

***Report monitoraggio
della falda freatica -
validazione e analisi
dei dati raccolti***

***Poročilo o spremljanju
podzemne vode –
validacija in analiza
zbranih podatkov***

www.ita-slo.eu/GRENNAT

**Autori: Dott. Barbieri Gianmaria
Dott. Rigoni Edoardo**

**Avtor: Dott. Barbieri Gianmaria
Dott. Rigoni Edoardo**

Partner di progetto/Projektni partnerji:



Comune di
Monfalcone

Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia.
Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GrennatITASLO

Partner di progetto/Projektni partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia.
Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

Sommario

1. Premessa	4
2. Riassunto	5
3. Introduzione	6
4. Misure preliminari all'installazione della strumentazione	9
5. Posizionamento della strumentazione nei piezometri	13
6. Verifica della qualità dei dati acquisiti fino a luglio 2025	14
7. Analisi	17
7.1. Status ed evoluzione delle serie temporali di EC, T, WL	17
7.2. Analisi intra-piezometro	25
7.3. Analisi inter-piezometro	28
7.4. Influenza della marea sulla dinamica della falda e intrusione salina	36
7.5. Influenza delle precipitazioni	44
8. Discussione e implicazioni per la mitigazione dell'intrusione salina	49
9. Conclusioni	50
10. Sintesi dei punti chiave	58

Kazalo

1. Uvodna opomba	4
2. Povzetek	5
3. Uvod	6
4. Predhodne meritve pred namestitvijo opreme	9
5. Namestitve merilne opreme v piezometre	13
6. Preverjanje kakovosti zbranih podatkov do julija 2025	14
7. Analiza	17
7.1. Stanje in razvoj časovnih nizov EC, T, WL	17
7.2. Intra-piezometrijska analiza	25
7.3. Analiza med piezometri	28
7.4. Vpliv plime na dinamiko podzemne vode in vdor slane vode	36
7.5. Vpliv padavin	44
8. Razprava in implicacije za blaženje vdora slane vode	49
9. Zaključki	50
10. Povzetek ključnih točk	58

Partner di progetto/Projektne partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia.
Progetto GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GrennatITASLO

1. Premessa

Questo studio si inquadra nel contratto di ricerca conferito dal Consorzio di Bonifica Veneto Orientale (CBVO) all'Istituto di Geoscienze e Georisorse del Consiglio Nazionale delle Ricerche (IGG-CNR), sede di Padova. L'obiettivo della ricerca è quello di fornire un supporto tecnico-scientifico alle attività di monitoraggio delle acque sotterranee, previste nel progetto Interreg Italia-Slovenia "GRENNAT - Infrastrutture verdi e rete Natura 2000 per lo sviluppo transfrontaliero sostenibile". Il presente rapporto illustra i risultati delle attività svolte dal CNR-IGG nell'ambito della Validazione dei dati (Fase 3) e dell'Analisi dei dati (Fase 4). Tali attività hanno riguardato la verifica e validazione delle misure raccolte, nonché l'analisi dell'andamento dei parametri monitorati dai sensori installati nei piezometri. L'obiettivo è stato quello di definire, in termini generali, la presenza, l'entità e la tendenza dell'interessamento della falda libera da parte del cuneo salino, individuare eventuali accorgimenti per il corretto funzionamento delle sei stazioni di monitoraggio e contribuire al miglioramento della comprensione dei processi di intrusione salina nell'area costiera.

1. Uvodne opombe

Ta študija je del raziskovalne pogodbe, ki jo je Konzorcij za melioracijo vzhodnega Veneta (Consorzio di Bonifica Veneto Orientale - CBVO) dodelil Institutu za geoznanosti in geovire Nacionalnega sveta za raziskave (IGG-CNR), izpostava v Padovi. Cilj raziskave je zagotoviti tehnično-znanstveno podporo dejavnostim spremljanja podzemnih voda, predvidenih v projektu Interreg Italija-Slovenija "GRENNAT - Zelene infrastrukture in omrežje Natura 2000 za trajnostni čezmejni razvoj". To poročilo prikazuje rezultate dejavnosti, ki jih je izvedel CNR-IGG v okviru Validacije podatkov (3. faza) in Analize podatkov (4. faza). Te dejavnosti so obsegale preverjanje in validacijo zbranih meritev ter analizo trendov parametrov, ki jih spremljajo senzorji, nameščeni v piezometrih. Cilj je bil splošno opredeliti prisotnost, obseg in trend vpliva slanega klina na prosto podtalnico, ugotoviti morebitne ukrepe za pravilno delovanje šestih merilnih postaj ter prispevati k boljšemu razumevanju procesov vdora slane vode na obalnem območju.

Partner di progetto/Projektni partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT**2. Riassunto**

Nella prima fase del terzo periodo di lavoro, sono state definite le profondità di installazione dei sensori multiparametrici (conducibilità elettrica, temperatura e livello della falda) in ciascun piezometro. Questa scelta è stata calibrata in base ai risultati delle tre campagne di profilatura verticale CTD, che hanno fornito una dettagliata descrizione della distribuzione verticale della conducibilità elettrica nell'acquifero. La seconda fase ha riguardato l'analisi dei dati acquisiti durante il primo semestre di monitoraggio, attraverso la quale è stato possibile delineare lo stato della contaminazione salina nella falda e valutare alcune forzanti, che ne governano la dinamica evolutiva. Per l'analisi dell'influenza della forzante mareale (WL_{mar}) sul livello piezometrico (WL) e sulla salinità (EC) del sistema di 7 piezometri costieri sono stati selezionati due periodi con ridotte precipitazioni, per minimizzare gli effetti della pioggia. Sono stati utilizzati coefficienti di correlazione e funzioni di cross-correlazione per quantificare tempi (lag) e intensità della risposta. I risultati mostrano correlazioni elevate e con lag di poche ore nei piezometri costieri, mentre verso l'interno la correlazione diminuisce e i lag aumentano. Per EC, la risposta è più lenta e dipendente dal sito. Le analisi confermano un gradiente costa-entroterra e una maggiore sensibilità dello strato superficiale (2–5 m) rispetto a quello profondo (5–8 m). Sono state inoltre valutate le correlazioni con la precipitazione, che mostrano risposte rapide e positive per WL e prevalentemente negative per EC (soprattutto superficiale), indicando un effetto diluitivo della ricarica meteorica.

2. Povzetek

V prvi fazi tretjega delovnega obdobja so bile določene globine namestitve večparametričnih senzorjev (električna prevodnost, temperatura in raven podtalnice) v vsakem piezometru. Ta izbira je bila prilagojena glede na rezultate treh kampanj vertikalnega profiliranja s sondo CTD, ki so zagotovile podroben opis vertikalne porazdelitve električne prevodnosti v vodonosniku. Druga faza je obsegala analizo podatkov, pridobljenih v prvem polletju spremljanja, s pomočjo katerih je bilo mogoče orisati stanje slane kontaminacije v podtalnici in oceniti nekatere gonilne sile, ki upravljajo njeno razvojno dinamiko. Za analizo vpliva plimovanja (WL_{mar}) na piezometrično raven (WL) in slanost (EC) sistema 7 obalnih piezometrov sta bili izbrani dve obdobji z malo padavinami, da bi zmanjšali vpliv dežja. Za kvantifikacijo časovnega zamika (lag) in intenzivnosti odziva so bili uporabljeni korelacijski koeficienti in funkcije navzkrižne korelacije. Rezultati kažejo visoke korelacije s kratkim zamikom le nekaj ur v obalnih piezometrih, medtem ko proti notranjosti korelacija upada, zamiki pa se povečujejo. Za EC je odziv počasnejši in odvisen od same lokacije. Analize potrjujejo gradient obala-notranjost in večjo občutljivost površinske plasti (2–5 m) v primerjavi z globoko plastjo (5–8 m). Ocenjene so bile tudi korelacije s padavinami, ki kažejo hitre in pozitivne odzive za WL ter pretežno negativne odzive za EC (predvsem površinske), kar nakazuje na učinek redčenja zaradi napajanja z meteorno vodo.

Partner di progetto/Projektne partnerji:

Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

3. Introduzione

L'intrusione salina rappresenta una delle principali minacce agli acquiferi costieri, in quanto riduce la disponibilità di risorse idriche dolci e ne limita l'utilizzo a fini potabili e irrigui. Tra i fattori che ne modulano l'evoluzione, la marea svolge un ruolo cruciale nel condizionare il carico idraulico alla costa, influenzando sia l'andamento piezometrico sia i processi di trasporto della salinità. Parallelamente, la relazione tra precipitazioni e risposta della falda costituisce un tema centrale nello studio degli acquiferi costieri, poiché la ricarica meteorica può modificare i livelli idrici e i parametri chimico-fisici con tempi e modalità variabili. In contesti litoranei, tuttavia, tale risposta è spesso modulata o mascherata dall'interazione con altri fattori, tra cui l'intrusione salina, le oscillazioni mareali e i prelievi antropici. Obiettivo del presente studio è dunque quello di analizzare in dettaglio tali relazioni mediante un approccio integrato che combina filtraggio mirato dei dati, analisi delle correlazioni con lag temporali e rappresentazioni grafiche avanzate.

Il contesto di riferimento è la costa veneta, dove l'intrusione salina negli acquiferi è stata ampiamente documentata in diversi settori, ma risulta ancora poco investigata nell'area del Veneto orientale, sede del presente lavoro. In altri comparti regionali, numerosi progetti hanno contribuito a delineare l'estensione e le dinamiche del fenomeno. Tra questi, il progetto ISES (Saltwater Intrusion and Land Subsidence, avviato nel 1999), finalizzato a quantificare e controllare i processi di salinizzazione, e il progetto RITMARE (The Italian Research for the Sea, 2011–2013), coordinato dal CNR e finanziato

3. Uvod

Vdor slane vode predstavlja eno glavnih groženj obalnim vodonosnikom, saj zmanjšuje razpoložljivost virov sladke podzemne vode ter omejuje njihovo uporabo za oskrbo s pitno vodo in namakanje. Med dejavniki, ki vplivajo na njegov razvoj, igra ključno vlogo plimovanje, ki pogojuje hidravlični tlak na obali ter vpliva tako na piezometrični potek kot tudi na procese transporta slanosti. Vzporedno s tem predstavlja odnos med padavinami in odzivom podtalnice osrednjo temo pri preučevanju obalnih vodonosnikov, saj lahko napajanje z meteorno vodo spremeni vodne ravni ter kemijsko-fizikalne parametre s spremenljivimi časovnimi zamiki in načini. V obmorskih okoljih pa je ta odziv pogosto moduliran ali prikrit zaradi medsebojnega vpliva drugih dejavnikov, vključno z vdorom slane vode, nihanjem plimovanja in antropogenim odvzemom vode. Cilj te študije je zato podrobno analizirati te odnose z integriranim pristopom, ki združuje usmerjeno filtriranje podatkov, analizo korelacij s časovnimi zamiki ter napredne grafične prikaze.

Referenčni kontekst je beneška obala, kjer je bil vdor slane vode v vodonosnike obsežno dokumentiran v različnih sektorjih, vendar je na območju vzhodnega Veneta, ki je predmet tega dela, še vedno pomanjkljivo raziskan. V drugih regionalnih sektorjih so številni projekti prispevali k orisu obsega in dinamike tega pojava. Med njimi sta projekt ISES (Saltwater Intrusion and Land Subsidence, začel leta 1999), namenjen kvantifikaciji in nadzoru procesov salinizacije, ter projekt RITMARE (The Italian Research for the Sea, 2011–2013), ki ga je usklajeval CNR, financiralo pa ministrstvo MIUR in s katerim

Partner di progetto/Projektne partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

dal MIUR, che ha avviato le prime attività di monitoraggio in aree costiere, evidenziando la forte variabilità stagionale dell'intrusione. Successivamente, studi sperimentali condotti dal CNR mediante tecniche geofisiche avanzate, tra cui indagini Airborne Electromagnetic (AEM), hanno consentito di mappare il fronte salino fino a diverse decine di metri di profondità e a chilometri di distanza dalla laguna e dal mare.

Negli anni più recenti, il progetto MoST (Monitoring Sea-water intrusion in coastal aquifers and Testing pilot projects for its mitigation, Interreg Italy–Croatia 2014–2020) ha istituito siti pilota, come quello di Chioggia, per osservare l'avanzamento del cuneo salino e sperimentare contromisure innovative supportate da campagne geofisiche e modellazioni numeriche. A esso è seguito il progetto SeCURE (Saltwater intrusion and climate change: monitoring, countermeasures and informed governance, Interreg Italy–Croatia 2014–2020), che ha ampliato le reti di monitoraggio e consolidato buone pratiche di gestione, con l'obiettivo di trasferire le esperienze maturate ad altri contesti costieri dell'Adriatico. Attualmente, il progetto SWAMrisk (Subsurface WATER monitoring and Management to prevent drought risk in coastal systems, Interreg Italy–Croatia 2021–2027) sta estendendo le attività di monitoraggio e di analisi dell'intrusione salina e della disponibilità di acqua dolce o a bassa salinità lungo l'intera fascia costiera compresa tra il fiume Brenta e il Po, proponendo nuove prospettive di gestione congiunta a scala transfrontaliera grazie alla collaborazione tra gruppi di ricerca italiani e croati.

so se začele prve aktivnosti spremljanja na obalnih območjih, ki so opozorile na močno sezonsko spremenljivost vdora slane vode. Pozneje so eksperimentalne študije, ki jih je CNR izvedel z naprednimi geofizikalnimi tehnikami, vključno z aeromagnetnimi elektromagnetnimi raziskavami (AEM), omogočile kartiranje slane fronte do globine več deset metrov in do razdalje več kilometrov od lagune in morja.

V zadnjih letih je projekt MoST (Monitoring Sea-water intrusion in coastal aquifers and Testing pilot projects for its mitigation, Interreg Italija–Hrvaška 2014–2020) vzpostavil pilotna območja, kot je tisto v Chioggi, za opazovanje napredovanja slanega klina in preizkušanje inovativnih ukrepov, podprtih z geofizikalnimi kampanjami in numeričnim modeliranjem. Sledil mu je projekt SeCURE (Saltwater intrusion and climate change: monitoring, countermeasures and informed governance, Interreg Italija–Hrvaška 2014–2020), ki je razširil merilna omrežja in utrdil dobre prakse upravljanja z namenom prenosa pridobljenih izkušenj na druga obalna območja Jadrana. Trenutno projekt SWAMrisk (Subsurface WATER monitoring and Management to prevent drought risk in coastal systems, Interreg Italija–Hrvaška 2021–2027) širi dejavnosti spremljanja in analiziranja vdora slane vode ter razpoložljivosti sladke vode ali vode z nizko slanostjo vzdolž celotnega obalnega pasu med reko Brento in reko Pad. Projekt ponuja nove perspektive skupnega upravljanja na čezmejni ravni zahvaljujoč sodelovanju med italijanskimi in hrvaškimi raziskovalnimi skupinami.

Partner di progetto/Projektne partnerji:

Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

Dalle ricerche sviluppate negli ultimi anni emerge chiaramente come la comprensione dei processi di intrusione salina, o più in generale degli scambi tra acque continentali e marine, superficiali e sotterranee, richieda innanzitutto l'istituzione di una rete osservativa dedicata, capace di garantire continuità e affidabilità nella raccolta dei dati nel lungo periodo. Solo una rete strutturata e stabile di monitoraggio, basata su sensori multiparametrici e protocolli standardizzati, può consentire di osservare in maniera sistematica l'evoluzione spazio-temporale dei principali parametri idrogeologici e idrochimici. In sostanza, per gli acquiferi costieri si rende necessaria una rete di osservazione analoga alle stazioni meteorologiche, che nel tempo hanno reso possibile la comprensione dei processi atmosferici e la costruzione di modelli previsionali robusti.

La nuova rete di monitoraggio GRENNAT (Fig. 1) progettata nella Fase 1 (Rapporto 1) e istituita nella Fase 2 (Rapporto 2), insieme alle modalità operative adottate e all'approccio analitico proposto, trae origine dal trasferimento di conoscenze e metodologie sviluppate nell'ambito del progetto SWAMrisk. La rete GRENNAT costituisce quindi il primo contributo strutturato allo studio dell'intrusione salina nelle falde sotterranee del Veneto orientale. Questa iniziativa permette di colmare un rilevante gap conoscitivo e di gettare le basi per lo sviluppo di modelli idrogeologici predittivi, scenari evolutivi e strategie di mitigazione a supporto della pianificazione territoriale e della tutela sostenibile delle risorse idriche.

Iz raziskav, razvitih v zadnjih letih, jasno izhaja, da razumevanje procesov vdora slane vode oziroma splošneje izmenjave med celinskimi in morskimi, površinskimi in podzemnimi vodami, zahteva predvsem vzpostavitev namenskega opazovalnega omrežja, ki je sposobno zagotoviti neprekinjenost in zanesljivost pri zbiranju podatkov v dolgem obdobju. Samo strukturirano in stabilno merilno omrežje, ki temelji na večparametrijskih senzorjih in standardiziranih protokolih, lahko omogoči sistematično opazovanje prostorsko-časovnega razvoja glavnih hidrogeoloških in hidrokemijskih parametrov. V bistvu je za obalne vodonosnike potrebno opazovalno omrežje, podobno meteorološkim postajam, ki so skozi čas omogočile razumevanje atmosferskih procesov in izgradnjo robustnih napovednih modelov.

Novo merilno omrežje GRENNAT (Slika 1), zasnovano v 1. fazi (Poročilo 1) in vzpostavljeno v 2. fazi (Poročilo 2), skupaj z usvojenimi operativnimi metodami in predlaganim analitičnim pristopom, izvira iz prenosa znanja in metodologij, razvitih v okviru projekta SWAMrisk. Omrežje GRENNAT tako predstavlja prvi strukturiran prispevek k proučevanju vdora slane vode v podzemne vode vzhodnega Veneta. Ta pobuda omogoča zapolnitev pomembne vrzeli v znanju ter postavlja temelje za razvoj napovednih hidrogeoloških modelov, razvojnih scenarijev in strategij ublažitve v podporo teritorialnemu načrtovanju in trajnostnemu varovanju vodnih virov.

Partner di progetto/Projektne partnerji:

Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

4. Misure preliminari all'installazione della strumentazione

Successivamente all'installazione dei tubi piezometrici, sono state eseguite alcune campagne di acquisizione di profili verticali di conducibilità elettrica (EC), temperatura (T) nella colonna d'acqua dei piezometri e misure del livello della falda al fine di individuare le profondità ottimali per l'installazione dei sensori (Fig. 1).

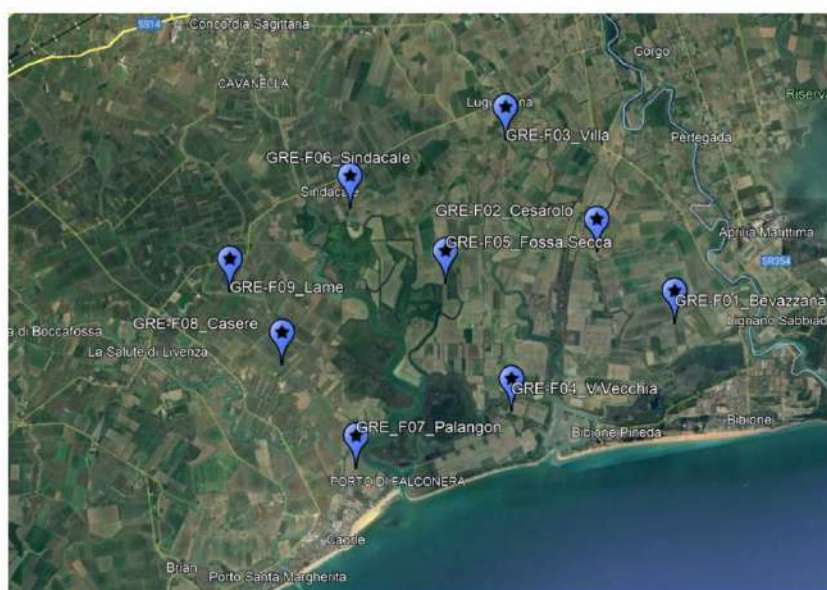


Figura 1/Slika 1

L'analisi dei profili verticali di conducibilità elettrica (EC) nei nove piezometri della rete appena istituita evidenzia una dinamica temporale e spaziale molto chiara dell'intrusione salina (Tab. 1, Fig. 2).

È importante sottolineare che soltanto durante la campagna di agosto 2024 i profili di EC sono stati rilevati lungo l'intera colonna d'acqua dei piezometri mediante CTD; nelle campagne di settembre e novembre 2024, invece, l'impiego del conduttivimetro ha limitato

4. Predhodne meritve pred namestitvijo opreme

Po namestitvi piezometričnih cevi so bile izvedene kampanje merjenja vertikalnih profilov električne prevodnosti (EC) in temperature (T) v vodnem stolpcu piezometrov ter meritve ravni podtalnice, z namenom določitve optimalnih globin za namestitev senzorjev (Slika 1).

Analiza vertikalnih profilov električne prevodnosti (EC) v devetih piezometrih novoustanovljenega omrežja kaže na zelo jasno časovno in prostorsko dinamiko vdora slane vode (Tab. 1, Slika 2). Pomembno je poudariti, da so bili profili EC le med kampanjo avgusta 2024 izmerjeni vzdolž celotnega vodnega stolpca piezometrov s sondo CTD; v kampanjah septembra in novembra 2024 pa je uporaba konduktometra omejila

Partner di progetto/Projektne partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

la profondità di acquisizione. Sebbene tali dati siano stati sufficienti a definire le profondità ottimali di installazione dei sensori fissi, non consentono un confronto pienamente omogeneo dell'evoluzione dell'intrusione salina.

globino merjenja. Čeprav so bili ti podatki zadostni za določitev optimalnih globin namestitve fiksnih senzorjev, ne omogočajo popolnoma homogene primerjave razvoja vdora slane vode.

Piezometro	ago-24	set-24	nov-24
GRE-F01 Bevazzana	12.0 – 26.0	6.3 – 10.0	3.3 – 4.0
GRE-F02 Cesarolo	3.2 – 16.9	3.5 – 17.6	5.0 – 17.1
GRE-F03 Villa	0.8 – 1.5	0.3 – 1.0	0.7 – 0.8
GRE-F04 ValleVecchia	11.0 – 24.8	9.1 – 22.1	3.6 – 17.8
GRE-F05 Fossa	5.9 – 11.9	4.0 – 9.5	5.0 – 5.1
GRE-F06 Sindacale	6.4 – 12.6	– (non rilevato)	5.0 – 10.0
GRE-F07 Palangon	40.5 – 45.4	19.9 – 20.9	40.5 – 42.0
GRE-F08 Casere	3.4 – 12.4	2.0 – 3.9	2.8 – 4.8
GRE-F09 Lame	1.9 – 2.8	2.2 – 2.4	2.4 – 3.6

Tab. 1

I piezometri costieri, rappresentati GRE-F04 ValleVecchia e GRE-F07 Palangon, mostravano già ad agosto 2024 condizioni gravissime di salinità, con range di EC rispettivamente di 11–25 mS/cm e 41–45 mS/cm. A settembre i valori rimanevano molto elevati, tra 9 e 22 mS/cm a Valle Vecchia e attorno a 20 mS/cm a Palangon, mentre a novembre si confermavano condizioni da gravi a gravissime, comprese tra 4 e 18 mS/cm e tra 41 e 42 mS/cm. GRE-F01 Bevazzana presentava ad agosto valori già gravissimi compresi tra 12 e 26 mS/cm, con una tendenza alla diminuzione nei mesi successivi: tra 6 e 10 mS/cm a settembre, corrispondenti a condizioni molto gravi, e tra 3 e 4 mS/cm a novembre, interpretabili come gravi

Obalni piezometri, ki jih predstavljata GRE-F04 ValleVecchia in GRE-F07 Palangon, so že avgusta 2024 kazali zelo kritične razmere glede slanosti, z razponi EC med 11–25 mS/cm oziroma 41–45 mS/cm. Septembra so vrednosti ostale zelo visoke, med 9 in 22 mS/cm v Valle Vecchia in okoli 20 mS/cm v Palangonu, medtem ko so se novembra potrdile resne do zelo kritične razmere, med 4 in 18 mS/cm ter med 41 in 42 mS/cm. GRE-F01 Bevazzana je že avgusta kazal zelo kritične vrednosti med 12 in 26 mS/cm, s trendom upadanja v naslednjih mesecih: med 6 in 10 mS/cm septembra (kar ustreza zelo resnim razmeram) ter med 3 in 4 mS/cm novembra, kar se lahko interpretira kot resne razmere.

