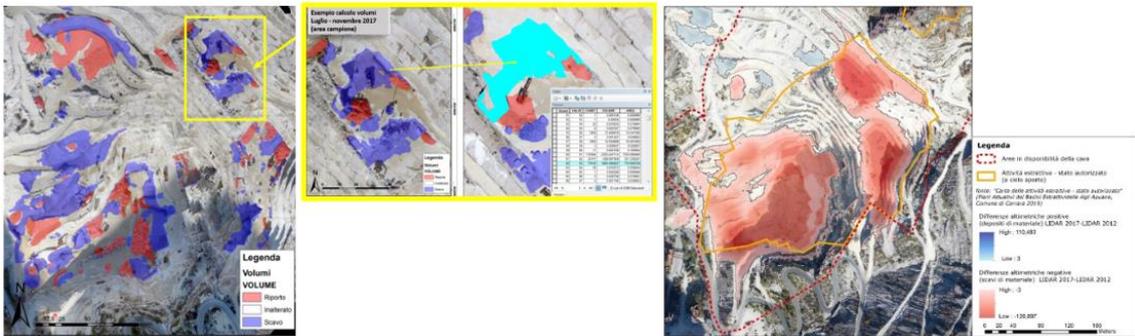
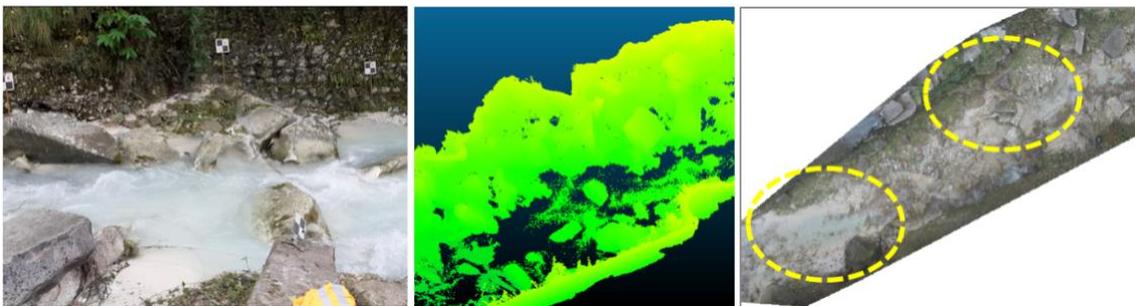


Figura 79: processo di rinaturalizzazione spontanea su cava dismessa. A sinistra e al centro: NDVI e ortoimmagine anno 2017. A destra: ortoimmagine anno 2023.



Figura 80: vegetazione riparia e accumulo di fanghi di segazione (marmettola). A sinistra: dettaglio del tratto rilevato con UAS e LiDAR terrestre. Al centro: modello del terreno da rilievo LiDAR terrestre. A destra: ortomosaico da UAS, con evidenziate le aree maggiormente soggette ad accumulo di marmettola a causa dei processi di trasporto solido.



Scheda n. 24 - Operazioni di svaso delle dighe

Finalità

Nell'arco alpino sono presenti numerose dighe artificiali, in maggioranza costruite più di 60 anni fa; pertanto, i sedimenti trasportati dai corsi d'acqua affluenti si sono nel tempo accumulati sul fondo di questi bacini compromettendone la capacità di invaso e creando problemi strutturali agli sbarramenti.

Negli ultimi anni è pertanto diventato indispensabile prevedere la rimozione dei sedimenti depositati al fine di recuperare la capacità di trattenere maggiori volumi d'acqua e ripristinare le condizioni di sicurezza di progetto. Tale operazione può avvenire per asportazione meccanica diretta dei sedimenti, previo svuotamento del bacino o per fluitazione ovvero trasporto a valle dei sedimenti, opportunamente risollevari, ad opera del corso d'acqua emissario. In entrambi i casi la rimozione/fluitazione del sedimento costituisce una potenziale criticità per gli ecosistemi fluviali posti a valle delle dighe.

In tale ambito i droni si sono rivelati un valido supporto alla determinazione per via aerofotogrammetrica dei volumi nelle diverse fasi delle operazioni di rimozione e alla verifica della tutela degli habitat fluviali di valle.

Metodologia di rilievo e strumentazione

Si utilizza generalmente un drone multirotores (es. Dji Phantom 4 RTK), e in casi particolari sono utilizzati droni multirotores (es. Dji Matrice 210 RTK e Dji Matrice 350 RTK) che hanno la possibilità di montare sensoristica specifica.

La maggior parte dei rilievi aerofotogrammetrici sono effettuati sfruttando la camera digitale RGB in dotazione al drone. In alcuni casi, per esigenze specifiche sono utilizzabili altri sensori: X5S su un drone Dji Matrice 210 RTK; o un LiDAR L1 su un drone Dji Matrice 350 RTK. Quest'ultima soluzione è utilizzata nel caso la presenza di vegetazione renda imprecisa, attraverso la sola fotogrammetria, l'effettiva stima del DTM sotto chioma è quindi la stima dei volumi.

La maggior parte di queste operazioni è riconducibili a operazioni in categoria "Open": rilievi in aree naturali (rurali o montane). Si fa presente, infine, che tutte le operazioni descritte si riferiscono unicamente al caso di invasi svuotati.

Elaborazione e output

I prodotti tipici dei rilievi sono: nuvole di punti, ortomosaici, DSM, DTM, derivati da aerofotogrammetria. In questi ambiti di utilizzo, il rilievo aerofotogrammetrico da drone rappresenta una soluzione molto pratica e allo stesso tempo accurata, in particolare quando effettuato con correzione RTK. In caso di contraddittorio e controllo di possibili non conformità è importante fornire una stima dell'accuratezza degli elaborati cartografici prodotti e, nel caso di computi volumetrici, dell'incertezza associata. In questi casi la procedura prevede sempre il rilievo di punti di controllo a terra con strumentazione GNSS per valutare in modo indipendente gli errori insiti nei modelli 3D restituiti e nelle successive stime dei volumi.

Tipologie di analisi

Le successive elaborazioni consentono, attraverso il confronto delle superfici acquisite in tempi diversi la stima dei volumi asportati e la conoscenza sulla nuova morfologia del fondo.

Figura 81: Ripresa di un cantiere dove è in corso la rimozione meccanica dei sedimenti a monte di un invaso.

