

Monitoraggio dell'inquinamento da discariche: metodi isotopici per individuare la presenza di contaminazione delle acque sotterranee

Alberto Tazioli¹, Giorgio Boschi², Andrea Carlini³

¹Autore corrispondente. Dipartimento di Fisica e Ingegneria dei Materiali e del Territorio, Università Politecnica delle Marche, via Brecce Bianche – 60131 Ancona. TEL. 071 2204258 a.tazioli@univpm.it.

²Acegas – Aps S.p.A. Divisione ambiente. Responsabile laboratorio

³Dipartimento di Fisica e Ingegneria dei Materiali e del Territorio, Università Politecnica delle Marche, Ancona.

Monitoring Landfill Contamination: Isotopic Techniques for Groundwater Pollution Recognition

ABSTRACT: The presence of dumps in Italy has been constituting for years a great environmental problem. Numerous they have been the approaches and the methods to study the behaviour of the dumps, and to determine if there can be losses in action from the side or bottom barriers. In this note we introduce some theoretical aspects with regard to the use of isotopic methods to determine possible spillages of leachate from landfills. Such methods are based on the perfect knowledge of the hydrogeological settings which the isotopic contents of deuterium, oxygen-18 and tritium furnish, and on the observation of possible variations of such parameters in comparison to the background environment for the area in examination. Particularly it has been in relief in numerous studies, and in different experiences currently conducted in field by the authors in the last years, as the tritium content of the leachate is superior hundreds of times to that present in the natural waters. This fact implicates the possibility to exploit the tritium as tracing of dump pollution, being the same dump the only possible source of tritium superior to the environmental levels. The use of such isotope as tracing is more useful in comparison to the observation of the chemical data of the waters, since tritium is not influenced by chemical or physical reactions, it belongs to the molecule of the water and it follows the flow of water without suffering decelerations or absorptions of relief. In many cases the variation of isotopic contents is manifested with notable advance in comparison to the arrival of the polluting plume, i.e. the zone of underground water where the chemical parameters have sensitively altered in comparison to the background environment. During the present note are introduced therefore the results of different jobs related to dumps located in the Northern Italy.

Key terms: tritium, isotopic techniques, leachate, groundwater, tracers, pollution, landfill.

Termini chiave: tritio, tecniche isotopiche, percolato, acque sotterranee, traccianti, inquinamento, discarica.

Riassunto

La presenza di discariche in Italia costituisce da anni un grande problema ambientale. Numerosi sono stati gli approcci e i metodi per studiare il comportamento degli impianti, e per determinare se ci possono essere perdite in atto dalle barriere laterali e/o di fondo. In questa nota presentiamo alcuni aspetti teorici legati all'utilizzo di metodi isotopici per determinare eventuali fuoriuscite di percolato da impianti di stoccaggio per rifiuti.

Tali metodi si basano sulla perfetta conoscenza dell'assetto idrogeologico che i contenuti isotopici di deuterio, ossigeno-18 e tritio forniscono, e sull'osservazione di eventuali variazioni di tali parametri rispetto al fondo ambiente pertinente per l'area in esame. In particolare, è stato rilevato in numerosissimi studi precedenti e in diverse esperienze condotte in campo dagli autori negli ultimi anni, come il contenuto in tritio del percolato sia centinaia di volte superiore a quello attualmente presente nelle acque naturali. Questo fatto implica la possibilità di sfruttare il

tritio come tracciante di inquinamento da discarica, essendo la discarica stessa l'unica fonte possibile di tritio superiore ai livelli ambientali.

L'utilizzo di tale isotopo come tracciante risulta molto più utile rispetto all'osservazione dei soli dati chimici delle acque, poiché il tritio non è influenzato da processi chimici o fisici, appartiene alla molecola dell'acqua e ne segue il flusso senza subire rallentamenti o assorbimenti di rilievo. In molti casi la variazione di contenuti isotopici si è manifestata con notevole anticipo rispetto all'arrivo della nube inquinante, intesa come zona di acqua sotterranea in cui i parametri chimici sono sensibilmente alterati rispetto al fondo ambiente.

Nel corso della presente nota saranno quindi presentati i risultati di diversi lavori relativi a discariche ubicate nel Nord Italia.

Introduzione

Il presente lavoro evidenzia un aspetto delle problematiche

ambientali che ha assunto negli ultimi anni una grande importanza nel panorama italiano: il problema della gestione degli impianti per lo stoccaggio dei rifiuti, la valutazione dell'impatto che opere del genere hanno sull'ambiente circostante, il monitoraggio dei corpi idrici sotterranei e superficiali allo scopo di rilevare eventuali "perdite" di percolato dalle discariche. Tutte queste tematiche sono di fondamentale importanza per una corretta gestione del territorio.

Questa breve nota mostra una serie di metodiche innovative sia nel monitoraggio di impianti di discarica, sia nell'inquadramento idrogeologico dell'area in cui la discarica si trova.