Partner di progetto/Proiettni partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



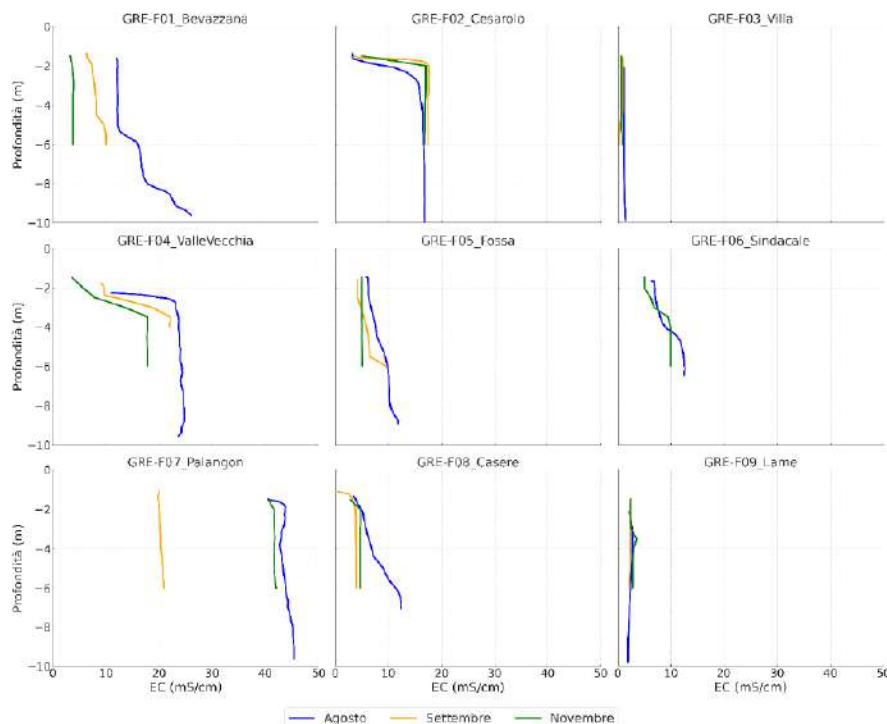


Figura 2/Slika 2

I piezometri intermedi, GRE-F02 Cesarolo, GRE-F05 Fossa e GRE-F06 Sindacale, mostrano dinamiche critiche ma differenziate. Cesarolo mostrava una situazione da grave a gravissima con valori tra 3 e 17 mS/cm sia in agosto sia in settembre, e con un peggioramento a novembre, tra 5 e 17 mS/cm, in condizioni molto gravi o gravissime anche per la parte superficiale. Fossa registrava ad agosto valori tra 6 e 12 mS/cm, quindi molto gravi o gravissimi, mantenuti a settembre con un intervallo di 4–10 mS/cm e pressoché invariati a novembre con circa 5 mS/cm. Sindacale (privo di dati a settembre) evidenziava ad agosto condizioni molto gravi con valori tra 6 e 13 mS/cm e confermava a novembre un quadro simile con EC tra 5 e 10 mS/cm.

Vmesni piezometri, GRE-F02 Cesarolo, GRE-F05 Fossa e GRE-F06 Sindacale, kažejo kritično, a diferencirano dinamiko. Cesarolo je kazal resne do zelo kritične razmere z vrednostmi med 3 in 17 mS/cm tako avgusta kot septembra, z novembrskim poslabšanjem na 5 do 17 mS/cm, kar predstavlja zelo resne ali zelo kritične razmere tudi za površinski del. Fossa je avgusta beležila vrednosti med 6 in 12 mS/cm, torej zelo resne ali zelo kritične, ki so se ohranile tudi septembra z razponom 4–10 mS/cm in ostale skoraj nespremenjene novembra s približno 5 mS/cm. Sindacale (brez podatkov za september) je avgusta kazal zelo resne razmere z vrednostmi med 6 in 13 mS/cm, novembra pa je potrdil podobno sliko z EC med 5 in 10 mS/cm.

Partner di progetto/Projektni partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

I piezometri interni, rappresentati da GRE-F03 Villa, GRE-F08 Casere e GRE-F09 Lama, partivano da condizioni migliori ma evidenziavano segnali di progressiva salinizzazione. Villa manteneva valori molto bassi: 0,8–1,5 mS/cm in agosto, 0,3–1,0 mS/cm a settembre e 0,7–0,8 mS/cm a novembre, indicando la persistenza di acqua dolce. Casere risultava più variabile, con valori tra 3 e 12 mS/cm in agosto, quindi da gravi a gravissimi, tra 0,7 e 3,9 mS/cm a settembre, dolci o al limite dell'allarme, e tra 2,8 e 4,8 mS/cm a novembre, da condizioni di allarme a gravi. Lama mostrava valori compresi tra 1,9 e 2,8 mS/cm in agosto, classificabili come allarme, tra 2,2 e 2,4 mS/cm a settembre, ancora in allarme, e tra 2,4 e 3,6 mS/cm a novembre, quindi da allarme a grave. La sintesi dello status dell'intrusione salina è riportata in Fig. 3

Notranji piezometri, ki jih predstavljajo GRE-F03 Villa, GRE-F08 Casere in GRE-F09 Lama, so začeli v boljših razmerah, vendar so kazali znake postopnega slajenja. Villa je ohranjala zelo nizke vrednosti: 0,8–1,5 mS/cm avgusta, 0,3–1,0 mS/cm septembra in 0,7–0,8 mS/cm novembra, kar kaže na stalno prisotnost sladke vode. Casere je bil bolj spremenljiv, z vrednostmi med 3 in 12 mS/cm avgusta (torej od resnih do zelo kritičnih), med 0,7 in 3,9 mS/cm septembra (sladka voda ali na meji opozorila) ter med 2,8 in 4,8 mS/cm novembra (od opozorilnih do resnih razmer). Lama je avgusta kazal vrednosti med 1,9 in 2,8 mS/cm, ki se uvrščajo v razred opozorila, septembra med 2,2 in 2,4 mS/cm (še vedno opozorilo) ter novembra med 2,4 in 3,6 mS/cm (torej od opozorila do resnih razmer). Povzetek stanja vdora slane vode je prikazan na Sliki 3.

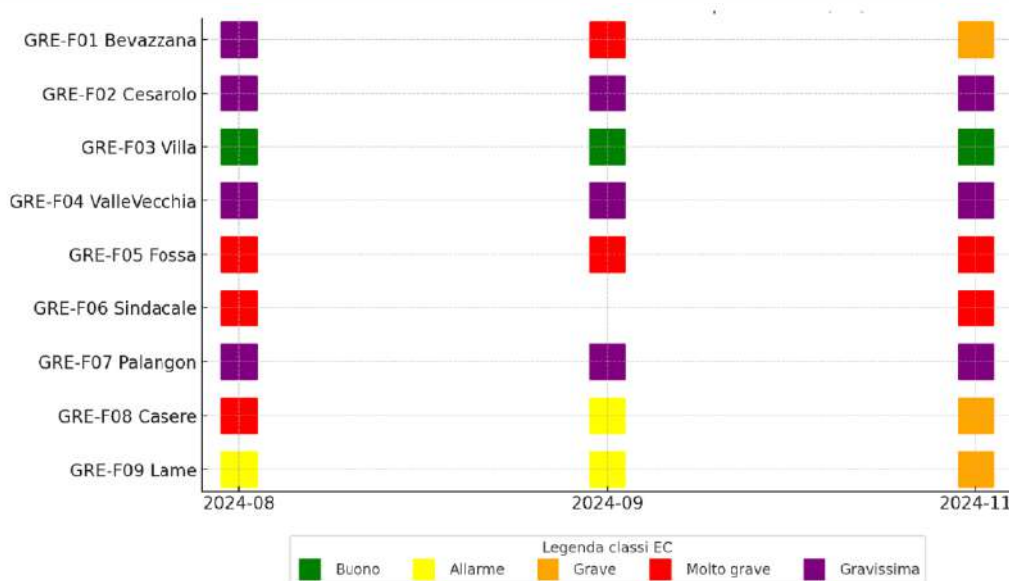


Figura 3/Slika 3

Partner di progetto/Projektni partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

5. Posizionamento della strumentazione nei piezometri

Sulla base di queste misure, dei log litologici ottenuti dai carotaggi e sulle esperienze acquisite in altri contesti analoghi (e.g., Progetto MoST, Progetto SWAMrisk), si è deciso per l'installazione di due sensori per la misura di CE e T nella parte superiore e inferiore del tratto filtrato di ogni piezometro e del sensore di livello della falda. In Tab. 2 è riportata la sintesi delle posizioni dei tratti filtrati, la posizione dei sensori e le litologie prevalenti dell'acquifero. Nelle analisi che seguono, per semplificare, le profondità dei sensori di CE e T sono indicate come 2-5 e 5-8 m, rispettivamente per il sensore superiore e inferiore.

5. Namestitev opreme v piezometre

Na podlagi teh meritev, litoloških profilov, pridobljenih z jedrovanjem, in izkušenj iz drugih podobnih kontekstov (npr. projekt MoST, progetto SWAMrisk), je bila sprejeta odločitev o namestitvi dveh sensorjev za merjenje EC (elektriche prevodnosti) in T (temperature) v zgornjem in spodnjem delu filtrirnega odseka vsakega piezometra ter sensorja za raven podtalnice. V Tab. 2 je naveden povzetek položajev filtrirnih odsekov, položajev sensorjev in prevladujočih litologij vodonosnika. V naslednjih analizah so zaradi poenostavitve globine sensorjev EC in T navedene kot 2-5 m oziroma 5-8 m, ločeno za zgornji in spodnji sensor.

Piezometro nome	Tratto filtrato (m)	Litologia prevalente
GRE-F01_BEVAZZANA	1 - 10	prevalentemente limoso nei primi 3 metri, mentre tra 5 e 10 m si osserva una maggiore componente di sabbia
GRE-F02_CESAROLO	1 - 7	sabbioso e limoso fino alla profondità di circa 6 m, mentre nel profilo di terreno sottostante, oltre i 7,5 m, si è progressivamente osservato l'aumento della matrice argillosa
GRE-F03_VILLA	1 - 10	principalmente sabbioso a partire dai 2,5 m di profondità e fino alla fine del carotaggio
GRE-F04_VALLEVECCHIA	1 - 10	alla profondità di 4,5 m, la composizione del terreno risulta principalmente sabbiosa fino ai 10 m
GRE-F05_FOSSA SECCA	1 - 10	principalmente limosa tra 3,5 e 8,5 m di profondità, mentre tra 8,5 e 10 m il contenuto di sabbia aumenta
GRE-F06_SINDACALE	1 - 7	limoso copreso tra 1,75 m e 4,5 m, che poi tra 4,5 e 8 m di profondità diventa principalmente argilloso e compatto
GRE-F07_PALANGON	1 - 10	matrice principalmente sabbiosa compresa tra 2 e 10 m di profondità
GRE-F08_CASERE	1 - 7	tra i 2 e i 6 metri uno strato di terreno tendenzialmente limoso, mentre oltre i 6 metri il terreno diventa molto più compatto e argilloso
GRE-F09_LAME	1 - 10	prevalenza di limo e sabbia compreso tra 2 e 10 m di profondità

Tab. 2

Partner di progetto/Proiettni partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Proiett GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT**6. Verifica della qualità dei dati acquisiti fino a luglio 2025**

I sensori sono stati installati nei diversi piezometri tra dicembre 2024 e gennaio 2025. I piezometri GRE-F03_Villa e GREN-F09_Lame, situati più all'interno della pianura costiera, sono al momento strumentati solo per la misura del livello di falda (WL); l'integrazione con sensori di conducibilità elettrica (EC) e temperatura (T) è prevista in una fase successiva. Nel frattempo, la EC è stata rilevata manualmente. Le registrazioni dei primi giorni mostrano una fisiologica fase di assestamento dei parametri EC, WL e T e, in alcuni casi, incertezze sulla qualità del dato.

Per garantire un confronto omogeneo tra serie e ridurre l'influenza di questa fase iniziale, è stata assunta la data comune di inizio al 10/01/2025 per tutti i piezometri.

Il periodo analizzato in questo rapporto è compreso tra il 10/01/2025 e il 31/07/2025. All'interno di questo intervallo sono state riscontrate lacune di acquisizione, in particolare nei piezometri GRE-F04_Valle, GRE-F06_Sindacale (Tab. 3, Fig. 4) e GRE-F03_Villa, che non hanno compromesso l'analisi complessiva relativa all'intrusione salina nell'acquifero.

Sono stati rilevati anche dati anomali: i sensori EC (2–5 m) di GRE-F02_Cesarolo e GRE-F04_Valle hanno registrato valori insolitamente bassi, in alcuni casi persino negativi; il sensore EC (2–5 m) di GRE-F07_Palangon ha invece superato 60 mS/cm e registrato oscillazioni ad alta frequenza di oltre 50 mS/cm. Queste anomalie saranno sottoposte a verifiche mirate per distinguere eventuali malfunzionamenti strumentali da effettivi segnali della dinamica del processo.

6. Preverjanje kakovosti pridobljenih podatkov do julija 2025

Senzorji so bili nameščeni v različne piezometre med decembrom 2024 in januarjem 2025. Piezometra GRE-F03_Villa in GREN-F09_Lame, ki se nahajata bolj v notranjosti obalne ravnice, sta trenutno opremljena le za merjenje ravni podtalnice (WL); dopolnitev s senzorji za električno prevodnost (EC) in temperaturo (T) je predvidena v kasnejši fazi. Medtem se je EC merila ročno. Zapisi iz prvih dni kažejo fiziološko fazo uravnavanja parametrov EC, WL in T ter v nekaterih primerih negotovosti glede kakovosti podatkov.

Da bi zagotovili homogeno primerjavo med serijami in zmanjšali vpliv te začetne faze, je bil kot skupni datum začetka za vse piezometre določen 10. 1. 2025.

Obdobje, analizirano v tem poročilu, obsega čas med 10. 1. 2025 in 31. 7. 2025. Znotraj tega intervala so bile ugotovljene vrzeli v zajemanju podatkov, zlasti v piezometrih GRE-F04_Valle, GRE-F06_Sindacale (Tab. 3, Slika 4) in GRE-F03_Villa, kar pa ni ogrozilo celotne analize glede vdora slane vode v vodonosnik.

Zaznani so bili tudi anomalni podatki: senzorji EC (2–5 m) na postajah GRE-F02_Cesarolo in GRE-F04_Valle so zabeležili nenavadno nizke vrednosti, v nekaterih primerih celo negativne; senzor EC (2–5 m) na postaji GRE-F07_Palangon pa je presegel 60 mS/cm in zabeležil visokofrekvenčne oscilacije z amplitudo nad 50 mS/cm. Te anomalije bodo predmet usmerjenih preverjanj, da bi razlikovali med morebitnimi okvarami instrumentov in dejanskimi signali dinamike procesa.

Partner di progetto/Projektни partnerji:

Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

Numero registrazioni effettuate					
Piezometro	EC_2_5m	Temp_2_5m	WL_2_5m	EC_5_8m	Temp_5_8m
GRE-F01_Bevazzana	4873	4873	4873	4873	4873
GRE-F02_Cesarolo	4728	4873	4873	4873	4873
GRE-F04_Valle	3660	3660	3478	3660	3660
GRE-F05_Fossa Secca	4873	4873	4873	4873	4873
GRE-F06_Sindacale	4873	4873	1990	4873	4873
GRE-F07_Palangon	4873	4873	4873	4873	4873
GRE-F08_Casere	4873	4873	4873	4873	4873
Dati mancanti					
Piezometro	EC_2_5m	Temp_2_5m	WL_2_5m	EC_5_8m	Temp_5_8m
GRE-F01_Bevazzana	0	0	0	0	0
GRE-F02_Cesarolo	145	0	0	0	0
GRE-F04_Valle	1213	1213	1395	1213	1213
GRE-F05_Fossa Secca	0	0	0	0	0
GRE-F06_Sindacale	0	0	2883	0	0
GRE-F07_Palangon	0	0	0	0	0
GRE-F08_Casere	0	0	0	0	0

Tab. 3

Purtroppo, non è stato possibile effettuare un successivo affinamento del posizionamento delle profondità di installazione attraverso il confronto tra i dati acquisiti dai sensori fissi e i profili verticali rilevati manualmente.

Ciò è dovuto al fatto che i sensori fissi hanno dimensioni di poco inferiori al diametro interno dei piezometri, rendendo di fatto impossibile il deployment del datalogger necessario per le profilature verticali. Questa operazione è stata rimandata al momento della manutenzione programmata dei sensori, quando verranno rimossi dai piezometri per le consuete operazioni di pulizia e calibrazione periodica.

Na žalost naknadna natančnejša prilagoditev globin namestitve s primerjavo med podatki, pridobljenimi s fiksnimi senzorji, in ročno izmerjenimi vertikalnimi profili, ni bila mogoča.

To je posledica dejstva, da so fiksni senzorji po dimenzijah le malo manjši od notranjega premera piezometrov, kar praktično onemogoča spuščanje pomnilnika podatkov (dataloggerja), ki je potreben za vertikalno profiliranje. Ta operacija je bila prestavljena na čas načrtovanega vzdrževanja senzorjev, ko bodo odstranjeni iz piezometrov zaradi rednega čiščenja in občasnega umerjanja.

Partner di progetto/Proiettini partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



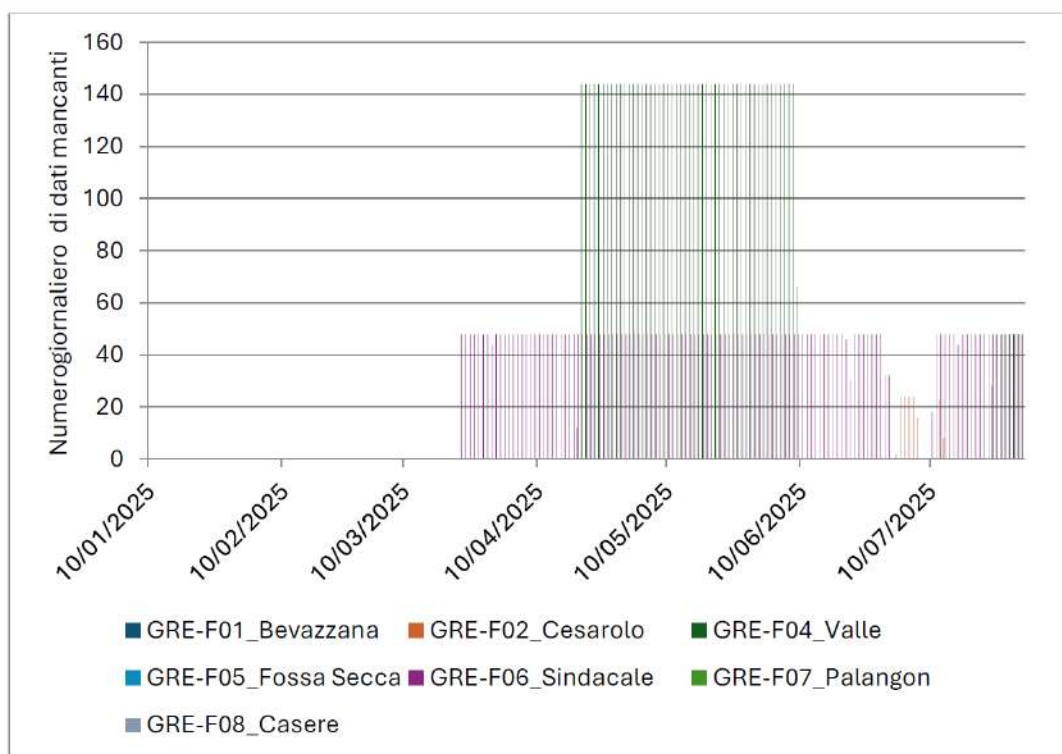


Figura 4/Slika 4

Partner di progetto/Projektni partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia.
Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

7 Analisi

7.1. STATUS ED EVOLUZIONE DELLE SERIE TEMPORALI DI EC, T, WL

Le serie temporali di EC, T, WL registrate nel periodo 10/01/2025 - 30/07/2025 sono riportate di seguito.

7. Analiza

7.1. STANJE IN RAZVOJ ČASOVNIH VRST ZA EC, T, WL

Časovne vrste za EC (električno prevodnost), T (temperaturo) in WL (raven podtalnice), zabeležene v obdobju od 10. 1. 2025 do 30. 7. 2025, so navedene spodaj.

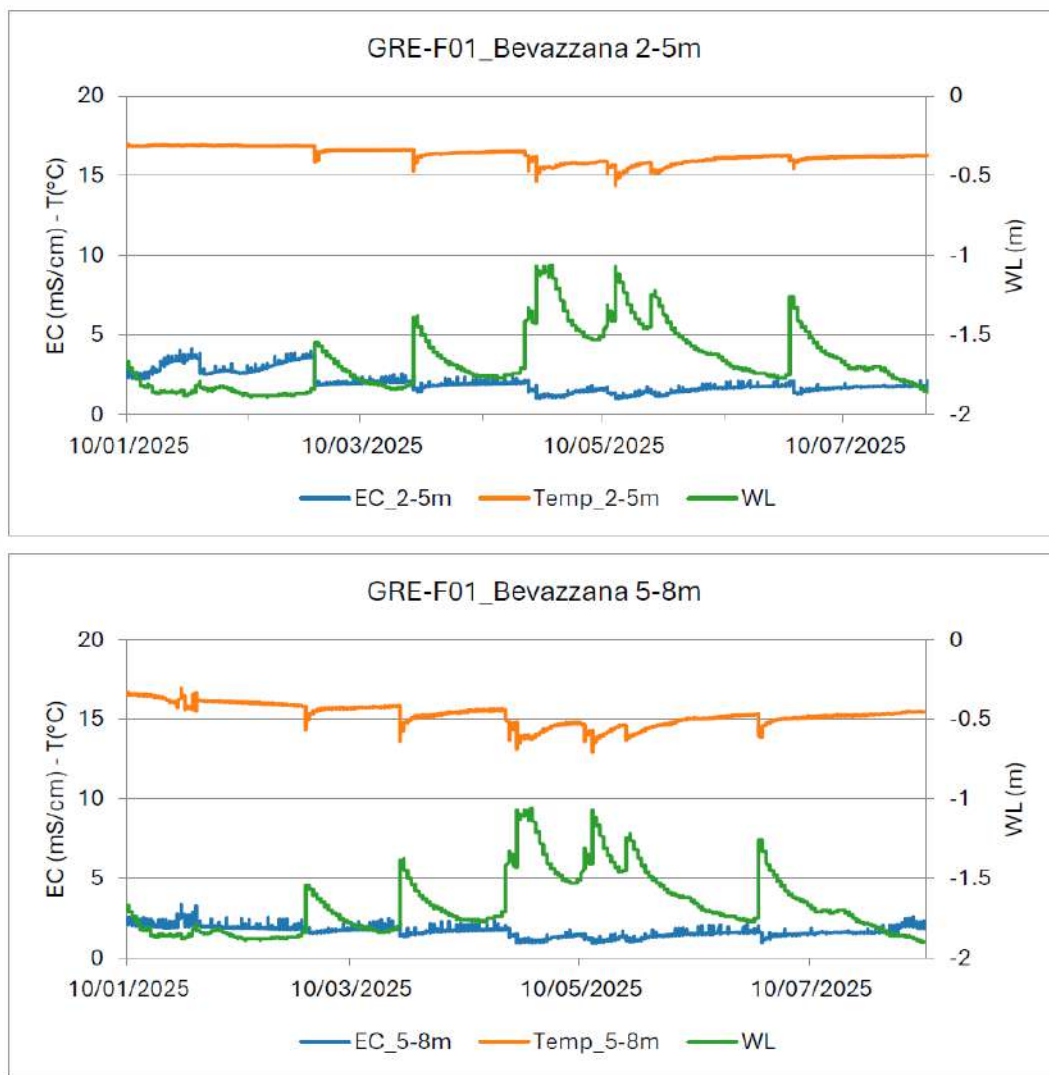


Figura 5/Slika 5

Partner di progetto/Projektne partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GrennatITASLO

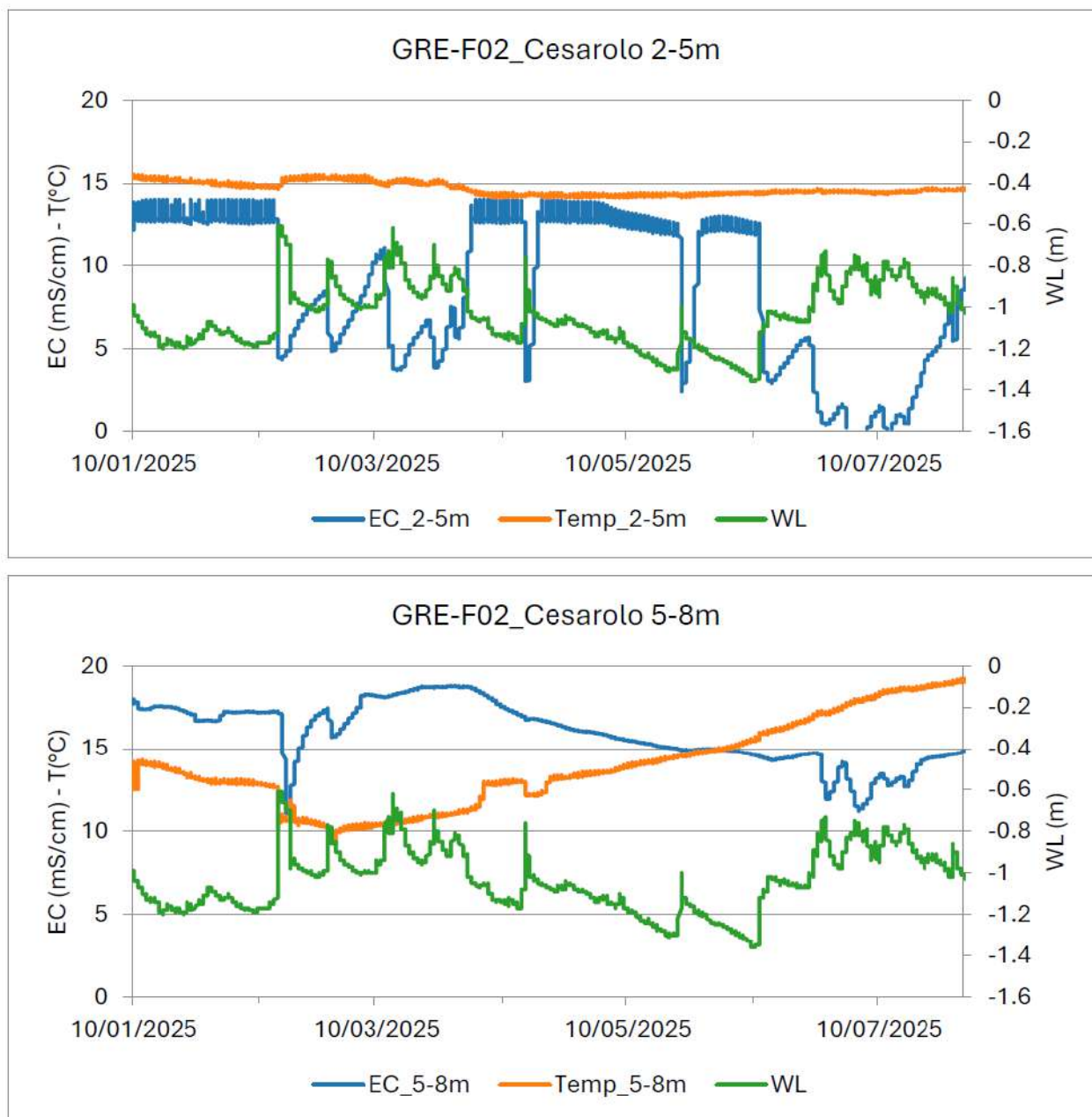


Figura 6/Slika 6

Partner di progetto/Projektni partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia.
 Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



