

# INFILTRAZIONE EFFICACE E PIEZOMETRIA NEGLI ACQUIFERI INCLINATI

A cura di L. Colombo, C. Rampolla P., Gattinoni e V. Francani

[loris.colombo@polimi.it](mailto:loris.colombo@polimi.it)

[carla.rampolla@gmail.com](mailto:carla.rampolla@gmail.com)

[paola.gattinoni@polimi.it](mailto:paola.gattinoni@polimi.it)

[vincenzo.francani@polimi.it](mailto:vincenzo.francani@polimi.it)

## Indice

ABSTRACT .....	1
1 PREMESSA .....	2
2 AQUIFERO ORIZZONTALE .....	3
2.1 VARIAZIONI DEI GRADIENTI IN CONDIZIONI DI ELEVATA INFILTRAZIONE.....	4
2.2.1 CASO 1 .....	5
2.2.1 CASO 2 .....	6
2.2.1 CASO 3 .....	8
3 CONCLUSIONI .....	10
BIBLIOGRAFIA .....	10

## 1. ABSTRACT

Le reti di monitoraggio delle frane sono dotate di piezometri e pluviometri, che permettono di seguire sia l'evento pluviometrico sia l'evoluzione della piezometria in tempo reale. Gli studi finora compiuti evidenziano che dalla pluviometria è possibile ricavare l'infiltrazione efficace sulla base di sperimentazioni in loco; la letteratura dimostra che, mettendo in relazione i dati di infiltrazione con il sollevamento della falda, si ricava che tale rapporto è tendenzialmente lineare quanto meno negli acquiferi a substrato orizzontale.

Si sono quindi eseguite simulazioni tanto per verificare che tale rapporto diretto sussiste anche per acquiferi a substrato inclinato, quanto per controllare se questa relazione è uniforme su tutta l'estensione dell'acquifero o se vi sono variazioni dovute ad esempio ai cambiamenti di trasmissività.

L'identificazione di una relazione semplice fra sollevamento della falda e infiltrazione permette di conoscere con anticipo le condizioni di pericolo che possono verificarsi su un versante franoso in base all'entità di pioggia prevista; pertanto si è ritenuto utile presentare

alcune considerazioni e una discussione sulla possibilità di utilizzare la pluviometria per risalire alle variazioni piezometriche degli acquiferi nelle aree in frana.

## **2. PREMESSA**

L'infiltrazione nelle aree franose è notoriamente un elemento fondamentale della stabilità dei versanti, ed è pertanto oggetto di analisi e monitoraggio, e la disposizione nello spazio della superficie piezometrica (soprattutto i gradienti idraulici e la soggiacenza) sono oggetto di indagine e di controllo in continuo, in quanto è ormai ben certo che una ridotta profondità del livello di falda rispetto al piano campagna e accentuate cadenti piezometriche favoriscono l'accelerazione dei dissesti.

Tener conto ed elaborare i dati dei livelli piezometrici confrontandoli con quelli delle precipitazioni nella fase iniziale degli eventi pluviometrici, permette di prevedere le deformazioni della superficie piezometrica nei diversi punti della frana. Infatti, se si dispone di una relazione semplice e sufficientemente approssimata fra altezza di pioggia e sollevamento piezometrico, si può estrapolare da questi primi dati qualche indicazione utile per prevedere l'evolversi della soggiacenza e dei gradienti in corrispondenza dei settori più instabili della frana. Una relazione di questo tipo non può che essere semplificativa, in quanto non può tener conto con esattezza di fattori da valutare sul campo luogo per luogo.

Ad esempio è noto che, con gli elevati gradienti che si instaurano nei corpi franosi, viene facilmente superata la velocità critica per la quale il flusso non avviene più con moto laminare, e la falda si muove con velocità data da una relazione del tipo:

$$v = \frac{kj^n}{m_e}$$

in cui  $n$  rappresenta un valore inferiore all'unità e uguale o superiore a 0.5, mentre  $m_e$  indica la porosità efficace e  $k$  la conducibilità idraulica. In condizioni di moto non laminare, non è più applicabile integralmente la relazione di Darcy sulla quale sono basate sia le relazioni analitiche che forniscono il rapporto infiltrazione/sollevamento piezometrico sia le elaborazioni numeriche.

Le velocità reali possono essere stimate solo sperimentalmente, conoscendo la litologia e la granulometria dei terreni interessati anche attraverso sperimentazioni in sito. Si ritiene peraltro che possa essere un contributo interessante la presentazione di una relazione orientativa che presenti questa approssimazione, e in questo lavoro si desidera esporre i criteri applicabili per ottenerla, in base a quanto suggerito dalla letteratura.

