

INTERREG ALCOTRA 2014-2020 Progetto “PITER Alpimed – INNOV”

Relazione attività WP 4.1.3 (risparmio idrico in agricoltura)



COMMITTENTE:



**Camera di Commercio, Industria, Artigianato e
Agricoltura (CCIAA) di Cuneo**
Via Emanuele Filiberto 3
12100 Cuneo

REDAZIONE:



Politecnico di Torino – DIATI
Corso Duca degli Abruzzi 24
10129 Torino

Prof. Alessandro Casasso
Prof. Andrea Lingua
Ing. Irene Aicardi
Ing. Nives Grasso

Sommario

Premessa.....	3
1 L'invaso irriguo di Rivoira.....	4
1.1 Installazione di una centralina di misura e trasmissione dei dati di portata	7
1.2 Analisi dei dati di portata nella stagione irrigua 2021	13
1.3 Analisi dei dati di portata nella stagione irrigua 2022	17
1.4 Considerazioni sull'influenza del clima	20
2 Sviluppo di tecniche di misurazione dell'umidità del terreno con immagini da drone	22
Bibliografia	34

Premessa

La presente relazione descrive sinteticamente le attività di ricerca svolte all'interno del progetto PITER Alpimed – INNOV dal Politecnico di Torino – DIATI, in qualità di soggetto attuatore del lead partner Camera di Commercio, Industria, Artigianato e Agricoltura (CCIAA) di Cuneo.

Le attività svolte si inquadrano all'interno dei WP 4.1.2 (risparmio energetico nelle stazioni sciistiche) e WP 4.1.3 (risparmio idrico in agricoltura), guidati dal prof. Alessandro Casasso e dall'ing. Irene Aicardi (a cui è in seguito subentrato il prof. Andrea Lingua).

La redazione del presente documento, che riguarda il WP 4.1.3, è a cura del prof. Alessandro Casasso e dell'ing. Nives Grasso. Alle attività svolte hanno collaborato anche l'ing. Vincenzo di Pietra (ricercatore) e l'ing. Costanza Gamberini (assegnista di ricerca negli anni 2019-2020).

La relazione che segue è composta da 2 capitoli relativi alle due attività principali del Politecnico di Torino – DIATI nel WP 4.1.3:

- La realizzazione di un sistema elettronico accessibile in remoto per la misura delle portate idriche in ingresso e in uscita all'invaso, finalizzato a fornire al Consorzio uno strumento utile all'ottimizzazione della gestione dell'invaso stesso, e la valutazione dei dati di monitoraggio delle stagioni irrigue 2021 e 2022 (Cap. 1);
- I primi risultati dello sviluppo di una tecnica di misurazione dell'umidità del terreno utilizzando immagini da drone, che può essere utile per caratterizzare la distribuzione irregolare dell'umidità in un campo pur in presenza di un adacquamento uniforme (Cap. 2).

1 L'invaso irriguo di Rivoira

L'invaso oggetto dello studio condotto nel WP 4.1.3 si trova nel comune di Boves (CN), in località Tetto Meniot, vicino alla frazione Rivoira. L'invaso, del volume di 42mila mc e della superficie di circa 1 ha, è stato realizzato nel 2016-2017 per accumulare l'acqua proveniente Bedale Rivoira Soprana, che deriva dal Torrente Colla in sponda destra (Fig. 12) a una quota di 670 m s.l.m., al fine di fornire un'irrigazione di soccorso durante i periodi di siccità estiva. Il Torrente Colla è interessato da altre due derivazioni, il Bedale Rivoira Sottana, sempre in sponda destra, e il Bedale Villa in sponda sinistra: queste due derivazioni avvengono dalla stessa traversa, posta a quota 645 m s.l.m. Nella zona era già presente un altro piccolo vaso in località Tetto Meniot (11mila mc), del tutto insufficiente per i fabbisogni dell'area, tant'è che numerose aziende agricole si erano attrezzate con pozzi irrigui. In Fig. 13 sono rappresentati i bacini irrigui serviti dai tre canali sopra descritti.

L'invaso serve una rete in pressione (Fig. 14 e Fig. 15) dalla quale si dipartono le bocchette irrigue (Fig. 16) alle quali è possibile connettere diversi tipi di sistema irriguo (aspersione, ala gocciolante ecc.) con attacchi di tipo Camlock.

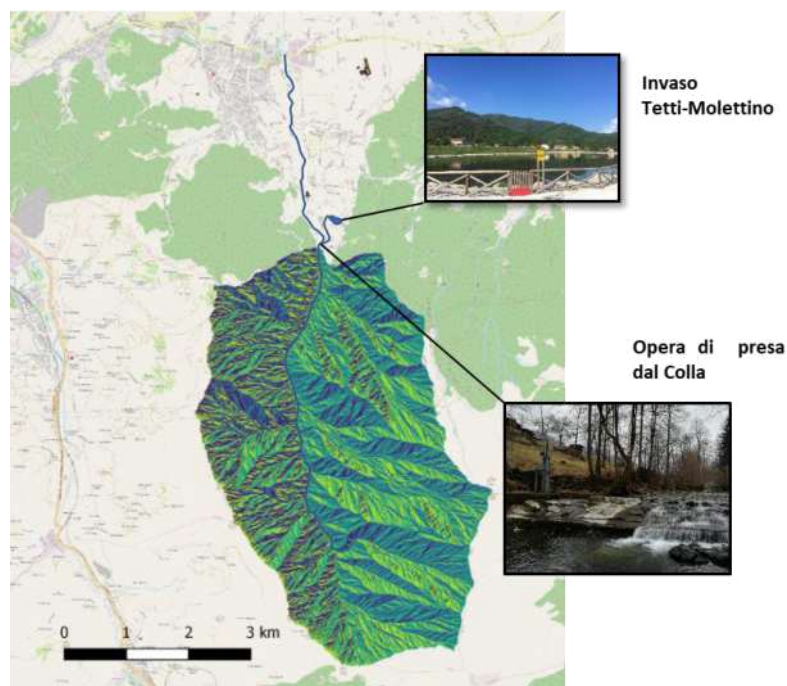


Fig. 1. Bacino del torrente Colla chiuso alla sezione della presa del Bedale Rivoira Soprana.

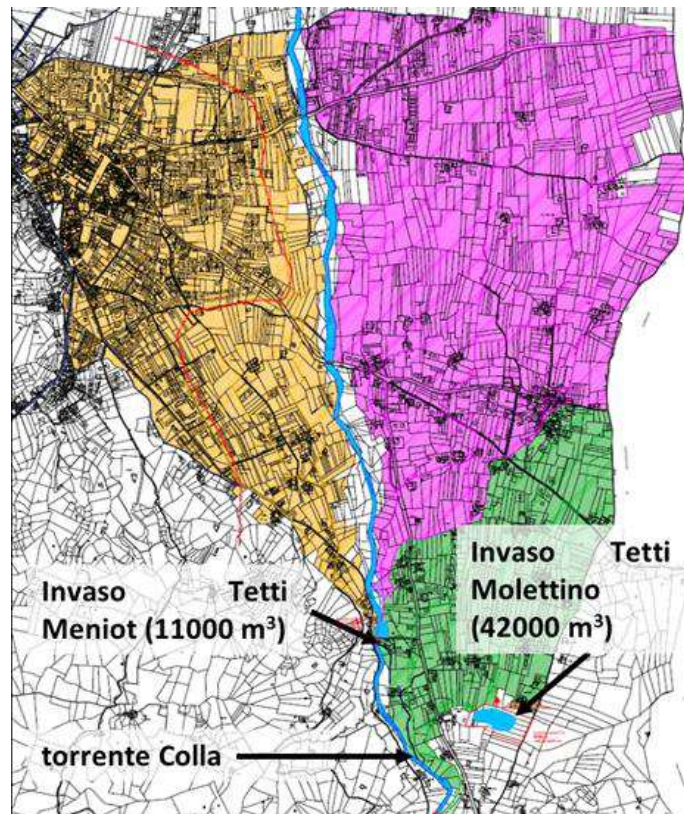


Fig. 2. Bacini irrigui dei canali Bedale Rivoira Soprana (verde) e Sottana (ciclamine) in sponda destra e del Bedale Villa (giallo) in sponda sinistra. Elaborazione da relazione del progetto esecutivo, studio ing. Ferrari.



Fig. 3. Planimetria del primo tratto di condotta principale (punti A-E). Fonte: progetto esecutivo, studio ing. Ferrari.

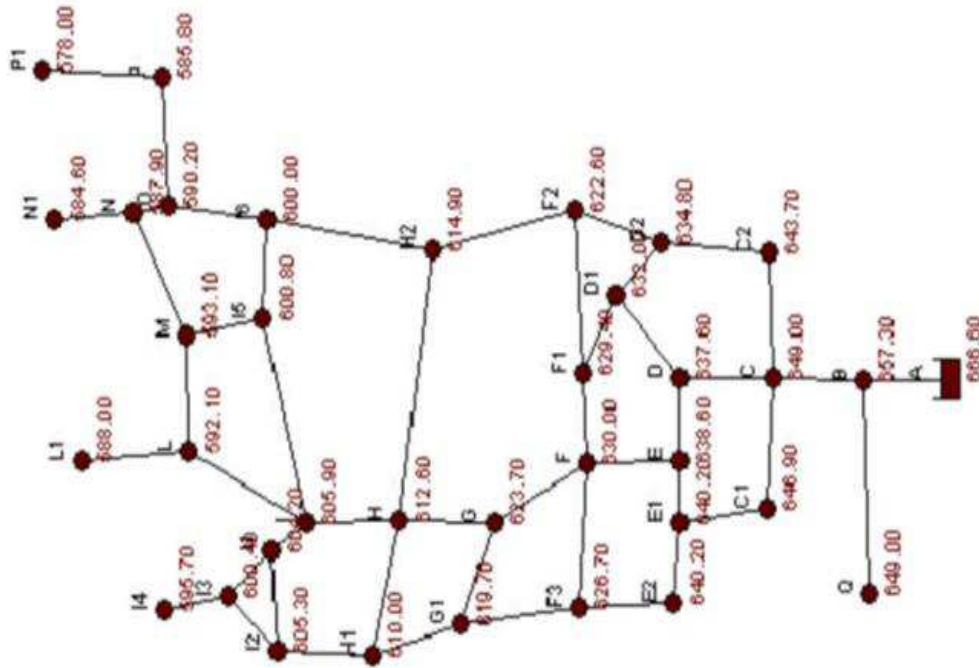


Fig. 4. Posizione dei nodi della rete (punti A-P = condotta principale; punti numerati = secondari). Fonte: progetto esecutivo, studio ing. Ferrari.



Fig. 5. Bocchetta irrigua con attacco Camlock (a sx) e particolare di un contatore volumetrico (a dx).

1.1 Installazione di una centralina di misura e trasmissione dei dati di portata

Presso l'invaso di Rivoira è stato installato un sistema di monitoraggio e registrazione delle portate in ingresso e uscita del lago e in mandata alla rete irrigua in pressione.

La portata viene misurata in 5 punti (Fig. 6):

1. Bedale Rivoira Soprana, immediatamente a monte della presa del lago
2. Bedale Rivoira Soprana, immediatamente a valle della presa dell'invaso
3. Scarico di troppo pieno del lago
4. Tubazione di mandata di monte (DN 110)
5. Tubazione di mandata di valle (DN 273)



Fig. 6. Planimetria dell'invaso di Rivoira con il canale Bedale Rivoira Soprana dal quale deriva l'invaso, lo scarico di troppo pieno e l'edificio di mandata della rete irrigua.

Nei punti 1, 2 e 3 sono stati installati dei misuratori di livello a ultrasuoni dai quali, tramite una equazione detta scala di deflusso, si ricava la portata [1]. In Fig. 7 sono rappresentati i misuratori di livello, mentre in Fig. 8 sono rappresentate le operazioni di taratura della scala di deflusso e il grafico della curva risultante. Le fotografie in Fig. 9 e Fig. 10 rappresentano, rispettivamente la preparazione dei risalti idraulici installati nei punti 1 e 2 e la cablatura dei misuratori di livello per il collegamento con la centralina di acquisizione dati, posizionata nella casetta che ospita le tubazioni di mandata della rete irrigua in pressione.



Fig. 7. Misuratori di livello a ultrasuoni installato nel Bedale Rivoira Soprana a monte (a sx) e a valle (al centro) della presa dell'invaso, e nei pressi dello scarico di troppo pieno del lago (a dx).

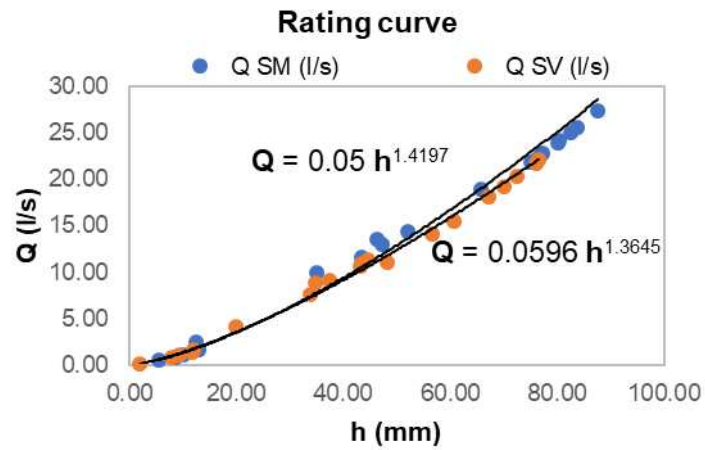
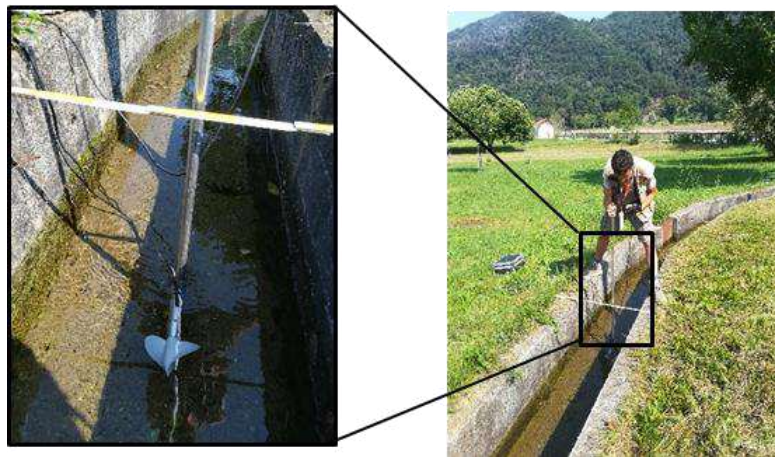


Fig. 8. Misurazioni di portata effettuate per la taratura della scala di deflusso del Bedale Rivoira Soprana e, in basso, grafico risultante per i misuratori a monte (SM) e a valle (SV) della presa del lago.



Fig. 9. Preparazione dei risalti idraulici per la misurazione delle portate nel Bedale Rivoira Soprana.



Fig. 10. Cablatura dei misuratori di livello nel punto 2.

Per i punti 4 e 5 sono invece stati installati dei misuratori di portata a ultrasuoni (Fig. 11), che si basano sulla misurazione del tempo di percorrenza del suono all'interno del tubo pieno d'acqua: dalla differenza fra i tempi misurati nel verso della corrente (t_1 in Fig. 12) e in controcorrente (t_2 in Fig. 12) si ricava la velocità del flusso dell'acqua nel tubo e, quindi, la portata.



Fig. 11. Misuratori di portata a ultrasuoni utilizzati per la misura sulle condotte in pressione.

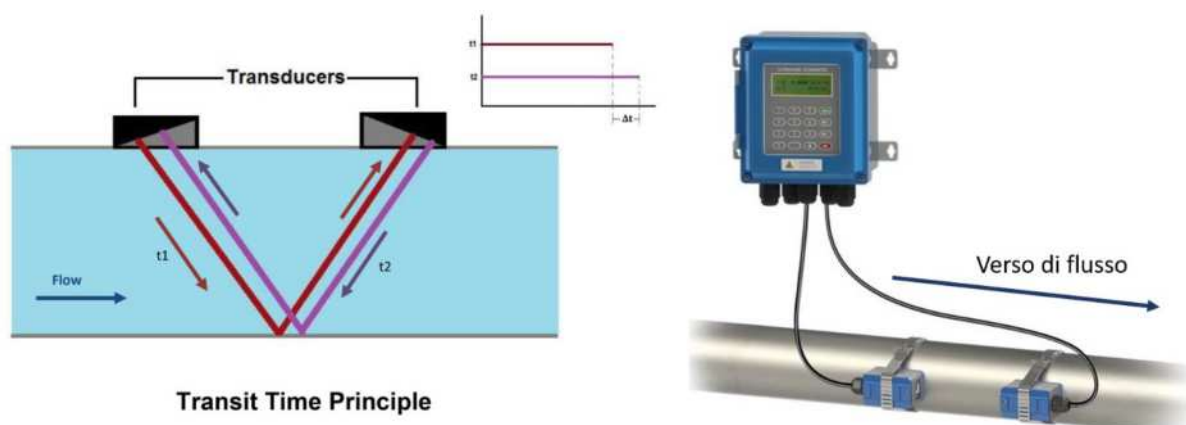


Fig. 12. Installazione di un misuratore di portata a ultrasuoni in un pozzetto di alimentazione per i cannoni da neve.

I misuratori di livello e di portata sono collegati a un sistema di memorizzazione e trasmissione su pagina web dei dati, installato nel mese di luglio 2020 (Fig. 13) e composto da:

- Modem GPRS
- Calcolatore Modbus
- Controller Ethernet
- Switch Ethernet
- 5 datalogger di segnale 4-20 mA utilizzati per la memorizzazione dei dati.



Fig. 13. Sulla sx: installazione del sistema di registrazione e trasmissione dati; sulla dx: scatola elettrica contenente il sistema composto da calcolatore Modbus, controller ethernet, modem GRPS e switch ethernet.

È inoltre stata installata una centralina meteorologica con registrazione dei dati di temperatura, pressione atmosferica, umidità relativa, altezza di precipitazione, velocità e direzione del vento a 2 m da piano campagna (Fig. 14).



Fig. 14. Centralina meteorologica installata presso l'invaso di Rivoira.

Il sistema di trasmissione dati installato a luglio 2020 ha avuto numerosi problemi di trasmissione dati dovuti alla scarsa ricezione del segnale mobile nell'area, per risolvere i quali si è ricorso ad un cambio di operatore. Nel mese di maggio 2021, quando si è trattato di procedere alla sostituzione della SIM card, è stato riscontrato un guasto a tutto il sistema di trasmissione che è stato causato, con ogni probabilità, da una sovracorrente in occasione di un temporale. Ne ha risentito ovviamente il monitoraggio nel corso della stagione irrigua 2021 ma soprattutto si è resa necessaria la sostituzione di tutto il sistema di trasmissione dati, operazione che è avvenuta nel mese di settembre 2021 (Fig. 15).



Fig. 15. Installazione del nuovo sistema di trasmissione dati nel mese di settembre 2021.

1.2 Analisi dei dati di portata nella stagione irrigua 2021

La misura di livello e di portata nella stagione irrigua 2021 è stata condizionata dal guasto occorso all'apparecchiatura di trasmissione dati, avvenuto in data ignota ma riscontrato in data 13/05/2021. In data 19/05/2021 sono state ripristinate le misurazioni di livello nei canali e di portata nelle condotte e di conseguenza i dati disponibili per la stagione irrigua 2021 sono:

- Livelli-portate canale a monte dell'invaso: dal 19/5 al 29/7. Mancano i dati dal 29/7 al 29/9 a causa di un problema nel settaggio dello strumento di acquisizione delle misure (datalogger);
- Livelli-portate canale a valle dell'invaso: dal 19/5 al 29/9;
- Livelli-portate sfioratore di troppo pieno: dal 19/5 al 29/9;
- Portate condotta piccola (DN110) a monte: dal 19/5 al 29/7 sono state acquisite, ma hanno un'affidabilità dubbia; è migliorata l'acquisizione dal 29/7 al 29/9 grazie alla sostituzione del sensore;
- Portate condotta grande (DN273) a valle: dal 29/7 al 29/9.