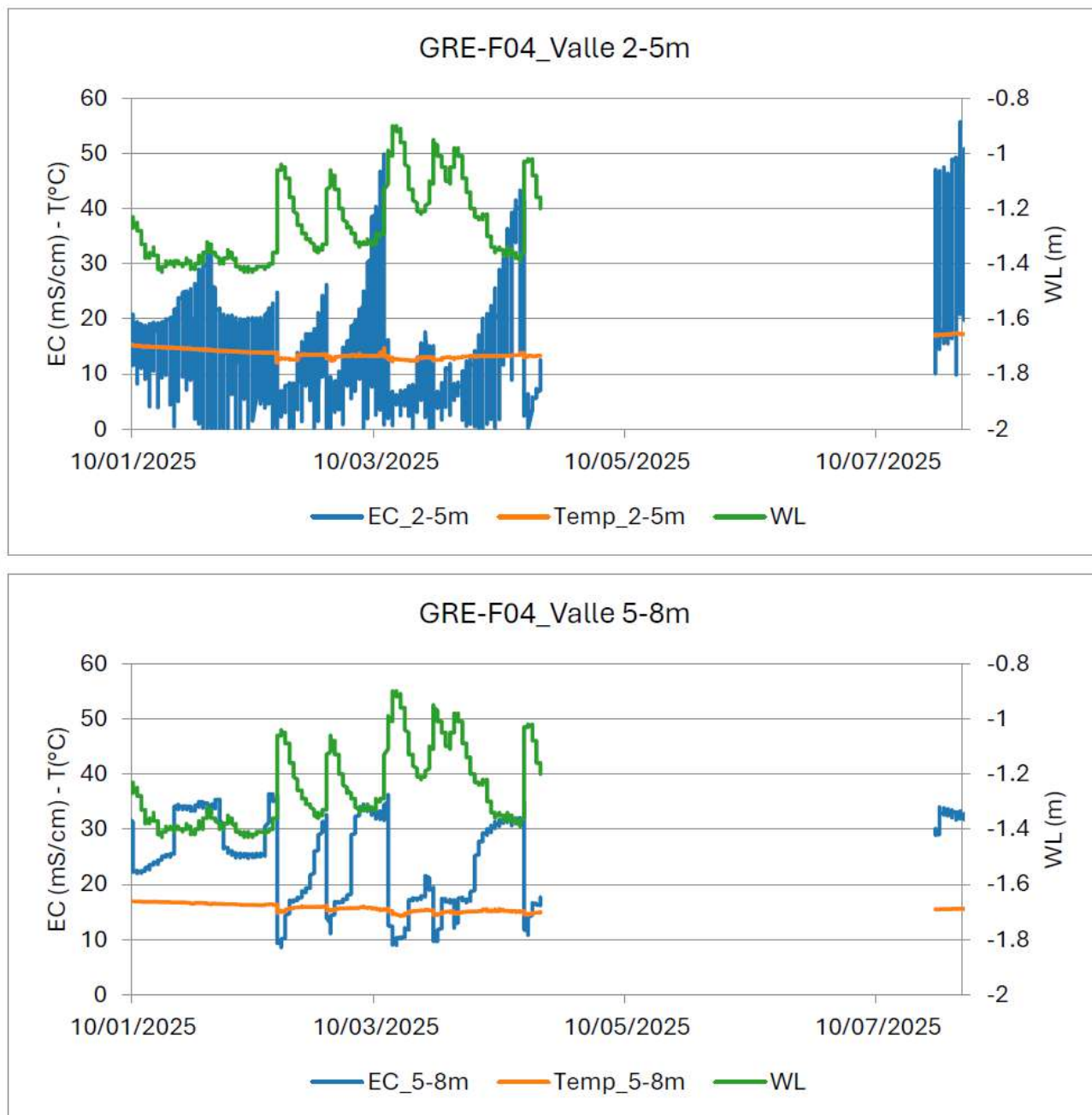


Figura 7/Slika 7

Partner di progetto/Projektni partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia.
Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

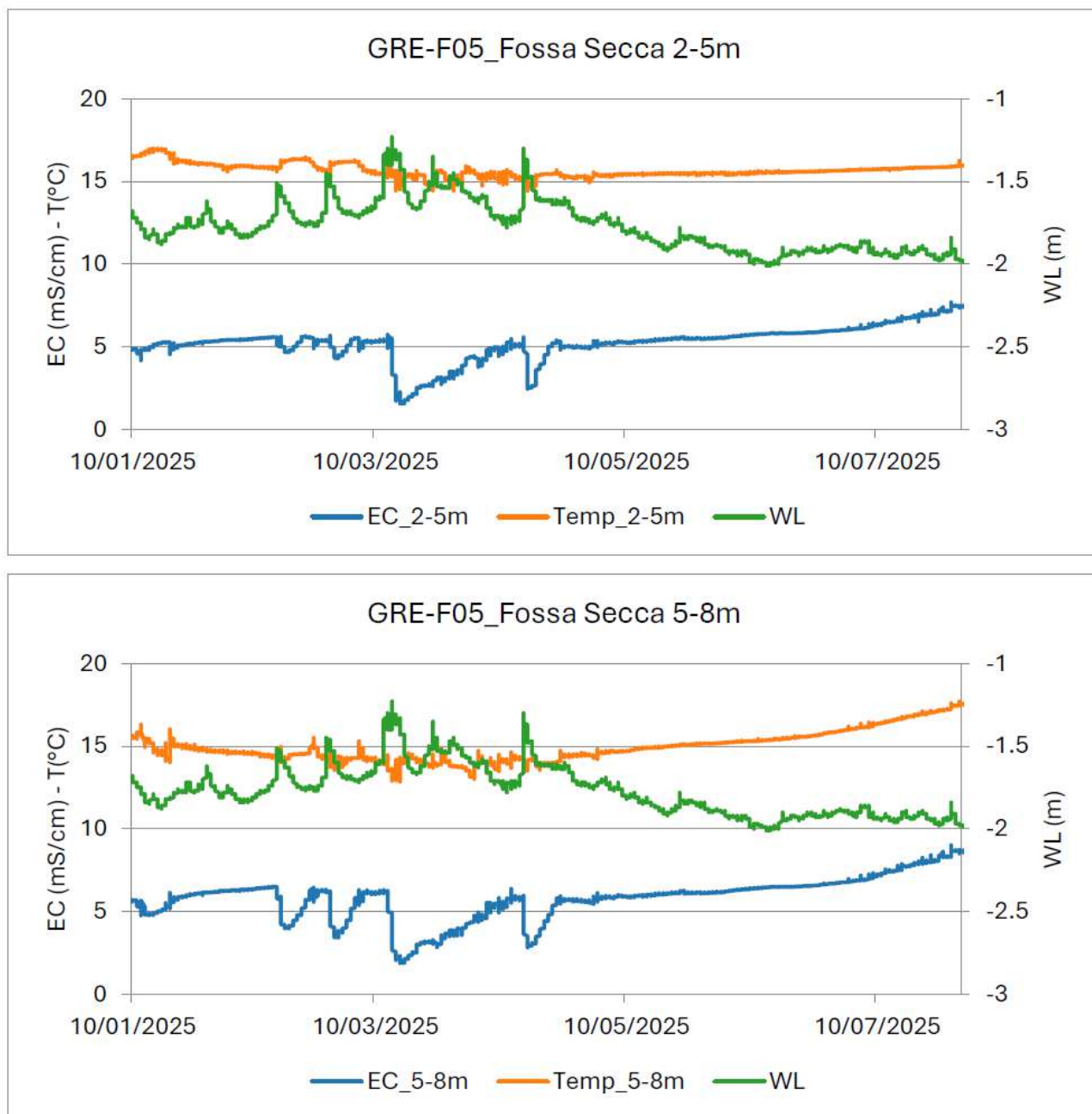


Figura 8/Slika 8

Partner di progetto/Projektni partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia.
 Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GrennatITASLO

GRENNAT

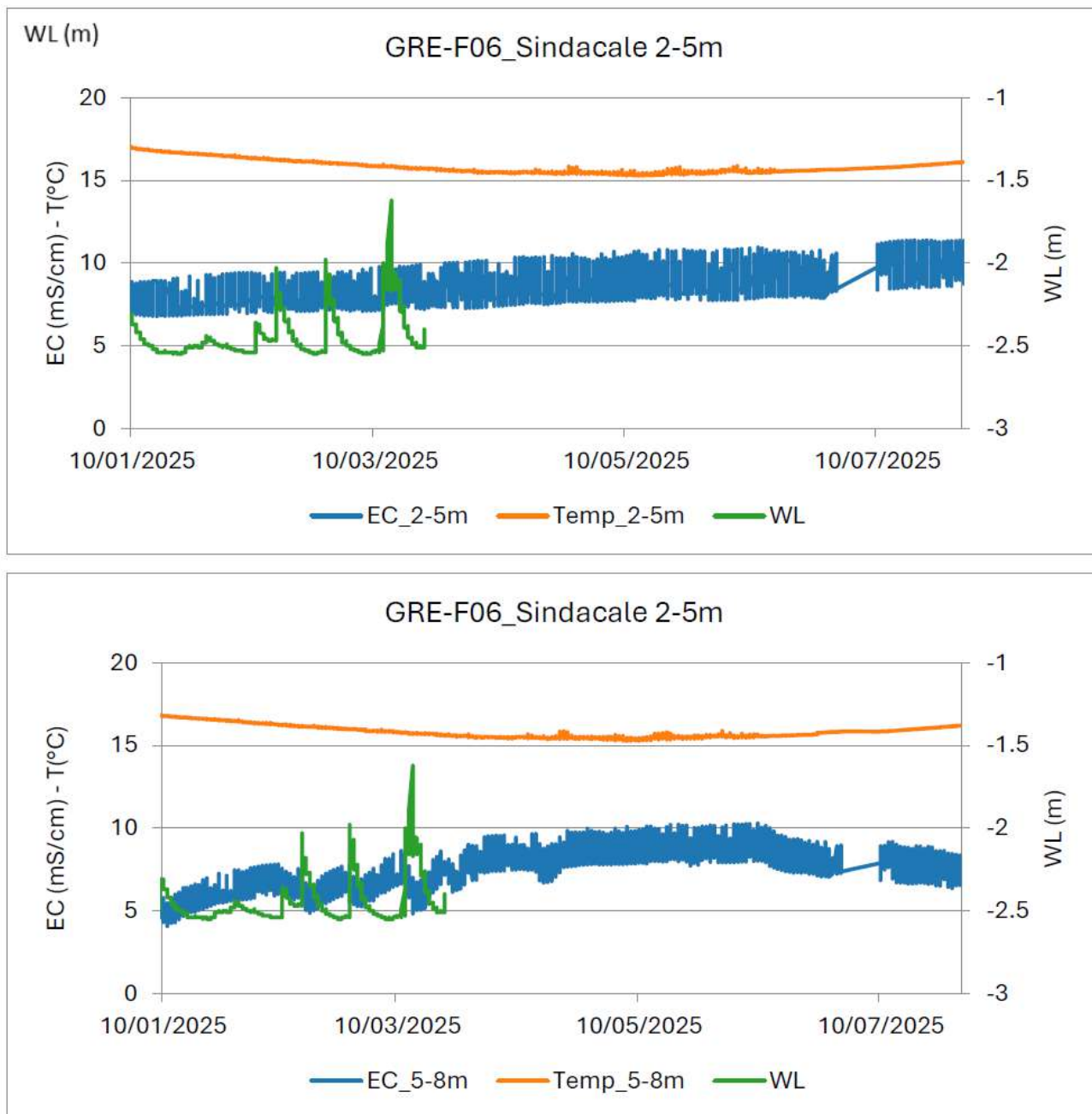


Figura 9/Slika 9

Partner di progetto/Projektni partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GrennatITASLO

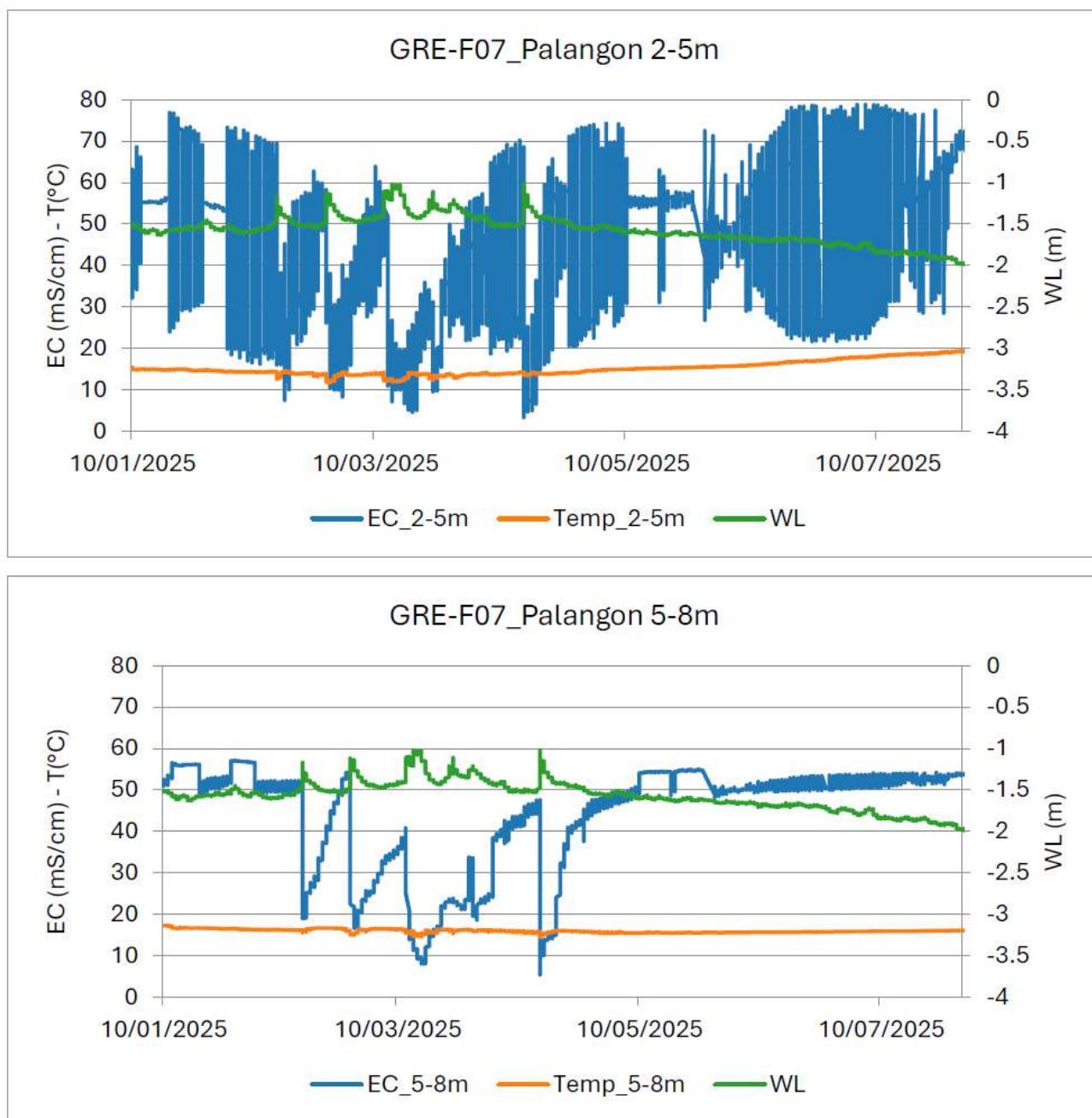


Figura 10/Slika 10

Partner di progetto/Projektni partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



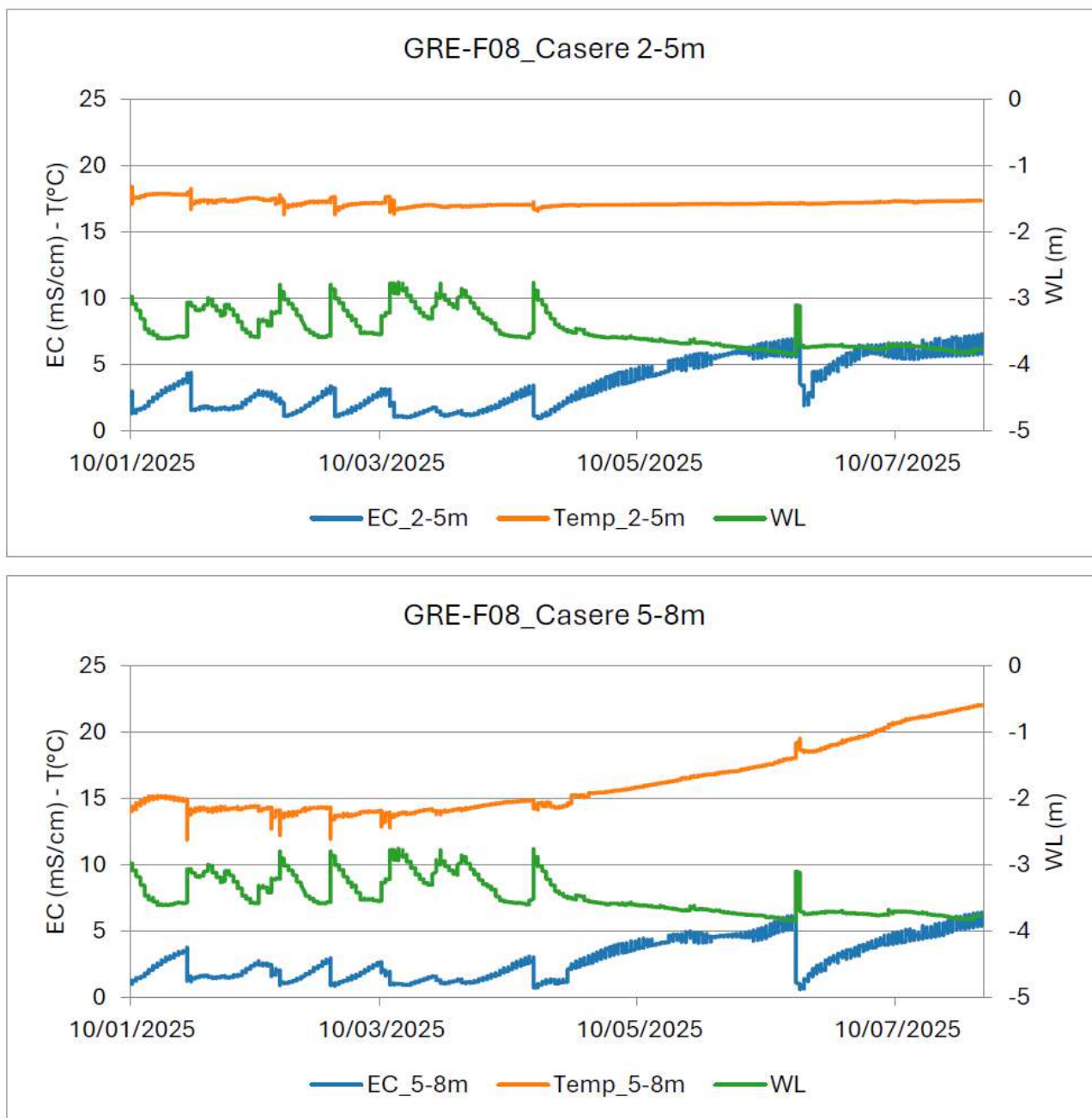


Figura 11/Slika 11

Partner di progetto/Projektni partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia.
Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

	EC_2_	Temp_2	WL_2_	EC_5_	Temp_5		EC_2_	Temp_2	WL_2_	EC_5_	Temp_5
	5m	5m	5m	8m	8m		5m	5m	5m	8m	8m
GRE-F01_ Bevazzana						GRE-F06_ Sindacale					
mean	2.00	16.32	-1.66	1.64	15.28	mean	8.61	15.84	-2.45	7.50	15.82
std	0.64	0.46	0.20	0.31	0.69	std	1.07	0.42	0.13	1.28	0.39
min	0.99	14.40	-1.89	0.91	12.93	min	6.78	15.27	-2.55	4.06	15.27
25%	1.60	16.06	-1.82	1.45	14.89	25%	7.80	15.50	-2.53	6.48	15.50
50%	1.81	16.27	-1.72	1.62	15.26	50%	8.36	15.68	-2.50	7.58	15.68
75%	2.14	16.63	-1.54	1.84	15.77	75%	9.33	16.07	-2.42	8.48	16.07
max	4.10	16.96	-1.06	3.37	16.92	max	11.38	17.02	-1.62	10.29	16.80
GRE-F02_ Cesarolo						GRE-F07_ Palangon					
mean	8.97	14.65	-1.04	15.95	13.94	mean	45.36	15.16	-1.57	44.06	15.93
std	4.36	0.40	0.15	1.83	2.65	std	18.43	1.76	0.18	12.87	0.40
min	0.10	14.06	-1.36	10.90	9.30	min	3.33	11.76	-1.99	5.36	14.46
25%	5.13	14.31	-1.15	14.68	12.15	25%	28.70	13.89	-1.68	39.09	15.64
50%	11.65	14.53	-1.06	16.06	13.52	50%	49.07	14.73	-1.56	50.04	15.88
75%	12.77	15.05	-0.93	17.30	15.69	75%	58.00	16.04	-1.46	52.88	16.22
max	13.96	15.53	-0.61	18.81	19.26	max	78.87	19.40	-1.02	57.11	17.19
GRE-F04_ Valle						GRE-F08_ Casere					
mean	15.71	13.86	-1.26	24.50	15.70	mean	3.54	17.16	-3.49	2.89	16.18
std	10.16	1.16	0.14	7.87	0.69	std	1.90	0.25	0.28	1.52	2.54
min	0.18	12.06	-1.43	8.56	14.21	min	0.91	16.29	-3.85	0.59	11.85
25%	7.91	13.19	-1.38	17.27	15.14	25%	1.74	17.02	-3.72	1.49	14.21
50%	14.09	13.40	-1.31	25.40	15.59	50%	2.95	17.11	-3.58	2.53	15.06
75%	20.06	14.37	-1.15	32.00	16.35	75%	5.56	17.28	-3.25	4.25	17.61
max	55.70	17.37	-0.90	36.36	16.93	max	7.34	18.40	-2.76	6.39	22.07
GRE-F05_ Fossa Secca											
mean	5.23	15.68	-1.77	5.79	14.95						
std	1.07	0.41	0.15	1.33	0.93						
min	1.56	14.42	-2.01	1.86	12.85						
25%	4.97	15.44	-1.90	5.27	14.28						
50%	5.37	15.60	-1.78	6.08	14.72						
75%	5.75	15.88	-1.68	6.45	15.39						
max	7.69	17.00	-1.23	9.00	17.71						

Tab. 4

Partner di progetto/Projektne partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia.
Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GrennatITASLO

GRENNAT

Le differenze di comportamento tra i piezometri riflettono anche le caratteristiche litologiche locali (Tab. 2). Nei siti a prevalenza sabbiosa (es. GRE-F04_Valle, GRE-F05_Fossa Secca, GRE-F07_Palagon) i parametri mostrano oscillazioni più rapide e coerenti, con una maggiore trasmissività idraulica. Nei siti caratterizzati da litologie fini (GRE-F06_Sindacale, GRE-F08_Casere, GRE-F01_Bevazzana) la risposta risulta più smorzata o anomala, in linea con la ridotta permeabilità e la maggiore capacità di attenuazione del segnale idrodinamico

7.2. ANALISI INTRA-PIEZOMETRO

Per gli stessi piezometri sono state analizzate le relazioni tra EC_2_5m e WL, tra EC_5_8m e WL e tra EC_2_5m ed EC_5_8m. Per ciascuna coppia di variabili è stato calcolato il coefficiente di correlazione di Pearson a lag zero (corr0), che misura la linearità istantanea fra le due serie temporali, nonché il valore massimo della correlazione (best_corr, Tab. 5) ottenuto spostando una serie rispetto all'altra entro un intervallo di ± 24 ore. Per ciascun caso è stato inoltre determinato il lag temporale (best_lag_hours, Tab. 5) corrispondente alla best_corr, espresso in ore. Un lag positivo indica che la seconda variabile (var2) è spostata in avanti rispetto alla prima (var1), quindi var2 ritarda rispetto a var1; viceversa, un lag negativo segnala che la seconda variabile anticipa la prima.

