

Monitoraggio delle frane mediante una rete di sensori: la misura del contenuto d'acqua nel terreno

A. Iacopino¹, S. Viaggio¹, R. Bovolenta¹

¹Università degli Studi di Genova

SOMMARIO: Nell'ambito del progetto ALCOTRA AD-VITAM, l'Università degli Studi di Genova si è impegnata nello sviluppo di un sistema, denominato LAMP, per l'analisi e previsione dei dissesti franosi innescati da piogge. LAMP è basato su un modello fisicamente basato, che integra modellazione idrologica e geotecnica. Per alimentare il modello sono impiegati sensori di temperatura e contenuto d'acqua nel suolo, oltre ai dati di pioggia osservati da pluviometri o radar meteorologici. Per ulteriore controllo sono disposti ricevitori GNSS a piano di campagna. I prodotti finali del modello sono mappe di suscettibilità al dissesto franoso in occorrenza di precipitazioni misurate o attese. Con particolare riferimento alle misure di contenuto di acqua nel suolo, il presente lavoro descrive le fasi di installazione della rete di monitoraggio, le analisi di affidabilità degli strumenti e le operazioni legate alla calibrazione dei sensori.

Keywords: frane, rete di monitoraggio, previsione, umidità del terreno.

1. INTRODUZIONE

Nella valutazione della propensione del territorio a franare le variabili che descrivono le condizioni geoidrologiche locali e le loro variazioni spaziali e nel tempo sono particolarmente importanti.

La stabilità dei pendii dipende dalla distribuzione delle pressioni dell'acqua interstiziale nel suolo che ovviamente è influenzata dagli eventi meteorici a cui il sito è soggetto. Tale distribuzione è associata anche alla propagazione del fronte di saturazione attraverso la zona non satura ed il monitoraggio di tale zona può pertanto essere utile a comprendere i possibili meccanismi di instabilità.

In generale, il monitoraggio della zona non satura può essere eseguito attraverso la misura della suzione e del contenuto d'acqua.

La misura della suzione è piuttosto problematica (Tarantino e Pozzato, 2008), mentre appare assai valida la misura del contenuto (volumetrico) d'acqua mediante sensori basati sulla misura della permittività dielettrica del terreno. Questi sensori hanno tempi di risposta praticamente istantanei, richiedono scarsa manutenzione (a parte quella legata all'elettronica degli strumenti), e sono relativamente poco costosi.

L'utilizzo di strumentazione a basso costo, consente di monitorare ampie porzioni di territorio, for-

nendo dati in tempo reale.

Dal momento che non esiste una relazione semplice fra il contenuto d'acqua nello strato più superficiale del suolo e le condizioni idrauliche dei versanti alle profondità ove si sviluppano le superfici di scorrimento, la misura delle condizioni di umidità superficiale del terreno è di notevole interesse per lo studio dei fenomeni franosi (Iverson, 2000; Crosta e Frattini, 2003) in abbinamento a modelli di analisi fisicamente basati.

1.1. Il progetto AD-VITAM e il sistema LAMP

AD-VITAM è un progetto di cooperazione transfrontaliera, finanziato all'interno del programma In-terreg V-A France-Italie, ALCOTRA 2014-2020, Asse 2, Ambiente Sicuro, che vede la collaborazione dell'Università di Genova con il Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), capofila del progetto, con il Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), l'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente Ligure (ARPAL), la Regione Piemonte, la Fondazione Montagna Sicura e l'Unione dei Comuni delle Valli Argentina e Armea. Il progetto nasce con l'obiettivo di aumentare la resilienza dei territori localizzati lungo l'arco alpino, al confine tra Italia e Francia, i quali risultano fortemente vulnera-

bili al dissesto franoso, sia per caratteristiche geologiche sia per la marcata presenza antropica.

Tra le principali finalità del progetto trova posto lo sviluppo di sistemi operativi che permettano lo studio della correlazione fra piogge e fenomeni franosi, in tempo reale, con lo scopo di fornire sistemi di previsione e prevenzione, nonché di allerta alle amministrazioni locali impegnate nella gestione del rischio nei riguardi dei fenomeni franosi, nelle operazioni di pianificazione e protezione civile, sia a livello di autorità centrale sia a livello di comunità locale, esposta a tale problematica.

