



**Politecnico
di Torino**

**Laurea magistrale in
Ingegneria Aerospaziale**

Sessione di laurea di ottobre 2025

**Configurazione e validazione in campo del
ricevitore GNSS mosaic-H RTK per
applicazioni in agricoltura di precisione**

Relatore:

Stefano PRIMATESTA

Correlatori:

Gianluca RISTORTO
Michele MABRITTO
Davide BITETTO

Candidato:

Quirico CONVERTINI

ANNO ACCADEMICO 2024/2025

Abstract

Negli ultimi decenni i velivoli a pilotaggio remoto, più comunemente conosciuti con il nome di droni o UAS (Unmanned Aircraft Systems), sono stati protagonisti di un notevole progresso grazie alla ricerca e allo sviluppo tecnologico che ha consentito loro di raggiungere diversi scenari applicativi, tra cui l'agricoltura di precisione. Proprio questo campo sarà l'oggetto di studio di questa tesi svolta presso l'azienda MAVTech Srl. Infatti, il tema dell'agricoltura viene associato sempre più spesso al tema della sostenibilità, e i droni con le più recenti tecnologie hardware e software possono essere in grado di soddisfare questo requisito.

Per poter svolgere alcune operazioni in ambito agricolo il drone deve essere equipaggiato con un ricevitore GNSS ad alta precisione. In uno scenario vitivinicolo, ad esempio, è fondamentale garantire un'accuratezza centimetrica tale che il velivolo riesca a seguire il filare assegnato. Tuttavia, per garantire questo risultato è necessario sfruttare alcuni ausili esterni come la tecnologia RTK e PPK. In questo elaborato il ricevitore GNSS che è stato oggetto di configurazione è il GNSS H-RTK mosaic-H: è stato prima testato con un setup da banco, in seguito è stato installato sul drone Q4X per essere infine reso operativo sul drone M6. Questa progressione ha permesso di acquisire maggiore praticità con il ricevitore e con le missioni di volo, data la massa crescente dei droni utilizzati.

Il mosaic-H per poter essere eseguito con l'autopilota PX4 richiede una configurazione iniziale descritta nella propria documentazione online. Dopo aver avuto conferma del corretto funzionamento del ricevitore, questo è stato installato su un drone con un setup da banco per poter essere testato all'aperto e avere un primo riscontro sulle coordinate restituite dal ricevitore, sia in modalità standalone, quindi senza ausili esterni, sia in modalità RTK. Lo step successivo ha previsto l'installazione del mosaic-H sul velivolo Q4X, un quadricottero molto stabile e affidabile, quindi ideale per un primo test in volo. L'obiettivo di questo test è stato assicurarsi che il drone, in modalità RTK, raggiungesse alcuni waypoints con una certa accuratezza tale da giustificare l'utilizzo in agricoltura di precisione. Il successo di questa prova ha consentito di passare allo step successivo, ovvero l'installazione del ricevitore GNSS mosaic-H sul drone M6, un esacottero con peso massimo al decollo di 25 kg dotato di un sistema di spruzzatura. L'intero sistema è stato poi testato in vigna andando a simulare una missione RTK su un filare con attività di spraying. A valle di ogni singolo test sono stati studiati i file log registrati a bordo del drone per stabilire il grado di accuratezza dei risultati ottenuti.

Infine, è stato descritto anche un rilievo in PPK svolto in un campo in assenza di rete mobile. Per poter compiere un lavoro di fotogrammetria in vigna era necessario acquisire le coordinate di alcuni punti a terra per poi poter georeferenziare le immagini raccolte in volo. Il ricevitore utilizzato è stato l'Emlid Reach RS2. L'obiettivo era quindi correggere questi punti in PPK e questo è stato possibile grazie al servizio di post-processing di SPIN3 GNSS per le regioni Piemonte, Valle D'Aosta e Lombardia.

Grazie a questi test si può affermare che il ricevitore mosaic-H RTK è un ottimo dispositivo da installare a bordo di velivoli che necessitano di un'elevata accuratezza in posizione come nel caso dell'agricoltura di precisione.

Indice

Abstract	2
Indice	4
Glossario	6
Introduzione	8
1 I droni nell'agricoltura di precisione	10
1.1 Il Global Navigation Satellite System (GNSS)	11
1.1.1 Costellazioni satellitari	12
1.1.2 Accuratezza e precisione	12
1.2 Tecnica Real Time Kinematic (RTK)	14
1.2.1 Errori di misura	14
1.2.2 Tecniche per determinare la posizione	15
1.2.3 Considerazioni generali sulla tecnica RTK	16
1.2.4 Protocollo NTRIP	17
1.3 Tecnica Post-Processed Kinematic (PPK)	18
1.3.1 Differenze tra RTK e PPK	19
1.3.2 Raccolta dati	21
1.3.3 Correzione dei dati in post-processing	22
2 Ricevitori GNSS e UAV utilizzati	24
2.1 H-RTK mosaic-H	24

2.1.1	Configurazione iniziale	25
2.2	Emlid Reach RS2+	29
2.3	Droni impiegati nelle attività	31
3	Sperimentazione e analisi dei risultati	34
3.1	Test statici	34
3.1.1	Emlid Reach RS2+ in RTK	35
3.1.2	Emlid Reach RS2+ in PPK	36
3.1.3	Mosaic-H non RTK	38
3.1.4	Mosaic-H in RTK	39
3.1.5	Mosaic-H in RTK con base corretta	41
3.1.6	Siyi F9P non RTK	42
3.1.7	Siyi F9P in RTK	44
3.2	Test dinamici in RTK	46
3.2.1	Volo con il Q4X e filari simulati	46
3.2.2	Volo in vigna con l'M6	52
4	Rilievo in PPK da TerreSparse	54
4.1	Pianificazione e acquisizione	55
4.2	Elaborazione dei risultati	55
5	Normativa UAS	62
5.1	Documenti per attività di spraying con il drone M6	63
	Conclusioni	66

Glossario

AMSL	Above Medium Sea Level
CORS	Continuously Operating Reference Station
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HDOP	Horizontal Dilution Of Precision
NTRIP	Network Transport of RTCM via Internet Protocol
OM	Operations Manuals
PPK	Post-Processed Kinematic
QGC	QGround Control
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	Real Time Kinematic
SBAS	Satellite-Based Augmentation System
UAS	Unmanned Aircraft System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VDOP	Vertical Dilution Of Precision

Introduzione

Di recente il settore dell'agricoltura è stato protagonista di uno sviluppo esponenziale grazie alle ultime ricerche in ambito tecnologico che hanno permesso l'utilizzo di mezzi e dispositivi con performance notevolmente migliorate rispetto al passato. I droni, noti anche come UAV o SAPR (Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto), hanno contribuito attivamente alla transizione dell'agricoltura 4.0. Un velivolo che sorvola una coltura può fornire una serie di informazioni utili all'agricoltore con il fine di ottimizzare i trattamenti, incrementare la produttività, ma con uno sguardo proiettato alla sostenibilità. Questa ideologia, conosciuta come agricoltura di precisione, è diventata sempre più importante per affrontare le sfide globali legate alla necessità di gestire in modo più efficiente le risorse.

Al giorno d'oggi, ciò che fa la differenza sono gli strumenti e i sensori installati a bordo del drone, infatti, grazie a questi e alle loro performance è possibile prendere decisioni in merito alle coltivazioni. A bordo di un UAV, o drone, si possono integrare diverse tecnologie e sensori. Tra questi, le camere multispettrali e termiche sono particolarmente utili. Le prime catturano la luce riflessa dalle foglie delle colture in bande di frequenza specifiche, permettendo di analizzare la salute e il vigore delle piante. Le seconde, invece, rilevano le differenze di temperatura, utili per identificare stress idrici o malattie. L'analisi dei dati raccolti da questi sensori permette di elaborare indici precisi sullo stato di salute delle colture. Le immagini che si ottengono a valle di questi studi possono restituire una mappa per la fertilizzazione a rateo variabile, che comporta un notevole risparmio economico per l'azienda agricola in quanto il fertilizzante utilizzato dipenderà dall'indice di vigore della vegetazione. Inoltre, se il drone lo consente, è possibile installare un impianto di spruzzatura per il trattamento mirato e preciso delle colture.

Qualsiasi sia il dispositivo installato a bordo, per operare nel campo dell'agricoltura di precisione è fondamentale che il drone sia dotato di un ricevitore GNSS accurato, ed è proprio questo l'obiettivo dello studio in questione, ovvero determinare il grado di accuratezza del ricevitore GNSS mosaic-H. Infatti, senza un grado di accuratezza elevato non è possibile soddisfare i requisiti in agricoltura di precisione, si pensi ad esempio a dei trattamenti in vigna in cui il drone deve seguire in modo accurato il filare. Tale accuratezza, spesso di tipo centimetrico, è indispensabile non solo per lo spraying, ma anche per il monitoraggio puntuale e la mappatura precisa delle colture. La collaborazione con l'azienda piemontese MavTech s.r.l., specializzata nella progettazione e produzione di

velivoli per uso professionale, ha permesso di compiere vari test sul campo con l'obiettivo di dimostrare le performance e quindi l'accuratezza del ricevitore in scenari operativi sul campo.

Il mosaic-H RTK è uno dei migliori ricevitori GNSS disponibili sul mercato, ma per ottenere un livello di accuratezza dell'ordine di qualche centimetro, così come richiesto in alcune operazioni, il ricevitore deve operare in modalità RTK o PPK: due tecniche che si basano sulla correzione della posizione del velivolo tramite una correzione differenziale inviata da un ricevitore fisso a terra che prende il nome di base. Quindi il principio di funzionamento è quello di ottenere una misura di posizione molto accurata partendo da alcuni dati grezzi. La tecnica RTK permette di ricevere queste correzioni in real time, invece la PPK in post processing.

Nel corso di questa tesi verranno approfondite le due metodologie di correzione con i rispettivi flussi di lavoro, presentati i dispositivi utilizzati per effettuare i vari test e descritti i risultati ottenuti discutendone il grado di accuratezza.

Outline

L'elaborato si sviluppa in cinque diversi capitoli suddivisi, secondo la propria tematica, nel seguente modo:

- Capitolo 1: introduce al tema dell'uso dei droni nell'agricoltura di precisione approfondendo in particolare l'importanza del determinare la posizione di un drone in volo. Viene introdotto il sistema GNSS e le tecniche RTK e PPK con le rispettive peculiarità;
- Capitolo 2: vengono presentati i vari dispositivi utilizzati nei test sperimentali, a partire dal ricevitore GNSS mosaic-H oggetto di studio, fino ai tre droni impiegati nelle prove di volo;
- Capitolo 3: approfondisce nel dettaglio i test effettuati, dimostrando le performance del mosaic-H in diverse condizioni. Si parte dal primo test in cui viene provato il solo ricevitore, fino al test in vigna con il mosaic-H installato sul drone M6;
- Capitolo 4: argomenta il rilievo effettuato in PPK nell'azienda agricola Terre Sparse dimostrando i risultati ottenuti e l'efficacia della tecnica in post-processing;
- Capitolo 5: fornisce una breve introduzione alla documentazione necessaria per ottenere l'autorizzazione al volo da parte dell'ENAC.

Capitolo 1

I droni nell'agricoltura di precisione

Con l'avvento dell'agricoltura 4.0 si cercano soluzioni tecnologiche innovative che permettano la raccolta di dati e interventi mirati, migliorando efficienza, produttività e sostenibilità. I droni sono tra i protagonisti di questa innovazione, infatti, grazie ad alcuni sensori a bordo possono monitorare lo stato del suolo e delle colture, analizzando dati come umidità, temperatura e stato di salute delle piante. Queste informazioni vengono poi presentate ai coltivatori che possono gestire in modo più selettivo i loro interventi ottimizzando così l'uso di acqua o di pesticidi con l'obiettivo finale di migliorare la resa complessiva del raccolto garantendo comunque la sostenibilità[13].

I velivoli a pilotaggio remoto, chiamati nel gergo comune droni o UAV (Unmanned Aerial Vehicle), per definizione sono velivoli, indipendentemente dalle dimensioni, dalla forma o dalla capacità, senza pilota a bordo che vengono controllati a distanza[3]. Una prima classificazione dei droni può essere data da:

- ala fissa: sono velivoli la cui portanza è generata dall'ala che rimane appunto fissa e tipicamente sono utilizzati per applicazioni, tra cui l'agricoltura di precisione, in cui si vuole sorvolare una vasta zona in poco tempo. Il limite più rilevante di questa categoria di droni è l'impossibilità di volare a basse velocità o a punto fisso per compiere delle operazioni localizzate;
- ala rotante: possono essere a singolo rotore o multirotorici, come i quadricotteri o gli esacotteri. Il loro punto di forza è quello di potersi spostare in tutte le direzioni nello spazio, e operare a basse velocità anche in terreni con variazioni di pendenza piuttosto repentine.

Siano essi ad ala fissa o ad ala rotante, per poter essere utilizzati in agricoltura di precisione, i velivoli devono essere equipaggiati con i più recenti sensori, quali telecamere multispettrali che rilevano specifiche bande dello spettro delle frequenze riflesse dalla vegetazione[1], oppure ricevitori GNSS ad alta precisione che garantiscano elevate prestazioni utili nel trattare in modo mirato le coltivazioni. Al ricevitore montato a bordo,

spesso si affiancano delle metodologie come la RTK (Real Time Kinematic) e la PPK (Post-Processed Kinematic) le quali incrementano l'accuratezza e la precisione della posizione del drone. Queste due metodologie e, più in generale, il sistema di posizionamento satellitare verranno approfonditi nel corso di questo capitolo.

1.1 Il Global Navigation Satellite System (GNSS)

Tra i vari componenti che costituiscono un drone, uno dei più importanti per applicazioni di agricoltura di precisione è sicuramente il ricevitore GNSS (Global Navigation Satellite System), impropriamente chiamato ricevitore GPS.

L'acronimo GNSS si riferisce ad un sistema di geo-radiolocalizzazione che permette di geolocalizzare, su scala globale, qualsiasi dispositivo dotato di ricevitore, determinandone la posizione in termini di latitudine, longitudine e altitudine con un buon margine di accuratezza. Per definizione di sistema, questo si compone di tre elementi fondamentali:

- segmento di controllo: ne fanno parte tutte le basi fisse a terra che controllano il corretto funzionamento dei satelliti e monitorano il segnale trasmesso. Se necessario possono inviare anche comandi in orbita;
- segmento spaziale: tutti i satelliti in orbita di una costellazione rientrano in questo segmento, e comunicano con i ricevitori e le basi a terra;
- segmento utente: sono tutti quei dispositivi con un ricevitore GNSS il cui scopo è quello di determinare la propria posizione. Possono solo ricevere segnali, ma non possono trasmetterne.

Ciascun satellite in orbita trasmette due segnali elettromagnetici: due onde portanti sinusoidali, chiamate L1 e L2, caratterizzate da diverse lunghezze d'onda. Ognuna di queste portanti è modulata con un codice, detto PRN (Pseudo-Random Number), che si ripete periodicamente nel tempo. Quando il segnale giunge al ricevitore a terra, quest'ultimo, decodificando l'informazione, è in grado di risalire alle coordinate del satellite nello spazio (effemeridi del satellite), al suo codice identificativo e all'istante t_0 in cui il segnale è partito. Anche il ricevitore genera un codice PRN, sincronizzandosi con quello del satellite. Confrontando il segnale ricevuto con il proprio, riesce così a calcolare il tempo impiegato dal segnale per raggiungerlo e, di conseguenza, la distanza che li separa. Questo è possibile perché il segnale nel vuoto viaggia alla velocità della luce, circa $3 \cdot 10^8$ m/s. Per determinare in modo univoco la propria posizione, un ricevitore deve ricevere i segnali da almeno quattro satelliti, sfruttando il principio della triangolazione. La distribuzione di questi satelliti nella volta celeste è un fattore importante, di cui si discuterà più avanti. I segnali ricevuti sono inevitabilmente soggetti a diversi errori che riducono l'accuratezza della misura di posizione. Tuttavia, è possibile limitare tali errori aumentando il numero di satelliti in vista[16][20].

1.1.1 Costellazioni satellitari

I satelliti presenti attualmente in orbita appartengono a sistemi differenti chiamati costellazioni. Ciascuna costellazione di satelliti è stata sviluppata e lanciata da un paese che ne detiene il controllo. Le più famose sono:

- **GPS:** sistema GNSS statunitense, uno dei più conosciuti ed utilizzati con 31 satelliti in orbita (24 operativi e 7 di riserva);
- **Galileo:** sistema GNSS europeo con 30 satelliti in orbita (27 operativi e 3 di riserva);
- **GLONASS:** sistema GNSS russo con 31 satelliti in orbita (24 operativi e 7 di riserva);
- **BeiDou:** sistema GNSS cinese con un utilizzo crescente con 30 satelliti operativi in orbite differenti;
- **QZSS:** sistema GNSS giapponese utilizzato prevalentemente nell'area del Giappone e del Pacifico con un numero massimo di 7 satelliti;
- **SBAS:** sistemi che migliorano la precisione, l'affidabilità e la disponibilità dei seganli GNSS.

1.1.2 Accuratezza e precisione

Prima si accennava al buon margine di accuratezza della misura di posizione attenuata dal segnale GNSS, ma è bene definire sin da subito i termini accuratezza e precisione, i quali possono essere simili, ma in realtà si riferiscono a concetti differenti[17].

- **Precisione:** indica quanto i singoli valori rilevati da uno strumento, durante misure ripetute della stessa grandezza, si avvicinino alla loro media. In pratica più uno strumento è preciso, più i suoi risultati saranno simili tra loro e quindi meno dispersi intorno al valore medio.
- **Accuratezza:** indica quanto il valore riportato da uno strumento si avvicini al valore vero della grandezza da misurare. In pratica più lo strumento è accurato, minore sarà l'errore sistematico e più il risultato sarà esatto.

La figura 1.1 mostra in modo chiaro la differenza tra i due termini. Immaginando che al centro del bersaglio ci sia il punto esatto da voler misurare con un ricevitore GNSS, il caso ideale ricade nel bersaglio "preciso e accurato" perchè gli altri sono appunto imprecisi, quindi con un alta dispersione delle misurazioni, o inaccurati, quindi distanti dal centro.

