

Heat as a tracer *Il calore come tracciante*

Matteo Cultrera

Department of Geosciences, University of Padua, Italy
matteo.cultrera@gmail.com

Keywords: *heat, tracer, geosciences.*

Parole chiave: calore, tracciante, geoscienze.

La società odierna deve confrontarsi con i delicati sistemi idrogeologici, al fine di preservarli per le generazioni future, soprattutto perché le acque sotterranee rappresentano una risorsa primaria sempre più preziosa. Di conseguenza, lo sfruttamento sostenibile delle acque sotterranee deve necessariamente passare attraverso la protezione degli acquiferi ed una loro appropriata gestione. Strumenti e software supportano le amministrazioni e gli enti preposti nel corso delle attività gestionali e di pianificazione.

È possibile distinguere due categorie principali tra loro strettamente collegate: (1) strumenti di monitoraggio dei sistemi ambientali e (2) strumenti di simulazione e gestione. Il monitoraggio della matrice ambientale permette di raccogliere informazioni dirette dei sistemi acquiferi e dei parametri idrogeologici eventualmente correlati. Il modello concettuale idrogeologico si fonda sulle informazioni raccolte e si concretizza attraverso un codice di calcolo; quest'ultimo permette una più accurata analisi del sistema oggetto di studio.

Per quanto riguarda gli acquiferi, un modello numerico necessita di una serie di dati ed informazioni che possono essere ottenuti mediante prove dirette in falda. Il ricorso a traccianti è una pratica diffusa da moltissimi anni e la bibliografia scientifica offre un'ampia gamma di possibili soluzioni ed applicazioni (Davis et al. 1980).

I traccianti comprendono qualsiasi sostanza che può essere disciolta o sospesa in acqua, ed essere rintracciata o individuata attraverso un campione di acqua o delle misure in punti di osservazione prossimi al punto di sversamento/sorgente. I traccianti possono includere anche sostanze introdotte artificialmente e presenti in natura. Il ricorso ai traccianti nelle acque sotterranee è una pratica diffusa da oltre un secolo, sebbene le applicazioni siano state poco diffuse nell'ambito tecnico-scientifico (Leibundgut 2009). L'interpretazione delle prove con i traccianti fornisce una serie di parametri idrogeologici, quali ad esempio: porosità, coefficienti di dispersività, velocità delle acque sotterranee (Broermann et al. 1997).

Le prove con traccianti possono essere suddivise all'interno delle seguenti categorie (Kaas, 1998): traccianti artificiali; traccianti ottici; test quantitativi; traccianti naturali.

La scelta del tracciante va ponderata considerando sia le proprietà del tracciante stesso che del mezzo – poroso o fratturato che sia – all'interno del quale il tracciante si muove (Tazioli and Palpacelli 2013).

Il tracciante ideale dovrebbe possedere alcune caratteristiche particolari, quali ad esempio (a) non modificare le proprietà dell'acqua; (b) non modificare le proprietà della matrice

solida; (c) non degradabile; (d) atossico ed inerte per l'ambiente; (e) di impiego semplice; (f) facilmente rilevabile; (g) economico. Risulta evidente che non esiste alcun tracciante in grado di rispecchiare tutte le caratteristiche sopra enunciate (Davis et al. 1980).

La diffusione dei sistemi di geoscambio a circuito chiuso, ha favorito in tempi più recenti il ricorso al calore tracciante nei test idrogeologici. Dal punto di vista matematico, molti autori hanno evidenziato diverse analogie relativamente alle soluzioni matematiche che descrivono il trasporto di soluti e quelle relative al trasporto del calore (Reed and Reddell 1980; Anderson 2005; Banks et al. 2014; Irvine et al. 2015).

In particolare, l'equazione di avvezione e diffusione (eq. 1) descrive le modalità con cui la concentrazione di un soluto C (kg/m^3) si muove all'interno di un acquifero. Il primo termine è legato al trasporto di massa per diffusione, il secondo si riferisce al trasporto di massa per avvezione ed infine il terzo rapporto suggerisce eventuali sorgenti o reazioni chimiche nel sistema (Domenico and Schwartz 1998):

$$D_x \frac{\delta^2 C}{\delta x^2} - v_x \frac{\delta C}{\delta x} \pm \frac{r}{n} = \frac{\delta C}{\delta t} \quad (1)$$

in cui D_x rappresenta la dispersione idrodinamica nella direzione x (m^2/s), v_x la velocità reale (m/s) e t è il tempo (s).

Considerando una matrice isotropa ed omogenea, in condizioni di equilibrio termico tra il mezzo poroso e i fluidi interstiziali, la variazione della temperatura dell'equazione di conduzione-convezione può essere descritto nella forma unidimensionale come (Domenico and Schwartz 1998):

$$\frac{k_e}{\rho_s c_s} \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} - \frac{\eta p_f c_f}{\rho_s c_s} v_x \frac{\delta T}{\delta x} \pm S = \frac{\delta T}{\delta t} \quad (2)$$

dove k_e è il termine che descrive la conducibilità termica della matrice solida, il prodotto $\rho_s c_s$ è la capacità volumetrica, la quale è funzione della densità ρ_s e della sua capacità termica specifica c_s in condizioni di volume costante. Il termine S rappresenta eventuali sorgenti o perdite di calore (Irvine et al. 2015).

L'analogia tra l'equazione 1 del trasporto del soluto e dell'equazione 2 relativa al trasporto del calore è evidente. Ne deriva che l'approccio sia fisico che matematico sono assimilabili nei due casi e - pertanto - gli idrogeologi possono facilmente applicare il trasporto del calore in sostituzione dei traccianti tradizionali (Anderson 2005).