Isotopi in problemi di inquinamento

Gli isotopi sono nuclidi dello stesso elemento, con lo stesso numero atomico (Z) ma con differente numero di massa (A), e quindi diversa massa atomica. La differenza delle masse è dovuta a un diverso numero di neutroni presenti nel nucleo dell'atomo. Le percentuali di abbondanza variano fra i singoli composti naturali e anche all'interno della stessa famiglia di composti. Gli isotopi sono suddivisi in isotopi stabili (in natura ne esistono meno di 300) e non stabili o radioattivi, presenti in numero di poco superiore a 1200.

L'aspetto forse più importante da sottolineare è l'effettiva differenza di filosofia relativamente all'utilizzo dei dati isotopici rispetto a quelli chimici. Come anticipato, i primi si usano per determinare alcune caratteristiche che la mera lettura delle concentrazioni chimiche non consente di apprezzare; queste ultime, infatti, danno solamente un'indicazione dell'effettiva (e quantitativa) presenza di un determinato composto chimico disciolto nell'acqua. Ma da dove derivano tali composti? E che tipo di processi hanno subito a partire dal momento dell'infiltrazione attraverso il terreno fino alla sorgente che alimenta l'acquedotto? Le risposte a queste domande non possono darle solamente i risultati delle analisi chimiche, è necessaria una serie di misure dei contenuti isotopici, in questo caso del carbonio, dell'ossigeno, dell'idrogeno, del cloro (Tazioli A., 2005).

In letteratura (Clark & Fritz, 1997; IAEA, 1975; USGS, 2002) ed in diversi casi studiati sono elencati i valori di riferimento per diverse specie isotopiche, e associati (sotto forma di intervallo, con un valore minimo ed uno massimo) a diverse origini o fonti da cui derivano gli inquinanti. Entro certi limiti è quindi possibile risalire con ottima approssimazione alla fonte di contaminazione che ha prodotto determinate concentrazioni di inquinanti, e quindi è possibile confrontare diversi punti di campionamento.

Isotopi come marcatori del ciclo idrogeologico

Un discorso a parte meritano gli isotopi della molecola dell'acqua; quelli principalmente usati per scopi idrogeologici sono il deuterio (^2H), l'ossigeno-18, il tritio (^3H). I primi due sono isotopi stabili, il tritio è un isotopo radioattivo con intervallo di decadimento pari a 4500 giorni

(12,32 anni circa).

L'importanza di tali isotopi risiede soprattutto nel loro utilizzo come marcatori del ciclo idrologico dell'acqua (Gat & Gonfiantini, 1994). I cambiamenti di stato cui l'acqua è sottoposta, infatti, generano un frazionamento isotopico, vale a dire una ripartizione a livello di concentrazioni tra le diverse specie isotopiche dello stesso elemento. Il frazionamento dipende dalle differenze di massa tra le varietà isotopiche contenute nell'acqua stessa. Le molecole leggere evaporano quindi più facilmente delle molecole pesanti, così il vapore che arriva da un lago o dal mare ha concentrazione in isotopi pesanti inferiore a quella della riserva da cui proviene. Quindi la composizione isotopica delle precipitazioni è direttamente connessa alla frazione residua di vapore ed è funzione della temperatura e, in misura minore, anche della pressione atmosferica (Craig & Gordon, 1965). L'altitudine, la latitudine, le stagioni influiscono quindi direttamente sui frazionamenti tra ossigeno 18 e ossigeno 16 e tra deuterio e protio (Fig. 1). Per chiarire meglio tale punto, supponiamo di seguire l'immaginaria molecola d'acqua dal momento della sua precipitazione in qualità di acqua di pioggia; innanzitutto, come anticipato, a seconda della quota e della latitudine della zona in cui si infila l'acqua di pioggia abbiamo valori isotopici (comunque variabili stagionalmente) ben definiti e noti (Gat et al. 1996), grazie ad un'estesa rete di monitoraggio mensile attiva da diversi anni e coordinata dalla IAEA di Vienna (IAEA/WMO, 2004).

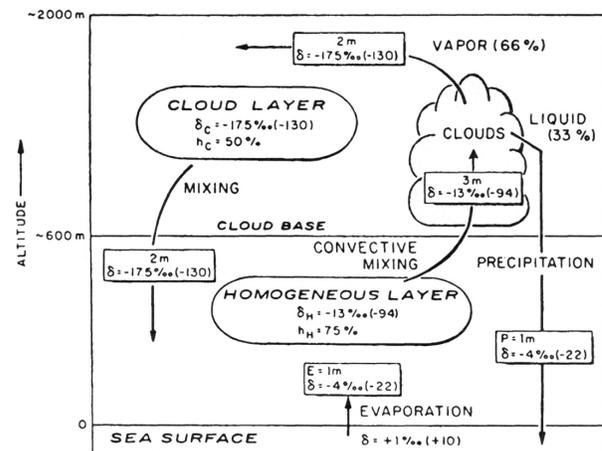


Figura 1. Da Clark & Fritz, 1997. Variazione dei contenuti isotopici nel ciclo dell'acqua.