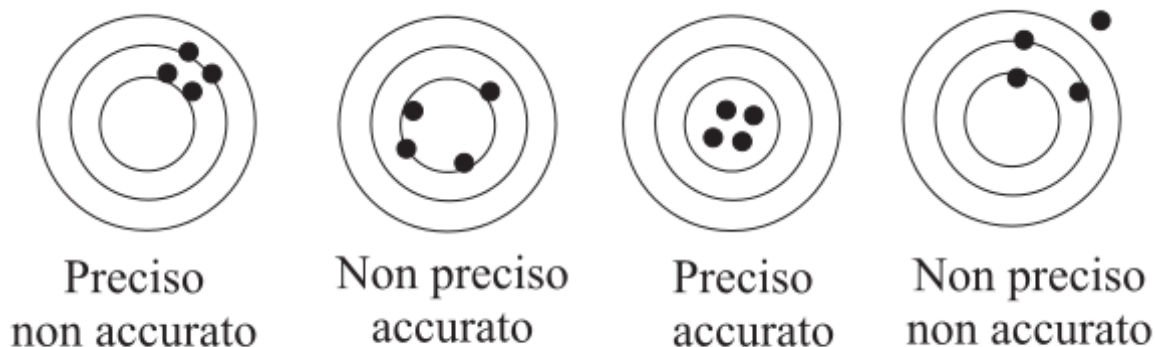


Figura 1.1: Differenze tra accuratezza e precisione

In agricoltura di precisione è evidente l'importanza di avere una misura di posizione sia accurata sia precisa per eseguire al meglio le missioni automatiche in campo.

Un indicatore diretto della precisione di uno strumento è la **deviazione standard (SD)**: un indice statistico che quantifica la dispersione di un insieme di dati rispetto al loro valore medio. Un valore di SD contenuto indica che i dati sono strettamente raggruppati attorno alla media; al contrario, un valore elevato suggerisce una maggiore dispersione. Questa definizione sarà utile nei capitoli successivi in cui verranno mostrati e commentati alcuni risultati.

Le caratteristiche di precisione e accuratezza non dipendono solo dalla qualità del segnale e del ricevitore, ma anche dalla geometria con cui i satelliti sono distribuiti nello spazio. Per questo esistono degli indicatori chiamati **HDOP** (Horizontal Dilution Of Precision) e **VDOP** (Vertical Dilution Of Precision). Sono dei numeri adimensionali ed esprimono come la geometria dei satelliti visibili influenzi la precisione della posizione calcolata da un ricevitore GNSS. L'HDOP si riferisce specificamente alla precisione della posizione orizzontale (latitudine e longitudine), il VDOP, invece, riguarda la precisione della posizione verticale (altitudine). In entrambi i casi più l'indicatore tende all'unità o valori inferiori più la geometria dei satelliti sarà ottimale e quindi la misura più precisa.

La figura 1.2 mostra in modo semplificato in 2D come ciascun satellite (S1 e S2), abbia una regione di incertezza a causa dell'errore a cui può essere soggetto il segnale. Se questi due satelliti sono distanti tra loro (HDOP bassi) come nel caso di sinistra, l'area di incertezza di misura della distanza tra ricevitore e satellite è minore. Invece, se i due satelliti sono più vicini tra loro (HDOP alti), come nel caso di destra, a pari banda di incertezza di ciascun satellite, l'area blu racchiusa dall'intersezione delle circonferenza è più ampia rispetto al caso precedente[14]. Questo caso generale si applica in modo analogo al VDOP.

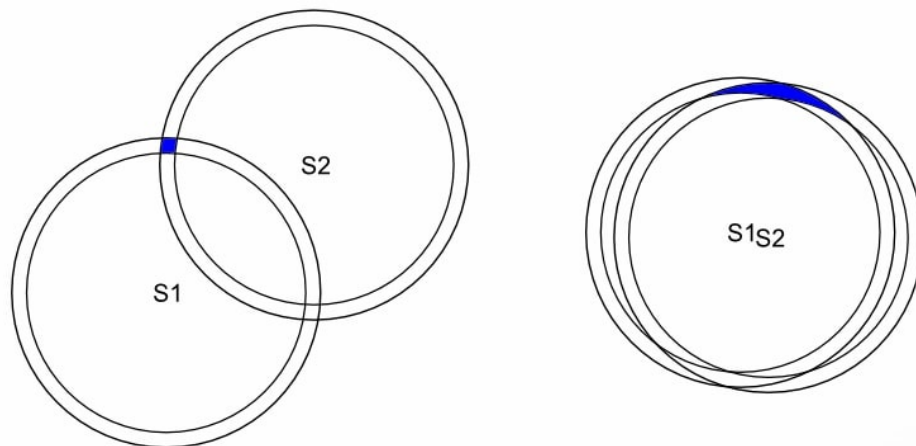


Figura 1.2: Effetti dell'HDOP e VDOP

1.2 Tecnica Real Time Kinematic (RTK)

Per applicazioni in agricoltura di precisione il ricevitore da solo non è sufficiente perchè la misura della distanza tra il satellite e il ricevitore, come qualsiasi misura, risulta affetta da un certo errore. Per questo motivo è indispensabile operare in condizioni RTK affinché il segnale che giunge al ricevitore GNSS venga corretto ottenendo così delle coordinate più accurate. Nel corso di questa sezione verranno approfonditi i dettagli di questa tecnica.

1.2.1 Errori di misura

Gli errori di misura più ricorrenti sono gli errori sistematici o biases che si distinguono in[15]:

- errore di orologio del ricevitore: questo errore deriva dal fatto che sui satelliti sono installati degli orologi atomici con costi e stabilità nettamente superiore agli orologi con cui sono equipaggiati i ricevitori. Questa differenza prestazionale porta ad un'asincronia temporale che introduce un fattore incognito nel conoscere con esattezza il tempo impiegato dal segnale per raggiungere terra;
- errore di orologio del satellite: seppur equipaggiati con orologi atomici potrebbero presentarsi delle piccole asincronie tra i satelliti di una costellazione;
- ritardo ionosferico: il segnale elettromagnetico emesso dai satelliti percorre diversi strati dell'atmosfera. Quello più critico è la ionosfera: quello strato caratterizzato dall'elevata presenza di ioni che soprattutto in caso di irraggiamento solare vengono eccitati causando dei disturbi nella trasmissione del segnale elettromagnetico provocando il ritardo ionosferico;

- **bias geometrici:** in questa categoria ricade il ritardo troposferico e l'errore d'effemeridi dei satelliti. Il primo è dovuto alla presenza in troposfera di acqua che riflette e rifrange il segnale elettromagnetico. Il secondo, invece, è dovuto all'errore con cui i satelliti determinano la propria posizione nell'orbita;
- **errore di multipath:** si presenta nei casi in cui il segnale inviato dal satellite colpisce una superficie riflettente come una superficie di vetro, e il ricevitore GNSS ha difficoltà nel riconoscere qual è il segnale diretto e quale invece quello indiretto.

1.2.2 Tecniche per determinare la posizione

Per determinare il posizionamento esistono due tipologie di misure che possono essere effettuate: quelle di codice e quelle di fase. Le misure di codice sono ottenute grazie all'uso di ricevitori in grado di decodificare solo le componenti impulsive dei segnali (codici), mentre quelle di fase sono relative all'uso di ricevitori che, oltre ai codici, decodificano anche una o più portanti.

Un'altra differenza che caratterizza il modo in cui i ricevitori GNSS possono determinare la propria posizione è se questi usano o meno ausili esterni.

- **Posizionamento standalone o assoluto:** il ricevitore determina la propria posizione affidandosi esclusivamente ai segnali ricevuti dai satelliti, senza l'ausilio di nessun dispositivo esterno. Con questa tecnica non si ha alcuna informazione aggiuntiva in merito alle correzioni degli errori elencati nella sezione 1.2.1;
- **Posizionamento relativo:** oltre al ricevitore, che in questa tecnica prende il nome di *rover*, ci si avvale di una *stazione di base*. Le coordinate di quest'ultima sono note, mentre quelle del rover sono incognite. L'output di questa tecnica è la distanza relativa tra il rover e la base, che prende il nome di *baseline*. Se i due dispositivi sono posti ad una distanza contenuta di circa 20/30 km si può assumere che entrambi siano soggetti agli stessi errori di misura;
- **Posizionamento differenziale:** è la tecnica utilizzata per applicazioni RTK. Prevede la presenza di un ricevitore GNSS *rover*, con posizione incognita, e di una *stazione base di riferimento (master)*, con coordinate note. Sulla base di questa affermazione, poiché la posizione di un generico satellite nello spazio è nota, ne consegue che la distanza satellite/stazione base sarà anch'essa nota. Confrontando questa distanza nota con quella calcolata dal ricevitore a bordo della stazione master è possibile trovare la somma degli errori che affliggono quella misura. Questo contributo di errore prende il nome di **correzione differenziale**. Nel caso in cui la baseline tra la stazione master e il rover sia compresa entro i 20/30 km, è possibile considerare che la correzione differenziale calcolata presso la stazione base sia valida anche per il rover. In questo modo le coordinate del rover saranno corrette e quindi prive di errore.

1.2.3 Considerazioni generali sulla tecnica RTK

La tecnica del posizionamento differenziale è alla base della metodologia RTK e l'informazione di correzione differenziale che riceve il rover è fondamentale per eliminare gli errori di misura.

Questa correzione differenziale viene trasmessa in un formato chiamato RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*) dalla stazione master al ricevitore in tempo reale via radio oppure tramite una rete mobile. Questi messaggi vengono decodificati dal rover che ne trae informazioni utili alla correzione della propria posizione. Per un rilievo in RTK, i messaggi RTCM possono essere inviati da tutte quelle stazioni master fisse nel tempo, dislocate sul territorio di interesse, che prendono il nome di stazioni CORS (*Continuously Operating Reference Station*). Nel caso delle regioni Piemonte, Valle D'Aosta e Lombardia la rete di stazioni CORS viene gestita dal Servizio di Posizionamento Interregionale SPIN3. Le stazioni attualmente attive e operative per servizi RTK nel mese di settembre 2025 sono mostrate in figura 1.3.

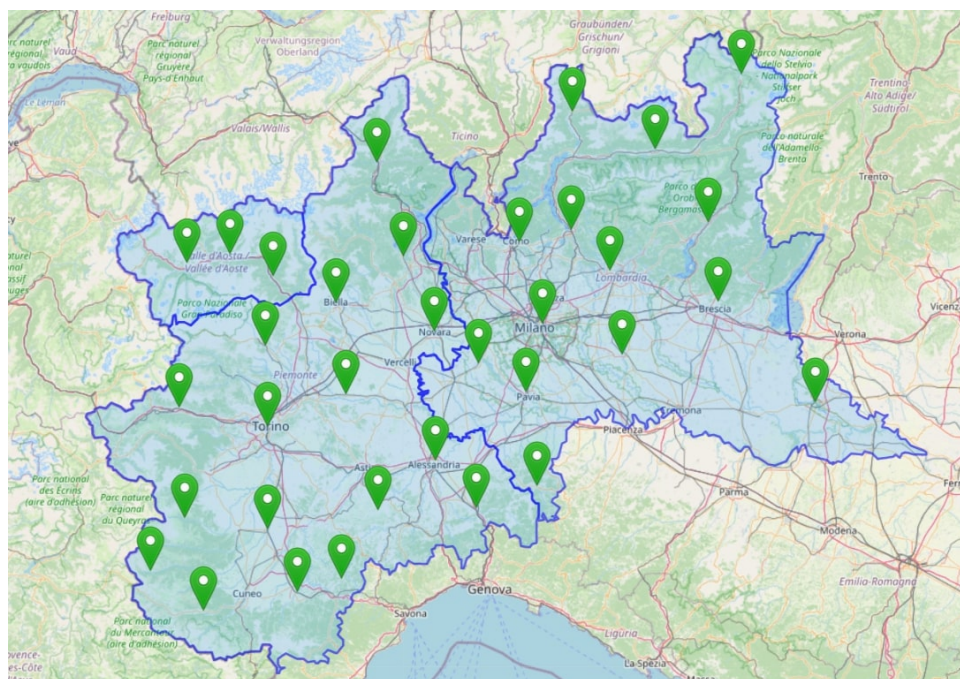


Figura 1.3: Stazioni CORS operative di SPIN3 GNSS

Come anticipato in precedenza, per ottenere una correzione affidabile, la baseline tra base e rover deve essere contenuta nell'intorno dei 20/30 km. Qualora questo non fosse possibile, la soluzione alternativa è l'utilizzo di un ricevitore GNSS da posizionare in campo che funge da stazione base. Un esempio è mostrato in figura 1.4: questo ricevitore caratterizzato dalla tipica forma a fungo viene montato su un treppiedi ed esposto ai satelliti; a breve distanza ci sarà un rover pronto a ricevere i suoi messaggi RTCM. È chiaro che affinché tutto funzioni la posizione di questa base deve essere nota e fissa



Figura 1.4: Base RTK F9P

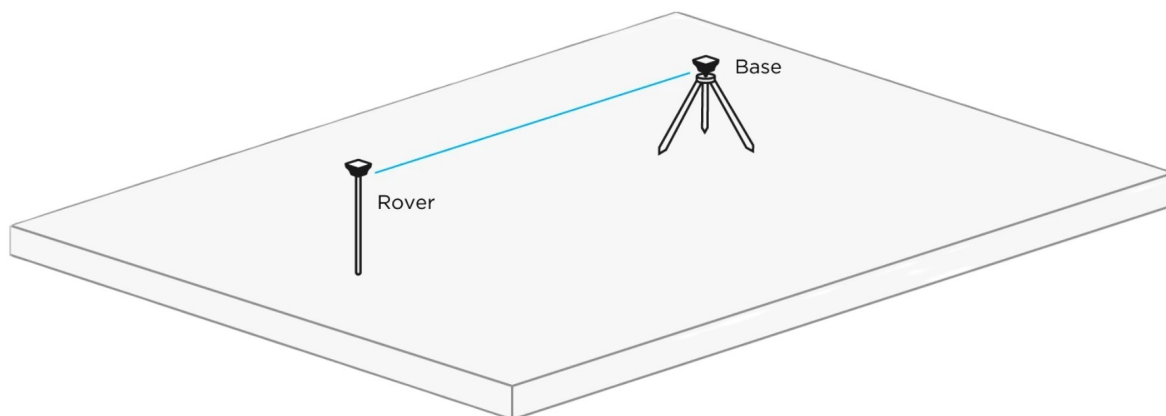


Figura 1.5: Base e rover in configurazione RTK

per ogni utilizzo. Infatti, la prassi comune prevede una procedura di *survey-in*: ovvero alimentare la base e lasciare che questa calcoli le sue coordinate raffinando sempre più il grado di accuratezza con il passare del tempo. La procedura di *survey-in* termina quando si è raggiunto un grado di accuratezza soddisfacente (0.4/0.1 metri), oppure un tempo massimo di esposizione che può andare da diversi minuti a diverse ore. Un approccio secondario sarebbe quello di acquisire in RTK le coordinate della base con un secondo ricevitore GNSS, per poi assegnarle tramite un software dedicato, evitando così la procedura di *survey-in*.

1.2.4 Protocollo NTRIP

Nel caso in cui il segnale radio non sia sufficiente per trasmettere i messaggi RTCM, la soluzione ideale per vincere il limite della distanza tra stazione base e rover è rappresentata da Internet. Per questo motivo nel 2004 è stato sviluppato il protocollo NTRIP (*Network*

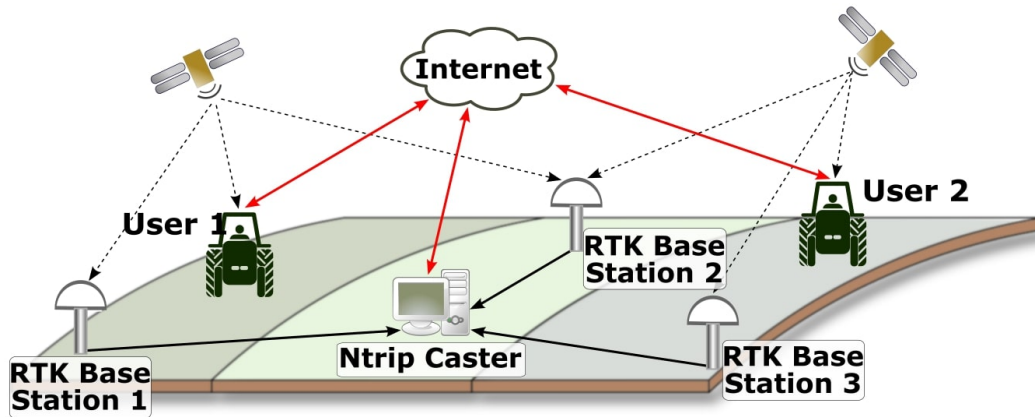


Figura 1.6: Protocollo NTRIP

Transport of RTCM via Internet Protocol) per il trasferimento dei dati per le correzioni differenziali RTK attraverso internet. I messaggi RTCM viaggiano tramite rete internet, pertanto è necessario che a bordo del rover sia montata una scheda SIM o che comunque abbia accesso ad una rete WiFi locale.

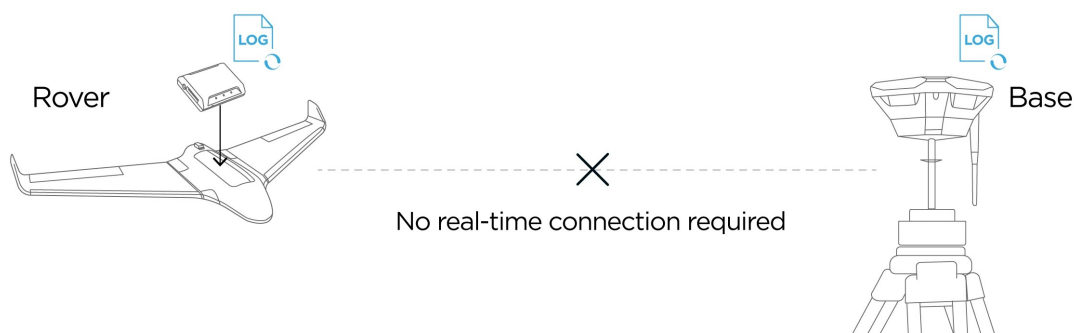
Il protocollo NTRIP è formato da tre segmenti: il client, il server e il caster (figura 1.6)[21].