Razlike v obnašanju med piezometri odražajo tudi lokalne litološke značilnosti (tab. 2). Na območjih s prevladujočimi peščenimi sedimenti (npr. GRE-F04_Valle, GRE-F05_Fossa Secca, GRE-F07_Palagon) parametri kažejo hitrejša in bolj usklajena nihanja, z večjo hidravlično prepustnostjo. Na območjih, za katera so značilne drobnozrnate litologije (GRE-F06_Sindacale, GRE-F08_Casere, GRE-F01_Bevazzana), je odziv bolj zadušen ali neobičajen, kar je v skladu z nižjo prepustnostjo in večjo sposobnostjo dušenja hidrodinamičnega signala.

7.2. INTRA-PIEZOMETRSKA ANALIZA

Za iste piezometre so bile analizirane povezave med EC_2_5m in WL, med EC_5_8m in WL ter med EC_2_5m in EC_5_8m. Za vsak par spremenljivk je bil izračunan Pearsonov korelacijski koeficient pri ničelnem zamiku (corr0), ki meri trenutno linearnost med obema časovnima vrstama, ter maksimalna vrednost korelacije (best_corr, tab. 5), dobljena z zamikanjem ene serije glede na drugo znotraj intervala ± 24 ur. Za vsak primer je bil dodatno določen časovni zamik (best_lag_hours, tab. 5), ki ustreza best_corr, izražen v urah. Pozitiven zamik pomeni, da je druga spremenljivka (var2) pomaknjena naprej glede na prvo (var1), torej var2 zaostaja za var1; nasprotno pa negativen zamik kaže, da druga spremenljivka prehiteva prvo.

Partner di progetto/Projektne partnerji:

Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

Piezometro	var1	var2	n hours	best_corr	best_lag_hours
GRE-F05_Fossa Secca	EC_2_5m	EC_5_8m	4868	0.958	1
GRE-F08_Casere	EC_2_5m	EC_5_8m	4847	0.936	23
GRE-F08_Casere	EC_2_5m	WL	4847	-0.871	24
GRE-F05_Fossa Secca	EC_5_8m	WL	4868	-0.834	24
GRE-F08_Casere	EC_5_8m	WL	4847	-0.832	7
GRE-F01_Bevazzana	EC_5_8m	WL	4868	-0.831	9
GRE-F04_Valle	EC_5_8m	WL	2397	-0.821	5
GRE-F01_Bevazzana	EC_2_5m	EC_5_8m	4868	0.821	0
GRE-F05_Fossa Secca	EC_2_5m	WL	4868	-0.817	24
GRE-F07_Palangon	EC_5_8m	WL	4802	-0.796	12
GRE-F01_Bevazzana	EC_2_5m	WL	4868	-0.756	18
GRE-F02_Cesarolo	EC_2_5m	WL	4726	-0.755	4
GRE-F06_Sindacale	EC_2_5m	EC_5_8m	4610	0.724	0
GRE-F04_Valle	EC_2_5m	EC_5_8m	2579	0.624	0
GRE-F07_Palangon	EC_2_5m	EC_5_8m	4802	0.621	0
GRE-F04_Valle	EC_2_5m	WL	2397	-0.540	3
GRE-F07_Palangon	EC_2_5m	WL	4802	-0.481	14
GRE-F02_Cesarolo	EC_2_5m	EC_5_8m	4726	0.444	24
GRE-F06_Sindacale	EC_2_5m	WL	1727	0.267	11
GRE-F06_Sindacale	EC_5_8m	WL	1727	-0.235	24
GRE-F02_Cesarolo	EC_5_8m	WL	4871	-0.126	24

Tab. 5

L'analisi delle correlazioni tra conducibilità elettrica (EC) alle due profondità (2–5 m e 5–8 m) e livello piezometrico (WL) evidenzia pattern idrodinamici distinti nei diversi punti di monitoraggio. Nella maggior parte dei piezometri, EC e WL risultano negativamente correlati, indicando un effetto di diluizione: l'aumento di WL, per ricarica o spinta idraulica, è associato a una diminuzione di EC (ad es. GRE-F08_Casere: –0.87 a 24 h; GRE-F05_Fossa Secca: –0.82 e –0.83 a 24 h; GRE-F01_Bevazzana: –0.76 a 18 h e –0.83 a 9 h). Un'eccezione è rappresentata da GRE-F06_Sindacale (0.27 a 11 h), dove l'incremento di WL coincide con un aumento di EC, suggerendo ingressi di acqua più salina. Le correlazioni tra EC_2_5m ed EC_5_8m sono generalmente elevate e positive nei piezometri GRE-F05_Fossa Secca (0.96, lag +1 h), GRE-F08_Casere (0.94, lag +23 h),

Analiza korelacij med električno prevodnostjo (EC) na dveh globinah (2–5 m in 5–8 m) ter piezometričnim nivojem (WL) kaže na različne hidrodinamične vzorce na posameznih merilnih mestih. V večini piezometrov sta EC in WL negativno korelirana, kar kaže na učinek redčenja: povečanje WL, zaradi napajanja ali hidravličnega pritiska, je povezano z zmanjšanjem EC (npr. GRE-F08_Casere: –0,87 pri 24 h; GRE-F05_Fossa Secca: –0,82 in –0,83 pri 24 h; GRE-F01_Bevazzana: –0,76 pri 18 h in –0,83 pri 9 h). Izjema je GRE-F06_Sindacale (0,27 pri 11 h), kjer se povečanje WL ujema s povečanjem EC, kar nakazuje dotok bolj slane vode.

Partner di progetto/Projektni partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

GRE-F01_Bevazzana (0,82, lag 0 h) e GRE-F06_Sindacale (0,72, lag 0 h), indicando una buona connessione verticale e risposta in fase alla stessa forzante. Lag brevi (0–1 h) denotano un trasferimento rapido del segnale, mentre lag più lunghi (≥ 23 h) suggeriscono propagazione ritardata o forzanti multiple

Korrelacije med EC_2_5m in EC_5_8m so na splošno visoke in pozitivne v piezometrih GRE-F05_Fossa Secca (0,96, zamik +1 h), GRE-F08_Casere (0,94, zamik +23 h), GRE-F01_Bevazzana (0,82, zamik 0 h) ter GRE-F06_Sindacale (0,72, zamik 0 h), kar kaže na dobro vertikalno povezanost in usklajen odziv na isti vpliv. Kratki zamiki (0–1 h) pomenijo hiter prenos signala, medtem ko daljši zamiki (≥ 23 h) nakazujejo zakasnjeno propagacijo ali prisotnost več vplivov.

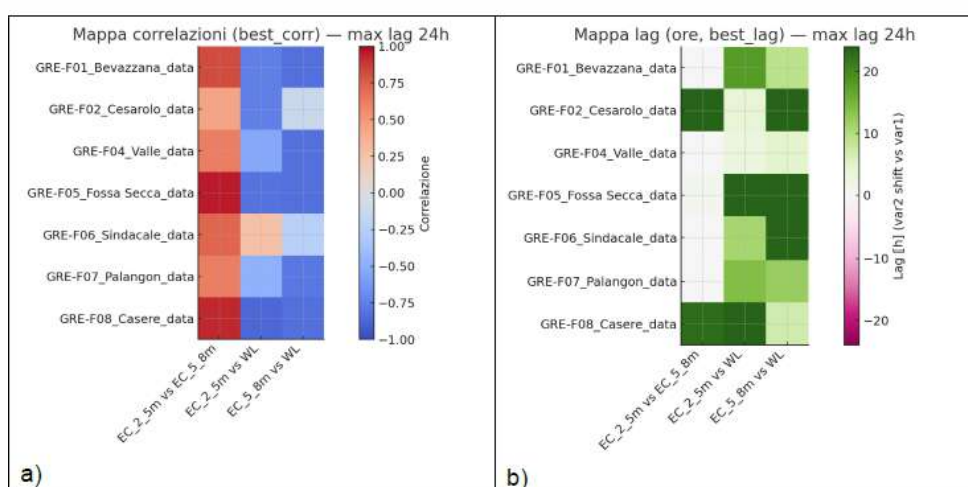


Figura 12/Slika 12

Complessivamente, le mappe di lag e correlazione confermano: (i) connessioni verticali forti in GRE-F05_Fossa Secca, GRE-F08_Casere, GRE-F01_Bevazzana e GRE-F06_Sindacale; (ii) prevalenza dell'effetto di diluizione, con eccezione di GRE-F06_Sindacale a 2–5 m; (iii) risposte rapide (≤ 6 h) in GRE-F04_Valle e GRE-F07_Palangon e ritardate (≥ 18 h) in GRE-F02_Cesarolo, GRE-F05_Fossa Secca e GRE-F08_Casere, riflettendo eterogeneità locali di permeabilità, distanza dalla costa e geometria dell'acquifero. Il controllo litologico ha un ruolo fondamentale:

Mape časovnih zamikov (lag) in korelacij skupno potrjujejo: (i) močne vertikalne povezave v GRE-F05_Fossa Secca, GRE-F08_Casere, GRE-F01_Bevazzana in GRE-F06_Sindacale; (ii) prevlado učinka redčenja, z izjemo GRE-F06_Sindacale na globini 2–5 m; (iii) hitre odzive (≤ 6 h) v GRE-F04_Valle in GRE-F07_Palangon ter zapoznele odzive (≥ 18 h) v GRE-F02_Cesarolo, GRE-F05_Fossa Secca in GRE-F08_Casere, kar odraža lokalno heterogenost prepustnosti, oddaljenost od obale in geometrijo vodonosnika. Litološki nadzor ima ključno vlogo: v peščenih piezometrih (GRE-F05_Fossa Secca, GRE-

Partner di progetto/Projektne partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

nei piezometri sabbiosi (GRE-F05_Fossa Secca, GRE-F08_Casere, GRE-F07_Palangon) le correlazioni verticali tra EC superficiale e profonda sono molto elevate e i lag ridotti, segno di buona connessione idraulica. Nei siti limoso-argillosi (GRE-F06_Sindacale, GRE-F01_Bevazzana), invece, le correlazioni risultano deboli o addirittura positive, indicando risalite saline o accumulo temporaneo di acqua più salata negli strati fini.

7.3. ANALISI INTER-PIEZOMETRO

L'analisi inter-piezometro su tutte le 21 coppie (finestra di lag ± 72 h; convenzione lag $> 0 \Rightarrow$ la seconda serie ritarda) conferma che il livello piezometrico (WL) (Tab. 6) è il segnale più coeso alla scala dell'intera rete. Considerando tutte le coppie, la $|r|$ mediana è 0,77 (Q1–Q3: 0,35–0,84) e il $|lag|$ mediano è 8 h (Q1–Q3: 2–11 h). La proiezione dei piezometri in geografia reale, integrando la distanza dal mare, individua un asse preferenziale che da GRE-F04_Valle si propaga verso GRE-F05_Fossa Secca, GRE-F07_Palangon e GRE-F08_Casere, con correlazioni elevate ($|r| \approx 0,9$) e ritardi modesti (~ 1 –10 h). Lungo questi archi il Δ distanza dalla costa è positivo (il nodo di arrivo è più interno), coerentemente con una propagazione costa $\rightarrow$ entroterra della forzante idraulica (marea/pressione).

F08_Casere, GRE-F07_Palangon) so verticalne korelacije med površinsko in globoko EC zelo visoke, časovni zamiki pa majhni, kar je znak dobre hidravlične povezave. Na meljasto-glinenih lokacijah (GRE-F06_Sindacale, GRE-F01_Bevazzana) pa so korelacije šibke ali celo pozitivne, kar nakazuje na dviganje slane vode ali začasno kopičenje bolj slane vode v drobnozrnatih plasteh.

7.3. ANALIZA MED RAZLIČNIMI PIEZOMETRI

Analiza med različnimi piezometri na vseh 21 parih (okno časovnega zamika ± 72 h; dogovor: zamik $> 0 \Rightarrow$ druga serija zaostaja) potrjuje, da je piezometrična raven (WL) (Tab. 6) najbolj povezan signal na ravni celotnega omrežja.

Če upoštevamo vse pare, je mediana $|r|$ 0,77 (Q1–Q3: 0,35–0,84), mediana $|lag|$ (modul časovnega zamika) pa znaša 8 ur (Q1–Q3: 2–11 h). Projekcija piezometrov v dejanskem geografskem prostoru, ki upošteva njihovo oddaljenost od morja, razkriva prednostno os, vzdolž katere se signal širi od postaje GRE-F04_Valle proti postajam GRE-F05_Fossa Secca, GRE-F07_Palangon in GRE-F08_Casere, z visokimi korelacijami ($|r| \approx 0,9$) in majhnimi zamiki (~ 1 –10 h). Vzdolž teh povezav je Δ razdalje od obale pozitiven (končna točka leži bolj v notranjosti), kar je skladno s širjenjem hidravlične gonilne sile (plimovanje/pritisk) v smeri od obale proti notranjosti.

Partner di progetto/Projektne partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

Parametro	PZ1	PZ2	n_hours_overlap	corr0	best_corr	best_lag_hours
WL	GRE-F05_Fossa Secca	GRE-F07_Palangon	4192	0.94	0.94	1
WL	GRE-F04_Valle	GRE-F05_Fossa Secca	2391	0.91	0.93	10
WL	GRE-F04_Valle	GRE-F07_Palangon	2381	0.90	0.93	10
WL	GRE-F02_Cesarolo	GRE-F04_Valle	2396	0.87	0.89	-8
WL	GRE-F05_Fossa Secca	GRE-F08_Casere	4833	0.87	0.87	2
WL	GRE-F07_Palangon	GRE-F08_Casere	4171	0.84	0.84	2
WL	GRE-F06_Sindacale	GRE-F07_Palangon	1540	0.79	0.84	-7
WL	GRE-F04_Valle	GRE-F06_Sindacale	1556	0.73	0.84	15
WL	GRE-F05_Fossa Secca	GRE-F06_Sindacale	1552	0.78	0.81	8
WL	GRE-F04_Valle	GRE-F08_Casere	2370	0.74	0.78	11
WL	GRE-F06_Sindacale	GRE-F08_Casere	1536	0.74	0.77	-5
WL	GRE-F02_Cesarolo	GRE-F06_Sindacale	1557	0.69	0.74	8
WL	GRE-F01_Bevazzana	GRE-F04_Valle	2391	0.52	0.53	-5
WL	GRE-F02_Cesarolo	GRE-F05_Fossa Secca	4859	0.35	0.35	-2
WL	GRE-F02_Cesarolo	GRE-F08_Casere	4841	0.35	0.35	2
WL	GRE-F01_Bevazzana	GRE-F08_Casere	4833	-0.24	-0.35	-72
WL	GRE-F01_Bevazzana	GRE-F02_Cesarolo	4859	-0.20	-0.30	-72
WL	GRE-F01_Bevazzana	GRE-F06_Sindacale	1552	0.26	0.29	7
WL	GRE-F02_Cesarolo	GRE-F07_Palangon	4199	0.26	0.26	1
WL	GRE-F01_Bevazzana	GRE-F05_Fossa Secca	4861	-0.03	-0.16	-72
WL	GRE-F01_Bevazzana	GRE-F07_Palangon	4192	-0.01	-0.14	-72

Tab. 6

Partner di progetto/Projektni partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia.
Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GrennatITASLO

GRENNAT

La conducibilità elettrica profonda (EC_{5-8 m}) (Tab. 7) mantiene coerenze inter-sito ma con tempi caratteristici più lunghi: sull'insieme delle coppie la $|r|$ mediana è 0,51 (Q1-Q3: 0,28-0,68) e il $|\text{lag}|$ mediano 71 h (Q1-Q3: 18-72 h). Gli archi principali ricalcano l'asse di WL ma con ritardi molto maggiori (ad es. F05→F07 $\approx +18$ h, F05→F08 $\approx +20$ h), in linea con trasporto advettivo + dispersione e scambi verticali che smorzano e ritardano il segnale salino rispetto a quello idraulico. La presenza di un arco "inverso" (F05→F04) suggerisce eterogeneità laterali (barriere/condotti) e differenze di esposizione alla forzante salina.

Globoka električna prevodnost (EC_{5-8 m}) (Tab. 7) ohranja medsebojno usklajenost med lokacijami, vendar z daljšimi značilnimi časovnimi zamiki: na celotnem nizu parov je mediana $|r|$ 0,51 (Q1-Q3: 0,28-0,68), mediana $|\text{lag}|$ (modul časovnega zamika) na ravni celotnega omrežja pa znaša 71 ur (Q1-Q3: 18-72 h). Glavne povezave sledijo osi piezometrične ravni (WL), vendar z veliko večjimi zamiki (npr. F05→F07 $\approx +18$ h, F05→F08 $\approx +20$ h), kar je skladno z advektivnim transportom, disperzijo in vertikalnimi izmenjavami, ki ublažijo in zakasniyo slani signal v primerjavi s hidravličnim. Prisotnost "obratne" povezave (F05→F04) nakazuje na lateralne heterogenosti (barriere/prevodniki) in razlike v izpostavljenosti slani gonilni sili.

Parametro	PZ1	PZ2	n_hours_overlap	corr0	best_corr	best_lag_hours
EC_5_8m	GRE-F05_Fossa Secca	GRE-F07_Palangon	4192	0.79	0.82	18
EC_5_8m	GRE-F04_Valle	GRE-F05_Fossa Secca	2573	0.76	0.79	-15
EC_5_8m	GRE-F04_Valle	GRE-F07_Palangon	2562	0.74	0.74	4
EC_5_8m	GRE-F05_Fossa Secca	GRE-F08_Casere	4833	0.71	0.72	20
EC_5_8m	GRE-F01_Bevazzana	GRE-F06_Sindacale	4365	-0.67	-0.69	-60
EC_5_8m	GRE-F02_Cesarolo	GRE-F08_Casere	4841	-0.65	-0.68	-72
EC_5_8m	GRE-F02_Cesarolo	GRE-F05_Fossa Secca	4859	-0.61	-0.68	72
EC_5_8m	GRE-F07_Palangon	GRE-F08_Casere	4171	0.62	0.62	3
EC_5_8m	GRE-F04_Valle	GRE-F08_Casere	2551	0.53	0.55	10
EC_5_8m	GRE-F02_Cesarolo	GRE-F07_Palangon	4199	-0.46	-0.53	72
EC_5_8m	GRE-F01_Bevazzana	GRE-F08_Casere	4833	-0.46	-0.51	-72
EC_5_8m	GRE-F06_Sindacale	GRE-F08_Casere	4350	0.50	0.50	-68
EC_5_8m	GRE-F02_Cesarolo	GRE-F06_Sindacale	4373	-0.40	-0.46	72
EC_5_8m	GRE-F01_Bevazzana	GRE-F02_Cesarolo	4859	0.42	0.42	-10
EC_5_8m	GRE-F01_Bevazzana	GRE-F04_Valle	2573	0.22	0.28	72
EC_5_8m	GRE-F05_Fossa Secca	GRE-F06_Sindacale	4365	0.26	0.28	30
EC_5_8m	GRE-F02_Cesarolo	GRE-F04_Valle	2577	-0.10	-0.24	72
EC_5_8m	GRE-F01_Bevazzana	GRE-F05_Fossa Secca	4861	-0.18	-0.23	-72
EC_5_8m	GRE-F06_Sindacale	GRE-F07_Palangon	3827	0.18	0.19	-71
EC_5_8m	GRE-F01_Bevazzana	GRE-F07_Palangon	4192	-0.10	-0.14	-71
EC_5_8m	GRE-F04_Valle	GRE-F06_Sindacale	2346	0.13	-0.14	-72

Tab. 7

Partner di progetto/Projektni partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

Per la conducibilità superficiale (EC_2–5 m) (Tab. 8) la coerenza è più locale ($|r|$ mediana 0,35; $|lag|$ mediano 23 h. Sulle 21 coppie, l'allineamento costa→entroterra ($\text{segno}(lag) = \text{segno}(\Delta\text{distanza})$) è 0,29, inferiore a WL (0,57) e EC_5–8 m (0,43), indicando che nello strato 2–5 m forzanti locali e scambi rapidi controllano in misura maggiore la fase del segnale.

Nel complesso, questi risultati sono coerenti con la distribuzione dei corpi sabbiosi individuati nei sondaggi (Valle → Fossa Secca → Palangon → Casere), che costituiscono una direzione preferenziale per la propagazione idraulica. Al contrario, la presenza di livelli più fini a Sindacale e Bevazzana agisce da barriera parziale, attenuando la trasmissione del segnale e riducendo le correlazioni inter-sito.

Emerge quindi una propagazione idraulica rapida e coerente lungo la direzione costa→interno, su cui si sovrappone una dinamica salina più lenta e filtrata. Le relazioni lag–distanza non risultano monotone quando valutate su tutte le coppie (la geometria costiera e l'eterogeneità idraulica pesano quanto, o più, della distanza), mentre sugli assi principali l'orientamento costa→entroterra è prevalente.

Come esempio si riportano i cross-correlogrammi inter-piezometro per le 12 migliori $|best_corr|$, calcolati su lag ± 72 h ($lag > 0 \Rightarrow$ PZ2 ritarda rispetto a PZ1). Per ciascun parametro (EC_2_5m, EC_5_8m, WL) sono state inoltre create le Heatmap delle correlazioni tra piezometri e le heatmap dei lag.

Za površinsko prevodnost (EC_2–5 m) (Tab. 8) je skladnost bolj lokalnega značaja (mediana $|r| = 0,35$; mediana $|lag| = 23$ h). Pri 21 parih je usklajenost smeri obala → zaledje ($\text{sign}(lag) = \text{sign}(\Delta\text{razdalja})$) enaka 0,29, kar je manj kot pri WL (0,57) in EC_5–8 m (0,43). To kaže, da v sloju 2–5 m lokalni vplivi in hitre izmenjave v večji meri nadzorujejo fazo signala.

Na splošno so ti rezultati skladni z razporeditvijo peščenih teles, ugotovljenih z vrtinami (Valle → Fossa Secca → Palangon → Casere), ki predstavljajo prednostno smer za hidravlično širjenje. Nasprotno pa prisotnost bolj drobnozrnatih plasti na območjih Sindacale in Bevazzana deluje kot delna pregrada, ki slabi prenos signala in zmanjšuje medlokacijske korelacije.

Iz rezultatov izhaja hitra in skladna hidravlična propagacija v smeri obala → notranjost, na katero se nalaga počasnejša in bolj filtrirana dinamika slanosti. Odnosi med zamikom (lag) in razdaljo niso monotoni, če jih ocenjujemo za vse pare skupaj (obalna geometrija in hidravlična heterogenost vplivata enako ali celo bolj kot sama razdalja), medtem ko je vzdolž glavnih osi prevladujoča usmerjenost obala → zaledje.

Kot primer so prikazani medpiezometriški navzkrižni korelogrami za 12 najboljših vrednosti $|best_corr|$, izračunanih za zamike ± 72 h ($lag > 0 \Rightarrow$ PZ2 zaostaja za PZ1). Za vsak parameter (EC_2_5m, EC_5_8m, WL) so bile izdelane tudi toplotne karte (heatmap) korelacij med piezometri ter toplotne karte zamikov (lag).