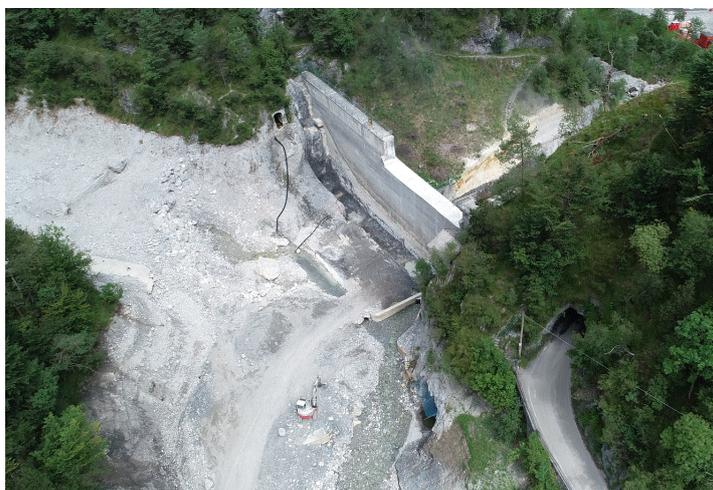
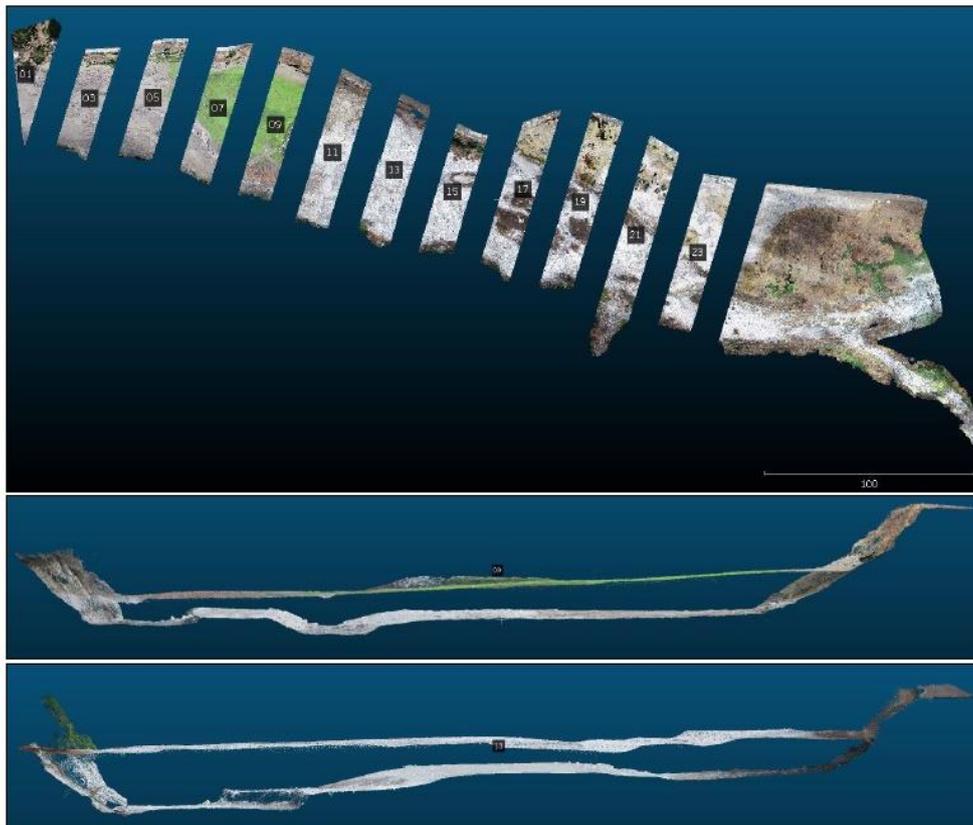


Figura 82: Scopo del rilievo aerofotogrammetrico è la generazione del modello 3D delle superfici ed il confronto di successivi rilievi effettuati nelle diverse fasi di cantiere consentendo la determinazione dei volumi movimentati.



Figura 83: Esempio di confronto tra sezioni che riportano le morfologie prima e dopo l'intervento di rimozione.



3.2 EMERGENZE

Scheda n. 25 - Sversamenti in corpi idrici superficiali

Finalità

I corpi idrici superficiali rappresentano ecosistemi di grande importanza ecologica e sono generalmente caratterizzati da un elevato grado di biodiversità. Tuttavia, questi ambienti sono particolarmente vulnerabili alle pressioni antropiche, che possono alterare la composizione delle comunità biologiche, degradare gli habitat acquatici e compromettere i servizi ecosistemici. Tra i possibili elementi di pressione, la presenza di scarichi, soprattutto se non autorizzati, costituisce il maggiore fattore di perturbazione e danno. Il SNPA è impegnato in attività di monitoraggio ambientale che includono l'implementazione di reti di sorveglianza e sistemi di indagine complessi finalizzati alla raccolta e analisi di dati relativi a diverse matrici ambientali, con l'obiettivo di individuare tendenze temporali e prevenire potenziali situazioni di degrado ambientale che potrebbero avere effetti diretti o indiretti sulla salute umana e sull'integrità degli ecosistemi.

Metodologia di rilievo e strumentazione

Le metodologie tradizionali di monitoraggio ambientale, basate su attività di sopralluogo e campionamento, presentano difficoltà operative significative nei corpi idrici interni, specialmente in aree remote o con limitata accessibilità. In tali contesti, diventa complesso ottenere una visione globale e dettagliata dello stato di salute dell'ecosistema, con il rischio di non individuare fonti di inquinamento puntuale come scarichi illegali. Per superare queste limitazioni, l'impiego di droni dotati di sensori specifici, come termocamere, rappresenta una metodologia promettente per il monitoraggio esteso ed efficace dei corpi idrici.

L'utilizzo di droni, infatti, consente di effettuare riprese aeree su vaste aree, fornendo una visione d'insieme altrimenti impossibile da ottenere. Grazie a sensori dedicati, come le termocamere, è possibile rilevare in tempo reale il campo termico su ampie sezioni del corpo idrico, identificando rapidamente le anomalie termiche, la loro estensione e la direzione di propagazione. Tali dati, pur essendo di natura prevalentemente qualitativa, permettono di ottimizzare le attività di monitoraggio e indagine puntuale, indirizzando in modo mirato gli sforzi analitici verso le zone che richiedono ulteriori approfondimenti.

