

LA VULNERABILITA' INTRISECA DI UN ACQUIFERO AD UN INQUINANTE VALUTATA COL METODO TOT (Luigi Fanizzi - ECOACQUE®)

La vulnerabilità intrinseca (cioè naturale) degli acquiferi alla contaminazione di sostanze inquinanti è "la specifica suscettibilità dei sistemi acquiferi, nelle loro varie parti e nei vari assetti geometrici ed idrodinamici, ad ingerire e diffondere contaminanti fluidi e/o idrovettoriali, il cui impatto, sulla qualità delle acque sotterranee, è funzione dello spazio e del tempo" (M. Civita, 1994). La vulnerabilità intrinseca dipende da tre fattori principali:

- 1) Il processo di ingestione e il tempo di percorrenza dell'acqua (e/o di un fluido contaminante) attraverso una zona insatura fino alla sottostante zona satura del sistema acquifero;
- 2) La dinamica del flusso delle acque sotterranee (e/o di un fluido contaminante) nella zona satura;
- 3) La concentrazione residua del contaminante al raggiungimento della zona satura, rispetto alla concentrazione originaria, che indica la capacità di attenuazione dell'acquifero dell'impatto del contaminante.

I fattori precedentemente citati dipendono a loro volta dalle diverse possibili sinergie di più parametri di natura idrogeologica e antropica, e che sono quindi soggetti a variazione in ciascuna area. Il processo di attenuazione che avviene all'interno di un sistema acquifero (cioè suolo + zona insatura + zona satura) quando riceve un contaminante (fluido e/o acqua veicolata) dipende dalle proprietà e dalla concentrazione primaria di ciascun contaminante ma anche dalla reattività del sistema, che può essere ridotto o, a lungo termine, completamente esaurito nel tempo. Durante il viaggio sotterraneo avvengono molte interazioni tra suolo, sottosuolo, acque sotterranee e contaminanti, il risultato complessivo è un'attenuazione dell'impatto del contaminante. Un ulteriore effetto di smorzamento, sicuramente non trascurabile, avviene in quanto la concentrazione residua del contaminante si diluisce, nella zona di saturazione, in misura minore, a causa della velocità del flusso, della portata unitaria e della dispersione idrodinamica. Da quanto si è visto, in molte aree dove è necessario coprire vaste aree individuate da confini amministrativi (cioè Comuni, Province, Regioni) o fisici (spartiacque interregionale) con una Mappa della Vulnerabilità, i modelli parametrici che sono stati impostati non possono essere applicati per mancanza di dati in quei punti in cui il terreno cambia da una morfologia di pianura ad una zona collinare o montana. In queste situazioni, in passato, si è scelto un metodo semplice, in grado di effettuare una valutazione meno raffinata e dettagliata, ma che però è stato applicato con buoni risultati a molte problematiche del territorio e dell'ambiente legate alla contaminazione delle falde acquifere. La soluzione che è stata trovata per questo problema e che è stata testata è l'approccio combinato. Questo approccio permette di combinare il Metodo **GOD** (L. Fanizzi, 2021) con il Metodo **TOT** senza soluzioni di continuità. Il metodo del **Tempo di arrivo** o di **transito**, cd **TOT** (acronimo di Time Of Travel) è stato elaborato alla fine degli anni settanta da una Commissione della Comunità Europea (*Commission of European Community - Division XI*) nell'ambito di un Programma di Ricerca avente come obiettivo la cartografia della qualità delle risorse idriche. Tale metodologia si basa sulla valutazione del tempo impiegato da un inquinante, con un comportamento simile all'acqua, a percorrere la distanza tra la superficie del suolo e la falda idrica sotterranea. Questo periodo, definito "tempo di arrivo", può essere calcolato facendo riferimento alla Legge di Darcy (Enrico Destefanis et Al., 2005):

$$Q = K \cdot A \cdot J$$

dove:

Q = portata della falda [m³/s];

A = sezione di acquifero attraversata dal flusso [m²];

J = gradiente idraulico [m/m];

K = conducibilità idraulica del mezzo [m/s].