After Clark & Fritz, 1997. *Isotopic content variation in the water cycle.*

Quindi, la particella di acqua con il suo ben definito valore isotopico cade al suolo; se si infila direttamente, tali valori isotopici sono conservati dalla particella d'acqua durante il suo percorso all'interno della falda, indipendentemente da ogni trasformazione chimica che l'acqua stessa può subire. Costituiscono quindi dei perfetti marcatori della zona di alimentazione dell'acqua sotterranea che si capta da una certa falda più a valle (Fig. 2). Se, al

contrario, la particella non si infiltra direttamente ma ruscella superficialmente, o rimane per diverso tempo sulla superficie, o durante il flusso dell'acqua di falda subisce comunque dei processi di evaporazione, tali valori subiscono un aumento a causa del frazionamento isotopico.

Il contenuto in deuterio ed ossigeno-18 indica quindi l'area di alimentazione o di ricarica, cioè l'area in cui tale particella si è infiltrata in seguito alle precipitazioni, ma non dà indicazioni sul tempo di trasferimento. Il tritio, in campo idrogeologico, serve proprio per determinare quanto tempo la famosa particella d'acqua infiltrata in un punto ha impiegato per raggiungere il punto di prelievo. Tale valutazione è possibile grazie al fatto che il tritio è un isotopo radioattivo, e quindi la sua concentrazione decade nel tempo con un periodo di dimezzamento pari a 4500 giorni (circa 12,3 anni).

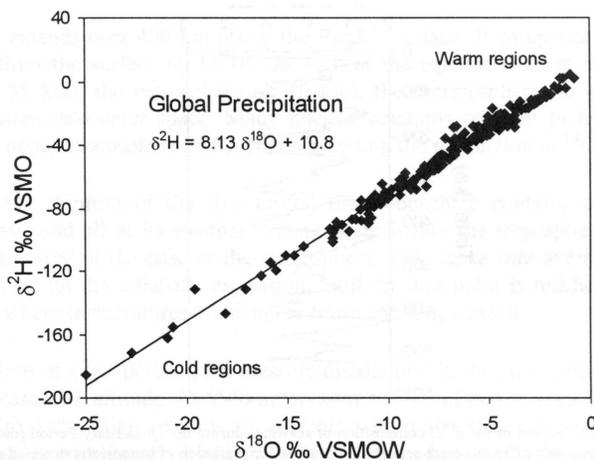


Figura 2. Carta isotopica rappresentante i contenuti delle acque sotterranee e delle piogge (da Clark & Fritz, 1997).

Isotopic plot of groundwater and rainwater (after Clark & Fritz, 1997).

È evidente così che valori medi molto bassi (1-3 UT) competono ad acque sotterranee con lungo tempo di permanenza nel sottosuolo, valori tra 4 e 8 UT ad acque con brevi o medi tempi di permanenza, valori tra 9 e 13 UT ad acque con brevissimi tempi di permanenza, spesso qualche mese appena. La situazione è naturalmente complicata dalle miscelezioni cui l'acqua nel suo percorso è sottoposta; senza addentrarci in un percorso tortuoso e complicato, basta qui accennare al fatto che valori di tritio nelle acque sotterranee superiori a 15-16 UT indicano molto probabilmente la presenza di fonti esterne di tritio. Una di queste fonti è sicuramente una discarica, che ha contenuti in tritio spesso centinaia di volte più elevati di quelli naturalmente presenti nell'ambiente (Caestani et al., 1999; Fuganti et al., 2003; Rank et al., 1992; Tazioli A. et al., 2004).

Il concetto di tracciante

Un concetto molto importante che si utilizza in problemi di

inquinamento è quello di tracciante. Un tracciante è una sostanza naturalmente presente nell'acqua o artificialmente immessa per determinare il percorso che l'acqua compie attraversando il terreno. Si possono utilizzare come traccianti ad esempio alcune sostanze chimiche (o isotopiche) prese come indicatrici di inquinamento; oppure si possono immettere nell'acqua delle sostanze che sia possibile seguire nel loro flusso insieme all'acqua. Per essere un buon tracciante la sostanza deve possedere alcune caratteristiche che la rendano in qualche maniera inalterata durante l'attraversamento dei terreni.

Nel caso della discarica, essa stessa può essere considerata come un enorme serbatoio di traccianti. Essa contiene infatti numerosi composti chimici in grandi quantità che a volte possono essere utili per capire se dalla discarica fuoriesce percolato. In particolare, una discarica può essere considerata come un grande reattore all'interno del quale avvengono diverse reazioni legate alla decomposizione della materia organica presente; la qualità del percolato è strettamente legata ai processi chimico-fisici e biologici che avvengono nel corpo rifiuti. Infatti, dopo una prima fase di vita, inizia la solubilizzazione di molti cationi (Mg, Fe, Mn, Zn), dei cloruri e dell'azoto ammoniacale.