All'interno del progetto AD-VITAM sono cinque i siti pilota che sono stati individuati, quattro di essi sono ubicati nella provincia di Imperia (Liguria, Italia), mentre il quinto fa parte della Région PACA, nella zona provenzale (Francia). Tali zone sono soggette a fenomeni franosi superficiali, per scivolamento, in cui la storia pregressa ha permesso di identificare la pioggia come elemento scatenante. L'Università di Genova ha realizzato un sistema per il monitoraggio e l'analisi dei versanti denominato LAMP (*Landslides Monitoring and Predicting*) (Bovolenta et al., 2016; Passalacqua et al., 2016) tuttora in via di sviluppo. Tale strumento consente di valutare la suscettibilità al dissesto franoso in occorrenza di precipitazioni, misurate o attese, stabilendo un nesso causa-effetto tra il verificarsi di eventi piovosi e l'innescare di fenomeni franosi. LAMP è basato su un modello idrologico-geotecnico integrato, indicato nel seguito come modello IHG (Passalacqua et al., 2015), fisicamente basato, sviluppato in ambiente GIS (Geographic Information System) e alimentato da una rete di monitoraggio a basso costo, autosufficiente, gestibile da remoto.

Il modello IHG, (*Integrated Hydrological Geotechnical model*) è stato ideato per analizzare areali di qualche chilometro quadrato in tempi ridotti in modo tale che, alimentato da dati di monitoraggio (di pioggia, temperatura, contenuto d'acqua), possa descrivere in "tempo reale" la risposta del sito in esame. La modellazione è completamente tridimensionale, sia in termini geometrici sia in termini di parametri geotecnici e idrologici, la cui spazializzazione è resa possibile attraverso opportuni metodi di interpolazione ed estrapolazione dei dati provenienti dalle indagini e dai monitoraggi in situ (Passalacqua et al., 2013). La caratterizzazione di un sito richiede la conoscenza di misure piezometriche, stratigrafie, parametri fisici, di resistenza del terreno e la permeabilità. L'analisi in ambiente GIS consente di ottenere un modello 3D del sito in esame dove la superficie è discretizzata in pixel (tipicamente 5m x 5m) e il volume in frana risulta suddiviso in una serie di elementi tri-dimensionali, che dal punto di vista idraulico si comportano come serbatoi sotterranei. Il modello viene alimentato da piogge che possono variare sia nello spazio, sia nel tempo (Federici et al., 2015).

Per un dato evento di pioggia (Fig. 1), il calcolo

della quantità di acqua che si infiltra nel sottosuolo viene svolto applicando il metodo del CN modificato (1972-1975). Per tale stima è fondamentale la conoscenza dell'uso del suolo e delle condizioni di umidità dello stesso, riferite ai tre giorni precedenti all'evento di pioggia analizzato. Ogni cella di discretizzazione, viene dunque studiata come un serbatoio in cui entra l'acqua di pioggia infiltrata e ne esce per deflusso sotterraneo ed evapotraspirazione.

La conoscenza del comportamento del livello di falda consente di svolgere l'analisi di stabilità in tensioni efficaci, basata sul metodo dell'equilibrio limite globale. In analogia a Skempton e Delory, (1957) e ad altri modelli presenti in letteratura (e.g. Alvioli e Baum, 2016, Baum et al., 2002-2008, Montrasio e Valentino, 2008) si assume che la superficie di scorrimento sia parallela al piano campagna. Tale assunzione è fatta per ogni elemento di volume; le condizioni di stabilità vengono valutate a diverse profondità, tipicamente ogni metro, sino a giungere in prossimità del substrato roccioso o stabile, definendo così la superficie di scorrimento caratterizzata dal minimo fattore di sicurezza. Questa può essere irregolare, dal momento che le celle possono avere caratteristiche geometriche e fisico-meccaniche differenti, variabili anche in profondità. I prodotti finali sono mappe di suscettibilità al dissesto franoso (formato raster), sia per piogge misurate sia per piogge attese, basate sulla variazione spaziale del fattore di sicurezza.

Attualmente, nell'ambito del progetto AD-VITAM, il modello IHG è adottato per l'analisi di cinque siti.

Molte analisi sono già state condotte in relazione a numerosi eventi storici di pioggia su scala giornaliera, correlando le osservazioni effettuate in sito dai piezometri e dai pluviometri al fine di calibrare, in particolare, i parametri di porosità e conducibilità idraulica per meglio cogliere le fasi di carico e scarico delle falde osservate in sito.

Recentemente sono state installate le reti di monitoraggio in alcuni dei siti di interesse, nel prossimo futuro tutti i siti verranno dotati dell'opportuna sensoristica, cosicché sarà possibile impiegare i sensori di temperatura e contenuto d'acqua nel suolo, oltre ai dati di pioggia osservati da pluviometri o radar meteorologici (Sguerso et al., 2016; Ferrando et al., 2018) per alimentare il modello IHG.

