

**SCHEMI PER IL MONITORAGGIO DEI TERRENI GOLENALI
PARZIALMENTE SATURI DEL FIUME PANARO NELLA VALUTAZIONE
DEI PROCESSI DI INTERAZIONE DEL SUOLO CON VEGETAZIONE ED
ATMOSFERA**

Carmine Gerardo Gragnano

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna

carmine.gragnano2@unibo.it (Referente della nota)

Elena Toth

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna

elena.toth@unibo.it

Guido Gottardi

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna

guido.gottardi2@unibo.it

Sommario

Il monitoraggio della zona non satura riveste un ruolo cruciale nella comprensione e nell'analisi dei fenomeni di interazione terreno-vegetazione-atmosfera ed è, ad oggi, pratica piuttosto frequente quella di far uso di sensori per la valutazione, diretta o indiretta, di alcune variabili di stato del suolo quali suzione e contenuto d'acqua. Tali misurazioni in campo, insieme ai dati ottenuti in laboratorio, permettono infatti di sviluppare modelli numerici previsionali dettagliati e rappresentativi delle reali condizioni di sito. Una delle applicazioni di maggior interesse in tal senso è certamente rappresentata dai rilevati arginali, nei quali la variabilità spazio-temporale del livello di saturazione soprattutto a seguito ed in concomitanza di eventi di precipitazione e piena, ha forti implicazioni sulle condizioni di stabilità e filtrazione. In tale ambito, l'uso di dati di monitoraggio può essere dunque cruciale nella valutazione del rischio associato a fenomeni di rottura sia locali che globali. Nella presente nota verrà presentato lo schema di monitoraggio della zona non satura di un settore arginale del fiume Panaro ed il contesto di studio; l'area ricade sulla sponda lato fiume dell'argine, nella quale sono monitorate in continuo suzione, contenuto d'acqua e temperatura del suolo fino ad una profondità massima di circa 3 m dal piano campagna. Questi dati, associati alle condizioni climatiche, oltre che idrometriche, forniranno un utile riscontro al complesso sistema di interazioni terreno-vegetazione-atmosfera specifiche del sito, garantendo un riferimento per le analisi del bilancio idrologico ed indicazioni sulle caratteristiche di ritenzione idrica del suolo.

1. Introduzione

L'interfaccia terreno-atmosfera determina per il suolo la presenza di un complesso sistema di condizioni al contorno che causa una continua evoluzione del grado di saturazione del terreno ed, eventualmente, oscillazioni del livello di falda. Questi fenomeni sono dovuti ad un costante scambio di volumi d'acqua tra il terreno e l'atmosfera, che rientrano all'interno del bilancio idrico. Per determinare il bilancio idrico di un suolo, vegetato o incolto, è necessario prendere in considerazione tutti gli apporti e le perdite d'acqua lungo la profondità, ottenendo così anche una misura indicativa della disponibilità d'acqua di un'area. A tal proposito, diversi Autori (e.g. Thornthwaite and Mather, 1955) hanno proposto proprio il bilancio idrico come indice per la classificazione regionale dei climi e ancor oggi questo viene largamente utilizzato nelle numerose applicazioni (agronomiche, idrologiche, naturalistiche, ecc.) che

necessitano di previsioni puntuali sull'effettiva disponibilità d'acqua nel suolo e che non si basino sui soli dati climatici. La trattazione analitica dei fenomeni di interazione terreno-atmosfera risulta spesso complessa, ma per una sua risoluzione è possibile partire dall'equazione di bilancio della massa idrica, che può esser scritta come (Hasenmueller and Criss, 2013):

$$q_P + q_E + q_R = q_I$$

dove vengono rappresentati i flussi determinati da fenomeni di precipitazione (q_P), evaporazione (q_E), ruscellamento (q_R) ed infiltrazione (q_I). La presenza di una coltura o di flora spontanea, inoltre, produce delle perdite d'acqua nel suolo radicato per traspirazione e allo stesso tempo diminuisce le perdite per evaporazione negli strati superficiali attraverso la copertura vegetale. La quantità di acqua che si infiltra nel suolo, oltre che dalle condizioni al contorno, dipende dalle caratteristiche di ritenzione e permeabilità del terreno e dal suo contenuto idrico. I processi di immagazzinamento e filtrazione dell'acqua nel terreno sono poi regolati dalle differenze di potenziale idrico, e possono essere espressi secondo la ben nota relazione di Richards (qui nella formulazione valida per flussi transitori bidimensionali nell'ipotesi di scheletro solido rigido):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + q = m_w \frac{\partial h}{\partial t}$$