Chiaramente per poter considerare alcune sostanze chimiche come traccianti senza incappare in grossolani errori occorre che il fondo ambiente circostante alla discarica (a monte e a valle) sia notevolmente diverso rispetto alle concentrazioni rinvenute nel percolato. Quantità di ammonio o nitrati di qualche decina di milligrammi per litro a monte e a valle della discarica indicano generalmente un fondo ambiente sensibilmente alterato per fenomeni esterni alla presenza della discarica stessa; in questi casi, quindi, non è opportuno servirsi di quei determinati composti chimici come unici traccianti di inquinamento da discarica, ma è necessario usare tecniche isotopiche che prevedano anche l'utilizzo di altre sostanze come traccianti di inquinamento.

Una di queste sostanze è proprio l'isotopo radioattivo dell'idrogeno, il tritio. Esso, se pur presente in piccolissime quantità nelle acque naturali, è parte integrante della molecola dell'acqua, per cui non è sottoposto a reazioni chimiche di alcun tipo né viene assorbito dai terreni, ma viaggia insieme alla massa di acqua di falda essendo acqua egli stesso. Perché allora utilizzarlo come tracciante quando le sue concentrazioni sono di moltissimo inferiori a quelle degli altri composti chimici? A questo proposito bisogna infatti ricordare che per ogni atomo di tritio ce ne sono 10^{18} di idrogeno, vale a dire una quantità infinitamente più grande, e che per la sua determinazione si utilizzano strumenti di gran lunga più precisi rispetto a quelli normalmente utilizzati per le determinazioni chimiche.

Il suo utilizzo come tracciante è legato al fatto che in numerosissime discariche il tenore in tritio è sensibilmente più elevato di quello naturalmente presente nelle acque sotterranee (Fuganti et al., 2003; Tazioli A. et al., 2004). Il rapporto risulta anche diverse centinaia di volte superiore. È

evidente allora che se anche una piccola parte di percolato fuoriuscisse dalla discarica mentre con le analisi chimiche sarebbe difficile individuarla, per mezzo delle analisi di tritio sarebbe possibile risalire a questa uscita. Infatti è sufficiente avere piccole variazioni (superiori ai valori normalmente presenti nell'ambiente) di tritio nelle acque sotterranee per essere certi di una contaminazione esterna.

Il metodo per determinare l'occorrenza o meno di inquinamento da parte di discariche si basa quindi sul verificarsi di anomalie nella attività (o concentrazione) di tritio nelle acque sotterranee o superficiali circostanti la discarica. Una volta stabiliti, infatti, i valori di fondo degli isotopi e del tritio, è possibile confrontare i valori riscontrati nei diversi corpi idrici con quelli pertinenti al percolato, e definire se esiste o meno una correlazione tra i diversi valori. Tale metodo è fondato sulla considerazione che l'unico input naturale di tritio è rappresentato dall'acqua di pioggia, ed esistono quindi andamenti ben definiti nel corso dell'anno idrologico, per cui per ogni zona è possibile individuare un minimo (invernale) ed un massimo (estivo) nella concentrazione di tritio. Eventuali valori superiori a queste oscillazioni mostrano contenuti in tritio derivanti anche da input esterni; poiché il tritio non si produce per reazioni chimiche, ma nucleari, l'unica fonte alternativa all'acqua di pioggia è costituita dal percolato di discariche.

Principali isotopi usati in problemi di inquinamento

La prima operazione che va fatta una volta che si fa uso delle determinazioni isotopiche è quella di definire il fondo ambiente dei principali parametri considerati come indici di inquinamento, ovvero eseguire una serie di misure ripetute in diversi periodi dell'anno per poter ricostruire le variazioni temporali e spaziali delle grandezze. Gli isotopi stabili sono conservativi rispetto a reazioni chimiche e processi di assorbimento che le sostanze possono subire, i quali, al contrario, variano semplicemente le quantità di sostanza chimica in gioco (cioè la concentrazione).

L'isotopo radioattivo presente nella molecola dell'acqua (il tritio) è utilizzato sia per la datazione delle acque recenti (inferiori a 50 anni) sia come tracciante di percolato da discariche (Fuganti et al., 2003).

Gli altri isotopi di interesse in problemi di inquinamento variano a seconda del tipo di sostanza che si considera inquinante per la zona in esame; le aree interessate da forti inquinamenti di solfati o solfuri vedranno l'utilizzo degli isotopi dello zolfo (soprattutto lo zolfo-34, espresso come $\delta^{34}\text{S}$ in differenza per mille, ‰, rispetto ad uno standard di riferimento) e dell'ossigeno dei solfati, espresso come differenza per mille, ‰, rispetto ad un campione standard di riferimento (Fig. 3 e 4). Le aree, come quella in esame, interessate da inquinamenti prevalentemente per la componente azotata, avranno come riferimento gli isotopi dell'idrogeno e dell'ossigeno e l'isotopo dell'azoto, ovvero l'azoto-15 ($\delta^{15}\text{N}$ ‰). Tale isotopo serve a marcare l'origine

di quei composti contenenti azoto, come i nitrati (NO_3^-) e l'ammonio (NH_4^+). Infatti, a seconda dei valori è possibile risalire alla fonte che ha prodotto determinate concentrazioni, stabilire se è di origine naturale o antropica, dovuta a fertilizzanti piuttosto che a liquame organico.