Il vantaggio del ricorso al calore come tracciante è indiscutibile, in quanto è possibile effettuare test di tracciamento con costi contenuti, evitando al tempo stesso l'utilizzo di traccianti spesso poco tollerati dalla normativa ambientale. Inoltre, rilevare le variazioni di temperatura in continuo è una prassi relativamente semplice, soprattutto grazie alla diffusione sempre più a larga scala dei dispositivi a fibre ottiche.

Tra le possibili applicazioni relative al calore come tracciante, si ricorda il ricorso alle strumentazioni utilizzate per i GRT, acronimo di Ground Response Test (Bakker et al. 2015). Tali apparati consentono di controllare le potenze scambiate con il sottosuolo, le temperature di entrata ed in uscita, il calore trasferito nell'acquifero.

I codici di calcolo diffusi sia a livello commerciale che scientifico consentono di simulare le prove in situ con modelli matematici, come nel caso di figura 1. In questo senso, un modello numerico calibrato ed opportunamente validato rappresenta un valido strumento di supporto per i gestori delle acque sotterranee.

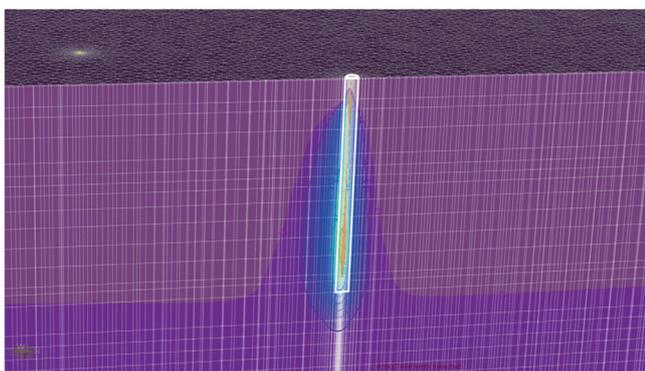


Fig.1: Simulazione del trasporto termico in un sistema multifalda mediante modellazione numerica.

I dati sperimentali possono essere acquisiti direttamente nel foro di prova o - preferibilmente - attraverso un punto di monitoraggio ubicato in prossimità del punto d'indagine. Analogamente alle prove con i traccianti tradizionali, è preferibile ricorrere ad un punto di monitoraggio prossimo al punto di immissione del segnale termico, sebbene spesso i test con traccianti (compreso il calore) possano essere realizzati su pozzo singolo (Leap and Kaplan 1993; Riemann et al. 2002; van Tonder et al. 2002). Il ricorso ad uno o più punti di monitoraggio permette di minimizzare gli errori imputabili ai processi avvertivi che si innescano a causa delle differenze di temperature nell'intorno della sonda per il GRT. La variazione della temperatura dell'acquifero induce anche una variazione di densità e di viscosità dell'acqua, modificando di fatto anche la conducibilità intrinseca e - di conseguenza - della conducibilità idraulica dei mezzi porosi. Tali variazioni sono generalmente trascurabili ed il loro impatto può essere eventualmente valutato mediante una analisi di sensitività.

BIBLIOGRAFIA

- Anderson MP (2005). Heat as a Ground Water Tracer. *Ground Water* 43:951-968. doi: 10.1111/j.1745-6584.2005.00052.x
- Bakker M, Caljé R, Schaars F, et al (2015). An active heat tracer experiment to determine groundwater velocities using fiber optic cables installed with direct push equipment: heat tracer experiments with vertical fiber optic cables. *Water Resour Res* 51:2760-2772. doi: 10.1002/2014WR016632
- Banks EW, Shanfield MA, Cook PG (2014). Induced Temperature Gradients to Examine Groundwater Flowpaths in Open Boreholes. *Groundwater* 52:943-951. doi: 10.1111/gwat.12157
- Broermann J, Bassett R, Weeks EP, Borgstrom M (1997). Estimation of α_L , Velocity, K_d and Confidence Limits from Tracer Injection Test Data. *Ground Water* 35:1066-1076. doi: 10.1111/j.1745-6584.1997.tb00179.x
- Davis SN, Thompson GM, Bentrley HW, Stiles G (1980). Ground-Water Tracers - A Short Review. *Ground Water* 18:10.
- Domenico PA, Schwartz FW (1998). *Physical and Chemical Hydrogeology*. John Wiley & Son, Inc.
- Irvine DJ, Simmons CT, Werner AD, Graf T (2015). Heat and Solute Tracers: How Do They Compare in Heterogeneous Aquifers? *Groundwater* 53:10-20. doi: 10.1111/gwat.12146
- Kaas W (1998). *Tracing Technique in Geohydrology*. CRC Press
- Leap DI, Kaplan PG (1993). A Single Well Tracing Method for Estimating Regional Advective Velocity in a Confined Aquifer: Theory and Preliminary Laboratory Verification. *Water Resour Res* 24:6.
- Leibundgut C (2009). *Tracers in hydrology*. Wiley-Blackwell, Chichester, UK; Hoboken, NJ
- Reed DB, Reddell DL (1980). *Heat Transport in Groundwater Systems-Laboratory Model*. Texas Water Resources Institute
- Riemann K, van Tonder G, Dzanga P (2002). Interpretation of single-well tracer tests using fractional-flow dimensions. Part 2: A case study. *Hydrogeol J* 10:357-367.
- Tazioli A, Palpacelli S (2013). Scelta del tracciante ideale per indagini idrogeologiche: risultati preliminari da test in laboratorio.
- Van Tonder G, Riemann K, Dennis I (2002). Interpretation of single-well tracer tests using fractional-flow dimensions. Part 1: Theory and mathematical models. *Hydrogeol J* 10:351-356. doi: 10.1007/s10040-002-0198-4