



Titolo

CARATTERIZZAZIONE E MONITORAGGIO DELLA ZONA NON SATURA PER LO SVILUPPO DEL DEPOSITO NAZIONALE DI RIFIUTI RADIOATTIVI

Descrittori

Tipologia del documento: L

Collocazione contrattuale: Contratto di cooperazione per una collaborazione tecnico-scientifica nel settore nucleare tra l'ENEA in veste di ente pubblico non economico e SOGIN spa organismo di diritto pubblico

Argomenti trattati: Caratterizzazione siti

Sommario: Il report presenta gli elementi utili per la pianificazione dello studio della Zona Non Saturata (ZNS), nel contesto delle analisi di sicurezza per il futuro Deposito Nazionale per i rifiuti radioattivi.

Autore: Riccardo Levizzari

Note

Copia n.

In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	10/7/2017	NOME	Riccardo Levizzari	Raolo Bartolomei	Paolo Meloni
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE	

Sommario

Premessa	4
1. La Zona Non Saturata nell’ambito di realizzazione del Deposito Nazionale per rifiuti radioattivi	5
1.1. <i>La Zona Non Saturata nel contesto geologico ed ambientale di superficie</i>	5
1.2. <i>La Zona Non Saturata nel contesto del Deposito Nazionale per rifiuti radioattivi</i>	6
1.3. <i>Esperienze internazionali sulla caratterizzazione e monitoraggio della Zona Non Saturata in ambito nucleare</i>	9
2. Fenomeni e parametri caratterizzanti la dinamica idrica nella Zona Non Saturata	12
2.1. <i>Aspetti fisico-idrologici di un mezzo poroso non saturo</i>	12
2.2. <i>Curva di ritenzione idrica e curva di conducibilità idraulica</i>	13
2.3. <i>Approfondimenti sull’idrologia dei mezzi porosi non saturi</i>	17
2.3.1. <i>Cenni sulle problematiche del flusso idrico in un mezzo non saturo a doppia porosità</i>	17
2.3.2. <i>L’isteresi nella dinamica idrica nei mezzi porosi non saturi</i>	19
3. I modelli di relazione tra contenuto idrico, tensione matriciale e conducibilità idraulica nella Zona Non Saturata	21
3.1. <i>Modelli di van Genuchten e Gardner</i>	22
3.2. <i>Modello di Brooks e Corey</i>	24
3.3. <i>Modello di Mualem</i>	25
3.4. <i>Modello di Campbell</i>	25
3.5. <i>Modello di Vogel-Cislerova</i>	26
3.6. <i>Le funzioni di pedotrasferimento</i>	27
3.7. <i>Considerazioni sui dati sperimentali relativi all’utilizzo dei modelli</i>	29
4. Tecniche per la caratterizzazione dei parametri idrologici e per il monitoraggio della Zona Non Saturata	31
4.1. <i>Lisimetri/Coppe porose a suzione per il prelievo di campioni di acqua nel mezzo non saturo</i>	31
4.2. <i>Tensiometri per la misura diretta della tensione matriciale</i>	35
4.3. <i>Tecniche di misura indiretta del contenuto idrico</i>	36
4.3.1. <i>Time Domain Reflectometry (TDR)</i>	36
4.3.2. <i>Frequency Domain Reflectometry (FDR)</i>	39
4.3.3. <i>Tecniche con sonde “Theta” e con sonde di tipo capacitivo</i>	39
4.3.4. <i>Sonda a neutroni</i>	40

4.4. Cenni alle indagini di laboratorio su campioni di un mezzo poroso non saturo	42
4.4.1. Misura del contenuto idrico	43
4.4.2. Misura della conducibilità idraulica	43
4.4.3. Determinazione della curva di ritenzione idrica	44
4.4.4. Misura della densità apparente e reale	44
4.4.5. Misura della porosità	45
4.4.6. Misura della superficie specifica	46
4.5. La chimica e la geochimica isotopica nella caratterizzazione della dinamica idrica nella Zona Non Saturata	46
4.5.1. Ruolo degli studi geochimici	46
4.5.2. Ruolo della geochimica isotopica	47


Premessa

Il rapporto tecnico è stato redatto nell'ambito del Contratto di Collaborazione Sogin-ENEA, in risposta alle attività previste dalla fase tecnica 1A dell'Ordine Attuativo 9 "Misura dei parametri idrodinamici, geochimici e radioecologici del sito e del suo intorno significativo". Il report presenta gli elementi utili per la pianificazione dello studio della Zona Non Saturata (ZNS), nel contesto delle analisi di sicurezza per il futuro Deposito Nazionale per i rifiuti radioattivi.

Gli studi sulla dinamica idrica e degli inquinanti nella ZNS sono relativamente recenti, se confrontati con quelli che hanno interessato altri comparti ambientali. Lo sforzo compiuto dai ricercatori ha posto le basi per lo sviluppo delle attività di rilievo dei dati sperimentali e dell'applicazione di studi modellistici, che rappresentano due strumenti imprescindibili per una corretta caratterizzazione dei parametri idrologici e per la corretta ed affidabile previsione della dinamica dei radionuclidi in questo sistema ambientale. Per queste due finalità è necessario avere ben presente la collocazione del sistema nel contesto geologico-ambientale e il ruolo rivestito nell'ambito del futuro Deposito Nazionale (§ 1), nonché le basi teoriche di fisica del suolo, che sottendono all'interpretazione dei principali fenomeni idrologici che lo interessano (§ 2). Le attività di simulazione sono uno degli strumenti fondamentali per prevedere l'evoluzione della dinamica idrica e degli inquinanti nei mezzi porosi insaturi; ma l'utilizzo affidabile dei codici di simulazione non può prescindere dalla conoscenza delle basi teoriche che sottendono l'utilizzo dei modelli stessi, nonché dall'origine e dalla finalità specifica per cui il modello stesso è stato realizzato (§ 3). E' anche necessario avere ben presenti i limiti che si presentano nell'implementazione dei principi teorici negli attuali codici di simulazione (argomento che sarà successivamente approfondito nel report legato alla fase tecnica 1B dell'Ordine Attuativo 9). L'utilizzo di tecniche di rilievo dei dati di terreno rappresenta un altro strumento fondamentale per caratterizzare il sistema insaturo e per rilevare i parametri fondamentali da applicare in ambito modellistico. L'utilizzo di questi strumenti deve essere supportato dalla conoscenza dei principi teorici su cui si basano le tecniche di misura; è anche opportuno avere piena consapevolezza dei loro limiti e del loro utilizzo in particolari condizioni geologico-ambientali (§ 4).

Le informazioni di questo report non sono esaustive di tutti i dettagli tecnico-scientifici riguardanti la ZNS. Il documento vuole fornire un primo insieme di elementi per una prospettiva di studio, da approfondire successivamente, su un comparto ambientale che riveste un ruolo determinante nelle implicazioni di sicurezza di un deposito superficiale di rifiuti radioattivi.

Il suolo e la ZNS sono i primi comparti ambientali interessati dalla migrazione di eventuali radionuclidi fuoriusciti in fase liquida o gassosa da un deposito superficiale per rifiuti radioattivi. Questa considerazione giustificherebbe già da sola un impegno nella caratterizzazione e monitoraggio del sistema. Sulla base di queste ed altre considerazioni, pare più che opportuno sviluppare un programma sperimentale di studio dell'insaturo, propedeutico alla vera e propria caratterizzazione e monitoraggio della futura area di deposito; lo scopo è quello di creare un insieme di competenze e conoscenze, che sarebbe oltremodo utile all'atto della localizzazione del Deposito Nazionale. In questo caso, pare utilissimo possedere una piena conoscenza dei principali fenomeni che interessano la dinamica idrica nella ZNS, una competenza tecnico-pratica sull'utilizzo degli strumenti di misura oggi disponibili e sull'applicazione dei dati rilevati nei codici di simulazione.