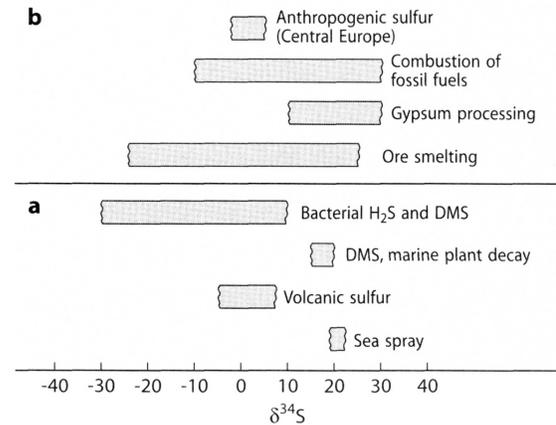


Figura 3. Composizione isotopica di composti naturali (a) e antropici (b) di zolfo (Hoefs, 2004). *Isotopic composition of natural (a) and anthropic (b) sulphur compound (after Hoefs, 2004).*

Dai dati di letteratura si evince che per i nitrati disciolti nelle acque sotterranee valori di $\delta^{15}\text{N}$ inferiori a +8‰ sono tipici di aree agricole, poiché il tenore di azoto-15 proveniente da fertilizzanti artificiali è attorno a 0. Valori superiori sono, in genere, il risultato di nitrificazione dell'azoto contenuto in rifiuti animali o concimi o liquami (USGS, 2002). Altri autori specificano che i rifiuti di origine animale hanno nitrati con valori di azoto-15 compresi tra +10‰ e +23‰, mentre i liquami organici tra +10‰ e +20‰ (Aggarwal et al., 1998).

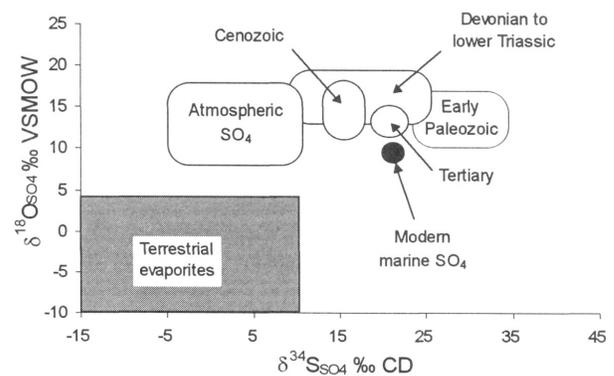


Figura 4. Rapporto tra i contenuti di zolfo-34 e ossigeno-18 per diversi composti naturali (Clark e Fritz, 1997). *Sulphur - 34 and Oxygen-18 content ratio for several natural compounds (Clark & Fritz, 1997).*

Il $\delta^{13}\text{C}$ nei carbonati (CO_3^{2-}), bicarbonati (HCO_3^-) e anidride carbonica (CO_2) disciolti, è utile per determinare

l'origine fisica di tali composti. I valori di $\delta^{13}\text{C}$ si aggirano per le acque sotterranee tra -15‰ e -10‰ rispetto allo standard PDB, mentre per le acque superficiali i valori sono leggermente più elevati. Negli ambienti riducenti come quelli delle discariche l'attività batterica crea un intenso frazionamento isotopico, portando il $\delta^{13}\text{C}$ a valori fortemente positivi ($\delta^{13}\text{C} > +15\text{‰}$), per cui è possibile, una volta noto il fondo locale dell'ambiente, verificare l'esistenza o meno di inquinamento.

Esempi di applicazioni

Tritio come tracciante di percolato

I valori attuali di tritio nell'atmosfera variano (per le nostre latitudini) da un minimo di 3-4 UT nei mesi invernali ad un massimo di 13-14 UT nei mesi primaverili ed estivi. Tali valori di input, come anticipato, sono usati per stabilire se in un determinato corpo idrico nei pressi di una discarica può esserci o meno la presenza di percolato anche in forma molto diluita.

L'esempio presentato riguarda una discarica sita in un'area pianeggiante nei pressi di Parma, posta su terreni alluvionali, alternativamente limosi e limoso sabbiosi.