La portata specifica, cioè la portata per unità di superficie attraversata, è pari a:

$$Q/A = v = K \cdot J$$

e ha le dimensioni di una velocità [m/s]; infatti è anche chiamata *velocità Darcyana*. In realtà, il flusso idrico non attraversa tutta la sezione considerata (costituita anche dai granuli), ma solo la parte relativa ai vuoti capaci di far fluire l'acqua sotto la forza di gravità (Cfr. Fig.1)

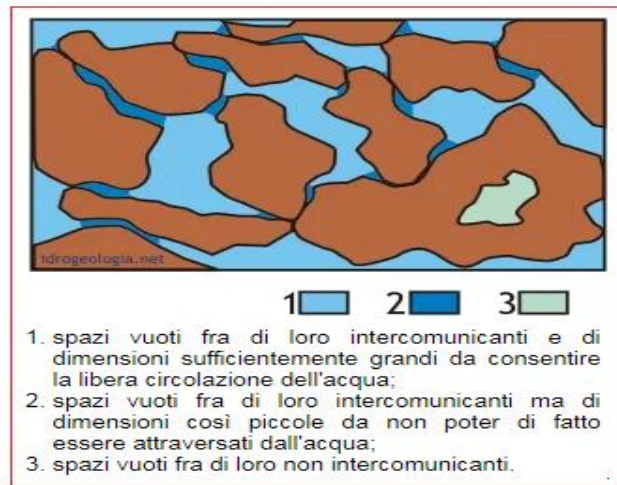


Fig. 1 – Tipologia di vuoti interessanti il terreno.

La velocità effettiva dell'acqua si trova, quindi, dividendo la *velocità Darcyana* per la porosità efficace n_e .

$$v_e = v/n_e = K \cdot J/n_e$$

Si applica ad ogni strato della zona non satura la relazione:

$$\text{velocità} = \text{spazio} / \text{tempo}$$

per cui consegue

$$v_e = K \cdot J/n_e = b/t$$

dove:

b = spessore dello strato [m];

e, risolvendo in funzione del tempo:

$$t = b \cdot n_e / K \cdot J \text{ [s]}.$$

Il tempo di arrivo, in falda, è calcolato assumendo le massime condizioni di sicurezza nella valutazione della vulnerabilità, cioè saturazione della zona non satura e gradiente idraulico unitario ($J = 1,00$ m/m). Dati questi presupposti per l'applicazione del modello, ne consegue che il tempo totale di transito è pari alla sommatoria del tempo necessario per attraversare tutti i livelli presenti nel non saturo (Cfr. Fig. 2):

$$t_{TOT} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{b_i \cdot n_{ei}}{k_i} \right)$$

dove per i parametri n_{ei} e K_i sono stati utilizzati i valori della Tabella 1 ed N è il numero degli strati attraversati, nel suo transito, dall'inquinante.