 Centro Ricerche Bologna	Sigla di identificazione SICNUC – PE46 - 002	Distrib. L	Pag. 5 di 54
---	--	---------------	--------------

1. La Zona Non Saturata nell'ambito di realizzazione del Deposito Nazionale per rifiuti radioattivi

La ZNS è la parte del sottosuolo all'interfaccia tra l'atmosfera ed il sottostante acquifero (o Zona Saturata) dove la porosità dei materiali è occupata contemporaneamente dalle fasi solida, liquida e gassosa¹. In un'accezione più prettamente fisica, la ZNS è il sistema tramite il quale avvengono gli scambi di massa ed energia tra la dinamica superficiale/atmosferica e i sistemi più profondi della crosta terrestre; è il luogo dove i processi di flusso (infiltrazione, evaporazione, traspirazione) contribuiscono a diversi fenomeni, tra cui la ricarica e la migrazione di inquinanti e nutrienti verso gli acquiferi. Per comprendere l'idrologia della ZNS è necessario considerare le interazioni tra tutte e tre le fasi in essa presenti, in particolare per le relative implicazioni modellistiche. Le tecniche di indagine sviluppate nell'ambito di discipline quali l'agronomia e l'idrogeologia possono essere efficacemente applicate per giungere ad una visione d'insieme del sistema, dei suoi rapporti con altri comparti ambientali e degli effetti diretti e indiretti dovuti alla realizzazione di un deposito superficiale di rifiuti radioattivi.

In passato le analisi di sicurezza degli impianti nucleari sono state realizzate prestando poca attenzione alla dinamica della Zona Non Saturata; solitamente, le considerazioni che la riguardano sono incluse nell'ambito di generici studi idrogeologici, che associano in modo semplicistico la dinamica idrica degli acquiferi a quella dell'insaturo. Infatti spesso sono stati utilizzati codici di simulazione nati espressamente per il moto dei fluidi in Zona Saturata, adattandoli in maniera approssimativa allo studio in Zona Non Saturata. Anche la documentazione bibliografica su queste tematiche non è così vasta.

1.1. La Zona Non Saturata nel contesto geologico ed ambientale di superficie

Dal punto di vista strettamente geologico, le caratteristiche della ZNS le permettono di esplicitare il ruolo di sistema-tampone (*buffer zone*), per la cattura delle specie chimiche in soluzione, e di sistema-filtro, per la loro modifica, tra la superficie del suolo/atmosfera e le acque sotterranee. Il suolo, parte fondamentale della ZNS, è altresì sede di fenomeni biologici fondamentali per la comunità delle specie viventi. Lo sviluppo dell'apparato radicale dei vegetali riveste notevole interesse per la capacità di cattura e trasferimento delle specie chimiche, quindi dei radionuclidi, e per la capacità di incidere sul bilancio idrico tramite la traspirazione. Infatti, in ambito modellistico, è opportuno tenere conto dell'impatto della vegetazione sul bilancio idrico stesso; aspetto che spesso è erroneamente tralasciato senza le opportune giustificazioni.

La ZNS è anche un sistema in grado di veicolare i gas in altri comparti ambientali, prima tra tutti l'atmosfera; si citano a tal riguardo le ben rinomate problematiche di produzione e trasporto dei biogas dalle tradizionali discariche superficiali di rifiuti convenzionali, dove gli effetti possono esplicarsi a distanze molto elevate dal luogo di produzione degli effluenti gassosi. Nell'ambito di un deposito superficiale di rifiuti

¹ Nel contesto della bibliografia internazionale di settore, la Zona Non Saturata è tipicamente definita con i termini "unsaturated zone", "zone of aeration" o "vadose zone". Alcuni autori hanno impiegato quest'ultimo termine per identificare, nell'ambito delle aree aride e semiaride, la zona più profonda del profilo insaturo, con elevata insaturazione. In questo documento si considererà il termine Zona Non Saturata in modo ampio, includendo tutto il profilo del sottosuolo dalla sua superficie alla superficie dell'acquifero, includendo anche la frangia capillare immediatamente sovrastante l'acquifero stesso.

radioattivi l'attenzione è comunque da porsi sulla tipologia di gas e sull'impatto radiologico esercitato sulla popolazione e sull'ambiente in un intorno ristretto del deposito stesso.

L'approccio comunemente utilizzato per analizzare gli aspetti idrologici della ZNS consiste nel considerare questo sistema come un continuum tra suolo, piante atmosfera, dove i flussi in ingresso ed uscita sono continui e regolati dai potenziali che si instaurano tra le diverse parti del sistema stesso. Gli strumenti creati per caratterizzarne e monitorarne la dinamica permettono di rilevare valori parametrici che devono essere considerati in stretta e vicendevole correlazione, per rappresentare al meglio l'aspetto di continuità tra la ZNS e gli altri comparti ambientali. Ad esempio, l'evaporazione da un suolo non può essere considerata indipendentemente dagli effetti concomitanti della traspirazione, così come l'effetto di migrazione di una specie chimica verso gli acquiferi, dovuto ad esempio ad un fronte di infiltrazione, non può prescindere dai fenomeni geochimici che intervengono all'interfaccia tra la fase fluida e quella solida; allo stesso modo, l'analisi della dinamica idrica nella ZNS mediante tecniche di geochimica isotopica non può non tenere conto degli input isotopici derivanti dalle acque meteoriche. Questi esempi sottolineano l'importanza di un'analisi approfondita ma complessiva del sistema e delle sue relazioni con i sistemi circostanti.

Lo spessore e la profondità limite della ZNS variano in funzione del contesto geologico e territoriale dell'area di studio, da alcuni metri a centinaia di metri. I principi che regolano la dinamica idrica e la migrazione degli inquinanti al suo interno non variano in funzione dello spessore; però le difficoltà e le risorse da impiegare sono ovviamente maggiori nel caso in cui si debba indagare su sistemi ad elevate profondità.

1.2. La Zona Non Saturata nel contesto del Deposito Nazionale per rifiuti radioattivi

La ZNS, come descritto nel precedente paragrafo, svolge un ruolo essenziale nell'ambito dei sistemi idrogeologici di superficie. Nell'ottica della realizzazione ed esercizio del Deposito Nazionale per rifiuti radioattivi, la ZNS così definita può costituire uno dei primi veicoli di migrazione dei radionuclidi nel sottosuolo, sia prevalentemente in forma liquida verso gli acquiferi, sia in forma gassosa verso la superficie del suolo e quindi verso l'atmosfera. Ma può anche espletare una funzione di contenimento dei radionuclidi, grazie alle sue proprietà fisico-chimiche; può quindi rappresentare una semplice, ma talvolta efficace, prima barriera geologica in caso di eventuale fuoriuscita di radionuclidi dal deposito. E' quindi fondamentale definire i principali parametri che influiscono sulla migrazione dei fronti di infiltrazione verso gli acquiferi, sia in termini di conducibilità idraulica non satura, sia in termini di capacità di cattura delle specie chimiche in soluzione; nel primo caso ci si riferisce alle variazioni di permeabilità nel non saturo in funzione del contenuto idrico, nel secondo caso ci si riferisce alla definizione dei coefficienti di distribuzione dei principali radionuclidi di interesse.

Nel seguito di questo paragrafo si analizzeranno in modo descrittivo i principali aspetti da considerare per quanto attiene:

- la ZNS nell'area adiacente il deposito;
- la ZNS sottostante il deposito.

Si evidenzieranno altresì le motivazioni per un accurato programma di caratterizzazione del mezzo, con alcuni utili riferimenti alle principali esperienze

internazionali del settore, che testimoniano gli sforzi compiuti da alcuni Paesi in tal senso.

La caratterizzazione della ZNS adiacente un deposito superficiale di rifiuti radioattivi è funzionale, come visto, agli aspetti di sicurezza ambientale legati alle attività correnti o future dell'impianto stesso, ma anche alla definizione dello "stato zero" dell'area. Caratterizzare il suolo e i sottostanti sedimenti non saturi è propedeutico alla comprensione dell'assetto ante-operam del sistema geologico-ambientale, nonché l'assetto del sito per la realizzazione delle future reti di monitoraggio, che non possono prescindere dall'ubicazione degli strumenti anche nella sezione più superficiale del profilo geologico.