Sono previsti ricevitori GNSS (*Global Navigation Satellite System*) a piano campagna per controllare che le zone reputate critiche dal modello IHG siano effettivamente soggette a spostamenti. Ovviamente, una validazione diretta non è possibile dal momento che il modello IHG valuta le condizioni di stabilità mediante un approccio all'equilibrio limite globale.

Nel seguito verrà illustrata la rete di monitoraggio, con particolare riferimento alla misura in campo del contenuto d'acqua nel suolo.

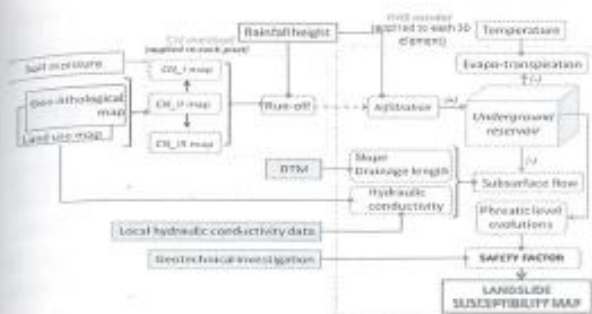


Figura 1. Diagramma di flusso del modello IHG.

2. RETE DI MONITORAGGIO: LA MISURA DEL CONTENUTO D'ACQUA DEL TERRENO

Con riferimento al monitoraggio del contenuto d'acqua nel suolo, l'equipaggiamento consiste in:

Sensori WaterScout SM100 (Spectrum): sono sensori capacitivi per la misura del contenuto d'acqua nel terreno (Fig. 2), che possono essere impiegati anche per installazioni multiple entro piccole trincee nell'ambito di monitoraggi ambientali. Devono essere inseriti nel terreno in modo tale che la loro superficie sia a contatto col suolo.



Figura 2. WaterScout SM100.

Sensor Pup: hanno lo scopo di alimentare i sensori ad essi connessi e trasmettere i dati via radio al Retriever.

Retriever: ha lo scopo di immagazzinare i dati ricevuti dai Sensor Pup.

Software RetrieverPups: attraverso tale software è possibile collegare il Retriever al PC e leggere direttamente le misurazioni. Inoltre, il software consente di impostare le modalità di acquisizione dei dati, in particolare l'intervallo temporale, e di monitorare i livelli di batteria dei Sensor Pup e del Retriever.

Pannello solare da 5W: l'alimentazione del Retriever e dei Sensor Pup viene assicurata dalla presenza di un apposito pannello solare corredato da un accumulatore. Tuttavia, in caso di sua assenza, i dispositivi vengono alimentati da batterie interne o dal Modem 3G attraverso il collegamento AUX.

Modem 3G: è essenziale per la trasmissione in remoto dei dati di umidità. Esso può essere alimentato attraverso la rete elettrica mediante apposito adattatore o mediante un pannello solare. Il modem viene collegato al ricevitore mediante cavo AUX.

Interfaccia SpecConnect: portale internet attraverso

il quale è possibile visualizzare lo storico dei monitoraggi, scaricare i dati in formato Excel, configurare i sensori e visualizzarne il posizionamento su cartografia digitale.

Applicazione WatchDog Mobile: applicazione per la telefonia mobile che consente di visualizzare i dati di umidità forniti dai sistemi di monitoraggio.

FieldScout Soil Sensor Reader: strumento utile alla lettura diretta del contenuto d'acqua misurato da un singolo WaterScout ad esso collegato (Fig. 3) ed essenziale per la visualizzazione del dato grezzo (RAW DATA), informazione indispensabile alla calibrazione dei sensori di umidità.



Figura 3. Utilizzo del FieldScout.

L'analisi di affidabilità degli WaterScout è stata eseguita in base ad un confronto fra la risposta dei sensori e i dati forniti dalla sonda capacitiva Drill&Drop (Sentek Sensor Technologies), assunta quale strumento di riferimento. La sonda Drill&Drop (Fig. 4) è una sonda multi-capacitiva che consente di misurare il contenuto d'acqua nel suolo lungo una verticale.



Figura 4. Sonda Drill&Drop.

La sonda Drill&Drop era stata precedentemente studiata mediante attività sperimentale in laboratorio (Campora et al., 2020), ma era stata scartata per il monitoraggio dei siti del progetto AD-VITAM in quanto piuttosto costosa.