Partner di progetto/Projektne partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

Parametro	PZ1	PZ2	EC 2_5m	GRE-F05_Fossa Secca	GRE-F08_Casere	4833	0.72	0.73	14
EC_2_5m	GRE-F06_Sindacale	GRE-F08_Casere	4350	0.53	0.56	64			
EC_2_5m	GRE-F04_Valle	GRE-F08_Casere	2551	0.54	0.54	-9			
EC_2_5m	GRE-F05_Fossa Secca	GRE-F07_Palangon	4192	0.52	0.54	23			
EC_2_5m	GRE-F01_Bevazzana	GRE-F08_Casere	4833	-0.44	-0.51	-72			
EC_2_5m	GRE-F04_Valle	GRE-F05_Fossa Secca	2573	0.49	0.51	-18			
EC_2_5m	GRE-F01_Bevazzana	GRE-F06_Sindacale	4365	-0.43	-0.44	-64			
EC_2_5m	GRE-F04_Valle	GRE-F07_Palangon	2562	0.42	0.43	2			
EC_2_5m	GRE-F07_Palangon	GRE-F08_Casere	4171	0.40	0.41	-9			
EC_2_5m	GRE-F05_Fossa Secca	GRE-F06_Sindacale	4365	0.39	0.40	-30			
EC_2_5m	GRE-F02_Cesarolo	GRE-F04_Valle	2577	0.34	0.35	-10			
EC_2_5m	GRE-F02_Cesarolo	GRE-F08_Casere	4696	-0.27	-0.34	72			
EC_2_5m	GRE-F02_Cesarolo	GRE-F06_Sindacale	4342	-0.31	-0.32	19			
EC_2_5m	GRE-F02_Cesarolo	GRE-F07_Palangon	4123	0.25	0.25	0			
EC_2_5m	GRE-F02_Cesarolo	GRE-F05_Fossa Secca	4714	-0.11	-0.22	72			
EC_2_5m	GRE-F04_Valle	GRE-F06_Sindacale	2346	0.18	0.19	-23			
EC_2_5m	GRE-F06_Sindacale	GRE-F07_Palangon	3827	0.16	0.19	7			
EC_2_5m	GRE-F01_Bevazzana	GRE-F02_Cesarolo	4714	0.14	0.14	11			
EC_2_5m	GRE-F01_Bevazzana	GRE-F05_Fossa Secca	4861	-0.10	-0.12	-72			
EC_2_5m	GRE-F01_Bevazzana	GRE-F04_Valle	2573	-0.05	-0.12	-71			
EC_2_5m	GRE-F01_Bevazzana	GRE-F07_Palangon	4192	0.00	-0.07	-71			

Tab. 8

Partner di progetto/Projektni partnerji:



MESTNA OBČINA
NOVA GORICA



Občina Miren - Kostanjevica



CONSORZIO DI BONIFICA
DELLA VENEZIA GIULIA



CONSORZIO DI BONIFICA
VENETO ORIENTALE
del Bacinello di Venezia - Treviso



Comune di
Monfalcone

Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia.
Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GrennatITASLO

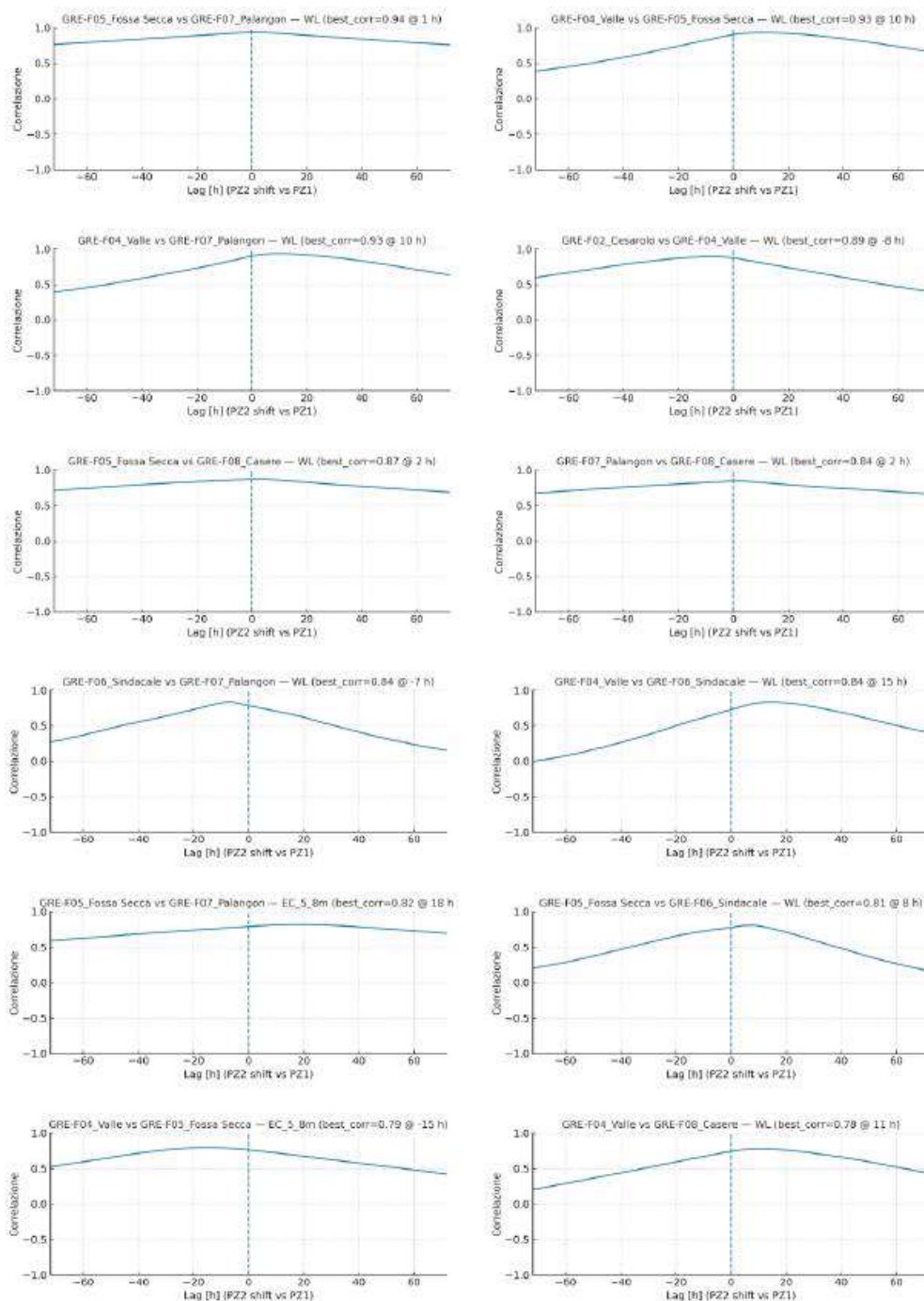


Figura 13/Slika 13

Partner di progetto/Projektni partnerji:



MESTNA OBČINA
NOVA GORICA



Občina Miren - Kostanjevica



Comune di
Monfalcone

Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia.
Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GrennatITASLO

GRENNAT

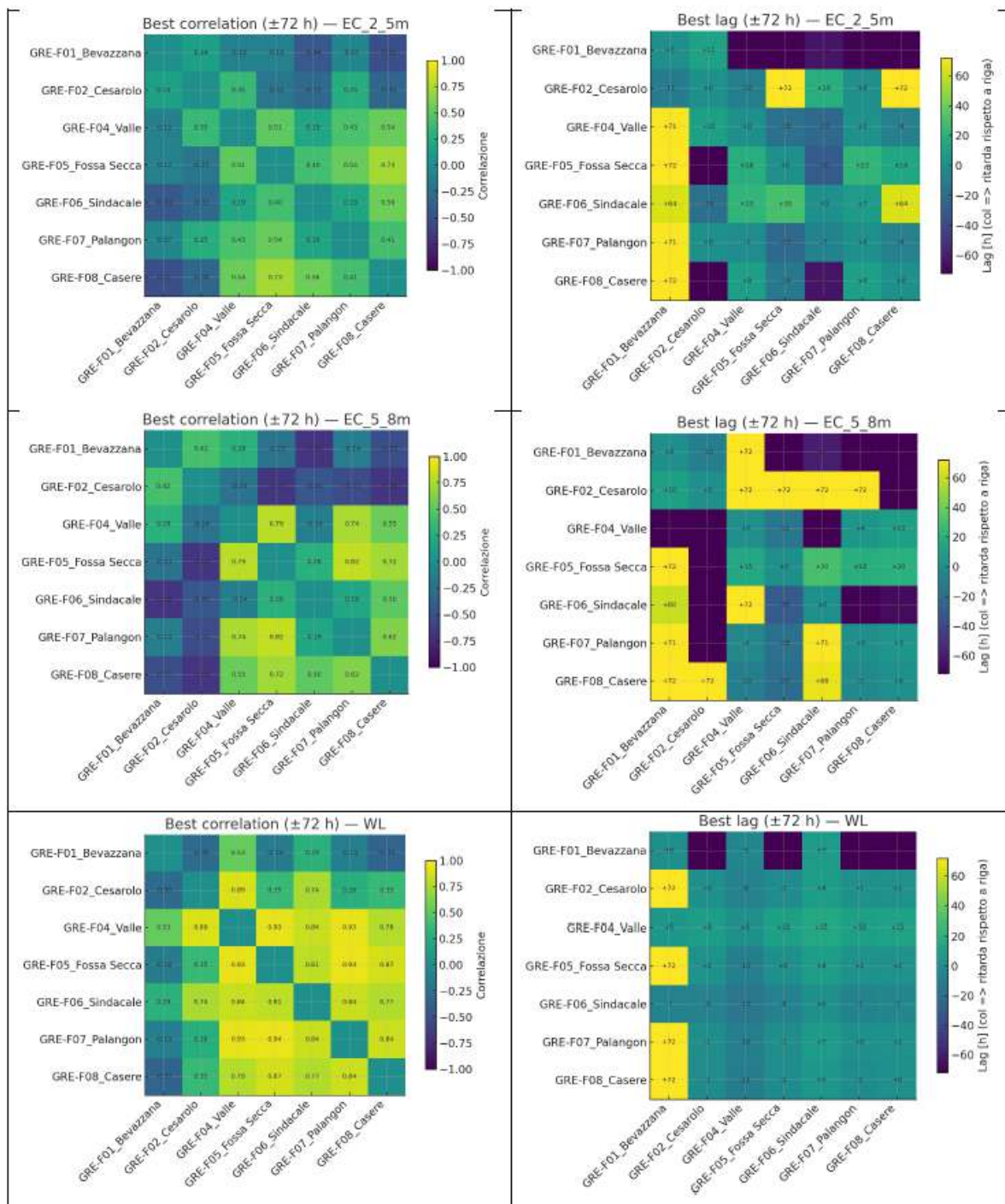


Figura 14/Slika 14

Partner di progetto/Projektni partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia.
Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GrennatITASLO

GRENNAT

L'analisi inter-piezometro su tutte le 21 coppie (finestra di lag ± 72 h; convenzione lag $> 0 \Rightarrow$ la seconda serie ritarda) conferma che il livello piezometrico (WL) è il segnale più coeso alla scala dell'intera rete. Considerando tutte le coppie, la $|r|$ mediana è 0,77 (Q1–Q3: 0,35–0,84) e il $|lag|$ mediano è 8 h (Q1–Q3: 2–11 h). La proiezione dei piezometri in geografia reale, integrando la distanza dal mare, individua un asse preferenziale che da GRE-F04_Valle si propaga verso GRE-F05_Fossa Secca, GRE-F07_Palangon e GRE-F08_Casere, con correlazioni elevate ($|r| \approx 0,9$) e ritardi modesti (~ 1 –10 h). Lungo questi archi il Δ distanza dalla costa è positivo (il nodo di arrivo è più interno), coerentemente con una propagazione costa $\rightarrow$ entroterra della forzante idraulica (marea/pressione). La conducibilità elettrica profonda (EC_5–8 m) mantiene coerenze inter-sito ma con tempi caratteristici più lunghi: sull'insieme delle coppie la $|r|$ mediana è 0,51 (Q1–Q3: 0,28–0,68) e il $|lag|$ mediano 71 h (Q1–Q3: 18–72 h). Gli archi principali ricalcano l'asse di WL ma con ritardi molto maggiori (ad es. F05 $\rightarrow$ F07 $\approx +18$ h, F05 $\rightarrow$ F08 $\approx +20$ h), in linea con trasporto advettivo + dispersione e scambi verticali che smorzano e ritardano il segnale salino rispetto a quello idraulico. La presenza di un arco "inverso" (F05 $\rightarrow$ F04) suggerisce eterogeneità laterali (barriere/condotti) e differenze di esposizione alla forzante salina. Per la conducibilità superficiale (EC_2–5 m) la coerenza è più locale ($|r|$ mediana 0,35; $|lag|$ mediano 23 h) e più sensibile al mixing. Sulle 21 coppie, l'allineamento costa $\rightarrow$ entroterra (segno(lag) = segno(Δ distanza)) è 0,29, inferiore a WL (0,57) e EC_5–8 m (0,43), indicando che nello strato 2–5 m forzanti locali e scambi rapidi

Analiza med piezometri na vseh 21 parih (okno zamikov ± 72 h; konvencija: lag $> 0 \Rightarrow$ druga časovna vrsta zaostaja) potrjuje, da je piezometrični nivo (WL) najbolj skladen signal na ravni celotnega omrežja. Ob upoštevanju vseh parov znaša mediana $|r|$ 0,77 (Q1–Q3: 0,35–0,84), mediana $|lag|$ pa 8 h (Q1–Q3: 2–11 h). Projekcija piezometrov v dejanski geografski prostor, ob upoštevanju oddaljenosti od morja, kaže na prednostno os širjenja od GRE-F04_Valle proti GRE-F05_Fossa Secca, GRE-F07_Palangon in GRE-F08_Casere, z visokimi korelacijami ($|r| \approx 0,9$) in majhnimi zamiki (~ 1 –10 h). Vz dolž teh povezav je Δ razdalje od obale pozitiven (ciljno vozlišče leži bolj v notranjosti), kar je skladno s širjenjem hidravličnega vpliva v smeri obala $\rightarrow$ zaledje (plimovanje/tlak).

Globinska električna prevodnost (EC_5–8 m) ohranja medlokacijsko skladnost, vendar z daljšimi značilnimi časovnimi zamiki: za vse pare znaša mediana $|r|$ 0,51 (Q1–Q3: 0,28–0,68), mediana $|lag|$ pa 71 h (Q1–Q3: 18–72 h). Glavne povezave sledijo isti osi kot WL, vendar z bistveno večjimi zamiki (npr. F05 $\rightarrow$ F07 $\approx +18$ h, F05 $\rightarrow$ F08 $\approx +20$ h), kar je skladno z advektivnim transportom, disperzijo in vertikalnimi izmenjavami, ki dušijo in zakasnujejo slanostni signal v primerjavi s hidravličnim signalom. Prisotnost »obratne« povezave (F05 $\rightarrow$ F04) nakazuje lateralno heterogenost (pregrade/prevodni kanali) ter razlike v izpostavljenosti slanostnim vplivom.

Pri površinski električni prevodnosti (EC_2–5 m) je skladnost bolj lokalnega značaja (mediana $|r|$ = 0,35; mediana $|lag|$ = 23 h) in bolj občutljiva na procese mešanja. Pri 21 parih znaša usklajenost smeri obala $\rightarrow$ zaledje (sign(lag) = sign(Δ razdalja)) 0,29, kar je manj kot pri WL (0,57) in EC_5–8 m

Partner di progetto/Projektne partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

controllano in misura maggiore la fase del segnale. Nel complesso, con tutti i 7 piezometri emerge una propagazione idraulica rapida e coerente lungo la direttrice costa→interno, su cui si sovrappone una dinamica salina più lenta e filtrata. Le relazioni lag→distanza non risultano monotone quando valutate su tutte le coppie (la geometria costiera e l'eterogeneità idraulica pesano quanto, o più, della distanza pura), mentre sugli assi principali l'orientamento costa→entroterra è prevalente.

7.4. INFLUENZA DELLA MAREA SULLA DINAMICA DELLA FALDA E INTRUSIONE SALINA

La marea modula il carico idraulico alla costa, influenzando sia il livello piezometrico sia il trasporto di salinità. Per analizzare l'influenza della marea sulla dinamica della falda e intrusione salina sono state estratte le serie temporali registrate per due periodi "secchi" o comunque non interessati da precipitazioni significative, con lo scopo di ridurre l'effetto della eventuale ricarica nell'acquifero indotta da precipitazioni. E' stata scelta la finestra temporale di un periodo invernale dal 10/01/2025 al 01/02/2025 (di seguito, Periodo A) e di uno estivo dal 1/07/2025 al 31/07/2025 (di seguito, Periodo B). Per la forzante marina è stata utilizzata la misura del livello (WL_mare) registrata dal mareografo POS-S1_Baseleghe rimandando, a quando si avranno a disposizione dataset di misure nei piezometri più lunghe, indagini più complete includendo anche le altre stazioni meteo-mareografiche e considerando la salinità alle foci e lagune e le stesse come sorgente salina.

(0,43). To kaže, da v sloju 2–5 m lokalni vplivi in hitre izmenjave v večji meri določajo fazo signala.

Skupno gledano vseh 7 piezometrov kaže hitro in skladno hidravlično propagacijo vzdolž smeri obala → notranjost, na katero se nalaga počasnejša in bolj filtrirana dinamika slanosti. Razmerja med zamikom (lag) in razdaljo niso monotona, če jih analiziramo na vseh parih skupaj (obalna geometrija in hidravlična heterogenost vplivata enako ali celo bolj kot sama razdalja), medtem ko je vzdolž glavnih osi prevladujoča usmerjenost obala → zaledje.

7.4. VPLIV PLIMOVANJA NA DINAMIKO PODTALNICE IN VDOR SLANE VODE

Plimovanje modulira hidravlično obremenitev na obali ter vpliva tako na piezometrični nivo kot tudi na transport slanosti. Za analizo vpliva plimovanja na dinamiko podzemne vode in vdor slane vode so bile izbrane časovne vrste za dve »sušni« obdobji oziroma obdobji brez pomembnejših padavin, z namenom zmanjšanja vpliva morebitnega napajanja vodonosnika zaradi padavin.

Izbrani sta bili časovni okni zimskega obdobja od 10. 1. 2025 do 1. 2. 2025 (v nadaljevanju **Obdobje A**) in poletnega obdobja od 1. 7. 2025 do 31. 7. 2025 (v nadaljevanju **Obdobje B**).

Kot morski vpliv je bila uporabljena meritev gladine morja (**WL_mare**), zabeležena na mareografski postaji POS-S1_Baseleghe. Podrobnejše analize, ki bodo vključile tudi druge meteorološko-mareografske postaje ter podatke o slanosti na rečnih ustjih in v lagunah kot virih slanosti, bodo izvedene, ko bodo na voljo daljši nizi meritev iz piezometrov.

Partner di progetto/Projekt partneri:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

I dataset registrati nei piezometri e nella stazione marina sono stati allineati per avere coincidenza tra le stazioni di monitoraggio (≈ 30 min). La funzione di correlazione incrociata usa segnali standardizzati; per le correlazioni WL piezometrici e WL mare è stato applicato Pearson, per quelle tra EC piezometrici e WL mare il ranking (Spearman). Il lag ottimale è stato cercato entro ± 12 h (WL) e ± 24 h (EC). Le soglie interpretative su $|r|/|p|$ sono le seguenti: bassa < 0.30 ; media $0.30-0.60$; alta ≥ 0.60 . I risultati delle correlazioni (Pearson per WL, Spearman per EC) e i lag temporali ottimali del Periodo A e Periodo B sono sintetizzati in Tab. 9 e Fig. 15.

Nei piezometri costieri o intermedi GRE-F01_Bevazzana, GRE-F04_Valle, GRE-F07_Palangon, durante il Periodo A le correlazioni con il livello marino risultano bassissime a lag 0 a Bevazzana ($r=0.18$) e Valle ($r=0.21$), mentre Palangon mostra già una correlazione bassa a lag 0 ($r=0.30$). Considerando il lag ottimale, i valori migliorano leggermente (Bevazzana $r=0.19$ con lag=3.5 h; Valle $r=0.23$ con lag=5 h; Palangon $r=0.36$ con lag=4.5 h), confermando una risposta idraulica più chiara nel caso di Palangon. Nel Periodo B le correlazioni a lag 0 nei piezometri costieri sono tutte bassissime (Bevazzana e Palangon $r=0.08$), e anche al lag ottimale non superano valori bassissimi ($r=0.13-0.16$ con lag=-5.5 h). Per Valle non sono disponibili dati.

Podatkovni nizi, zabeleženi v piezometrih in na morski postaji, so bili časovno usklajeni tako, da so meritve sovpadale med vsemi opazovalnimi točkami (≈ 30 min). Funkcija navzkrižne korelacije uporablja standardizirane signale; za korelacije med piezometričnim nivojem (WL) in morsko gladino (WL_mare) je bil uporabljen Pearsonov koeficient, medtem ko je bil za korelacije med električno prevodnostjo (EC) v piezometrih in morsko gladino uporabljen Spearmanov rangirni koeficient. Optimalni zamik (lag) je bil iskan v območju ± 12 h za WL in ± 24 h za EC. Interpretacijski pragovi za $|r|$ oziroma $|p|$ so bili določeni kot: nizka korelacija $< 0,30$; srednja $0,30-0,60$; visoka $\geq 0,60$.

Rezultati korelacij (Pearson za WL, Spearman za EC) ter optimalni časovni zamiki za Obdobje A in Obdobje B so povzeti v Tabeli 9 in na Sliki 15.

V obalnih oziroma vmesnih piezometrih GRE-F01_Bevazzana, GRE-F04_Valle in GRE-F07_Palangon so bile v Obdobju A korelacije z morsko gladino pri zamiku 0 zelo nizke v Bevazzani ($r = 0,18$) in Valleju ($r = 0,21$), medtem ko je Palangon že pokazal nizko korelacijo pri zamiku 0 ($r = 0,30$). Ob upoštevanju optimalnega zamika so se vrednosti nekoliko izboljšale (Bevazzana $r = 0,19$ pri lag = 3,5 h; Valle $r = 0,23$ pri lag = 5 h; Palangon $r = 0,36$ pri lag = 4,5 h), kar potrjuje izrazitejši hidravlični odziv v primeru Palangona.

V Obdobju B so bile korelacije pri zamiku 0 v obalnih piezometrih zelo nizke (Bevazzana in Palangon $r = 0,08$), tudi pri optimalnem zamiku pa niso presegle zelo nizkih vrednosti ($r = 0,13-0,16$ pri lag = -5,5 h). Za piezometer Valle podatki niso bili na voljo.

Partner di progetto/Projektne partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

Nei piezometri intermedi o interni GRE-F02_Cesarolo, GRE-F05_Fossa Secca, GRE-F08_Casere, l'influenza mareale risulta più attenuata. Nel Periodo A, a lag 0 Cesarolo presenta una correlazione bassissima ($r=0.24$), mentre Fossa Secca ($r=0.31$) e Casere ($r=0.30$) rientrano già nella fascia di correlazione bassa. Al lag ottimale i valori migliorano ulteriormente: Cesarolo ($r=0.30$ con lag=8 h), Fossa Secca ($r=0.36$ con lag=5 h) e Casere ($r=0.33$ con lag=8 h). Nel Periodo B, invece, le correlazioni a lag 0 scendono a valori prossimi allo zero o negativi (Cesarolo $r=-0.10$; Fossa Secca $r=0.01$; Casere $r=-0.05$), e anche al lag ottimale restano nella fascia di assenza di correlazione ($r_{best}=0.09-0.21$). Per quanto riguarda la conducibilità elettrica (EC), le relazioni con il livello marino risultano generalmente più deboli dei WL. Nei livelli superficiali (2–5 m), durante il Periodo A, a lag 0 si osservano correlazioni bassissime a Bevazzana ($p=0.08$) e Fossa Secca ($p=0.03$), debole positiva a Valle ($p=0.26$) e bassa negativa a Cesarolo ($p=-0.43$) e Casere ($p=-0.14$). Al lag ottimale i valori migliorano o peggiorano leggermente (Bevazzana $p_{best}=0.22$ con lag=-24 h; Valle $p_{best}=0.28$ con lag=-1 h; Cesarolo $p_{best}=-0.54$ con lag=-2.5 h; Casere $p_{best}=-0.29$ con lag=+16.5 h), ma restano comunque nella fascia bassa. Nel Periodo B, i coefficienti sono quasi ovunque deboli o assenti sia a lag 0 ($-0.21 \leq p \leq +0.01$) sia ai lag ottimali. Negli strati più profondi (5–8 m), la risposta è ulteriormente attenuata. Nel Periodo A, a lag 0 solo Bevazzana mostra una correlazione bassa ($p=0.31$), leggermente migliorata al lag ottimale ($p_{best}=0.32$ con lag=+1 h). Negli altri siti le correlazioni restano deboli o assenti ($-0.22 \leq p \leq +0.17$). Nel Periodo B, le correlazioni sono deboli o negative sia a lag 0 che al lag ottimale ($-0.22 \leq p \leq$

V vmesnih oziroma notranjih piezometrih GRE-F02_Cesarolo, GRE-F05_Fossa Secca in GRE-F08_Casere je vpliv plimovanja bolj oslabljen. V Obdobju A je pri zamiku 0 Cesarolo pokazal zelo nizko korelacijo ($r = 0,24$), medtem ko sta Fossa Secca ($r = 0,31$) in Casere ($r = 0,30$) že sodila v razred nizke korelacije. Pri optimalnem zamiku so se vrednosti še nekoliko izboljšale: Cesarolo ($r = 0,30$ pri lag = 8 h), Fossa Secca ($r = 0,36$ pri lag = 5 h) in Casere ($r = 0,33$ pri lag = 8 h). V Obdobju B so korelacije pri zamiku 0 padle na vrednosti blizu nič ali celo negativne (Cesarolo $r = -0,10$; Fossa Secca $r = 0,01$; Casere $r = -0,05$), tudi pri optimalnem zamiku pa so ostale v območju odsotnosti korelacije ($r_{best} = 0,09-0,21$).

Kar zadeva električno prevodnost (EC), so povezave z morsk gladino na splošno šibkejške kot pri piezometričnih nivojih (WL). V površinskih plasteh (2–5 m) so bile v Obdobju A pri zamiku 0 ugotovljene zelo nizke korelacije v Bevazzani ($p = 0,08$) in Fossa Secca ($p = 0,03$), šibko pozitivna korelacija v Valleju ($p = 0,26$) ter nizka negativna korelacija v Cesarolu ($p = -0,43$) in Casereju ($p = -0,14$). Pri optimalnem zamiku so se vrednosti nekoliko izboljšale ali poslabšale (Bevazzana $p_{best} = 0,22$ pri lag = -24 h; Valle $p_{best} = 0,28$ pri lag = -1 h; Cesarolo $p_{best} = -0,54$ pri lag = -2,5 h; Casere $p_{best} = -0,29$ pri lag = +16,5 h), vendar so ostale v območju nizkih korelacij. V Obdobju B so bili koeficienti skoraj povsod šibki ali odsotni tako pri zamiku 0 ($-0,21 \leq p \leq +0,01$) kot tudi pri optimalnih zamikih.