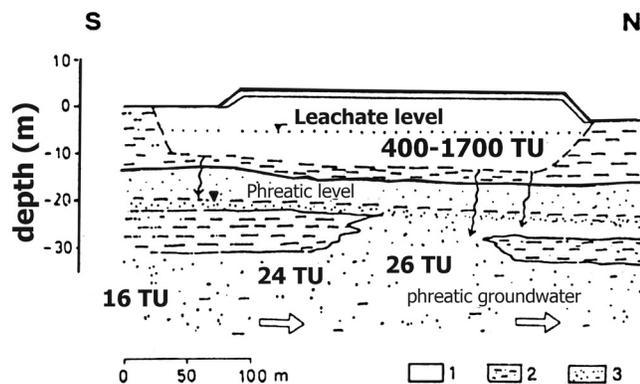


Figura 5. Sezione geologica schematica con indicazione dei contenuti in tritio. 1: rifiuti; 2: argilla limosa e sabbiosa; 3: sabbia e ghiaia (Tazioli A. & Tazioli G.S., 2005).

Geological section with indication of tritium contents. 1: waste; 2: silty and sandy clay; 3: sand and gravel (Tazioli A. & Tazioli G.S., 2005).

In quest'area si è verificata un'ampia migrazione di percolato verso l'ambiente sottostante (Calestani et al., 1999). I sedimenti sabbiosi contengono la falda freatica, alimentata da piogge locali, con un breve tempo di residenza nel sottosuolo. La conducibilità elettrica è di poco superiore ai $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$. La Fig. 5 rappresenta una sezione geologica schematica della zona della discarica, con l'indicazione dei valori di tritio; come si può vedere, i valori nel percolato sono elevati, mentre nella falda freatica si misurano valori tra 16 e 26 UT. L'attività di tritio nell'acqua sotterranea ha permesso di monitorare la migrazione di percolato lungo una direzione di flusso di quasi 3 km a valle della discarica (Fig. 6). I valori di tritio

nell'acqua sotterranea sono bassi rispetto a quelli del percolato, ma sensibilmente più alti del fondo ambiente, che nel 1998 raggiungeva un massimo stagionale di 16 UT, anche a grande distanza dall'impianto. Per questo tipo di contaminazione, quindi, utilizzando solo i parametri chimici come indicatori di inquinamento ci si sarebbe fermati pochi metri a valle della discarica, in quanto i valori di tali parametri risultavano alterati solamente nei primi pozzi immediatamente a ridosso della discarica stessa. L'applicazione delle tecniche isotopiche a questo caso ha permesso di individuare prima delle tecniche tradizionali l'occorrenza di inquinamento anche a notevole distanza dal punto di uscita. Questo dato deriva dalla considerazione che le sostanze chimiche disciolte nell'acqua subiscono durante il percorso fenomeni di assorbimento, dispersione, diffusione e precipitazione chimica, mentre l'acqua continua a viaggiare alla sua velocità lungo la direzione del deflusso sotterraneo.

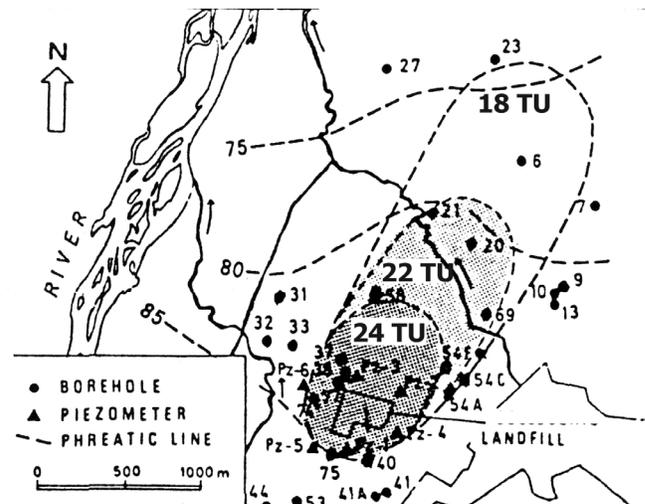


Figura 6. Migrazione di percolato dalla discarica. Si nota una diminuzione nei contenuti in tritio nella direzione del plume, fino a circa 2,5 km dalla discarica (Tazioli A. & Tazioli G.S., 2005).

Leachate migration from landfill. It can be noted a lowering of tritium contents in the plume direction, until about 2.5 kms from the landfill (Tazioli A. & Tazioli G.S., 2005).

Essendo il tritio una componente dell'acqua, esso non è ritardato nel suo percorso; per questa ragione in casi come quello appena presentato, si può usare come tracciante di inquinamento da percolato con ottimi risultati.

Contenuti isotopici indicatori delle fonti inquinanti

Il secondo esempio presentato riguarda una discarica del Nord Italia, posta su una pianura alluvionale basata su un'alternanza di depositi di origine marina, prevalentemente costituiti da argille limose e sabbie limose. Gli acquiferi sono diversi, divisi da lenti o strati un po' più spessi di materiali impermeabili. Tale discarica si inserisce in un contesto ambientale già gravemente compromesso, con una falda freatica superficiale fortemente inquinata e alimentata

direttamente dalle acque di pioggia locali, e un acquifero confinato posto immediatamente sotto ad uno strato continuo di argilla di qualche metro di spessore, a partire da

una profondità di circa 8-9 m dal p.c. L'acquifero confinato risulta leggermente in pressione, e anch'esso inquinato, con una conducibilità elettrica a tratti molto elevata (Fig. 7).