Lungo un arco temporale di circa tre mesi sono state osservate le misure effettuate in un campo prova, ove sono state realizzate due verticali, ciascuna strumentata con 4 sensori WaterScout SM 100 e una verticale equipaggiata con una sonda Drill&Drop di lunghezza pari a 90cm (con sensori posti ogni 10cm).

Tali strumentazioni sono state affiancate in modo tale da monitorare l'evoluzione dei profili di umidità sino ad una profondità di circa 90cm dal piano campagna. Tale attività sperimentale non ha solo messo in evidenza il comportamento degli WaterScout in relazione ad alcuni eventi di pioggia, ma ha fornito spunti fondamentali, ad esempio per l'interpretazione dei dati e per le modalità di installazione.

Gli WaterScout SM 100 sono stati sottoposti anche a sperimentazione in laboratorio. In tale occasione è stato possibile osservare (meglio che nel campo prova) la deriva del segnale. I sensori posti in acqua distillata hanno mostrato talvolta una variazione della risposta significativa nel tempo. Si è imputata tale deriva del segnale alla progressiva formazione di piccole bolle d'aria sulla superficie dei sensori immersi in acqua.

3. CALIBRAZIONE DEI SENSORI WATERSCOUT

L'aspetto su cui si è voluta concentrare l'attenzione è senz'altro la calibrazione degli WaterScout. Infatti, è di primaria importanza trovare una relazione tra la misurazione dello specifico sensore ed il contenuto volumetrico di acqua nel terreno.

Una serie di curve di calibrazione, spesso basate sulla sola tessitura del suolo, vengono generalmente fornite dagli stessi produttori di strumenti. Tuttavia, diversi studi hanno dimostrato che le equazioni di calibrazione fornite dai produttori potrebbero non descrivere in modo efficace i dati misurati, in particolare per contenuti di umidità elevati e per materiali che non rientrano tra quelli studiati nelle calibrazioni offerte dai produttori (De Carteret et al., 2013). Per tale motivo, si è deciso di intraprendere un'opportuna attività sperimentale in laboratorio per la ricerca di equazioni di taratura specifiche del suolo nei siti investigati, al fine di migliorare l'accuratezza e le prestazioni dei dispositivi di monitoraggio del contenuto d'acqua.

Per la calibrazione dei sensori WaterScout SM100 è stata definita una procedura che sta portando a risultati soddisfacenti per quanto ancora preliminari. L'idea fondamentale consiste nel disporre di campioni di terreno prelevati in prossimità della posizione dei sensori di umidità nell'area di studio da impiegarsi per definire delle curve di calibrazione in laboratorio. Sostanzialmente, si procede secondo due fasi operative:

1. Caratterizzazione geotecnica del terreno con cui viene realizzato il modello di simulazione dell'aggregato di calibrazione.
2. Determinazione delle curve di regressione suolo-specifiche.

Tale attività sperimentale è utile per appurare se la taratura è necessaria ogni qualvolta le caratteristiche

del terreno differiscono, in una certa misura, da quelle per le quali sono state sviluppate le correlazioni suggerite dai produttori.

La risposta dei sensori, in termini di dato grezzo, viene osservata inserendone quattro in una matrice, opportunamente modellata, di terreno umido e misurando il segnale in uscita mediante il FieldScout. Dalla stessa matrice si estraggono poi quattro campioni, per ciascuno dei quali viene misurato il volume, la massa umida e la massa asciutta, così da poter risalire alla densità e quindi all'effettivo contenuto volumetrico d'acqua. La ripetitività tanto della lettura grezza quanto del calcolo del contenuto d'acqua per quattro volte consente di disporre di una media dei valori di riferimento che minimizzi l'errore. Ripetendo il processo variando il contenuto d'acqua, si ottiene un insieme di dati utile a stabilire una correlazione tra il dato grezzo e il contenuto d'acqua peculiare del terreno analizzato. La corretta determinazione di tale relazione consente di avere una misura affidabile dell'umidità del suolo.