L'utilizzo di UAS, inoltre, offre il vantaggio di coprire, in pochi minuti di volo, estesi tratti di corpi idrici, documentando le caratteristiche del territorio in modo continuo e senza interruzioni. Questa metodologia consente di ottenere un quadro generale delle condizioni ecologiche su ampie superfici, riducendo il tempo e le risorse necessarie per le indagini preliminari. Inoltre, la capacità di identificare aree problematiche consente di pianificare interventi mirati per l'analisi in loco, migliorando l'efficienza complessiva del monitoraggio.

Elaborazione e output

Attraverso l'elaborazione degli scatti raccolti dal sensore del drone è possibile convertire l'informazione radiometrica in mappe termiche, ossia rappresentazioni del campo di temperatura superficiale nell'area inquadrata dal sensore. L'informazione può quindi essere restituita sotto forma di diversi tematismi grafici in falso colore, da associare e confrontare con l'omologa scena raccolta con il sensore fotografico RGB.

Tipologie di analisi

Le immagini prodotte permettono di evidenziare l'eventuale presenza di anomalie termiche nella vena defluente. Dal confronto tra l'immagine termica e l'omologa nel campo nel visibile è, inoltre, possibile verificare la presenza di eventuali manufatti o morfologie del terreno tali da suggerire la presenza di scarichi non autorizzati o simili configurazioni che potranno, successivamente, essere oggetto di approfondimento in situ.

Figura 84: Rio Mannu di Ozieri, Ozieri (SS). Individuazione di anomalia termica in sponda destra del Rio Mannu di Ozieri. Rappresentazione affiancata: (dx) campo termico in falso colore, (sx) immagine RGB.

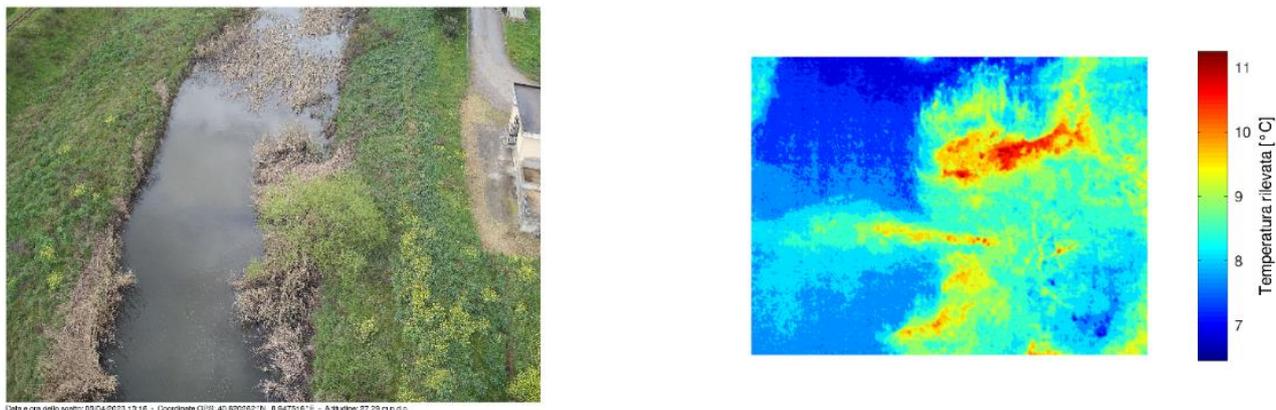
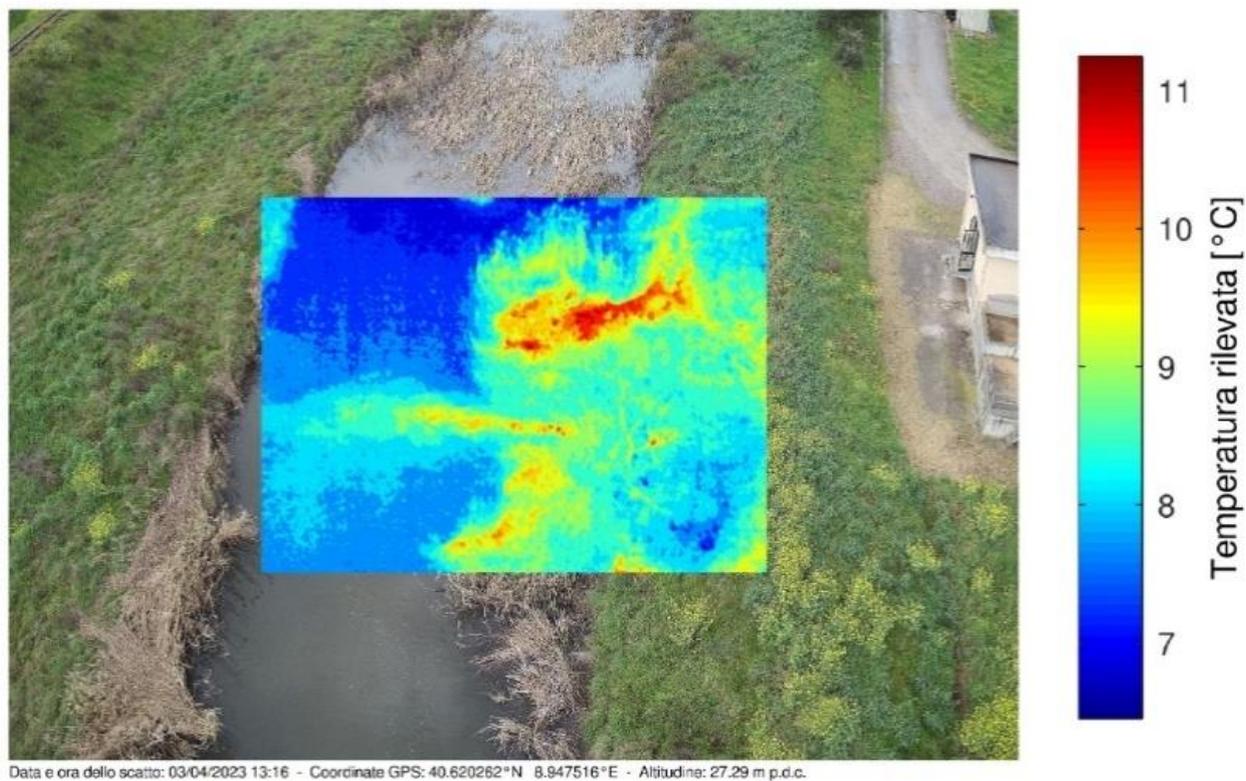


Figura 85: Fraz. Chilivani, Ozieri (SS). Individuazione di anomalia termica collegata al recapito in sponda sinistra di un affluente del Rio Mannu di Ozieri da parte del depuratore. Rappresentazione in formato PIP (picture in picture) con campo termico rappresentato in falso colore sovrapposto ad immagine RGB.