- NTRIP client: è composto da tutti gli utilizzatori del servizio NTRIP, quindi tutti quei dispositivi che ricevono i messaggi RTCM via internet. Ciascun client per accedere al servizio deve possedere username e password note dal momento dell'iscrizione, e l'indirizzo IP del NTRIP caster (SPIN3 GNSS nel caso della regione Piemonte);
- NTRIP server: si occupa di trasferire le informazioni di correzione differenziale dalle stazioni CORS al NTRIP caster;
- NTRIP caster: si può definire come il cervello del protocollo che gestisce i dati in ingresso dal server e in uscita verso i client. Quindi è il caster che in funzione della posizione del rover invia la correzione del server più opportuna.

1.3 Tecnica Post-Processed Kinematic (PPK)

I numerosi vantaggi dati dall'utilizzo dei droni con metodologia RTK in applicazioni di precisione sono ormai noti, ma in alcuni casi questa tecnica potrebbe non essere applicabile. Questa sezione discute della tecnica PPK (Post-Processed Kinematic), ovvero una procedura che si basa sulla raccolta di dati GNSS grezzi da parte del drone in volo e da una stazione di riferimento a terra, che verranno successivamente elaborati per ottenere

① In the field



② In the office

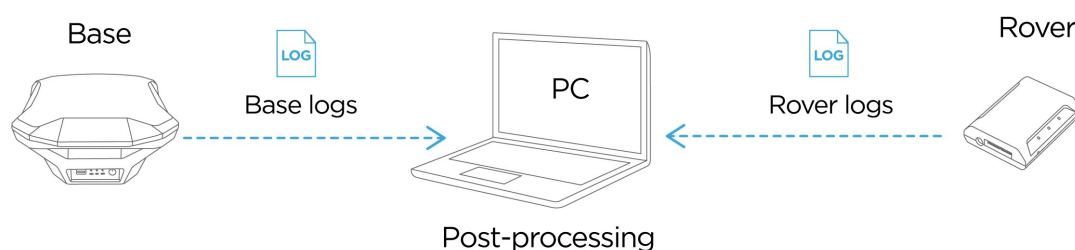


Figura 1.7: Flusso di lavoro in PPK

dei dati corretti con accuratezza molto elevata[8]. Questa è una tecnica utilizzata tipicamente in applicazioni in cui è richiesta la massima accuratezza del posizionamento, come rilievi topografici, agricoltura di precisione e mappatura. A valle della raccolta di dati da parte del ricevitore e della stazione di riferimento installata a terra, è necessario che questi dati vengano elaborati da un software specifico per restituire le posizioni corrette del rover negli istanti desiderati[2].

1.3.1 Differenze tra RTK e PPK

Sebbene le due tecniche di posizionamento di precisione RTK e PPK restituiscono circa lo stesso risultato, ovvero quello di avere una misura di precisione accurata, hanno molte differenze che le distinguono. A volte non sempre è possibile scegliere tra le due tecniche, ma l'ambiente e le esigenze progettuali potrebbero far tendere l'ago della bilancia più da un lato rispetto all'altro. Ad esempio il caso ideale per scegliere la tecnica RTK è quando si vogliono dei risultati accurati in tempo reale per poter prendere alcune decisioni immediatamente sul sito. Il suo limite è il range tra ricevitore e base CORS che invia le correzioni differenziali, che si aggira intorno ai 30 km; all'aumentare della distanza della baseline si ha un decremento dell'accuratezza. Invece, la tecnica PPK si può rivelare un'ottima scelta nei casi in cui l'accuratezza dei dati di posizione è fondamentale a discapito della tempestività con cui si ottengono i risultati. È l'ideale anche per applicazioni

in zone rurali di difficile accesso in cui è scomodo posizionare una base RTK sul terreno, oppure si ha difficoltà a mantenere una connessione con le stazioni di terra CORS[4].

La tabella 1.2 elenca le principali differenze tra le due tecniche in termini di tempi di elaborazione, costi, rete mobile ed accuratezza.

RTK	PPK
Feedback in tempo reale durante la missione grazie alla comunicazione continua con la base RTK a terra per ricevere i dati di correzione.	Non richiede una comunicazione in tempo reale con la base, poiché le correzioni vengono applicate in un secondo momento in post-processing.
Tempi di elaborazione dei dati molto rapida.	Tempi di elaborazione dei dati più lunghi poiché è necessario un post-processing.
Connessione di rete mobile a bordo del rover necessaria per poter ricevere le correzioni da stazioni di riferimento CORS. Tecnica RTK soggetta a perdita di segnale di rete in alcune zone più remote.	Connessione di rete mobile non necessaria in quanto il rover non riceve alcun messaggio di correzione in tempo reale.
Facilità d'uso maggiore rispetto alla tecnica PPK poiché richiede competenze minori in termini di impostazioni e funzionamento.	Facilità d'uso minore rispetto alla tecnica RTK poiché richiede alcune competenze aggiuntive come la conoscenza di alcuni software di post-processing.
Minore precisione rispetto al PPK, perché la comunicazione tra base e ricevitore potrebbe essere affetta da leggeri ritardi, e anche perché in RTK si usa solo una stazione come riferimento.	Maggiore precisione poiché la tecnica PPK non è soggetta a ritardi o interruzione della comunicazione, inoltre in post-processing è possibile correggere i dati usando più stazioni di riferimento a terra, ottenendo così più precisione.
Costi maggiori rispetto al PPK data la necessità di strumentazione RTK aggiuntiva.	Costi ridotti dato che non è necessario acquistare strumentazione aggiuntiva.

Tabella 1.2: Differenze tra RTK e PPK

1.3.2 Raccolta dati

La raccolta dei dati per la tecnica PPK è un processo molto importante a cui poi verranno applicate le dovute correzioni differenziali. Questo processo, se eseguito correttamente, permette di ottenere misure di posizione molto accurate. I protagonisti in questo caso sono due: il rover e la base; entrambi devono registrare dei dati GNSS grezzi che verranno poi processati.

Rover È quel dispositivo che si muove all'interno dello scenario di interesse e che raccoglie dati GNSS. Può essere un drone che vola secondo una missione automatica, oppure un ricevitore GNSS usato per battere dei punti a terra. Qualunque sia questo dispositivo durante la sua attività raccoglie informazioni satellitari, con step temporali tipicamente di 1 secondo, sotto forma di file RINEX, un formato standard per dati GNSS grezzi. All'interno di questo file, detto di *navigazione*, perchè generato dal rover, è possibile leggere alcuni dettagli di ciascun satellite in vista dal ricevitore.[6]

Base Il secondo protagonista nei rilievi PPK è la base: un ricevitore GNSS fisso durante tutta la finestra temporale di acquisizione dati. Anche la base genera un file RINEX secondo gli stessi step temporali del rover raccogliendo informazioni sui vari satelliti di ciascuna costellazione. Tramite questo file RINEX, chiamato di *base*, è possibile risalire alle correzioni da apportare al file RINEX di *navigazione* del rover. Questo è possibile poiché data la posizione nota a priori della base, questa è in grado di stimare l'errore tra la propria posizione esatta e quella stimata dai dati satellitari, e usare questo errore per correggere la posizione del rover.

Sono possibili due diversi scenari:

- Base propria: si installa la propria base in un punto relativamente vicino al campo su cui si andrà ad operare, e a valle della procedura di survey-in questa restituirà la sua posizione con un certo grado di accuratezza. Oppure, assegnare direttamente alla base le coordinate acquisite tramite un secondo ricevitore GNSS. Fatto ciò la base potrà iniziare a registrare i dati all'interno del file RINEX di base;
- Base del sistema CORS: non è necessario installare una propria base nel campo poiché si utilizzano i file RINEX di base generati dalle stazioni di riferimento CORS del territorio (sezione 1.2.3). In figura 1.8 si può vedere l'antenna di una delle stazioni di base del servizio SPIN3 GNSS: l'antenna TORI installata all'interno dell'area del Politecnico di Torino.



Figura 1.8: Stazione di riferimento permanente TORI[19]

1.3.3 Correzione dei dati in post-processing

Dopo aver raccolto i dati GNSS rispettivamente nei file RINEX di *base* e di *navigazione* è possibile correggerli per avere misure di posizione molto accurate. Così come per il caso RTK, anche per la tecnica PPK si cerca di lavorare con una baseline il più piccola possibile, perchè all'aumentare della distanza tra base e rover potrebbero cambiare le condizioni atmosferiche e ambientali e quindi rendere meno efficiente la correzione differenziale applicata. Si consiglia di usare stazioni di riferimento con baseline inferiori ai 30 chilometri[2]. Esistono diversi software in grado di offrire questo servizio di post-processing, ma quello utilizzato in questo caso di studio è SPIN3 GNSS che oltre a raccogliere i dati dalle stazioni CORS, mette a disposizione anche il servizio di post-elaborazione. Per questo servizio è sufficiente fare un upload dei dati registrati dal rover in formato RINEX e poi sarà il software stesso a trovare la stazione di riferimento più vicina con i propri file RINEX di base da utilizzare. A fine elaborazione si ottengono i dati di partenza corretti in PPK. Il capitolo 4 tratta di un caso reale svolto in un'azienda agricola usando la tecnica PPK.

Capitolo 2

Ricevitori GNSS e UAV utilizzati

2.1 H-RTK mosaic-H

[11] Il ricevitore GNSS protagonista di questo studio è il GNSS mosaic-H (fig. 2.1) della casa produttrice Holybro, uno dei migliori hardware tra quelli a disposizione nel campo RTK grazie al suo modulo con processore Septentrio.

Il ricevitore dispone di un magnetometro IST8310, due antenne ad alte prestazioni e un involucro in alluminio. Grazie al suo ingresso a doppia antenna (una principale (*main*) ed una ausiliaria (*aux*)), il mosaic-H può fornire all'autopilota informazioni di imbardata senza bussola. Questo è utile in casi in cui il magnetometro di bordo, a causa di disturbi elettromagnetici esterni, non fosse affidabile, ad esempio in missioni vicino a cavi dell'alta tensione. In questa tesi verrà affrontato esclusivamente il tema del calcolo della posizione. Le caratteristiche di multi-banda e multi-costellazione permettono al ricevitore di acquisire i segnali da tutte le costellazioni elencate nella sezione 1.1.1 su più frequenze, offrendo così una maggior precisione, affidabilità e resistenza alle interferenze rispetto ad



Figura 2.1: H-RTK mosaic-H (Dual Antenna Heading)[11]

altri ricevitori concorrenti.

Il principale vantaggio derivante dall'utilizzo del mosaic-H in modalità RTK è l'enorme miglioramento dell'accuratezza posizionale. Come illustrato nella tabella 2.1, l'accuratezza in modalità standalone (senza correzioni RTK) è significativamente peggiore, con un errore addirittura di tre ordini di grandezza di differenza, rispetto alla modalità RTK. Questo si traduce in performance notevolmente peggiori per applicazioni che richiedono alta precisione. Tuttavia, quando si ricevono le correzioni RTCM per il posizionamento RTK, è fondamentale considerare un fattore aggiuntivo che influenza l'accuratezza finale: la baseline. L'incertezza sul posizionamento in modalità RTK tende ad aumentare proporzionalmente alla baseline: si moltiplica il valore indicato in ppm (parts per million) per ogni chilometro di distanza dalla stazione base RTK. Questo implica che una baseline più corta garantirà una maggiore accuratezza della posizione. Esempio: per una stazione base RTK che si trova a 10 km dal rover, l'accuratezza orizzontale sarà:

$$6 \text{ mm} + 0.5 \frac{\text{mm}}{\text{km}} \cdot 10 \text{ km} = 6 \text{ mm} + 5 \text{ mm} = 11 \text{ mm}$$

Mode	Accuratezza orizzontale	Accuratezza verticale
Standalone	1.2 m	1.9 m
RTK	0.006 m + 0.5 ppm	0.01 m + 1 ppm

Tabella 2.1: Accuratezza di posizionamento[11]

2.1.1 Configurazione iniziale

Prima di utilizzare il ricevitore mosaic-H è necessario svolgere una prima attività di configurazione. La procedura descritta sulla documentazione online richiede di settare alcuni parametri del ricevitore in modo da renderlo compatibile con il firmware dell'autopilota in uso[12]. Il software utilizzato per assegnare i parametri di configurazione al mosaic-H è stato QGroundControl (QGC da ora in poi): un'applicazione che permette la pianificazione di missioni e il controllo dei parametri di volo di qualsiasi velivolo che sfrutta il protocollo MAVLink. In primo luogo, il ricevitore è stato collegato alla carrier board Cube Black (figura 2.2) e questa tramite USB al PC con QGC in esecuzione. Il firmware dell'autopilota installato all'interno della Cube Black era la versione v1.14.3 di PX4¹. A questo punto, operando da QGC, nella sezione *parametri* del velivolo è stato possibile impostare i valori come da guida, indicati in figura 2.3.

A valle di questa prima configurazione, il ricevitore, una volta esposto all'esterno, ha iniziato a ricevere i primi segnali GNSS mostrando i risultati su QGC. Dalla figura 2.4 si vede che il ricevitore in quel momento era riuscito a ricevere il segnale di 11 satelliti con un HDOP e VDOP di 1 e 1.3, valori ottimi secondo quanto detto nella sezione 1.1.2.

¹Per la versione 1.15.0 di PX4 e le successive i parametri non erano al momento applicabili.



Figura 2.2: Cube Black carrier board

Clear ☐ Show modified only		
GPS_1_CONFIG	GPS 1	Serial Configuration for Main GPS
GPS_1_GNSS	31	GNSS Systems for Primary GPS (integer bitmask)
GPS_1_PROTOCOL	Septentrio (SBF)	Protocol for Main GPS
GPS_2_CONFIG	Disabled	Serial Configuration for Secondary GPS
GPS_DUMP_COMM	Disable	Log GPS communication data
GPS_PITCH_OFFSET	0.001 deg	Pitch offset for dual antenna GPS
GPS_SAT_INFO	Disabled	Enable sat info (if available)
GPS_YAW_OFFSET	0.001 deg	Heading/Yaw offset for dual antenna GPS

Figura 2.3: Parametri impostati su QGC per il mosaic-H e PX4 v1.14.3

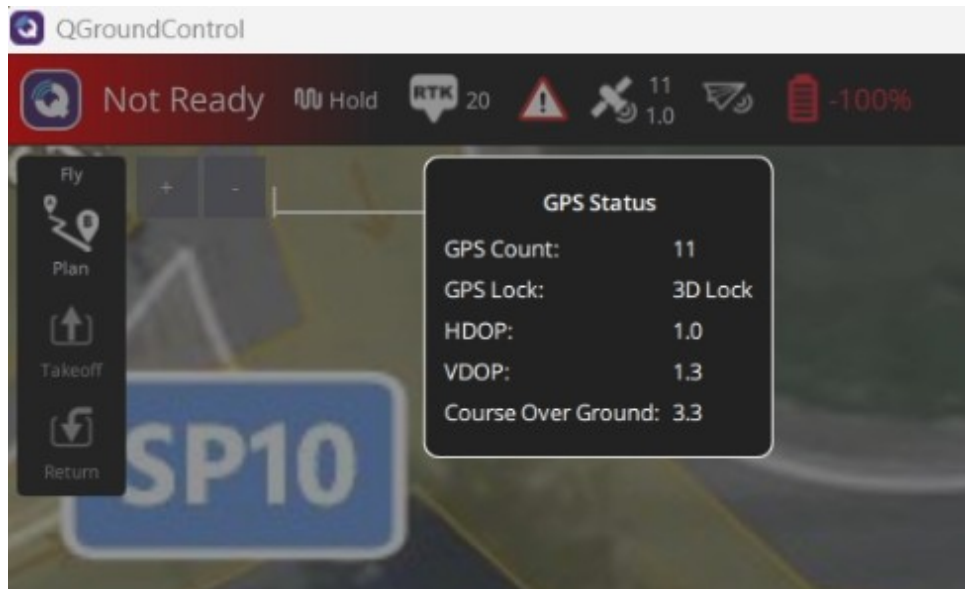


Figura 2.4: Informazioni sul segnale GNSS

La voce GPS Lock può assumere 4 valori differenti:

- 3D Lock: posizione determinata dal solo ricevitore GNSS senza alcun ausilio;
- 3D DGPS Lock: la precisione della posizione viene migliorata grazie al dead reckoning in cui i dati dei sensori di bordo, come la piattaforma inerziale, vengono utilizzati per il calcolo della posizione corrente per propagazione dalla posizione precedente;
- 3D RTK GPS Lock (float): il rover riceve le correzioni dalla base RTK ma non può risolvere tutte le ambiguità; in questo caso, la precisione è di solito nell'intorno del metro;
- 3D RTK GPS Lock (fixed): il rover, utilizzando le correzioni della base, ha risolto le ambiguità nel calcolo della posizione e ha ottenuto la soluzione con una precisione di livello centimetrico[7].

Dopo aver confermato il corretto funzionamento del ricevitore mosaic-H in modalità standalone, il passo successivo è stato verificarne le prestazioni in modalità RTK. La configurazione è analoga al caso precedente, ma oltre al ricevitore e il PC a cui è collegato si aggiunge un secondo ricevitore che funge da base RTK. Nel dettaglio la base RTK collegata via USB al PC è stata la F9P già mostrata in figura 1.4. A valle della procedura di survey-in della base il mosaic-H ha iniziato a ricevere le correzioni differenziali sotto forma di messaggi RTCM e a conferma di ciò, la finestra di QGC dedicata alle informazioni GNSS, dopo diversi secondi compariva come in figura 2.5. La differenza sostanziale rispetto al caso senza RTK (figura 2.4) è lo status del tipo di soluzione è fixed, questo conferma l'effettiva correzione delle ambiguità nel calcolo della posizione.