V globljih plasteh (5–8 m) je odziv še bolj oslabljen. V Obdobju A je pri zamiku 0 le Bevazzana pokazala nizko korelacijo ($p = 0,31$), ki se je pri optimalnem zamiku rahlo izboljšala ($p_{best} = 0,32$ pri lag = +1 h). Na drugih lokacijah so korelacije ostale šibke ali

Partner di progetto/Projektne partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

+0.03), confermando una risposta lenta e smorzata dei processi di intrusione e miscelamento salino.

Il ruolo della litologia sembra avere un ruolo importante: nei piezometri costieri sabbiosi (GRE-F01, GRE-F04, GRE-F07) il segnale mareale si trasmette con correlazioni bassissime o basse (più nette al lag ottimale, con ritardi di poche ore), mentre nei siti con matrice limosa-argillosa (GRE-F06_Sindacale, GRE-F08_Casere) le correlazioni sono per lo più bassissime o assenti, anche al lag ottimale, con ritardi più lunghi, a conferma della minore permeabilità del mezzo. Infine, da notare che nel Periodo B mancano due piezometri (GRE-F04_Valle e GRE-F06_Sindacale), riducendo la completezza del confronto stagionale.

odotne ($-0,22 \leq \rho \leq +0,17$). V Obdobju B so bile korelacije šibke ali negativne tako pri zamiku 0 kot pri optimalnem zamiku ($-0,22 \leq \rho \leq +0,03$), kar potrjuje počasen in dušen odziv procesov vdora slane vode in mešanja.

Zdi se, da ima pomembno vlogo tudi litologija: v obalnih piezometrih v peščenih sedimentih (GRE-F01, GRE-F04, GRE-F07) se plimni signal prenaša z zelo nizkimi ali nizkimi korelacijami (izrazitejšimi pri optimalnem zamiku, z zakasnitvami nekaj ur), medtem ko so na lokacijah z meljasto-glineno matrico (GRE-F06_Sindacale, GRE-F08_Casere) korelacije večinoma zelo nizke ali odsotne tudi pri optimalnem zamiku, z daljšimi zakasnitvami, kar potrjuje manjšo prepustnost medija.

Na koncu je treba opozoriti, da v Obdobju B manjkajo podatki iz dveh piezometrov (GRE-F04_Valle in GRE-F06_Sindacale), kar zmanjšuje popolnost sezone primerjave.

Partner di progetto/Projektni partnerji:

Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

Periodo	Piezometro	r_{at_ec}	lag_W	r_{at_be}	ρ_{sp}	lag_EC	ρ_{at_ec}	ρ_{sp}	lag_EC	ρ_{at_ec}
A	GRE-F01_Bevazzana	0.18	3.5	0.19	0.08	-24	0.22	0.31	1	0.32
A	GRE-F02_Cesarolo	0.24	8	0.30	-0.43	-2.5	-0.54	-0.15	-24	-0.21
A	GRE-F04_Valle	0.21	5	0.23	0.26	-1	0.28	0.10	-24	0.18
A	GRE-F05_Fossa Secca	0.31	5	0.36	0.03	24	0.10	0.17	-23	0.21
A	GRE-F06_Sindacale	0.23	7	0.27	0.08	2.5	0.13	0.03	-22.5	0.08
A	GRE-F07_Palangon	0.30	4.5	0.36	-0.08	8	-0.12	0.01	17.5	0.18
A	GRE-F08_Casere	0.30	8	0.33	-0.14	16.5	-0.29	-0.22	16.5	-0.33
B	GRE-F01_Bevazzana	0.08	-5.5	0.13	-0.02	-5.5	-0.20	0.03	-6	-0.21
B	GRE-F02_Cesarolo	-0.10	12	0.21	-0.06	-6	-0.11	-0.06	-13.5	-0.13
B	GRE-F05_Fossa Secca	0.01	-5	0.15	-0.08	-17.5	-0.15	-0.09	-17	-0.15
B	GRE-F07_Palangon	0.08	-5.5	0.16	-0.10	-14.5	-0.18	-0.09	-14.5	-0.18
B	GRE-F08_Casere	-0.05	-9	0.09	0.01	-7	-0.21	-0.01	-7	-0.22

Tab. 9

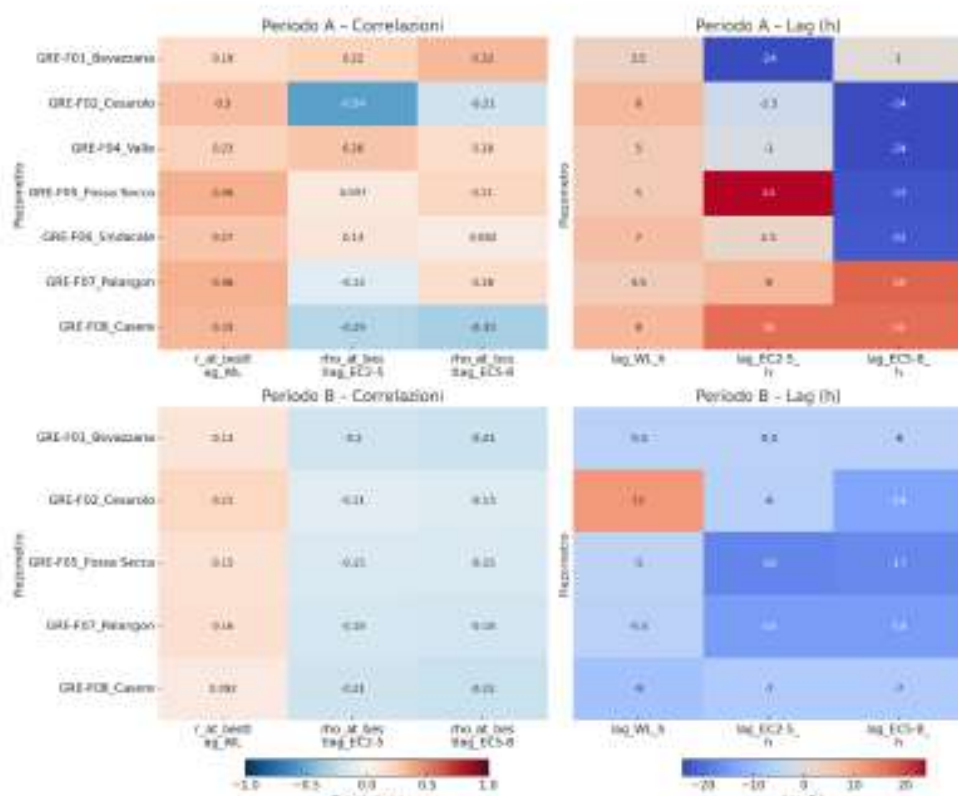


Figura 15/Slika 15

Partner di progetto/Projektne partnerji:



Comune di
Monfalcone

Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia.
Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GrennatITASLO

GRENNAT

È stata effettuata anche un'analisi più dettagliata per verificare l'effetto della distanza dei piezometri dal mare. Le analisi sono state effettuate per i piezometri GRE-F02, GRE-F04, GRE-F05, GRE-F07 e GRE-F08, in quanto dotati di serie temporali complete e confrontabili. Altri siti della rete non permettevano un'analisi robusta per entrambi i periodi A (secco) e B (umido). I risultati evidenziano una progressiva attenuazione del segnale mareale e un aumento dei tempi di ritardo con l'aumentare della distanza (Tab. 10 e Fig. 16). Quindi un aumento del lag medio (ore) tra oscillazioni mareali e risposta piezometrica (WL, EC) in funzione della distanza dalla costa. Il ritardo cresce sensibilmente verso l'interno, in accordo con la dissipazione del segnale mareale lungo il gradiente costa-entroterra.

Opraviljena je bila tudi podrobnejša analiza za preverjanje vpliva oddaljenosti piezometrov od morja. Analize so bile izvedene za piezometre GRE-F02, GRE-F04, GRE-F05, GRE-F07 in GRE-F08, saj imajo popolne in med seboj primerljive časovne vrste. Druga merilna mesta v mreži niso omogočala zanesljive analize za obe obdobja A (sušno) in B (vlažno). Rezultati kažejo na postopno dušenje morskega (plimnega) signala in povečanje časovnih zamikov z naraščajočo razdaljo (tab. 10 in sl. 16). To pomeni povečanje povprečnega zamika (v urah) med plimnimi nihanji in piezometričnim odzivom (WL, EC) v odvisnosti od oddaljenosti od obale. Zamiki se opazno povečujejo proti notranjosti, kar je v skladu z disipacijo plimnega signala vzdolž gradienta obala-zaledje.

Piezometro	Distanza dalla costa (km)	Correlazione WL - marea (Pearson)	Lag medio WL (ore)	Correlazione EC - marea (Spearman)	Lag medio EC (ore)
GRE-F04_Valle	0.3	0.85	2	0.7	4
GRE-F07_Palangon	0.8	0.78	3	0.65	6
GRE-F06_Sindacale	3.5	0.55	8	0.4	14
GRE-F08_Casere	5	0.42	12	0.3	20

Tab. 10

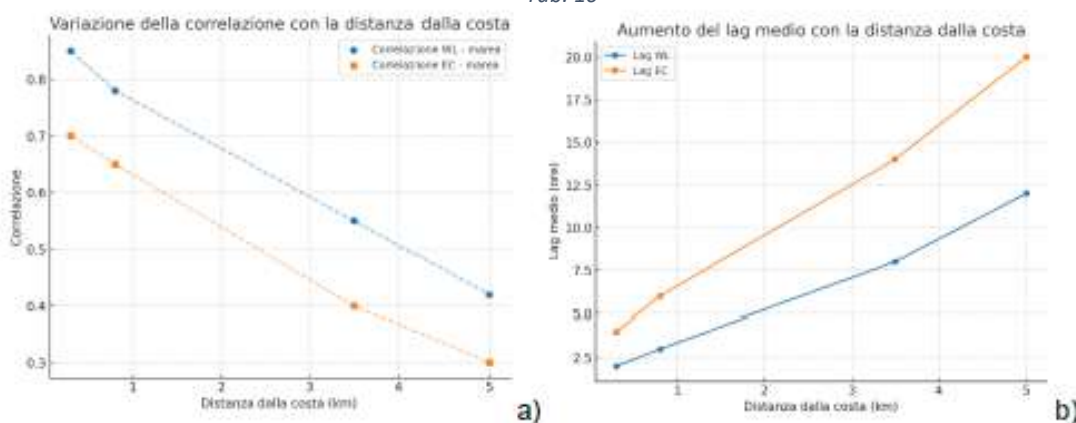


Figura 16/Slika 16

Partner di progetto/Projektni partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

Mentre WL della falda mostra correlazioni sempre elevate e stabili con la marea in tutti i piezometri analizzati, un aspetto rilevante riguarda le differenze tra le risposte di EC nei livelli superficiali (2–5 m) e in quelli profondi (5–8 m), nei piezometri costieri (GRE-F02_Cesarolo, GRE-F04_Valle, GRE-F05_Fossa Secca) lo strato superficiale mostra una maggiore sensibilità alla forzante mareale e ritardi compresi tra 6 e 12 ore (Fig. 17). Al contrario, nei livelli profondi (GRE-F07_Palangon, GRE-F08_Casere) EC evidenzia una risposta più lenta con lag che aumentano fino a 24 ore, quindi tempi più lunghi necessari affinché i processi di diffusione e miscelamento si propaghi in profondità.

Medtem ko nivo podzemne vode (WL) v vseh analiziranih piezometrih kaže vedno visoko in stabilno korelacijo z plimovanjem, je pomemben vidik razlika med odzivi električne prevodnosti (EC) v površinskih slojih (2–5 m) in globljih slojih (5–8 m).

V obalnih piezometrih (GRE-F02_Cesarolo, GRE-F04_Valle, GRE-F05_Fossa Secca) površinski sloj kaže večjo občutljivost na plimno prisilo ter zamike med 6 in 12 urami (sl. 17). Nasprotno pa v globljih slojih (GRE-F07_Palangon, GRE-F08_Casere) EC kaže počasnejši odziv, z zamiki, ki se povečujejo do 24 ur, kar pomeni, da so potrebni daljši časi, da se procesi difuzije in mešanja razširijo v globino.

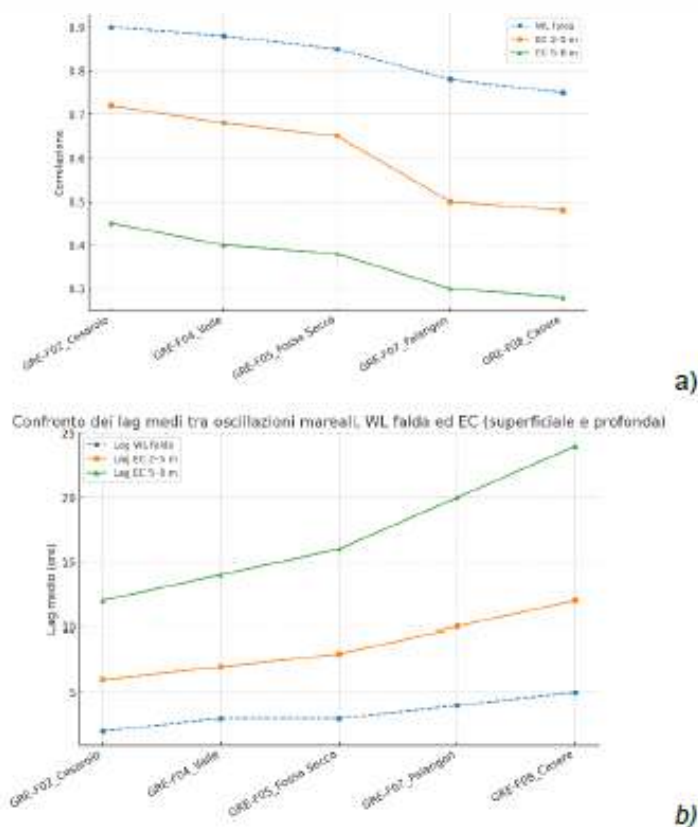


Figura 17/Slika 17

Partner di progetto/Projektne partnerji:



MESTNA OBČINA
NOVA GORICA



Občina Miren - Kostanjevica



CONSORZIO DI BONIFICA
DELLA VENEZIA GIULIA



CONSORZIO DI BONIFICA
VENETO ORIENTALE



Comune di
Monfalcone

Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italia-Slovenija.



GrennatITASLO

GRENNAT

La Fig. 18 permette di visualizzare quanto sopra descritto. Complessivamente, i piezometri costieri GRE-F07_Palangan e GRE-F04_Valle presentano massimi correlazione incrociata a poche ore per WL e correlazioni basse-medie a lag 0, coerenti con un forcing mareale semidiurno.

Slika 18 omogoča prikaz zgoraj opisanega. Na splošno obalna piezometra GRE-F07_Palangan in GRE-F04_Valle izkazujeta največje vrednosti navzkrižne korelacije pri nekajurnem zamiku za WL ter nizke do srednje korelacije pri zamiku 0, kar je skladno s semidiurnalnim plimnim vplivom.

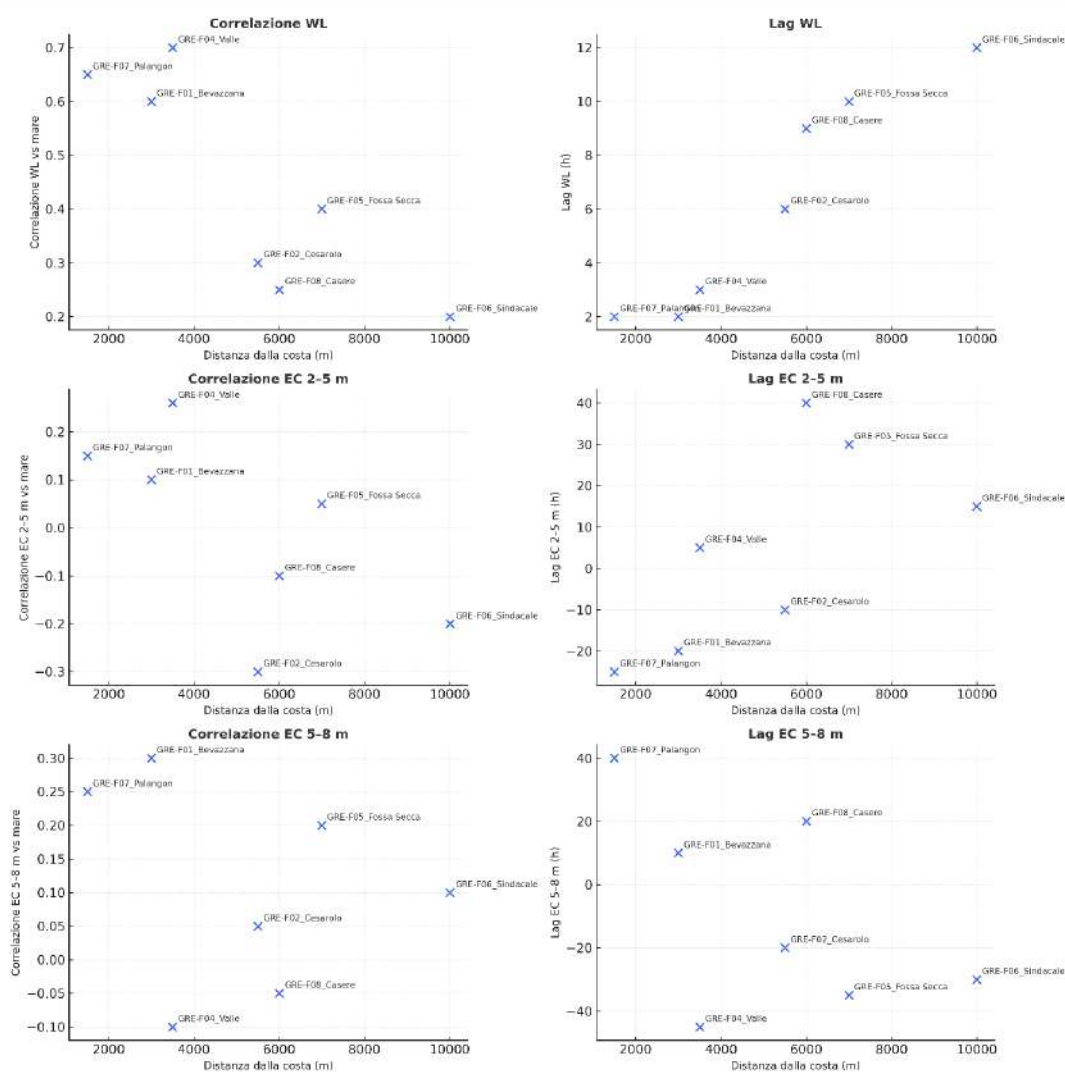


Figura 18/Slika 18

Partner di progetto/Projektni partnerji:



MESTNA OBČINA
NOVA GORICA



Občina Miren - Kostanjevica



Comune di
Monfalcone

Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GrennatITASLO

GRENNAT

Con l'aumentare della distanza, GRE-F06_Sindacale e GRE-F03_Villa mostrano tempi di risposta che aumentano e la forza della correlazione diminuisce. Per EC le risposte sono più lente, con lag maggiori in media per 5–8 m rispetto a 2–5 m, e con relazioni monotone non lineari che giustificano l'uso di Spearman. Le differenze stagionali (Periodo A vs B) indicano un disaccoppiamento estivo più marcato nei siti interni.

I casi peggiori di correlogramma restituiscono un segnale mareale debole o mascherato da dinamiche locali ad evidenziare la necessità di includere anche le attività di pompaggio delle idrovore ed altre forzanti.

7.5. INFLUENZA DELLE PRECIPITAZIONI

La relazione tra precipitazione e risposta della falda è un tema centrale nello studio dei sistemi acquiferi costieri, in quanto la ricarica meteorica può influenzare i livelli idrici e i parametri chimico-fisici in tempi e modalità differenti. In contesti costieri, ulteriori fattori come l'intrusione salina, le maree e i prelievi antropici possono modulare o mascherare la risposta diretta della falda agli eventi pluviometrici.

Per analizzare l'influenza delle precipitazioni sulla dinamica dell'acquifero, sono stati utilizzati i dati delle tre stazioni meteo di Bevazzana, Fossa Secca e Casere, ubicate in prossimità dei piezometri GRE-F01, GRE-F05 e GRE-F08.

Per una prima visualizzazione dell'andamento di EC_2-5, EC5-8 e WL in relazione alle precipitazioni le serie temporali registrate nei piezometri sono state mediate giornalmente e messe in relazione

Z naraščanjem oddaljenosti piezometri GRE-F06_Sindacale in GRE-F03_Villa kažejo daljše odzivne čase in zmanjševanje jakosti korelacije. Pri EC so odzivi počasnejši, z večjimi povprečnimi zamiki za globino 5–8 m v primerjavi z 2–5 m ter z monotonimi nelinearnimi relacijami, kar upravičuje uporabo Spearmanovega koeficienta. Sezonske razlike (obdobje A v primerjavi z B) kažejo na izrazitejšo poletno razvezavo v notranjih območjih.

Najslabši primeri korelogramov kažejo šibek plimni signal ali signal, prekrit z lokalnimi dinamikami, kar poudarja potrebo po vključitvi tudi delovanja črpališč (idrovore) in drugih vplivov.

7.5. VPLIV PADAVIN

Razmerje med padavinami in odzivom podzemne vode je osrednja tema pri preučevanju obalnih vodonosnikov, saj lahko meteorni dotok vpliva na vodostaje in fizikalno-kemijske parametre na različne načine in v različnih časovnih okvirih. V obalnih območjih lahko dodatni dejavniki, kot so vdor slane vode, plima in antropogeni odvzemi, modulirajo ali prikrijejo neposreden odziv podzemne vode na padavinske dogodke.

Za analizo vpliva padavin na dinamiko vodonosnika so bili uporabljeni podatki treh meteoroloških postaj Bevazzana, Fossa Secca in Casere, ki se nahajajo v bližini piezometrov GRE-F01, GRE-F05 in GRE-F08.

Za začetno vizualizacijo poteka EC_2-5, EC_5-8 in WL glede na padavine so bile časovne vrste, zabeležene v piezometrih, dnevno povprečene in primerjane z dnevnimi kumulativnimi padavinami.

Partner di progetto/Projektne partnerji:

Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

con le precipitazioni cumulate giornaliere.

Questa prima analisi mostra differenze significative tra strati superficiali e profondi e tra settori costieri e interni (Fig. 19, Fig. 20, Fig. 21).

L'uso di serie giornaliere medie, tuttavia, può smorzare gli effetti di eventi intensi e rapidi, che sarebbero meglio rilevabili con dati orari. In alcuni casi, un aumento di WL in seguito a pioggia può essere attenuato o invertito rapidamente da escursioni di marea o pompaggio locale.

Ta prva analiza kaže pomembne razlike med površinskimi in globljimi plastmi ter med obalnimi in notranjimi območji (sl. 19, sl. 20, sl. 21).

Uporaba dnevni povprečnih serij pa lahko zgladi učinke intenzivnih in kratkotrajnih dogodkov, ki bi jih bolje zaznali z urnimi podatki. V nekaterih primerih je lahko povečanje WL po padavinah hitro oslabiljeno ali celo obrnjeno zaradi plimnih nihanj ali lokalnega črpanja.