dove x e z rappresentano le due dimensioni spaziali, t il tempo, h rappresenta il potenziale idrico ($h = u_w/\gamma_w + z$), k_x e k_z sono i coefficienti di permeabilità del suolo nelle due possibili direzioni, q è il flusso d'acqua applicato al contorno ed m_w è un parametro di ritenzione dipendente dalle caratteristiche idriche del suolo (ovvero la pendenza della curva di ritenzione idrica).

Il risultato del bilancio idrico, ovvero la variabilità del grado di saturazione nonché del potenziale idrico, è responsabile di significative alterazioni delle proprietà idro-meccaniche del suolo (resistenza, deformabilità, ritenzione, permeabilità); per tale motivo, gli effetti delle interazioni del terreno con l'atmosfera hanno una significativa ricaduta anche in ambito geotecnico: basti pensare che vari tipi di infrastrutture (rilevati stradali e ferroviari, argini fluviali, dighe, bacini di decantazione, colmate), oltre che i naturali pendii e riempimenti di terra, sono fortemente esposti agli agenti climatici. Per garantire e verificare le condizioni di sicurezza di queste opere, nonché per ridurre la vulnerabilità dei territori nei confronti di fenomeni di instabilità ed esaminare gli effetti dei cambiamenti climatici, è richiesto l'uso di robuste metodologie di modellazione numerica che includano l'analisi dei fenomeni di interazione terreno-vegetazione-atmosfera. In questo contesto, l'utilizzo di sistemi di monitoraggio della zona non satura del terreno riveste un'importanza cruciale in quanto capace di fornire misure delle reali condizioni di sito, utili alla calibrazione dei modelli oltre che alla definizione e diffusione di sistemi di early-warning. Proprio in quest'ottica, si ritrovano in letteratura diversi esempi di casi studio (Toll et al., 2012; Tarantino et al., 2016; Gragnano et al., 2021; Jommi et al., 2021) aventi anche lo scopo di favorire l'utilizzo di strumentazione di monitoraggio del non saturo all'interno dell'attuale pratica ingegneristica e di colmare le distanze che esistono tra avanzamenti di ricerca ed applicazioni di routine su casi reali. Con lo scopo di raccogliere informazioni utili all'analisi dei processi di interazione del suolo con vegetazione ed atmosfera di un'argine fluviale inerbato del fiume Panaro, nei pressi di Bomporto (circa 15 km a nord di Modena), un apposito monitoraggio che include la misura delle principali variabili di stato non sature del terreno (suzione di matrice e contenuto volumetrico d'acqua) è stato progettato ed installato in due sezioni distinte, anche per indagare l'influenza di due differenti tipi di vegetazione nei fenomeni di interazione terreno-atmosfera, con sensori posti ad una profondità variabile tra 0.6 m e 3.0 m. Al fine di conoscere le opportune condizioni al contorno del problema, è stata posta in sito una compatta stazione meteorologica in grado di misurare temperatura e umidità relativa dell'aria, precipitazione, radiazione solare ed attività ventosa.