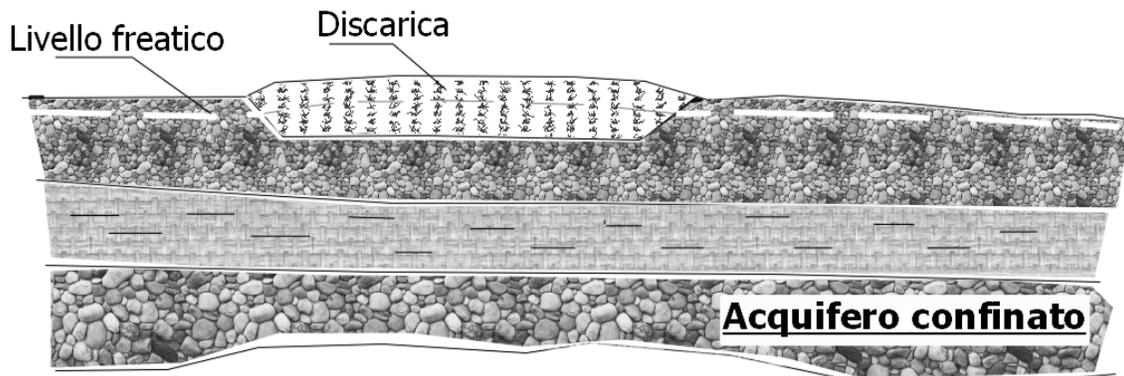


Figura 7. Sezione dell'area contenente la discarica. Il primo acquifero è freatico, costituito da sabbie limose; il secondo acquifero è leggermente in pressione. Sono separati da uno strato a permeabilità più bassa.

Section of the landfill area. The first aquifer is slightly artesian. The two aquifers are divided from a lower permeability layer.

La particolarità di tale sito consiste nel forte degrado ambientale cui soggiacciono le acque superficiali e sotterranee sia a monte (anche per diversi km) sia a valle dell'impianto di stoccaggio dei rifiuti.

caratterizzata da un rapido rinnovamento, essendo alimentata da piogge locali, mentre la falda in pressione ha un tempo di permanenza di almeno 30 anni, ed è alimentata da precipitazioni collinari o pedemontane (Fig. 8). Dall'osservazione dei dati isotopici e di tritio è stato possibile distinguere le due diverse falde, ed escludere collegamenti tra la discarica e l'ambiente circostante, in quanto i valori di tritio rilevati nelle acque risultavano sempre nell'ambito dei valori di fondo riscontrati nelle acque naturali.

Si è allora effettuato un approfondimento di indagine per capire quali potevano essere le fonti inquinanti che avevano prodotto alte concentrazioni, soprattutto di composti azotati, nelle acque sotterranee e superficiali. Sono state effettuate in particolare analisi isotopiche dell'azoto-15 presente nei nitrati e nell'ammonio, e di carbonio-13 presente nei bicarbonato e nella CO_2 disciolta.

I risultati hanno confermato una provenienza nettamente inorganica per i composti del carbonio, e provenienza dell'azoto da fertilizzanti per alcuni campioni prelevati a monte e a valle della discarica. In altri campioni i valori dell'azoto-15 hanno indicato una provenienza da mineralizzazione naturale; effettivamente, osservando la stratigrafia dell'area si è notata la presenza anche importante di livelli di torba che produce notoriamente, concentrazioni elevate di ammonio e altri sali.

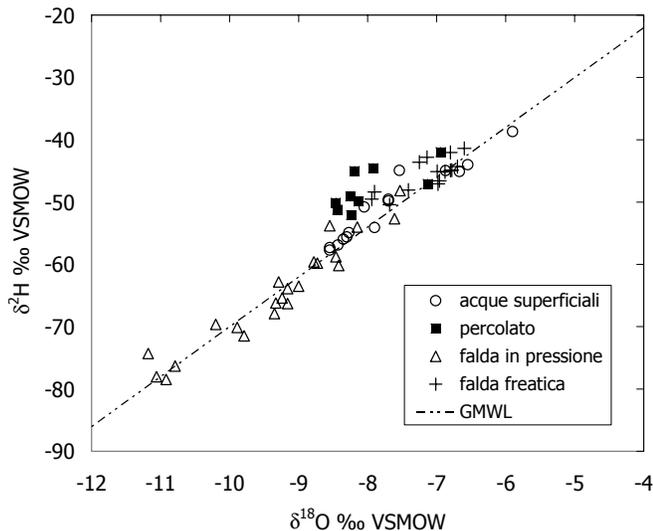


Figura 8. Rapporti isotopici per i diversi tipi di acque presenti nel sito. Questi valori marcano una differente origine per le acque alimentate localmente e per le acque della falda in pressione.