La lettura grezza dei sensori di umidità del suolo, ed in particolare degli WaterScout, non è altro che la misura elettrica dello strumento, tipicamente espressa in mV. Gli WaterScout vengono alimentati con una tensione che va dai 3 ai 5V ed è essenziale tenere conto che la variazione della tensione in entrata influenza il valore della tensione misurata. Tale aspetto è di fondamentale importanza in quanto i Sensor Pup alimentano i sensori con una tensione di circa 3V mentre il FieldScout Soil Sensor Reader fornisce una tensione di circa 4V. Stabilire dunque una correlazione fra il dato grezzo e il contenuto d'acqua attraverso l'utilizzo del FieldScout determina la necessità di stabilire il legame fra la lettura di tale strumento e quella fornita dai Sensor Pup. Considerando la funzione del convertitore A/D da 12 bit installato nei Sensor Pup, è possibile risalire al suddetto legame. In genere risulta opportuno adimensionalizzare la lettura elettrica in uscita con quella in entrata (V_{out}/V_{in}).

Essendo necessari numerosi campioni di terreno per la calibrazione dei sensori, si è deciso di contenere i costi utilizzando un'attrezzatura decisamente più economica di quella classica. Sono stati impiegati dei campionatori ricavati da tubi in PVC-N (diametro 110mm, spessore 0,4mm) opportunamente corredati da elementi appositamente realizzati, fra cui una corona d'acciaio da applicare al campionatore e utilizzata come tagliente per favorire la penetrazione dello strumento (Fig. 5).

Si ritiene che l'utilizzo di siffatti campionatori riduca i costi complessivi delle operazioni, dal momento che i classici shelby in acciaio inox di 1m di lunghezza hanno un costo pari ad almeno tre volte il prezzo del medesimo tubo in PVC-N. Naturalmente, tali campionatori in PVC-N hanno una maggiore probabilità di rompersi durante la battitura. Nonostante ciò, durante la campagna di campionamento a Ceria-

na (uno dei cinque siti esaminati nel progetto AD-VI-TAM) le condizioni del terreno si sono rivelate molto favorevoli alla penetrazione e su nove pre-lievi solo uno ha visto la completa rottura del campionatore.

L'attività sperimentale per la calibrazione è tuttora in corso.



Figura 5. Schema della corona (a sinistra) ed estrazione del campionatore con campione di terreno al suo interno (a destra).

4. MODALITA' DI INSTALLAZIONE DEI SENSORI WATERSCOUT

L'installazione in campo della rete di monitoraggio prevede, innanzitutto, un sopralluogo volto alla scelta dei punti ove posizionare i sensori e i dispositivi di trasmissione e ricezione. Il Retriever deve essere in grado di captare il segnale radio dei Sensor Pup distribuiti sull'area e il Modem ad esso collegato deve connettersi ad un operatore che assicuri una copertura di rete sufficientemente affidabile. Pertanto la scelta dei punti di misurazione del contenuto d'acqua nel terreno dovrà necessariamente dipendere sia dalla presenza di una zona nella quale poter inserire i sensori sia dalla ricezione del segnale radio, quest'ultimo valutabile collegando il Retriever ad un PC mediante cavo USB e utilizzando l'apposita interfaccia RetrieverPups. L'inserimento dei sensori nel terreno avviene a diverse profondità, in modo tale da descrivere il profilo verticale di umidità in diversi punti, concentrando l'attenzione nei primi 90cm circa.

Le principali modalità di installazione sono due. La più veloce prevede l'inserimento in verticale di ogni sensore alla profondità desiderata, raggiunta mediante un preforo di installazione (Fig. 6).

Se tale operazione risulta ostacolata dalla presenza di trovanti o terreno particolarmente compatto, si dovrà necessariamente optare per un'installazione in orizzontale all'interno di un fronte di scavo a trincea (Fig. 7).

Per l'inserimento degli WaterScout nel terreno, viene in genere utilizzato un tubo in PVC che accompagna il sensore nella fase di installazione e che viene sfilato nel momento in cui il sensore raggiunge la sua posizione.



Figura 6. Sensore allocato in un tubo in PVC (a sinistra) ed inserimento in foro verticale precedentemente realizzato (a destra).



Figura 7. Inserimento in foro orizzontale del sensore allocato in un tubo in PVC.

Quale che sia la modalità di installazione scelta, questa dovrà essere eseguita facendo sì che la superficie del sensore risulti pienamente a contatto col terreno. Talvolta si applica il terreno uscente dal foro direttamente sulla superficie dello strumento il quale poi viene inserito verticalmente.

La funzionalità del sensore installato viene sempre verificata, mediante l'utilizzo del FieldScout.

L'installazione in verticale prevede, dopo il posizionamento dei sensori, l'applicazione di un certo quantitativo di bentonite inumidita con acqua in maniera tale da isolare il foro di installazione ed evitare la generazione di vie preferenziali di infiltrazione d'acqua.