Si è già descritta l'importanza di una valutazione complessiva dei fenomeni concomitanti nelle diverse matrici ambientali che si interfacciano con la Zona Non Saturata; atmosfera e acque sotterranee in particolare. E' opportuno individuare le correlazioni esistenti tra i vari sistemi; ad esempio gli effetti indotti dalla precipitazioni si devono quantificare dal punto di vista dell'impatto sull'infrastruttura nell'ottica dei fenomeni di lisciviazione e dal punto di vista del bilancio idrico dell'area, che deve essere quantificato in relazione all'infiltrazione e ai fenomeni evapotraspirativi, che possono costituire dei fenomeni preponderanti in certi contesti ambientali e stagionali. Questi fenomeni hanno un'ovvia ricaduta sulla potenziale migrazione di eventuali radionuclidi verso le acque sotterranee. Le metodologie per la valutazione quantitativa di questi fenomeni sono diverse e si basano anche su rilievi condotti con le tecniche e gli strumenti presentati nel successivo § 4.

Il suolo, come parte costituente della ZNS, è sede di importanti attività chimico-biologiche che coinvolgono flora e fauna; per questa ragione le contaminazioni in un intorno del sito di deposito si possono tradurre in una contaminazione diffusa verso la biosfera. Infatti, la caratterizzazione della ZNS con tutti i dettagli pedologici del caso è opportuna anche in riferimento al trasferimento dei radionuclidi dalla geosfera alla biosfera.

Nell'ambito degli studi da condurre per la caratterizzazione ed il monitoraggio della ZNS sottostante un deposito superficiale di rifiuti radioattivi, il discorso è più complesso. Una delle strategie adottate in ambito internazionale per la realizzazione di depositi di rifiuti, sia convenzionali che radioattivi, consiste nella localizzazione dell'infrastruttura in aree caratterizzate da una coltre di materiali non saturi, prevalentemente a bassa permeabilità, in grado di esplicare le funzioni di barriera fisica e geochimica per ridurre la migrazione di eventuali radionuclidi. La ZNS sottostante un'infrastruttura di deposito rappresenta quindi il primo sistema poroso con cui vengono in contatto eventuali radionuclidi che dovessero fuoriuscire da un deposito, soprattutto in soluzione liquida. L'utilizzo della ZNS come barriera di contenimento è un concetto ampiamente sviluppato ed adottato sia in ambito convenzionale che nucleare. In ambito nucleare, negli USA sono stati sviluppati interessanti programmi di studio a partire dagli anni '70 del novecento, individuando nella porzione rocciosa non satura dell'area di Yucca Mountain presso il deserto del Nevada, un sito idoneo per la realizzazione di un deposito geologico per rifiuti radioattivi [1]. Le indagini nel settore nucleare hanno ereditato parte delle conoscenze tecnico-scientifiche di altri settori di studio, quali l'agronomia, dove già da anni si promuovevano ricerche di settore per caratterizzare al meglio la dinamica idrica in un mezzo poroso non saturo; proprio da questi programmi di studio e dal concetto che un mezzo poroso non saturo può costituire una valida barriera alla diffusione dei radionuclidi, è stato sviluppato il progetto americano per la

realizzazione di un deposito nazionale di smaltimento dei rifiuti radioattivi ad alta attività e lunga vita, da ubicarsi nell'area suddetta.

L'idea che promuove la scelta dell'orizzonte non saturo per il contenimento di rifiuti radioattivi si basa sull'assunto che il contenimento di eventuali radionuclidi si può attuare aumentando il percorso che i radionuclidi devono compiere per raggiungere possibili target e rallentandone la velocità di migrazione. E' quindi ovvio che la presenza di materiali fini per spessori elevati, in un certo contesto geologico con ridotta circolazione idrica sotterranea, può assolvere ad entrambe le funzioni. A questo aspetto si aggiunge la mancanza di una completa saturazione del mezzo, che ostacola, come descritto nei successivi paragrafi, il movimento della fase liquida e dei radionuclidi verso la Zona Saturata. Oltre alle bassissime permeabilità che si possono riscontrare in taluni contesti geologici, un altro fattore che limita la migrazione dei radionuclidi è costituito dall'alternanza di sedimenti con differenti caratteri idraulici; questo proprietà del mezzo espleta ottime funzioni di barriera capillare all'interfaccia tra i differenti orizzonti, riducendo al minimo la componente convettiva della migrazione liquida. La ZNS può espletare anche un'importante funzione di barriera geochimica e di sistema tampone per la degradazione dei radionuclidi, consentendo il loro naturale decadimento; questo nel caso in cui ricorrano particolari condizioni, quali ad esempio la presenza di minerali argillosi, zeoliti o fasi mineralogiche con elevato coefficiente di distribuzione. Nelle condizioni sopra descritte, il sistema non saturo presenta ottime capacità di isolamento di un deposito per rifiuti radioattivi dall'ambiente esterno e può costituire una favorevole barriera naturale per il confinamento dei radionuclidi.

La ZNS nell'area di deposito può anche essere il luogo di installazione di una rete di monitoraggio radiologica, in grado di recepire i primi segnali di un'eventuale contaminazione; ben prima che questa raggiunga ad esempio le acque sotterranee, dove il deflusso verso altri target avviene a velocità decisamente superiori. Se si analizza la funzionalità di una rete di monitoraggio in questo ottica, la tempistica di identificazione di radionuclidi fuoriusciti dal deposito può favorire interventi più tempestivi rispetto ad una rete di monitoraggio in Zona Saturata. Si disporrebbe di uno strumento utile per una preventiva valutazione del rischio in caso di fuoriuscita di radionuclidi dal deposito, per l'attuazione di successive azioni correttive o di semplice monitoraggio, nonché di uno strumento in grado di valutare in modo indiretto l'integrità del deposito stesso.

Viste le precedenti considerazioni, è evidente la necessità di caratterizzare il sistema (ZNS) per garantire la sicurezza nel confinamento dei rifiuti radioattivi. Questa attività si deve basare su un accurato programma di indagini volto a definirne le caratteristiche fisico-idrologiche, geochimiche, e biologiche, organizzando coerentemente i dati che rappresentano il sistema idrogeologico, per creare un modello concettuale affidabile. Sono da evitare, per quanto possibile, le estrapolazioni dei valori parametrici derivanti da studi condotti in altri contesti geologico-ambientali ed adattati all'area prescelta per la realizzazione del deposito. Questo modello sarà poi implementato in un sistema di simulazione, per quantificarne l'evoluzione durante i periodi di esercizio e post-chiusura del deposito, nonché le sue interazioni con altri sistemi ambientali (acque sotterranee e atmosfera). La simulazione dovrà essere opportunamente calibrata con dati rilevati in situ per poterne valutare l'affidabilità. In questo senso, l'impiego di strumenti di caratterizzazione e monitoraggio riveste un ruolo primario non solo per quantificare i parametri numerici, ma anche per monitorare le variazioni di taluni parametri, che possono costituire un utile benchmark nelle attività di taratura dei codici di

simulazione (livello di falda, contenuto idrico, tensione matriciale ecc.). Sulle attività di simulazione si concentrano alcune difficoltà, legate alle problematiche di modellazione in mezzi a bassissima permeabilità e di quantificazione degli scambi con le altre matrici ambientali con cui la ZNS è in stretta interazione. Un primo approccio per ridurre le problematiche consiste nella creazione di un modello semplificato del sistema idrogeologico, da affinare per iterazioni successive.

Il monitoraggio della Zona Non Saturata deve essere concepito come la raccolta di tutte le evidenze in grado di verificare che l'impatto del deposito sia quello previsto in fase di analisi preventiva di sicurezza. Il monitoraggio può essere correttamente eseguito solo in seguito ad un'approfondita caratterizzazione del sistema.