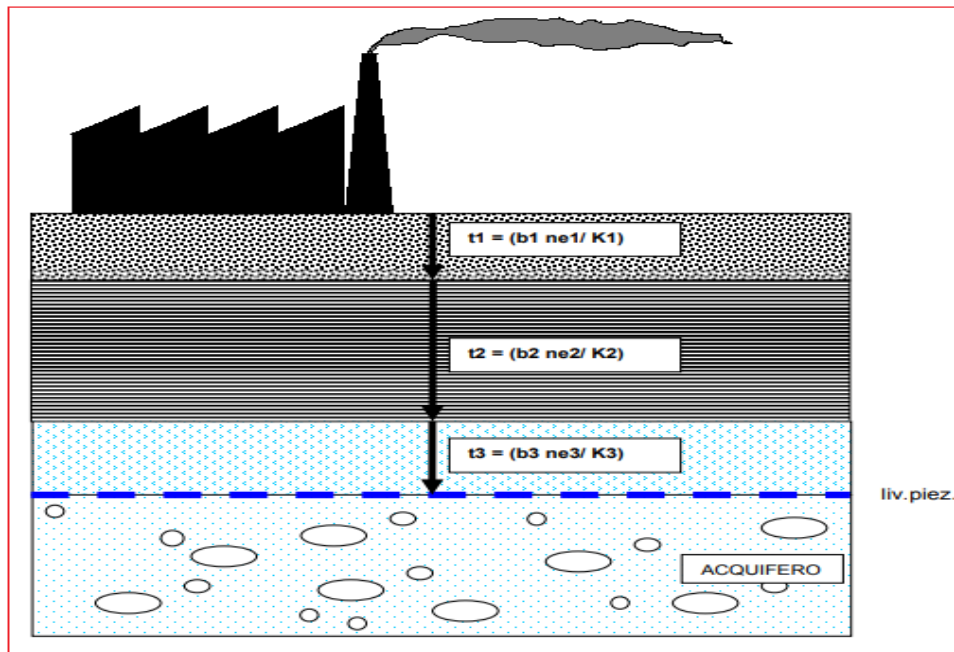


Fig. 2 – Rappresentazione schematica di calcolo del TOT di un inquinante.

GN	FORMAZIONE LITOIDE	POROSITA' EFFICACE n_e [%]	PERMEABILITA' k [m/s]
G1	Ghiaia grossa	23	$2 \cdot 10^{-3}$
G2	Ghiaia media	24	$3 \cdot 10^{-3}$
G3	Ghiaia fine	25	$5 \cdot 10^{-3}$
G4	Sabbia grossa	27	$5 \cdot 10^{-4}$
G5	Sabbia media	28	$1 \cdot 10^{-4}$
G6	Sabbia fine	23	$3 \cdot 10^{-4}$
G7	Alluvioni	9	$1 \cdot 10^{-3}$
G8	Limo	8	$9 \cdot 10^{-7}$
G9	Arenaria fine	21	$2 \cdot 10^{-6}$
G10	Argilla	3	$2 \cdot 10^{-9}$
G11	Arenaria media	27	$4 \cdot 10^{-5}$
G12	Calcilutite (Craie)	4	$6 \cdot 10^{-4}$
G13	Calcarenite	20	$5 \cdot 10^{-6}$
G14	Calcere inalterato	10	$1 \cdot 10^{-5}$
G15	Calcari marnosi	2	$1 \cdot 10^{-7}$
G16	Marna	2	$5 \cdot 10^{-8}$
G17	Calcere alterato	14	$2 \cdot 10^{-4}$
G18	Dolomia	4	$1 \cdot 10^{-8}$
G19	Sabbia dunare	38	$2 \cdot 10^{-4}$
G20	Loess	18	$9 \cdot 10^{-7}$
G21	Torba	44	$7 \cdot 10^{-5}$
G22	Scisti (Ardesia)	26	$9 \cdot 10^{-10}$
G23	Tufo vulcanico	21	$2 \cdot 10^{-6}$
G24	Basalto	1	$1 \cdot 10^{-7}$
G25	Gabbro alterato	1,5	$2 \cdot 10^{-6}$
G26	Granito alterato	2	$2 \cdot 10^{-5}$

Tabella 1 – mod. Water Supply Paper, UGS – L. Scesi, M. Papini, P. Gattinoni, 2014: Valori di n_e e k_i .

Nella formulazione di tale metodologia, Zampetti (1983) propose le seguenti classi di vulnerabilità:

- ☐ V₁: zone a vulnerabilità debole e molto debole, corrispondente a tempi di transito lunghi, superiori a 20 anni;
- ☐ V₂: zone a vulnerabilità media, corrispondente a tempi di transito medi, da 1 a 20 anni;
- ☐ V₃: zone a vulnerabilità elevata, corrispondente a tempi di transito brevi, da 1 settimana ad 1 anno;
- ☐ V₄ a: zone a vulnerabilità molto elevata, corrispondente a tempi di transito inferiori a 1 settimana; - V₄b: zone carsiche o fessurate, senza protezione superficiale;
- ☐ V₅: zone in cui la vulnerabilità non è ben definibile alla dimensione scalare usata in studi regionali;
- ☐ V₆: zone in cui mancano precise informazioni sugli acquiferi;
- ☐ V₇: zone sterili dal punto di vista idrogeologico.