### 3. ACQUIFERO ORIZZONTALE

Se l'acquifero è suborizzontale, l'infiltrazione produce un'alterazione della piezometria, secondo relazioni note dalla letteratura. Infatti, quando lo strato acquifero libero ha spessore costante abbiamo:

$$q = kh \left( \frac{dh}{dx} \right) = r$$
$$h^2 - h'^2 = \frac{2r(L-x)}{k}$$

misurando x e L a partire dal limite superiore impermeabile in cui x = 0 si ottiene:

$$h'^2 = h''^2 + \frac{2rL}{k}$$
$$r = \frac{k(h'^2 - h''^2)}{2L}$$

Ma l'inclinazione della superficie piezometrica cambia rispetto all'andamento normale.

$$h''^2 = h'^2 - \frac{2rL}{k}$$

se y è una quota intermedia:

$$y^2 = h'^2 - \frac{2rx}{k} = h''^2 + 2r(L-x) \quad (1)$$

Quando l'acquifero ha uno spessore elevato, la relazione può ulteriormente essere semplificata sostituendo al valore  $(y+h'')/2$  lo spessore medio dell'acquifero b. Si osserva che, se le quote h' e h'' sono fisse e se varia l'infiltrazione, la relazione (1) si può scrivere esplicitando y:

$$y^2 - h''^2 = 2r(L-x)$$
$$(y+h'')(y-h'') = 2r(L-x)$$

Da questa equazioni si calcola quindi:

$$b(y-h'') = r(L-x)$$
$$by = r(L-x) + bh''$$
$$y = r \left( \frac{L-x}{b} \right) + h'' \quad (2)$$

Si può concludere che la relazione fra infiltrazione e livello piezometrico può essere scritta, quando il substrato è orizzontale, come una funzione lineare in cui compaiono due costanti:

$$C' = \frac{(L-x)}{b}$$

$$C'' = h''$$

Quindi

$$y = C'r + C''$$

### 3.1. VARIAZIONE DEI GRADIENTI IN CONDIZIONI DI ELEVATA INFILTRAZIONE

L'incremento di infiltrazione può modificare sensibilmente le condizioni descritte. In particolare, per valori diversi dell'infiltrazione, la superficie piezometrica assume gradienti diversi, cambiando quindi la velocità di flusso. Se l'acquifero è posto su un substrato inclinato, la distribuzione dei gradienti piezometrici può cambiare anche in questo caso, in particolare se cambiano i valori delle trasmissività.

In particolare Werner (1957) ha stabilito una relazione che, partendo da quella del substrato orizzontale, perviene alla determinazione della superficie piezometrica con substrato inclinato in condizioni di regime stazionario con infiltrazione uniforme su tutta l'area di frana. Detta  $z$  l'altezza della superficie piezometrica rispetto a una superficie di riferimento orizzontale, secondo Werner si ha la possibilità di calcolare l'altezza piezometrica  $y$  dalla relazione:

$$y^2 = z_1^2 + \left( \frac{2w/kj}{h_0} \right) F1(ax)$$

dove  $F1(ax)$  vale:

$$x - L \left[ \exp\left(\frac{j}{h_0}\right) - 1 \right] / \left[ \exp\left(\frac{jL}{h_0}\right) \right]$$

$z_1$  è il valore di  $y$  in assenza di ricarica,  $h_0$  rappresenta invece l'altezza piezometrica che si avrebbe se il profilo piezometrico si mantenesse parallelo al substrato.

Il valore  $h_0$  assume il nome di altezza piezometrica normale, ed è dato dalla relazione:

$$h_0 = z - ix$$

Si osserva che queste relazioni indicano che la linearità del rapporto fra infiltrazione e altezza piezometrica viene meno quando l'infiltrazione è molto elevata e le variazioni del gradiente idraulico sono accentuate. Per verificare quali siano le condizioni capaci di determinare un rapporto non lineare fra infiltrazione e altezza piezometrica, sono state effettuate alcune simulazioni con diverse strutture geologiche.

Si sono simulate le piezometrie in acquiferi formati da celle prismatiche di larghezza e lunghezza pari a 200 m, e spessore di 10 m,  $r$  varia da zero a  $5 \cdot 10^{-3}$  mm/s per ogni cella di superficie  $4000 \text{ m}^2$  (10m di spessore per 100 di larghezza per 100 di lunghezza).

L'infiltrazione efficace, come si nota, è stata tenuta su valori molto elevati, in quanto  $0.004 \text{ mm/s}$  su  $4000 \text{ m}^2$  corrisponde a un'infiltrazione di circa  $85 \text{ mm/giorno}$ , per poter simulare con maggiore dettaglio le variazioni piezometriche.

Sono quindi stati fatti diversi esempi dell'evolversi della piezometria in regime stazionario con l'aumentare dell'infiltrazione, variando la struttura geologica per verificare quali siano le strutture geologiche che sono in grado di dar luogo più facilmente a incrementi rilevanti e localizzati del gradiente idraulico.