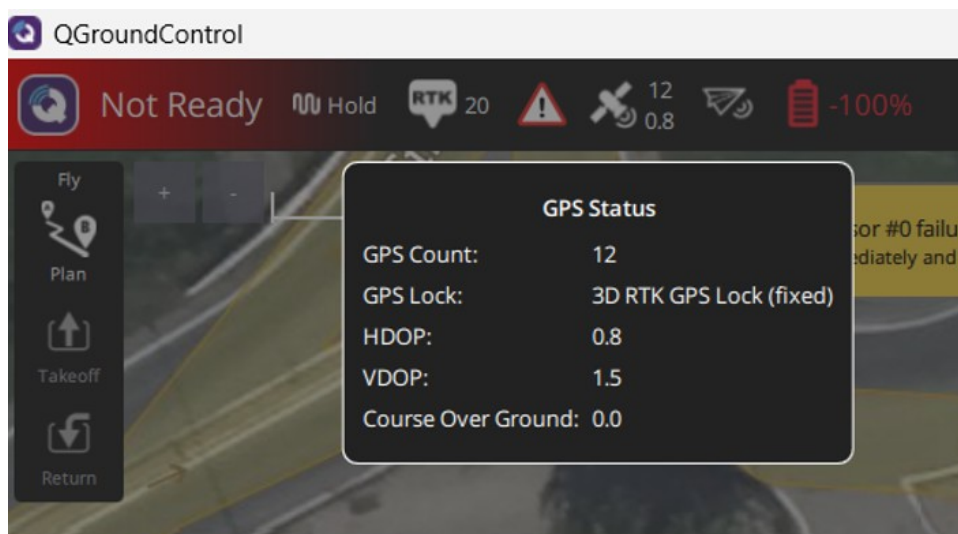


Figura 2.5: Informazioni sul segnale GNSS in RTK

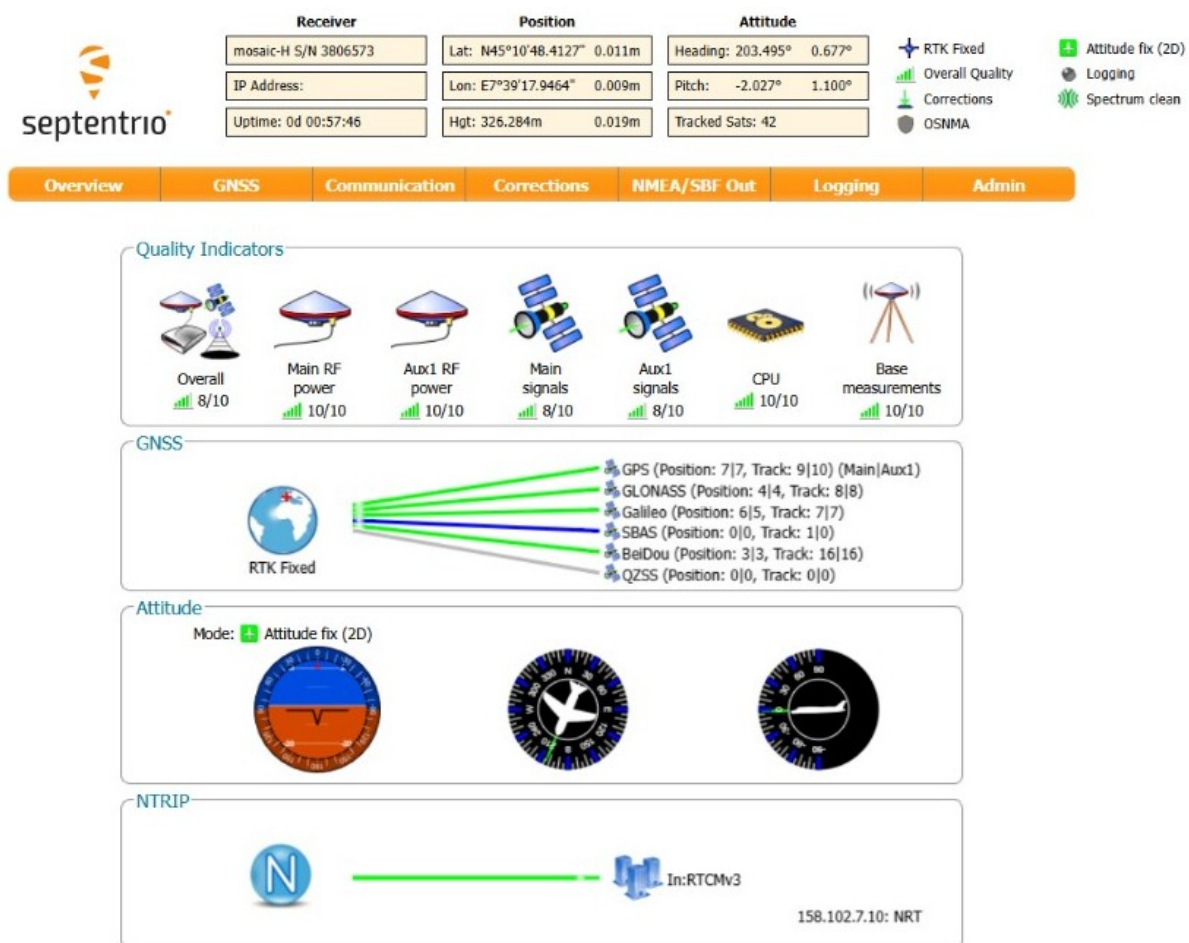


Figura 2.6: Web App Septentrio

Un altro strumento molto potente che si ha a disposizione per lo studio delle varie informazioni di posizionamento del ricevitore è la web app sviluppata da Septentrio. È possibile accedervi digitando l'indirizzo IP del ricevitore e permette di avere una panoramica sullo stato del ricevitore e di modificarne tutti i parametri. Dalla figura 2.6 si può dire che al momento in cui è stata acquisita la schermata il ricevitore era in modalità RTK, infatti lo confermano le due icone in alto a destra: *Correction* e *RTK Fixed*. Nella parte centrale in alto, invece, vengono mostrate le coordinate e la quota ellissoidale con valori di accuratezza dell'ordine del centimetro.

Con questo si conclude la configurazione del ricevitore mosaic-H poichè si è mostrato affidabile nei vari scenari. Nel prossimo capitolo verranno eseguiti dei test con il ricevitore montato a bordo di alcuni droni per dimostrarne l'accuratezza in fase operativa.

2.2 Emlid Reach RS2+

Oltre al ricevitore GNSS mosaic-H montato a bordo del velivolo, durante i test che verranno descritti più avanti, è stato usato anche il dispositivo Emlid Reach RS2+ (d'ora in avanti chiamato ricevitore Emlid)[9]. Si tratta di un ricevitore GNSS multi-banda e multi-costellazione, con precisione centimetrica utile in campi come la mappatura e la navigazione. Grazie ad un modem LTE integrato, installando una scheda SIM con un piano per la rete mobile attivo, è possibile ricevere direttamente le correzioni sottoforma di messaggi RTCM direttamente dal protocollo NTRIP. Questa funzione è stata sfruttata nei vari test per acquisire dei punti nel campo oggetto di studio, e avere direttamente le coordinate corrette per poterle poi confrontare con quelle restituite dal ricevitore mosaic-H. La casa produttrice dichiara che il ricevitore Emlid riesce ad operare in RTK con una baseline fino a 60 km, e 100 km in PPK. Le sue prestazioni in termini di accuratezza nel determinare la posizione sono riassunte nella tabella 2.2.

Mode	Accuratezza orizzontale	Accuratezza verticale
Statica	4 mm + 0.5 ppm	8 mm + 1 ppm
RTK	7 mm + 1 ppm	14 mm + 1 ppm
PPK	5 mm + 0.5 ppm	10 mm + 1 ppm

Tabella 2.2: Valori di accuratezza



Figura 2.7: Ricevitore GNSS Emlid Reach RS2+

2.3 Droni impiegati nelle attività

In questa breve sezione verranno presentati i velivoli impiegati per i vari test descritti nel capitolo 3. Si tratta di tre droni differenti interamente progettati e realizzati in Italia dall'azienda MAVTech s.r.l.

RX3 È un drone pensato per rilievi e sorveglianza ad alta precisione in ambienti critici. Grazie al sistema propulsivo ad alta efficienza garantisce tempi di volo prolungati, e la sua versatilità permette di supportare vari payload per le diverse esigenze operative. L'RX3 è compatibile con una vasta gamma di sensori, tra cui LiDAR, telecamere RGB, sensori iperspettrali, telecamere multispettrali e sistemi di imaging termico, rendendolo molto versatile.



Peso (senza payload)	3,1 kg
Peso massimo al decollo	3,9 kg
Peso payload	Fino a 0,8 kg
Dimensioni	840x310x870 mm (LxHxL)
Autonomia	Fino a 40 min
Velocità massima	12 m/s (limitato)

Tabella 2.3: Specifiche tecniche RX3

Q4X Nasce dal perfezionamento del modello precedente, il Q4T, ed è stato pensato per offrire alte prestazioni in ambienti difficili come operazioni di ricerca e soccorso alpino. Ha un design modulare che ne permette la compatibilità con una varietà di accessori, tra cui: GPS RTK, luci stroboscopiche, telecamere FPV, LiDAR e ricevitore ADS-B. I potenti motori e la resistenza alla pioggia leggera garantiscono affidabilità nei voli in quota.



Peso (senza payload)	6 kg
Peso massimo al decollo	9,5 kg
Peso payload	Fino a 3,5 kg
Dimensioni	1130x500x1130 mm (LxHxL)
Autonomia	Fino a 40 min
Velocità massima	12 m/s (limitato)

Tabella 2.4: Specifiche tecniche Q4X

M6 È un esacottero ed è il drone più grande sviluppato dall'azienda. Nasce per poter essere impiegato in operazioni per il trasporto di carichi pesanti grazie alla sua piattaforma robusta e versatile. Il sistema di payload dell'M6 offre flessibilità operativa, consentendo di montare i carichi sulla parte superiore o inferiore della struttura principale per soddisfare le specifiche esigenze della missione. È possibile montare un sistema di irrorazione dotato di un serbatoio brevettato anti-sloshing per applicazioni agricole, inoltre montando un GPS RTK è possibile operare in condizioni di elevata precisione. Evitando il fenomeno dello sloshing, il sistema consente un'applicazione più accurata di fitofarmaci, fertilizzanti e altri prodotti per la difesa delle piante, riducendo gli sprechi e ottimizzando l'uso delle risorse.



Peso (senza payload)	15 kg
Peso massimo al decollo	25 kg
Peso payload	Fino a 10 kg
Dimensioni	1820x620x2010 mm (LxHxL)
Autonomia	Fino a 22 min
Velocità massima	12 m/s (limitato)

Tabella 2.5: Specifiche tecniche M6

Capitolo 3

Sperimentazione e analisi dei risultati

Dopo aver configurato correttamente il ricevitore GNSS come descritto nel capitolo precedente, il passo successivo è quello di validare questa configurazione. Perciò di seguito, verranno descritti diversi test:

- **test statici:** si intendono quei test effettuati con un ricevitore GNSS montato a bordo del velivolo, ma con il drone a terra e non armato. Quindi il drone viene spostato manualmente da un punto all'altro solo dopo aver acquisito le coordinate del punto precedente. La configurazione usata prevedeva l'utilizzo di un drone con un allestimento da banco molto semplice ma con tutto il necessario per effettuare delle misurazioni di posizione. A bordo di questo velivolo è stato montato il ricevitore GNSS mosaic-H. Per poter testare un altro hardware e confrontarne i risultati è stato usato anche il drone RX3, con a bordo il ricevitore GNSS SIYI F9P RTK[18].
- **test dinamico:** si intendono quei test effettuati con il ricevitore GNSS mosaic-H montato a bordo del velivolo che non è più a terra, ma in volo e quindi si sposterà da un punto all'altro secondo una missione pre-assegnata con punti noti acquisiti in precedenza. Il velivolo usato per questi test è il Q4X, un drone molto affidabile e robusto su cui poteva essere installato il mosaic-H RTK.

3.1 Test statici

L'obiettivo di questa serie di test statici è quello di verificare l'accuratezza dei vari ricevitori GNSS. I punti a terra che verranno presi come riferimento per tutti i successivi test sono 15 punti fissi rilevati in un'area di parcheggio situata nel comune di Caselle Torinese (TO) in Strada Leinì. Per avere delle coordinate esatte con cui poi confrontare i risultati dei vari test, i 15 punti sono stati battuti in un primo momento con il ricevitore GNSS

Emlid Reach RS2+. Questo dispositivo attraverso una rete di dati mobile è in grado di ricevere le correzioni dal protocollo NTRIP e quindi avere una misura di posizione in RTK con valori di deviazione standard dell'ordine del centimetro. Per questo motivo, è possibile, con buona approssimazione, assumere le coordinate ottenute con il ricevitore Emlid come esatte. Nei vari test svolti verranno considerate, a pari ricevitore GNSS, sia misurazioni in RTK e non. Il risultato atteso da questa serie di test è quello di dimostrare un notevole vantaggio nell'utilizzo del ricevitore GNSS mosaic-H, in termini di precisione e accuratezza della sua posizione misurata, rispetto ad altri ricevitori. Nei successivi sottocapitoli verranno descritti tutti i test effettuati con ciascun ricevitore e metodologia.

3.1.1 Emlid Reach RS2+ in RTK

Attraverso questo primo rilievo è stato possibile acquisire i 15 punti oggetto dello studio e successivamente caricarli su Google Earth per visualizzarli. I vari punti sono stati acquisiti tramite l'app Emlid Flow abilitando le correzioni, quindi in modalità RTK, pertanto, ciascun punto è stato registrato in maniera istantanea con una precisione centimetrica sia sul piano orizzontale che verticale. In tabella 3.1 vengono mostrate le coordinate dei vari punti e la relativa quota in riferimento al modello EGM96 (Earth Gravitational Model 1996): un modello geoidale che definisce il livello medio del mare a livello globale ed è più rappresentativo rispetto al livello medio del mare indicato dall'ellissoide WGS 84. In figura 3.1 è possibile notare i punti acquisiti ed è anche evidente come questi siano traslati rispetto agli angoli delle aiuole e marciapiedi che effettivamente sono stati battuti. Questo è dovuto alla non perfetta georeferenziazione della mappa di Google Earth che in questo caso risulta traslata leggermente verso destra.

ID punto	Latitudine [°N]	Longitudine [°E]	Quota AMSL [m]
1	45.1782577	7.65656148	275.281
2	45.17822226	7.65660139	275.269
3	45.17821336	7.65654079	275.268
4	45.17820125	7.65668617	275.234
5	45.17816561	7.65672979	275.227
6	45.17817962	7.65675389	275.173
7	45.1781442	7.65679599	275.199
8	45.17810569	7.65686191	275.184
9	45.17809224	7.65693557	275.099
10	45.17825277	7.65720516	275.009
11	45.17828714	7.65716481	275.045
12	45.17834443	7.65714084	274.999
13	45.17841902	7.65705363	274.983
14	45.17855517	7.65715873	274.934
15	45.17835136	7.65671752	275.191

Tabella 3.1: Punti campionati con il ricevitore Emlid RS2



Figura 3.1: Punti campionati con il ricevitore Emlid (in verde)

3.1.2 Emlid Reach RS2+ in PPK

Un secondo metodo per avere conferma dell'esattezza delle coordinate dei 15 punti è determinarle attraverso le correzioni del servizio SPIN3 in post-processing. La procedura è stata quella di acquisire i 15 punti con il ricevitore Emlid senza alcun tipo di correzione in ingresso, quindi sono stati registrati dei dati grezzi di posizione con incertezze di circa 0.2 metri nel piano XY, che successivamente sono stati corretti. Il ricevitore durante l'acquisizione dei punti ha generato il file RINEX di *navigazione* che è poi stato elaborato da SPIN3 e corretto utilizzando il file RINEX di *base* della stazione CORS più vicina. A valle della correzione le coordinate ottenute sono messe a confronto con quelle misurate della prova precedente e il risultato è visibile in tabella 3.3. In figura 3.2 sono visibili le misure grezze di posizione in viola e le misure corrette dal servizio SPIN3 in verde; si è deciso di non aggiungere i punti campionati in RTK della prova precedente perchè altrimenti, per ogni waypoints, ci sarebbero stati tre punti colorati, di cui due perfettamente sovrapposti (punto in RTK e in PPK) che avrebbero potuto confondere. L'ultima colonna della tabella 3.3 conferma la buona riuscita del test dato che durante le varie misurazioni si ha un errore medio di circa 8 centimetri. Considerando anche un minimo errore nel posizionare il ricevitore GNSS nella stessa identica posizione tra le due prove, si può considerare il risultato soddisfacente per questo caso di studio.

Dopo aver determinato le coordinate dei 15 punti di riferimento i successivi test si basano sul verificare l'accuratezza dei vari ricevitori.



Figura 3.2: Punti campionati con il ricevitore Emlid corretti con SPIN3 in PPK (in verde) e punti grzzi non corretti (in viola)

ID punto	Correzioni in PPK		Correzioni in RTK		Errore [cm]
	Latitudine [°N]	Longitudine [°E]	Latitudine [°N]	Longitudine [°E]	
1	45.1782585	7.6565611	45.1782577	7.65656148	9.4
2	45.1782226	7.6566013	45.17822226	7.65660139	3.8
3	45.1782141	7.6565405	45.17821336	7.65654079	8.5
4	45.1782018	7.6566859	45.17820125	7.65668617	6.5
5	45.1781662	7.6567294	45.17816561	7.65672979	7.2
6	45.1781800	7.6567539	45.17817962	7.65675389	4.2
7	45.1781447	7.6567956	45.1781442	7.65679599	6.3
8	45.1781058	7.6568604	45.17810569	7.65686191	11.9
9	45.1780927	7.6569350	45.17809224	7.65693557	6.8
10	45.1782538	7.6572053	45.17825277	7.65720516	11.5
11	45.1782871	7.6571658	45.17828714	7.65716481	7.8
12	45.1783454	7.6571407	45.17834443	7.65714084	10.8
13	45.1784188	7.6570547	45.17841902	7.65705363	8.7
14	45.1785556	7.6571589	45.17855517	7.65715873	5.0
15	45.1783526	7.6567166	45.17835136	7.65671752	15.5

Tabella 3.3: Coordinate dei punti corretti in PPK e RTK

3.1.3 Mosaic-H non RTK

In questo rilievo, tutti i 15 punti sono stati campionati con il ricevitore mosaic-H. È da specificare che non è stato utilizzato alcun supporto esterno, pertanto le coordinate devono essere considerate non corrette. Durante le prove, il ricevitore scambiava le proprie informazioni tramite telemetria tra drone e PC, le quali venivano lette su QGroundControl. Il drone veniva spostato da un punto all'altro, poggiato a terra, e solo dopo alcuni secondi venivano raccolti i dati di latitudine e longitudine. Come si vede dalla figura 3.3, le coordinate restituite in output contraddistinte dai punti gialli non sono di certo paragonabili a quelle esatte in verde, ma sono soggette ad un'impresione dovuta al fatto che il ricevitore lavora in modalità standalone quindi senza alcuna correzione. In tabella 3.4 sono indicate le coordinate dei punti restituite dal ricevitore senza alcuna correzione, e infine, nell'ultima colonna è indicato l'errore lineare tra i punti esatti del paragrafo 3.1.1 e quelli appena battuti. L'errore medio è di circa 120 centimetri con un massimo di 202 centimetri nel punto 6, assolutamente inaccettabile per applicazioni di agricoltura di precisione.