In Fig. 16 sono riportati gli andamenti giornalieri e medi settimanali della portata nelle due condotte. Il volume totale transitato in questi due mesi è di 33681 m³ nella condotta grande di valle e di 4296 m³ nella condotta piccola di monte, pari a una media totale di 7.1 L/s (612.5 m³/d) per le due tubazioni. Il valore massimo di portata nella condotta grande è stato di 1784 m³/d nel giorno 15/09/2021.

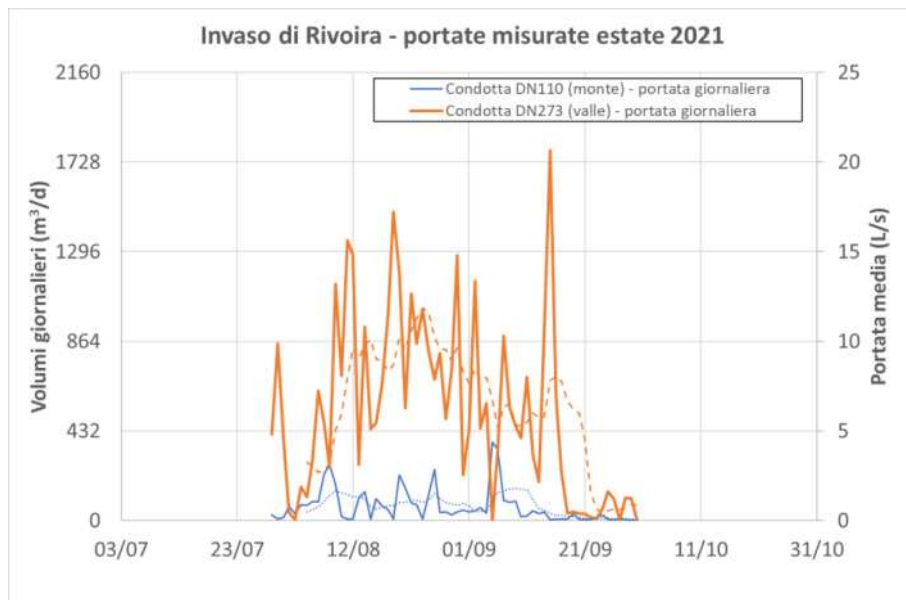


Fig. 16. Portate medie giornaliere nel periodo 29/7 - 29/9/2021 dalle due condotte della rete in pressione.

Confrontando le portate in ingresso e uscita dall'invaso (Fig. 17), si osserva che fino al 25/06 l'invaso ha ricevuto una portata consistente (circa 2500 m³/d pari a circa 29 L/s), con l'eccezione di pochi giorni (31/5 e 8/6) in cui la portata in ingresso e in uscita era nulla. Osservando l'andamento del livello dello

sfioratore di troppo pieno (Fig. 19) nello stesso periodo, si nota che l'invaso ha avuto una fuoriuscita praticamente costante di acqua dallo sfioratore.

Dal 25/6 al 7/7, inoltre, l'invaso non ha ricevuto un apporto idrico netto: come riportato in Fig. 17, le portate del canale a monte e a valle dell'invaso sono rimaste praticamente uguali. Per questo motivo, il lago ha continuato a scendere di livello, come si può osservare in Fig. 19: la discesa totale di livello dal 25/6 al 7/7 è stata di 1.14 m; considerata la superficie del lago, a tale variazione di livello corrisponde un volume di 12500 m³ circa. In questo periodo, per il quale non erano disponibili misure di portata nelle condotte, la portata media è stata quindi di circa 960 m³/d (11 L/s).

È probabile che in quel periodo sia stata utilizzata l'acqua irrigua sia dalle bealere sia dalla rete in pressione, il che spiegherebbe perché il lago non sia stato riempito nonostante vi fosse una portata in alimentazione, anche cospicua (tra 1000 e 3000 m³/d).

La mancanza dei dati dal 29/7 al 29/9 non consente purtroppo di proseguire questa analisi.

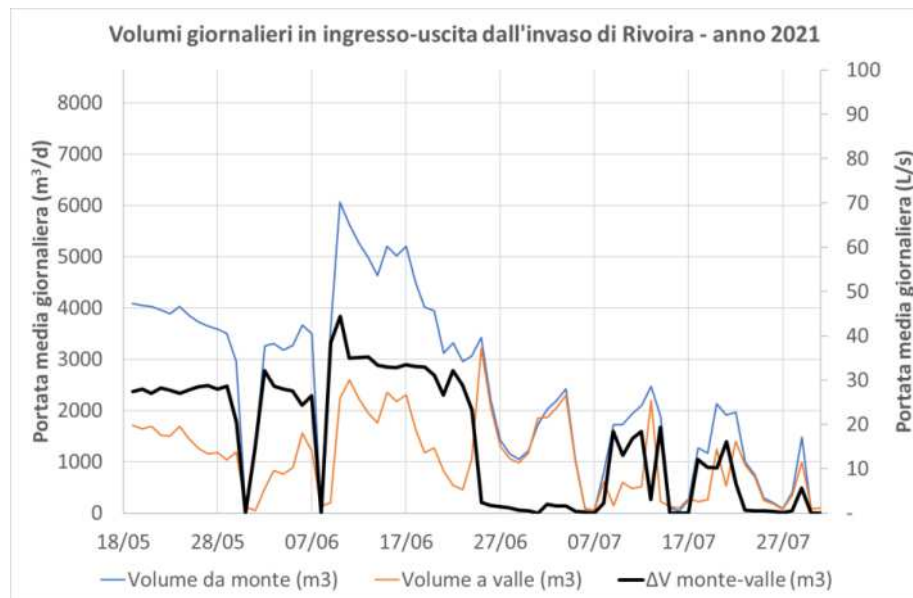


Fig. 17. Portate medie giornaliere nel periodo 19/5 – 29/7/2021 nel canale che alimenta l'invaso, a monte (blu) e a valle (arancione) della presa del lago. In nero è riportata la differenza, che rappresenta la portata netta alimentante il lago.

Nel periodo 29/7 – 29/9 sono comunque disponibili i dati della portata nel canale, a valle della presa del lago. Questa portata resta nulla o su valori piuttosto bassi (inferiori a 10 L/s) per buona parte del periodo monitorato. Dal 30/7 al 29/9, il volume totale che risulta fluire a valle della presa del lago è di circa 18800 m³.

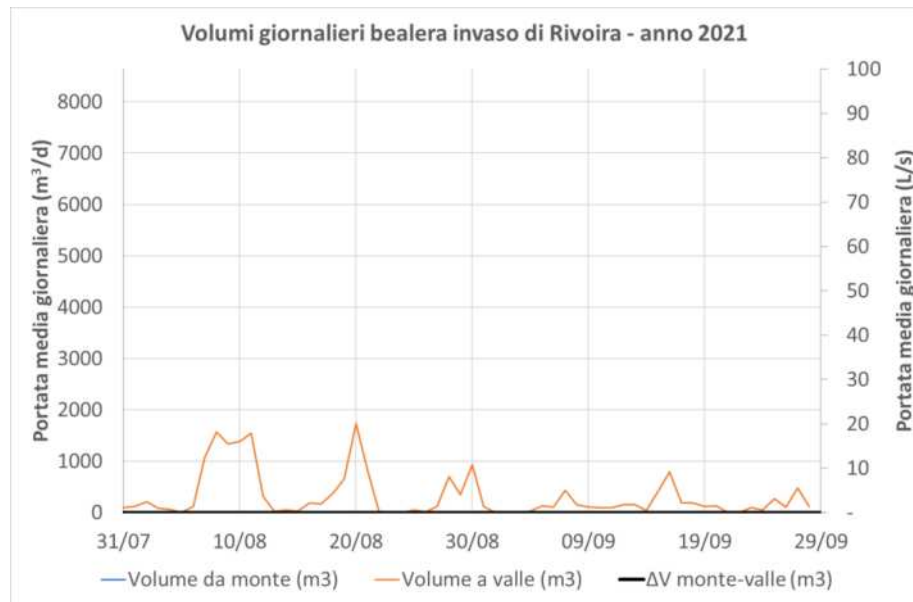


Fig. 18. Portate medie giornaliere nel periodo 29/7 – 29/9/2021 nel canale che alimenta l'invaso a valle del lago di Rivoira.

La misura di livello dallo scarico di troppo pieno ha un limite inferiore pari a circa 1.5 m di distanza dal misuratore: a questo valore corrisponde il telo impermeabile di fondo del lago. La postazione di installazione non permette quindi di monitorare il livello del lago una volta che questo scenda al di sotto di circa 1.1 m dalla soglia di sfioro e, d'altronde, la motivazione di questo sensore di livello è appunto la valutazione delle portate sfiorate e non quella del volume invasato, che richiederebbe un altro tipo di sensore.

Come si osserva dai grafici in Fig. 19 e Fig. 20 (dettaglio 11-27/09/2021), all'inizio del periodo di misurazione (19/5-25/6) il livello del lago è quasi costantemente superiore alla soglia di sfioro. Le uniche due eccezioni si osservano nei giorni 31/5-2/6 e nei giorni 9-10/6, ovvero in corrispondenza della mancata alimentazione da monte. In quei giorni si sono verificate intense precipitazioni e quindi si presume che l'alimentazione dell'invaso (comunque già pieno) sia stata sospesa precauzionalmente per evitare il suo interrimento.

Dopo il 7/7 si osserva che il livello del lago sale e scende con ciclicità giornaliera. La variazione di livello registrata è molto significativa, pari ad almeno 80 cm (ma, considerato il limite di misura della distanza a 1.5 m, l'abbassamento potrebbe essere ben maggiore). Considerata la superficie del lago (10952 m² sulla sommità), a questo abbassamento corrisponde una riduzione di quasi 9mila m³ del volume. Si tratta di una variazione non realistica e quindi si può ipotizzare che vi siano dei malfunzionamenti del sensore a ultrasuoni.

Il sensore di livello per lo sfioratore di troppo pieno si conferma quindi non utilizzabile per caratterizzare l'andamento del livello nel lago (e, peraltro, non era stato installato con questa motivazione): due possibili rimedi sono l'estensione del braccio sul quale installare il misuratore di

livello dello sfioratore e l'installazione di un datalogger di pressione dell'acqua sul fondo del lago o comunque ad una profondità superiore a quella del suo livello minimo atteso.

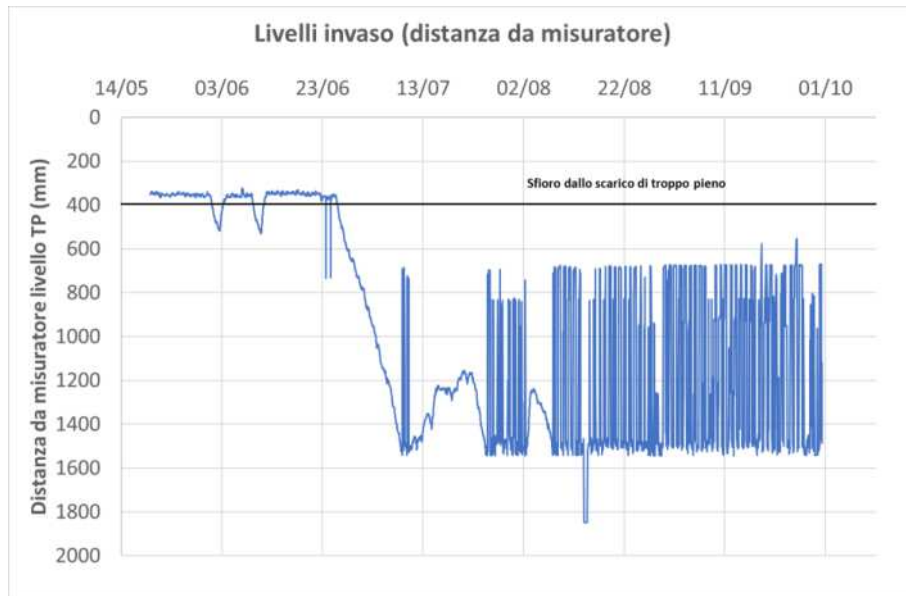


Fig. 19. Livelli dell'invaso (distanza dal misuratore di livello) nel periodo 19/5 – 29/9/2021.

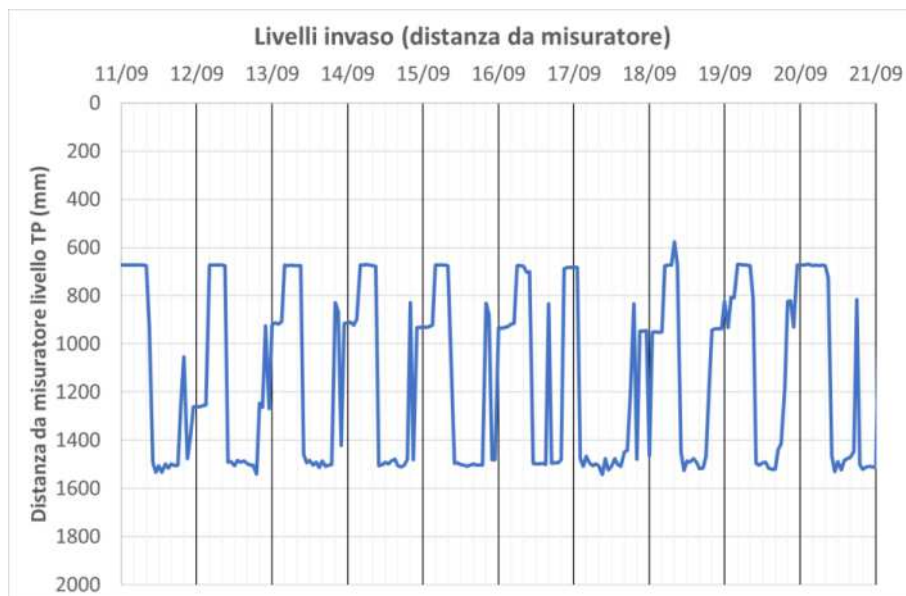


Fig. 20. Livelli dell'invaso (distanza dal misuratore di livello): dettaglio 11-21/9/2021.

La stagione irrigua 2021 doveva essere la prima stagione con il sistema di misurazione di livelli e portate completo. Purtroppo i guasti occorsi alla strumentazione e i tempi di ripristino necessari hanno inficiato la disponibilità dei dati, che tuttavia permettono di trarre alcune indicazioni:

- L'invaso viene attualmente utilizzato con una portata di circa 600 – 1000 m³/d e una portata massima misurata di 1784 m³/d (20 L/s). Si tratta, beninteso, di portate medie giornaliere,

calcolate cioè come se tale portata transitasse per 24 ore al giorno. I valori massimi, misurati con cadenza di 10 minuti, sono di 40 L/s.

- La rete di monitoraggio dei livelli e delle portate potrebbe essere ben integrata da un trasduttore di misura del livello nel lago, installato sul fondo o in prossimità di esso, per valutare l'andamento del volume invasato.
- Compatibilmente con gli utilizzi della bealera di alimentazione dell'invaso, è necessario dare priorità al riempimento dell'invaso in particolare nel mese di luglio, quando è ancora possibile intercettare una portata rilevante e portare il lago a riempimento.
- Con la portata massima misurata in questa stagione irrigua (1784 m³/d), l'invaso avrebbe un'autonomia di circa 23 giorni considerando il volume di progetto di 42mila m³.

1.3 Analisi dei dati di portata nella stagione irrigua 2022

La misura delle portate e dei livelli nella stagione irrigua 2022 è avvenuta in modo sostanzialmente regolare, pur con qualche problema di alimentazione elettrica che ha continuato a persistere.

Come riportato in Tab. 1, il volume totale nel periodo maggio-ottobre 2022 convogliato dalle due condotte è di 57989 m³, quasi tutti transitati nella condotta di valle da 273 mm (53514 m³), mentre la condotta di monte da 110 mm ha avuto un utilizzo molto inferiore (4474 m³).

Tab. 1. Volumi mensili transitati nella condotta di monte e di valle nel periodo maggio-ottobre 2022.

Mese	Condotta monte (m ³)	Condotta valle (m ³)	Totale condotte (m ³)
Maggio	29	739	769
Giugno	1135	12757	13892
Luglio	1577	18429	20007
Agosto	1024	14844	15868
Settembre	699	5857	6556
Ottobre	9	888	897
Totale stagione (m³)	4474	53514	57989

L'andamento dei volumi giornalieri transitati nelle due condotte è rappresentato in Fig. 21. Si osserva che, per la condotta di valle, la portata massima transitata è stata di 1439 m³/d il giorno 10/07/2022: tale dato è paragonabile a quello misurato nella stagione precedente.

Poiché per la stagione irrigua 2021 sono disponibili solo i dati dal 29/7 al 29/9, si riportano per confronto i quantitativi transitati nelle due condotte nello stesso periodo del 2022:

- Condotta di monte (DN 110): 1763 m³, ovvero 59% in meno rispetto al 2021 (4296 m³).
- Condotta di valle (DN 273): 21036 m³, ovvero 37.5% in meno rispetto al 2021 (33681 m³).



Fig. 21. Portate medie giornaliere nel periodo 19/5-16/10/2022 dalle due condotte della rete in pressione.

A differenza della stagione precedente, le portate in alimentazione e in uscita dall'invaso riportate in Fig. 22 evidenziano una alimentazione del lago avvenuta, seppure in modo intermittente, durante tutta la stagione irrigua.

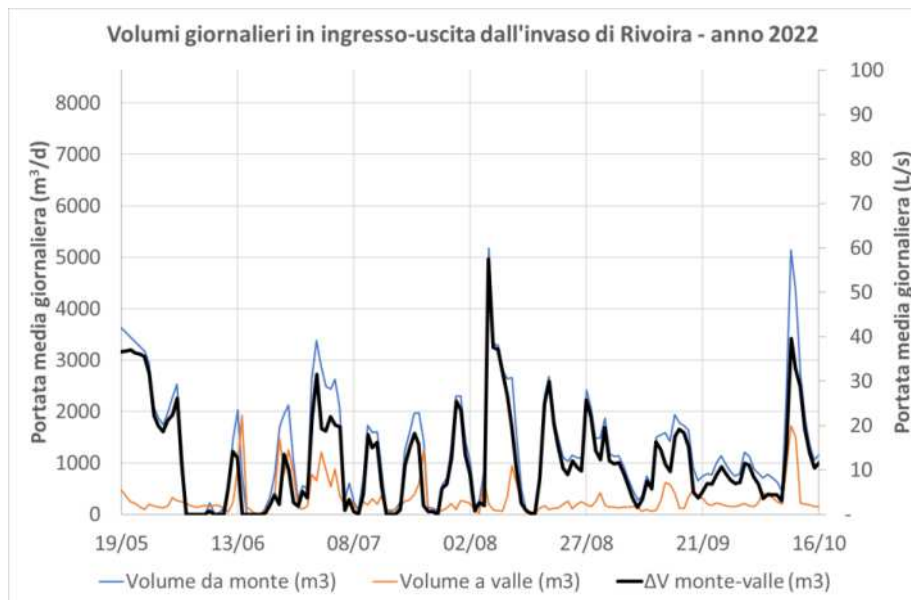


Fig. 22. Portate medie giornaliere nel periodo 19/5 – 16/10/2022 nel canale che alimenta l'invaso, a monte (blu) e a valle (arancione) della presa del lago. In nero è riportata la differenza, che rappresenta la portata netta alimentante il lago.