### 3.1.1. Caso 1

Si osserva che il livello piezometrico nei punti 1,3, 5, aumenta linearmente con l'infiltrazione. I grafici riportati dimostrano che, pur variando la  $T$  in ogni punto si verifica un aumento lineare con diverso coefficiente angolare.

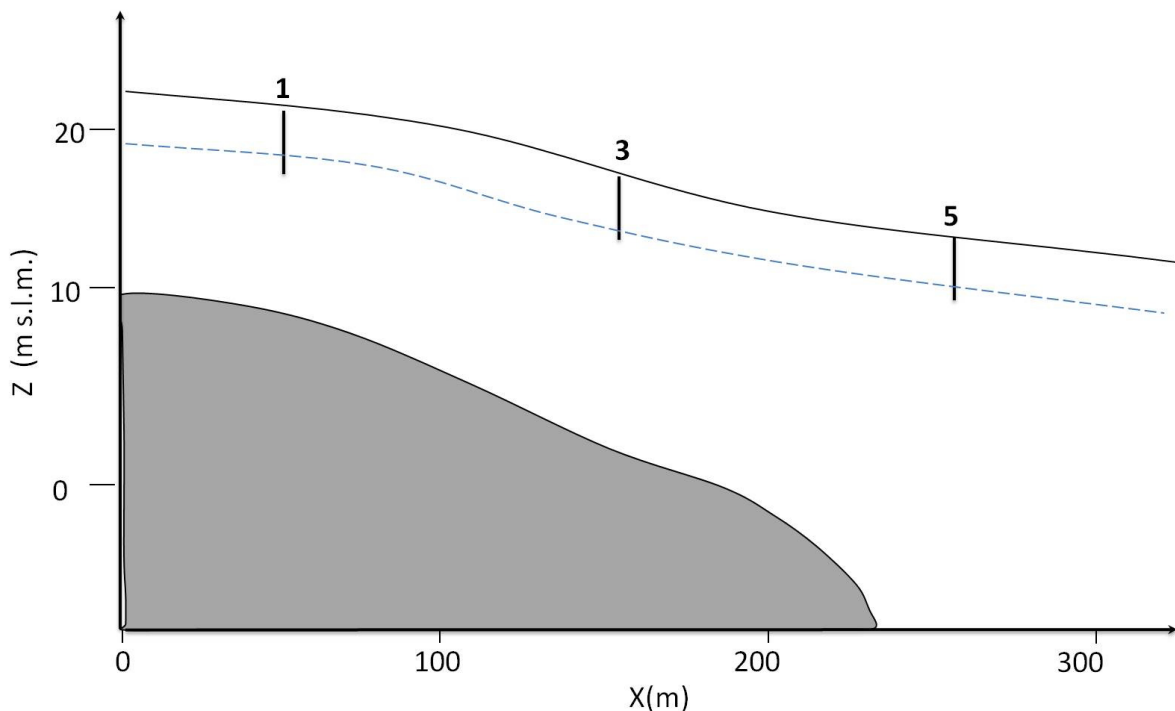


Figura 1: sezione semplificata del corpo di frana: Lo spessore nei punti 1 è 20 m, e la  $T = 0,004 \text{ mq/s}$ . La  $T$  aumenta verso valle mentre rimane identica la permeabilità. Nel punto 5 è di  $0,008 \text{ mq/s}$ .