La caratterizzazione ed il monitoraggio del mezzo non saturo sono anche giustificabili sulla base degli studi condotti dalle organizzazioni internazionali per promuovere una soluzione affidabile per lo smaltimento dei rifiuti radioattivi. In un recente rapporto realizzato nell'ambito del *Nuclear Energy Agency* del OECD, sulla comunicazione degli aspetti di sicurezza nella realizzazione di un deposito geologico, il monitoraggio delle matrici ambientali rappresenta uno dei temi principali emersi per giungere ad una corretta comunicazione al pubblico e agli stakeholder in genere [2]. Le medesime conclusioni possono essere ovviamente estrapolate per un deposito superficiale, vista l'attenzione dell'opinione pubblica su questi temi e su qualsiasi argomentazione legata all'inquinamento delle matrici ambientali con cui le persone hanno maggiormente contatto nella vita di ogni giorno: acqua, suolo e aria.

1.3. Esperienze internazionali sulla caratterizzazione e monitoraggio della Zona Non Saturata in ambito nucleare

In ambito internazionale, le poche attività di caratterizzazione e monitoraggio della ZNS sono state sviluppate per valutare la sicurezza dei depositi superficiali nella loro complessità, ereditando metodologie e tecniche dai tradizionali studi condotti nel campo agronomico e idrogeologico. Gli studi sul non saturo, a meno di alcune eccezioni, non hanno rivestito un ruolo determinante sulle considerazioni di sicurezza degli impianti nucleari; spesso sono stati inclusi sommariamente nelle attività di modellazione idrogeologica di un sito, senza tenere in debito conto l'importanza che il sistema riveste nella migrazione dei radionuclidi.


I suoli sono stati accuratamente studiati per le ripercussioni sul trasferimento dei radionuclidi dalla geosfera alla biosfera ed ai vegetali in particolare, ma poca attenzione è stata rivolta a quantificare l'effetto di ritardo nella diffusione dei radionuclidi esercitato dai sedimenti non saturi, preferendo sottostimarne gli effetti, per un approccio di tipo cautelativo. In altri casi, vista la complessità del sistema da indagare e le limitate risorse a disposizione, si è approssimato l'insieme dei fenomeni introducendo semplici fattori di ritardo nella migrazione dei radionuclidi. Nei pochi contesti dove sono state impiegate adeguate risorse per l'analisi di questo comparto ambientale, le motivazioni che hanno spinto i tecnici ad attuare delle adeguate campagne di rilievo sono quelle precedentemente esposte. Le indagini nell'insaturo sono state eseguite in modo approfondito in contesti in cui lo smaltimento dei rifiuti radioattivi meno pericolosi (VLLW e LLW) è stato effettuato in attinenza con lo smaltimento di rifiuti convenzionali, cioè in depositi superficiali concepiti per discariche tradizionali, senza un vero e proprio sistema di barriere ingegneristiche; in tal caso, le considerazioni sulla sicurezza del sito non potevano prescindere dalle informazioni sulla Zona Non Saturata, primo veicolo di migrazione dei radionuclidi [3].

Negli USA la caratterizzazione della ZNS per il deposito geologico di Yucca Mountain vanta decenni di esperienze teoriche e sperimentali e rappresenta uno dei migliori studi condotti in tal senso per le finalità di smaltimento di rifiuti radioattivi [4]. Nonostante le finalità del progetto siano volte alla realizzazione di un deposito geologico profondo (circa 750 m dalla superficie del suolo) per lo smaltimento di rifiuti ad alta attività, alcuni aspetti idrogeologici del non saturo possono costituire un valido esempio nell'ambito della realizzazione di un deposito superficiale. Le indagini in questo caso sono state indirizzate alla caratterizzazione di un sistema roccioso non saturo potente centinaia di metri, costituito da tufi vulcanici miocenici in gran parte cementati, in un'area semiarida con debole infiltrazione di acque meteoriche; queste caratteristiche sono propedeutiche alle considerazioni sulla sicurezza intrinseca del sito, visto che la scarsa presenza di acque di infiltrazione, associata alla capacità di barriera offerta dalle litologie presenti, limita fortemente il potenziale contatto tra le strutture di deposito e le acque di infiltrazione. La profondità, la complessità stratigrafica e lo spessore della formazione rocciosa l.s. è tale che sono state impiegate risorse considerevoli per definire un modello concettuale appropriato del sistema idrogeologico, cui successivamente sono stati applicati i codici di simulazione, con elevato dettaglio [5].

Un approccio integrale di analisi della dinamica della ZNS per un deposito superficiale già esistente è stata condotta per il sito Beatty (*Burial Site*) ubicato nello stato del Nevada, USA, che ospita rifiuti radioattivi a bassa attività in apposite trincee. Nell'area la ZNS raggiunge uno spessore compreso tra 60 m e 90 m ed è costituita, a differenza del precedente caso studio, da sedimenti incoerenti e poco consolidati, costituiti da ghiaie e sabbie limose con intercalazioni argillose; un quadro stratigrafico non dei più favorevoli per lo stoccaggio di rifiuti radioattivi, ma inserito in una regione arida, dove gli apporti meteorici e di infiltrazione superficiale sono molto ridotti. Lo scopo dello studio è stato infatti quello di determinare il movimento verticale delle acque di infiltrazione e di potenziali radionuclidi lisciviati dai rifiuti e veicolati verso gli acquiferi sottostanti. In questo caso lo studio è stato condotto con una visione d'insieme delle relazioni esistenti tra la ZNS e le altre matrici ambientali con cui è in relazione [6]. Ulteriori interessanti analisi di questo sito sono state condotte per il movimento di gas radioattivi attraverso l'insaturo, a seguito di problemi di contaminazione delle acque sotterranee [7].

Un altro importante caso di studio relativo alla migrazione dei radionuclidi nell'insaturo riguarda le indagini condotte per il deposito *Richard II*, per rifiuti classificati come LLW, nella Repubblica Ceca. La definizione dei parametri di caratterizzazione idrogeologica è stata funzionale all'applicazione del codice di simulazione SUTRA, al fine di verificare gli effetti esercitati dal mezzo non saturo sulla migrazione degli inquinanti e la loro successiva progressione verso l'acquifero [8].

L'applicazione di studi isotopici ha guidato le indagini di caratterizzazione del sito di Stabatske, per la localizzazione del futuro deposito nazionale per rifiuti radioattivi a bassa attività in Lituania [9]. L'applicazione di tecniche di tracciamento utilizzando isotopi naturali ha permesso di definire la dinamica idrica della ZNS e le sue relazioni con gli acquiferi superficiali; infatti le variazioni isotopiche indotte su isotopi stabili della molecola d'acqua possono dare importanti informazioni circa l'infiltrazione dalla superficie, l'evapotraspirazione e la migrazione verso la falda (come riportato nel successivo § 4.5). In questo caso sono stati analizzati i principali aspetti idrologici del continuum atmosfera-suolo-falda, partendo dai segnali isotopici delle precipitazioni.

 Centro Ricerche Bologna	Sigla di identificazione SICNUC – PE46 - 002	Distrib. L	Pag. 11 di 54
---	---	----------------------	------------------

Sempre nel contesto europeo, alcune indagini sono state compiute per caratterizzare l'effetto barriera espletato dalla spessa coltre di argille e loess che costituiscono il sottosuolo non saturo del sito di Saligny, in Romania, per la localizzazione di un deposito di rifiuti radioattivi a bassa e media attività. Le indagini geochimiche e l'utilizzo di vari codici di simulazione, in seguito ad un'approfondita caratterizzazione idrologica dell'area, hanno verificato il ruolo di contenimento offerto dalla presenza dei materiali porosi non saturi, a bassa permeabilità, di natura loessica, per una potenza di circa 40-45 m [10]. In questo sito particolare attenzione è stata condotta alla migrazione del Trizio, che trova nel mezzo insaturo il primo e più importante veicolo di trasferimento verso l'atmosfera e la biosfera [11].

