

VARIAZIONI DI TEMPERATURA MISURATE CON FIBRA OTTICA COME INDICATORI DI FILTRAZIONE ARGINALE DURANTE LA PIENA DELL'ADIGE DEL 5 AGOSTO 2021

Nicola FABBIAN

Università degli Studi di Padova – Dipartimento ICEA
nicola.fabbian@phd.unipd.it

Giorgia DALLA SANTA

Università degli Studi di Padova – Dipartimento ICEA, Dipartimento di Geoscienze
giorgia.dallasanta@unipd.it

Luca SCHENATO

Research Institute for Geo-Hydrological Protection, National Research Council CNR
luca.schenato@irpi.cnr.it

Fabio DE POLO

Ufficio Sistemazione Bacini montani sud – Agenzia per la protezione civile Bolzano
Fabio.DePolo@provincia.bz.it

Simonetta COLA

Università degli Studi di Padova – Dipartimento ICEA
simonetta.cola@unipd.it

Sommario

Nonostante i notevoli miglioramenti apportati negli ultimi anni all'ingegneria geotecnica e idraulica, le infiltrazioni causano ancora periodicamente il collasso dei rilevati arginali. Il monitoraggio di queste strutture è complesso, a causa della loro notevole lunghezza e dell'elevata variabilità spaziale dei terreni che le costituiscono, che influenzano sia il corpo che la fondazione arginale, soprattutto quando sono presenti depositi sabbiosi e paleo-alvei. Considerano la temperatura come possibile indicatore di filtrazione nel corpo arginale, metodi innovativi che utilizzano sensori a fibra ottica distribuita hanno migliorato notevolmente la misura e il monitoraggio in sito, dato che consentono misure distribuite ad alta risoluzione spaziale e temporale, condotte su vaste aree.

Il presente lavoro presenta il monitoraggio di un argine del fiume Adige, effettuato a Salorno (BZ) nel 2021. È stato attrezzato un sito test per caratterizzare il regime di filtrazione nel corpo arginale e nei terreni di fondazione. Sono quindi stati effettuati cinque fori di sondaggio agli angoli e al centro di un'area quadrata di 20 m di lato, a cavallo della struttura del rilevato, con il foro centrale in sommità. Ogni foro ospita quattro diversi tipi di apparecchiature di monitoraggio: cavi in fibra ottica per rilevare le variazioni di temperatura lungo il pozzo, cavi elettrici per misure ERT 3D, due celle piezometriche e due sonde di misura di temperatura. Inoltre, sono stati raccolti numerosi campioni indisturbati, per una caratterizzazione completa dei terreni in laboratorio. Si intende anche effettuare una serie di prove di immissione con fluido salato, in modo da poter identificare più chiaramente tramite misure ERT i percorsi di filtrazione 3D all'interno dell'argine. I dati di monitoraggio raccolti sul campo saranno utilizzati per comprendere meglio il comportamento idraulico e le condizioni di sicurezza arginale in quest'area, e per valutare l'affidabilità e il potenziale di queste tecniche innovative di monitoraggio.

1. Introduzione

L'indagine e il monitoraggio delle strutture arginali sono complessi, a causa della notevole lunghezza della struttura studiata e dell'elevata variabilità spaziale dei terreni che costituiscono il corpo arginale e la sua fondazione, soprattutto quando sono presenti antichi paleo-alvei. Recentemente, diversi studi sperimentali hanno rilevato che la temperatura può essere utilizzata come un indicatore di filtrazione all'interno del corpo arginale e della sua fondazione (Bersan et al., 2018; Cola et al., 2021). Per monitorare la temperatura, può essere interessante integrare il tradizionale monitoraggio sul campo con l'uso di sensori distribuiti in fibra ottica, in modo da misurare le variazioni di temperatura nel tempo, in quanto le fibre ottiche consentono misure distribuite ad alta risoluzione spaziale su grandi distanze e con un'elevata frequenza di campionamento. Il presente lavoro descrive un innovativo test *on site* che combina l'uso dei tradizionali sensori di temperatura e pressione, con il monitoraggio distribuito della temperatura mediante fibra ottica allo scopo di studiare la filtrazione attraverso l'argine durante un evento di piena.