L'installazione in orizzontale prevede l'inserimento degli WaterScout in prefori orizzontali profondi pochi centimetri. In questo caso non è necessario l'uso di bentonite. Nonostante ciò la realizzazione di uno scavo e, ad installazione conclusa, il successivo rinterro altera le condizioni iniziali con riferimento alla circolazione dell'acqua. Pertanto è necessario, prima di procedere al rinterro, applicare un telo impermeabilizzante sul fronte di scavo ove i sensori sono stati installati.

In generale, risulta opportuno adottare alcune misure di protezione dei dispositivi installati, quali guaine protettive rivestite in alluminio atte a evitare che i roditori danneggino i cavi dei sensori.

L'alimentazione dei Sensor Pup distribuiti sull'area è assicurata da pannelli solari da 5V, mentre il Modem è collegato mediante apposito trasformatore

alla rete elettrica, nonostante anche per esso l'alimentazione mediante pannello solare risulti comunque possibile. Il Retriever viene alimentato dal Modem stesso attraverso il cavo AUX per la trasmissione dati.

I dispositivi di monitoraggio vengono installati in ambiente naturale, pertanto è opportuno adottare guaine protettive rivestite in alluminio atte a evitare che i roditori danneggino i cavi dei sensori. Inoltre, è consigliabile concludere l'installazione dei Sensor Pup e dei sensori annessi con la realizzazione di un recinto di protezione che circondi localmente il palo di supporto delle centraline.

Vale la pena sottolineare come gli strumenti di misura descritti non entrino in sostanziale conflitto con altri dispositivi di monitoraggio presenti in campo, come ad esempio i GNSS per la misurazione degli spostamenti.

5. I CASI STUDIO DI MENDATICA E CERIANA: RISULTATI PRELIMINARI

Tra il novembre e il dicembre 2019 le reti di monitoraggio sono state installate nei siti di Mendatica (IM) e Ceriana (IM).

I cinque Sensor Pup distribuiti su ciascun sito sono stati denominati con l'iniziale della località, seguita da un numero progressivo da 1 a 5.

In corrispondenza di ogni nodo della rete sono stati installati quattro sensori WaterScout (indicati con le lettere A, B, C, D) posti a diverse profondità dal piano campagna.

Si riportano nel seguito alcuni andamenti (Fig. 8 e 9) del contenuto d'acqua nel terreno, misurati in concomitanza di eventi piovosi intensi, che sono stati misurati da pluviometri installati nei siti (o in vicinanza). È necessario sottolineare che i valori di contenuto d'acqua nel terreno riportati nei grafici fanno ancora riferimento alle impostazioni di fabbrica. Infatti, non sono state ancora applicate ai dati grezzi le pertinenti curve di calibrazione, in quanto non ancora ottenute.

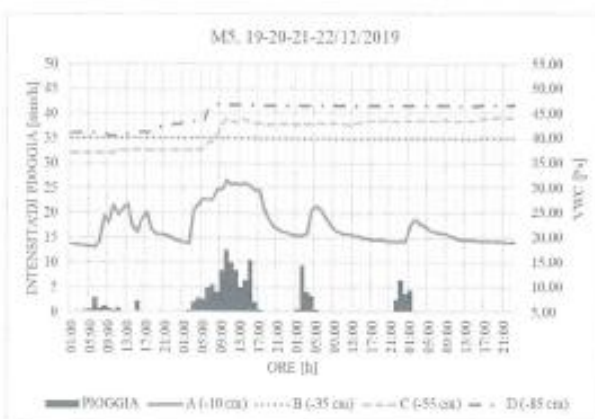


Figura 8. Andamento dell'umidità del suolo rilevata dal Sensor Pup M5 installato a Mendatica dal 19/12/2019 al 22/12/2019.

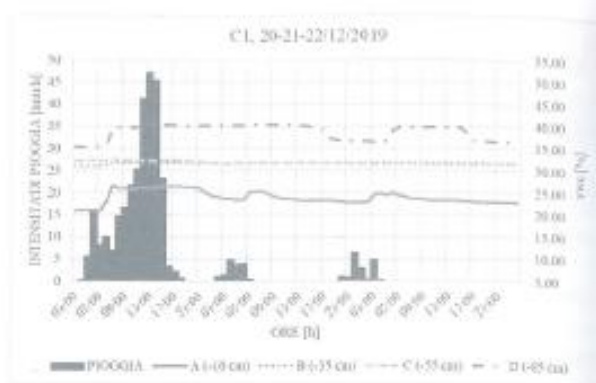


Figura 9. Andamento dell'umidità del suolo rilevata dal Sensor Pup C1 installato a Ceriana dal 20/12/2019 al 22/12/2019

Fermo restando che i valori di contenuto d'acqua (indicati in ordinata come VWC-Volumetric Water Content) potranno subire modifiche applicando le curve di calibrazione, è possibile notare che gli andamenti sono in accordo con le piogge misurate dai pluviometri.