Questa alimentazione ha permesso di mantenere il livello dell'invaso, per buona parte della stagione, entro 1 m di distanza dalla soglia di sfioro e, quindi, con un volume residuo di circa 30mila m³, come evidenziato dal grafico in Fig. 23. Ciò che permesso quindi di evitare le problematiche di misura del

livello dell'invaso, riscontrate nella stagione irrigua 2021 e descritte nel paragrafo precedente (si veda il grafico in Fig. 19), quando il livello dell'invaso era sceso sotto la soglia minima misurabile dal sensore di livello installato sullo scarico di troppo pieno (circa 1.1 m dalla soglia di sfioro). Per ovviare a questo problema, nel mese di aprile 2022 erano anche stati installati due datalogger di pressione: uno sul fondo del lago (Solinst Levellogger, Fig. 24A) e uno per la compensazione barometrica (Solinst Levellogger, Fig. 24B). Il sensore di livello installato sul fondo del lago ha però avuto dei malfunzionamenti e pertanto non viene riportata la serie temporale dei livelli misurati.



Fig. 23. Livelli dell'invaso (distanza dal misuratore di livello): dettaglio 11-21/9/2021.

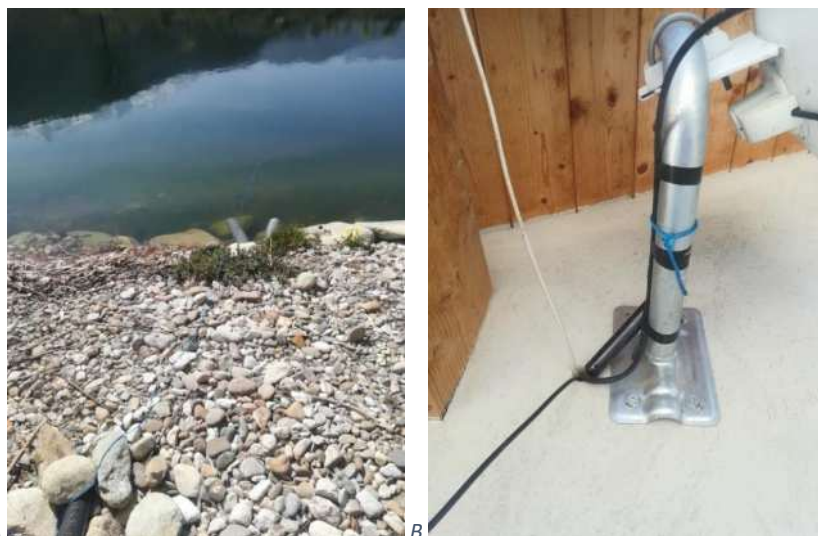


Fig. 24. Datalogger di pressione della pressione dell'acqua: installazione sul fondo del lago (A) e, sopra il livello dell'acqua, del datalogger per la compensazione barometrica (B).

1.4 Considerazioni sull'influenza del clima

Dal confronto tra le portate utilizzate nelle stagioni irrigue 2021 e 2022, emerge che in quest'ultimo anno le condizioni di utilizzo dell'invaso sono state meno critiche, grazie all'alimentazione dal canale che è giunta anche durante i mesi di luglio e agosto.

Questa valutazione è confortata anche dall'analisi dei dati pluviometrici, effettuata sulla stazione IBOVES15 di Weather Underground (<https://www.wunderground.com/dashboard/pws/IBOVES15>) per l'anno 2022 e sulla stazione di ARPA Piemonte "Cascina Borrelli" a Boves per l'anno 2021. Non è infatti disponibile, ad oggi, il dato della stazione ARPA Piemonte per tutto il 2022, ma solo per i primi 6 mesi. Le due stazioni meteo si trovano comunque a circa 1 km di distanza l'una dall'altra.

Dalla Tab. 2 e dalla Fig. 25 si osserva che, mentre il totale delle precipitazioni annue è abbastanza simile (rispettivamente 653.0 mm nel 2022 e 706.6 mm nel 2021), le precipitazioni nel periodo marzo-ottobre sono state prossime alla media nel 2022 (516.3 mm a fronte di una media di circa 600 mm, si veda Fig. 26), nel 2021 il totale nello stesso periodo è stato di molto inferiore (315.2 mm). Tale differenza si mantiene anche nel periodo di maggiore richiesta idrica: tra giugno e agosto, le precipitazioni sono state rispettivamente di 198.6 mm nel 2022 e 112.2 mm nel 2021.

Tab. 2. Precipitazioni a Boves negli anni 2022 e 2021.

Mese	Prec 2022 (mm)	Prec 2021 (mm)
Gennaio	0.0	102
Febbraio	4.6	21.2
Marzo	33.0	6.2
Aprile	71.9	81.2
Maggio	146.8	63
Giugno	103.9	73.6
Luglio	29.5	27.6
Agosto	65.3	11
Settembre	31.5	26.4
Ottobre	34.5	26.2
Novembre	83.4	252.6
Dicembre	48.8	15.6
TOTALE	653.0	706.6

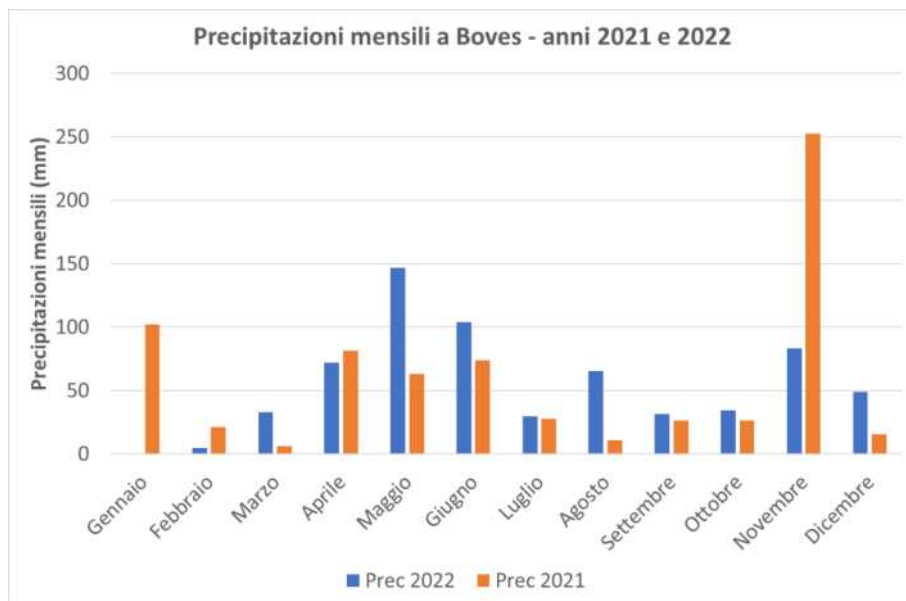


Fig. 25. Confronto fra le precipitazioni mensili a Boves negli anni 2022 (blu) e 2021 (arancione).

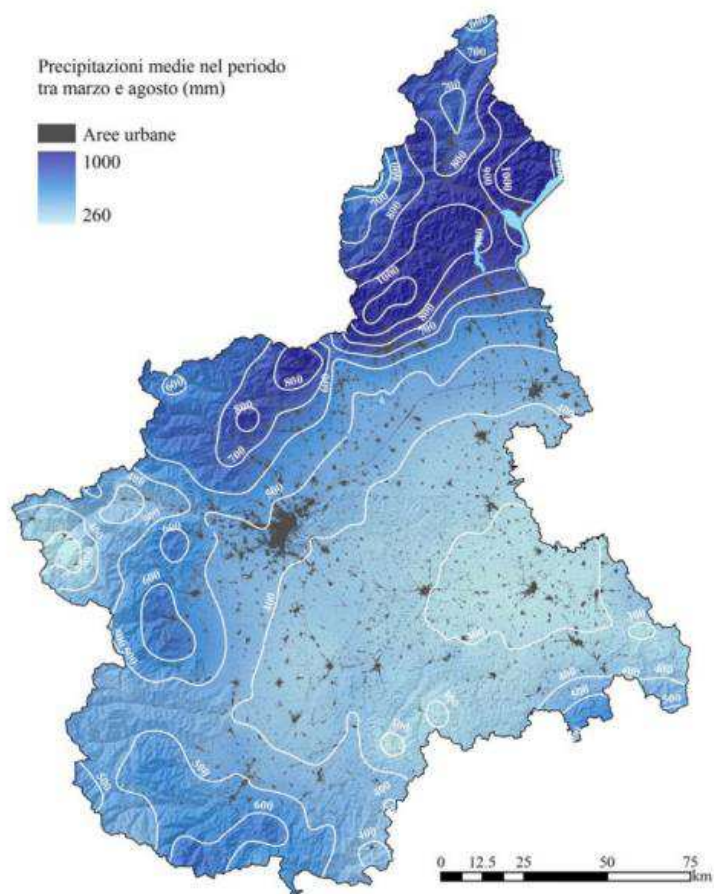


Figura 1. Distribuzione dell'altezza di pioggia media cumulata nel periodo Marzo-Agosto in Piemonte.

Fig. 26. Mappa delle precipitazioni medie cumulate tra marzo e ottobre [fonte: Regione Piemonte, <http://bit.ly/3GhwvUg>].

2 Sviluppo di tecniche di misurazione dell'umidità del terreno con immagini da drone

Per quest'ultima fase del progetto di ricerca sono state messe a disposizione alcune delle più innovative tecniche geomatiche per l'identificazione dello "stato idrico" delle diverse colture, per la valutazione delle modalità di distribuzione dell'acqua nel suolo.

L'area oggetto di studio è quella del Consorzio Irriguo di Rivoira a Boves (CN), in prossimità dell'invaso Tetti-Molettino (Fig. 27), dove alcuni campi dell'azienda agricola "La Bisalta" di Valerio Ramero sono stati resi disponibili per le sperimentazioni. In particolare, le analisi sono state condotte su porzioni di terreno interessate da differenti tipi di colture: due campi di mais, un campo di patate e un campo di fagioli.



Fig. 27. Colture analizzate nell'ambito del progetto PITER Alpimed INNOV.

L'obiettivo principale dello studio si è concentrato sulla sperimentazione di differenti sensori, camere RGB, multispettrali e termiche, integrati su sistemi UAV per il rilievo dell'area di interesse e la generazione di prodotti utili per il monitoraggio dello stato di stress idrico del terreno. Infatti, le immagini acquisite con questi devices possono essere elaborate con tecnica Structure from Motion (SfM), che consente, in primo luogo, di ottenere una mappatura ad alta risoluzione del terreno per

ciascuna banda spettrale, ovvero una nuvola di punti densa tridimensionale, dalla quale è possibile generare modelli digitali del terreno (DTM) e ortofoto di precisione nel visibile (RGB) dell'area oggetto di studio. Successivamente, le informazioni relative alla risposta spettrale dei vari oggetti presenti nell'area possono essere combinate tra loro al fine di stimare diversi indici multispettrali, che consentono di individuare le aree che necessitano di un'irrigazione mirata per una migliore gestione della risorsa idrica:

- Combinazione delle radiazioni riflesse nel vicino infrarosso (NIR) e nel rosso (RED) per la stima dell'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e la mappatura del livello di vigoria della coltura. Si calcola come il rapporto tra la differenza e la somma delle radiazioni riflesse nel vicino infrarosso e nel rosso [2], ovvero:

$$NDVI = \frac{nir - red}{nir + red} \quad (1)$$

- Combinazione dell'indice NDVI e della temperatura al suolo per la stima dell'indice SMI (Soil Moisture Index), relativo al contenuto idrico nel terreno. Per il calcolo di questo parametro occorre analizzare la temperatura normalizzata in funzione dell'indice NDVI attraverso il grafico pixel a pixel riportato come esempio in Fig. 28. Successivamente si stimano le 2 rette che definiscono la temperatura delle zone + asciutte e delle zone + bagnate e si calcola SMI [3] secondo la relazione:

$$SMI = \frac{Tn_{max} - Tn}{Tn_{max} - Tn_{min}} \quad (2)$$

Dove Tn_{max} e Tn_{min} rappresentano rispettivamente la temperatura massima (zone asciutte) e la temperatura minima (zone umide) normalizzate, mentre Tn corrisponde alla temperatura al suolo.

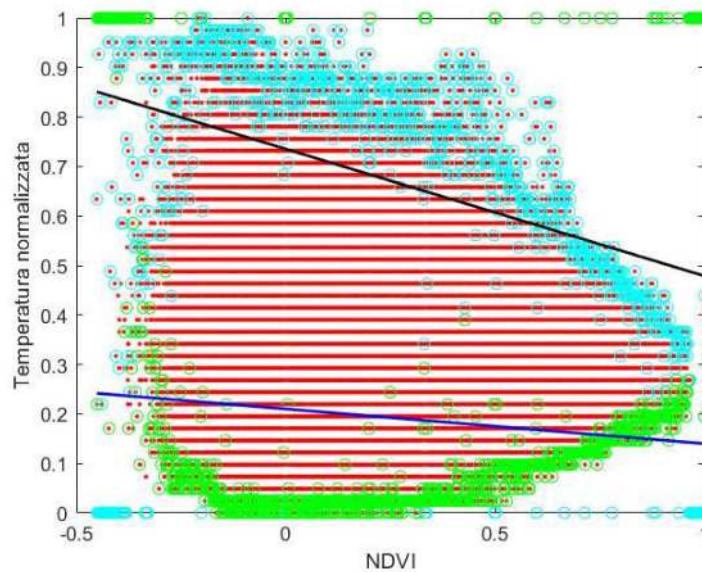


Fig. 28. Grafico "pixel a pixel" della temperatura normalizzata in funzione dell'indice NDVI.



- Combinazione delle radiazioni riflesse nel vicino infrarosso (NIR) e nel verde (GREEN) o infrarosso termico per la stima dell'indice MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) [4], relativo al contenuto di acqua delle foglie, e mappatura dello stress idrico delle coltivazioni. L'indice MNDWI si calcola applicando la formula:

$$MNDWI = \frac{green - nir}{green + nir} \quad (3)$$

La metodologia proposta è stata applicata in tre campagne di misura, la prima condotta nel periodo pre-irriguo (22/05/2020), la seconda durante la fase di irrigazione dei campi (22/07/2020), e l'ultima al termine del periodo irriguo (28/09/2021), al fine di valutare la variazione di umidità del suolo nei differenti periodi.

Durante le operazioni di rilievo, i voli sono stati condotti con il sistema UAV Dji Matrice 200 equipaggiato con la camera multispettrale Slantrange 4p+, composta da sei sensori nelle bande RGB, Red, Red Edge, e NIR. Lo stesso drone è stato utilizzato per acquisire immagini termiche e RGB con la camera Zenmuse XT2. Per il secondo rilievo, oltre ai sensori già citati, è stato sperimentato l'uso della camera multispettrale integrata sul sistema UAV Dji Phantom 4 Multispectral, composta dai cinque sensori RGB, Red Edge e NIR. In Tab. 3 vengono riportate le principali caratteristiche dei sensori multispettrali adottati.

Tab. 3. Specifiche sensori multispettrali utilizzati per le campagne di rilievo.

	Sensore	MP	GSD 100m	Centro banda, ampiezza banda	GPS/GNSS
	Slanrange	3.2 MP	2.2 cm	Rw: 620 nm, 110 nm G: 520 nm, 110 nm B: 470 nm, 110 nm Redge: 715 nm, 30 nm Rn: 650 nm, 40 nm N: 850 nm, 70 nm	Da matrice
	Phantom 4 multispectral	2,08 MP	5.29 cm	R: 650 nm \pm 16 nm G: 560 nm \pm 16 nm B: 450 nm \pm 16 nm REdge: 730 nm \pm 16 nm N: 840 nm \pm 26 nm	Da DJI (GNSS dual frequency)

Per la prima campagna di rilievo sono stati condotti due voli utilizzando la camera Slanrange 4P+ (Fig. 29): un primo volo ha ricoperto le aree dei campi di patate, fagioli e mais (campo di mais(1) in Fig. 27); mentre con il successivo è stato possibile rilevare il campo di mais (2). Entrambi i voli sono stati programmati in modo da garantire un ricoprimento dell'80% tra i fotogrammi nadirali e un GSD a terra di circa 2 cm. Infine, una prima sperimentazione del sensore termico è stata eseguita con un terzo volo sul campo di patate.



Fig. 29. Predisposizione della camera Slanrange 4P+ sul sistema DJI Matrice 200.

Gli stessi piani di volo programmati per la prima sessione di rilievo, sono stati utilizzati per eseguire i voli durante la seconda campagna di studio. Oltre a questo, due altri voli con uguale ricoprimento sono

stati condotti con il sistema Phantom 4 Multispectral. I voli sono stati programmati con il software Terra, che consente di sfruttare il DSM dell'area già noto in precedenza. Questo test ha oltretutto permesso di valutare le performances del software Terra. Infine, con un ultimo volo, è stato acquisito il dato termico sui campi di fagioli, patate e di mais n.1.

Per la terza campagna di rilievo, è stato eseguito un solo volo con ogni sensore (Slantrange, termico e Phantom 4 Multispectral) sulle aree dei campi di patate, fagioli e mais (1). Anche in questo caso, i voli sono stati effettuati ad un'altezza tale da garantire un GSD di circa 2 cm. In contemporanea sono stati utilizzati dei sensori di umidità TDR.

I dati acquisiti da drone sono stati successivamente elaborati con approccio SfM, come descritto nei paragrafi precedenti.

Benché i sistemi UAV utilizzati siano equipaggiati con ricevitori GNSS per la geolocalizzazione delle immagini, si è scelto di disporre dei marker di 40x40 cm a terra all'interno dell'area di interesse per la verifica dell'accuratezza dei prodotti realizzati. A tal fine, la posizione del centro di questi marker è stata misurata con tecnica GNSS RTK (Fig. 30), sfruttando le correzioni derivanti dalla rete di stazioni permanenti SPIN del Piemonte e della Lombardia, tramite connessione GSM, che ha permesso di raggiungere un'accuratezza centimetrica.



Fig. 30. Misura dei marker con approccio GNSS RTK.

L'elaborazione fotogrammetrica dei dati è stata condotta in un primo momento con il software AMP per le immagini acquisite con il sensore Slantrange 4P+, con il software commerciale Pix4D per le immagini termiche, che contiene strumenti specifici per la conversione dell'informazione contenuta nel *digital number* in valori di temperatura in gradi Celsius, e con il software Dji Terra per il

processamento dei dati multispettrali del Phantom 4 Multispectral. Tuttavia, quest'ultimo non consente di sfruttare i GCP a terra per l'ottimizzazione della georeferenziazione del blocco fotogrammetrico multispettrale; pertanto, al fine di avere un maggior controllo sull'accuratezza dei prodotti, si è scelto di utilizzare anche per questi dataset il software AMP.

L'elaborazione dei dataset di immagini aeree ha consentito, in primo luogo, la generazione di nuvole di punti tridimensionali con RSME stimato su alcuni CP di 3-4 cm (Fig. 31) per quanto riguarda i fotogrammi multispettrali Slantrange della prima e della terza campagna di rilievo, un'accuratezza di circa 3 cm sui dati termici e un RMSE di 7 cm sul blocco fotogrammetrico realizzato a partire dai del Phantom 4 Multispectral.

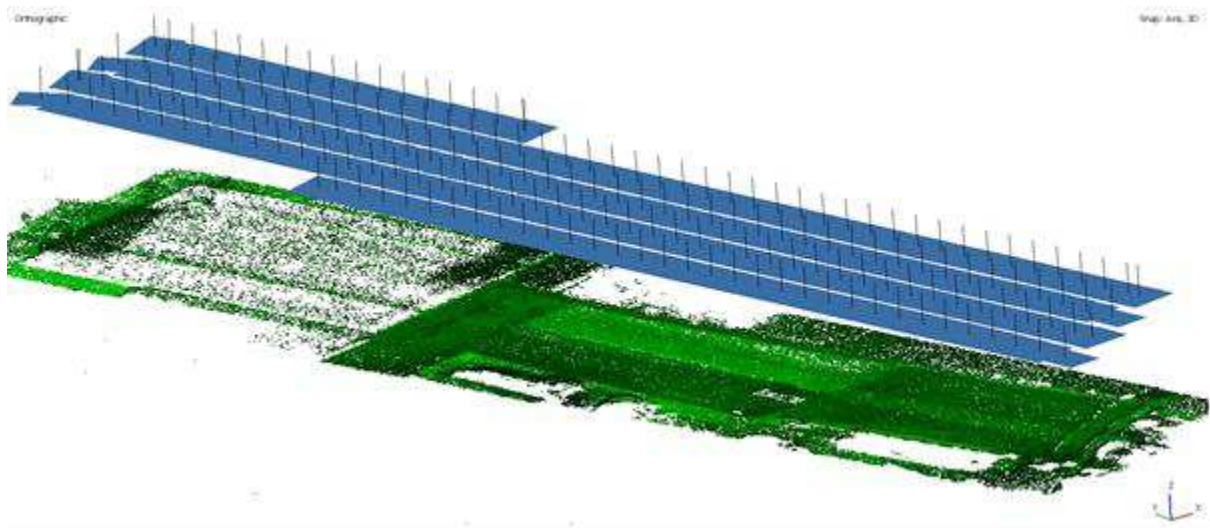


Fig. 31. Allineamento delle immagini (in azzurro) acquisite per mezzo del sistema Phantom 4 Multispectral nella banda del Green e generazione della nuvola di punti (in verde) dei campi di patate, fagioli e mais (1) (seconda campagna di rilievo).