Scheda n. 26 - Incendi e abbruciamenti in ambito industriale o urbano

Finalità

L'utilizzo dei droni con termocamera in caso di incendio in aziende o aree industriali è utile nel gestire le fasi emergenziali, individuando materiali inquinanti in dispersione sia in aria che sul terreno e, ove esistano protocolli e procedure di collaborazioni, affiancando il personale del Corpo nazionale dei vigili del fuoco nell'individuazione di punti caldi, nuovi inneschi, dispersione di sostanze infiammabili o pericolose. Non meno importante la riduzione del rischio di esposizione degli operatori che possono effettuare valutazioni rimanendo in area di sicurezza.

Un rilievo con UAS può facilitare l'individuazione a distanza della presenza delle acque di spegnimento e l'eventuale percolamento con eventuale immissione in corpi idrici superficiali, valutazioni che in orario notturno, in aree prive di illuminazione, può risultare molto difficile se fatto da terra.

Un ulteriore supporto fornito dai droni consiste nella verifica del tipo di copertura degli edifici interessati dall'incendio; in casi di sospetto impiego di materiale contenente amianto per le coperture, si potrebbero attuare o anticipare, da parte degli organismi coinvolti e competenti in materia, tutte le procedure e le cautele volte alla riduzione della dispersione delle fibre nell'ambiente.

In caso di abbruciamenti irregolari di materiali di varia natura, il drone può essere determinante per individuare il punto di combustione, quando esso risulta nascosto da vegetazione o in mezzo ad aree coltivate; può essere inoltre utile per definirne l'estensione e per valutare la direzione di propagazione compatibilmente con le condizioni meteo.

Metodologia di rilievo e strumentazione

Durante gli incendi occorre tenere presente sia aspetti legati agli inquinanti aerodispersi, sia alla dispersione delle acque di spegnimento. Si consideri inoltre che in scenario emergenziale l'operatività di UAS è impedita, entro un'area definita, se non espressamente condotta a supporto ed in coordinamento con il personale titolare della gestione dell'emergenza e dell'eventuale soccorso (Corpo nazionale dei vigili del fuoco).

La strumentazione comunemente impiegata è rappresentata da velivolo multirottore equipaggiato con camera RGB e sensore termico e condotto in modalità manuale. È da prestare particolare attenzione alle aree limitrofe al luogo incidentale che possono essere interessate dalla dispersione di inquinanti e/o da ricaduta di materiali, soprattutto in caso di vento.

Infine, si ravvisa l'utilità degli UAS in caso di fenomeni di molestie olfattive, dovuti ad abbruciamenti, per la ricerca del punto di combustione anche se al momento delle riprese la combustione dovesse risultare cessata.

Elaborazione e output

Sono possibili elaborazioni delle immagini termografiche tramite software dedicato.

Inoltre, è possibile effettuare voli fotogrammetrici per creare ortofoto e/o modelli 3d dell'area interessata dall'evento per effettuare misurazioni, valutazione dei materiali combusti e rifiuti derivanti dalla combustione senza dover accedere ad aree potenzialmente contaminate riducendo così l'esposizione degli operatori.

Tipologie di analisi

Analisi termografiche, analisi RGB sulla tipologia dei materiali/rifiuti, misurazioni lineari e di volume dell'area in indagine funzionali alla gestione post-emergenza e alla bonifica.

Figura 86: combustione di biomasse individuazione dei punti di autocombustione.

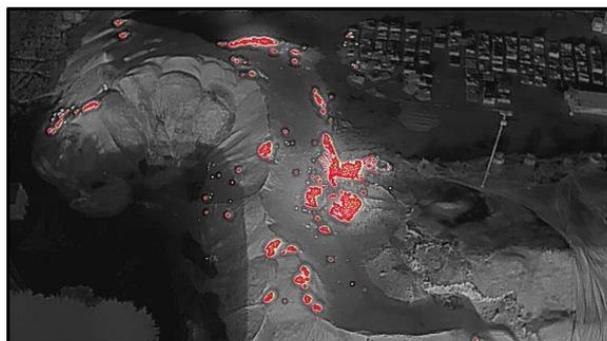


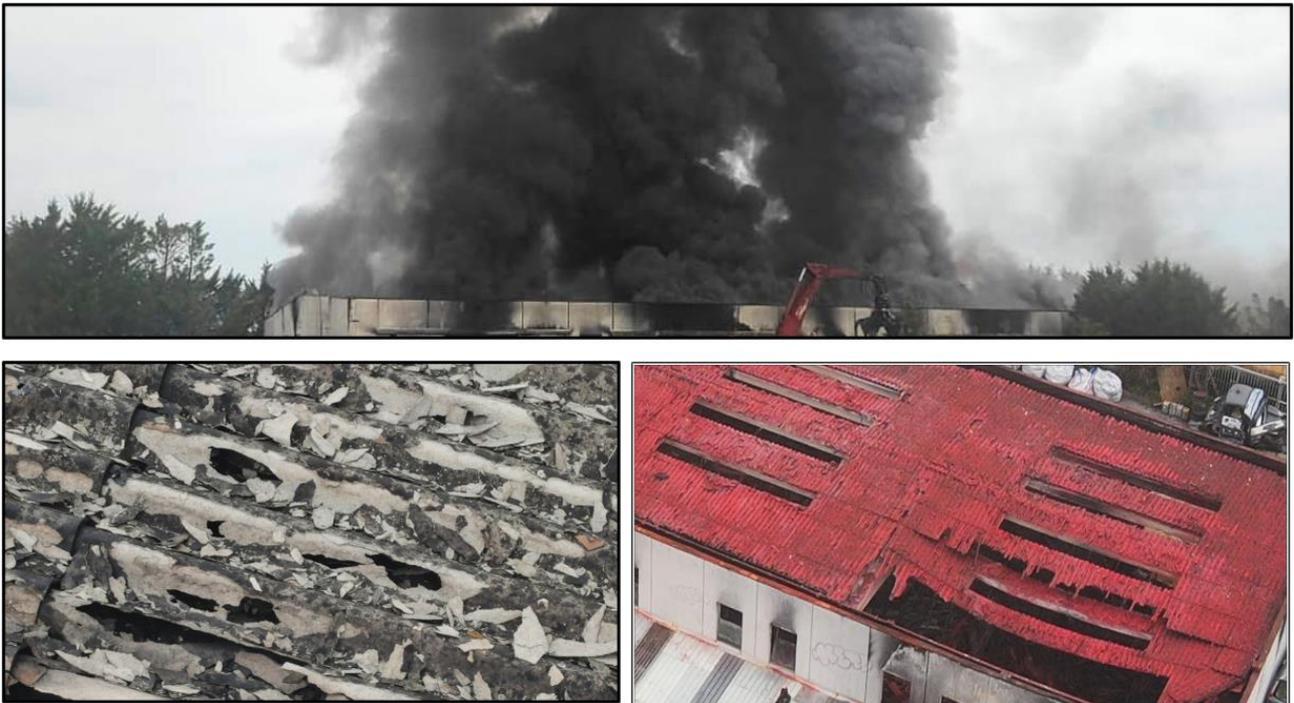
Figura 87: incendio e relativa colonna di aria calda rilevata dalla termocamera in caso di vento aiuta ad individuare la direzione della dispersione di inquinanti.