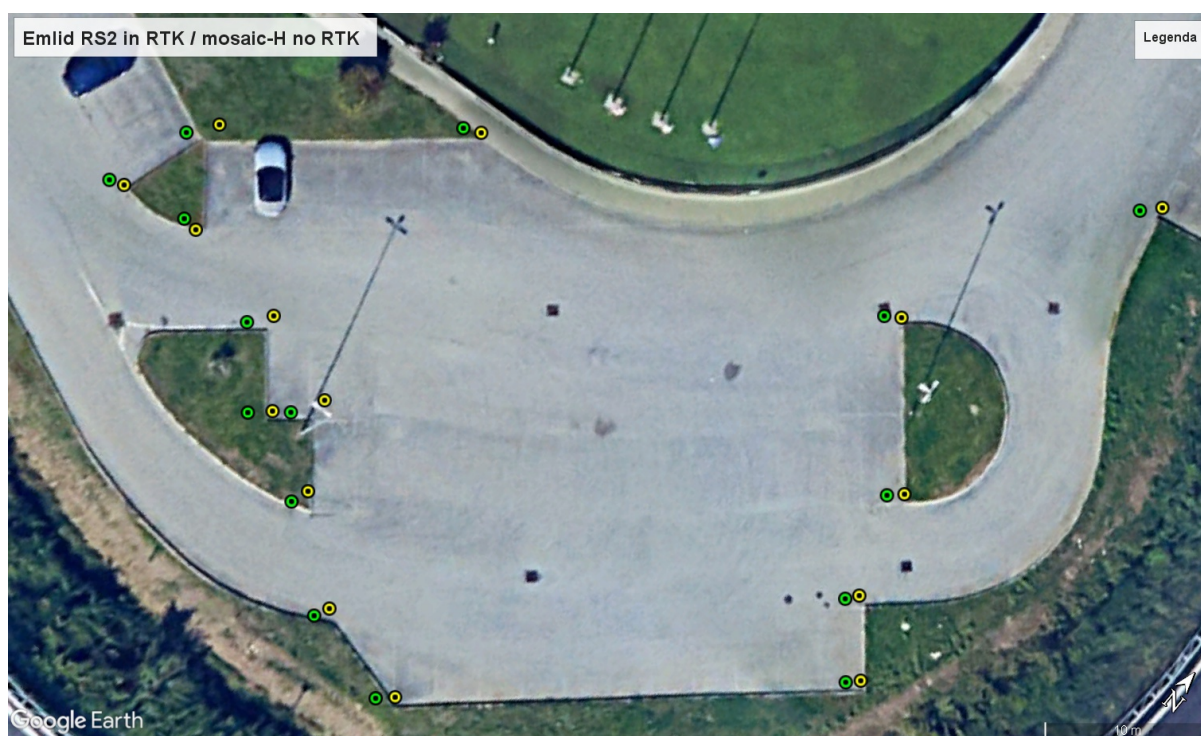


Figura 3.3: Punti campionati con il ricevitore Emlid (in verde) e con il ricevitore mosaic-H non in RTK (in giallo)

ID punto	Latitudine [°N]	Longitudine [°E]	Errore [cm]
1	45.1782718	7.6565762	194.5
2	45.1782216	7.6566131	92.0
3	45.1782161	7.6565515	89.2
4	45.1782125	7.6566982	156.5
5	45.1781742	7.656743	140.8
6	45.1781953	7.6567671	202.6
7	45.1781536	7.6568005	110.3
8	45.1781134	7.6568673	95.5
9	45.1780987	7.6569463	110.5
10	45.1782585	7.6572135	91.2
11	45.1782932	7.6571718	86.8
12	45.1783509	7.6571509	106.7
13	45.1784243	7.6570649	106.0
14	45.1785647	7.6571714	145.1
15	45.1783554	7.65673	107.6

Tabella 3.4: Punti campionati con il ricevitore mosaic-H non in RTK

3.1.4 Mosaic-H in RTK

Durante questo rilievo, oltre al ricevitore mosaic-H configurato come la prova precedente, alla strumentazione si aggiunge la base H-RTK F9P GNSS che collegata a QGroundControl, a valle della procedura di survey-in, inizia ad inviare al ricevitore GNSS a bordo i messaggi RTCM necessari per ricevere le dovute correzioni. Durante questo test i parametri impostati su QGC per la procedura di survey-in della base sono: 0.5 metri di accuratezza e 300 secondi come tempo minimo. In un caso applicativo reale l'ideale sarebbe esporre la base RTK alla volta celeste per più tempo possibile: diversi minuti o meglio se diverse ore per ridurre al massimo l'incertezza della posizione della base. Questo è necessario in quanto l'incertezza con cui la base RTK determina la sua posizione si ripercuote anche nella posizione finale del rover. Quindi, si intuisce come il caso ideale sia avere valori di accuratezza molto bassi. Anche se può sembrare controintuitivo, un valore di accuratezza più basso indica un GPS più preciso. In modo analogo al caso precedente le coordinate sono state acquisite tramite QGC punto per punto; una differenza riscontrata rispetto al test precedente è stata una maggiore stabilità delle coordinate spostando il rover da un punto all'altro: indizio che introduce uno dei benefici della tecnologia RTK. Osservando la figura 3.4 si nota a colpo d'occhio che le coordinate dei punti campionati sono molto più accurate rispetto al caso precedente, e quindi più vicine alle coordinate esatte in verde, ma nonostante ciò rimane un offset tra le due misure dovuto all'accuratezza di 0.5 metri della base RTK che è stata introdotta prima. Guardando la tabella 3.5, l'errore medio tra i punti esatti e quelli appena campionati si aggira intorno ai 60 centimetri: un evidente miglioramento rispetto al test precedente, ma ancora troppo elevato per poter impiegare il drone in applicazioni di precisione.



Figura 3.4: Punti campionati con il ricevitore Emlid (in verde) e con il ricevitore mosaic-H in RTK (in arancione)

ID punto	Latitudine [°N]	Longitudine [°E]	Errore [cm]
1	45.1782609	7.6565703	77.7
2	45.1782255	7.6566045	43.5
3	45.1782148	7.6565448	35.3
4	45.1782029	7.6566951	72.3
5	45.1781678	7.6567392	77.6
6	45.1781818	7.6567627	73.1
7	45.1781432	7.6568031	56.8
8	45.1781083	7.6568685	59.2
9	45.1780939	7.6569463	86.0
10	45.1782559	7.6572126	67.9
11	45.1782894	7.6571698	46.5
12	45.1783462	7.6571447	36.1
13	45.178421	7.6570586	44.7
14	45.1785603	7.6571688	97.3
15	45.1783526	7.6567274	78.6

Tabella 3.5: Punti campionati con il ricevitore mosaic-H in RTK

3.1.5 Mosaic-H in RTK con base corretta

L'obiettivo di questo rilievo è quello di ottenere delle misure di posizione del ricevitore mosaic-H il più accurate possibile paragonandole alle coordinate dei 15 punti ottenute con il ricevitore GNSS Emlid come riferimento. Per fare ciò è necessario che la posizione della base RTK sia nota ed esatta, per questo, invece di avviare la procedura di survey-in della base RTK da QGC, vengono assegnate direttamente le coordinate della base precedentemente acquisite tramite il ricevitore Emlid in RTK. In questo modo la posizione del rovere nei 15 punti non è affetta dall'incertezza della posizione della base come invece accadeva nel caso precedente. In figura 3.5 si evince il grande vantaggio di ottenere i messaggi RTCM da una base RTK con posizione nota. Infatti, le posizioni del rover sono molto accurate, tanto che a volte le due icone sulla mappa sono quasi sovrapposte. In questo caso il minimo errore presente tra le due posizioni può essere dovuto a due motivi: un errore nel posizionare i due ricevitori, nei due test, nella stessa identica posizione, con la conseguenza di battere effettivamente due punti diversi a pochi centimetri di distanza; oppure l'acquisizione delle coordinate del mosaic-H da QGC senza aspettare che queste si stabilizzassero, ma con piccole oscillazioni delle ultime cifra decimali che portano ad un errore di qualche centimetro.

Le coordinate dei punti ottenute a valle del test sono raggruppate nella tabella 3.6. Al netto dei possibili errori di posizionamento descritti prima è evidente che l'errore indicato nell'ultima colonna della tabella è ancora inferiore rispetto al test precedente, con un errore medio di 22 centimetri e un massimo di 33 centimetri in corrispondenza del punto 9 e 12. Sono valori che si possono sicuramente migliorare, ma comunque accettabili per un lavoro di agricoltura di precisione.

ID punto	Latitudine [°N]	Longitudine [°E]	Errore [cm]
1	45.1782594	7.6565636	25.2
2	45.1782227	7.656603	13.5
3	45.1782124	7.6565429	19.7
4	45.1781993	7.656684	27.5
5	45.1781647	7.6567281	16.7
6	45.1781782	7.6567556	20.7
7	45.178143	7.6567972	16.4
8	45.178104	7.6568629	20.3
9	45.1780916	7.6569397	33.1
10	45.178255	7.6572074	30.4
11	45.1782884	7.6571631	19.4
12	45.1783469	7.6571385	33.0
13	45.1784203	7.6570525	16.8
14	45.1785528	7.6571583	26.5
15	45.1783524	7.6567157	18.4

Tabella 3.6: Punti campionati con il ricevitore mosaic-H in RTK con base corretta



Figura 3.5: Punti campionati con il ricevitore Emlid (in verde) e con il ricevitore mosaic-H in RTK con base corretta (in bianco)

3.1.6 Siyi F9P non RTK

Con questo test si vuole mettere a confronto l'accuratezza del ricevitore GNSS Siyi F9P con il mosaic-H in modalità standalone, quindi senza alcuna tecnologia esterna d'aiuto. Come si anticipava nell'introduzione dei test statici, ad inizio capitolo, il ricevitore Siyi era a bordo del drone RX3 e scambiava i suoi dati con la ground station tramite telemetria, quindi le sue coordinate venivano acquisite dalla schermata di QGC. In figura 3.6 si ha un'anticipazione di quanto la misura restituita dal sensore sia poco accurata rispetto alle coordinate esatte dei vari punti, infatti dall'ultima colonna della tabella 3.7 se ne ha la conferma con un errore medio di 206 centimetri e un massimo di 239 centimetri. Quindi, confrontando questi risultati con quelli della tabella 3.4 del mosaic-H, si può affermare che quest'ultimo sia più accurato già in modalità standalone con un errore medio di 120 centimetri nelle varie misurazioni, contro i 206 del ricevitore Siyi.



Figura 3.6: Punti campionati con il ricevitore Emlid (in verde) e con il ricevitore Siyi non in RTK (in azzurro)

ID punto	Latitudine [°N]	Longitudine [°E]	Errore [cm]
1	45.1782748	7.6565778	229.0
2	45.1782323	7.656617	165.5
3	45.1782293	7.6565536	203.6
4	45.1782189	7.6567036	239.0
5	45.1781821	7.6567448	217.7
6	45.1781965	7.6567702	226.9
7	45.1781564	7.6568099	173.9
8	45.1781234	7.6568759	225.2
9	45.1781064	7.6569571	230.6
10	45.1782647	7.6572231	193.2
11	45.1783033	7.6571723	188.9
12	45.1783593	7.6571506	182.1
13	45.1784377	7.6570644	224.1
14	45.1785691	7.6571726	189.1
15	45.1783682	7.6567302	211.9

Tabella 3.7: Punti campionati con il ricevitore Siyi non in RTK

3.1.7 Siyi F9P in RTK

Durante questo test è stato necessario configurare la base RTK in modo tale che il ricevitore Siyi riuscisse a ricevere le dovute correzioni. La procedura usata è stata analoga al caso del ricevitore mosaic-H in RTK descritta nel paragrafo 3.1.4. I parametri della procedura di survey-in della base RTK erano analoghi, quindi 0.5 metri di accuratezza e 300 secondi come tempo minimo. La strumentazione utilizzata consisteva nel drone RX3 con ricevitore Siyi, e telemetria montata a bordo; la ground station era un PC con QGC in esecuzione e un'antenna collegata via USB in grado di ricevere i dati di telemetria inviati dal drone; infine, la base RTK collegata via USB che inviava i messaggi RTCM al ricevitore Siyi. Come nei test precedenti, il velivolo è stato spostato manualmente e le coordinate sono state acquisite tramite la schermata di QGC. Inoltre, similmente a quanto osservato con il mosaic-H in modalità RTK, i valori delle coordinate si sono stabilizzati con maggiore rapidità rispetto alla modalità non RTK.

Un problema riscontrato durante questo test è stato la scarsa affidabilità del ricevitore Siyi F9P in quanto non riusciva a mostrare a schermo, su QGC, la perdita del fix della posizione all'operatore. Probabilmente un bug del ricevitore, ma che in alcune applicazioni potrebbe risultare molto sconveniente o pericoloso. Era un problema già riscontrato in alcuni casi d'uso del drone, ma la conferma è arrivata dopo aver disalimentato la base RTK e lo status del GPS rimaneva inalterato sul fix in RTK.

In figura 3.7 si percepisce l'errore tra le coordinate esatte dei vari punti e quelli campionati dal ricevitore Siyi in RTK, invece dalla tabella 3.8 si ha modo di percepire l'errore tra le due misure in ciascun punto. L'errore medio si aggira sui 160 centimetri, ma si ricorda che in questo test la base RTK aveva un'incertezza di 0.5 metri, quindi non sarebbe mai stato possibile avere un errore vicino allo zero. Nonostante ciò, si apprezza un miglioramento rispetto al test precedente in cui l'errore medio era di 206 centimetri. Infine, si può affermare che a pari accuratezza della base RTK, ricordando i risultati della tabella 3.5, il ricevitore mosaic-H rimane più accurato rispetto al ricevitore Siyi F9P, con un errore medio rispettivamente di 60 centimetri contro 160 centimetri.



Figura 3.7: Punti campionati con il ricevitore Emlid (in verde) e con il ricevitore Siyi in RTK (in blu)

ID punto	Latitudine [°N]	Longitudine [°E]	Errore [cm]
1	45.1782686	7.6565696	136.8
2	45.1782328	7.656608	128.1
3	45.178228	7.6565435	164.1
4	45.1782131	7.6566963	153.7
5	45.1781799	7.6567397	176.7
6	45.1781933	7.6567639	171.0
7	45.1781557	7.6568037	141.3
8	45.1781195	7.6568716	171.2
9	45.1781067	7.6569458	179.6
10	45.1782684	7.6572102	178.1
11	45.1783028	7.6571716	182.0
12	45.178358	7.6571432	151.9
13	45.1784339	7.6570585	169.7
14	45.1785703	7.6571651	175.4
15	45.1783624	7.6567221	127.8

Tabella 3.8: Punti campionati con il ricevitore Siyi in RTK

3.2 Test dinamici in RTK

L'obiettivo di questi test è verificare l'accuratezza e la precisione della misura di posizione restituita dal ricevitore GNSS mosaic-H durante il volo in modalità RTK.

3.2.1 Volo con il Q4X e filari simulati

Il drone utilizzato per questo test è stato il Q4X. Durante questa prova, il ricevitore GNSS Emlid Reach RS2+ è stato utilizzato per acquisire le coordinate esatte di sei punti a terra, i quali sono poi diventati i waypoints della missione automatica pianificata tramite QGroundControl. Successivamente, in questi punti sono state posizionate delle paline segnaletiche, in modo tale che l'operatore potesse stabilire a distanza se il drone fosse sulla perpendicolare del waypoint o meno. Essendo la missione in RTK, la base era attiva, ma a valle dei test statici descritti in precedenza, le sono state assegnate direttamente le sue coordinate esatte senza fare alcuna procedura di survey-in in modo che la sua posizione fosse molto accurata.

La missione automatica prevedeva il decollo da un punto qualsiasi, diverso dai sei waypoints, e poi il sorvolo di questi ultimi in modo sequenziale simulando due filari di una vigna, con 10 secondi di hovering su ciascuno dei punti di riferimento. Con questo piano di volo si intende dimostrare che il ricevitore mosaic-H permette al drone Q4X di raggiungere i waypoints con grande accuratezza, e che i tratti rettilinei tra di essi vengano rispettati.

Il campo scelto per questo test di volo è stato un terreno privato nel comune di Ciriè, mostrato in figura 3.8, in cui si notano anche i sei waypoints, in giallo, ad una quota assegnata rispetto al terreno di 4 metri e la traiettoria desiderata in arancione.