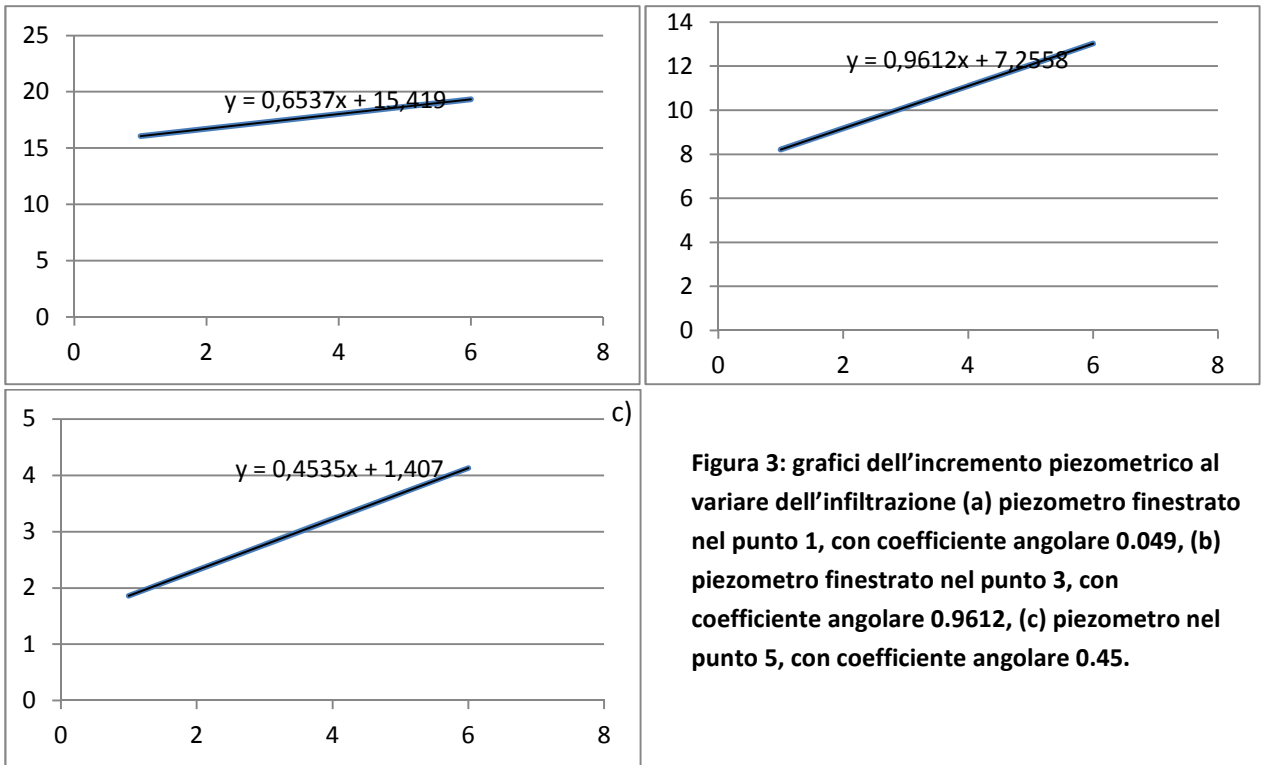


Figura 3: grafici dell'incremento piezometrico al variare dell'infiltrazione (a) piezometro finestrato nel punto 1, con coefficiente angolare 0.049, (b) piezometro finestrato nel punto 3, con coefficiente angolare 0.9612, (c) piezometro nel punto 5, con coefficiente angolare 0.45.

### 3.1.2. Caso 2

Quando il substrato ha forma meno regolare, e la T tende a ridursi da monte a valle l'incremento piezometrico rimane sempre una funzione lineare dell'infiltrazione, ma si ha una consistente deformazione della superficie piezometrica in corrispondenza delle sezioni più ristrette.

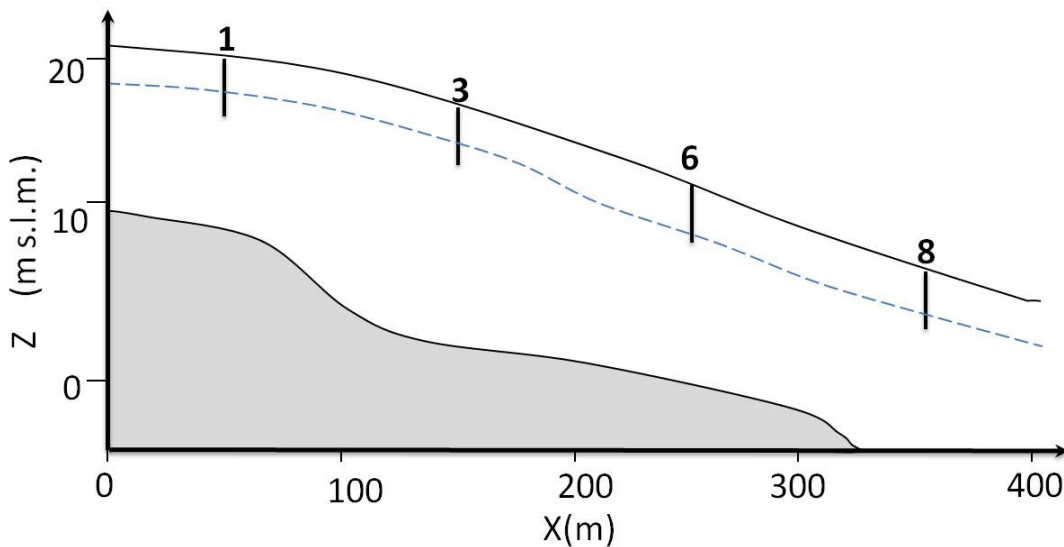


Figura 4: l'alimentazione è posta a quota piezometrica 20 m, il recapito a 2 m. La lunghezza del corpo franoso è di 400 m, r varia da zero a  $5 \cdot 10^{-6}$  mm/s per ogni cella di superficie  $1000 \text{ m}^2$  (10m di spessore per 100 di larghezza per 100 di lunghezza)

Con infiltrazione efficace crescente da 10 E-6 a 5-10 E-6 mm/s, la risalita piezometrica è lineare in tutti i punti, come indicato dalla figura 5.