2. Contesto ed area di studio

2.1 Il bacino idrografico del fiume Panaro

Il fiume Panaro scorre interamente all'interno della regione Emilia Romagna, avendo sorgente sul monte Cimone e confluenza in sponda destra del fiume Po ed assorbe le confluenze del torrente Tiepido e del Naviglio (Fig. 1). Il suo bacino di influenza interessa gran parte delle province di Modena e Bologna, estendendosi per una superficie di 2.300 km², corrispondente circa al 3.1% della superficie complessiva del bacino del fiume Po; con una lunghezza complessiva di 165 km, il fiume Panaro ricade per il 45% del suo intero percorso in ambiente montano. Quest'ultimo aspetto riveste un'importanza principale nella produzione dei deflussi, fortemente dipendenti anche da fenomeni di scioglimento nivale; per tale motivo, non è inusuale registrare fenomeni di piena rilevanti anche in presenza di limitati eventi di precipitazione lungo i tratti di pianura. Un importante funzione di regimentazione delle portate fluviali è svolta dalla cassa di espansione situata in località Sant'Anna nel comune di San Cesario sul Panaro (Fig. 1); tale opera idraulica, infatti, è posta al termine del percorso montano del fiume, operando una parziale disconnessione tra le vicende idrologiche e idrauliche dei due ambiti (monte e valle). Il bacino chiuso alla cassa di espansione misura 890 km². A valle, il corso d'acqua principale scorre all'interno di arginature continue con lunghi tratti rettilinei alternati da tratti a meandri. Soprattutto in quest'area, le sponde arginali lato fiume risultano particolarmente esposte a fenomeni erosivi ed instabilità di diversa rilevanza, che pongono seri problemi di manutenzione, consolidamento e protezione all'ente (AIPo, Agenzia Interragonale per il fiume Po) preposto alla sicurezza idraulica ed alla gestione del reticolo idrografico del Panaro. È però di particolare interesse ricordare anche la recente formazione di una breccia nell'argine destro del Panaro avvenuta in località Gaggio di Castelfranco, comune di Castelfranco Emilia (Mo), che ha portato ad esondazione fluviale il giorno 06/12/2020. L'argine è di fatti collassato in condizioni di livelli idrometrici che garantivano al manufatto ampi margini di resistenza al sormonto. La rotta, d'altro canto, è stata tutt'altro che istantanea; l'evento si è infatti manifestato con una apertura passante nel corpo dell'argine che è andata progressivamente allargandosi sotto l'azione dell'erosione dell'acqua da fiume verso campagna (Menduni et al., 2021).