Purtroppo occorre segnalare che non è stato possibile portare a termine l'elaborazione di tutti i dataset di immagini:

- Durante la seconda campagna di rilievo sono stati rilevati problemi nella geolocalizzazione delle immagini acquisite con sensore Slantrange e ciò ha impedito la corretta esportazione dei dati con il software proprietario SlantView, rendendo quindi inutilizzabile il dato;
- A seguito della prima fase di elaborazione dei dati del Phantom 4 Multispettrale relativi al campo di mais (2) della seconda campagna di misura, sono insorti problemi nell'allineamento dei fotogrammi: ciò è dovuto alla fitta vegetazione che compromette la corretta correlazione dei punti sulle immagini e risolvibile solo acquisendo strisciate a differenti altezze, rispetto a quella costante impostata nel piano di volo;

- Si è osservato, infine, che, a seguito dell'allineamento delle immagini acquisite dal Phantom 4 Multispettrale durante l'ultima campagna di rilievo, la nuvola di punti generata risulta essere particolarmente rumorosa, a causa di un errato processamento della banda del Rosso. I risultati così ottenuti sono pertanto stati scartati poiché ritenuti non affidabili. Il problema potrà essere superato nelle future campagne di misura aumentando la sovrapposizione tra i fotogrammi.

A partire dai prodotti ottenuti dall'elaborazione delle immagini multispettrali e termiche, sono stati generati per ogni volo DTM, DSM e ortofoto nel sistema di coordinate WGS84 UTM 32N, con una risoluzione di 3 cm ciascuno (Fig. 33).

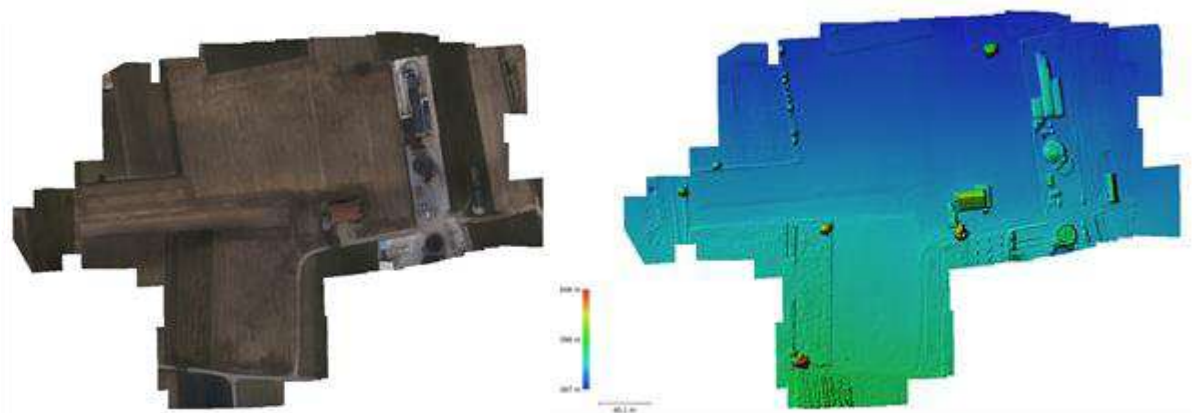


Fig. 32. Ortofoto (a sinistra) e DSM (a destra) generati a partire dai dati acquisiti il 22/05/2020 relativi al campo di mais n.2.

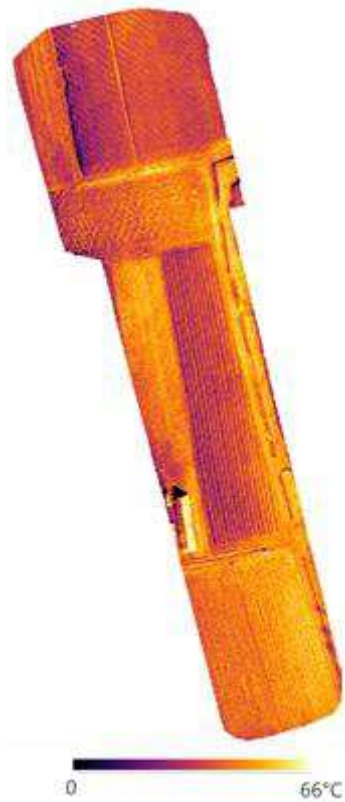


Fig. 33. Ortofoto termica generati a partire dai dati acquisiti il 28/09/2021 relativi al campo di mais n.1, fagioli e patate.

Le operazioni sulle varie bande radiometriche condotte in ambiente GIS, hanno permesso, successivamente, di stimare gli indici di vegetazione (NDVI) e di umidità (NDWI) del suolo. In Fig. 34 e Fig. 35 si riportano i risultati ottenuti, dove si nota come valori tendenti a 1 per l'indice NDVI indichino una maggiore presenza di vegetazione, mentre per l'indice MNDWI rappresentino un maggior quantitativo di acqua.

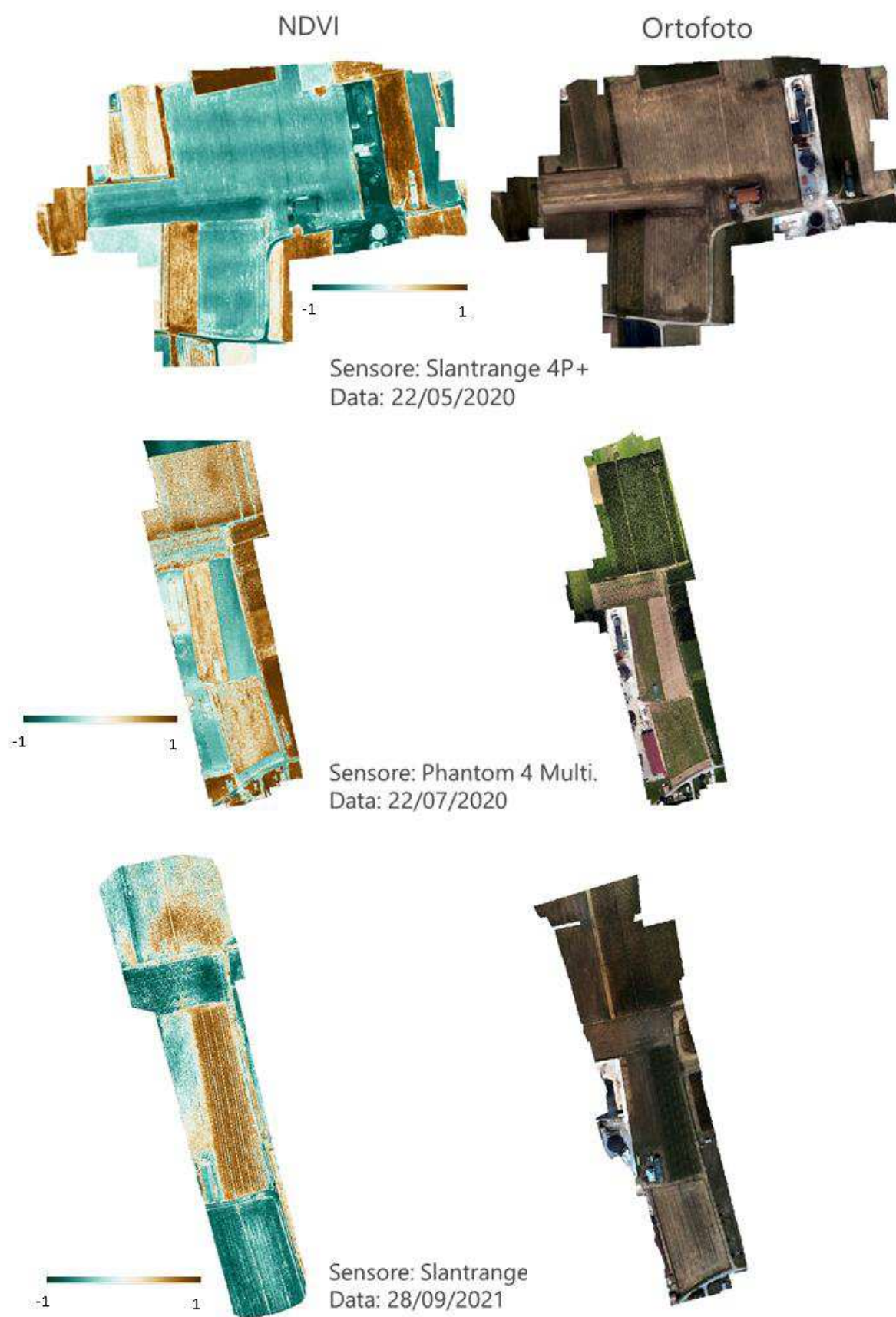


Fig. 34. Mappa dell'indice NDVI.



Fig. 35. Mappa dell'indice MDWI.

Infine, dalla compilazione di uno specifico codice in Matlab, utilizzando le mappe di indice NDVI e le ortofoto di temperatura, è stato possibile stimare l'indice SMI. Oltre ai dati già citati, occorre realizzare una maschera che identifichi le aree su cui eseguire il calcolo e nasconda tutti gli oggetti sui quali non ha significato stimare l'umidità (quali edifici, veicoli ecc.). L'output della procedura è una nuova mappa contenente all'interno di ogni pixel il valore di SMI stimato (Fig. 36). Valori di SMI prossimi a 1 indicano terreni maggiormente umidi.

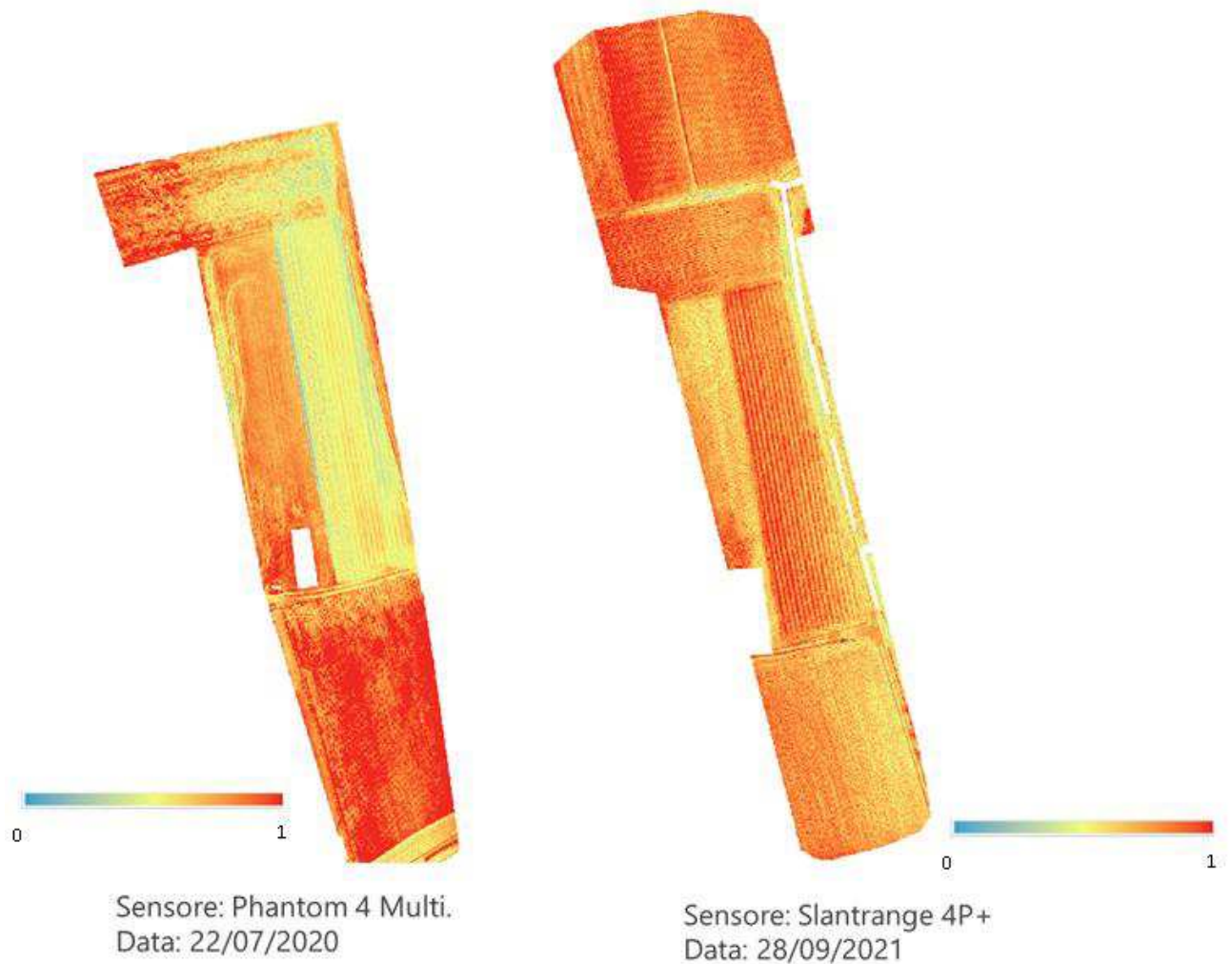


Fig. 36. Mappa dell'indice SMI.

L'attendibilità di tale stima è stata validata analizzando la correlazione tra i valori di SMI e i valori di umidità del suolo misurati con una sonda TDR al suolo. Durante la terza campagna di rilievo il sensore è stato utilizzato per misurare l'umidità del terreno in 70 differenti punti dislocati all'interno dell'area di interesse (campi di mais 1, patate e fagioli) ad una profondità di circa 10-15 cm dalla superficie. La posizione di ciascun punto di misura è stata inoltre misurata con tecnica GNSS RTK per mezzo di una

palina, ottenendo le coordinate con precisione centimetrica; questa informazione ha così permesso di comparare i valori di umidità misurati e quelli stimati a partire dai prodotti fotogrammetrici.

In Fig. 37 si riporta il grafico di dispersione generato dal confronto tra i valori di umidità del suolo (VWC) misurati con la sonda TDR e quelli stimati a partire dai dati UAV (indice SMI), che mostra come effettivamente ci sia una correlazione tra le due popolazioni di dati, sebbene ancora piuttosto debole.

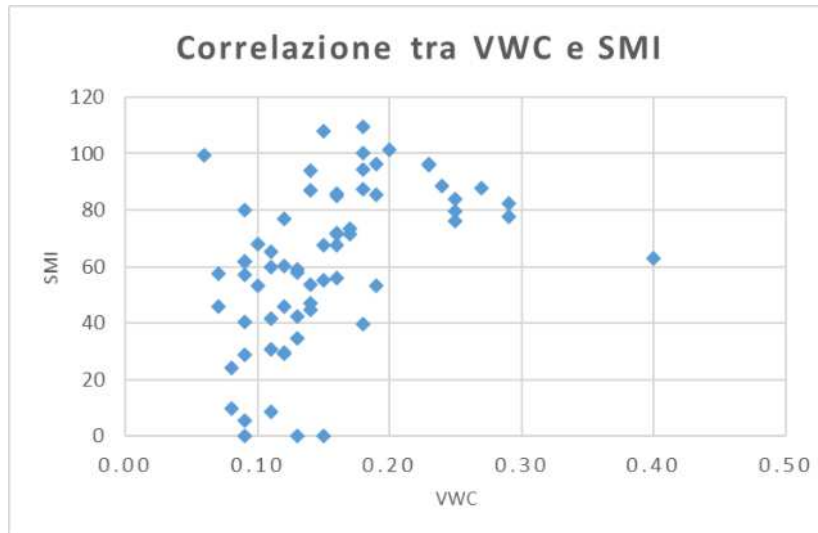


Fig. 37. Correlazione tra la misura di umidità del suolo (VWC) e la stima dell'indice SMI.

Bibliografia

1. Citrini, D.; Nosedà, G. *Idraulica*; Milano, 1987; ISBN 88-08-08104-4.
2. Carlson, T.N.; Ripley, D.A. On the Relation between NDVI, Fractional Vegetation Cover, and Leaf Area Index. *Remote Sensing of Environment* **1997**, *62*, 241–252, doi:10.1016/S0034-4257(97)00104-1.
3. Saha, A.; Patil, M.; Goyal, V.C.; Rathore, D.S. Assessment and Impact of Soil Moisture Index in Agricultural Drought Estimation Using Remote Sensing and GIS Techniques. *Proceedings* **2018**, *7*, 2, doi:10.3390/ECWS-3-05802.
4. Xu, H. A Study on Information Extraction of Water Body with the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI). *Journal of Remote Sensing* **2005**, *5*, 589–595.



INTERREG ALCOTRA 2014-2020 Projet “PITER Alpimed – INNOV”

Rapport d'activité WP 4.1.3 (économie d'eau en agriculture)



PROMOTEUR :



**Camera di Commercio, Industria, Artigianato e
Agricoltura (CCIAA) di Cuneo**
Via Emanuele Filiberto 3
12100 Cuneo

RÉDACTION :



Politecnico di Torino – DIATI
Corso Duca degli Abruzzi 24
10129 Torino

Prof. Alessandro Casasso
Prof. Andrea Lingua
Ing. Irene Aicardi
Ing. Nives Grasso

Sommaire

Avant-propos.....	3
1 Le bassin d'irrigation de Rivoira	4
1.1 Installation d'une unité de mesure du débit et de transmission des données	7
1.2 Analyse des données de débit de la saison d'irrigation 2021.....	13
1.3 Analyse des données de débit de la saison d'irrigation 2022.....	17
1.4 Considérations sur l'influence du climat.....	21
2 Développement de techniques de mesure de l'humidité du sol à l'aide d'images de drones	23
Bibliographie	35

Avant-propos

Le présent rapport décrit brièvement les activités de recherche menées dans le cadre du projet PITER Alpimed - INNOV par le Politecnico di Torino - DIATI, en tant que délégataire du chef de file de la Chambre de Commerce, d'Industrie, d'Artisanat et d'Agriculture (CCIAA) de Cuneo.

Les activités réalisées sont encadrées par les WP 4.1.2 (économie d'énergie dans les stations de ski) et WP 4.1.3 (économie d'eau en agriculture) et dirigées par le Prof. Alessandro Casasso et l'Ing. Irene Aicardi (qui a ensuite été remplacée par le Prof. Andrea Lingua).

La rédaction de ce document, qui concerne le WP 4.1.3, a été confiée au professeur Alessandro Casasso et à l'ingénieur Nives Grasso. L'ingénieur Vincenzo di Pietra (chercheur) et l'ingénieur Costanza Gamberini (chargée de recherche en 2019-2020) ont également contribué aux activités.