Figura 88: vista BSB per l'individuazione di un nuovo innesco dovuto a materiale infiammabile.



Figura 89: incendio di capannone con copertura di cemento amianto e successiva fase di incapsulamento/bonifica.



3.3 AGENTI FISICI

Scheda n. 27 - Luminanza (ambiente notturno)

Finalità

L'uso di UAS a supporto delle azioni di salvaguardia del cielo notturno e di promozione del risparmio energetico consente, tramite riprese notturne, di individuare con maggior facilità gli impianti inquinanti, in quanto emittenti direttamente verso l'alto, oppure con flussi luminosi troppo elevati.

Metodologia di rilievo e strumentazione

La misura della luminanza con la classica strumentazione illuminotecnica da terra è poco agevole a causa della difficoltà di poter operare in ambienti urbanizzati e trafficati ed in relazione alla geometria di osservazione. Il supporto fornito dagli UAS a tale misura risulta quindi particolarmente vantaggioso, soprattutto perché consente un controllo mirato, veloce e preciso di tutti quegli impianti, sia pubblici che privati, che insistono su di un territorio fortemente interessato da illuminazione notturna. Al momento la metodologia proposta (es. in ARPA Veneto) è in fase sperimentale: sono state effettuate misure con fotocamera appositamente calibrata e si sta approfondendo la relazione tra la luminanza misurata a terra e quella da drone.

Il metodo proposto permetterà sia il controllo dei valori di flusso luminoso installati, spesso del tutto superiori a quelli previsti dalle normative tecniche, sia una quantificazione del flusso luminoso disperso verso il cielo. Inoltre, i rilievi da UAS condotti a varie altezze, analizzati anche in rapporto ai dati di profondità ottica ottenuti da satellite, permetteranno di approfondire i complessi aspetti che legano l'inquinamento luminoso alla presenza di particolato atmosferico e alla sua variabilità con l'altezza.

Per i rilievi si utilizzano generalmente droni multirotori equipaggiati con una camera calibrata per tre diverse sensibilità (ISO: 800, 1600 e 3200) e apertura f/2.8; le immagini sono acquisite in formato JPEG o RAW (queste ultime sono fondamentali perché contengono i valori di luminanza grazie alla calibrazione della fotocamera).

Elaborazione e output

Il valore di luminanza misurato dal drone varia a seconda dell'angolo di ripresa e delle caratteristiche di riflessione delle diverse tipologie di superficie indagata; pertanto, il valore misurato non corrisponde direttamente a quello indicato come luminanza stradale nelle norme UNI e non può essere, quindi, direttamente confrontato con esso.

Eseguendo però un volo di tipo goniometrico (ovvero un volo che riprenda il medesimo territorio da angolazioni ed altezze diverse, in modo da coprire l'intera superficie di una semisfera) si potrà calcolare dalle diverse immagini il fattore correttivo da applicare alle luminanze individuate da UAS per ottenere informazioni confrontabili con la normativa tecnica.

Tipologie di analisi

L'output che si ottiene a valle delle riprese con drone è rappresentato dalle immagini con valori di luminanza al suolo, oltre alle immagini RGB classiche. Tali immagini, possono essere unite per creare un ortomosaico che mostri, ad esempio, le differenze di temperatura di colore dei vari apparecchi di illuminazione al suolo.

Il rilievo eseguito attraverso questa metodica può inoltre fornire il valore flusso luminoso emesso verso l'alto dagli apparecchi di illuminazione.

Figura 90: singola immagine di rotonda stradale, ripresa da 80 metri di altezza. A sx il dato RGB, a dx i valori di luminanza.

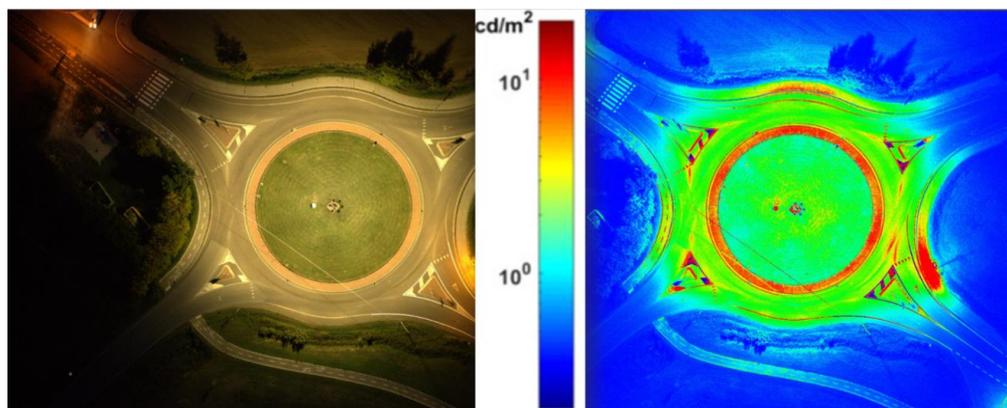


Figura 91: condizioni di illuminazione del parcheggio di un centro commerciale, ripresa obliqua. A sx l'originale RGB, a dx i valori di luminanza.