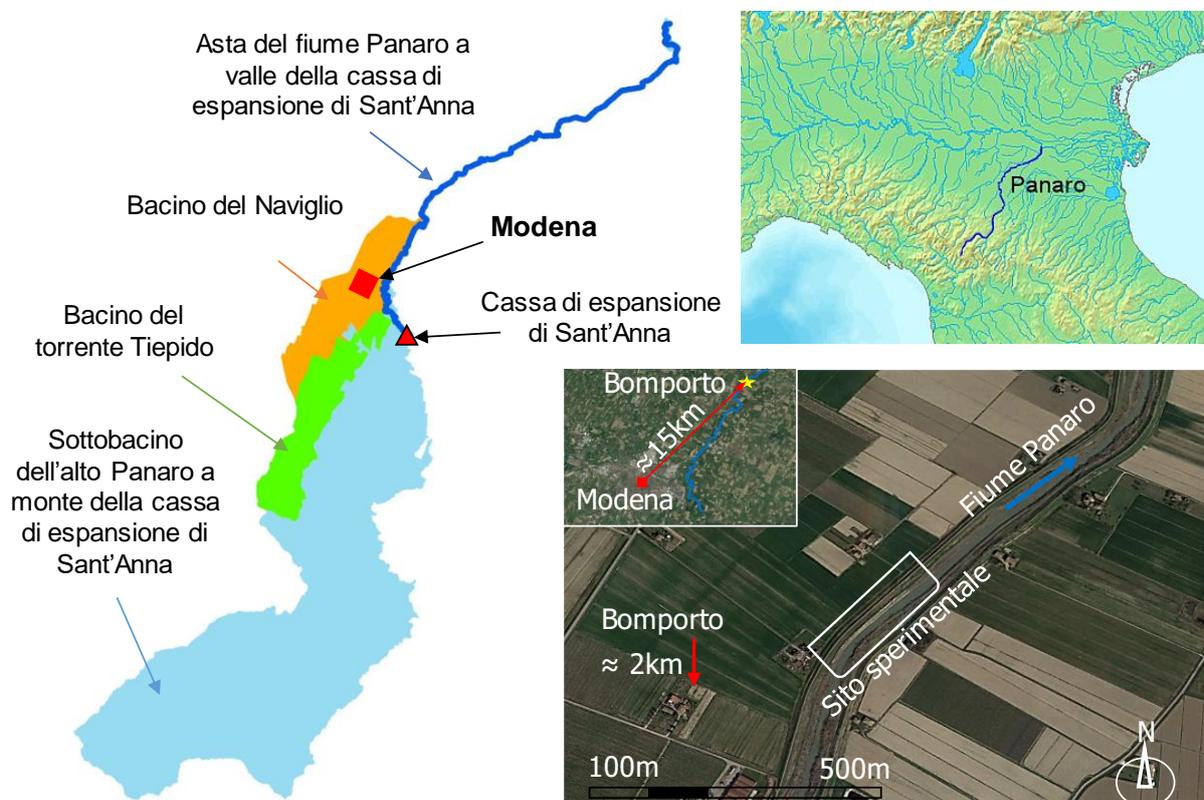


Fig. 1. Bacino idrografico del fiume Panaro e dei suoi affluenti, con in dettaglio l'ubicazione del sito sperimentale.

2.2 Area di studio

La sponda arginale oggetto di monitoraggio è situata in sponda sinistra del fiume Panaro, a valle di circa 12 km dalla sezione della rotta del dicembre 2020 e di 2 km dal centro abitato di Bomporto (Mo). Con riferimento alla sezione tipo (Fig. 2), l'argine si eleva di 6.1 m rispetto al piano campagna con pendenza di 30° ed ha larghezza in cresta di 5.3 m; sulla sponda lato fiume si ritrovano due riseghe, la prima delle quali (petto) ha una larghezza di 6.0 m ed è posta ad una quota di 3.9 m al di sotto della quota arginale mentre la seconda (antipetto) ha una larghezza di 4.4 m ed è posta ad una quota di 5.4 m inferiore rispetto alla prima. Le pendenze dei versanti lato fiume variano tra 27° e 28°. Nel deflusso delle portate di magra ordinaria, il livello idrometrico risulta più basso della quota dell'antipetto di circa 3 m. La quota del livello di falda risulta, ovviamente, fortemente dipendente dalle condizioni al contorno; in assenza di un sistema di monitoraggio piezometrico preesistente, si riportano qui le misure svolte nel corso di una prima campagna di indagini geognostiche in sito, che hanno permesso di individuare per il mese di aprile 2015 (alla fine della stagione a maggior piovosità) la falda ad una profondità di circa 1.4 m dal piano campagna ed a 3.5 m dalla quota del petto, mentre successive ripetizioni delle prove in ottobre 2020 (al termine della stagione a scarsa piovosità) hanno riportato livelli di falda ad una profondità di 5.7 m dalla quota del petto e 3.0 m dalla quota dell'antipetto. Per quel che riguarda le unità costituenti l'area di studio (Fig. 2), senza poter scendere nel dettaglio delle interpretazioni delle prove di caratterizzazione, si osserva come il rilevato arginale sia costituito da terreno principalmente limo-sabbioso fino alla quota del piano campagna. Al di sotto di tale unità si ritrova la presenza di uno strato di terreno a granulometria più fine, con caratteristiche meccaniche ed idrauliche variabili dal lato campagna al lato fiume e di spessore compreso tra 2.0 m e 2.8 m; tale strato sormonta una sottile unità che è probabilmente sede di un acquifero superficiale, di altezza pari ad 1.1 m al lato campagna ed al di sotto del rilevato arginale, non però chiaramente individuabile al lato fiume. A profondità maggiori si incontra, invece, un substrato di terreno a matrice argillosa, costituente probabilmente l'orizzonte superiore del deposito alluvionale sottostante. Le zone di terreno attualmente oggetto di monitoraggio (Fig. 2) sono situate nel petto (fino a 3.0 m di profondità) e nell'antipetto (fino ad 1.4 m di profondità) dell'argine, in due sezioni distinte della stessa sponda, poste a circa 50 m di distanza l'una dall'altra.