Il sito sperimentale si trova lungo il fiume Adige vicino a Salorno (in Provincia di Bolzano), nella valle dell'Adige. Nell'area oggetto di studio, gli argini sono stati costruiti alla fine del XIX secolo per raddrizzare il corso del fiume. Le tracce degli antichi meandri sono quindi facilmente riconoscibili nelle fotografie aeree o nelle immagini satellitari (Angelucci, 2013). Per caratterizzare a fondo la struttura arginale e il suo comportamento geotecnico, sono stati eseguiti n.5 sondaggi agli angoli e al centro di un'area quadrata di 20 m di lato, a cavallo dell'argine destro (Fig. 1a).

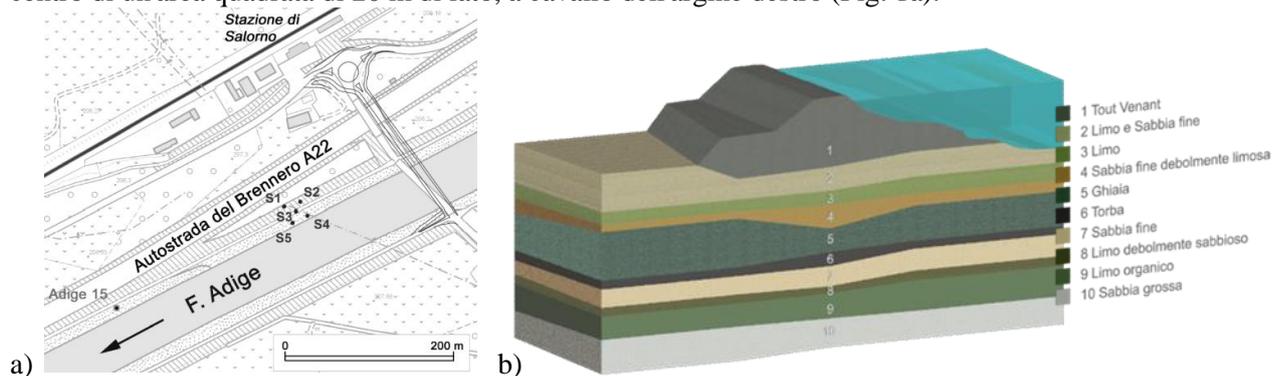


Fig. 1 a) Planimetria del sito di monitoraggio; b) Stratigrafia dell'area di studio (da Fabbian et al., 2022)

In ogni foro ai sensori standard (celle piezometriche e sonde termiche) sono stati affiancati metodi di monitoraggio innovativi (fibre ottiche e cavi per tomografia elettrica). Inoltre, sono stati condotti diversi test di permeabilità in situ per caratterizzare il comportamento idraulico dei vari livelli stratigrafici e sono stati raccolti numerosi campioni indisturbati. I dati di temperatura e pressione sono stati interpretati per caratterizzare il comportamento idraulico dell'argine e definire le condizioni di sicurezza in quest'area; la campagna di misura è attualmente in corso, in modo da poter approfondire il potenziale di fibra ottica e ERT come tecniche di monitoraggio della filtrazione arginale.

2. Sistema di monitoraggio del rilevato

2.1 Cavi a fibre ottiche come sensori di temperatura diffusa

Negli ultimi 30 anni, i sensori in fibra ottica (FO) hanno trovato un notevole sviluppo e utilizzo nel campo dell'ingegneria, soprattutto grazie ai vantaggi che questa tecnologia offre rispetto alla sensoristica tradizionale visto che le FO possono fornire con accuratezza elevata la temperatura del terreno ad alta risoluzione spaziale e temporale e sono quindi in grado di rilevare anche le variazioni di temperatura indotte dalla filtrazione anomala che avviene durante un evento di piena. Il meccanismo più noto attraverso il quale una FO può essere utilizzata come sensore termico si basa sul confronto tra

i segnali ottici generati da un laser immesso da un interrogatore nel cavo ottico e retrodiffusi: nota la velocità della luce nel cavo, è possibile determinare la posizione in cui si generano i segnali retrodiffusi e valutarne l'intensità, che è correlata alla temperatura dell'ambiente in cui il cavo è posato (Schenato, 2017). Esistono diversi tipi di metodi di interrogazione FO, adatti a diverse applicazioni ed esigenze, nonché diversi interrogatori e cavi di fibra, con risoluzione spaziale che varia da mm a metri, all'interno di campi di misura che variano da circa un metro a oltre 100 km (Palmieri et al, 2013).