Le rapport suivant est composé de 2 chapitres concernant les deux principales activités du Polytechnique de Turin - DIATI dans le WP 4.1.3 :

- Le développement d'un système électronique accessible à distance pour la mesure des débits d'eau en entrée et en sortie du réservoir, visant à fournir au Consortium un outil utile pour l'optimisation de la gestion du réservoir lui-même, et l'évaluation des données de suivi pour les saisons d'irrigation 2021 et 2022 (Chap. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) ;
- Les premiers résultats du développement d'une technique de mesure de l'humidité du sol à l'aide d'images de drones, qui peut être utile pour caractériser la distribution inégale de l'humidité dans un champ malgré un arrosage uniforme (Chap. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

1 Le bassin d'irrigation de Rivoira

Le bassin objet de l'étude menée dans le WP 4.1.3 est situé dans la commune de Boves (CN), dans la localité de Tetto Meniot, près du hameau de Rivoira. Le réservoir, d'un volume de 42 000 mètres cubes et d'une superficie d'environ 1 ha, a été construit en 2016-2017 pour accumuler l'eau de Bedale Rivoira Soprana, qui dérive du torrent Colla sur la rive droite (Fig. 12) à une altitude de 670 m au-dessus du niveau de la mer, afin de fournir une irrigation de secours pendant les sécheresses estivales. Le torrent Colla a deux autres dérivations, le Bedale Rivoira Sottana, toujours sur la rive droite, et le Bedale Villa sur la rive gauche : ces deux dérivations ont lieu à partir de la même traverse, située à une altitude de 645 m au-dessus du niveau de la mer. Un autre petit réservoir était déjà présent dans la région dans la localité de Tetto Meniot (11 mille mètres cubes), ce qui était tout à fait insuffisant pour les besoins de la zone, à tel point que de nombreuses fermes s'étaient équipées de puits d'irrigation. La figure 13 montre les bassins d'irrigation desservis par les trois canaux décrits ci-dessus.

Le bassin dessert un réseau sous pression (Fig. 14 et Fig. 15) d'où partent les sorties d'irrigation (Fig. 16) auxquelles peuvent être raccordés différents types de systèmes d'irrigation (aspersion, goutte à goutte, etc.) avec des raccords de type Camlock.

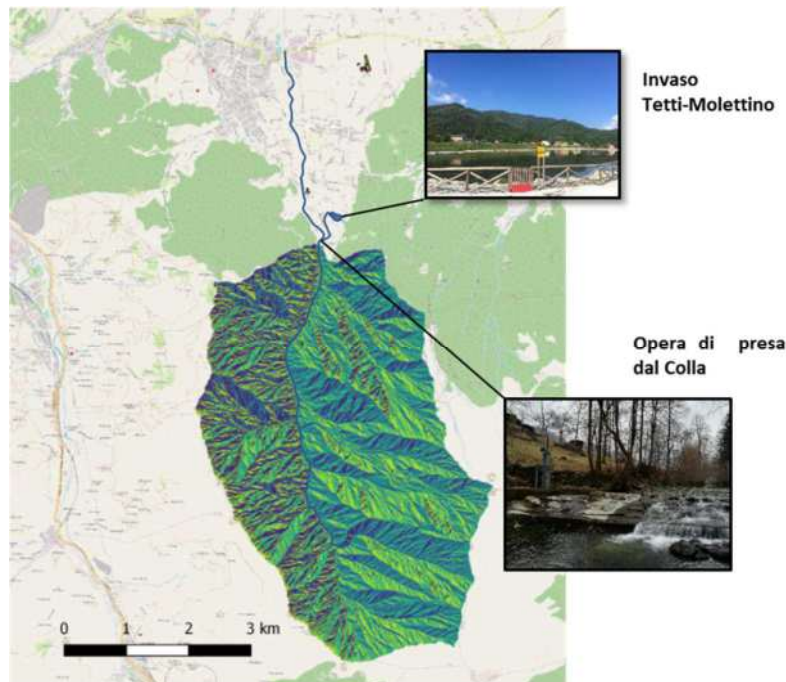


Fig. 1. Le bassin du torrent Colla fermé au niveau de la prise d'eau du Bedale Rivoira Soprana.

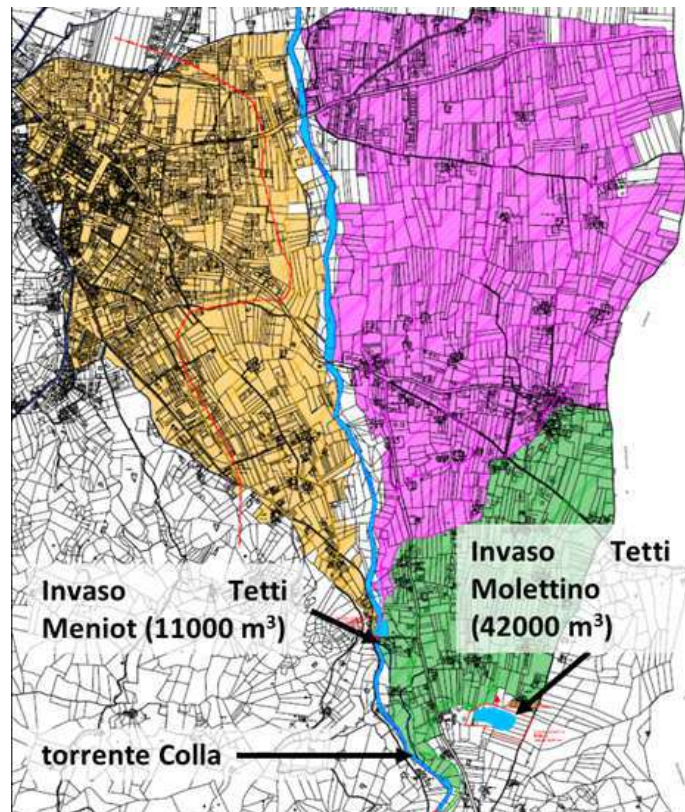


Fig. 2. Zones d'irrigation des canaux Bedale Rivoira Soprana (vert) et Sottana (cyclamen) sur la rive droite et Bedale Villa (jaune) sur la rive gauche. Élaboré à partir du rapport du projet exécutif, étude ingénieur Ferrari..

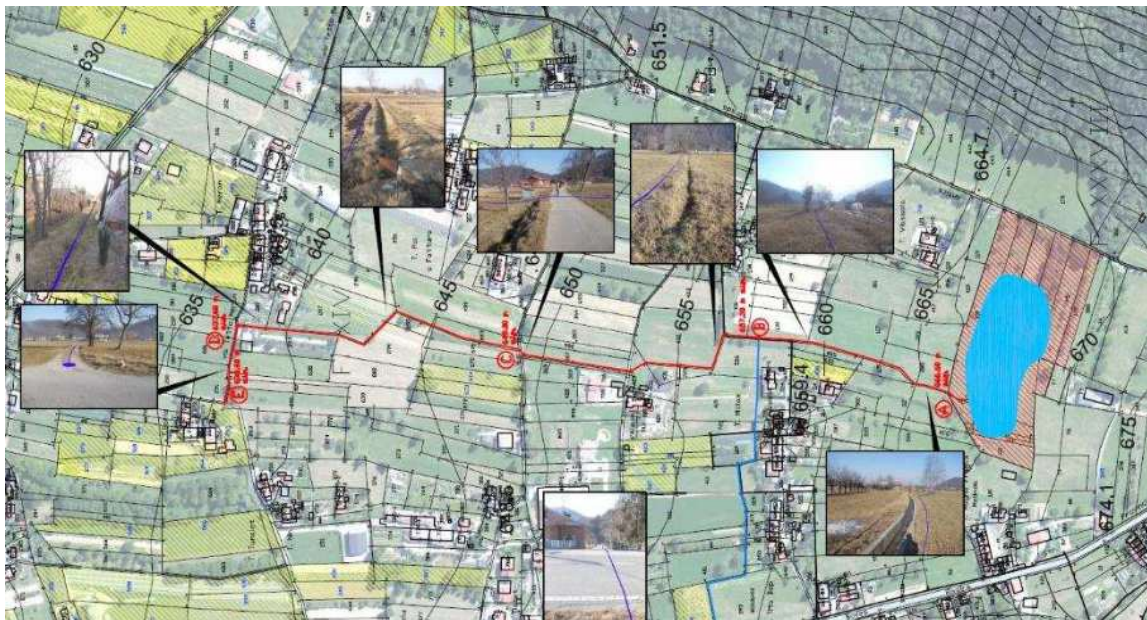


Fig. 3. Planimétrie de la première section de la canalisation principale (points A-E). Source : projet exécutif, étude ing. Ferrari.

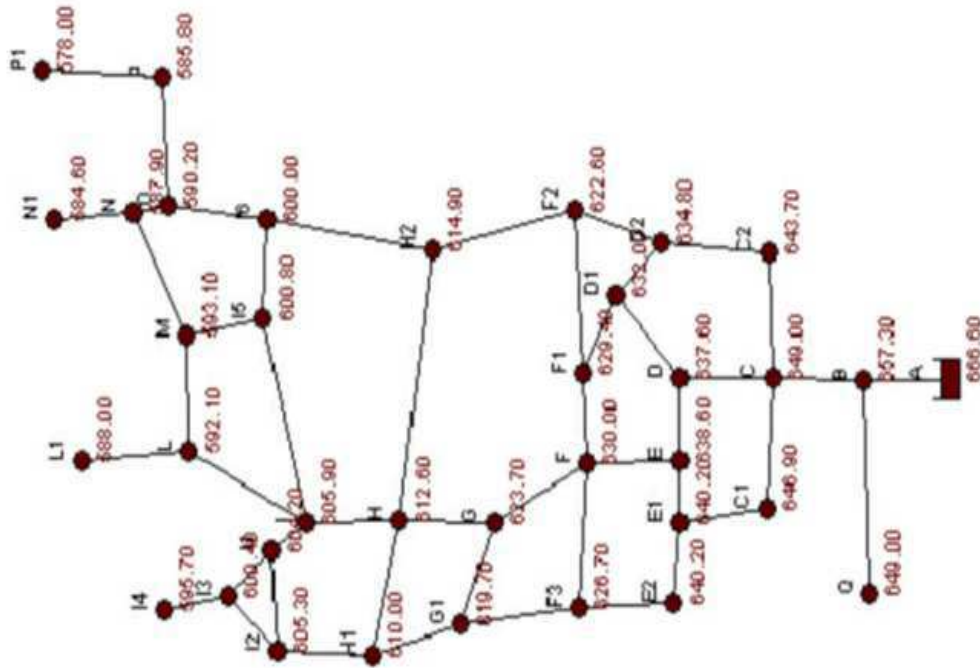


Fig. 4. Localisation des nœuds du réseau (points A-P = canalisation principale ; points numérotés = secondaires). Source : projet exécutif, étude ing. Ferrari.



Fig. 5. Bouche d'irrigation avec connexion Camlock (à gauche) et détail d'un compteur volumétrique (à droite).

1.1 Installation d'une unité de mesure du débit et de transmission des données

Au réservoir de Rivoira, un système a été installé pour surveiller et enregistrer le débit à l'entrée et à la sortie du lac et à la sortie du réseau d'irrigation sous pression.

Le débit est mesuré en 5 points (Fig. 6) :

1. Bedale Rivoira Soprana, immédiatement en amont de la prise d'eau du lac.
2. Bedale Rivoira Soprana, immédiatement en aval de la prise d'eau du bassin
3. Sortie du trop-plein du lac
4. Tuyau de refoulement en amont (DN 110)
5. Tuyau de refoulement en aval (DN 273)

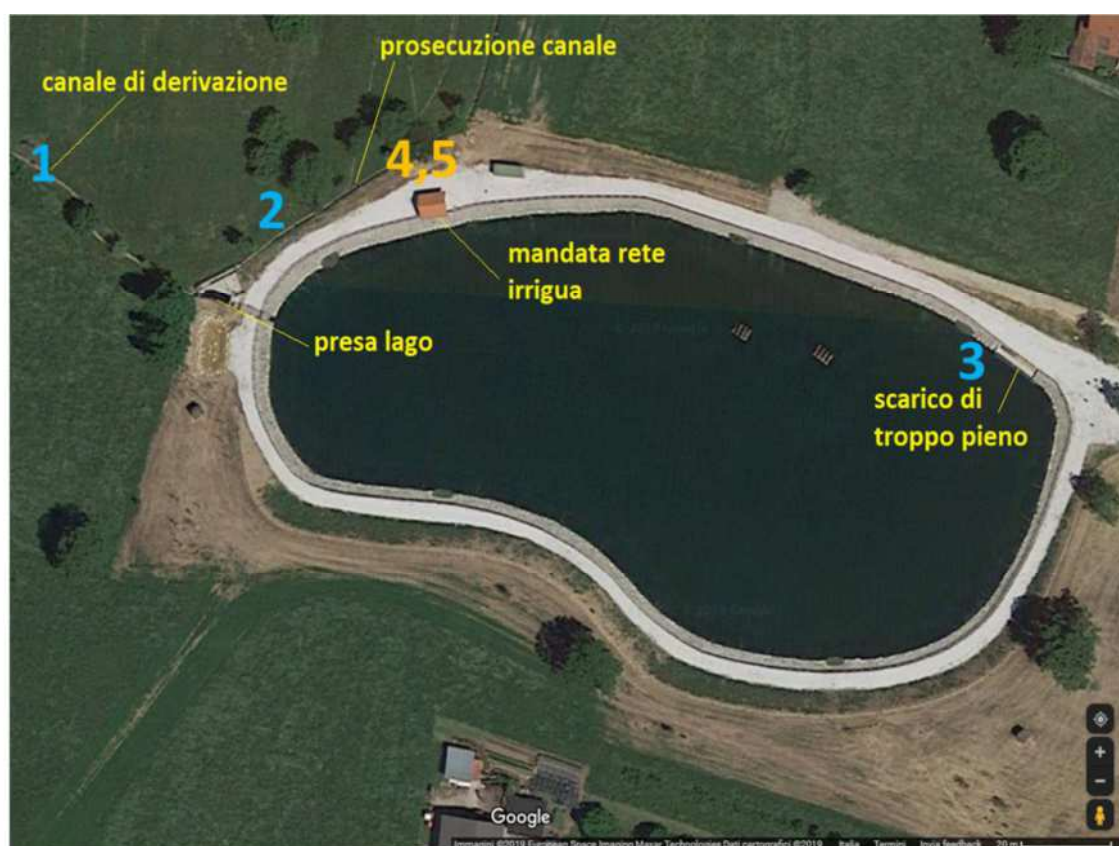


Fig. 6. Plan du bassin de Rivoira avec le canal Bedale Rivoira Soprana dont est issu le réservoir, le drain de débordement et le bâtiment de refoulement du réseau d'irrigation.

Des jauges de niveau à ultrasons ont été installées aux points 1, 2 et 3, à partir desquelles le débit est dérivé à l'aide d'une équation connue sous le nom d'échelle de débit [1]. La Fig. 7 montre les jauges de niveau, tandis que la Fig. 8 illustre les opérations de calibrage de l'échelle de débit et le graphique de la courbe résultante. Les photographies de la Fig. 9 et de la Fig. 10 représentent, respectivement, la préparation des colonnes montantes hydrauliques installées aux points 1 et 2 et le câblage des jauges de niveau pour la connexion avec l'unité de contrôle de l'acquisition des

données, située dans le hangar abritant les tuyaux de refoulement du réseau d'irrigation sous pression.



Fig. 7. Jauges de niveau à ultrasons installées dans le Bedale Rivoira Soprana de Bedale en amont (à gauche) et en aval (au centre) de la prise d'eau du réservoir, et près de la sortie du trop-plein du lac (à droite).

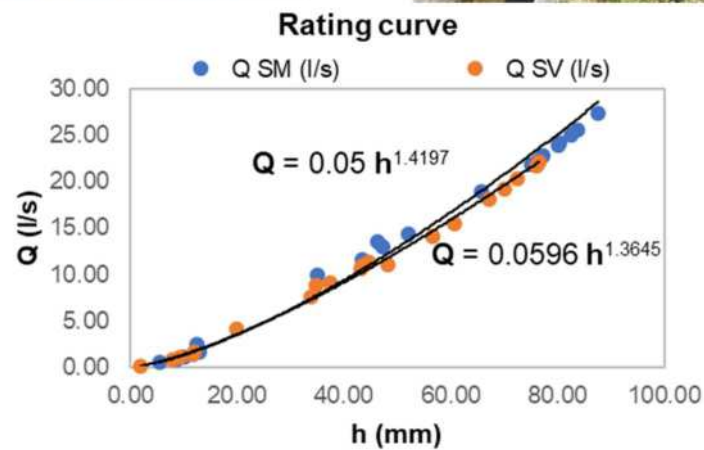
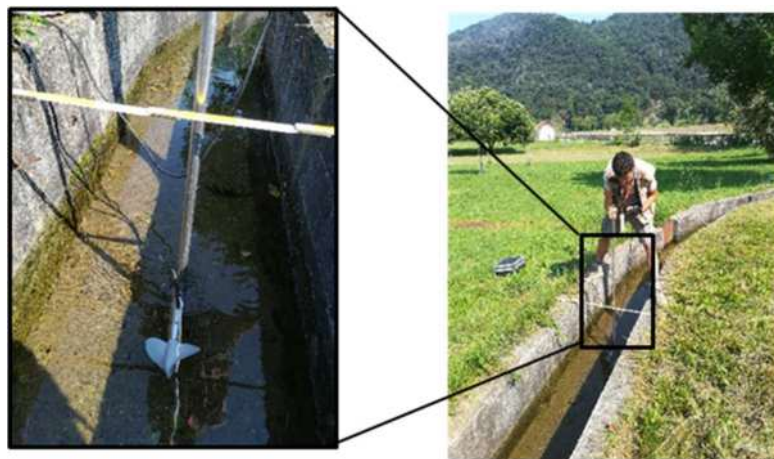


Fig. 8. Mesures de débit effectuées pour l'étalonnage de l'échelle de débit du Bedale Rivoira Soprana et, ci-dessous, graphique résultant pour les jauges amont (SM) et aval (SV) de la prise d'eau du lac.



Fig. 9. Préparation des colonnes montantes hydrauliques pour la mesure du débit dans le Bedale Rivoira Soprana.



Fig. 10. Câblage des jauges de niveau au point 2.

Pour les points 4 et 5, par contre, on a installé des débitmètres à ultrasons (Fig. 11), qui se basent sur la mesure du temps de parcours du son à l'intérieur du tuyau rempli d'eau : de la différence entre les temps mesurés dans le sens du courant (t_1 sur la Fig. 12) et à contre-courant (t_2 sur la Fig. 12), on obtient la vitesse de l'eau dans le tuyau et donc le débit.



Fig. 11. Débitmètres à ultrasons utilisés pour les mesures sur les canalisations sous pression.

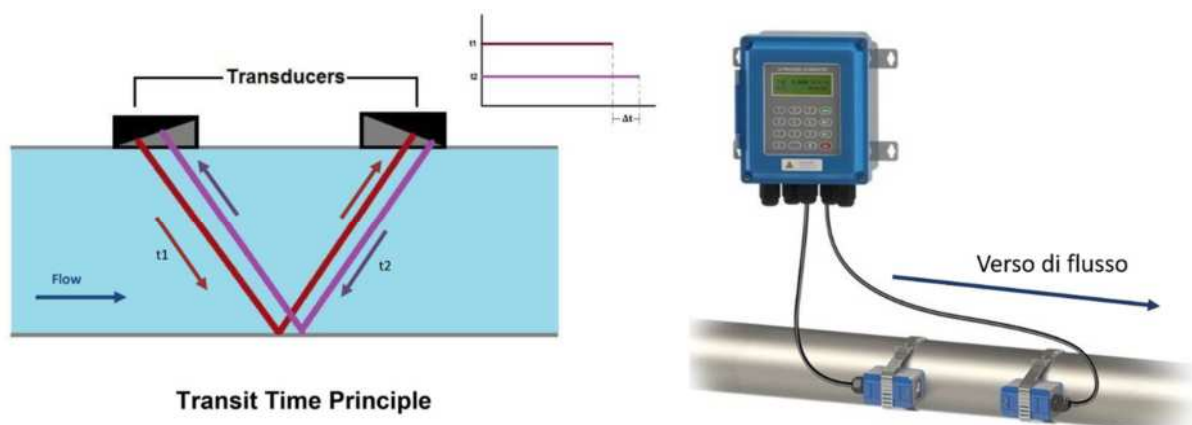


Fig. 12. Installation d'un débitmètre à ultrasons dans le puits d'alimentation d'un canon à neige.