3. Il sistema di monitoraggio

3.1 Tipologie di strumenti utilizzati

Per il monitoraggio dell'area di studio si è scelto di impiegare tipologie di sensori che hanno trovato largo uso in ambito sia geotecnico che agrario e che hanno mostrato, in generale, una grande affidabilità in numerosi casi studio della fisica del suolo.

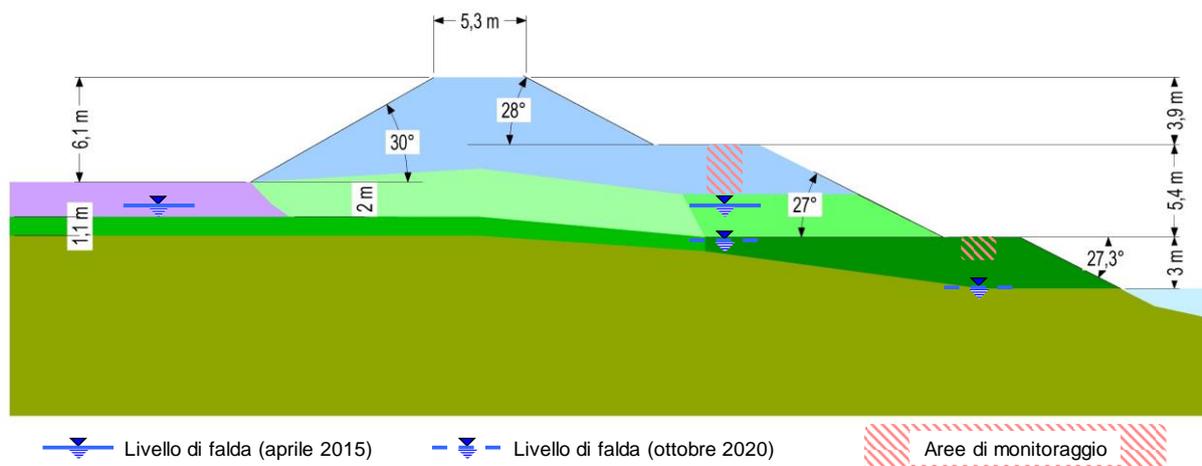


Fig. 2. Geometria tipo della sezione e suddivisione in unità omogenee di terreno. Sono indicate: le profondità di falda con linee blu (aprile, 2015, continue; ottobre, 2020, tratteggiate); le aree monitorate con campitura rossa.

Il contenuto d'acqua del terreno è determinato in maniera indiretta. Lo strumento impiegato è costituito da un corpo in plastica, in cui sono presenti le componenti elettroniche, ed una parte metallica di tre aghi in acciaio (Fig. 3a). Il sensore misura la permittività dielettrica (ϵ_a) del mezzo in cui è immerso mediante un segnale elettrico che genera un'onda (70 MHz) alla base degli aghi. Di quest'onda viene misurata l'ampiezza del segnale di ritorno, funzione della saturazione del mezzo attraversato. La permittività (che assume il valore massimo in condizioni di terreno saturo e minimo per terreno secco) viene convertita in contenuto volumetrico d'acqua tramite un'equazione di calibrazione, funzione principalmente della mineralogia del terreno in cui il dispositivo (TEROS 12, Meter Group) viene installato. Sempre sulla misura della permittività dielettrica è basato il funzionamento di uno strumento di monitoraggio della suzione di matrice; oltre che da un corpo in plastica, il sensore è costituito da dischi porosi rigidi collocati tra due piastrine in acciaio (Fig. 3b). Quando il sensore è in contatto con il terreno, gli elementi porosi tendono a raggiungere un equilibrio sulla base del potenziale idrico circostante; gli elementi metallici generano invece un campo elettromagnetico (70 MHz) che attraversa gli elementi porosi e consente di stimarne la permittività dielettrica e, da questa, il contenuto volumetrico d'acqua; conoscendo la curva di ritenzione delle piastre porose, si ottiene univocamente il valore di suzione di matrice. Tali sensori (TEROS 21, Meter Group) permettono di determinare valori di suzione da -9 kPa a -100,000 kPa, ovvero nell'intero range di parziale saturazione degli elementi porosi. Di tipologia diretta è poi la misura della pressione d'acqua (sia positiva che negativa) eseguita dai posti in sito tensiometri e che sono costituiti da una punta ceramica, preliminarmente saturata con acqua deareata, installata in profondità; in base alle condizioni di equilibrio idraulico che si generano con il terreno nell'area di contatto è possibile una misura (a mezzo di un trasduttore di pressione posto nell'asta sovrastante la punta) del potenziale idrico del suolo. Un limite fisico della misura di suzione, in questi casi, è costituito dalla eventuale cavitazione dell'acqua presente all'interno del sistema di misura del tensiometro (TEROS 32, Meter Group), che si raggiunge già per valori di circa -85 kPa (ben inferiore del valore di ingresso d'aria della ceramica). In ciascun sensore di monitoraggio è presente, inoltre, un termistore che misura la temperatura del suolo.