2.2 Indagini geotecniche

Nei mesi di maggio e giugno 2021 sono state condotte le seguenti indagini geotecniche per la caratterizzazione del sito (vedi anche Fabbian et al. (2022)):

1. Sono stati eseguiti n.5 sondaggi agli angoli e al centro (corrispondente all'asse del rilevato) (Fig. 1a). Il foro centrale (S3) ha una lunghezza di circa 30 m, mentre quelli situati agli angoli hanno una lunghezza di circa 25 m, in modo da raggiungere più o meno la stessa profondità. S1 e S2 sono situati sul lato campagna, mentre S4 e S5 sono situati sul lato fiume. La Fig. 1b mostra una stratigrafia schematica del sottosuolo nell'area di studio.
2. N.11 campioni indisturbati sono stati raccolti mediante *Gel-Push Sampling* in S3, mentre n.10 campioni indisturbati con campionatore a parete sottile e n.16 campioni rimaneggiati sono stati prelevati in corrispondenza degli altri sondaggi.
3. In corrispondenza dei terreni più permeabili sono state eseguite le prove *SPT* e *Lefranc*.
4. Altre prove di permeabilità in situ sono state eseguite testando un dispositivo sperimentale appositamente costruito, per determinare la permeabilità dei terreni a grana grossa (sabbie e ghiaie sabbiose).

2.3 Il sistema di monitoraggio

In ogni foro è stata quindi installata la seguente strumentazione:

1. un cavo FO per misurare la variazione di temperatura lungo il profilo verticale;
2. cavi per la tomografia elettrica (ERT) per eseguire rilievi 3D durante le prove di immissione dal foro centrale; l'interrogatore ERT in uso è in grado di testare n.3 fori alla volta per ottenere una mappa 3D della resistività del terreno di fondazione dell'argine;
3. n.10 celle piezometriche e n.10 sonde termometriche, precedentemente calibrate in laboratorio. I sensori sono collegati a un controllore A/D e interrogati ogni ora.

Il cavo in FO, interrogato con un interrogatore Raman (*Oryx SR DTS* di *Sensornet*), fornisce un dato di temperatura per tutta la sua lunghezza con una risoluzione spaziale di 2 m e un'accuratezza di 0,1°C. In particolare, il cavo ha un diametro esterno di 4 mm e ospita 2 fibre multimodali (oltre a un filamento conduttivo per la modalità di riscaldamento attivo non utilizzata in questo caso, vedi Schenato, 2017). Per ciascun foro, il cavo è stato installato verticalmente con configurazione U-loop, ancorato esternamente a un tubo microfessurato di 60 mm di diametro. Una volta completata la perforazione, il tubo fessurato e il cavo in fibra sono stati calati nel foro ed il rivestimento è stato quindi rimosso. Per consentire la rimozione del rivestimento, il cavo in fibra ottica è stato precedentemente tagliato della lunghezza esatta di ciascun foro e poi giuntato ai cavi dei fori adiacenti per creare un unico percorso ottico, che può essere interrogato da una sola postazione (Fig. 2a) in una configurazione *dual-ended*. La parte di FO che collega orizzontalmente un foro all'altro è stata protetta posandola all'interno di un tubo corrugato in PVC, a sua volta interrato in una trincea profonda circa 0,5 m. Circa 20 m di cavo sono stati lasciati liberi per poterli posare nel bagno termico, ad un'estremità del percorso ottico, in modo da effettuare le operazioni di calibrazione durante le campagne di misura. La sezione del cavo è rappresentata in Fig. 2b. Infine, n. 2 sonde di pressione e temperatura, con un'accuratezza di 2 cm di colonna d'acqua e 0,1°C, rispettivamente, sono state installate in ogni foro a diverse profondità (vedi anche Fig. 3-4).



Fig. 2 a) Attrezzatura utilizzata per le misure con FO. b) Sezione del cavo in fibra ottica per le misure di temperatura (diametro esterno 4 mm): 1) fibra ottica multimodale, insensibile alla piegatura con rivestimento in acrilato a doppio strato; 2) acciaio inox 316L, riempito di gel, tubo sciolto; 3) fili metallici di armatura in acciaio inox 316L; 4) conduttori in rame (area totale della sezione trasversale 0,83 mm²); 5) doppio strato, guaina esterna in poliammide/nylon. (da Solifos AG - BRUsens DTS AHFO)

3 Risultati del monitoraggio e discussione

Durante i rilievi e il successivo monitoraggio è stata raccolta una grande quantità di dati. In particolare, qui vengono presentati i dati registrati durante l'evento di piena del 5 agosto 2021.