In De Luca e Verga (1991) la vulnerabilità verticale viene distinta, in base al tempo di arrivo in falda, nelle seguenti sei classi riportate in Tabella 2.

Time of Travel (TOT)	Classe di Vulnerabilità intrinseca
> 20	Molto Bassa
20 ÷ 10 anni	Bassa
10 ÷ 1 anno	Media
1 anno ÷ 1 settimana	Alta
1 settimana ÷ 24 ore	Elevata
< 24 ore	Molto Elevata

Tab. 2 – Classi di vulnerabilità intrinseca.

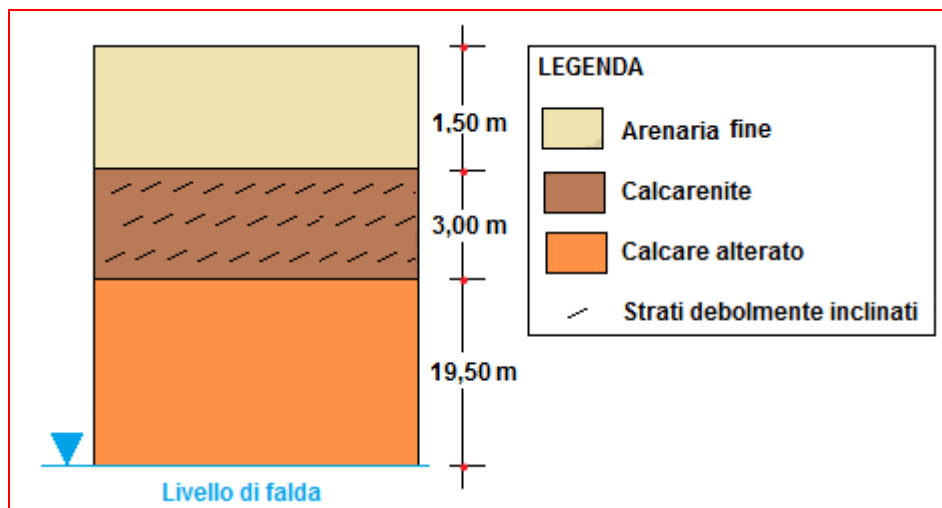


Fig. 3 – Colonna stratigrafica.

Ad esempio di quanto teoricamente, fin qui esposto, si riporta l'applicazione del metodo del Tempo di transito, per il calcolo della vulnerabilità di un acquifero all'inquinamento, situato nella Regione Puglia, ai fini della localizzazione di un appropriato impianto di trattamento e smaltimento di acque meteoriche di dilavamento di aree esterne di uno stabilimento produttivo. L'area oggetto di studio è ubicata in un territorio che, sotto l'aspetto idrogeologico, appartiene alla cosiddetta "Idrostruttura delle Murge". Tale zona presenta una colonna stratigrafica così come riportata in Fig. 3, secondo tre strati litologici ben definiti e di spessore variabile, con una soggiacenza della falda freatica a 24 m dal piano campagna.