ID punto	Latitudine [°N]	Longitudine [°E]	Quota AMSL [m]
1	45.2303069	7.5781048	364.780
2	45.2303191	7.5780718	364.820
3	45.2301453	7.577937	364.690
4	45.2301547	7.5779001	364.720
5	45.2303305	7.5780403	364.880
6	45.2303433	7.5780085	364.880

Tabella 3.9: Coordinate dei waypoints

A valle del volo, analizzando il file log registrato dal flight computer, la figura 3.9 mostra sommariamente la traiettoria eseguita dal Q4X. Si notano tre tratte distinte in tre colori differenti:

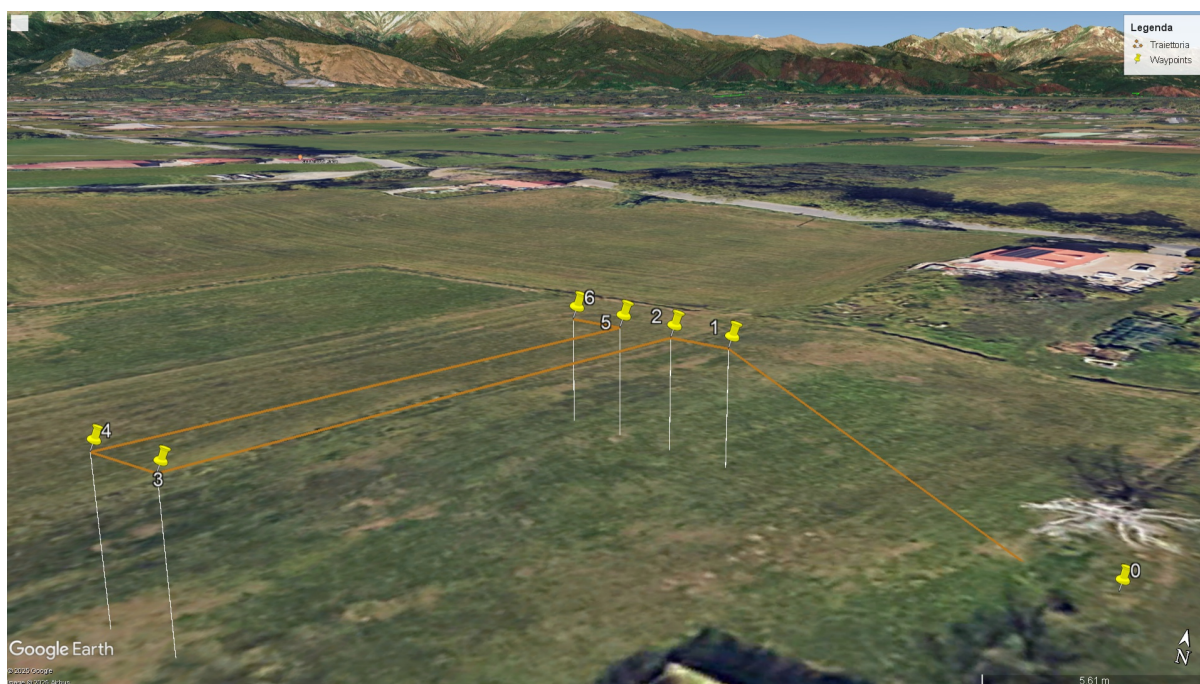


Figura 3.8: Posizione dei waypoints nello spazio

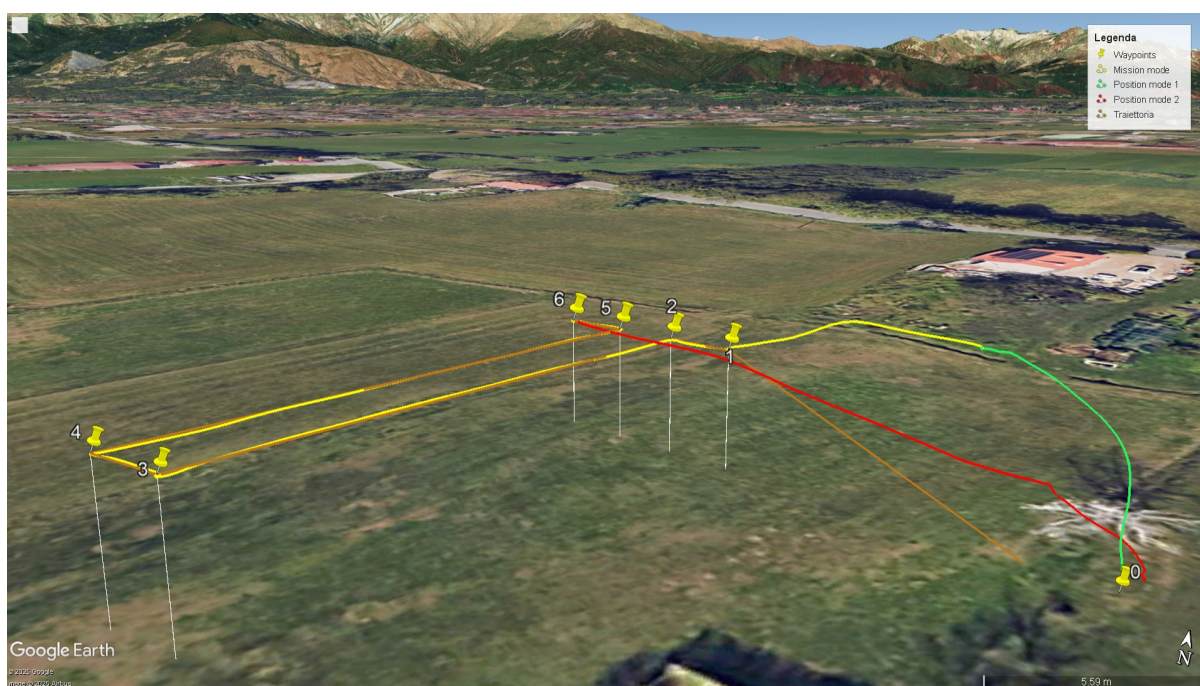


Figura 3.9: Traiettoria eseguita in volo dal Q4X

1. verde: è la prima parte del volo, in cui il drone decolla manualmente e viene portato in una posizione qualsiasi nello spazio;
2. giallo: è il tratto in cui il Q4X esegue la missione vera e propria senza l'intervento del pilota. Si porta alla quota del primo waypoint, vi staziona per 10 secondi

mantenendo la posizione, e poi avanza verso il waypoint successivo fino ad arrivare al sesto ed ultimo waypoints. Da questo punto inizia la fase successiva. Durante questa missione il velivolo imbarda puntando al waypoint successivo solo dopo aver completato il periodo di hovering, quindi quando è già in movimento;

3. rosso: il drone, al termine della sua missione, passa nuovamente nelle mani del pilota che lo riporta manualmente nei pressi del punto da cui è decollato.

L'accuratezza nel seguire la traiettoria assegnata e l'hovering nei vari waypoints viene valutato con i seguenti grafici ottenuti grazie allo studio del log di volo tramite il sito Flight Review. Il link tramite cui si può accedere ai dati completi del volo è il seguente: https://review.px4.io/plot_app?log=f1336ca9-effd-4cf5-a886-2bc7d5a35824.

Analisi del log sul piano orizzontale

Le figure 3.10 e 3.11 mostrano in dettaglio la traiettoria rilevata dai sensori di bordo del Q4X rispettivamente nei pressi dei waypoint 3 e 4. Le tre linee di colore diverso, come suggerito dalla legenda, hanno significati differenti:

- **Estimated:** è una stima calcolata del percorso effettivo del velivolo. Non si basa solo sui dati GPS, ma integra informazioni provenienti da una varietà di sensori di bordo, come accelerometri e giroscopi. Questi dati, con il proprio indice di affidabilità vengono elaborati dal filtro di Kalman che ne restituisce la stima finale. Si può considerare questa traiettoria come la più affidabile;
- **Setpoint:** è la traiettoria desiderata o pianificata che il velivolo avrebbe dovuto seguire. È il percorso che è stato impostato nel sistema di controllo di volo prima o durante il volo;
- **GPS (projected):** è una rappresentazione diretta dei dati di latitudine, longitudine e altitudine forniti dal ricevitore GNSS del velivolo. Questa contribuisce nel determinare la traiettoria *estimated* unendosi alla informazioni degli altri sensori di bordo.

Intorno a ciascun waypoint è stato tracciato un cerchio che rappresenta l'area all'interno del quale si trova la traiettoria stimata (la più fedele alla realtà), durante l'hovering. Sebbene, come tutti i segnali, anche questa informazione sia soggetta ad errore e la traiettoria non coincida perfettamente con quella reale, la si può ritenere accurata. Questa affermazione deriva dai test statici affrontati prima in cui è stata validata l'accuratezza del mosaic-H, e dato che la traiettoria azzurra si basa proprio sulle informazioni del ricevitore, allora anche quest'ultima sarà accurata. Poiché queste informazioni alimentano il filtro di Kalman, allora, anche la traiettoria arancione si può ritenere altrettanto accurata.

Considerando quindi la traiettoria *estimated* in corrispondenza dei waypoints, si può affermare che questa ricade all'interno di una circonferenza di 10 centimetri di raggio in

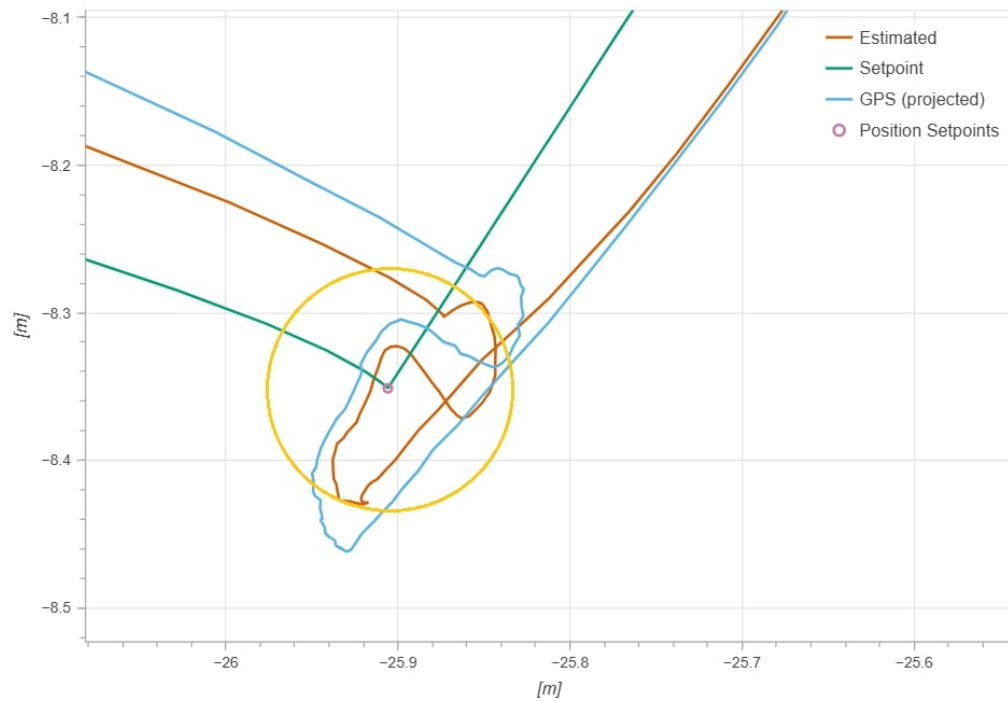


Figure 3.10: Waypoint 3

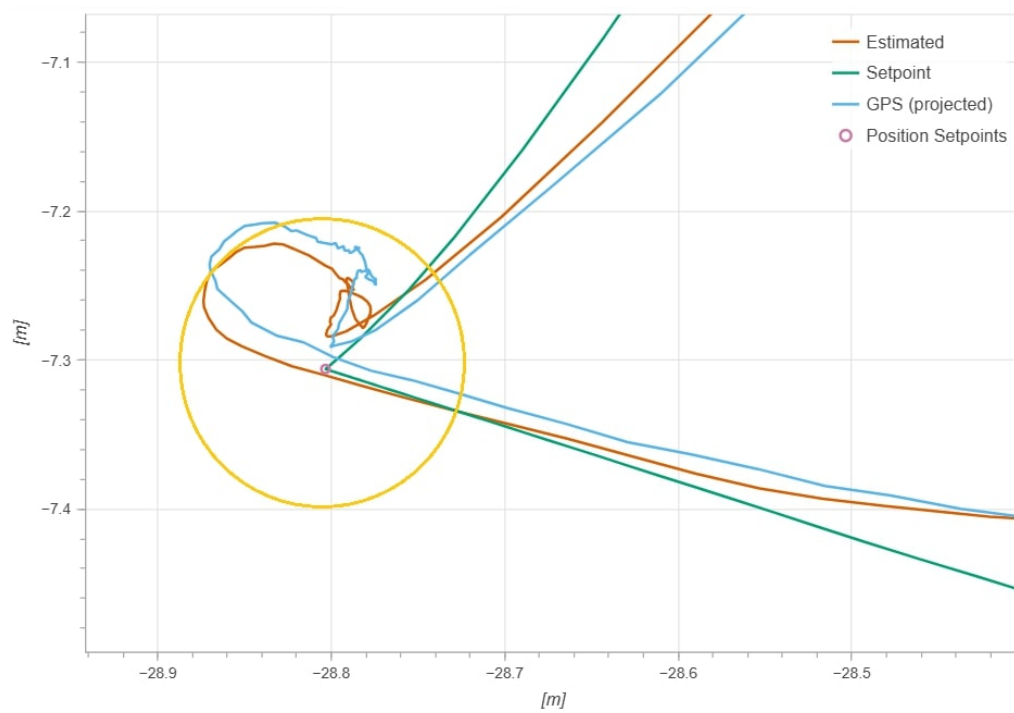


Figure 3.11: Waypoint 4

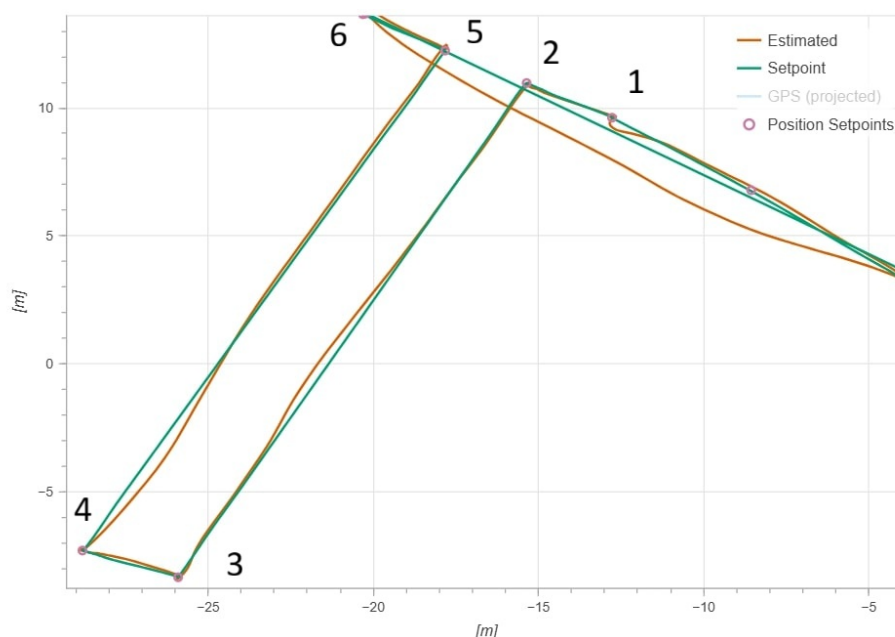


Figura 3.12: Traiettoria completa del volo nel piano orizzontale

entrambi i casi: un risultato assolutamente performante per applicazioni di agricoltura di precisione. La traiettoria non del tutto "pulita" in corrispondenza dei waypoints può essere attribuita al fatto che il velivolo, completata la fase di hovering di 10 secondi, imbarca quando è già in movimento, quindi è lecito che ci siano delle imperfezioni considerando anche il fatto che il drone Q4X ha una massa di circa 6 chilogrammi, quindi ha un'inerzia non indifferente e che essendo in volo una leggera brezza può causare un disturbo momentaneo.

Passando ai filari, rappresentati dai tratti rettilinei che collegano il waypoint 2 al 3, e il 4 al 5, in linea generale si può affermare anche in questo caso che i risultati sono soddisfacenti. L'unica eccezione è una piccola deviazione visibile in figura 3.12¹ in cui la traiettoria stimata si allontana da quella di riferimento con un errore massimo di circa 20 centimetri su entrambi i tratti. Questo fenomeno può essere ricondotto ad un problema della legge di controllo per il tracking della traiettoria, piuttosto che ad un problema di accuratezza del ricevitore mosaic-H, dato che quest'ultimo ha dimostrato la sua affidabilità in tutti i casi precedenti.

¹La traiettoria GPS (projected) è stata nascosta dal grafico per non confondere, ma è paragonabile alla traiettoria stimata in arancione

Analisi del log sul piano verticale

Dopo aver studiato il livello di accuratezza del ricevitore sul piano orizzontale, non rimane altro che analizzare l'accuratezza sul piano verticale.



Figura 3.13: Andamento della quota AMSL

In figura 3.13 sono mostrate 3 curve che indicano l'andamento della quota durante la fase di missione tra i 6 waypoints.

- **vehicle_local_position_setpoint:** indica l'andamento di quota desiderato, stabilito dalla legge di controllo. Ogni tratto a regime della curva (tratto orizzontale) può essere interpretato come la fase di hovering del velivolo su un waypoint, quindi a quota costante. Invece, ogni tratto con pendenza positiva o negativa indica una variazione di quota e quindi le fasi in cui il velivolo si spostava da un punto all'altro. Ogni tratto orizzontale a regime, assume il valore di quota AMSL indicato nella tabella 3.9;
- **vehicle_gps_position:** rappresenta la quota del Q4X misurata esclusivamente dal ricevitore GNSS mosaic-H in RTK;
- **vehicle_global_position:** è la curva che indica l'andamento della quota calcolata dal filtro di Kalman, e si può considerare come la più realistica perchè combina diverse informazioni ricevute in input da diversi sensori di bordo. È molto simile

alla curva *gps_position* poichè questa è una tra le informazioni più affidabili che riceve il filtro di Kalman, quindi è giusto che la rispecchi.

In conclusione, analizzando la curva *vehicle_global_position*, è possibile affermare che, il velivolo segue la traiettoria desiderata con elevata accuratezza. È bene notare che, nonostante le oscillazioni delle curve mostrate in figura, l'errore massimo riscontrato tra la curva di *setpoint* e la *global* si attesta intorno agli 8 centimetri a circa 80 secondi di missione. Purtroppo non è possibile valutare la precisione della misura rispetto ad un riferimento assoluto, ma l'oscillazione limitata garantisce un mantenimento preciso della quota. Considerando che si fa riferimento ad un drone in volo che segue una traiettoria dinamica, e che alcuni disturbi esterni saranno sempre presenti, si può considerare tutto ciò un ottimo risultato se applicato soprattutto all'agricoltura di precisione.