In quest'ultimo studio [12] risulta evidente l'importanza di indagini condotte direttamente in situ e dell'impiego di tecniche di rilievo complementari per giungere ad una corretta caratterizzazione della Zona Non Saturata, in un'area proposta per la localizzazione di un deposito superficiale di rifiuti radioattivi a bassa e media attività in Bulgaria, nel sito Marichin-Valog. I dati ottenuti dalle indagini dirette e indirette sono stati poi utilizzati per le attività di simulazione della dinamica idrica, utilizzando specifici software. E' interessante evidenziare le difficoltà emerse nel rilievo di parametri, quali la conducibilità idraulica, utilizzando diverse tecniche.

In altri casi, le indagini per la caratterizzazione ed il successivo monitoraggio della ZNS sono state obbligatoriamente condotte in seguito a fenomeni di contaminazione radioattiva, che nel tempo hanno raggiunto la falda e sono stati individuati, ex-post, dalla rete di monitoraggio, come nel caso di Sellafield, UK [13].

2. Fenomeni e parametri caratterizzanti la dinamica idrica nella Zona Non Saturata

Nel seguito saranno analizzati i principi fisici e idrologici che regolano la dinamica idrica nella Zona Non Saturata, con particolare riferimento ad un mezzo poroso non saturo a permeabilità primaria.

2.1. Aspetti fisico-idrologici di un mezzo poroso non saturo

In un mezzo poroso in condizioni di mancata saturazione, la tendenza delle molecole d'acqua è quella di legarsi alle pareti esterne dei granuli che costituiscono la fase solida, per effetto delle forze di adesione liquido-solido, a cui si associano le forze di coesione tra le singole molecole di acqua, che tendono ad addossarsi vicendevolmente per costituire livelli idrici concentrici sulle pareti del granulo. Le tensioni che si generano sono favorite anche dalle specie ioniche presenti in soluzione e dalle particelle elettricamente cariche presenti sulla superficie esterna dei granuli, con effetti più pronunciati in presenza di minerali argillosi o di specie chimiche fortemente dipolari. La fase liquida aderisce alle pareti dei granuli costituendo un sottile film, con spessore variabile in funzione del contenuto idrico presente. Questo è l'assunto fondamentale da cui dipende la dinamica idrica nella ZNS e da cui nasce la complessità insita nel suo studio.

Le forze con cui le molecole di acqua aderiscono alla matrice solida possono essere espresse in termini energetici come potenziale per unità di volume (potenziale matriciale, φ_m), cioè l'energia necessaria per lo spostamento di un volume o di una massa unitaria di acqua. Esprimendo il potenziale per unità di volume, lo si può facilmente ricondurre, dal punto di vista dimensionale, ad un valore di pressione: nei mezzi porosi non saturi il valore è sempre negativo e può essere definito "tensione matriciale" oppure "tensione capillare" o semplicemente "suzione"; questa rappresenta indirettamente la forza con cui le molecole di acqua sono trattenute nei pori. Dal punto di vista dimensionale, in un terreno non saturo, nelle normali condizioni ambientali, la tensione matriciale è normalmente espressa in *mbar*, *cm_H₂O* o *kPascal*. Il suo valore assoluto è inversamente proporzionale al contenuto idrico: un aumento del valore assoluto di tensione nel terreno indica una riduzione del contenuto idrico o umidità; al contrario, un aumento dell'umidità comporta una riduzione del valore assoluto della tensione, che converge a zero in caso di saturazione. In genere la tensione si annulla anche se l'acqua non ha completamente saturato i pori del mezzo, perché una certa quantità di fase gassosa rimane sempre intrappolata nel sistema.

Per completezza di informazione, è opportuno evidenziare, nonostante sia ininfluenza nella maggior parte delle considerazioni che seguiranno, che il potenziale idrico totale nell'insaturo dovrebbe anche tenere conto di altre componenti:

- la componente gravitazionale, dovuta al relativo campo in cui il mezzo è inserito (φ_g);
- la componente cinetica (φ_c), dovuta alla velocità del fluido nel mezzo poroso (trascurabile viste le ridotte velocità in gioco);

- la componente osmotica (φ_o), dovuta agli ioni disciolti in acqua e alla stessa polarità delle molecole d'acqua, che esercitano forze chimiche ed elettrostatiche;
- la componente idrostatica/pneumatica (φ_i), dovuta alla presenza delle fasi gassose.

Il potenziale risultante che insiste su un volume unitario di liquido in un mezzo insaturo si può quindi esprimere con la relazione

$$\varphi_R = \varphi_m + \varphi_g + \varphi_c + \varphi_o + \varphi_i \quad (1)$$

Come detto, questi ultimi termini sono ininfluenti e quindi trascurabili nella maggior parte dei rilievi sperimentali atti a individuare i principali parametri idrologici. Per quanto riguarda la tensione osmotica, la sua rilevanza può non essere trascurabile in caso di apporto di soluzioni altamente saline, quali la presenza di acque salmastre in superficie o, in particolari contesti geologici, la risalita di acque ad elevata concentrazione di ioni disciolti; in tal caso, il rilievo delle tensioni matriciali di cui ai successivi paragrafi deve essere opportunamente modulato tenendo conto anche di questo fattore.

2.2. Curva di ritenzione idrica e curva di conducibilità idraulica

Il precedente paragrafo ha illustrato per sommi capi quali sono le implicazioni fisiche e idrologiche dovute alla mancata saturazione di tutta la porosità disponibile all'interno di un mezzo poroso. Esiste una relazione non lineare tra la tensione matriciale di un mezzo poroso non saturo (h) e il suo contenuto idrico (θ), che viene normalmente espressa mediante una funzione che lega i due parametri, definita curva di ritenzione idrica o *Soil-Water Retention Curve*, nella letteratura internazionale di settore (Figura 1).

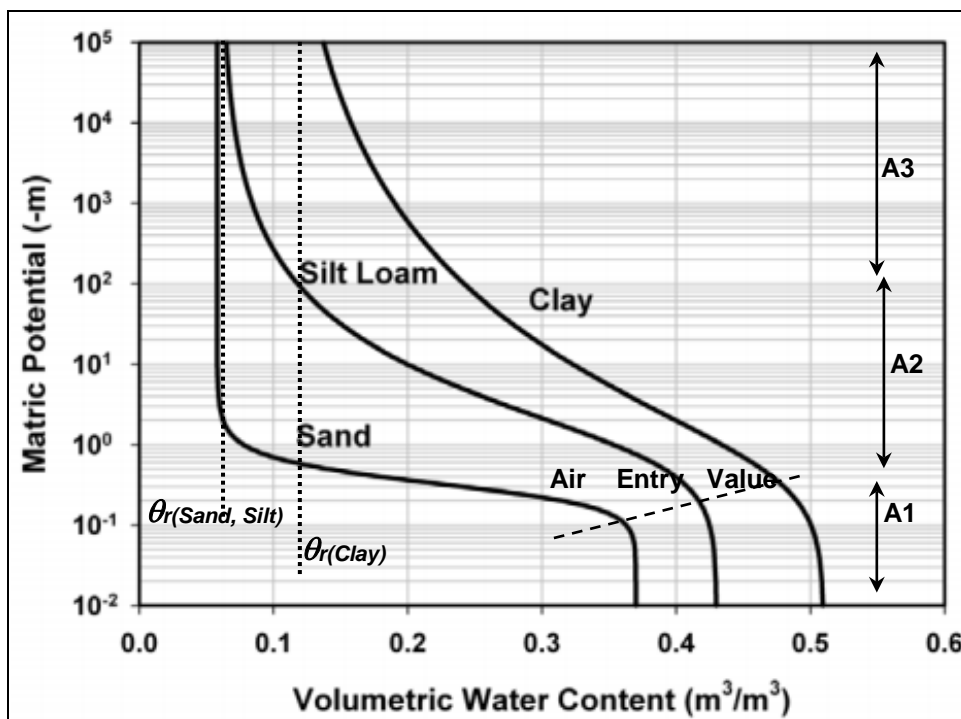


Figura 1. Curve esemplificative della relazione tra contenuto idrico e tensione matriciale per differenti sedimenti [14].