Per il caso specifico, il metodo TOT ha permesso di valutare la vulnerabilità intrinseca del locale acquifero, secondo il seguente tempo di transito totale:

$$t_{TOT} = 1,5 \text{ m} \cdot 0,21 / (4 \cdot 10^{-5}) \text{ m/s} + 3,0 \text{ m} \cdot 0,20 / (5 \cdot 10^{-6}) \text{ m/s} + 19,5 \text{ m} \cdot 0,14 / (2 \cdot 10^{-4}) \text{ m/s}$$

ossia

$$t_{TOT} = 141.525 \text{ [s]} \text{ ossia, equivalentemente } \Rightarrow t_{TOT} = 39,31 \text{ [h]} > 24,00 \text{ [h]}$$

presentando, quindi, una **vulnerabilità intrinseca**: **ELEVATA**

La vulnerabilità intrinseca stimata, fornisce un elemento di valutazione tale da evidenziare, in funzione delle caratteristiche dei terreni e delle condizioni idrogeologiche nel sottosuolo, la possibilità di penetrazione e diffusione di un inquinante nell'acquifero soggiacente. Lo scopo principale è quello di identificare le situazioni di **compatibilità delle opere** al fine di poter procedere alla riduzione ovvero all'eliminazione degli effetti dell'inquinamento, in atto o temuti, con opportune **azioni di mitigazione**.

Per tale valutazione, nel metodo esposto, sono stati presi in considerazione i seguenti parametri:

- ☐ il tipo ed il grado di permeabilità, che influenzano la velocità di percolazione dell'inquinante e, quindi, l'**azione d'attenuazione** (penetrazione, assorbimento, diffusione, degradazione, eccetera), propria dei vari terreni, nei vari strati;
- ☐ il tipo e lo spessore della copertura dell'acquifero;
- ☐ la soggiacenza della superficie piezometrica, o freatica dell'acquifero, cioè lo spessore del terreno non saturo che esercita una funzione di **attenuazione** sul carico inquinante.

Il **tipo di acquifero**, esercita il controllo sulla lunghezza del percorso seguito dall'inquinante (da cui dipendono i fenomeni di autodepurazione) e sulla direzione da esso seguita (influenzata dalle variazioni granulometriche e dall'andamento delle fratture). Nella seguente Tab. 3, sono stati considerati i vari litotipi con **capacità depurante** e quelli **non esercitanti** tali **capacità di attenuazione** (L. Fanizzi, 2021).

LITOTIPI	DEPURANTE				NON DEPURANTE			
Alluvioni grossolane								
Calcari carsificati								
Calcari fessurati								
Dolomie fessurate								
Alluvioni medio - fini								
Complessi sabbiosi								
Arenarie e conglomerti								
Alternanze (flysch)								
Marne e argilliti								
Argille e limi								
Piroclastiti diverse								
Metamorfiti fessurate								

Tab. 3 – Litotipi depuranti (attenuatori) e non depuranti.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Zampetti M. (1983): "*Informazioni e dati relativi alla quantità e alla qualità delle acque sotterranee sotterranee nella Comunità Europea. Inquinamento delle acque sotterranee da composti organo-clorurati di origine industriale*". Monduzzi Editore, Bologna.
- [2] De Luca D. A., Verga G. (1991): "*Una metodologia per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi*". *Acque Sotterranee*, marzo 1991, Fascicolo 29, 30-33.
- [3] Civita M. (1994): "*Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: teoria e pratica*", Pitagora Editrice, Bologna.
- [4] E. Destefanis, M. Lasagna, D. De Luca (2005): "*La vulnerabilità intrinseca dell'acquifero superficiale valutata con i metodi G.O.D. /Foretser et Al. 2002) e Time of Travel (M. Zampetti, 1983) relativa al territorio di pianura della Regione Piemonte*", *Idrogeologia della pianura piemontese*, pp. 13, Cap. 4, Ed. Mariogros Industrie Grafiche SpA, Torino.
- [5] Water Supply Paper (2018): "*Scholar Select*", Geological Survey (U.S.), Ed. Franklin Classics Trade Press, Washington, D.C.
- [6] L. Scesi, M. Papini e P. Gattinoni (2014): "*Principi di geologia applicata per ingegneria civile-ambientale e scienze della terra*", Casa Editrice Ambrosiana, Rozzano (MI).
- [7] L. Fanizzi (2021) : "*Vulnerabilità intrinseca di un acquifero alla contaminazione*", Lexambiente, Mat. Acque, Inquinamento idrico, Dottrina, Roma.