3.2.2 Volo in vigna con l'M6

Dopo aver verificato l'affidabilità e l'accuratezza del ricevitore mosaic-H simulando una missione di sorvolo di alcuni filari, non rimane altro che effettuare un test in uno scenario reale messo a disposizione dall'azienda agricola Terre Sparse.

Il mosaic-H è stato installato a bordo del drone M6, l'unico tra la flotta MavTech s.r.l. adatto alle operazioni in agricoltura di precisione. La missione prevedeva il sorvolo di un filare in modalità RTK assegnando le coordinate note di inizio e fine. La stazione base RTK di riferimento, un ricevitore GNSS del tipo F9P, già mostrato in figura 1.4, è stata posizionata in un punto nel campo con coordinate note. Questa configurazione permette di determinare in modo esatto la posizione del drone nello spazio grazie alle correzioni differenziali provenienti da una base RTK con posizione molto accurata. L'obiettivo del test è dimostrare che il drone sia in grado di raggiungere i waypoints di inizio e fine filare e che segua in modo accurato la traiettoria pianificata simulando una fase di spraying in vigna.

Analizzando il log registrato dal drone in volo è possibile studiarne la traiettoria eseguita. In figura 3.14 si nota esclusivamente il tratto di interesse tra il waypoint 1 e il 2 ovvero il sorvolo del filare in modalità automatica. Come per i log visti in precedenza, sul grafico vengono riportate tre diverse traiettorie: *estimated*, *setpoint* e la *GPS (projected)*. Paragonando la *setpoint*, ovvero un segmento dritto che unisce i due waypoints, con la *estimated* la quale è la traiettoria più realistica, si può affermare che il drone segue il filare ad eccezione di qualche piccola oscillazione nella parte centrale, ma che non influisce sulle prestazioni dello spraying. L'errore massimo che si registra rispetto alla traiettoria di *setpoint* è di circa 10 centimetri nel mezzo del filare, ma una possibile causa può essere attribuita ad alcune leggere raffiche di vento che disturbavano l'equilibrio. La figura 3.15 catturata dall'alto mostra, invece, l'M6 durante la missione di sorvolo del filare.

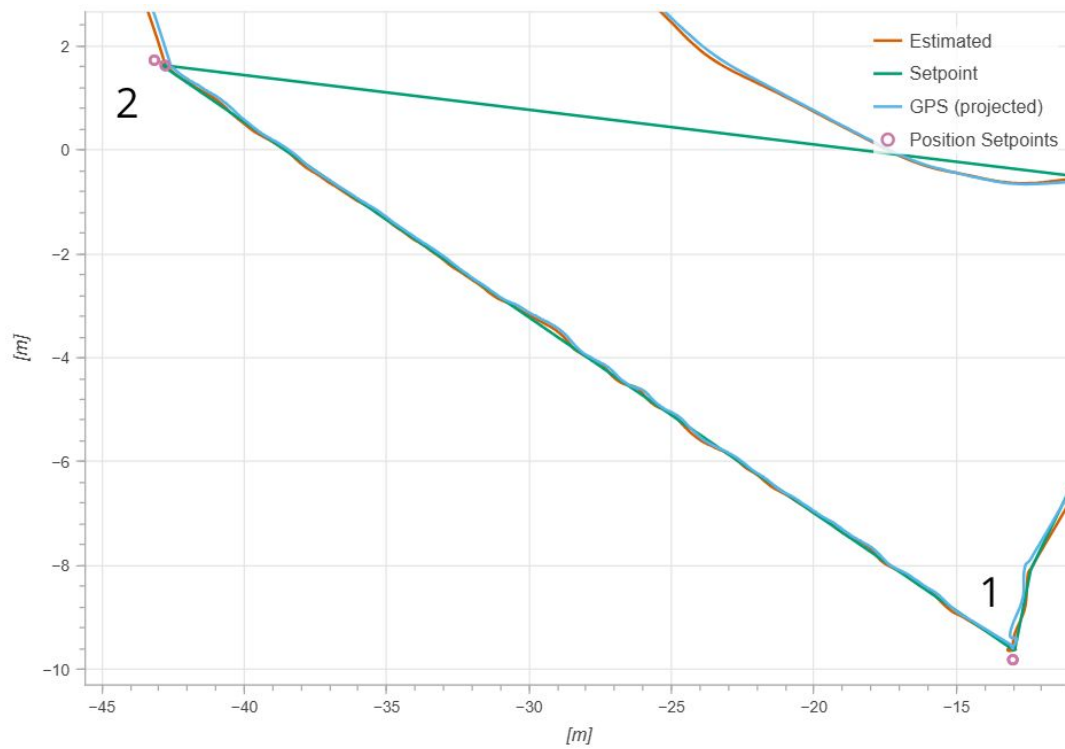


Figura 3.14: Traiettoria eseguita dall'M6



Figura 3.15: M6 in volo sul filare

Capitolo 4

Rilievo in PPK da TerreSparse

Dopo aver introdotto il quadro teorico della metodologia di correzione in PPK nel capitolo 1.3, questa sezione si addentra in un'analisi pratica descrivendo un caso di studio reale. L'obiettivo è dimostrare l'efficacia della tecnica PPK in un contesto operativo concreto caratterizzato da condizioni ambientali in cui non era possibile operare con la tecnica RTK.

Il lavoro descritto è stato svolto presso l'azienda agricola *Terre Sparse*[22], una piccola realtà che dai primi anni 2000 coltiva frutteti e vigneti con grande attenzione e rispetto per i propri territori. Il campo studiato si trova nel comune di Borgo Franco d'Ivrea (TO) e la richiesta era quella di ottenere una mappa di vigore vegetativo dei vigneti, uno strumento fondamentale nell'agricoltura di precisione. Per raggiungere tale scopo, si è scelto di utilizzare il drone RX3 equipaggiato con una camera multispettrale. Questa tecnologia permette di catturare la firma spettrale della vegetazione, misurando la luce riflessa a diverse lunghezze d'onda. Dall'elaborazione di questi dati è possibile calcolare gli indici di vegetazione[1].

La sfida principale del progetto non era l'acquisizione delle immagini aeree, ma piuttosto la loro georeferenziazione. Era necessario conoscere le coordinate esatte di alcuni punti fissi come gli angoli di un gazebo, oppure l'inizio di un filare, in modo che le immagini ottenute dal sorvolo potessero essere poi sovrapposte grazie a questi punti in comune. La soluzione che andrebbe utilizzata per avere un'accuratezza molto elevata sarebbe la tecnica RTK che però richiede una connessione di rete mobile costante, ma essendo una zona rurale questo non era possibile poiché mancava una copertura di rete affidabile. Quindi, in uno scenario del genere la metodologia PPK risulta la soluzione più appropriata. Di seguito verranno descritte le varie fasi dalla pianificazione

4.1 Pianificazione e acquisizione

Per un'acquisizione più accurata ed efficiente, data la morfologia del terreno, sono stati scelti in precedenza alcuni punti all'interno del campo di proprietà dell'azienda agricola osservando una mappa dall'alto, evitando zone vicino a vegetazione molto folta. Sono stati scelti 27 punti nel modo più omogeneo possibile e fissi nel tempo in modo da poter avere ripetibilità qualora si dovessero presentare ulteriori occasioni di sorvolo. Per acquisire i punti è stato usato il ricevitore GNSS Emlid con il palo posto ad un'altezza di 2 metri. Come anticipato, il ricevitore non aveva modo di stabilire una connessione di rete stabile con il sistema NTRIP in modo tale da ricevere le dovute correzioni dalla stazione CORS più vicina, pertanto tutti i punti sono stati acquisiti senza l'ausilio di alcuna tecnologia esterna, dunque in modalità standalone. Data la particolare morfologia della zona con le colline che circondano il campo a forma di ferro di cavallo, l'acquisizione di ciascun punto è durata 30 secondi ciascuno e nonostante ciò l'incertezza media della posizione di ciascun punto si aggirava intorno ai 27 centimetri. Il ricevitore era impostato in modo tale che acquisisse l'informazione di posizione ogni 0.2 secondi, quindi con una frequenza di 5 Hertz. Pertanto, con un tempo di campionamento di 30 secondi per ciascun punto si raccoglievano circa 150 informazioni che venivano poi mediate per ottenere la misura di posizione finale con una certa incertezza. In alcuni punti il ricevitore riscontrava molta difficoltà nell'acquisire informazioni a 5 Hz, perciò, la posizione di alcuni punti è stata determinata con una frequenza minore rispetto ai 5 Hertz nominali. Probabilmente questo era dovuto alla difficoltà del ricevitore nel ricevere il segnale dai satelliti dato che accadeva in punti del campo in cui la vegetazione vicina era molto folta e i rilievi montuosi schermavano parte della volta celeste. Mentre l'operatore acquisisce i vari punti, il ricevitore crea e compila il file RINEX di *navigazione* che sarà poi necessario per la post elaborazione.

4.2 Elaborazione dei risultati

Una volta che tutti i 27 punti sono stati acquisiti tramite il ricevitore Emlid Reach RS2 e la app dedicata Emlid FLOW si ottengono:

- un **file .csv** che contiene al suo interno tutti i punti acquisiti e i relativi dettagli come le coordinate in longitudine e latitudine, diverse misure di quota in funzione dei diversi sistemi di riferimento usati, incertezze della misura, status del punto (se fix, float o single) e tempi di campionamento;
- un **file RINEX di navigazione** all'interno del quale sono contenute alcune informazioni sui satelliti delle diverse costellazioni raccolte con una frequenza di 5 Hertz.

Per ottenere le coordinate corrette dei punti campionati si utilizza il software SPIN3 in cui è necessario caricare sul sito solo il file RINEX di *navigazione* (figura 4.1). Successi-

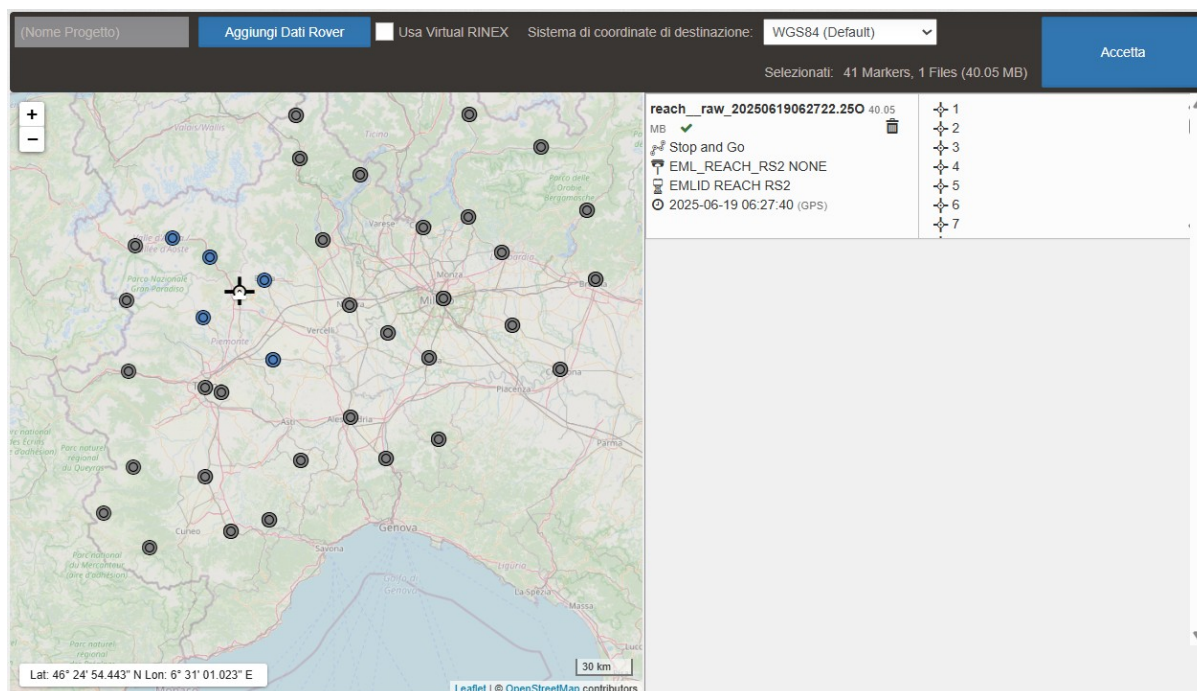


Figura 4.1: Schermata del software SPIN3 con il file RINEX di navigazione da correggere

vamente il software individua le stazioni CORS più vicine alla zona del campionamento e utilizza i file RINEX di *base* delle varie stazioni di riferimento, già in suo possesso, per apportare le correzioni differenziali necessarie ai punti di partenza. Dopo pochi secondi, il risultato della post elaborazione è una tabella con i vari punti sulle righe, e sulle colonne le specifiche come il tipo di soluzione, le coordinate corrette e la deviazione standard delle correzioni appena ottenute.

I tre tipi di soluzione possibili in ordine di precisione decrescente sono:

- **Fase fissato:** è la soluzione di massima precisione, in cui il ricevitore è riuscito a risolvere la cosiddetta ambiguità di fase misurando con esattezza il numero intero di lunghezze d'onda del segnale portante che lo separano dal satellite. L'accuratezza è centimetrica o sub-centimetrica;
- **xRTK:** *extended Real-Time Kinematic*. Combina i segnali di più costellazioni GNSS e utilizza algoritmi avanzati per mantenere una soluzione fissa o per ripristinarla molto rapidamente in caso di perdita del segnale. Potrebbe anche indicare una soluzione che, pur non essendo pienamente "Fase Fissato", ha un'accuratezza molto elevata e verificata, comunque superiore a una soluzione "Float". A differenza della classica tecnica RTK, questa sfrutta correzioni che provengono da più stazioni di riferimento anziché una singola stazione. L'accuratezza è paragonabile alla soluzione precedente, ma ottenuta in condizioni più difficili;
- **Codice:** il posizionamento è calcolato utilizzando solo il "codice" contenuto nel segnale GNSS, ottenendo così un risultato più rapido ma meno preciso. Questo av-

viene quando le condizioni non sono ideali per risolvere l'ambiguità di fase (ad esempio troppi ostacoli, pochi satelliti, disturbi del segnale). L'accuratezza è nell'ordine delle decine di centimetri.

Punto	Tipo Soluzione	Latitudine [°N]	Longitudine [°E]	Quota Ell. [m]	SD Lat [m]	SD Long [m]	SD Quota [m]
1	Fase Fissato	45.5094847	7.8888039	437.8064 m	0.0146 m	0.0055 m	0.0116 m
2	Fase Fissato	45.5095175	7.8887587	437.8499 m	0.0064 m	0.0091 m	0.0204 m
3	Fase Fissato	45.5094544	7.8886664	437.8489 m	0.0080 m	0.0017 m	0.0246 m
4	Fase Fissato	45.5094203	7.8887114	437.7828 m	0.0049 m	0.0042 m	0.0206 m
5	Fase Fissato	45.5097234	7.888635	448.0702 m	0.0044 m	0.0069 m	0.0101 m
6	Fase Fissato	45.509662	7.8885875	448.0162 m	0.0061 m	0.0062 m	0.0226 m
7	Fase Fissato	45.5096266	7.8885653	447.8922 m	0.0052 m	0.0056 m	0.0210 m
8	Fase Fissato	45.5091874	7.8881504	443.3192 m	0.0061 m	0.0024 m	0.0148 m
9	Fase Fissato	45.5090086	7.8875655	450.1023 m	0.0015 m	0.0019 m	0.0087 m
10	Fase Fissato	45.5093659	7.8879144	452.9614 m	0.0050 m	0.0025 m	0.0248 m
11	Fase Fissato	45.5092759	7.888037	450.8005 m	0.0046 m	0.0013 m	0.0307 m
12	Fase Fissato	45.5096391	7.8875141	453.7026 m	0.0044 m	0.0039 m	0.0089 m
13	Fase Fissato	45.5091444	7.8875393	456.3629 m	0.0032 m	0.0056 m	0.0222 m
14	Fase Fissato	45.5090723	7.8872267	453.8771 m	0.0072 m	0.0007 m	0.0047 m
15	Fase Fissato	45.5092771	7.8873606	457.7907 m	0.0014 m	0.0021 m	0.0105 m
16	Fase Fissato	45.509481	7.8873041	456.6700 m	0.0045 m	0.0017 m	0.0118 m
17	Fase Fissato	45.5099267	7.8868008	457.3480 m	0.0080 m	0.0048 m	0.0262 m
18	Fase Fissato	45.5095351	7.8871108	454.9511 m	0.0018 m	0.0014 m	0.0151 m
19	Fase Fissato	45.5095555	7.887089	454.9492 m	0.0002 m	0.0023 m	0.0229 m
20	Fase Fissato	45.5095964	7.8863957	451.0106 m	0.0015 m	0.0013 m	0.0051 m
21	Fase Fissato	45.509505	7.8867376	451.4738 m	0.0003 m	0.0102 m	0.0047 m
22	Fase Fissato	45.5093001	7.8866629	452.9839 m	0.0102 m	0.0021 m	0.0136 m
23	Fase Fissato	45.5094392	7.886312	451.2626 m	0.0006 m	0.0009 m	0.0026 m

Punto	Tipo Soluzione	Latitudine [°N]	Longitudine [°E]	Quota Ell.[m]	SD Lat [m]	SD Long [m]	SD Quota [m]
24	Fase Fissato	45.5097538	7.8864584	450.6079 m	0.0001 m	0.0013 m	0.0001 m
25	Codice	45.5101784	7.8858516	457.0353 m	0.0072 m	0.0439 m	0.0266 m
26	Fase Fissato	45.5099895	7.8859376	449.7635 m	0.0070 m	0.0034 m	0.0052 m
27	Fase Fissato	45.510026	7.8856616	449.3987 m	0.0032 m	0.0042 m	0.0109 m

Tabella 4.1: Correzione dei 27 punti restituita da SPIN3



Figura 4.2: Punti corretti (in verde) e non (in rosso)

La tabella 4.1 è ciò che il software SPIN3 restituisce alla fine della sua elaborazione. Tutti i punti sono stati corretti risolvendo l'ambiguità di fase ad eccezione del punto numero 25 che sin dal momento dell'acquisizione presentava problemi di ricezione del segnale, probabilmente a causa della fitta vegetazione nelle vicinanze. Nonostante la sua deviazione standard sia paragonabile a quella degli altri punti il tipo di soluzione suggerisce che il risultato non sarà molto accurato, pertanto questo punto non verrà tenuto in considerazione per la georeferenziazione delle immagini.