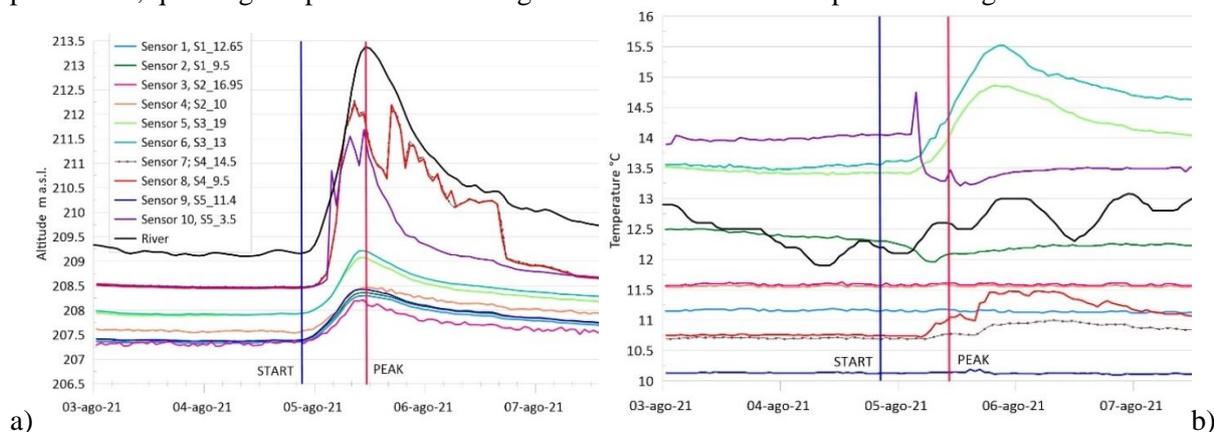


Fig. 2. Pressioni (a) e temperature (b) misurate dai sensori durante l'evento di piena (3-8 agosto 2021) (da Fabbian et al., 2022)

In Fig. 3a, i livelli piezometrici registrati dai trasduttori di pressione sono confrontati con il livello del fiume registrato alla stazione idrometrica di Salerno (situata sull'altra sponda del fiume nella stessa sezione). La piena ha prodotto un aumento del livello dell'acqua del fiume di circa 4,2 m in sole 11 ore, raggiungendo la quota massima di 213,4 m s.l.m. (circa 70 cm sotto la cresta dell'argine) alle 11.00 circa del 5 agosto 2021. L'evento ha generato numerosi fontanazzi al piede dell'argine: in prossimità del sito sperimentale sono state individuate quattro venute d'acqua di modesta entità, caratterizzate dall'emersione di acqua pulita, indicando assenza di fenomeni di erosione interna.

Le sonde n. 7, 8 e 10 (curve marrone, rossa e viola scuro in Fig. 3a), rispettivamente situate a S4_14,5 m, S4_9,5 m e S5_3,5 m, appaiono le più sensibili all'oscillazione del livello del fiume, avendo registrato una variazione di circa 3-3,8 m, raggiungendo i livelli piezometrici più elevati. Questo comportamento era prevedibile per il sensore n.10, a bassa profondità e vicino al letto del fiume, mentre era meno prevedibile per le sonde n.7 e 8, che si trovano negli strati sabbiosi 4 e 7 (si veda la stratigrafia in Fig.1b), soprattutto a confronto con la risposta della sonda n.9, che si trova a S5_11,4m, cioè a breve distanza, nello strato di ghiaia 5 (tra gli strati 4 e 7). Il livello piezometrico misurato dalle sonde n.7 e 8 ha iniziato a salire dopo 1-2 ore, un tempo eccezionalmente rapido se confrontato con il ritardo di 4 o 5 ore nella risposta degli altri sensori. Spostandosi sul lato campagna (sensori n. 5 e 6 e poi sensori n. 1, 2, 3 e 4), l'oscillazione di pressione registrata durante la piena risulta fortemente ridotta a soli 1-1,2 m. Osservazioni più approfondite sono riportate in Fabbian et al. (2022).

Durante la piena, la temperatura dell'acqua del fiume è scesa di circa 1°C, e solo il sensore n.10 ha registrato un calo simile, probabilmente a causa della sua vicinanza al corso del fiume. I sensori n.5, 6,

7 e 8, invece, hanno registrato un aumento della temperatura di circa $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, con un certo ritardo rispetto al passaggio dell'onda di piena, probabilmente attribuibile alla migrazione di acqua calda precedentemente residente in strati più profondi, a sua volta causata dall'aumento del gradiente piezometrico tra i due lati dell'argine.