La curva di ritenzione idrica varia in funzione della tipologia di suolo e può essere costruita sperimentalmente misurando i valori dei due parametri con le medesime condizioni al contorno. Per la precisione, le curve sono due per ogni mezzo poroso, visto che per il fenomeno di isteresi di cui al seguito, h e θ assumono coppie di valori differenti in funzione del fenomeno in corso: inumidimento o essiccamento del mezzo.

Nella Figura 1 è evidente come, all'aumentare del grado di saturazione, la pendenza della curva tenda a diminuire fino ad un valore cosiddetto di tensione di ingresso dell'aria (*air entry value*); questo valore di pressione rappresenta il punto in cui l'aria tende a penetrare nelle porosità del mezzo insaturo sostituendo la fase liquida (essiccamento) o a ritirarsi dalle porosità del mezzo lasciando spazio alla fase liquida (inumidimento). E' altresì evidente la differente morfologia delle curve rappresentate: nelle granulometrie più fini prevale una buona proporzionalità tra la riduzione del contenuto idrico e l'aumento del valore assoluto della tensione matriciale. Per le granulometrie sabbiose, si apprezza invece un'evidente asimmetria, con una forma a "S" molto pronunciata: esiste un campo di valori (tra 0,09 e 0,35 circa in Figura 1) dove la riduzione del contenuto idrico comporta delle ridotte variazioni di tensione matriciale. Questo avviene perché nei suoli a granulometria grossolana (sabbie di Figura 1), in cui la dimensione dei pori è maggiore e questi presentano un'ottima continuità, l'acqua può facilmente fuoriuscire durante la fase di desaturazione; ne consegue che, superato il punto di ingresso dell'aria, il sistema si desatura velocemente in un intervallo di variazione delle tensioni matriciali abbastanza ristretto. Il processo è meno marcato per la curva che rappresenta le argille.

In un mezzo poroso, le differenti classi granulometriche portano alla formazione di pori con differenti dimensioni, che si possono classificare con i termini micro, meso e macropori. Durante il processo di essiccamento, i pori più piccoli tendono a mantenere intrappolata la frazione liquida al loro interno, anche per bassi valori assoluti della tensione matriciale (area A1 di saturazione capillare in Figura 1, riferita alla curva *silt loam*); quindi una riduzione del potenziale non comporta variazioni apprezzabili del contenuto idrico, visto che la ritenzione dell'umidità sulle pareti dei pori è favorita dalle forze di adesione. Questa situazione permane approssimativamente fino a che la tensione non raggiunge il valore della tensione di ingresso dell'aria, in cui inizia l'entrata della fase gassosa nelle porosità. La fase successiva è rappresentata dall'area di desaturazione in cui la fase gassosa sostituisce progressivamente la fase liquida; in questo contesto, ad una riduzione del contenuto idrico, corrisponde una riduzione della tensione matriciale, più o meno marcata in funzione della tipologia del suolo (area A2). Il processo di desaturazione continua fino ad un punto in cui, anche se continua la diminuzione della tensione matriciale, non si verifica un'apprezzabile riduzione del contenuto idrico; questo avviene nell'area di saturazione residua, oltre il punto di saturazione residua, proprio di ciascun sedimento ($\theta_{r(Clavy)}$, $\theta_{r(Sand, Silt)}$, area A3). La tensione non è sufficiente a drenare completamente la fase liquida: il flusso è quindi nullo, sebbene possano verificarsi movimenti di tipo gassoso in entrata e in uscita dal sistema. Il contenuto idrico residuo può essere quindi definito come la quantità d'acqua che non contribuisce al flusso perché è legata in modo indissolubile alle pareti dei granuli o per assenza di continuità tra i micropori; può essere anche definita come la quantità d'acqua che permane nelle microporosità e perde la sua capacità di rispondere alle variazioni di gradiente idraulico.

Durante la fase di inumidimento di un mezzo insaturo, ad esempio per infiltrazione dalla superficie di un suolo, il massimo contenuto idrico che può colmare i pori presenti viene definito contenuto idrico alla saturazione (θ_s in Figura 2, esemplificativa dal punto di vista qualitativo). Come si può osservare, una parte, seppur minima, della porosità continua a rimanere occupata dalla fase gassosa anche dopo saturazione.

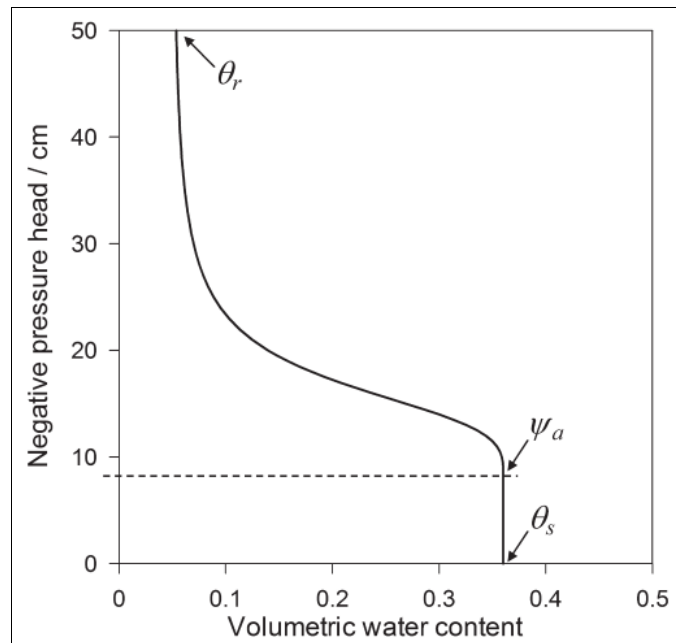


Figura 2. Rappresentazione dei parametri di tensione di ingresso dell'aria (ψ_a), contenuto idrico alla saturazione (θ_s), contenuto idrico residuo (θ_r), in una curva di ritenzione idrica di un generico sedimento [15].

La relazione tra contenuto idrico residuo e alla saturazione può essere così espressa:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2)$$

dove il termine S_e è un parametro adimensionale, definito "Saturazione efficace" che rappresenta il grado di saturazione normalizzato rispetto ai valori estremi di contenuto idrico nel mezzo poroso.

L'umidità in un mezzo non saturo influenza la tensione matriciale, ma anche la permeabilità del mezzo. Analizzando il moto dei fluidi all'interno delle sue porosità, il sottile film che avvolge le particelle solide rappresenta l'unico mezzo in cui può avvenire la migrazione della fase liquida. In maniera semplicistica si può affermare che, a differenza di un mezzo saturo, il percorso che il fluido deve compiere è nettamente più tortuoso, visto che non è svolto in linea retta tra i due ipotetici baricentri di due pori contigui. Maggiore è la saturazione liquida (umidità) del mezzo, minore sarà la tortuosità del percorso dei filetti fluidi. Definendo sommariamente la permeabilità come la propensione di un mezzo poroso a farsi attraversare da una fase liquida, è evidente come questo parametro sia strettamente legato alla contenuto idrico già presente nel mezzo. Ne consegue che la permeabilità nell'insaturo è direttamente proporzionale al contenuto idrico e quindi è indirettamente proporzionale al valore assoluto della tensione matriciale.

In caso di completa saturazione, la conducibilità idraulica raggiunge i valori più elevati e viene definita conducibilità idraulica alla saturazione (K_s). In suoli completamente secchi, il parametro può raggiungere valori che sono di alcuni ordini di grandezza inferiori rispetto al valore K_s .