3.1 Lo schema di monitoraggio

Il monitoraggio ha interessato l'area lato fiume dell'argine; le due sezioni che sono state strumentate si distinguono principalmente per la tipologia di piante che le caratterizza. In una di queste (Fig. 4, destra) è stato seminato un particolare tipo di vegetazione erbacea avente capacità di radicazione molto profonda, fino a 2 m, mentre nell'altra sezione (Fig. 4, sinistra) la vegetazione è quella tradizionalmente presente in sito, con una profondità di radicazione fin a circa 1 m. Per poter definire delle curve di ritenzione di sito, coppie di TEROS 12 e TEROS 21 sono stati installati a quote ravvicinate in verticali multi-parametriche (Rocchi et al, 2018), così da ottenere valori di suzione e contenuto d'acqua associabili. Il sistema di monitoraggio è poi caratterizzato dalla presenza di TEROS 32 alla profondità di circa 3.0 m dalla quota del petto, dove è prevista una significativa oscillazione del livello di falda. Essendo l'area di studio soggetta periodicamente a fasi di sommersione completa (in concomitanza del passaggio di piene importanti), si è deciso di installare un TEROS 32 anche ad una profondità di 1.1 m dalla quota dell'antipetto, per avere in quest'area misure continue della pressione neutra, anche positiva.

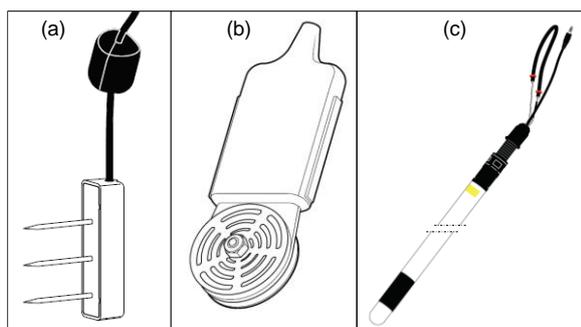


Fig. 3. Immagini schematiche, non in scala, degli strumenti TEROS 12 (a), TEROS 21 (b) e TEROS 32 (c).

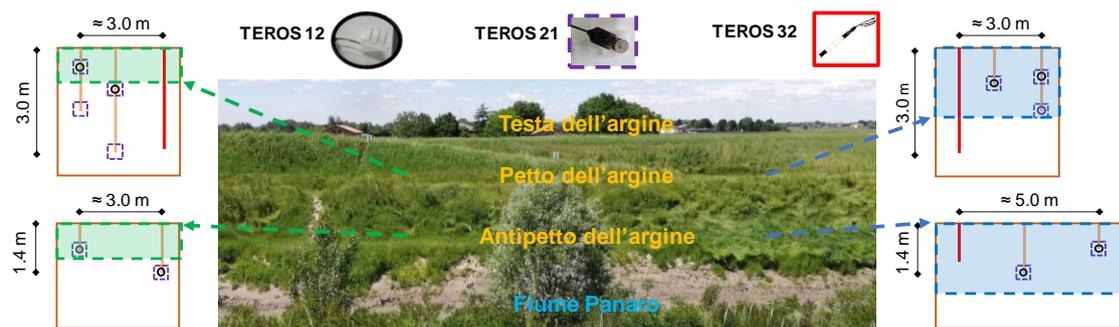


Fig. 4. Sintesi degli schemi di monitoraggio implementati nel sito sperimentale.