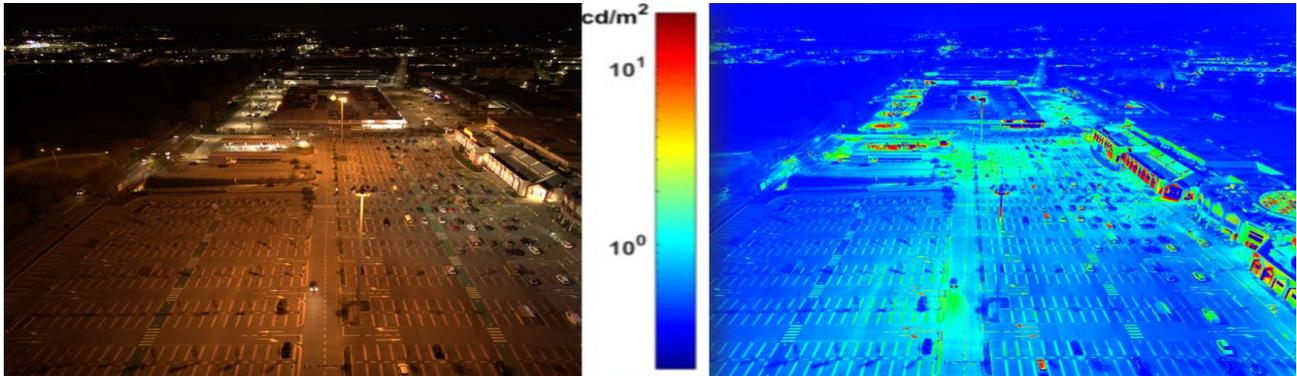
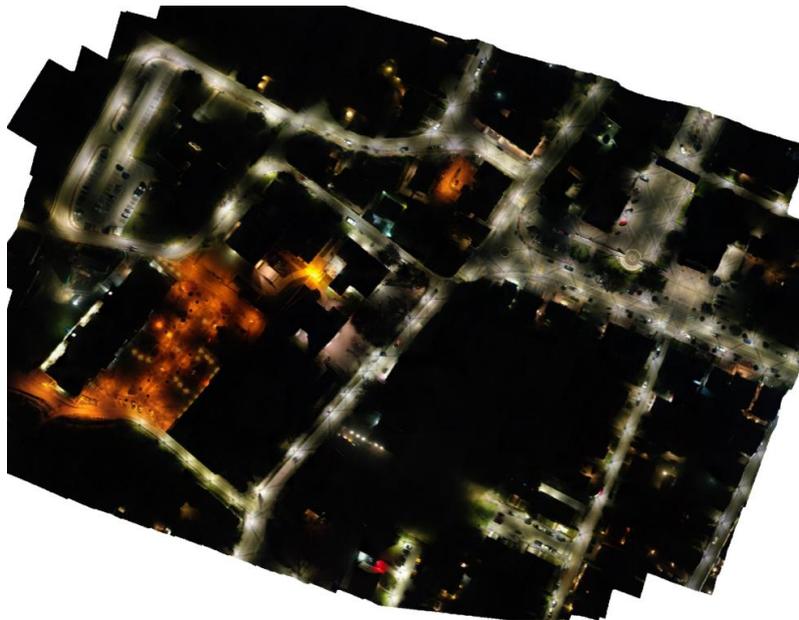


Figura 92: ortomosaico RGB di porzione di centro urbano elaborato da acquisizione notturna. È possibile individuare le diverse tipologie di luci utilizzate e la presenza di corridoi bui o aree intensamente illuminate.



Scheda n. 28 - Livello di campo elettrico a radio frequenza

Finalità

Le attività sotto descritte sono funzionali all'esecuzione di misure speditive del campo elettrico a RF (Radio Frequenza) al fine di verificare il rispetto dei limiti di esposizione della popolazione e identificare potenziali criticità da approfondire con ulteriori misurazioni condotte secondo protocolli standard più onerosi. Il sistema proposto, recentemente oggetto di confronto con i metodi standard, prevede l'impiego di un misuratore a banda larga collocato nelle posizioni di indagine attraverso l'uso di UAS. Il drone, in questo caso, facilita e velocizza l'esecuzione delle misure in ambiente urbano operando dall'esterno degli edifici e limitando, di conseguenza, la necessità dell'ottenimento di permessi per l'accesso ai piani superiori.

Metodologia di rilievo e strumentazione

Il monitoraggio, condotto in via sperimentale per la definizione di un protocollo di misura, prevede l'uso di un UAS multirottore (es. Dji Mavic 3 Enterprise) accoppiato con un misuratore Fly Probe Microrad. Le attività sperimentali hanno inoltre previsto un primo interconfronto, da perfezionare ulteriormente, per verificare le interferenze generate dal velivolo. A tale scopo le misure di riferimento sono state condotte con un secondo misuratore, Wave Control SMP2 e sonda WPF8-HP, e sono state testate due configurazioni di installazione: la prima con installazione diretta sul corpo superiore del drone, tramite ancoraggio in materiale plastico; nella seconda il sensore è agganciato al drone tramite una fune di collegamento di 100 cm di lunghezza. Nel primo caso il Fly Probe è solidale al *main body*, mentre nel secondo è libero nel movimento lungo il piano orizzontale.

Date le caratteristiche tecniche del misuratore si rende necessario avviare la misura/registrazione prima del decollo; successivamente, tramite conduzione manuale del UAS, si raggiunge il punto di monitoraggio che viene mantenuto per il tempo necessario (alcuni minuti). Il volo viene effettuato in modalità assistita e con il supporto del GNSS di navigazione in modo da limitare la deriva durante lo stazionamento. Trattandosi di sensore isotropico l'orientamento del velivolo è ininfluenza sulla misura in entrambe le configurazioni di installazione. Terminata la misura il drone è riportato a terra e il sistema di acquisizione spento.

Non è prevista l'acquisizione di immagini/video perché non rilevanti per le misure e per limitare le potenziali criticità connesse al rispetto della normativa sulla privacy trovandosi ad operare in prossimità di proprietà privata.

Elaborazione e output

Il sistema non prevede l'integrazione del misuratore con l'elettronica del drone, né tanto meno la trasmissione dei dati al radiocomando dello UAS. Pertanto, impiegando il velivolo unicamente come mezzo per il posizionamento del misuratore nei punti di interesse, l'unica operazione *post-flight* che si rende necessaria è lo scarico del log di volo e l'esportazione in formato leggibile della traiettoria realizzata al fine di derivare, per ogni istante di volo, la posizione plano-altimetrica del mezzo e poter associare i valori di campo rilevati.