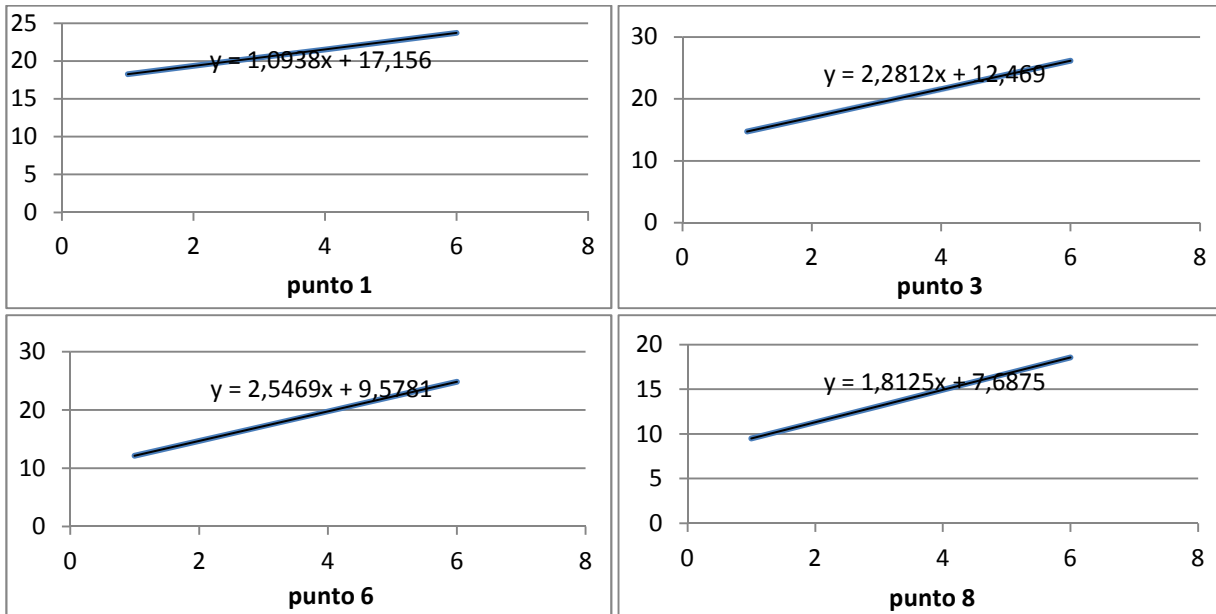


Figura 5: risalita piezometrica ne: (a) punto 1 (b) punto 3 (c) punto 6 e (d) punto 8.

E' interessante notare che nel punto 6, dove avviene il restringimento della sezione di flusso, la risalita dei livelli piezometrici è superiore a quella degli altri punti. L'andamento dei profili piezometrici al crescere dell'infiltrazione è dato dalle due figure successive, che mettono a confronto la situazione iniziale (assenza di precipitazioni) con quella con infiltrazione uniforme di 3-10e-6 mm/s. Le figure 6 e 7 mostrano la maggiore risalita nel punto 6, come indicato nei seguenti grafici.

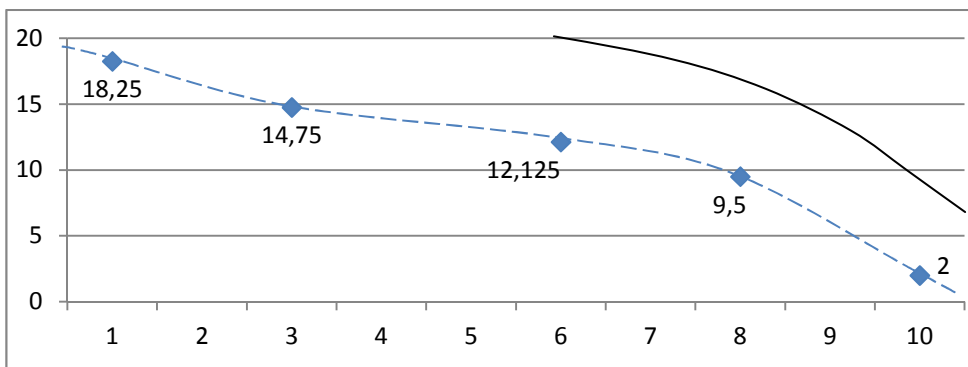


Figura 6: situazione iniziale senza infiltrazione. La linea nera rappresenta il profilo topografico.