Les compteurs de niveau et de débit sont connectés à un système de stockage et de transmission de données basé sur le web, installé en juillet 2020 (Fig. 13) et composé de :

- Modem GPRS
- Ordinateur Modbus
- Contrôleur Ethernet
- Commutateur Ethernet
- 5 enregistreurs de signaux 4-20 mA utilisés pour le stockage des données.



Fig. 13. À gauche : installation du système d'enregistrement et de transmission des données ; à droite : boîtier électrique contenant le système composé d'un ordinateur Modbus, d'un contrôleur Ethernet, d'un modem GPRS et d'un commutateur Ethernet.

Une station météorologique a également été installée avec enregistrement des données de température, de pression atmosphérique, d'humidité relative, de hauteur des précipitations, de vitesse et de direction du vent à 2 m au-dessus du sol (Fig. 14).



Fig. 14. Station météorologique installée au bassin de Rivoira.

Le système de transmission de données installé en juillet 2020 a connu de nombreux problèmes de transmission de données en raison de la mauvaise réception des signaux mobiles dans la région, problèmes qui ont dû être résolus en changeant d'opérateur. En mai 2021, lorsque la carte SIM a dû être remplacée, on a constaté que l'ensemble du système de transmission était défaillant, ce qui a très probablement été causé par une surtension pendant un orage. Cela a évidemment affecté le suivi pendant la saison d'irrigation 2021, mais il a surtout fallu remplacer l'ensemble du système de transmission des données, une opération qui a eu lieu en septembre 2021 (Fig. 15).



Fig. 15. Installation du nouveau système de transmission des données en septembre 2021.

1.2 Analyse des données de débit de la saison d'irrigation 2021

Les mesures de niveau et de débit de la saison d'irrigation 2021 ont été affectées par la défaillance de l'équipement de transmission des données, qui s'est produite à une date inconnue mais a été détectée le 13/05/2021.

Le 19/05/2021 les mesures de niveau dans les canaux et du débit des canalisations ont été rétablies et par conséquent les données disponibles pour la saison d'irrigation 2021 sont :

- Niveaux et débits du canal en amont du bassin : du 19/5 au 29/7. Les données manquent du 29/7 au 29/9 en raison d'un problème de réglage de l'instrument d'acquisition des mesures (datalogger) ;
Niveaux - débits du canal en aval du bassin : du 19/5 au 29/9 ;
- Niveaux - débits de l'évacuateur de crues : de 19/5 à 29/9 ;
- Débits petite canalisation (DN110) en amont : du 19/5 au 29/7 ont été acquis, mais leur fiabilité est douteuse ; l'acquisition du 29/7 au 29/9 s'est améliorée grâce au remplacement du capteur ;
- Débits grande canalisation (DN273) en aval : du 29/7 au 29/9.

La Fig. 16 montre l'évolution du débit journalier et de la moyenne hebdomadaire dans les deux canalisations.

Le volume total écoulé au cours de ces deux mois est de 33681 m³ dans la grande canalisation aval et de 4296 m³ dans la petite canalisation amont, soit une moyenne totale de 7,1 L/s (612,5 m³/j) pour les deux canalisations.

La valeur maximale du débit dans la grande canalisation a été de 1784 m³/j le 15/09/2021.

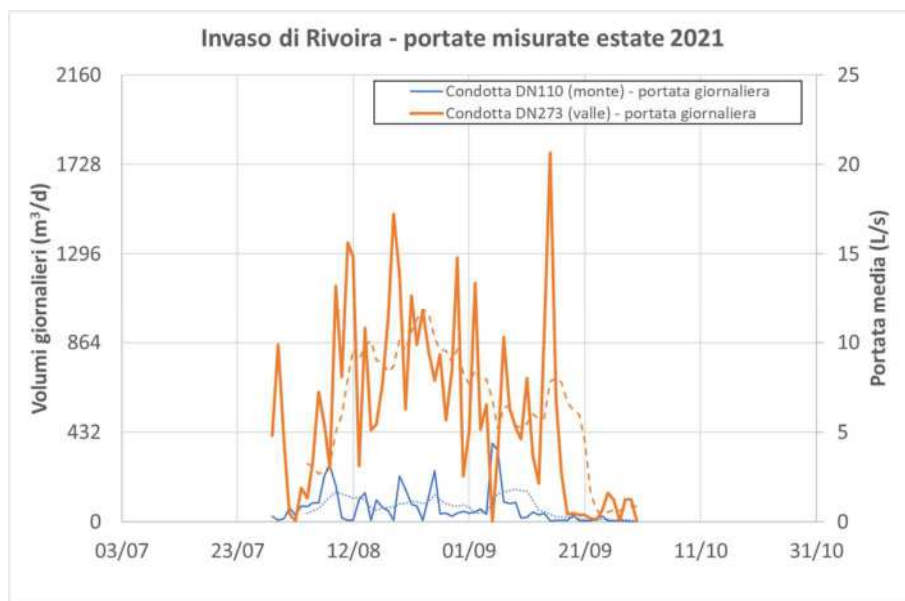


Fig. 16. Débits journaliers moyens sur la période 29/7 - 29/9/2021 des deux canalisations du réseau sous pression.

En comparant les débits d'entrée et de sortie du réservoir (Fig. 17), on constate que jusqu'au 25/06, le réservoir a reçu un débit important (environ 2500 m³/j, soit environ 29 L/s), à l'exception de quelques jours (31/5 et 8/6) où les débits d'entrée et de sortie étaient nuls. En observant l'évolution du niveau du déversoir de surverse (Fig. 19) sur la même période, on constate que le réservoir a eu une sortie d'eau du déversoir pratiquement constante.

En outre, du 25/6 au 7/7, le bassin n'a pas reçu d'apport net d'eau : comme le montre la Fig. 17, les débits des canaux en amont et en aval du réservoir sont restés pratiquement les mêmes. Pour cette raison, le niveau du lac a continué à baisser, comme on peut le voir sur la Fig. 19 : la baisse totale du niveau du 25/6 au 7/7 a été de 1,14 m ; compte tenu de la surface du lac, ce changement de niveau correspond à un volume d'environ 12500 m³. Pendant cette période, pour laquelle aucune mesure de débit n'était disponible dans les canalisations, le débit moyen était donc d'environ 960 m³/j (11 L/s).

Il est probable que l'eau d'irrigation provenant à la fois de la béalière et du réseau sous pression ait été utilisée durant cette période, ce qui expliquerait que le lac ne se soit pas rempli malgré l'existence d'un débit dans l'alimentation, même important (entre 1000 et 3000 m³/j).

L'absence de données du 29/7 au 29/9 ne permet malheureusement pas de poursuivre cette analyse.

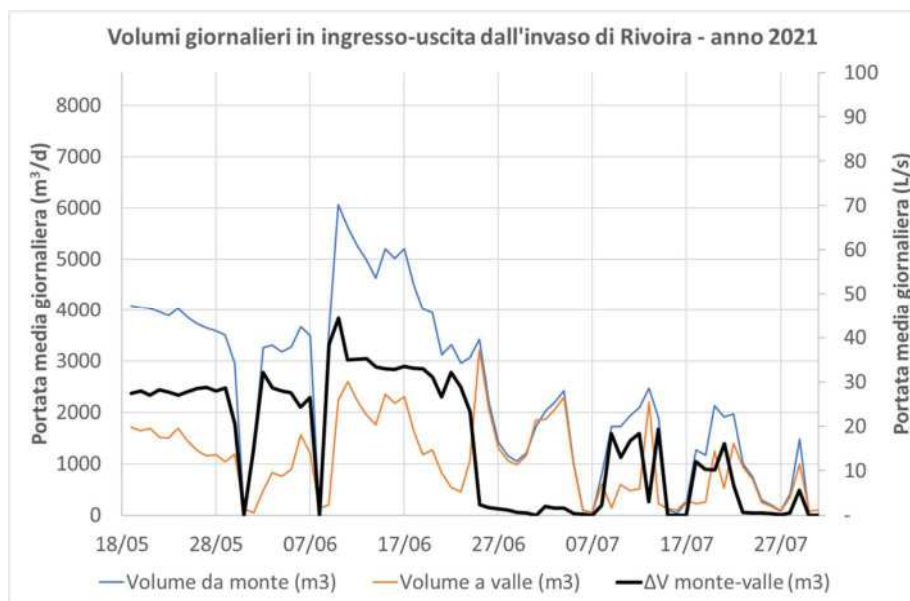


Fig. 17. Débits journaliers moyens sur la période 19/5 - 29/7/2021 dans le canal alimentant le réservoir, en amont (bleu) et en aval (orange) de la prise d'eau du lac. En noir, la différence, représentant le débit net alimentant le lac..

En revanche, pour la période 29/7 - 29/9, des données de débit sont disponibles pour le canal en aval de la prise d'eau du lac. Ce débit reste nul ou à des valeurs assez faibles (moins de 10 L/s) pendant une grande partie de la période surveillée. Du 30/7 au 29/9, le volume total qui a débité en aval de la prise d'eau du lac est d'environ 18800 m³.

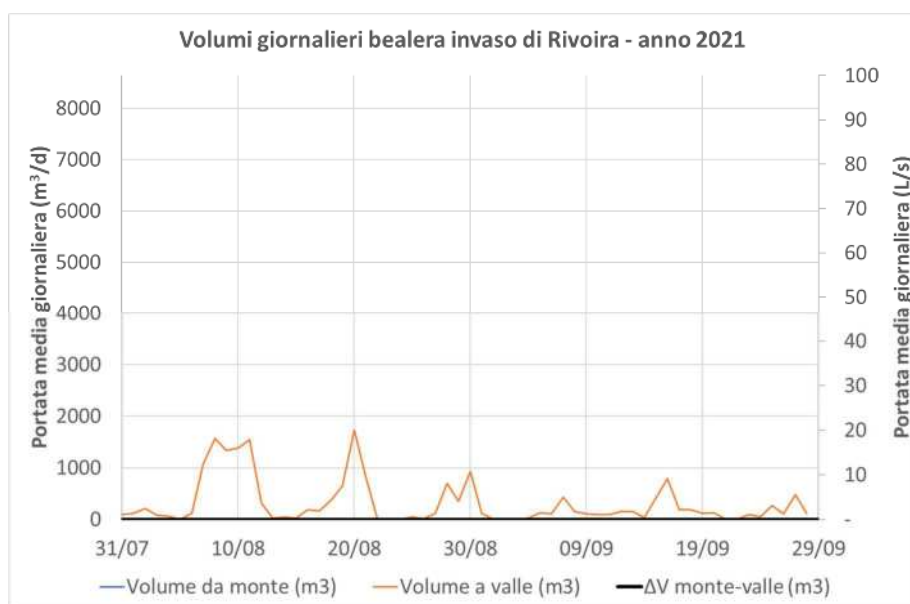


Fig. 18. Débits journaliers moyens sur la période 29/7 - 29/9/2021 dans le canal alimentant le bassin en aval du lac de Rivoira.

La mesure de niveau à partir du déversoir de surverse a une limite inférieure d'environ 1,5 m de la jauge : cette valeur correspond à la nappe imperméable au fond du lac. L'emplacement de l'installation ne permet donc pas de surveiller le niveau du lac dès qu'il descend en dessous d'environ 1,1 m du seuil de débordement et, d'autre part, la motivation de ce capteur de niveau est

précisément l'évaluation du débit débordé et non celle du volume stocké, qui nécessiterait un autre type de capteur.

Comme on peut le voir sur les graphiques de la Fig. 19 et de la Fig. 20 (détail 11-27/09/2021), au début de la période de mesure (19/5-25/6), le niveau du lac est presque constamment au-dessus du seuil de débordement. Les deux seules exceptions sont observées le 31/5-2/6 et le 9-10/6, c'est-à-dire les jours où il n'y a pas eu d'alimentation par l'amont. Ces jours-là, il y a eu de fortes pluies et on suppose donc que l'alimentation du bassin (qui était déjà plein) a été suspendue par mesure de précaution pour éviter son envasement.

Après le 7/7, on observe que le niveau du lac monte et descend de façon cyclique sur une base quotidienne. Le changement de niveau enregistré est très significatif, s'élevant à au moins 80 cm (mais étant donné la distance limite de 1,5 m de la mesure, l'abaissement pourrait être beaucoup plus important). Compte tenu de la surface du lac (10952 m² au sommet), cet abaissement correspond à une réduction de volume de près de 9 mille m³. Cette variation est irréaliste et on peut donc supposer qu'il y a un dysfonctionnement du capteur à ultrasons.

Il est donc confirmé que le capteur de niveau du déversoir est inutilisable pour caractériser l'évolution du niveau du lac (et, de plus, il n'avait pas été installé pour cette raison) : deux remèdes possibles sont de prolonger le bras sur lequel installer la jauge de niveau du déversoir et d'installer un enregistreur de pression d'eau au fond du lac ou, en tout cas, à une profondeur supérieure à son niveau minimum prévu.



Fig. 19. Niveaux du bassin (distance de la jauge de niveau) dans la période 19/5 - 29/9/2021.

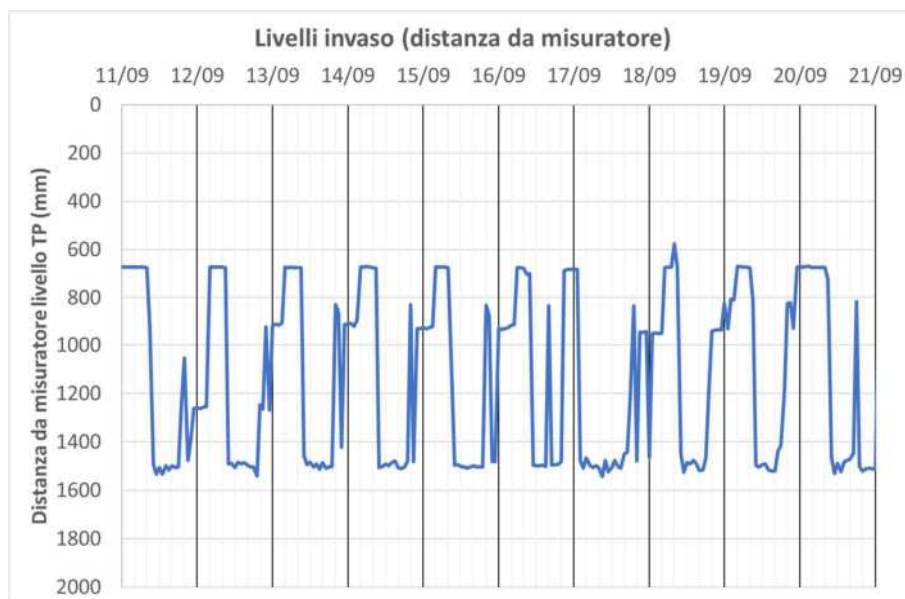


Fig. 20. Niveaux du bassin (distance de la jauge de niveau) : détail 11-21/9/2021.

La saison d'irrigation 2021 devait être la première saison avec le système complet de mesure du niveau et du débit. Malheureusement, les pannes de l'instrumentation et le temps de rétablissement nécessaire ont affecté la disponibilité des données, qui permettent néanmoins de tirer quelques indications :

- Le réservoir est actuellement utilisé avec un débit d'environ 600 - 1000 m³/j et un débit maximal mesuré de 1784 m³/j (20 L/s). Il s'agit bien entendu de débits journaliers moyens, c'est-à-dire calculés comme si ce débit circulait pendant 24 heures par jour. Les valeurs maximales, mesurées toutes les 10 minutes, sont de 40 L/s.
- Le réseau de surveillance du niveau et du débit pourrait bien être complété par un transducteur de mesure du niveau dans le lac, installé au fond du lac ou à proximité, pour évaluer l'évolution du volume stocké.
- Dans le respect de l'utilisation de la béalière qui alimente le réservoir, la priorité devrait être donnée au remplissage de ce dernier, notamment en juillet, lorsqu'il est encore possible d'intercepter un débit important et d'amener le lac à se remplir.
- Avec le débit maximal mesuré au cours de cette saison d'irrigation (1784 m³/j), le réservoir aurait une autonomie d'environ 23 jours compte tenu du volume de conception de 42 000 m³.

1.3 Analyse des données de débit de la saison d'irrigation 2022

La mesure des débits et des niveaux au cours de la saison d'irrigation 2022 a été essentiellement régulière, bien que certains problèmes d'alimentation électrique aient persisté.

Comme le montre le Tab. 1, le volume total de la période mai-octobre 2022 transporté par les deux canalisations a été de 57989 m³, dont la quasi-totalité a transité par la canalisation aval de 273 mm (53514 m³), tandis que la canalisation amont de 110 mm a été beaucoup moins utilisée (4474 m³).

Tab. 1. Volumes mensuels transitant dans la canalisation amont et aval en mai-octobre 2022.

Mois	Canalisation amont (m ³)	Canalisation aval (m ³)	Total canalisations (m ³)
Mai	29	739	769
Juin	1135	12757	13892
Juillet	1577	18429	20007
Août	1024	14844	15868
Septembre	699	5857	6556
Octobre	9	888	897
Total saison (m³)	4474	53514	57989

L'évolution des volumes journaliers transités dans les deux canalisations est présentée sur la figure 21. On constate que, pour la canalisation aval, le débit maximal transité a été de 1439 m³/j le 10/07/2022 : ce chiffre est comparable à celui mesuré lors de la saison précédente.

Étant donné que seules les données du 29/7 au 29/9 sont disponibles pour la saison d'irrigation 2021, les quantités transitant par les deux canalisations pendant la même période en 2022 sont indiquées à titre de comparaison :

- Canalisation amont (DN 110) : 1763 m³, soit 59% de moins qu'en 2021 (4296 m³).
- Canalisation aval (DN 273) : 21036 m³, soit 37,5% de moins qu'en 2021 (33681 m³).



Fig. 21. Débits journaliers moyens sur la période 19/5-16/10/2022 des deux canalisations du réseau sous pression.

Contrairement à la saison précédente, les débits d'entrée et de sortie du réservoir présentés à la Fig. 22 montrent que le lac a été alimenté, bien que par intermittence, tout au long de la saison d'irrigation.

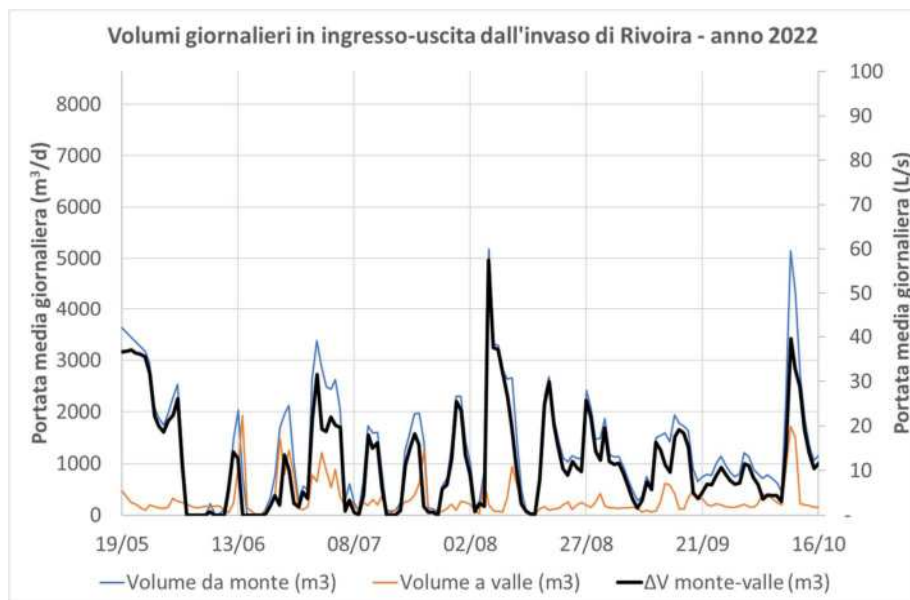


Fig. 22. Débits journaliers moyens sur la période 19/5 - 16/10/2022 dans le canal alimentant le bassin, en amont (bleu) et en aval (orange) de la prise d'eau du lac. En noir, la différence, représentant le débit net alimentant le lac.