Tipologie di analisi

Le misure di campo elettromagnetico a RF realizzate con sensore trasportato con UAS (configurazione con fune) consentono di avere una idea dell'entità del campo e, nonostante abbiano intervalli di confidenza maggiori rispetto a quelle derivate da sensori installati a terra, facilitano, rendendolo più speditivo il monitoraggio. È così possibile incrementare, ad invarianza di risorse, la numerosità dei siti oggetto di misura e, di conseguenza, aumentare l'efficacia dei controlli a vantaggio della tutela della salute della popolazione, specialmente in ambiente urbano.

Figura 93: configurazione di misura con sensore ancorato a 100 cm sotto il velivolo.



Figura 94: configurazione come da immagine precedente ed effetto delle diverse fasi di funzionamento sui valori di campo (interferenze): fase 1 – UAS spento, fase 2 – UAS acceso a terra e motori spenti, fase 3 – UAS acceso a terra e motori in rotazione al minimo, Fase 4 – UAS acceso in aria in hovering.

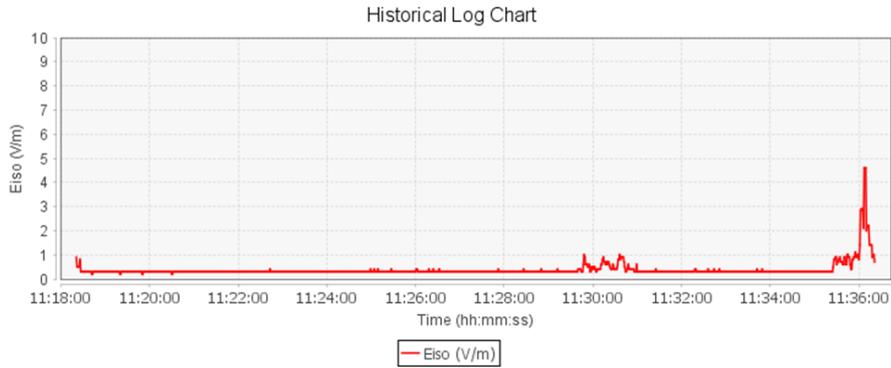
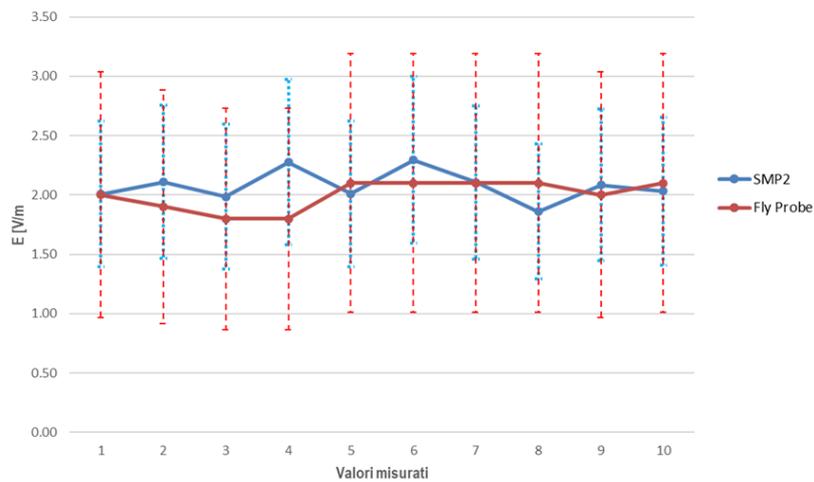


Figura 95: esempio di interconfronto fra il sistema di misura accoppiato a UAS e misuratore Wave Control SMP2 sonda WPF8-HP. Per ogni configurazione di test le misure hanno avuto durata pari a circa 3'.



Figura 96: confronto dei valori misurati dai due sistemi e relative barre di incertezza.



3.4 ARIA

Scheda n. 29 - Qualità dell'aria

Finalità

Il monitoraggio accurato e costante dell'aria è cruciale per identificare le fonti di inquinamento, valutare i rischi e prendere misure correttive. Gli attuali sistemi, pur essendo molto validi, non riescono a coprire tutto il territorio e l'allestimento di campagne ad hoc risulta molto costoso.

Gli UAS offrono una soluzione promettente per raccogliere dati di concentrazione di inquinanti di interesse su vaste aree in tempi brevi. In questo contesto ci sono diversi casi studio che focalizzano l'attenzione sull'affidabilità di questa tecnologia.

A titolo di esempio, un esperimento in corso sull'argomento è l'utilizzo di droni per valutare la distribuzione in quota degli inquinanti atmosferici. Gli aspetti da testare sono diversi ed articolati, ma in linea generale si possono aggregare su due livelli:

- sensori (affidabilità, influenza condizioni meteorologiche);
- piattaforme (pianificazione volo, interferenze nelle acquisizioni).

Metodologia di rilievo e strumentazione

In generale, in questo contesto i droni utilizzati sono equipaggiati con *smart sensor*, ovvero dispositivi formati da tanti *sensori low-cost* quanti sono i parametri da misurare.

Nel caso dell'esperimento citato sopra, il drone è stato equipaggiato con una *sensor box* che misura temperatura, umidità, gas e particolato. La pianificazione del volo è stata realizzata considerando le finalità del rilievo: salire di quota misurando in punti stabiliti le concentrazioni degli inquinanti.

Al fine di ottenere più misure possibili, si è optato per un volo in cui il drone sale di quota lungo i lati di un pentagono, in questo modo è possibile rallentare la velocità nella sua componente verticale ascendente. Inoltre, a quote prestabilite sovrapposte, il drone è rimasto in hovering per un minuto.

È possibile, inoltre, programmare il volo in concomitanza dei lanci automatici del pallone sonda meteorologico per ulteriori valutazioni analizzando i dati acquisiti contemporaneamente.

Elaborazione e output

I dati acquisiti consistono in valori di concentrazione che variano nello spazio e nel tempo. L'elaborazione è stata strutturata per step. Nel primo step è stata effettuata l'esplorazione del dataset in modo da definire il dataset finale, nel secondo step è stata effettuata una analisi delle variazioni in quota e infine, nel terzo step, è stata effettuata una analisi statistica. Di particolare interesse è risultato il primo step, in quanto ha evidenziato criticità nella metodologia utilizzata.

Tipologie di analisi

L'utilizzo di UAS equipaggiati con *smart sensor* per misurare la concentrazione di inquinanti in aria permette di avere dati spaziali che possono essere utilizzati in diversi contesti. Ad esempio, possono essere utili nel rilevare superamenti ai camini, possono fornire informazioni preliminari sulla qualità dell'aria in un'area non monitorata, possono essere integrati nei modelli di qualità dell'aria.