Nel pozzo S3, dove si trovano i sensori n. 5 e 6, il tubo fessurato era ancora aperto, permettendo possibili movimenti verticali di acqua e aria al suo interno. Di conseguenza, i dati registrati dai sensori n. 5 e 6 risultano influenzati dalla temperatura dell'aria esterna (circa $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ al picco di piena).

Per un migliore confronto, in Fig. 4 viene rappresentata la sezione trasversale S1 - S3 - S5 al picco dell'evento di piena. Si nota che la pressione negli strati di fondazione dell'argine non è stata influenzata in modo significativo dall'onda di piena, quindi è ragionevole ipotizzare che le venute d'acqua osservate si siano sviluppate interamente al corpo arginale o all'interfaccia tra gli strati 1 e 2.

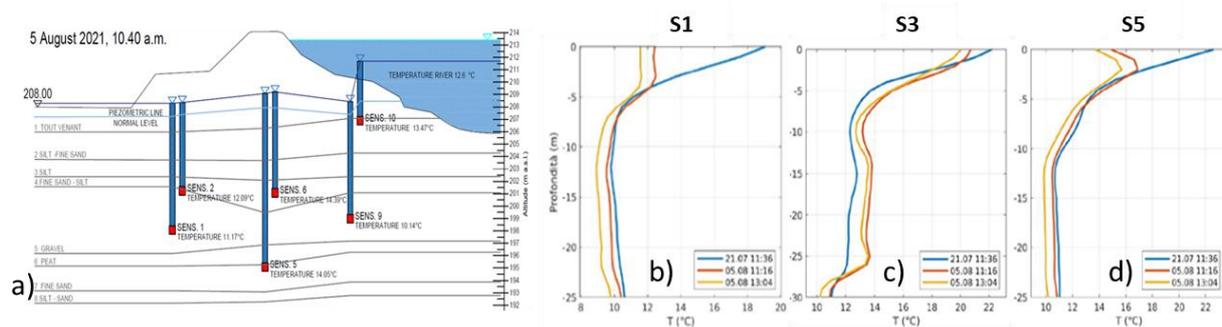


Fig. 4. a) Profili di temperatura nei pozzi al picco di piena (5 agosto 2021 ore 10.40) confrontati con quelli in regime normale (linea azzurra). Profili di temperatura nel pozzo S1(b) e S3(c) e S5(d) misurati il 5 agosto 2021 confrontati con quelli del 21 luglio 2021 (da Fabbian et al., 2022)

In Fig. 4 b, c vengono confrontati i profili verticali di temperatura misurati dalle FO il 5 agosto durante il picco di piena, con quelli misurati tre settimane prima, quando il livello dell'Adige era basso (in azzurro). Durante la piena, il terreno nei primi 4-5 m si è saturato rapidamente a causa dell'infiltrazione di acqua piovana fredda, e la temperatura del suolo è scesa di circa 8°C (vedi Fig.4b). Nei pozzi lato campagna (S1) solitamente la falda è a $-4,3\text{ m}$ dalle teste dei pozzi e quindi in luglio la temperatura del terreno sopra falda è riscaldata dall'irradiazione solare e dall'elevata temperatura dell'aria; in corrispondenza della piena si osserva una significativa diminuzione della temperatura negli strati più superficiali, indice della filtrazione dell'acqua attraverso il corpo arginale e gli strati di fondazione superficiali indotta dalla piena.

Nei pozzi lungo il fiume e in S5 (Fig. 4d), l'abbassamento della temperatura si osserva solo nei primi 2-3 m, probabilmente perché le teste dei pozzi si trovano a soli 2 m sopra la quota di falda. I dati del pozzo centrale S3 (Fig. 5c) non mostrano variazioni in superficie perché il tubo fessurato era aperto e la circolazione dell'aria ha influenzato la temperatura interna. Significativo è osservare che il profilo verticale misurato nel pozzo centrale S3 registra una variazione di circa 1°C negli strati profondi al passaggio dell'onda di piena, confermando quanto registrato dai sensori tradizionali. L'andamento della temperatura misurata dal FOS è paragonabile a quello precedentemente riportato da Cola et al. (2021) in un altro sito sperimentale sull'argine dell'Adige vicino a Salerno, dove è stato installato un cavo FO orizzontale per il rilevamento delle variazioni di temperatura lungo 300 m di argine. In quel sito, durante un importante evento di piena nell'ottobre 2018 la filtrazione indotta dall'alluvione nel terreno ha sostituito l'acqua preesistente, caratterizzata da un livello di temperatura più elevato. Di conseguenza, il FOS ha registrato una diminuzione della temperatura tendente a quella del fiume.