Soprattutto i sensori A, posti a 10cm dal piano campagna risentono sensibilmente delle piogge.

6. CONCLUSIONI

Il sistema LAMP è stato formulato per l'analisi e la previsione dei dissesti franosi innescati da pioggia.

Esso è basato su un modello idrologico-geotecnico integrato fisicamente basato, alimentato da una rete di monitoraggio a basso costo, autosufficiente, gestibile da remoto e facilmente rilocabile.

Il modello applica il metodo del Curve Number Modificato (SCS 1972-1975) per calcolare la quantità di pioggia che si infiltra, in funzione dell'uso del suolo e della condizione di bagnamento dovuta ai tre giorni di pioggia precedenti.

Per tale ragione, la rete di monitoraggio è stata dotata di sensori capacitivi WaterScout per la misura del contenuto d'acqua che appaiono essere particolarmente adatti per il monitoraggio di aree in frana, permettendo installazioni multiple.

Particolare attenzione deve essere dedicata all'installazione della rete di monitoraggio e alla taratura della sensoristica.

La presente memoria descrive brevemente l'attività sperimentale che è stata condotta e che è tuttora in corso. Le misure di contenuto d'acqua nel terreno, finora effettuate dalle reti di monitoraggio recentemente installate devono essere ancora debitamente trattate e interpretate, ma risultano promettenti.

Il monitoraggio del contenuto d'acqua nel terreno, può rivelarsi utile anche per analizzare le condizioni di umidità del terreno immediatamente dopo le emergenze. Si ritiene dunque che il sistema LAMP sia un utile strumento per l'analisi e la previsione dei dissesti franosi e possa essere di reale supporto alla gestione delle emergenze.