Cet approvisionnement a permis de maintenir le niveau du bassin, pendant une bonne partie de la saison, à moins de 1 m du seuil de débordement et, donc, avec un volume résiduel d'environ 30 000 m³, comme le montre le graphique de la Fig. 23. Ceci a permis d'éviter les problèmes de mesure du niveau du réservoir rencontrés lors de la saison d'irrigation 2021 et décrits au paragraphe précédent (voir le graphique de la Fig. 19), lorsque le niveau du réservoir est descendu en dessous du seuil minimum mesurable par le capteur de niveau installé sur la sortie du déversoir (à environ 1,1 m du seuil de débordement). Pour remédier à ce problème, deux enregistreurs de pression ont également été installés en avril 2022 : un au fond du lac (Solinst Levellogger, Fig. 24A) et un pour la compensation barométrique (Solinst Levellogger, Fig. 24B). Cependant, le capteur de niveau installé au fond du lac a mal fonctionné et la série chronologique des niveaux mesurés n'est donc pas rapportée.



Fig. 23. Niveaux du bassin (distance de la jauge de niveau) : détail 11-21/9/2021.

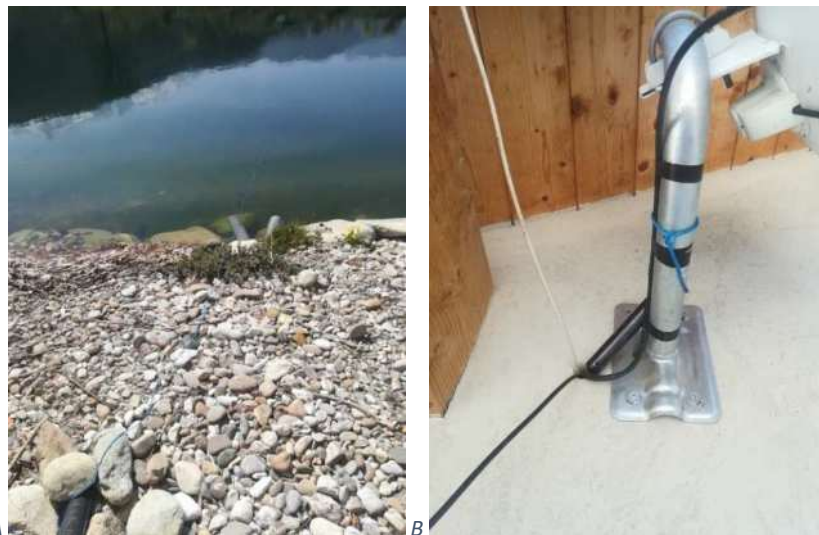


Fig. 24. Enregistreur de pression d'eau : installation au fond du lac (A) et au-dessus du niveau d'eau de l'enregistreur de données pour la compensation barométrique (B).

1.4 Considérations sur l'influence du climat

La comparaison entre les débits utilisés au cours des saisons d'irrigation 2021 et 2022 montre que cette dernière année, les conditions d'utilisation du réservoir ont été moins critiques, grâce à l'approvisionnement du canal qui est également arrivé au cours des mois de juillet et août.

Cette évaluation est également soutenue par l'analyse des données pluviométriques, effectuée sur la station IBOVES15 de Weather Underground (<https://www.wunderground.com/dashboard/pws/IBOVES15>) pour l'année 2022 et sur la station ARPA Piemonte "Cascina Borrelli" de Boves pour l'année 2021. À ce jour, les données de la station ARPA Piemonte pour toute l'année 2022 ne sont pas disponibles, mais seulement pour les 6 premiers mois. Cependant, les deux stations météorologiques sont situées à environ 1 km de distance.

Le Tab. 2 et la Fig. 25 montrent que, bien que le total des précipitations annuelles soit assez similaire (653,0 mm en 2022 et 706,6 mm en 2021, respectivement), les précipitations dans la période mars-octobre étaient proches de la moyenne en 2022 (516,3 mm par rapport à une moyenne d'environ 600 mm, voir Fig. 26), en 2021 le total dans la même période était beaucoup plus faible (315,2 mm). Cette différence se maintient également dans la période de plus forte demande en eau : entre juin et août, les précipitations ont été respectivement de 198,6 mm en 2022 et de 112,2 mm en 2021.

La comparaison des débits utilisés lors des saisons d'irrigation 2021 et 2022 montre que, pour cette dernière année, les conditions d'utilisation du bassin ont été moins critiques, grâce à l'apport du canal qui est également arrivé pendant les mois de juillet et août.

Tab. 2. Précipitations à Boves pour les années 2022 et 2021.

Mois	Préc 2022 (mm)	Préc 2021 (mm)
Janvier	0.0	102
Février	4.6	21.2
Mars	33.0	6.2
Avril	71.9	81.2
Mai	146.8	63
Juin	103.9	73.6
Juillet	29.5	27.6
Août	65.3	11
Septembre	31.5	26.4
Octobre	34.5	26.2
Novembre	83.4	252.6
Décembre	48.8	15.6
TOTAL	653.0	706.6

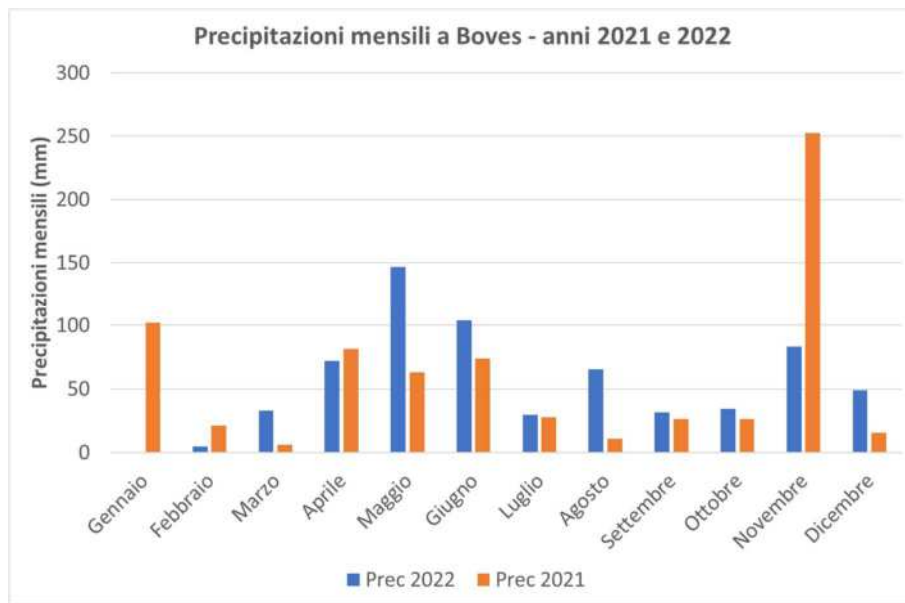


Fig. 25. Comparaison des précipitations mensuelles à Boves en 2022 (bleu) et 2021 (orange).

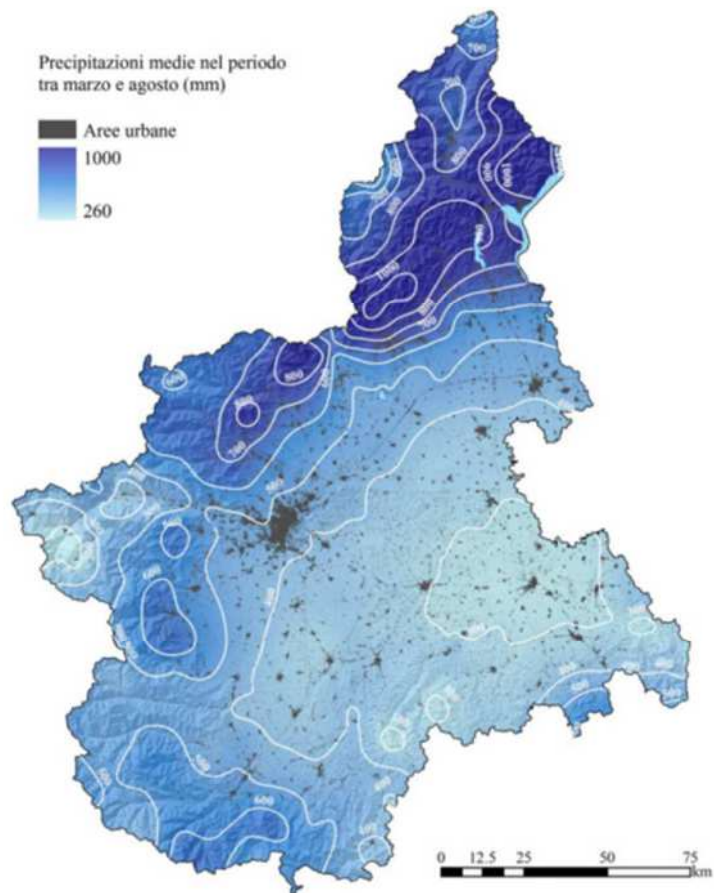


Figura 1. Distribuzione dell'altezza di pioggia media cumulata nel periodo Marzo-Agosto in Piemonte.

Fig. 26. Carte des précipitations cumulées moyennes entre mars et octobre (source : Région Piémont, <http://bit.ly/3GhvvUq>).

2 Développement de techniques de mesure de l'humidité du sol à l'aide d'images de drones

Pour cette dernière phase du projet de recherche, certaines des techniques géomatiques les plus innovantes ont été mises à disposition pour l'identification de l'"état hydrique" des différentes cultures, pour l'évaluation de la distribution de l'eau dans le sol.

La zone étudiée est celle du Consortium d'Irrigation Rivoira à Boves (CN), près du réservoir Tetti-Molettino (Fig. 27), où quelques champs de l'exploitation agricole "La Bisalta" de Valerio Ramero ont été mis à disposition pour l'expérimentation. En particulier, les analyses ont été réalisées sur des portions de terrain occupées par différents types de cultures : deux champs de maïs, un champ de pommes de terre et un champ de haricots.

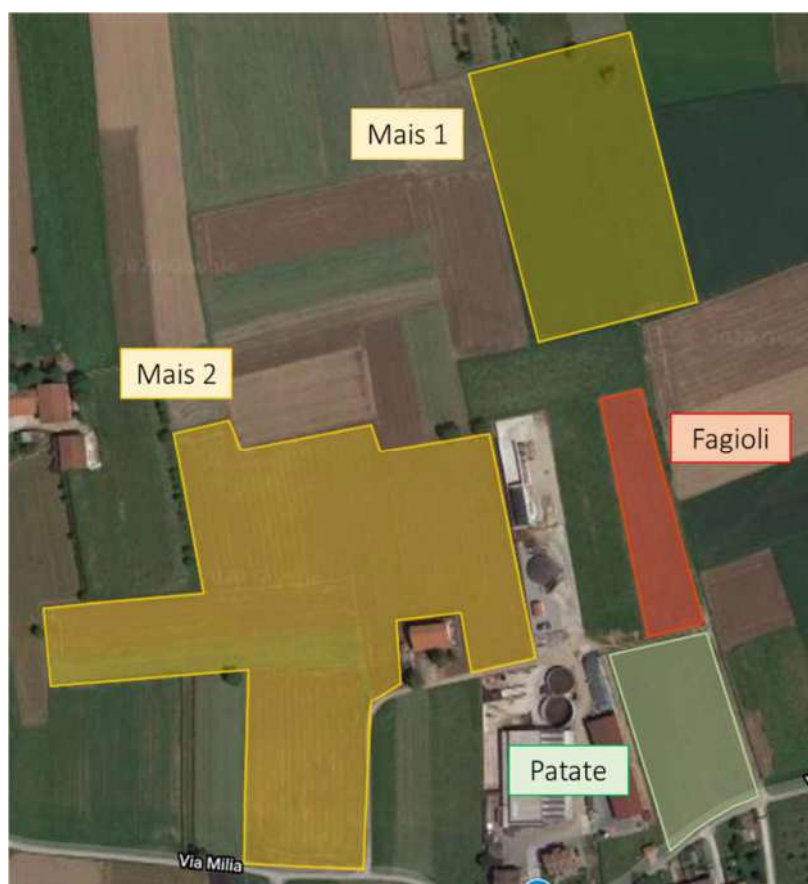


Fig. 27. Cultures analysées dans le cadre du projet PITER Alpimed INNOV.

L'objectif principal de l'étude s'est concentré sur l'expérimentation de différents capteurs, caméras RVB, multispectrales et thermiques, intégrés sur des systèmes de drones pour cartographier la zone d'intérêt et générer des produits utiles pour le suivi de l'état de stress hydrique du sol. En effet, les images acquises avec ces dispositifs peuvent être traitées avec la technique Structure from Motion (SfM), qui permet, en premier lieu, d'obtenir une cartographie du terrain à haute résolution pour

chaque bande spectrale, c'est-à-dire un nuage de points tridimensionnel dense, à partir duquel il est possible de générer des modèles numériques de terrain (MNT) et des orthophotos de précision dans le visible (RVB) de la zone étudiée. Par la suite, les informations sur la réponse spectrale des différents objets de la zone peuvent être combinées pour estimer différents indices multispectraux, qui permettent d'identifier les zones nécessitant une irrigation ciblée pour une meilleure gestion des ressources en eau :

- Combinaison des rayonnements réfléchis dans le proche infrarouge (NIR) et le rouge (RED) pour estimer le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et cartographier le niveau de vigueur de la culture. Il est calculé comme le rapport entre la différence et la somme du rayonnement réfléchi dans le proche infrarouge et le rouge [2], c'est-à-dire

$$NDVI = \frac{nir - red}{nir + red} \quad (1)$$

- Combinaison de l'indice NDVI et de la température du sol pour estimer l'indice d'humidité du sol (SMI), qui se rapporte à la teneur en eau du sol. Pour calculer ce paramètre, il est nécessaire d'analyser la température normalisée en fonction de l'indice NDVI en utilisant le graphique pixel par pixel présenté à titre d'exemple sur la Fig. 28. Ensuite, les 2 droites définissant la température des zones +sèches et +humides sont estimées et le SMI [3] est calculé selon la relation :

$$SMI = \frac{Tn_{max} - Tn}{Tn_{max} - Tn_{min}} \quad (2)$$

Où Tn_{max} et Tn_{min} représentent respectivement la température maximale (zones sèches) et la température minimale (zones humides) normalisées, tandis que Tn correspond à la température du sol.

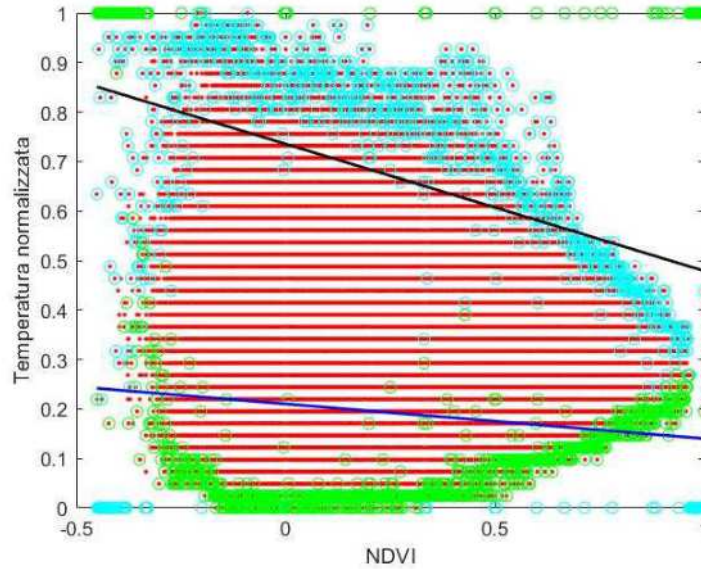


Fig. 28. Graphique pixel par pixel de la température normalisée en fonction de l'indice NDVI.

- Combinaison du rayonnement infrarouge proche (NIR) et vert (GREEN) ou thermique réfléchi pour estimer l'indice de différence d'eau normalisé modifié (MNDWI) [4], relatif à la teneur en eau des feuilles, et cartographier le stress hydrique des cultures. Le MNDWI est calculé en appliquant la formule suivante :

$$MNDWI = \frac{green - nir}{green + nir} \quad (3)$$

La méthodologie proposée a été appliquée dans trois campagnes de mesure, la première réalisée dans la période de pré-irrigation (22/05/2020), la deuxième pendant l'irrigation des champs (22/07/2020), et la dernière à la fin de la période d'irrigation (28/09/2021), afin d'évaluer la variation de l'humidité du sol dans les différentes périodes.

Pendant les opérations de relevé, les vols ont été effectués avec le système de drone Dji Matrice 200 équipé de la caméra multispectrale Slantrange 4p+, composée de six capteurs dans les bandes RVB, Rouge, Red Edge et NIR. Le même drone a été utilisé pour acquérir des images thermiques et RVB avec la caméra Zenmuse XT2. Pour le deuxième relevé, en plus des capteurs déjà mentionnés, l'utilisation de la caméra multispectrale intégrée au système de drone multispectral Dji Phantom 4, composée des cinq capteurs RVB, Red Edge et NIR, a été testée. Le Tab. 3 montre les principales caractéristiques des capteurs multispectraux adoptés.

Tab. 3. Spécifications des capteurs multispectraux utilisés pour les campagnes de relevés.

	Senseur	MP	GSD 100m	Centro banda, ampiezza banda	GPS/GNSS
	Slanrange	3.2 MP	2.2 cm	Rw: 620 nm, 110 nm G: 520 nm, 110 nm B: 470 nm, 110 nm Redge: 715 nm, 30 nm Rn: 650 nm, 40 nm N: 850 nm, 70 nm	Da matrice
	Phantom 4 multispectral	2,08 MP	5.29 cm	R: 650 nm \pm 16 nm G: 560 nm \pm 16 nm B: 450 nm \pm 16 nm REdge: 730 nm \pm 16 nm N: 840 nm \pm 26 nm	Da DJI (GNSS dual frequency)

Pour la première campagne de relevé, deux vols ont été effectués avec la caméra Slanrange 4P+ (Fig. 29) : un premier vol a couvert les zones des champs de pommes de terre, de haricots et de maïs (champ de maïs (1) sur la Fig. 27) ; tandis que le suivant a couvert le champ de maïs (2). Les deux vols ont été programmés pour assurer une couverture de 80 % entre les cadres nadiraux et un GSD au sol d'environ 2 cm. Enfin, un premier test du capteur thermique a été effectué avec un troisième vol au-dessus du champ de pommes de terre.



Fig. 29. Installation de la caméra Slanrange 4P+ sur le système DJI Matrice 200.

Les mêmes plans de vol prévus pour la première session de relevés ont été utilisés pour effectuer les vols de la deuxième campagne d'étude. En plus de cela, deux autres vols avec une couverture égale

ont été effectués avec le système multispectral Phantom 4. Les vols ont été programmés avec le logiciel Terra, ce qui permet d'utiliser le DSM de la zone précédemment connu. Ce test a également permis d'évaluer les performances du logiciel Terra. Enfin, lors d'un dernier vol, des données thermiques ont été acquises sur les champs de haricots, de pommes de terre et de maïs n° 1.

Pour la troisième campagne de relevé, un seul vol a été effectué avec chaque capteur (slantrange, thermique et Phantom 4 Multispectral) sur les zones des champs de pommes de terre, de haricots et de maïs (1). Là encore, les vols ont été effectués à une hauteur permettant d'assurer un GSD d'environ 2 cm. En même temps, des capteurs d'humidité TDR ont été utilisés.

Les données acquises par drone ont ensuite été traitées selon une approche SfM, comme décrit dans les paragraphes précédents.

Bien que les systèmes de drones utilisés soient équipés de récepteurs GNSS pour géolocaliser les images, il a été décidé de placer des marqueurs de 40x40 cm sur le sol dans la zone d'intérêt pour vérifier la précision des produits réalisés. À cette fin, la position du centre de ces marqueurs a été mesurée en utilisant la technique GNSS RTK (Fig. 30), en exploitant les corrections dérivées du réseau de stations permanentes SPIN du Piémont et de la Lombardie, via une connexion GSM, ce qui a permis d'atteindre une précision centimétrique.