4. Conclusioni

Si possono quindi ricavare le seguenti conclusioni:

1. a parte il sensore n.10 (S5_3.5) più vicino al fiume, gli altri sensori sono posizionati all'interno dei

terreni di fondazione dell'argine, in strati più permeabili, a una profondità tra 12 e 17 m dalla sommità arginale, quindi 4 m più in basso rispetto al fondo dell'alveo. Nonostante la piena significativa, l'aumento di pressione è limitato, suggerendo che la filtrazione interessa solo il corpo arginale e gli strati meno profondi non riguardando quelli più profondi. La stessa osservazione si può ottenere dalle misure di temperatura; anche in questo caso, il sensore n.10 (S5_3.5) è l'unico che mostra una variazione di temperatura, che converge a quella del fiume.

2. al contrario, le fibre ottiche hanno misurato un significativo aumento della temperatura limitatamente agli strati più superficiali (fino a 4 m), precedentemente influenzati solo dalla temperatura dell'aria. Durante la piena, la temperatura è diminuita di 8°C a causa della filtrazione di acqua più fredda (circa 12,5°C), che è penetrata e ha saturato il corpo arginale.
3. il sistema di monitoraggio applicato combina sensori tradizionali con cavi in fibra ottica: i primi hanno fornito l'evoluzione temporale della temperatura e della pressione ad una certa profondità predeterminato (dove era stato installato lo strumento), mentre il secondo ha fornito una misura della temperatura distribuita su tutta la verticale durante la campagna di misura, e riesce ad intercettare il segnale di filtrazione in superficie, dove non era stato preventivato.

Pertanto, i due metodi combinati mostrano l'avanzamento del fronte di saturazione all'interno dell'argine, catturato dalle misure con FO. Queste, monitorando l'intero profilo verticale, riescono a indentificare la profondità a cui avviene la filtrazione, difficilmente ottenibile utilizzando sensori puntuali, la cui posizione deve essere stabilita a priori. Ulteriori misure e analisi verranno eseguite in diverse condizioni di regime idraulico, consentendo di valutare ulteriormente il potenziale della fibra ottica nel monitoraggio delle strutture arginali.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano l'Ente Montano Provincia Autonoma di Bolzano per aver finanziato lo studio.

Bibliografia

- Angelucci D., (2013). “La valle dell’Adige: genesi e modificazione di una grande valle alpina come interazione tra dinamiche naturali e fattori antropici”. Atti di convegno. Rovereto, 21-22 febbraio 2013. Accademia Roveretana degli Agiati.
- Bersan S., Koelewijn A. R., Simonini P. (2018). “Effectiveness of distributed temperature measurements for early detection of piping in river embankments”. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 1491-1508.
- Chen C.C., Lee W.F., Chen J.W, Ishihara K. (2014). “Liquefaction potential of non-plastic silty sand”. *Journal of marine Science and Technology*, 22 (2): 137-145.
- Cola S., Girardi V., Bersan S., Simonini P., Schenato L., De Polo F. (2021). “An optical fiber based monitoring system to study the seepage flow below the landside toe of a river levee”. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 11(3), 691-705 <https://doi.org/10.1007/s13349-021-00475-y>.
- Fabbian N., Cola S, Simonini P, De Polo F., Schenato L., Tedesco G., Marcato G., Dalla Santa G, “Innovative and traditional monitoring system for characterizing the seepage inside river embankments along the Adige River in Salerno (Italy)”. Proc. of International Symposium on Field Monitoring in Geomechanics (ISFMG), London, 4 – 7 settembre 2022
- Palmieri L., Schenato L. (2013). “Distributed optical fiber sensing based on Rayleigh scattering”. *The Open Optics Journal*, 7, (Suppl-1, M7) 104-127.
- Schenato L. (2017). “A review of distributed fiber optic sensors for geo-hydrological applications”. *Applied Sciences*, 7(9), 896.
- Solifos AG - BRUsens DTS AHFO Datasheet https://solifos.com/app/uploads/2021/03/Solifos_SE-01-02_3-50-1-022_en.pdf