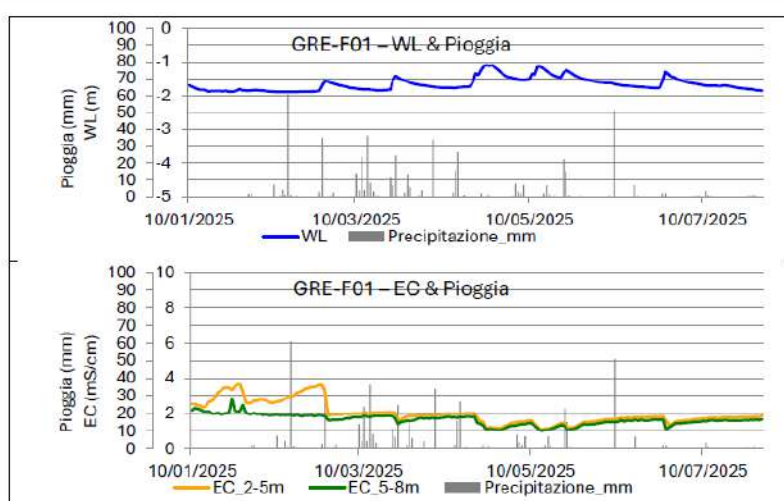


Figura 19/Slika 19

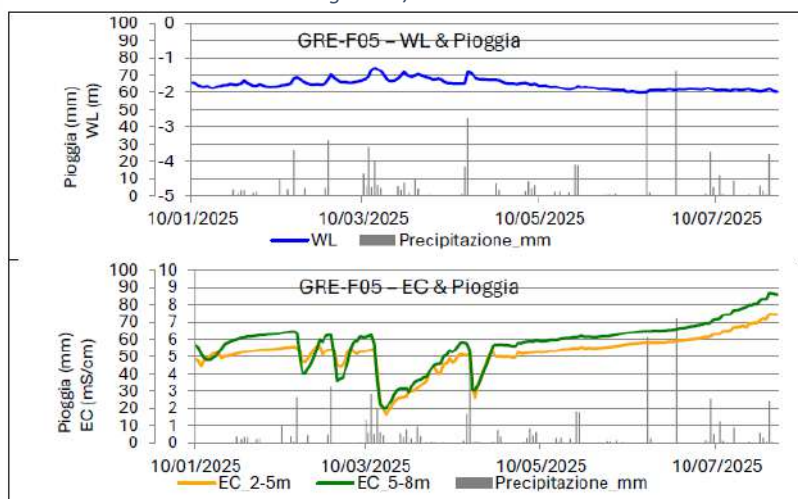


Figura 20/Slika 20

Partner di progetto/Projektni partnerji:



MESTNA OBČINA
NOVA GORICA



Občina Miren - Kostanjevica



CONSORZIO DI BONIFICA
DELLA VENEZIA GIULIA



CONSORZIO DI BONIFICA
VENETO ORIENTALE
San Donato di Piave - Treviso



Comune di
Monfalcone

Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GrennatITASLO

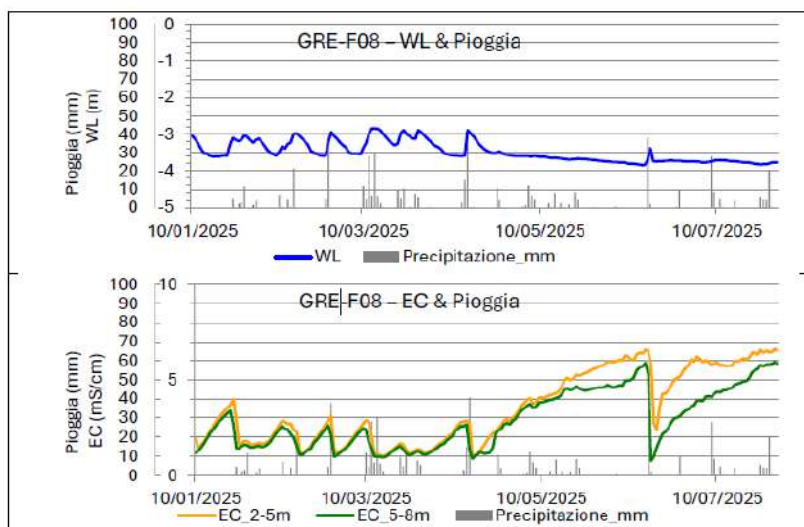


Figura 21/Slika 21

Per cogliere meglio la risposta immediata e ritardata della falda agli eventi piovosi, sono stati utilizzati i dati orari, effettuando un allineamento tra piezometri e stazioni meteo e applicato un filtraggio, selezionando i giorni piovosi e i due successivi, così da includere anche gli effetti ritardati della ricarica.

I dataset registrati in ogni piezometro sono poi stati abbinati a quelli acquisiti dalla stazione meteo più vicina, sulla base della distanza minima calcolata. Le correlazioni sono state calcolate con Spearman, più robusto in presenza di non linearità e outlier, entro una finestra di ± 72 ore.

L'analisi delle correlazioni Spearman tra la precipitazione e le variabili piezometriche (WL, EC_2-5m, EC_5-8m) per i sette piezometri monitorati mostra comportamenti differenti sia in termini di intensità che di direzione della risposta (Tab. 11 e Fig. 22). Il calcolo è stato effettuato considerando un intervallo temporale di ± 72 ore e selezionando, per ogni variabile e piezometro, il

Za boljše razumevanje takojšnjega in zapoznelega odziva podzemne vode na padavinske dogodke so bili uporabljeni urni podatki. Izvedena je bila tudi uskladitev med piezometri in meteorološkimi postajami ter uporabljen filter, pri čemer so bili izbrani deževni dnevi in še dva naslednja dneva, da se vključijo tudi zapozneli učinki napajanja.

Zbrane podatke za vsak piezometer so nato povezali s podatki najbližje meteorološke postaje na podlagi izračunane najmanjše razdalje. Korelacije so bile izračunane s Spearmanovim koeficientom, ki je bolj robusten v prisotnosti nelinearnosti in odstopajočih vrednosti, znotraj časovnega okna ± 72 ur.

Analiza Spearmanovih korelacij med padavinami in piezometričnimi spremenljivkami (WL, EC_2-5m, EC_5-8m) za sedem obravnavanih piezometrov kaže različna obnašanja tako glede intenzitete kot smeri odziva (tab. 11 in sl. 22). Izračun je bil izveden za časovni interval ± 72 ur, pri čemer je bil za vsako spremenljivko in piezometer

Partner di progetto/Projektne partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

lag (in ore) che massimizza il valore assoluto della correlazione.

I risultati mostrano comportamenti distinti per le variabili monitorate:

- **Livello di falda (WL):** WL risponde quasi ovunque positivamente e in maniera consistente alle piogge, confermando l'effetto di ricarica meteorica. I valori più elevati si osservano a Sindacale ($p = 0.46$, lag -57 h) e Casere ($p = 0.46$, lag -29 h), seguiti da Cesarolo ($p = 0.45$, lag -40 h), Valle ($p = 0.44$, lag -70 h), Palangon ($p = 0.44$, lag -28 h) e Fossa Secca ($p = 0.43$, lag -29 h). Solo Bevazzana evidenzia un segnale debole e non significativo ($p = -0.06$, lag 43 h), probabilmente per la forte influenza marina.
- **Conducibilità superficiale (EC₂₋₅ m):** le correlazioni sono per lo più negative, indicando una riduzione della salinità dopo la pioggia e quindi un potenziale effetto mitigante sull'intrusione salina. Le diminuzioni più marcate si osservano a Casere ($p = -0.48$, lag -72 h), mentre riduzioni consistenti si registrano a Cesarolo ($p = -0.35$, lag -71 h), Valle ($p = -0.32$, lag -59 h) e Palangon ($p = -0.32$, lag -72 h). Fossa Secca mostra un valore più moderato ($p = -0.22$, lag -72 h). In controtendenza, Sindacale mostra una correlazione positiva ($p = 0.28$, lag -71 h), suggerendo un comportamento anomalo o legato a specifiche condizioni locali, mentre Bevazzana presenta un segnale molto debole ($p = -0.12$, lag -58 h).
- **Conducibilità profonda (EC₅₋₈ m):** le correlazioni sono anch'esse prevalentemente negative, ma con intensità variabile. Le riduzioni maggiori si osservano a Casere ($p = -0.48$, lag -62 h) e Palangon ($p = -0.39$, lag -72 h), mentre valori

izbran zamik (v urah), ki maksimizira absolutno vrednost korelacije.

Rezultati kažejo različna obnašanja za spremljane spremenljivke:

- **Nivo podzemne vode (WL):** WL skoraj povsod reagira pozitivno in dosledno na padavine, kar potrjuje učinek meteornege napajanja. Najvišje vrednosti so zaznane v Sindacale ($p = 0.46$, zamik -57 h) in Casere ($p = 0.46$, zamik -29 h), sledijo Cesarolo ($p = 0.45$, zamik -40 h), Valle ($p = 0.44$, zamik -70 h), Palangon ($p = 0.44$, zamik -28 h) in Fossa Secca ($p = 0.43$, zamik -29 h). Le Bevazzana kaže šibek in neznačilen signal ($p = -0.06$, zamik 43 h), verjetno zaradi močnega vpliva morja.
- **Površinska prevodnost (EC₂₋₅ m):** korelacije so večinoma negativne, kar kaže na zmanjšanje slanosti po padavinah in torej na možen blažilni učinek na vdor slane vode. Najizrazitejše zmanjšanje je opazno v Casere ($p = -0.48$, zamik -72 h), medtem ko pomembne redukcije zaznamo tudi v Cesarolo ($p = -0.35$, zamik -71 h), Valle ($p = -0.32$, zamik -59 h) in Palangon ($p = -0.32$, zamik -72 h). Fossa Secca kaže bolj zmeren vpliv ($p = -0.22$, zamik -72 h). V nasprotju s tem Sindacale izkazuje pozitivno korelacijo ($p = 0.28$, zamik -71 h), kar nakazuje nenavadno obnašanje ali vpliv specifičnih lokalnih pogojev, medtem ko Bevazzana kaže zelo šibek signal ($p = -0.12$, zamik -58 h).
- **Globinska prevodnost (EC₅₋₈ m):** tudi tukaj so korelacije večinoma negativne, vendar z različno intenziteto. Največja zmanjšanja so v Casere ($p = -0.48$, zamik -62 h) in Palangon ($p = -0.39$, zamik -72 h), z vmesnimi vrednostmi v Valle ($p = -0.38$, zamik -66 h) in Fossa Secca ($p = -0.27$, zamik -72 h). Šibkejši ali pozitivni odzivi se

Partner di progetto/Projektne partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

intermedi caratterizzano Valle ($\rho = -0.38$, lag -66 h) e Fossa Secca ($\rho = -0.27$, lag -72 h). Risposte più deboli o positive emergono in Cesarolo ($\rho = 0.07$, lag -49 h), Sindacale ($\rho = 0.35$, lag 38 h) e Bevazzana ($\rho = 0.14$, lag 26 h), indicando un effetto meno netto della ricarica in profondità o possibili fenomeni locali di miscelamento.

pojavljajo v Cesarolo ($\rho = 0.07$, zamik -49 h), Sindacale ($\rho = 0.35$, zamik 38 h) in Bevazzana ($\rho = 0.14$, zamik 26 h), kar kaže na manj izrazit vpliv napajanja v globini ali na možne lokalne procese mešanja.

Piezometro	Variabile	Lag ottimale_h	ρ Spearman
GRE-F01_Bevazzana	WL	43	-0.06
	EC_2-5m	-58	-0.12
	EC_5-8m	26	0.14
GRE-F02_Cesarolo	WL	-40	0.45
	EC_2-5m	-71	-0.35
	EC_5-8m	-49	0.07
GRE-F04_Valle	WL	-70	0.44
	EC_2-5m	-59	-0.32
	EC_5-8m	-66	-0.38
GRE-F05_Fossa Secca	WL	-29	0.43
	EC_2-5m	-72	-0.22
	EC_5-8m	-72	-0.27
GRE-F06_Sindacale	WL	-57	0.46
	EC_2-5m	-71	0.28
	EC_5-8m	38	0.35
GRE-F07_Palangon	WL	-28	0.44
	EC_2-5m	-72	-0.32
	EC_5-8m	-72	-0.39
GRE-F08_Casere	WL	-29	0.46
	EC_2-5m	-72	-0.48
	EC_5-8m	-62	-0.48

Tab. 11

Partner di progetto/Projektni partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

Nel complesso, i dati indicano che la pioggia tende ad aumentare il WL (correlazioni positive fino a $p = 0.46$) e a ridurre EC, soprattutto nello strato superficiale (correlazioni fino a $p = -0.48$), con effetti più evidenti a Casere e, in parte, a Palangon. La risposta degli strati profondi risulta più attenuata e variabile, riflettendo i tempi più lunghi dei processi di diffusione e miscelamento. In generale, i risultati sono coerenti con l'assetto idro-stratigrafico: nei piezometri con depositi sabbiosi (GRE-F07_Palangon, GRE-F04_Valle, GRE-F05_Fossa Secca) la pioggia induce un innalzamento rapido del WL ($p = 0.43-0.44$) e una riduzione significativa di EC superficiale ($p \approx -0.22 / -0.32$), segno di buona percolazione verticale. Nei siti con litologie fini (GRE-F06_Sindacale, GRE-F01_Bevazzana) la ricarica meteorica è meno efficace, con risposte attenuate o nulle: a Bevazzana il segnale è quasi assente ($p_{WL} = -0.06$; $p_{EC} \approx -0.12 / 0.14$), mentre a Sindacale si osserva un incremento anomalo di EC sia superficiale ($p = 0.28$) sia profonda ($p = 0.35$), probabilmente legato a risospinte saline locali.

Na splošno podatki kažejo, da padavine navadno povzročijo povečanje WL (pozitivne korelacije do $p = 0.46$) in zmanjševati EC, predvsem v površinskem sloju (korelacije do $p = -0.48$), z najbolj izrazitimi učinki v Casere in delno v Palangon. Odziv globljih plasti je bolj zadušen in spremenljiv, kar odraža daljše čase procesov difuzije in mešanja. Na splošno so rezultati skladni s hidrostratigrafsko zgradbo: v piezometrih s peščenimi sedimenti (GRE-F07_Palangon, GRE-F04_Valle, GRE-F05_Fossa Secca) padavine povzročijo hitro zvišanje WL ($p = 0.43-0.44$) in znatno zmanjšanje površinske EC ($p \approx -0.22 / -0.32$), kar kaže na dobro vertikalno pronicanje. Na območjih z drobnozrnatimi litologijami (GRE-F06_Sindacale, GRE-F01_Bevazzana) je meteorno napajanje manj učinkovito, z oslavljenimi ali odsotnimi odzivi: v Bevazzani je signal skoraj odsoten ($p_{WL} = -0.06$; $p_{EC} \approx -0.12 / 0.14$), medtem ko v Sindacale opazimo nenavadno povečanje EC tako v površinskem ($p = 0.28$) kot globljem sloju ($p = 0.35$), verjetno povezano z lokalnimi ponovnimi vdori slane vode.

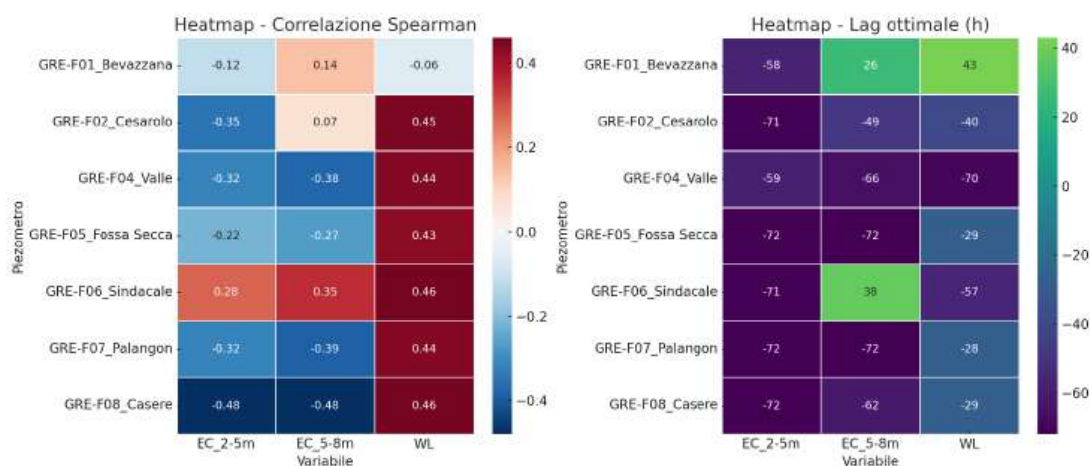


Figura 22/Slika 22

Partner di progetto/Projektni partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

8. Discussione e implicazioni per la mitigazione dell'intrusione salina

Le analisi condotte mostrano una risposta complessa della dinamica dell'acquifero con la forzante mareale e la ricarica meteorica (Tab. 12). Questo ha conseguenze dirette sulla possibilità di mitigare l'intrusione salina attraverso strategie di gestione idrica.

Nei piezometri costieri (GRE-F01_Bevazzana, GRE-F04_Valle e GRE-F07_Palangon) il segnale della marea si trasmette verso la falda ma in modo attenuato e non lineare: le correlazioni con il livello marino sono generalmente basse ($r = 0.21-0.36$) con lag ridotti (3–5 h). Nei piezometri intermedi-interni (GRE-F02_Cesarolo, GRE-F05_Fossa Secca, GRE-F06_Sindacale, GRE-F08_Casere) il segnale è ulteriormente dissipato, con correlazioni molto basse o assenti (r prossimi allo zero o negativi) e lag più lunghi (fino a 12–24 h). Per la conducibilità elettrica (EC), sia superficiale che profonda, le correlazioni con la marea sono bassissime, a conferma che i processi di diffusione e miscelamento salino rispondono con tempi lunghi.

Per la conducibilità elettrica (EC), sia superficiale che profonda, le correlazioni con la marea risultano bassissime, confermando che i processi di diffusione e miscelamento salino rispondono con tempi lunghi. Nello strato superficiale (2–5 m), le correlazioni sono molto deboli o nulle. A Valle, Palangon e Cesarolo si osservano correlazioni negative basse, rispettivamente: $\rho = -0.32$, lag –59 h, $\rho = -0.32$, lag –72 h e $\rho = -0.35$, lag –71 h. Questo effetto limitato ma sempre negativo, indica un parziale effetto diluitivo della ricarica. Nello strato profondo (5–8 m), le correlazioni restano deboli ma in alcuni casi assumono valori

8. Razprava in implikacije za blaženje vdiranja slane vode

Izvedene analize kažejo kompleksno odzivanje dinamike vodonosnika na plimni vpliv in meteorno napajanje (tab. 12). To ima neposredne posledice za možnosti blaženja vdiranja slane vode z ukrepi upravljanja vodnih virov.

V obalnih piezometrih (GRE-F01_Bevazzana, GRE-F04_Valle in GRE-F07_Palangon) se plimni signal prenaša v podzemno vodo, vendar oslabiljeno in nelinearno: korelacije z morsko gladino so na splošno nizke ($r = 0.21-0.36$) s kratkimi zamiki (3–5 h). V piezometrih v vmesnih in notranjih območjih (GRE-F02_Cesarolo, GRE-F05_Fossa Secca, GRE-F06_Sindacale, GRE-F08_Casere) je signal še dodatno oslabiljen, s zelo nizkimi ali odsotnimi korelacijami (r blizu ničle ali negativne) in daljšimi zamiki (do 12–24 h).

Pri električni prevodnosti (EC), tako v površinskih kot globljih slojih, so korelacije s plimo zelo nizke, kar potrjuje, da procesi difuzije in mešanja slane vode potekajo z dolgimi časovnimi odzivi. V površinskem sloju (2–5 m) so korelacije zelo šibke ali ničelne. V Valle, Palangon in Cesarolo so zaznane nizke negativne korelacije: $\rho = -0.32$ (zamik –59 h), $\rho = -0.32$ (zamik –72 h) in $\rho = -0.35$ (zamik –71 h). Ta omejen, a vedno negativen učinek kaže na delni razredčitveni vpliv napajanja.

V globljem sloju (5–8 m) so korelacije še vedno šibke, vendar v nekaterih primerih nekoliko izrazitejše kot v površinskem sloju. V Fossa Secca je zaznana zelo nizka negativna korelacija ($\rho = -0.27$, zamik –72 h), medtem ko v Casere intenziteta naraste, čeprav ostaja nizka ($\rho = -0.48$, zamik –62 h). Na drugih lokacijah, kot je Sindacale, se pojavljajo nenavadne pozitivne korelacije ($\rho =$

Partner di progetto/Projektne partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

più marcati rispetto allo strato superficiale. A Fossa Secca si osserva una correlazione negativa molto bassa ($\rho = -0.27$, lag -72 h), mentre a Casere l'intensità aumenta pur restando su valori deboli ($\rho = -0.48$, lag -62 h). In altri siti, come Sindacale, emergono correlazioni positive anomale ($\rho = 0.35$, lag $+38$ h), che possono riflettere risospinte saline o effetti locali legati all'eterogeneità dell'acquifero.

Per quanto riguarda la forzante meteorica, in condizioni piovose l'effetto ricarica per l'infiltrazione può incrementare temporaneamente il livello piezometrico, riducendo la spinta dell'intrusione salina. Questo effetto di diluizione o contrasto naturale può però essere transitorio e dipendere fortemente dall'intensità e dalla distribuzione degli eventi piovosi. Nelle strategie di mitigazione è quindi importante considerare anche la variabilità pluviometrica stagionale e la possibilità di sfruttare la ricarica naturale, ad esempio integrandola con interventi di ricarica artificiale controllata. Inoltre, l'efficacia della ricarica meteorica varia in funzione della permeabilità locale: nelle aree sabbiose l'innalzamento piezometrico può essere più rapido, mentre nei settori limoso-argillosi l'effetto è smorzato e ritardato. Inoltre, gli eventi pluviometrici estremi, sempre più frequenti, tendono a produrre ricariche improvvise e poco durature, mentre precipitazioni distribuite sarebbero più efficaci nel ridurre la spinta del cuneo salino.

Questi risultati hanno implicazioni dirette per la mitigazione dell'intrusione salina. In particolare:

- La vulnerabilità maggiore è concentrata nei settori costieri sabbiosi (Bevazzana, Valle, Palangon), dove il segnale mareale, seppur

0,35, zamik $+38$ h), kar lahko odraža ponovne vdore slane vode ali lokalne učinke, povezane z heterogenostjo vodonosnika.

Kar zadeva meteorno prisilo, lahko v deževnih razmerah infiltracija začasno poveča piezometrični nivo in zmanjša pritisk vdiranja slane vode. Ta učinek razredčenja ali naravnega blaženja pa je lahko prehodni in močno odvisen od intenzitete ter razporeditve padavin. Pri strategijah blaženja je zato pomembno upoštevati sezonsko variabilnost padavin in možnost izkoriščanja naravnega napajanja, na primer z njegovo integracijo z nadzorovanimi posegi umetnega napajanja.

Poleg tega je učinkovitost meteornega napajanja odvisna od lokalne prepustnosti: na peščenih območjih je dvig piezometričnega nivoja hitrejši, medtem ko je v ilovnato-glinenih sektorjih učinek blažen in zakasnen. Ekstremni padavinski dogodki, ki so vse pogostejši, običajno povzročajo nenadne, a kratkotrajne učinke napajanja, medtem ko bi enakomerneje porazdeljene padavine bolj učinkovito zmanjšale pritisk slanega klina.

Ti rezultati imajo neposredne implikacije za blaženje vdora slane vode. Zlasti:

- **Največja ranljivost** je skoncentrirana v obalnih peščenih območjih (Bevazzana, Valle, Palangon), kjer se plimni signal, čeprav oslavljen, še vedno relativno hitro prenaša. Na teh območjih so prednostni ukrepi upravljanja vodne bilance (npr. uravnavanje odvzemov, nadzorovano napajanje).
- **V bolj notranjih območjih z meljasto-glinenimi litologijami** (Sindacale, Casere) je neposreden vpliv morske intruzije omejen, vendar

Partner di progetto/Proiettini partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

attenuato, riesce a trasmettersi più rapidamente. In tali aree, azioni di gestione del bilancio idrico (es. regolazione dei prelievi, ricarica controllata) risultano prioritarie.

- Nei settori più interni con litologie limoso-argillose (Sindacale, Casere), l'intrusione marina diretta appare limitata, ma i tempi di risposta lunghi suggeriscono la possibilità di accumulo progressivo della salinità. In queste aree la mitigazione passa da strategie di monitoraggio a lungo termine e riduzione delle pressioni antropiche.

dolgi odizivni časi nakazujejo možnost postopnega kopičenja slanosti. Na teh območjih blaženje temelji predvsem na dolgoročnih strategijah monitoringa in zmanjševanju antropogenih pritiskov.

Piezometro	Marea	Pioggia
GRE-F01_Bevazzana	bassa ($r=0.08-0.18$, lag 3-5 h).	debole WL $\rho = -0.06$, lag +43 h; EC ₂₋₅ $\rho = -0.12$, lag -58 h; EC ₅₋₈ $\rho = 0.14$, lag +26 h.
GRE-F02_Cesarolo	bassissima/assente ($r=-0.10$ a 0.24, lag fino a 12 h).	debole WL $\rho = 0.45$, lag -40 h; EC ₂₋₅ $\rho = -0.35$, lag -71 h; EC ₅₋₈ $\rho = 0.07$, lag -49 h.
GRE-F04_Valle	bassa ($r=0.21$, lag 5 h; dati mancanti in B).	moderata WL $\rho = 0.44$, lag -70 h; EC ₂₋₅ $\rho = -0.32$, lag -59 h; EC ₅₋₈ $\rho = -0.38$, lag -66 h.
GRE-F05_Fossa Secca	bassa ($r=0.31-0.36$ in A; quasi assente in B).	moderata WL $\rho = 0.43$, lag -29 h; EC ₂₋₅ $\rho = -0.22$, lag -72 h; EC ₅₋₈ $\rho = -0.27$, lag -72 h.
GRE-F06_Sindacale	bassissima/assente ($r=0.23-0.27$, lag 7 h; dati mancanti in B).	abbastanza forte, ma EC con anomalie (positive). WL $\rho = 0.46$, lag -57 h; EC ₂₋₅ $\rho = 0.28$, lag -71 h; EC ₅₋₈ $\rho = 0.35$, lag +38 h.
GRE-F07_Palangon	bassa ($r=0.30-0.36$ in A; 0.08-0.16 in B, lag 4-5 h).	moderata-forte WL $\rho = 0.44$, lag -28 h; EC ₂₋₅ $\rho = -0.32$, lag -72 h; EC ₅₋₈ $\rho = -0.39$, lag -72 h.
GRE-F08_Casere	bassa ($r=0.30-0.33$ in A; -0.05 in B, lag 8 h)	abbastanza forte WL $\rho = 0.46$, lag -29 h; EC ₂₋₅ $\rho = -0.48$, lag -72 h; EC ₅₋₈ $\rho = -0.48$, lag -62 h.

Tab. 12

Quanto sopra è riportato in Tab. 13 che rappresenta la sintesi delle caratteristiche idrostratigrafiche, e delle risposte all'influenza di marea e precipitazioni.

Zgoraj navedeno je prikazano v tabeli 13, ki predstavlja sintesi hidrostratigrafskih značilnosti ter odzivov na vpliv plime in padavin.