Fig. 30. Mesure des marqueurs avec l'approche GNSS RTK.

Le traitement photogrammétrique des données a été effectué initialement avec le logiciel AMP pour les images acquises avec le capteur Slantrange 4P+, avec le logiciel commercial Pix4D pour les images thermiques, qui contient des outils spécifiques pour convertir les informations contenues dans le nombre numérique en valeurs de température en degrés Celsius, et avec le logiciel Dji Terra

pour le traitement des données multispectrales du Phantom 4 Multispectral. Cependant, ce dernier ne permet pas d'exploiter les GCP au sol pour optimiser le géoréférencement du bloc photogrammétrique multispectral ; par conséquent, afin d'avoir un plus grand contrôle sur la précision des produits, il a été décidé d'utiliser le logiciel AMP pour ces jeux de données également.

Le traitement des ensembles d'images aériennes a permis, tout d'abord, de générer des nuages de points tridimensionnels avec un RSME estimé sur certains CP de 3-4 cm (Fig. 31) en ce qui concerne les images multispectrales Slantrange de la première et de la troisième campagne de relevés, une précision d'environ 3 cm sur les données thermiques et un RMSE de 7 cm sur le bloc photogrammétrique issu du Phantom 4 Multispectral.

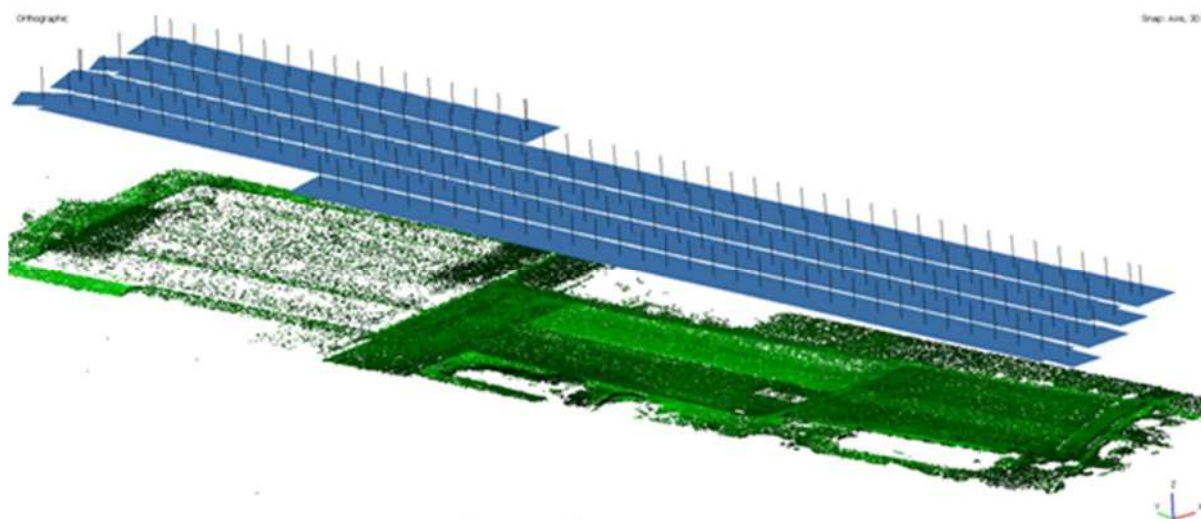


Fig. 31. Alignement des images (en bleu) acquises à l'aide du système multispectral Phantom 4 dans la bande verte et génération du nuage de points (en vert) des champs de pommes de terre, de haricots et de maïs (1) (deuxième campagne de relevés).

Malheureusement, il faut noter qu'il n'a pas été possible de terminer le traitement de tous les ensembles de données d'images :

- Au cours de la deuxième campagne de relevés, des problèmes ont été détectés dans la géolocalisation des images acquises avec le capteur Slantrange et cela a empêché l'exportation correcte des données avec le logiciel propriétaire SlantView, rendant ainsi les données inutilisables ;
- Après la première phase de traitement des données multispectrales du Phantom 4 relatives au champ de maïs (2) de la deuxième campagne de mesure, des problèmes sont apparus dans l'alignement des images : cela est dû à la végétation dense qui compromet la corrélation correcte des points sur les images et ne peut être résolu qu'en acquérant des

balayages à différentes hauteurs, par rapport à la hauteur constante fixée dans le plan de vol ;

- Enfin, il a été observé que, suite à l'alignement des images acquises par le Phantom 4 Multispectral lors de la dernière campagne de relevé, le nuage de points généré était particulièrement bruyant, en raison d'un traitement incorrect de la bande Rouge. Les résultats ainsi obtenus ont donc été abandonnés car ils ont été considérés comme peu fiables. Le problème peut être résolu dans les futures campagnes de mesure en augmentant le chevauchement entre les images.

À partir des produits obtenus par le traitement des images multispectrales et thermiques, des MNT, MNS et orthophotos ont été générés pour chaque vol dans le système de coordonnées WGS84 UTM 32N, avec une résolution de 3 cm chacun (Fig. 33).

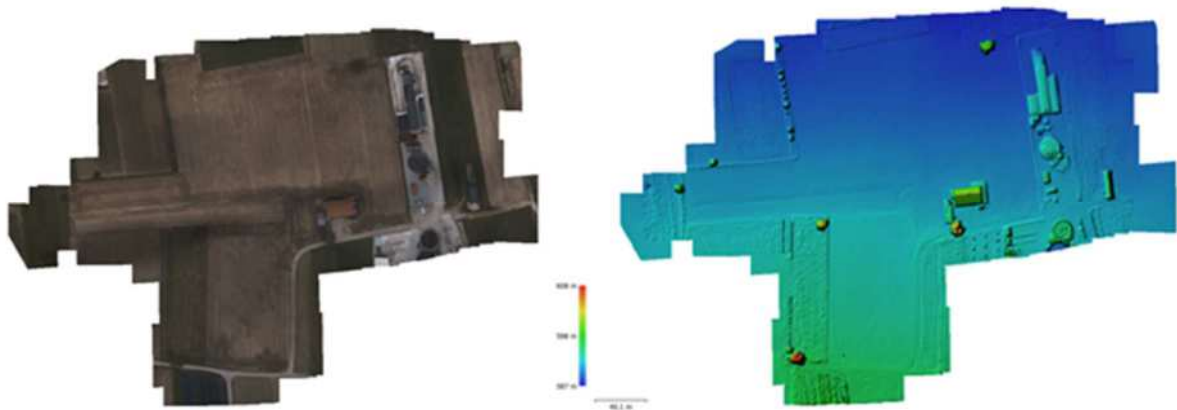


Fig. 32. Orthophoto (gauche) et MNS (droite) générés à partir des données acquises le 22/05/2020 pour le champ de maïs n.2.

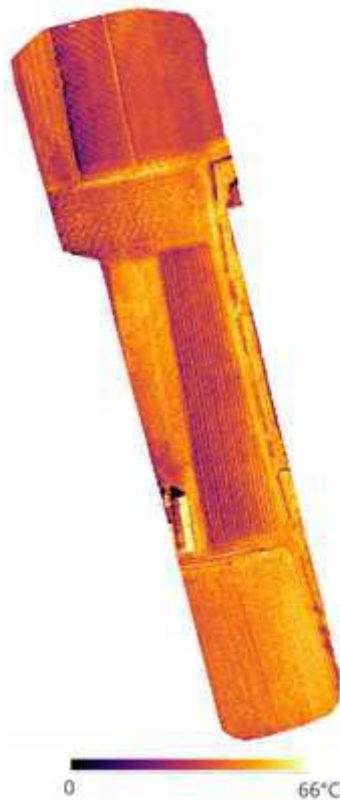


Fig. 33. Orthophoto thermique générée à partir des données acquises le 28/09/2021 pour le champ de maïs n° 1, les haricots et les pommes de terre..

Les opérations sur les différentes bandes radiométriques effectuées dans l'environnement SIG ont ensuite permis d'estimer les indices de végétation (NDVI) et d'humidité du sol (NDWI). La Fig. 34 et la Fig. 35 montrent les résultats obtenus, où l'on peut constater que les valeurs tendant vers 1 pour l'indice NDVI indiquent une plus grande présence de végétation, tandis que pour l'indice NDWI elles représentent une plus grande quantité d'eau.

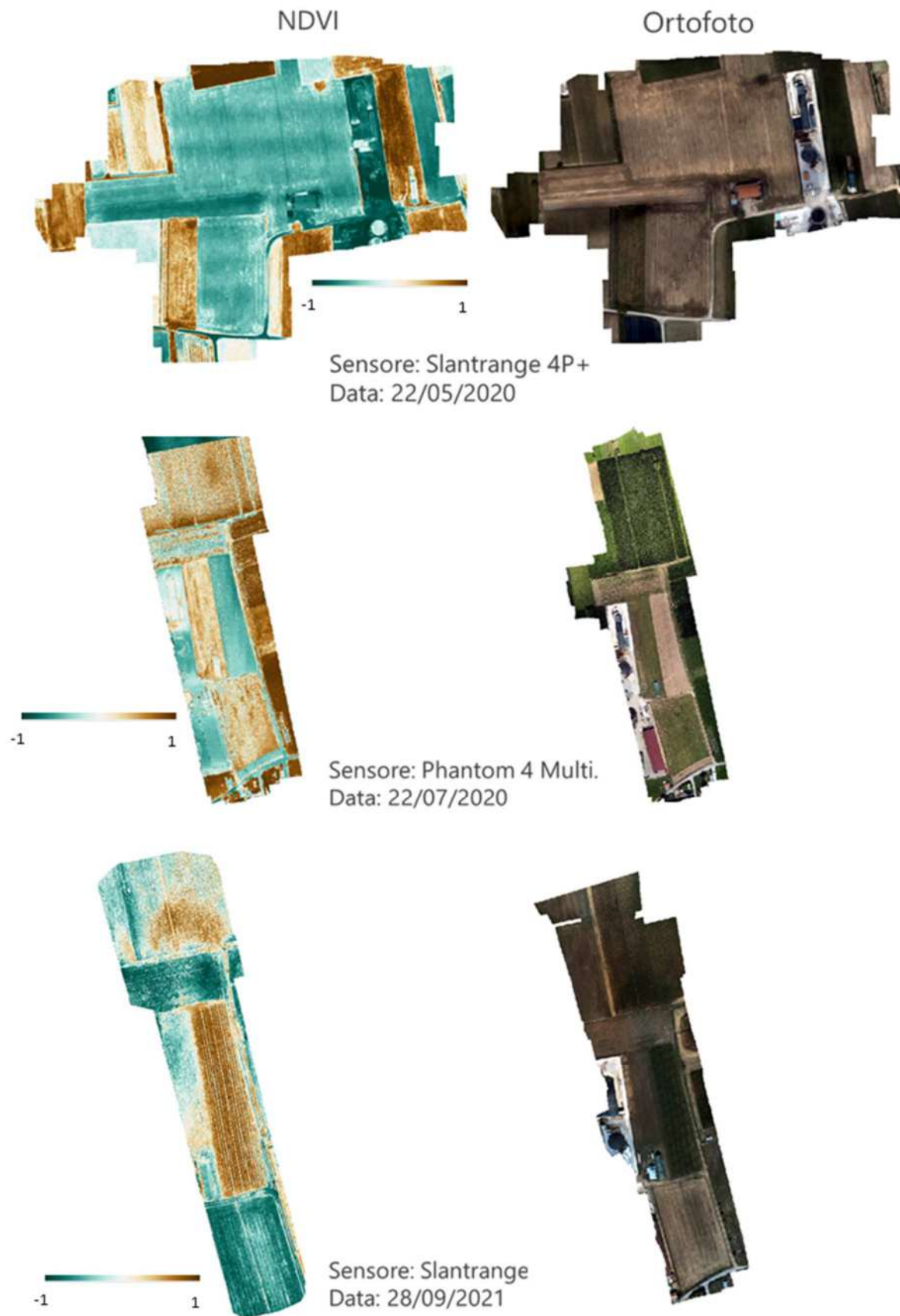


Fig. 34. Carte de l'indice NDVI.



Fig. 35. Carte de l'indice MDWI.

Enfin, en compilant un code spécifique dans Matlab, en utilisant les cartes de l'indice NDVI et les orthophotos de température, il a été possible d'estimer l'indice SMI. En plus des données déjà mentionnées, il est nécessaire de créer un masque qui identifie les zones sur lesquelles effectuer le calcul et qui cache tous les objets sur lesquels il n'est pas significatif d'estimer l'humidité (comme les bâtiments, les véhicules, etc.). Le résultat de cette procédure est une nouvelle carte contenant la valeur SMI estimée dans chaque pixel (Fig. 36). Les valeurs SMI proches de 1 indiquent des sols plus humides.

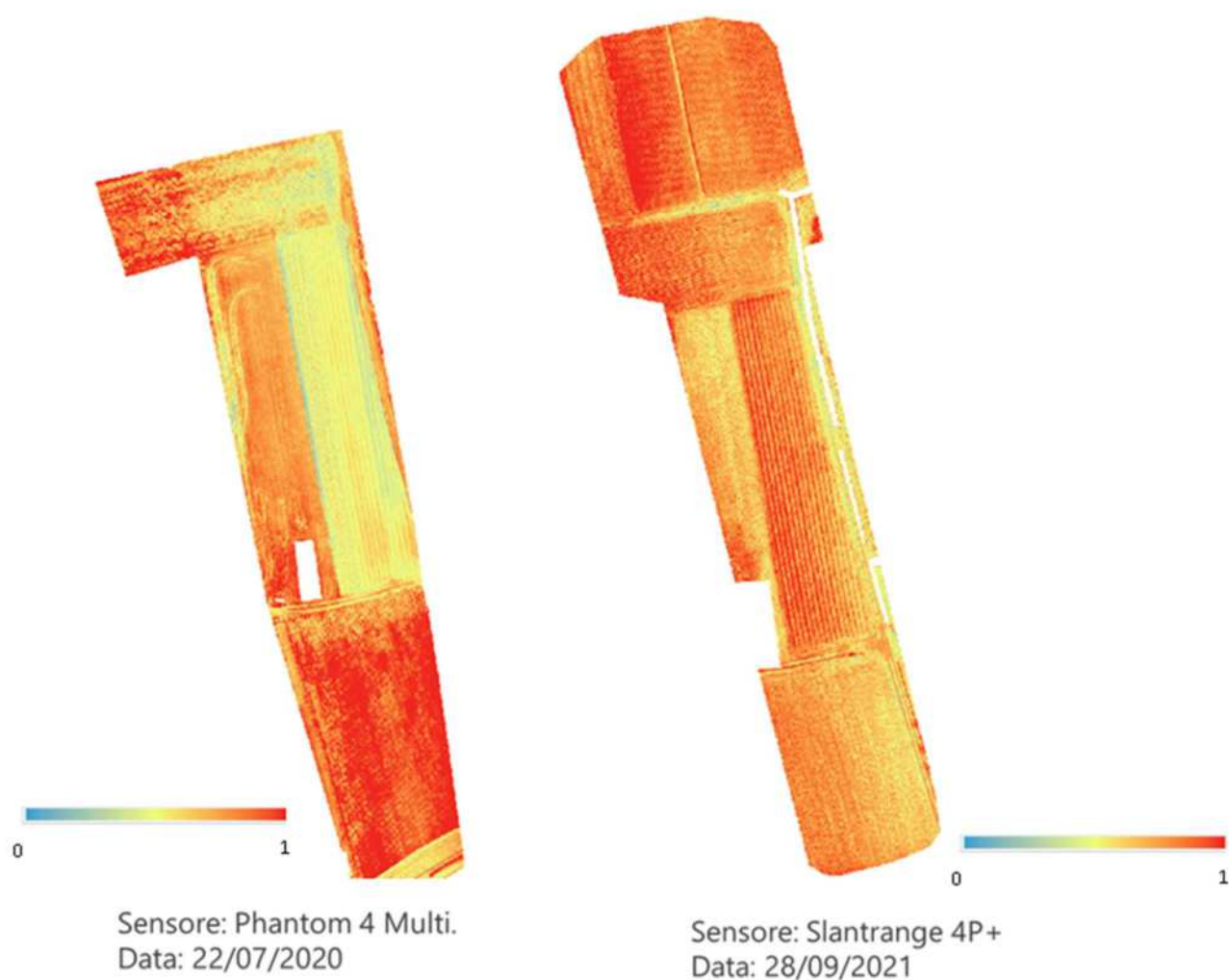


Fig. 36. Carte de l'indice SMI.

La fiabilité de cette estimation a été validée en analysant la corrélation entre les valeurs du SMI et les valeurs d'humidité du sol mesurées avec une sonde TDR au sol. Au cours de la troisième campagne de relevés, la sonde a été utilisée pour mesurer l'humidité du sol en 70 points différents situés dans la zone d'intérêt (champs de maïs 1, de pommes de terre et de haricots) à une profondeur d'environ 10-15 cm de la surface. La position de chaque point de mesure a également

été mesurée par la technique GNSS RTK au moyen d'une perche, en obtenant les coordonnées avec une précision centimétrique ; ces informations ont ainsi permis de comparer les valeurs d'humidité mesurées et celles estimées à partir des produits photogrammétriques.

La Fig. 37 montre le diagramme de dispersion généré par la comparaison des valeurs d'humidité du sol (VWC) mesurées avec la sonde TDR et celles estimées à partir des données du drone (indice SMI), qui montre qu'il existe effectivement une corrélation entre les deux populations de données, bien qu'encore assez faible.

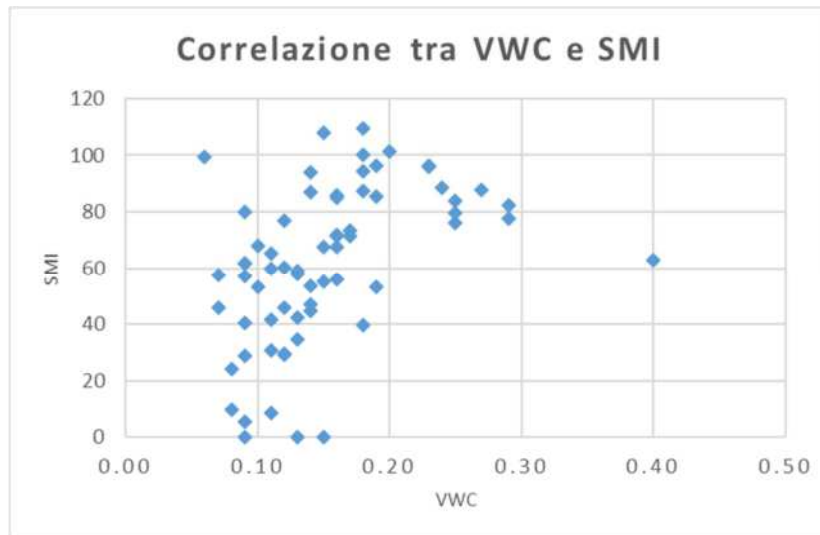


Fig. 37. Corrélation entre la mesure de l'humidité du sol (VWC) et l'estimation de l'indice SMI.

Bibliographie

1. Citrini, D.; Nosedà, G. *Idraulica*; Milan, 1987; ISBN 88-08-08104-4.
2. Carlson, T.N.; Ripley, D.A. On the Relation between NDVI, Fractional Vegetation Cover, and Leaf Area Index. *Remote Sensing of Environment* **1997**, *62*, 241–252, doi:10.1016/S0034-4257(97)00104-1.
3. Saha, A.; Patil, M.; Goyal, V.C.; Rathore, D.S. Assessment and Impact of Soil Moisture Index in Agricultural Drought Estimation Using Remote Sensing and GIS Techniques. *Proceedings* **2018**, *7*, 2, doi:10.3390/ECWS-3-05802.
4. Xu, H. A Study on Information Extraction of Water Body with the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI). *Journal of Remote Sensing* **2005**, *5*, 589–595.