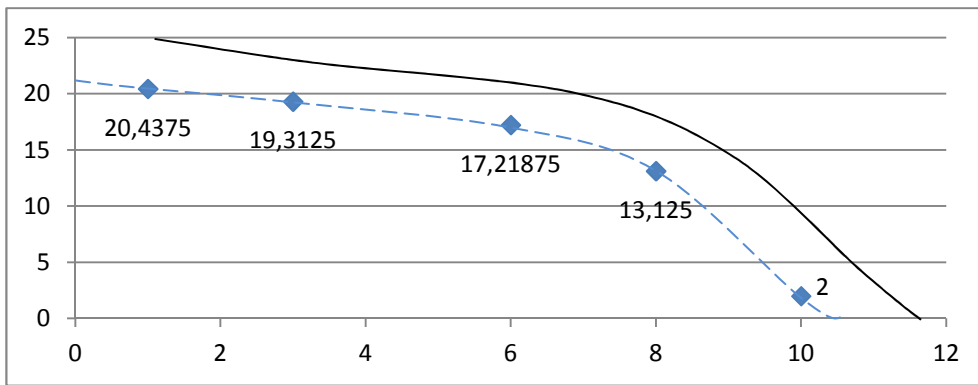


Figura 7: Profilo piezometrico in condizioni stazionarie con 3-10-6 mm/s di infiltrazione

### 3.1.3. Caso 3

Nella simulazione successiva, si sono utilizzate le caratteristiche di un corpo franoso reale, che presenta una rilevante estensione longitudinale (circa 400 m), con una differenza di quota piezometrica fra la zona di alimentazione e quella di recapito valutabile in 18 m, quindi con una cadente piezometrica media molto elevata (9%), simile a quella dei casi precedenti.

La simulazione del flusso idrico ha portato alla constatazione che in questo caso l'incremento dell'altezza piezometrica con l'infiltrazione non è perfettamente lineare. Gli scostamenti dalla linearità non sono tuttavia rilevanti, tanto che il coefficiente di determinazione R2 rimane superiore a 0,96 in ogni punto.

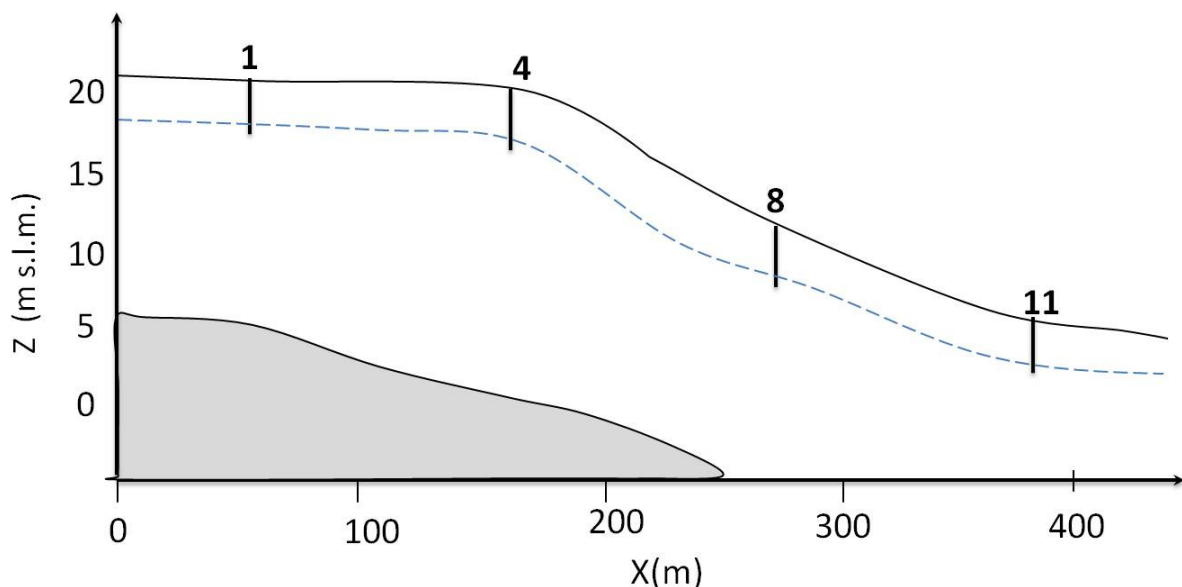


Figura 8 - sezione semplificata del corpo di frana per il caso 3.