BIBLIOGRAFIA

- Alvioli, M., and Baum, R. L., 2016. Parallelization of the TRIGRS model for rainfall-induced landslides using the message passing interface: *Environmental Modeling & Software*, v. 81, pp. 122 - 135, doi: 10.1016/j.envsoft.2016.04.002.
- Baum, R. L., Savage, W. Z., & Godt, J. W. (2008). TRIGRS-A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis, version 2.0 (No. 2008-1159). US Geological Survey.
- Baum, R. L., Savage, W. Z., & Godt, J. W. (2002). TRIGRS-A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis, US geological survey open-file report, 424, 38.
- Bovolenta, R., Passalacqua, R., Federici, B. (2018). Precipitazioni e dissesto franoso: esperienze nell'ambito di un programma europeo di cooperazione transfrontaliera fra Italia e Francia, Genova, 4-6 luglio 2018. IARG 2018.
- Bovolenta, R., Passalacqua, R., Federici, B., Sguerso, D. (2016). LAMP-LAndslide Monitoring and Predicting for the analysis of landslide susceptibility triggered by rainfall events, pp.517-522, in *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice* - ISBN:9781138029880.
- Campora, M., Palla, A., Gnecco, I., Bovolenta, R., & Passalacqua, R. (2020). The laboratory calibration of a soil moisture capacitance probe in sandy soils, *Soil and Water Research*, 15(2), pp. 75-84.
- Crosta, G. B. and Frattini, P.: Distributed modelling of shallow landslides triggered by intense rainfall, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 3, pp. 81-93, <https://doi.org/10.5194/nhess-3-81-2003>, 2003.
- De Carterer, R., Buzzi, O., Fityus, S. (2013). Installation, calibration and application of dielectric sensors in laboratory studies of compacted unsaturated granular materials, *Geotechnical Testing Journal*, 36, n 5, pp. 1-12.
- Federici, B., Bovolenta, R., & Passalacqua, R. (2015). From rainfall to slope instability: an automatic GIS procedure for susceptibility analyses over wide areas, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 6(5-7), pp. 454-472.
- Ferrando L., Federici B., Sguerso D. (2018). 2D PWV monitoring of a wide and orographically complex area with a low dense GNSS network. *Earth, Planets and Space*, pp. 1-21, <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0824-6> <http://rdcu.be/KAge>
- Iverson, Richard. (2000). Iverson, R.M.: Landslide triggering by rain infiltration, *Water Resour. Res.* 36, pp. 1897-1910. Water Resources Research.
- Montrasio, L., & Valentino, R. (2008). A model for triggering mechanisms of shallow landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8(5), pp. 1149-1159.
- Passalacqua, R., Bovolenta, R., Spallarossa D., De Ferrari, R. (2013). Geophysical site characterization for a large landslide 3-D modelling, *Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4 - Proceedings of the 4th International Conference on Site Characterization 4, ISC-4*, pp. 1765-1771.
- Passalacqua, R., Bovolenta, R., Federici, B. (2015). An integrated hydrological-geotechnical model in GIS for the analysis and prediction of large-scale landslides triggered by rainfall events, *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 2: Landslide Processes*, pp. 1799-1803.
- Passalacqua, R., Bovolenta, R., Federici, B., & Balestrero, D. (2016). A physical model to assess landslide susceptibility on large areas: recent developments and next improvements, *Procedia Engineering*, 158, pp. 487-492.
- Sentek Technologies, Inc. (2011). Calibration manual for Sentek soil moisture sensors, Version 2.0, Sentek Sensor Technologies, Stepney, SA, Australia.
- Skempton, A.W., DeLory, F.A. (1957). Stability of natural slopes in London Clay, in: *Proc. 4th Int. Conf. on Soil Mechanics & Foundation Engineering*, vol. 2, 378-381.
- Sguerso D., Labbouz L., Walpersdorf A. (2016). 14 years of GPS tropospheric delays in the French-Italian border re-gion: comparisons and first application in a case study, *Applied Geomatics*, DOI 10.1007/s12518-015-0158-z, ed. Springer Verlag, Online ISSN 1866-928X, pp. 13-25.
- Soil Conservation Service (1972). *Hydrology*, in: *National Engineering Handbook*, sec. 4, U.S. Dept. of Agriculture, Washington D.C.
- Soil Conservation Service (1975). *Urban hydrology for small watersheds*, Tech. Ref. No. 55, U.S. Dept. of Agriculture, Washington D.C.
- Spectrum Technologies, Inc. (2015). *Retriever & Pup Wireless Network: Product Manual*. Spectrum Technologies, Inc., Thayer Court Aurora, IL.
- Spectrum Technologies, Inc. (2015). *Soil Sensor Reader: Product Manual*. Spectrum Technologies, Inc., Thayer Court Aurora, IL.
- Spectrum Technologies, Inc. (2015). *Waterscout SM100 Soil Moisture Sensor: Product Manual*, Spectrum Technologies, Inc., Thayer Court Aurora, IL.
- Tarantino, A., Pozzato, A. (2008). Strumenti per il monitoraggio della zona non satura, *Rivista Italiana di Geotecnica*, Vol. 3, pp. 109-125.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia calorosamente il personale tecnico del Laboratorio di Strutture e Geotecnica del DICCA (Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale) della Scuola Politecnica di Genova per il continuo contributo fornito alle attività sperimentali.

Un doveroso ringraziamento va ai Proff. Roberto Passalacqua e Bianca Federici che hanno collaborato a tutte le fasi del progetto AD-VITAM.

ABSTRACT

LANDSLIDE MONITORING BY A SENSOR NETWORK: A FOCUS ON THE SOIL WATER MOISTURE MEASUREMENT

Keywords: landslides, monitoring network, forecast, soil moisture

Most of the Italian territory is subject to landslides and therefore the possibility of using low-cost sensors for widespread monitoring networks is particularly attractive, provided that the sensors are characterized by satisfactory accuracy and precision, low cost and good compatibility with the acquisition systems.

Within the ALCOTRA AD-VITAM project, the University of Genoa has developed a system, called LAMP, for the analysis and forecasting of landslides triggered by rainfalls.

LAMP adopts a physically based model, which integrates the hydrological and geotechnical modeling. Temperature and soil moisture sensors are used to feed the model, in addition to rain data obtained

by rain gauges or meteorological radars. Moreover, GNSS receivers are arranged on the ground level.

The final products of the model are landslide susceptibility maps in case of measured or forecasted rainfalls.

With particular reference to soil water moisture measurements, this paper describes the installation phases of the monitoring network and the sensor calibration.

The first soil moisture values detected by the wireless sensor networks installed in two of the AD-VI-TAM sites are shown in the paper.

LAMP may furnish a real support to a better protection of both the natural and the urbanized environments, allowing site-specific warnings and a better hydro-geological risk management capacity.