Inoltre, si segnala la presenza di un Teros 21 alla stessa profondità (3.0 m) di un Teros 32 (Fig. 4, sinistra), con lo scopo di verificare l'attendibilità delle misure indirette, mentre nella stessa area manca un Teros 12 alla profondità di 1.8 m. Quest'ultima scelta è dovuta anche alla necessità di rientrare nella disponibilità dei canali di acquisizione dei datalogger posti in sito, in numero pari a 24.

4. Conclusioni

Nella presente nota si è brevemente descritto un caso studio relativo al progetto ed all'installazione di un sistema di monitoraggio presso una sponda arginale del fiume Panaro; le variabili misurate rivestono grande importanza nell'analisi dei processi di interazione terreno-atmosfera e la loro disponibilità permetterà, nelle successive analisi, tramite il confronto tra le due sezioni monitorate, di poter stimare l'entità del contributo di differenti tipi di vegetazione al bilancio idrico. L'interpretazione dei dati sarà cruciale nella calibrazione di modelli numerici utili per determinare poi la vulnerabilità del sito verso fenomeni di rottura ed instabilità locale.

Fonti di finanziamento

Il presente lavoro è stato realizzato nel contesto del progetto OPERANDUM, finanziato dal programma europeo per la ricerca e l'innovazione Horizon 2020 attraverso il grant agreement No 776848.

Bibliografia

- Gragnano, C.G., Rocchi, I., Gottardi, G. (2021). "Field Monitoring and Laboratory Testing for an Integrated Modeling of River Embankments under Transient Conditions". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(9): 05021006.
- Hasenmueller, E., Criss, R.E. (2013). "Water Balance Estimates of Evapotranspiration Rates in Areas with Varying Land Use". In: *Evapotranspiration – An Overview*. Alexandris, S.G., Stricevic R. (Eds.), InTech, Croatia.
- Jommi C., Sterpi D., de Gast T., Muraro S., Ponzoni E., Van Hemert H. (2021). "Coupled Hydro-Mechanical Analysis of the Pre-failure and the Failure Behaviour of a Dyke on Soft Subsoil: Formulation and Synthesis of Results". In: *Numerical Analysis of Dams, ICOLDBW 2019*. Bolzon G., Sterpi D., Mazzà G., Frigerio A. (Eds.), Lecture Notes in Civil Engineering, 91. Springer, Cham, Switzerland.
- Menduni, G., Cocchi, R., Manselli, L., Simonini, P. (2021). "Relazione di dettaglio". Commissione tecnico-scientifica per la valutazione delle cause all'origine della rotta arginale lungo il fiume Panaro in località Gaggio di Castelfranco Emilia, r_emiuro.Giunta - Prot. 02/03/2021.0177836.E
- Rocchi I., Gragnano C.G., Govoni L., Mentani A., Bittelli M., Castiglione P., Buzzi O., Gottardi G. (2018). A new technique for deep in situ measurements of soil water retention behaviour". *Geotechnical Research*, 5(1), 3–12.
- Tarantino, A., Gallipoli, D., Jommi, C., Mendes, J., Capotosto, A., Amabile, A., Pedrotti, M., Pozzato, A., Beneš, V., Bottaro, F., Denzer, H., Boeck, F. (2016). "Advances in the monitoring of geo-structure subjected to climate loading". Proc. 3rd Eur. Conf. on Unsaturated Soils, Paris, France, E3S Web of Conferences 9, 04001.
- Thornthwaite C.W., Mather J.R., 1955. "The water balance". *Publications in Climatology*, 8, 1-104.
- Toll, D.G., Mendes, J., Gallipoli, D., Glendinning, S., Hughes, P.N. (2012). "Investigating the impacts of climate change on slopes: field measurements". *Engineering Geology Special Publications*, 26(1), 151–161.