Ricordando la definizione di deviazione standard (SD) anticipata nella sezione 1.1.2, è possibile interpretare i risultati di questo rilievo riportati nella tabella 4.1. Un valore di SD contenuto indica che i dati sono strettamente raggruppati attorno alla media; al contrario, un valore elevato suggerisce una maggiore dispersione.

Nel contesto pratico di questo lavoro, la posizione di ciascun punto è stata determinata mediando circa 150 campionamenti, acquisiti in un tempo di occupazione di 30 secondi. Questi campionamenti formano una "nuvola" di soluzioni preliminari, la cui deviazione standard è una misura diretta della precisione del sistema, indicando quanto le singole determinazioni di posizione siano coerenti tra loro. Tuttavia, poiché il processo di post-elaborazione corregge gli errori sistematici (bias), si assume che tale nuvola di punti non solo sia precisa, ma anche centrata sulla posizione reale. Di conseguenza, in questo contesto la deviazione standard diventa un indicatore affidabile anche dell'accuratezza della coordinata finale.

Infine, le coordinate corrette dei 26 punti (escluso quindi il ventiseiesimo) sono state usate per georeferenziare in modo esatto l'immagine ottenuta dal sorvolo del campo con il drone RX3.

In tabella 4.2 sono indicate le coordinate dei 27 punti acquisiti senza correzioni e quelle dei punti corretti da SPIN3, infine, l'ultima colonna a destra indica l'errore assoluto tra le due misure. Questo permette di percepire il notevole vantaggio di una correzione in PPK, infatti, sarebbe impensabile di lavorare in agricoltura di precisione con dei dati grezzi che differiscono dai dati reali di circa 200 centimetri di media. La morfologia del territorio ha reso il rilievo dei punti difficile sin da subito, ma la tecnica PPK ha permesso di ottenere delle coordinate sufficientemente accurate per poter compiere un lavoro di agricoltura di precisione.

Punto	NON corretti		Corretti		Errore [cm]
	Latitudine [°N]	Longitudine [°E]	Latitudine [°N]	Longitudine [°E]	
1	45.50950513	7.88881414	45.5094847	7.8888039	240.6
2	45.50954385	7.88877443	45.5095175	7.8887587	317.4
3	45.50948292	7.88866748	45.5094544	7.8886664	317.0
4	45.50944778	7.88870685	45.5094203	7.8887114	307.4
5	45.50973653	7.88865145	45.5097234	7.888635	194.2
6	45.50967454	7.88860096	45.509662	7.8885875	174.4
7	45.50963618	7.88857618	45.5096266	7.8885653	136.1
8	45.50920836	7.8881648	45.5091874	7.8881504	258.5
9	45.50901946	7.88758232	45.5090086	7.8875655	178.1
10	45.50938461	7.88792829	45.5093659	7.8879144	234.4
11	45.50929134	7.88805258	45.5092759	7.888037	210.1
12	45.50965216	7.88752847	45.5096391	7.8875141	183.3
13	45.50916492	7.88753768	45.5091444	7.8875393	228.4
14	45.50909404	7.88723809	45.5090723	7.8872267	257.3
15	45.50928798	7.88737156	45.5092771	7.8873606	148.0
16	45.50949011	7.88731278	45.509481	7.8873041	121.7
17	45.50994919	7.88681339	45.5099267	7.8868008	268.5
18	45.5095494	7.88711673	45.5095351	7.8871108	165.5
19	45.50957031	7.88709611	45.5095555	7.887089	173.6
20	45.50961804	7.8863761	45.5095964	7.8863957	284.8
21	45.50951375	7.88675141	45.509505	7.8867376	145.0
22	45.50930777	7.88667439	45.5093001	7.8866629	123.6
23	45.50944984	7.88632067	45.5094392	7.886312	136.2
24	45.50976326	7.8864735	45.5097538	7.8864584	157.7
25	45.51018368	7.88589539	45.5101784	7.8858516	346.0
26	45.50999383	7.88594145	45.5099895	7.8859376	56.7
27	45.51002889	7.88567713	45.510026	7.8856616	125.1

Tabella 4.2: Coordinate dei punti pre e post correzione

Capitolo 5

Normativa UAS

Le operazioni che prevedono l'impiego di aeromobili a pilotaggio remoto sono altamente regolamentate. Dal 31 dicembre 2020 è in vigore il documento Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems (Regolamento di Esecuzione (UE) n. 947/2019) emesso da EASA, l'Agenzia Europea per la Sicurezza Aerea, che delinea le regole da seguire per operare in sicurezza durante qualsiasi operazione in volo. Secondo l'articolo 3 delle Easy Access Rules (EAR) le principali categorie in cui si possono differenziare le operazioni UAS, in base al livello di rischio che comportano, sono di tre tipi: **open**, **specific** e **certified**[5].

- Categoria **open** (rischio basso): le operazioni NON sono soggette ad autorizzazione operativa preventiva. I principali requisiti da soddisfare sono:
 - l'UAV ha una massa massima al decollo inferiore ai 25 kg;
 - il pilota deve garantire che l'aeromobile mantenga una distanza di sicurezza dalle persone e che non sorvoli assembramenti di persone;
 - il pilota mantiene il velivolo in VLOS (*visual line of sight*) in qualsiasi momento;
 - il velivolo deve essere mantenuto entro 120 metri dal punto più vicino alla superficie terrestre, salvo in caso di sorvolo di un ostacolo;
 - durante il volo l'aeromobile non deve trasportare merci pericolose e non lascia cadere alcun tipo di materiale.

Questa categoria può essere suddivisa in altre tre sottocategorie: A1, A2 e A3, le quali si differenziano in base al sorvolo di persone non coinvolte nelle operazioni.

- Categoria **specific** (rischio medio): le operazioni con UAS necessitano un'autorizzazione operativa da parte dell'autorità competente, se anche solo uno dei requisiti elencati nella categoria *open* non è soddisfatto. Alla domanda di autorizzazione

operativa presentata all'autorità competente deve essere allegata una **valutazione dei rischi** effettuata dall'operatore UAS, corredata dalle adeguate misure di attenuazione corrispondenti.

- Categoria **certified** (rischio alto): le operazioni necessitano della certificazione dell'UAS a norma del regolamento delegato (UE) 2019/945, della certificazione dell'operatore e, se necessaria, della licenza del pilota. Le operazioni UAS rientrano in questa categoria se si verifica una delle seguenti condizioni:
 - sorvolo di assembramenti di persone;
 - trasporto di persone;
 - trasporto di merci pericolose che possono comportare un rischio elevato per terzi in caso di incidente.

Le operazioni UAS sono inoltre classificate nella categoria *certified* se l'autorità competente, sulla base della valutazione dei rischi ricevuta, ritiene che il rischio dell'operazione non possa essere adeguatamente attenuato senza la certificazione dell'UAS e dell'operatore UAS.

5.1 Documenti per attività di spraying con il drone M6

A valle di questa prima classificazione delle operazioni UAS si immagini di voler effettuare un test sperimentale di spraying in vigna con il drone M6 prodotto da MavTech. Lo scenario prevede l'impiego di un velivolo con massa massima al decollo di 25 kg, il sorvolo di una vigna, quindi senza assembramenti di persone, in costante VLOS, ad una quota di circa 3 metri rispetto al terreno, con un sistema di spruzzatura che rilascia acqua, essendo una fase sperimentale. Questa attività ricade nella categoria *specific*, poiché l'unico requisito non soddisfatto della categoria *open* è il rilascio di materiale in volo. Per questo motivo è necessario presentare una domanda all'ente competente, ovvero ENAC (Ente Nazionale per l'Aviazione Civile), per ottenere un'autorizzazione operativa.

Si consiglia di inviare la domanda, per un corretto espletamento delle verifiche, 60 giorni prima dalla data prevista per l'operazione e dovrà includere:

- il modulo di *Domanda di autorizzazione operazioni UAS in categoria specifica* (Rif. Regolamento (UE) 2019/947 art. 12) debitamente compilato, secondo le istruzioni Enac;
- una copia del manuale delle operazioni (*Operations Manuals* - OM);
- documenti a supporto della richiesta;
- fattura di pagamento dei diritti Enac.

Predefined risk assessment PDRA S-01

AMC3 to Article 11 to Regulation 2019/947

- VLOS
- below 120m or 150m (also in urban environment)
- with a UAS meeting the technical requirements defined in the PDRA
- Ensure no involved person is present in the controlled ground area

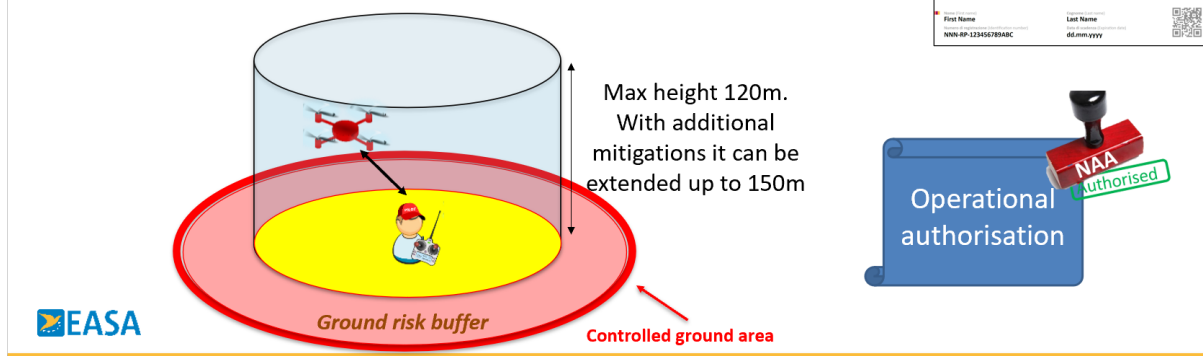


Figura 5.1: Caratteristiche PDRA-S01

Tra i documenti a supporto della richiesta rientra il documento per la valutazione dei rischi di cui EASA propone due metodologie: PDRA e SORA. La prima sta per *Predefined Risk Assessment* e si riferisce ad uno scenario operativo standardizzato in cui l'operatore UAS è guidato alla valutazione del rischio. La seconda, invece, sta per *Specific Operations Risk Assessment* e riguarda tutti quegli scenari operativi non ricoperti dalle varie PDRA. Nel caso specifico della missione pensata per l'M6 in vigna esiste già una valutazione dei rischi precompilata, ovvero la PDRA-S01 definita da EASA per lavori agricoli e operazioni di spostamento pesi a corto raggio[10].

Il manuale delle operazioni (OM), invece, è un documento che deve essere compilato dall'operatore UAS e deve essere allegato alla domanda per l'autorizzazione operativa al volo in categoria *specific*. L'OM descrive nel dettaglio le procedure operative, le misure di sicurezza, la gestione dei rischi e le procedure di emergenza adottate dall'operatore UAS, nonché la descrizione dettagliata del drone. La sua approvazione, da parte dell'autorità competente, avviene solo nel caso in cui sia dimostrato che tutte le potenziali criticità individuate attraverso un'analisi dei rischi SORA o PDRA sono adeguatamente mitigate e mantenute sotto controllo.

Conclusioni

I risultati presentati in questo studio offrono una chiara comprensione delle capacità del ricevitore GNSS mosaic-H in contesti operativi per l'agricoltura di precisione dimostrando come l'accuratezza posizionale dei velivoli sia diventata un fattore critico data la crescente domanda di pratiche agricole più sostenibili ed efficienti. Il flusso di lavoro seguito nel preparare i vari test ha permesso di comprendere a pieno le capacità del ricevitore, e alla fine di questo studio è possibile affermare che il mosaic-H ha dimostrato una grande affidabilità e accuratezza nel determinare la posizione del velivolo in RTK. Questa metodologia si è dimostrata indispensabile per soddisfare l'obiettivo di raggiungere un'accuratezza centimetrica tale da poter impiegare il ricevitore GNSS in agricoltura di precisione. Tuttavia, anche la tecnica PPK ha dimostrato un successo notevole permettendo così di operare in scenari in cui la tecnica RTK non fosse applicabile. Entrambe le metodologie, pur riferendosi a scenari applicativi differenti, come è stato approfondito nel corso della tesi, contribuiscono allo sviluppo del settore agricolo permettendo ad aziende e agricoltori di operare in modo selettivo sulle colture con un occhio alla sostenibilità e alla produttività.

Il lavoro svolto, sebbene abbia raggiunto gli obiettivi prefissati, ha aperto numerose prospettive per futuri sviluppi e approfondimenti, suggerendo direzioni per ottimizzare le metodologie finora affrontate. Un tema affrontato, ma non portato a termine, è stato quello di permettere al ricevitore GNSS mosaic-H montato a bordo del velivolo di ricevere i messaggi RTCM direttamente dal protocollo NTRIP, e non via radio dalla base RTK posizionata a terra. Questo implica che, il ricevitore a bordo per poter essere un *client* del protocollo NTRIP, debba poter accedere ad una connessione di rete tramite SIM o con un modulo WiFi collegandosi ad una rete locale. Questa configurazione elimina la base RTK posizionata a terra e quindi semplifica l'utilizzo dell'intero sistema da parte dell'operatore.

In riferimento allo specifico ambiente vitivinicolo, uno sviluppo molto interessante potrebbe essere l'integrazione a bordo di un sensore optical flow che permetta un tracking del filare ancora più efficace. Infatti, all'informazione del ricevitore GNSS per il mantenimento della traiettoria si aggiungerebbe quella visiva data dal sensore garantendo un'affidabilità più elevata soprattutto per missioni come lo spraying in vigna.

In definitiva, questo studio dimostra come i droni, supportati da tecnologie per il posizionamento all'avanguardia, siano protagonisti attivi dello sviluppo del settore dell'agricoltura di precisione con una visione proiettata verso una gestione intelligente e sostenibile delle risorse.

Bibliografia

- [1] Aerial CLick. *Droni e Agricoltura di Precisione: come il Multispettrale Rivoluziona il Settore Agricolo*. URL: <https://www.aerialclick.com/blog/905-droni-e-agricoltura-di-precisione-come-il-multispettrale-rivoluziona-il-settore-agricolo>.
- [2] DJI. *Istruzioni relative all'elaborazione PPK per i droni DJI Enterprise*. URL: <https://enterprise-insights.dji.com/it/blog/ppk-post-processed-kinematics-workflow#>.
- [3] DJI. *Qual è la differenza tra droni, UAS, UAV e SAPR?* URL: <https://www.dji-store.it/qual-e-la-differenza-tra-droni-uas-uav-e-sapr/>.
- [4] DroneDeploy. *RTK vs PPK: Choosing the right GPS correction method for drone mapping*. URL: <https://www.dronedeploy.com/blog/what-is-the-difference-between-rtk-ppk-and-gcp-and-why-does-it-matter>.
- [5] "Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems (Regolamento di Esecuzione (UE) 2019/947)". In: ().
- [6] eliteCONSULTING. *Flusso di lavoro PPK completo per i droni aziendali DJI*. URL: <https://www.eliteconsulting.it/flusso-di-lavoro-ppk-completo-per-i-droni-aziendali-dji/>.
- [7] Emlid. *Glossary*. URL: <https://docs.emlid.com/reachrs2/glossary/#solution-status-fix-float-single>.
- [8] Emlid. *How PPK works*. URL: <https://docs.emlid.com/reachrs3/ppk-quickstart/ppk-introduction/>.
- [9] Emlid. *REACH RS2+*. URL: <https://emlid.com/reachrs2plus/>.
- [10] ENAC. *Autorizzazione operativa*. URL: <https://www.enac.gov.it/sicurezza-aerea/droni/categoria-specifica-specific-category/autorizzazione-operativa/>.
- [11] Holybro. *H-RTK Mosaic-H*. URL: https://holybro.com/products/h-rtk-mosaic?srsltid=AfmBOoqq78C-fip1BhCQlFeKlSsKrIo4As7xxUAbbhr4RscHYwP_5BWc.
- [12] Holybro. *Setup & Getting Started (PX4)*. URL: <https://docs.holybro.com/gps-and-rtk-system/h-rtk-mosaic-h/setup-and-getting-started-px4>.
- [13] ITS Agro. *Droni, IA e robot: il futuro dell'agricoltura 4.0 è già qui*. URL: <https://www.itsagro.it/droni-ia-e-robot-il-futuro-dellagricoltura-4-0-e-gia-qui>.

- [14] Richard B. Langley. “Dilution of Precision”. In: *GPS World* (1999).
- [15] Gerbi Mattia. “Posizionamento di precisione con sensori GNSS low-cost in aree montane ad alta quota”. Tesi di dott. City, Country: Politecnico di Torino, 2021. URL: <https://webthesis.biblio.polito.it/secure/20643/1/tesi.pdf>.
- [16] Pedago. *Sistema GNSS e Rilievi Topografici in RTK e PP: quali sono le differenze?* URL: <https://www.pedago.it/blog/gnss-rtk-pp-come-funziona>.
- [17] SA Quality for Metrology. *Precisione e accuratezza in metrologia: differenze e definizioni*. URL: <https://stefaniaaccorsi.it/blog/precisione-e-accuratezza-cosa-sono/>.
- [18] Siyi. *SIYI F9P RTK*. URL: <https://shop.siyi.biz/products/siyi-f9p-rtk?VariantsId=10790>.
- [19] SPIN3. *Stazioni Permanenti*. URL: <https://www.spingnss.it/stazioni/>.
- [20] SPIN3 GNSS. *Il sistema di posizionamento GPS*. URL: https://www.servizi.spingnss.it/spiderweb/ext/guide/Il_sistema_di_posizionamento_GPS.pdf.
- [21] Strumenti Topografici. *NTRIP Caster: cosa sono e come utilizzare quelli gratuiti*. URL: <https://www.strumentitopografici.it/2021/02/05/ntrip-caster-cosa-sono-e-come-utilizzare-quelli-gratuiti/>.
- [22] Terre Sparse. *Cantina Terre Sparse*. URL: <https://www.aziendaterrespase.it/>.