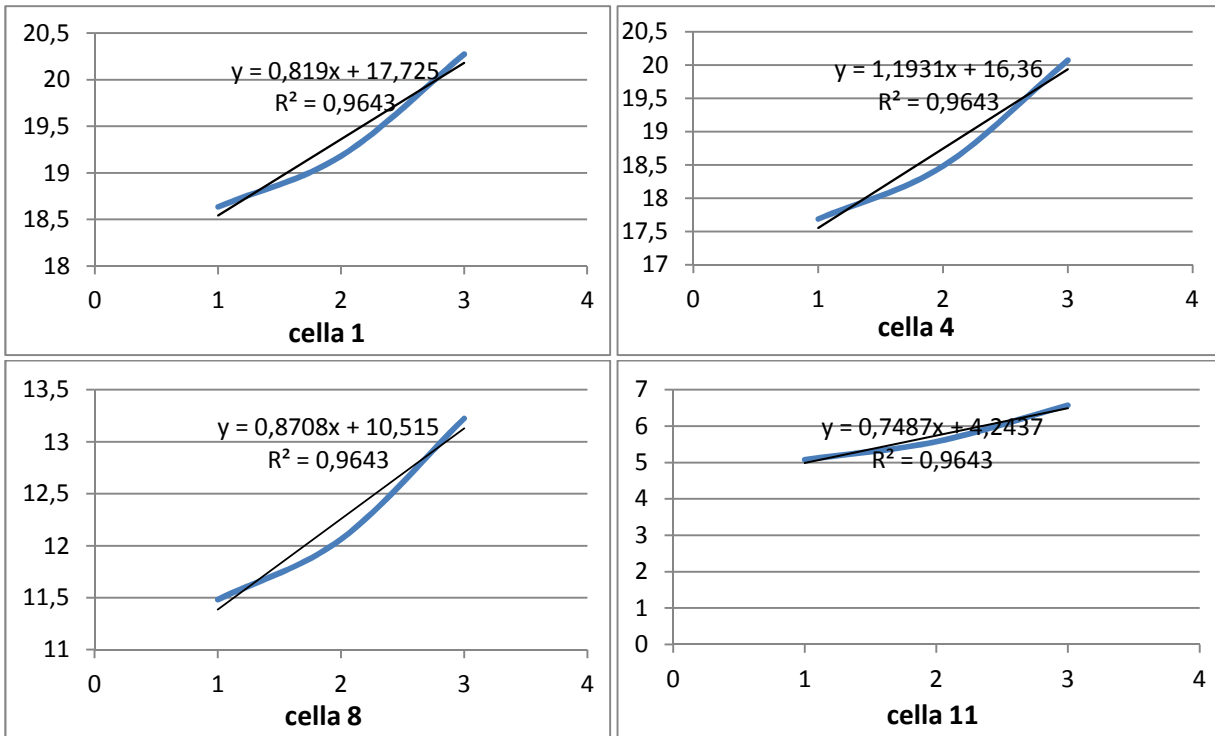


Figura 9 - piezometrie delle diverse celle variando l'infiltrazione da 0,001 a 0,003 mm/s su 4000 m<sup>2</sup>

Nella figura 9 si osservano le variazioni piezometriche e la loro aderenza ad un rapporto quasi costante con l'infiltrazione. La costante additiva nell'espressione di  $y$  è in ogni caso molto prossima al valore di  $y$  per  $x = 0$ . Al fine di valutare l'incidenza dell'aumento dei gradienti sul rapporto piezometria-infiltrazione, si è proceduto ad una simulazione in cui sono stati ridotti i dislivelli piezometrici fra alimentazione e recapito, aumentando a 18 m il livello del recapito nell'ultima simulazione. Si nota come venga confermata la linearità del rapporto infiltrazione-incrementi piezometrici.