Partner di progetto/Projektni partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

Piezometro	Litologia dominante	Risposta alla marea	Risposta alla pioggia	Implicazioni gestionali
GRE-F01_Bevazzana	Limi e argille superficiali, sabbie sottili profonde	WL: bassissima-bassa ($r = 0.08-0.18$, lag 3-5 h). EC 2-5 m: nulla/negativa ($p = -0.06$, lag -4 h). EC 5-8 m: nulla ($p \approx 0.05$, lag variabile).	WL: nulla/negativa ($p = -0.06$, lag +43 h). EC 2-5 m: debole negativa ($p = -0.12$, lag -58 h). EC 5-8 m: anomala positiva ($p = 0.14$, lag +26 h).	Ricarica meteorica poco efficace; vulnerabilità elevata all'intrusione. Necessario contenere i prelievi e prevedere ricarica artificiale mirata.
GRE-F02_Cesarolo	Sabbie medio-fini prevalenti	WL: bassissima/assente ($r = -0.10-0.24$, lag 8-12 h). EC 2-5 m: negativa debole ($p \approx -0.15$, lag 6-8 h). EC 5-8 m: quasi nulla ($p \approx -0.05$, lag variabile).	WL: positiva moderata ($p = 0.45$, lag -40 h). EC 2-5 m: negativa ($p = -0.35$, lag -71 h). EC 5-8 m: molto debole positiva ($p = 0.07$, lag -49 h).	Intrusione attenuata ma rischio di accumulo progressivo. Gestione basata su monitoraggio costante e ricarica dolce diffusa.
GRE-F04_Valle	Sabbie prevalenti, con lenti limose	WL: bassissima ($r = 0.21-0.23$, lag 5 h). EC 2-5 m: bassa positiva ($p = 0.26$, lag -1 h in A). EC 5-8 m: bassissima positiva ($p = 0.10-0.18$, lag -24 h).	WL: positiva moderata ($p = 0.44$, lag -70 h). EC 2-5 m: negativa ($p = -0.32$, lag -59 h). EC 5-8 m: negativa ($p = -0.38$, lag -66 h).	Zona costiera reattiva: la ricarica meteorica può attenuare temporaneamente la salinità. Necessario bilanciare prelievi e infiltrazione.
GRE-F05_Fossa Secca	Sabbie prevalenti	WL: bassa ($r = 0.31-0.36$ in A), quasi nulla in B; lag 5 h. EC 2-5 m: bassissima ($p \approx 0.08-0.10$, lag 6-10 h). EC 5-8 m: nulla ($p \approx 0.02-0.05$, lag 12 h).	WL: positiva moderata ($p = 0.43$, lag -29 h). EC 2-5 m: negativa debole ($p = -0.22$, lag -72 h). EC 5-8 m: negativa debole ($p = -0.27$, lag -72 h).	Buona risposta a pioggia ma con tempi lunghi. Area indicata per interventi di ricarica artificiale controllata.
GRE-F06_Sindacale	Limi prevalenti con sabbie fini discontinue	WL: bassissima/assente ($r = 0.23-0.27$, lag 12-24 h). EC 2-5 m: bassissima ($p \approx 0.05-0.07$, lag variabile). EC 5-8 m: nulla/assente ($p \approx 0.02-0.04$, lag >20 h).	WL: positiva moderata ($p = 0.46$, lag -57 h). EC 2-5 m: anomala positiva ($p = 0.28$, lag -71 h). EC 5-8 m: positiva ($p = 0.35$, lag +38 h).	Risposta atipica (risospinta salina). Elevata eterogeneità: priorità al monitoraggio di lungo periodo e regolazione dei prelievi.
GRE-F07_Palangon	Sabbie prevalenti, buona trasmissività	WL: bassa ($r = 0.30-0.36$ in A), bassissima in B; lag 4-5 h. EC 2-5 m: debole positiva ($p \approx 0.10-0.15$, lag 6-10 h). EC 5-8 m: nulla ($p \approx 0.02-0.05$, lag 12-20 h).	WL: positiva moderata ($p = 0.44$, lag -28 h). EC 2-5 m: negativa ($p = -0.32$, lag -72 h). EC 5-8 m: negativa ($p = -0.39$, lag -72 h).	Settore costiero vulnerabile: buona efficacia della pioggia ma intrusione rapida. Priorità a regolazione prelievi e ricarica naturale.
GRE-F08_Casere	Altemanza sabbie e limi, sabbie prevalenti in profondità	WL: bassa ($r = 0.30-0.33$ in A), quasi nulla/negativa in B; lag 8 h. EC 2-5 m: bassissima negativa ($p \approx -0.10$, lag 10-12 h). EC 5-8 m: nulla ($p \approx -0.05$, lag >20 h).	WL: positiva moderata-forte ($p = 0.46$, lag -29 h). EC 2-5 m: negativa marcata ($p = -0.48$, lag -72 h). EC 5-8 m: negativa marcata ($p = -0.48$, lag -62 h).	Sito strategico interno: la pioggia contribuisce a diluire la salinità, ma rischio di accumulo resta. Utile ricarica artificiale integrativa.

Tab. 13

Partner di progetto/Projektne partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GrennatITASLO

GRENNAT

In prospettiva gestionale, questi risultati indicano che interventi basati sul potenziamento della ricarica dolce potrebbero contribuire a ridurre i livelli di salinità negli strati più vulnerabili, soprattutto nei settori interni (es. Casere). Nei siti costieri (Cesarolo, Valle, Fossa Secca, Palangon) la forte influenza mareale rende invece necessario combinare la gestione dei prelievi con misure di adattamento più strutturali. La situazione di Bevazzana evidenzia una risposta molto debole alla pioggia, rendendo necessarie strategie di lungo periodo, mentre a Sindacale le correlazioni positive tra pioggia, WL ed EC indicano possibili risospinte saline o effetti locali, che richiedono un monitoraggio mirato e soluzioni integrate.

Un modello di sintesi delle caratteristiche idro-stratigrafiche e delle risposte della falda in corrispondenza dei piezometri GRENNAT all'influenza di marea e precipitazioni è schematizzata in Tab. 14 che per ciascun sito riportata: litologia dominante, risposta al segnale mareale (intensità e lag), risposta agli eventi meteorici (direzione ed efficacia sulle variazioni di EC e WL) e implicazioni gestionali in termini di vulnerabilità e possibili misure di mitigazione. La legenda cromatica (verde = risposta positiva/benefica, giallo = intermedia, rosso = critica, rosso scuro = molto critica) permette una lettura immediata dei siti più sensibili e delle potenzialità di ricarica dolce come strumento di contrasto all'intrusione salina.

Z vidika upravljanja ti rezultati kažejo, da bi lahko ukrepi, temelječi na povečanju dotoka sladke vode, prispevali k zmanjšanju ravni slanosti v najbolj ranljivih plasteh, zlasti v notranjih območjih (npr. Casere). V obalnih območjih (Cesarolo, Valle, Fossa Secca, Palangon) pa močan vpliv plime zahteva kombinacijo upravljanja odvzemov z bolj strukturnimi prilagoditvenimi ukrepi. Razmere v Bevazzani kažejo zelo šibek odziv na padavine, zato so potrebne dolgoročne strategije, medtem ko v Sindacale pozitivne korelacije med padavinami, WL in EC nakazujejo možne ponovne vdore slane vode ali lokalne učinke, ki zahtevajo ciljno usmerjeno spremljanje in integrirane rešitve.

Sintezni model hidrostratigrafskih značilnosti in odzivov podzemne vode v piezometrih GRENNAT na vpliv plime in padavin je prikazan v tabeli 14, kjer so za vsak posamezen kraj navedeni: prevladujoča litologija, odziv na plimni signal (intenzivnost in zamik), odziv na meteorološke dogodke (smer in učinkovitost glede sprememb EC in WL) ter upravljalvske implikacije v smislu ranljivosti in možnih ukrepov blaženja. Barvna legenda (zelena = pozitiven/ugoden odziv, rumena = vmesen, rdeča = kritičen, temno rdeča = zelo kritičen) omogoča hitro prepoznavo najbolj občutljivih območij ter potenciala dotoka sladke vode kot ukrepa za omejevanje vdiranja slane vode.

Partner di progetto/Proietttni partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



Matrice delle risposte dei piezometri a marea e pioggia

	Marea	Pioggia
GRE-F01_Bevazzana	Critica	Critica
GRE-F02_Cesarolo	Intermedia	Benefica
GRE-F04_Valle	Intermedia	Benefica
GRE-F05_Fossa Secca	Intermedia	Benefica
GRE-F06_Sindacale	Critica	Molto critica
GRE-F07_Palangon	Critica	Benefica
GRE-F08_Casere	Intermedia	Benefica

Tab. 14

9. Conclusioni

Il monitoraggio svolto nel primo semestre del progetto GRENNAT ha permesso di ottenere una prima caratterizzazione della dinamica idrogeologica e salina della pianura costiera tra Livorno e Tagliamento.

Le profilature CTD eseguite nei piezometri GRENNAT (GRE-F01_Bevazzana, GRE-F02_Cesarolo, GRE-F04_Valle, GRE-F05_Fossa Secca, GRE-F06_Sindacale, GRE-F07_Palangon, GRE-F08_Casere) hanno evidenziato la presenza del cuneo salino, con propagazione laterale fino a circa 8–10 km dalla costa e risalita verticale nella falda. Sebbene nel semestre analizzato non si possa quantificare un avanzamento netto, emerge una condizione già critica di salinizzazione lungo la fascia costiera e nei settori profondi.

Le analisi intra-piezometro mostrano che la marea agisce da forzante secondaria: nei piezometri costieri (GRE-F04_Valle, GRE-F07_Palangon) si osservano correlazioni con WL basse ma chiare (r

9. Zaključki

Spremljanje, izvedeno v prvem semestru projekta GRENNAT, je omogočilo prvo karakterizacijo hidrogeološke in slanostne dinamike obalne ravnice med rekama Livorno in Tagliamento.

CTD profiliranja, opravljena v piezometrih GRENNAT (GRE-F01_Bevazzana, GRE-F02_Cesarolo, GRE-F04_Valle, GRE-F05_Fossa Secca, GRE-F06_Sindacale, GRE-F07_Palangon, GRE-F08_Casere), so pokazala prisotnost slanega klina, z lateralnim širjenjem do približno 8–10 km od obale in z vertikalnim dvigom v podzemni vodi. Čeprav v obravnavanem semestru ni mogoče kvantificirati jasnega napredovanja, se kaže že kritično stanje zaslanjevanja vzdolž obalnega pasu in v globljih sektorjih.

Intra-piezometrične analize kažejo, da plima deluje kot sekundarna pogonska sila: v obalnih piezometrih (GRE-F04_Valle, GRE-F07_Palangon) so zaznane nizke, vendar jasne korelacije z WL ($r \approx 0,30-0,36$, zamik 4–5 h), medtem ko je v bolj

Partner di progetto/Projektne partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

$\approx 0.30-0.36$, lag di 4–5 h), mentre nei siti più interni (GRE-F06_Sindacale, GRE-F08_Casere) l'effetto è attenuato e ritardato (lag fino a 24 h). Le correlazioni con EC restano quasi sempre bassissime o assenti, coerenti con una propagazione lenta del segnale, con eccezioni anomale come GRE-F01_Bevazzana (EC profonda: $\rho \approx 0.14$, lag +26 h) e GRE-F06_Sindacale (EC profonda: $\rho \approx 0.35$, lag +38 h).

Le precipitazioni costituiscono la principale forzante positiva, con incrementi del WL generalmente rapidi e significativi. Durante i periodi piovosi, la falda risponde in modo più netto. I piezometri GRE-F02_Cesarolo, GRE-F04_Valle, GRE-F05_Fossa Secca, GRE-F06_Sindacale, GRE-F07_Palagon e GRE-F08_Casere mostrano una risposta positiva del WL (ρ tra 0.43 e 0.46, lag -29 h a -70 h). Nei siti costieri (GRE-F04_Valle, GRE-F07_Palagon) e interni (GRE-F08_Casere), l'effetto diluitivo sulla salinità è marcato nello strato superficiale (2–5 m), con effetti che si propagano anche agli strati profondi nei piezometri GRE-F07_Palagon e GRE-F08_Casere ($\rho \approx -0.48$). Al contrario, a GRE-F01_Bevazzana la risposta è debole o anomala (EC superficiale: $\rho \approx -0.12$; EC profonda: $\rho \approx 0.14$), e a GRE-F06_Sindacale la pioggia genera un incremento di salinità superficiale ($\rho \approx 0.28$), segno di un'efficacia molto limitata della ricarica naturale.

Le analisi inter-piezometro confermano un asse di propagazione idraulica e salina tra GRE-F04_Valle – GRE-F07_Palagon e GRE-F08_Casere, con connessioni verticali più marcate in GRE-F05_Fossa Secca e GRE-F08_Casere, e deboli anomalie in GRE-F02_Cesarolo e GRE-F06_Sindacale, a conferma di una forte eterogeneità idro-stratigrafica.

notranjih območjih (GRE-F06_Sindacale, GRE-F08_Casere) učinek oslabljen in zakasnen (zamik do 24 h). Korelacije z EC so skoraj vedno zelo nizke ali odsotne, kar je skladno s počasnim prenosom signala; izjeme so nenavadni primeri, kot GRE-F01_Bevazzana (globinska EC: $\rho \approx 0.14$, zamik +26 h) in GRE-F06_Sindacale (globinska EC: $\rho \approx 0.35$, zamik +38 h).

Padavine predstavljajo glavno pozitivno pogonsko silo, z običajno hitrimi in izrazitimi povečanju WL. V deževnih obdobjih je odziv vodonosnika izrazitejši. Piezometri GRE-F02_Cesarolo, GRE-F04_Valle, GRE-F05_Fossa Secca, GRE-F06_Sindacale, GRE-F07_Palagon in GRE-F08_Casere kažejo pozitiven odziv WL (ρ med 0.43 in 0.46, zamik od -29 h do -70 h). Na obalnih območjih (GRE-F04_Valle, GRE-F07_Palagon) in v notranjih območjih (GRE-F08_Casere) je razredčitveni učinek na slanost izrazit v površinskem sloju (2–5 m), z učinki, ki se v piezometrih GRE-F07_Palagon in GRE-F08_Casere širijo tudi v globlje plasti ($\rho \approx -0.48$).

Nasprotno pa je v GRE-F01_Bevazzana odziv šibek ali nenavaden (površinska EC: $\rho \approx -0.12$; globinska EC: $\rho \approx 0.14$), v GRE-F06_Sindacale pa padavine povzročajo povečanje površinske slanosti ($\rho \approx 0.28$), kar kaže na zelo omejeno učinkovitost naravnega napajanja.

Analize med piezometri potrjujejo os hidravličnega in slanostnega širjenja med GRE-F04_Valle – GRE-F07_Palagon in GRE-F08_Casere, z izrazitejšimi vertikalnimi povezavami v GRE-F05_Fossa Secca in GRE-F08_Casere ter šibkimi anomalijami v GRE-F02_Cesarolo in GRE-F06_Sindacale, kar potrjuje veliko hidrostratigrafsko heterogenost.

Partner di progetto/Projektne partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

In sintesi, il quadro mostra condizioni critiche di salinizzazione, l'effetto limitato della marea come forzante diretta e il ruolo strategico della ricarica meteorica nella mitigazione. Tuttavia, il periodo osservato è troppo breve per valutazioni definitive: sarà necessario proseguire il monitoraggio e integrare ulteriori forzanti (pompaggi, rilasci irrigui, contributi fluviali) per una comprensione completa della dinamica intrusiva. Si sottolinea infatti che questo è un o dei principali limiti delle analisi presentate in questo rapporto. Il primo semestre di monitoraggio offre solo una fotografia parziale della dinamica dell'acquifero costiero e non consente interpretazioni esaustive. Per una valutazione statistica più significativa sarà necessario disporre di un periodo di osservazione più lungo. Inoltre, sono state considerate unicamente due forzanti del cuneo salino in falda (livello marino e precipitazioni), mentre un'analisi completa delle dinamiche e della loro evoluzione temporale richiederà l'inclusione anche dei pompaggi delle idrovore, dei rilasci irrigui e dei contributi dei corsi d'acqua.

Per quanti riguarda le potenziali implicazioni gestionali, sarà da tener conto che nei siti costieri (GRE-F02_Cesarolo, GRE-F04_Valle, GRE-F07_Palangan) l'influenza mareale è più evidente rispetto agli interni; ma resta complessivamente debole se confrontata con gli effetti della ricarica meteorica. In quelli intermedi (GRE-F02_Cesarolo) la risposta mareale è ancora più attenuata, mentre prevale l'effetto positivo della pioggia. Le precipitazioni possono attenuare temporaneamente l'intrusione, ma è necessario combinare la riduzione dei prelievi e altre misure di difesa. Nei siti interni reattivi (GRE-F05_Fossa Secca, GRE-F08_Casere) la ricarica dolce, naturale

Na kratko slika kaže na kritične razmere zaslanjevanja, omejen neposredni vpliv plime kot pogonskega dejavnika ter strateško vlogo meteornega napajanja pri blaženju. Vendar je opazovano obdobje prekratko za dokončne zaključke: potrebno bo nadaljevati monitoring in vključiti dodatne vplive (črpanje, namakalne izpuste, prispevke vodotokov) za celovito razumevanje dinamike vdora. Poudariti je treba, da je to tudi ena glavnih omejitev predstavljenih analiz. Prvi semester spremljanja ponuja le delno sliko dinamike obalnega vodonosnika in ne omogoča izčrpnih interpretacij. Za statistično bolj zanesljivo oceno bo potrebno daljše obdobje opazovanja. Poleg tega sta bila upoštevana le dva vpliva slanega klina v podzemni vodi (morska gladina in padavine), medtem ko bo za popolno analizo dinamike in njenega časovnega razvoja treba vključiti tudi črpanje črpališč, namakalne izpuste in prispevke vodotokov.

Kar zadeva morebitne upravljavske implicacije, je treba upoštevati, da je v obalnih območjih (GRE-F02_Cesarolo, GRE-F04_Valle, GRE-F07_Palangan) vpliv plime bolj očiten kot v notranjosti, vendar ostaja na splošno šibek v primerjavi z učinki meteornega napajanja. V vmesnih območjih (GRE-F02_Cesarolo) je plimni odziv še bolj oslavljen, medtem ko prevladuje pozitiven učinek padavin. Padavine lahko začasno omilijo vdor slane vode, vendar je treba ukrepe kombinirati z zmanjšanjem odvzemov in drugimi zaščitnimi ukrepi. V notranjih, bolj odzivnih območjih (GRE-F05_Fossa Secca, GRE-F08_Casere) naravno ali umetno napajanje s sladko vodo kaže jasen blažilni učinek. V območjih z šibkimi ali nenavadnimi odzivi (GRE-F01_Bevazzana, GRE-F06_Sindacale) samo meteorno napajanje ni zadostno: potrebne so integrirane in dolgoročne strategije.

Partner di progetto/Projektne partnerji:

Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

o artificiale, mostra un effetto mitigante evidente. Nei siti con risposte deboli o anomale (GRE-F01_Bevazzana, GRE-F06_Sindacale) la sola ricarica meteorica non è sufficiente: servono strategie integrate e di lungo periodo.

10. Sintesi dei punti chiave

Il primo semestre di monitoraggio restituisce solo una fotografia parziale della dinamica dell'acquifero e delle sue relazioni con livello marino e precipitazioni; una valutazione completa richiederà un periodo di osservazione più lungo e l'inclusione di ulteriori forzanti (pompaggi, rilasci irrigui, ecc.). Di seguito la sintesi dei risultati.

- Risposta del livello della falda (WL) alla marea: nei piezometri costieri (GRE-F04_Valle, GRE-F07_Palagon) le correlazioni tra livello marino e WL risultano basse ($r = 0.21-0.36$) con lag rapidi (3–5 h). In quelli più interni (GRE-F06_Sindacale, GRE-F08_Casere) il segnale mareale è ulteriormente attenuato ($r \leq 0.23$) e con lag più lunghi (12–24 h).
- Risposta della conducibilità elettrica (EC - indicatore di salinità) alla marea: EC mostra in generale correlazioni bassissime o nulle con il livello marino, coerenti con processi di diffusione lenta e miscelamento; i segnali sono più percepibili solo nello strato superficiale in alcuni siti (GRE-F04_Valle, GRE-F07_Palagon), ma restano deboli ($\rho \approx 0.10-0.18$).
- Correlazione WL–EC intra-piezometro: in quasi tutti i siti WL ed EC della falda risultano inversamente correlati (effetto diluitivo), seppur con valori deboli. Le risposte più evidenti si osservano nello strato superficiale (2–5 m), ad esempio a GRE-F02_Cesarolo ($\rho = -0.35$) e GRE-F08_Casere ($\rho = -0.48$), mentre in profondità

10. Povzetek ključnih točk

Prvi semester spremljanja ponuja le delno sliko dinamike vodonosnika in njegovega odnosa z morsko gladino ter padavinami; za celovito oceno bo potrebno daljše obdobje opazovanja in vključitev dodatnih vplivov (črpanje, namakalni izpusti itd.). V nadaljevanju je povzetek rezultatov:

- Odziv nivoja podzemne vode (WL) na plimo: v obalnih piezometrih (GRE-F04_Valle, GRE-F07_Palagon) so korelacije med morsko gladino in WL nizke ($r = 0.21-0.36$) s kratkimi zamiki (3–5 h). V bolj notranjih območjih (GRE-F06_Sindacale, GRE-F08_Casere) je plimni signal še bolj oslavljen ($r \leq 0.23$) in z daljšimi zamiki (12–24 h).
- Odziv električne prevodnosti (EC – kazalnik slanosti) na plimo: EC na splošno kaže zelo nizke ali ničelne korelacije z morsko gladino, kar je skladno s počasnimi procesi difuzije in mešanja; signali so nekoliko bolj zaznavni le v površinskem sloju na nekaterih lokacijah (GRE-F04_Valle, GRE-F07_Palagon), vendar ostajajo šibki ($\rho \approx 0.10-0.18$).
- Korelacija WL–EC znotraj posameznega piezometra: skoraj na vseh lokacijah sta WL in EC podzemne vode obratno sorodna (razredčitveni učinek), čeprav s šibkimi vrednostmi. Najizrazitejši odzivi so v površinskem sloju (2–5 m), na primer pri GRE-F02_Cesarolo ($\rho = -0.35$) in GRE-F08_Casere ($\rho = -0.48$), medtem ko v globini prevladujejo oslavljeni ali odsotni signali.
- Odziv podzemne vode na padavine: padavine kažejo pozitivne korelacije z WL (do $\rho = 0.46$ v GRE-F08_Casere in GRE-F06_Sindacale) ter negativne z EC, predvsem v sloju 2–5 m (npr. GRE-F04_Valle $\rho = -0.32$; GRE-F07_Palagon $\rho = -0.32$;

Partner di progetto/Projektne partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



GRENNAT

prevalgono segnali smorzati o assenti.

- Risposta della falda alla pioggia: le precipitazioni mostrano correlazioni positive con WL (fino a $\rho = 0.46$ in GRE-F08_Casere, GRE-F06_Sindacale) e negative con EC soprattutto nello strato 2–5 m (ad esempio GRE-F04_Valle $\rho = -0.32$; GRE-F07_Palangon $\rho = -0.32$; GRE-F08_Casere $\rho = -0.48$). L'effetto diluitivo si manifesta con lag variabili (immediati fino a 1–2 giorni), ed è più marcato nei siti interni e intermedi.
- Connessioni inter-piezometro: il WL conferma una propagazione idraulica da costa verso entroterra (ad esempio da Valle/Palangon verso Casere). L'EC mostra invece risposte più discontinue e sito-specifiche, riflettendo la forte eterogeneità dell'acquifero (es. connessioni verticali più marcate a GRE-F05_Fossa Secca e GRE-F08_Casere, quasi assenti a GRE-F02_Cesarolo e GRE-F06_Sindacale).
- Differenze stagionali: nei periodi secchi estivi il ruolo della marea resta percepibile ma secondario nei piezometri costieri (GRE-F04, GRE-F07), mentre si dissipa progressivamente verso gli interni (GRE-F06, GRE-F08). Nei periodi umidi la pioggia diventa la forzante dominante, con effetti di diluizione più netti e diffusi, soprattutto nello strato superficiale.

GRE-F08_Casere $\rho = -0,48$). Razredčitveni učinek se pojavlja z različnimi zamiki (od takojšnjega do 1–2 dni) in je bolj izrazit v notranjih in vmesnih območjih.

- **Povezave med piezometri:** WL potrjuje hidravlično širjenje od obale proti notranjosti (npr. od Valle/Palangon proti Casere). EC pa kaže bolj prekinjene in lokacijsko specifične odzive, kar odraža veliko heterogenost vodonosnika (npr. izrazitejša vertikalne povezave v GRE-F05_Fossa Secca in GRE-F08_Casere, ter skoraj odsotne v GRE-F02_Cesarolo in GRE-F06_Sindacale).
- **Sezonske razlike:** v sušnih poletnih obdobjih vpliv plime ostaja zaznaven, vendar drugotnega pomena v obalnih piezometrih (GRE-F04, GRE-F07), medtem ko proti notranjosti (GRE-F06, GRE-F08) postopno slabi. V vlažnih obdobjih padavine postanejo prevladujoč dejavnik, z izrazitejšimi in širše razširjenimi učinki redčenja, zlasti v površinskem sloju.

Partner di progetto/Projektni partnerji:



Il progetto GRENNAT è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia. Projekt GRENNAT sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.