Isotopic ratio for several kind of waters. These values show a different origin for the local groundwater and the artesian groundwater.

Nell'arco degli ultimi tre anni sono state eseguite numerose analisi isotopiche e di tritio su diversi campioni di percolato, di acque superficiali appartenenti ai canali irrigui presenti intorno alla discarica e al fiume posto nelle vicinanze, di acque sotterranee prelevate nella falda freatica e nella prima falda in pressione. La falda freatica è

Conclusioni

Gli esempi presentati dimostrano l'utilità (ed in certi casi la necessità) di affiancare ai metodi tradizionali di indagine tecniche isotopiche per la determinazione della provenienza dei corpi idrici e degli inquinanti presenti negli stessi. In particolare i contenuti isotopici di carbonio-13, zolfo-34, azoto-15 sono indispensabili per la definizione dell'origine delle fonti inquinanti; il tritio dà indicazioni sull'età delle

acque e sull'eventuale fuoriuscita di percolato da discariche.

L'utilizzo di tale isotopo come tracciante risulta molto più utile rispetto all'osservazione dei soli dati chimici delle acque, poiché il tritio non è influenzato da processi chimici o fisici, appartiene alla molecola dell'acqua e ne segue il flusso senza subire rallentamenti o assorbimenti di rilievo.

In molti casi la variazione di contenuti isotopici si è manifestata con notevole anticipo rispetto all'arrivo della nube inquinante, intesa come zona di acqua sotterranea in cui i parametri chimici sono sensibilmente alterati rispetto al fondo ambiente.

Bibliografia

- Aggarwal J., Sheppard D.S., Robinson B.W. (1998) Analytical developments in the measurements of boron, nitrate, phosphate and sulphate isotopes and case examples of discrimination of nitrogen and sulphur sources in pollution studies. *Application of isotope techniques to investigate groundwater pollution*, IAEA-TECDOC-1046, ISSN 1011-4289.
- Calestani G., Masserano M., Pellegrini M., Tazioli G.S., Vannucchi M. (1999) *On the methods for monitoring the interference of sanitary landfills activity processes with the underground environment. The example of two monitored landfills near the city of Parma, Italy*. 7th Int. Waste Management and Landfill Symp. Vol. IV, Grafiche Galeati, Imola, Italy, pp. 245-252.
- Clark I.D. & Fritz P. (1997) *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Pub. New York. ISBN 1-56670-249-6.
- Craig, H., and L. I. Gordon, Deuterium and oxygen 18 variations in the ocean and the marine atmosphere, in *Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures*, edited by E. Tongiorgi, pp. 9-130, Cons. Naz. di Rech., Spoleto, Italy, 1965.
- Fuganti A., Eichinger L., Morteani G. & Preinfalk C. (2003) *L'utilizzo degli isotopi trizio, ossigeno-18, deuterio e carbonio-13 per la valutazione dei rapporti tra discariche di rifiuti ed acque sotterranee* *Geologia Tecnica e ambientale*. Vol. 2/03, pp. 5-10.
- J. R. Gat and R. Gonfiantini, Eds., *Stable Isotope Hydrology: Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle* (IAEA Tech. Rep. Ser. 210, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1981); J. R. Donguy, *Prog. Oceanogr.* 34, 45 (1994).
- Gat, J. R., A. Shemesh, E. Tziperman, A. Hecht, D. Georgopoulos, and O. Basturk, *The stable isotope composition of waters of the eastern Mediterranean Sea*, *J. Geophys. Res.*, 101, 6441-6451, 1996.
- Hoefs J. (2004) *Stable Isotope Geochemistry*. Springer-Verlag Berlin. ISBN3-540-40227-6.
- IAEA/WMO (2004). *Global Network of Isotopes in Precipitation*. The GNIP Database. Accessible at: <http://isohis.iaea.org>
- Rank, D. W. Papesch, V. Rajner & Riehl-Herwirsch G. (1992) *Environmental Isotope Study at the Breitenau Experimental Landfill (Lower Austria)*. Tracer Hydrology, Hotzl & Werner eds, *Proc. of the 6th Int. Symp. on Water Tracing*, Karlsruhe, Germany, 173-177, Balkema, Rotterdam.
- Tazioli A., Tazioli G.S. & Gonfiantini R. (2004) *Landfill pollution control with isotope techniques*. Isotope Hydrology and Integrated Water Res. Management, IAEA. ISBN 92-0-108604. pp. 255-259.
- Tazioli A. & Tazioli G.S. (2005) *Water and leachate tritium content as pollution tracer in sanitary landfill investigations*. Proc. Of 10th Int. Symp. SARDINIA 2005, Eds Cossu & Stegmann.
- U.S. Geological Survey (2002) *Compilation of Minimum and Maximum Isotope ratios of selected elements in naturally occurring terrestrial materials and reagents*. Reston, Virginia.