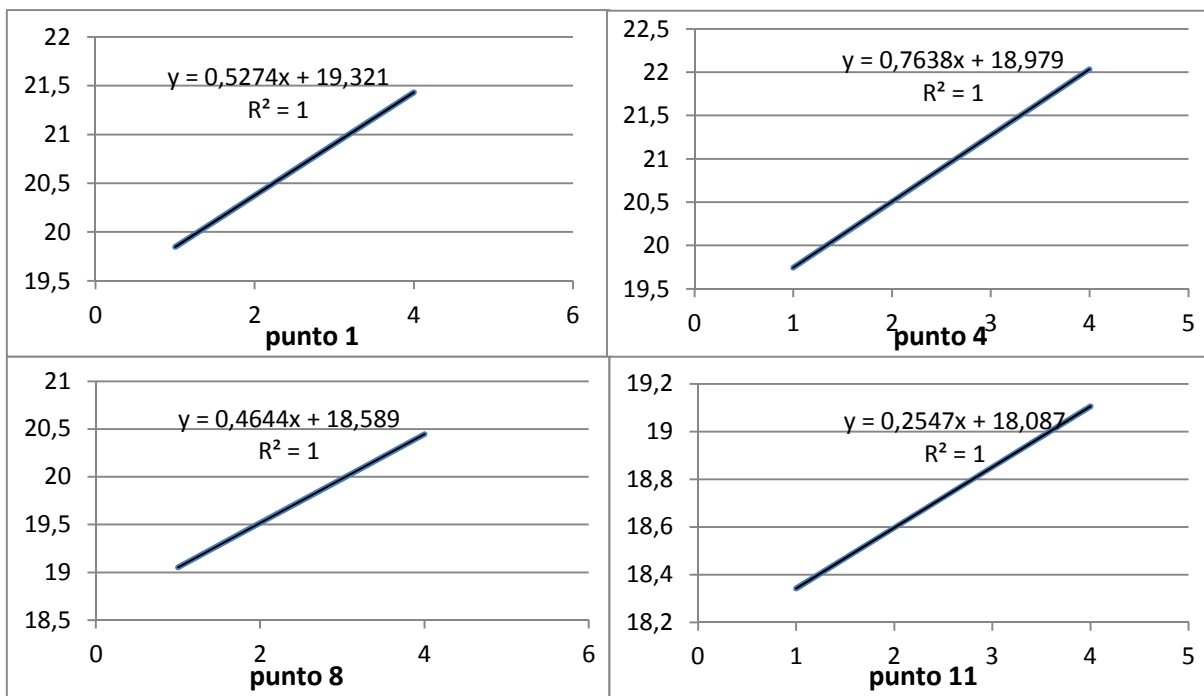


Figura 9 - piezometrie delle diverse celle aumentando a 18 m il livello del recapito

## **4. CONCLUSIONI**

E' stata eseguita una valutazione degli effetti teorici dell'infiltrazione sulla morfologia della superficie piezometrica di un acquifero con substrato inclinato del quale sono note la distribuzione della permeabilità e dello spessore, in condizioni di regime stazionario. Dalle relazioni di letteratura, si ricava che l'incremento del livello piezometrico è in queste condizioni direttamente proporzionale all'infiltrazione in ogni punto dell'acquifero. Si constata invece che tale rapporto è diverso da punto a punto, sia in relazione con la distanza dal recapito dell'acquifero, sia in rapporto con la trasmissività e la forma dell'acquifero.

Dal punto di vista dell'interesse pratico, assume rilevanza il fatto che il rapporto fra livello piezometrico e infiltrazione per diversi valori di pioggia totale risulti dalle simulazioni una costante secondo il punto considerato in condizioni di regime stazionario. Infatti la rilevazione in piezometri di monitoraggio degli effetti di un afflusso meteorico di entità nota può consentire di estrapolare per i punti in cui è avvenuta la misurazione l'entità del sollevamento del livello piezometrico con precipitazioni di entità superiore. Tale valutazione permette di prevedere se vi si possono instaurare condizioni di gradiente critico per la stabilità o per l'erosione sotterranea.

Appare d'altronde importante valutare gli effetti dell'instaurarsi di moti non lineari e le modalità per calcolarne gli effetti sul rapporto infiltrazione- soggiacenza, così da disporre di uno strumento più completo di quello descritto in questo rapporto. I risultati di queste valutazioni teoriche, se dovessero ricevere conferma dalle sperimentazioni in sito, potrebbero fornire così utili indicazioni per la prevenzione dei fenomeni franosi.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Chapman, T. G. (2003), Steady recharge-induced groundwater flow over a plane bed: Nonlinear and linear solutions, in MODSIM 2003 International Congress on Modelling and Simulation, vol. 1, pp. 254–259, Model. and Simul. Soc. of Aust. and N. Z., Townsville, Queensl.
- Evangelos Akylas, Antonis D. Koussis & Athanasios N. Yannacopoulos (2006). Analytical solution of transient flow in a sloping soil layer with recharge, Hydrological Sciences Journal, 51:4, 626-641, DOI: 10.1623/hysj.51.4.626.
- Tofani V., Dapporto S., Vannocci P., and Casagli N. (2006). Infiltration, seepage and slope instability mechanisms during the 20–21 November 2000 rainstorm in Tuscany, central Italy. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 6, 1025-1033, doi:10.5194/nhess-6-1025-2006.
- Werner P.W. (1957) Some problems in non-artesian ground-water flow, Transactions of the American Geophysical Union, 38 (4), 511-518, 1957.

- Wooding, R.A., and T.G. Chapman (1966). Groundwater flow over a sloping impermeable layer. 1. Application of the Dupuit-Forchheimer assumption, *Journal of Geophysical Research*, 71, 2895-2902, 1966.
- Galeandro A., Simunek J., Simeone V. (2013). Analysis of rainfall infiltration effects on the stability of pyroclastic soil veneer affected by vertical drying shrinkage fractures. *Bull Eng Geol Environ* 72:447–455 DOI 10.1007/s10064-013-0492-5
- Minopoli S.,(rel. Ciampo G. e Esposito L. ,2005). Effetti dell'infiltrazione delle acque piovane sulla stabilità dei pendii, con particolare riguardo ai fenomeni d'instabilità che interessano le coltri piroclastiche nell'area urbana della città di Napoli. Tesi di dottorato in scienze della terra, Università degli Studi di Napoli Federico II.