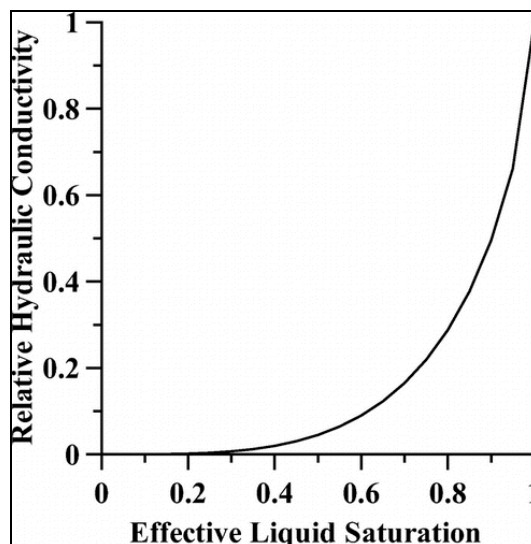


Figura 3. Rappresentazione qualitativa della curva di conducibilità idraulica di un mezzo poroso [16].

E' importante evidenziare che la non continuità tra pori adiacenti in un mezzo poroso, comporta la non permeabilità del mezzo; se nel mezzo saturo la discontinuità tra pori è dovuta alla presenza di pori non fisicamente connessi (come accade per i materiali ultrafini), nel mezzo non saturo la non continuità può essere dovuta anche alla mancanza di un continuum tra i film idrici che circondano i granuli della matrice, per ridotto contenuto idrico. Da qui si apprezza come la permeabilità sia un concetto da separare nettamente dalla porosità e da correlare invece al contenuto idrico. Anche se in misura minore nelle normali condizioni ambientali, la permeabilità di un mezzo poroso può anche essere influenzata dalla temperatura (visto che incide sulla viscosità del fluido), dall'attività dei microorganismi (che possono ostruire i pori intergranulari), dal contesto chimico-fisico (che può portare alla precipitazione di soluti, in grado di ridurre la continuità tra i pori stessi o modificare la coesione e la struttura della frazione solida).

La determinazione del valore della permeabilità saturo dovrebbe essere riferita sempre a materiali indisturbati, eventualmente con misure condotte in situ. Le misure di laboratorio, ad esempio con permeametri, forniscono valori accettabili per materiali con tessiture medio-grossolane, mentre è molto meno affidabile la medesima misura su materiali fini, dove esiste una maggiore variabilità nella distribuzione delle granulometrie e dove delle piccole variazioni del contenuto idrico alla saturazione, inducono importanti variazioni della K_s , anche di vari ordini di grandezza. A questo si aggiunge il problema della rappresentatività del dato: le proprietà strutturali del suolo quali macroporosità e fessurazioni, influenzano pesantemente la conducibilità; questi caratteri possono variare sensibilmente nello spazio indagato e di conseguenza i campioni eventualmente prelevati possono essere poco rappresentativi del sistema nel suo complesso. Per tale ragione è preferibile misurare la conducibilità idraulica non a saturazione, cercando di costruire una curva sperimentale in funzione del contenuto idrico nell'ambito della

parziale saturazione. Un discorso analogo lo si può effettuare per il contenuto idrico a saturazione θ_s .

Riassumendo i concetti precedentemente esposti, è possibile evidenziare come le relazioni fondamentali che regolano i flussi idrici in un mezzo non saturo riguardino la curva di ritenzione idrica e la curva di conducibilità idraulica. Queste possono essere associate tenendo conto della legge di Darcy, per il moto dei fluidi in un mezzo saturo, dove il flusso è proporzionale alla permeabilità del mezzo, alle differenze di carico idraulico e alla sezione attraversata, secondo la ben nota relazione:

$$q = K \times \frac{\Delta h}{l} \times A \quad (3)$$

L'equazione di Darcy, associata alla legge di conservazione della massa, porta alla definizione dell'equazione di Richards, per rappresentare il moto dei fluidi in mezzi porosi non saturi, che tiene conto della relazione tra contenuto idrico (θ), tensione matriciale (h) e conducibilità idraulica (K)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \times \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (4)$$

per flusso monodimensionale [17]. Questa relazione presenta dei limiti in presenza di macroporosità, che possono costituire vie preferenziali per il flusso, e trascura i fenomeni di isteresi di cui al seguito.

2.3. Approfondimenti sull'idrologia dei mezzi porosi non saturi

2.3.1. Cenni sulle problematiche del flusso idrico in un mezzo non saturo a doppia porosità

L'equazione di Richards possiede dei limiti nel rappresentare il moto dei fluidi in un mezzo poroso con macroporosità o vie preferenziali di flusso; ad esempio per la presenza di clasti sovradimensionati rispetto alla granulometria media del mezzo, di fessurazioni di varia natura, di biopori legati all'attività radicale dei vegetali o di altri organismi, ecc. In queste vie preferenziali di flusso il moto di filtrazione è generalmente caotico, turbolento e non può essere efficacemente descritto dalla teoria precedentemente esposta. La definizione di macroporo è controversa e spesso riferita al solo aspetto dimensionale; questo può essere un criterio poco utile in un'ottica relativa, cioè rispetto alla granulometria prevalente di un sedimento: in un materiale argilloso, i macropori possono avere dimensioni tali da non essere considerati macropori per un suolo di tipo sabbioso. E' quindi più utile ricondurre il concetto di macroporosità alla presenza di vie preferenziali di flusso. Una disamina riassuntiva dei principi che regolano il moto all'interno delle macroporosità, ancora attuale nonostante l'anno di pubblicazione, è riportata in [18].

Le vie preferenziali di flusso sono maggiori in prossimità della superficie del suolo, dove svolgono un ruolo primario nell'infiltrazione delle acque superficiali e quindi nel trasporto di eventuali radionuclidi; in caso di infiltrazione diretta dalla superficie, si genera un inumidimento differenziale del fronte di infiltrazione, come diretta conseguenza del fatto che i fluidi si muovono a velocità differente in diverse porzioni del mezzo. Si raggiunge quindi un inumidimento degli strati più bassi del mezzo poroso, in modo molto più efficace di quanto non faccia il flusso matriciale all'interno delle microporosità.

Il flusso nelle vie preferenziali riveste una notevole importanza laddove le discontinuità costituiscono una parte rilevante della struttura del mezzo. Due esempi possono essere esplicativi; nel caso di vie preferenziali di flusso estese lungo tutto il profilo dell'insaturo, la quantità di soluti che può infiltrarsi negli orizzonti più profondi può eccedere sensibilmente le quantità originariamente previste in assenza di discontinuità nel mezzo. Allo stesso tempo, il flusso nelle discontinuità può falsare le previsioni sull'entità dei fenomeni di infiltrazione ed evapotraspirazione degli orizzonti pedologici, effettuata studiando le variazioni dei segnali degli isotopi stabili nella molecola d'acqua; infatti le vie preferenziali di flusso possono portare in profondità un segnale isotopico differente rispetto al segnale isotopico custodito nelle molecole che persistono nell'acqua matriciale, perché la velocità con cui avviene l'infiltrazione nei macropori non permette una miscelazione con l'acqua nei micropori.

I flussi nelle discontinuità possono essere anch'essi modellizzati, con codici che prevedono specifiche opzioni per gestire il sistema di studio con una singola o una doppia porosità-permeabilità². Sulla base dell'approccio concettuale e dei relativi sistemi adottati, è possibile una prima efficace distinzione tra i modelli a doppia porosità e i modelli a doppia permeabilità:

- i modelli a doppia porosità prevedono il moto advettivo dei fluidi principalmente all'interno delle vie preferenziali di flusso, mentre le microporosità sono intese come "volume utile allo stoccaggio" del contenuto idrico e dei soluti; la migrazione dei soluti può però avvenire per diffusione attraverso entrambi i sotto-sistemi in cui sono divise le porosità;
- i modelli a doppia permeabilità prevedono il moto advettivo sia all'interno dei macropori che dei micropori e una relazione di interfaccia tra i due sotto-sistemi; il sistema delle microporosità è quindi parte attiva nel trasferimento della fase liquida e dei soluti, sia per diffusione che per advezione.