Figura 97: traccia reale del volo effettuato utilizzando un software di pianificazione.



Figura 98: UAS durante l'esecuzione del piano di volo in concomitanza del lancio programmato del pallone sonda.

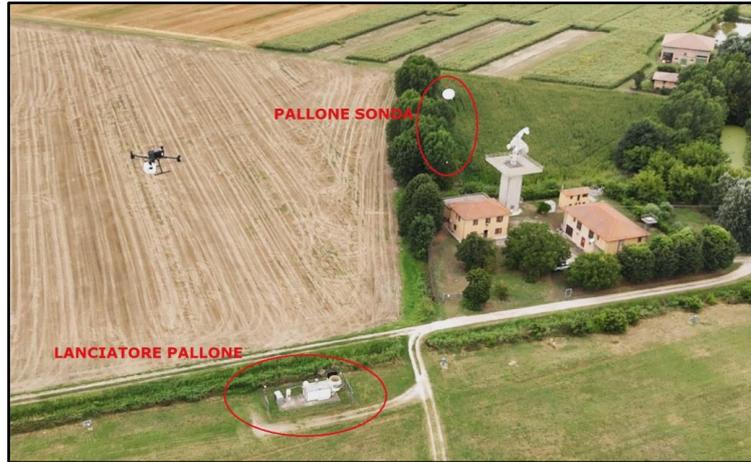


Figura 99: esempi di grafici derivanti dalle varie elaborazioni dei dati raccolti.

Media di NO₂ in volo1 per Gruppo di Altitudine

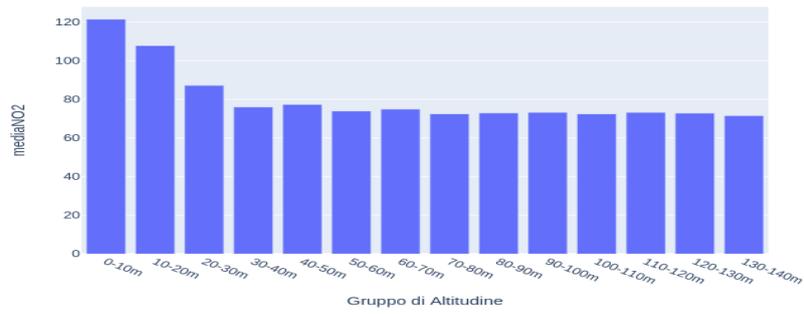
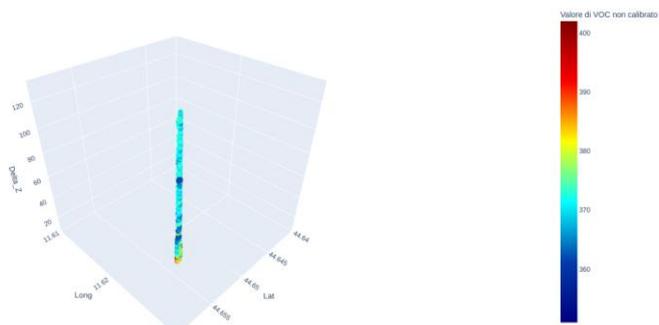
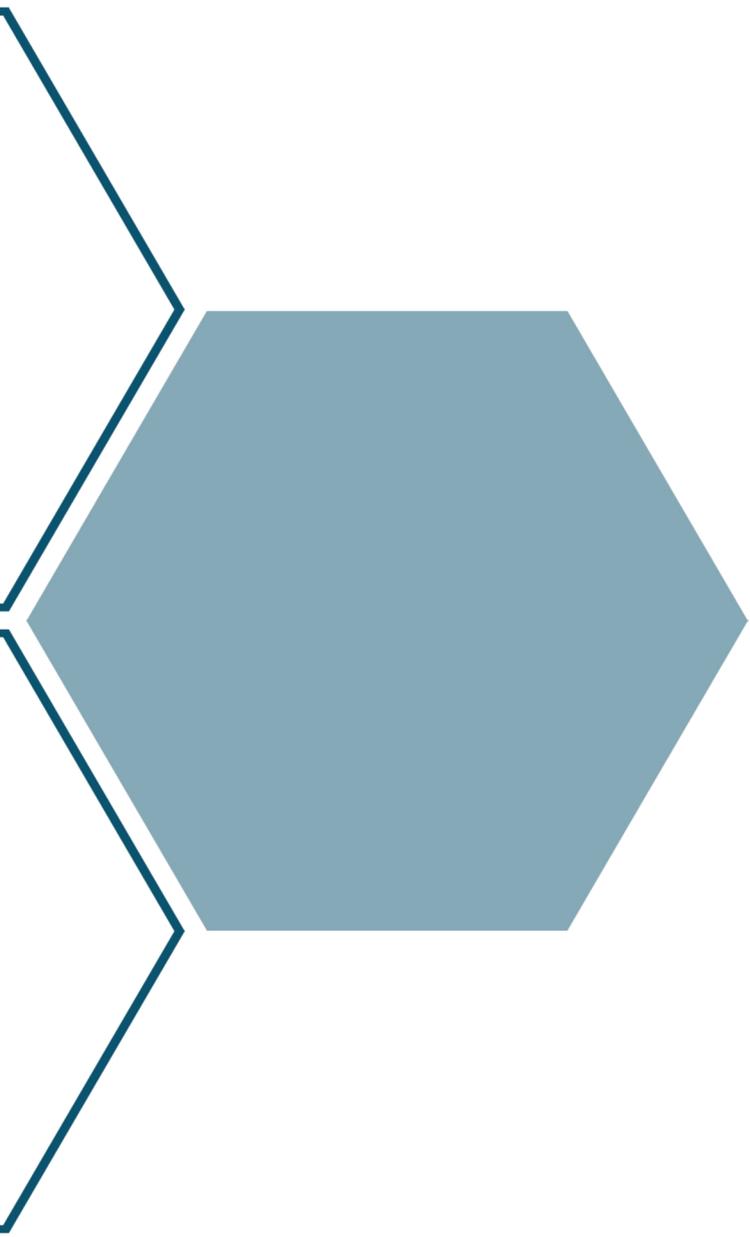


Grafico 2D di volo1 - NO₂ dalle 100000 alle 120000



Grafico 3D di VOC in volo1





PT SNPA
2025