A titolo esemplificativo si descrivono due approcci alla modellazione, elaborati per sistemi a doppia porosità. Il primo approccio è riportato in [19] ed è consistito per l'appunto nella separazione concettuale delle porosità in due sotto-sistemi, caratterizzati da precisi parametri idraulici e di trasporto, implementando il moto dei fluidi solo per le macroporosità, mediante leggi di trasporto di massa. I due sotto-sistemi sono poi vicendevolmente correlati mediante funzioni per lo scambio diffusivo. Il secondo è riportato in [20], implementando un modello che utilizza la teoria della propagazione dell'onda cinematica, per poter descrivere il movimento dell'acqua nelle macroporosità. L'approccio è abbastanza semplice, perché trascura totalmente le forze capillari e quindi la ritenzione idrica sulle pareti dei granuli, con tutte le relative approssimazioni del caso.

I modelli a doppia permeabilità sono più complessi rispetto ai precedenti, dovendo descrivere un flusso convettivo sia all'interno delle microporosità che delle macroporosità; però questo approccio rispecchia in modo abbastanza fedele i fenomeni nei mezzi porosi non saturi. Anch'essi fanno uso di alcune approssimazioni, quali ad esempio le geometrie regolari assunte per le macroporosità.

La breve analisi riportata evidenzia che solo mediante una dettagliata caratterizzazione della ZNS è possibile stabilire se adottare un modello di

² Il merito dello sviluppo di questo tipo di modelli è da ricondurre all'ingegneria petrolifera, da cui poi i modelli sono stati in parte trasferiti, almeno concettualmente, alla geologia degli acquiferi, per lo studio e la tutela delle acque sotterranee.

rappresentazione del flusso, basato su singola o doppia porosità/permeabilità, in funzione della presenza di vie preferenziali di flusso.

2.3.2. L'isteresi nella dinamica idrica nei mezzi porosi non saturi

In un mezzo poroso non saturo il fenomeno di isteresi può essere definito come la differenza tra la relazione che descrive il rapporto tensione-contenuto idrico durante un processo di inumidimento e la medesima relazione durante un processo di essiccamento. Dal punto di vista matematico, il contenuto in acqua non è legato in modo univoco alla tensione da una sola funzione, ma bensì da due funzioni, che dipendono dalla storia pregressa del mezzo poroso, quindi indirettamente dall'alternanza dei fenomeni di inumidimento, essiccamento. Dal punto di vista fisico, il fenomeno di isteresi è da ricondurre alla disuniformità geometrica dei pori (dimensione e forma), alla presenza di aria intrappolata nei pori stessi e alle modifiche indotte durante il processo di inumidimento, essiccamento alla superficie di contatto tra aria e acqua.

L'isteresi non si limita solo ad influenzare la relazione tra contenuto idrico e tensione matriciale, ma anche la relazione tra contenuto idrico e conducibilità, anche se in modo meno pronunciato e in parte trascurabile per gran parte dei mezzi porosi nelle normali condizioni ambientali.

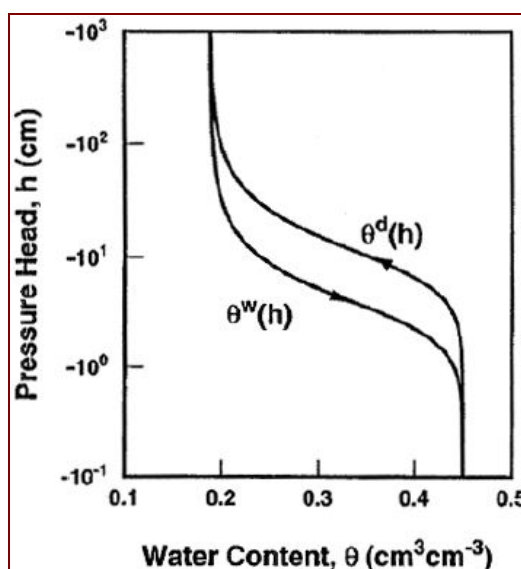


Figura 4. Schema qualitativo della curva di ritenzione idrica per i fenomeni di inumidimento ed essiccamento di un terreno non saturo; $\theta^w(h)$ rappresenta la curva di ritenzione principale di inumidimento (*main wetting curve*) e $\theta^d(h)$ rappresenta la curva di ritenzione principale di essiccamento (*main drying curve*).

In Figura 4 è rappresentato il fenomeno: nel processo di essiccamento del terreno, con conseguente riduzione del contenuto idrico (θ) e di aumento del valore assoluto della tensione matriciale (h), la distribuzione delle coppie di valori (θ , h) segue un percorso definito curva principale di essiccamento (*main drying curve*). Nel processo di inumidimento, con aumento del contenuto idrico e riduzione del valore assoluto della tensione matriciale, le coppie di valori (θ , h) seguono un percorso definito curva principale di inumidimento (*main wetting curve*). A parità di tensione matriciale, il contenuto di acqua trattenuto nel mezzo poroso è inferiore durante il

processo di inumidimento, rispetto al contenuto d'acqua trattenuto durante il processo di essiccazione. Il passaggio dall'una all'altra curva avviene lungo curve definite *scanning curves*, non in modo casuale nell'area compresa tra le due curve principali (Figura 5).

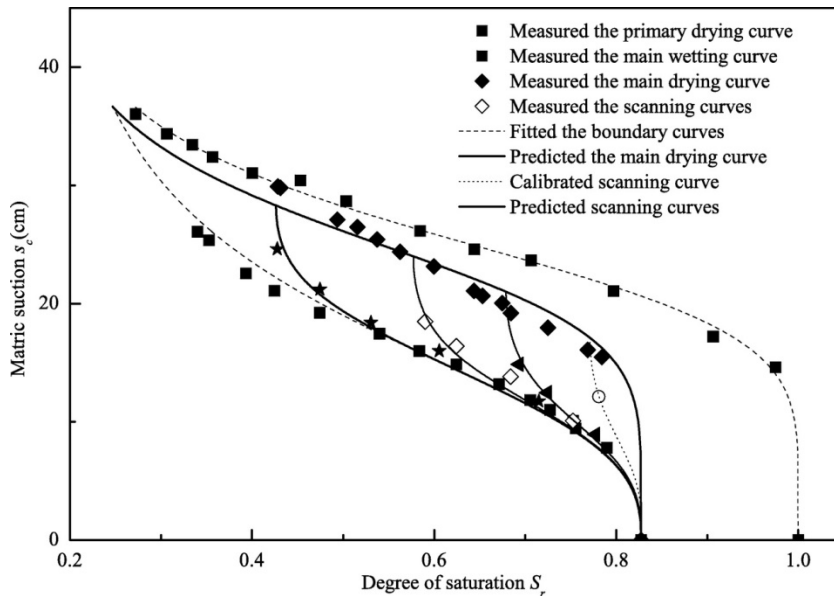



Figura 5. Rappresentazione delle *scanning curves* nel fenomeno di isteresi per un mezzo poroso insaturo [21].

Il fenomeno può anche essere così interpretato: durante le fasi di infiltrazione ed aumento del contenuto idrico, le forze di ritenzione che legano le molecole di liquido alle pareti dei granuli favoriscono il movimento del liquido stesso, mentre vi si oppongono durante le fasi di essiccazione. Questi effetti sono ulteriormente pronunciati in caso di terreni a bassissima permeabilità, che trattengono fasi gassose al loro interno, o in caso di fenomeni di rigonfiamento-contrazione della matrice solida (tipico della presenza di minerali argillosi).

Anche nel caso dell'isteresi i modelli di simulazione dimostrano alcuni limiti, visto che simulare questi due fenomeni in condizioni differenti è difficoltoso; spesso si trascura il fenomeno per approcciare il problema in modo approssimativo, ma con risultati altrettanto approssimativi.

 Centro Ricerche Bologna	Sigla di identificazione SICNUC – PE46 - 002	Distrib. L	Pag. 21 di 54
---	--	---------------	------------------

3. I modelli di relazione tra contenuto idrico, tensione matriciale e conducibilità idraulica nella Zona Non Saturata

L'applicazione di un modello analitico per risolvere l'equazione di Richards (4) è ristretta ad un numero di sistemi relativamente semplici. Normalmente la risoluzione è affidata ad approcci numerici che approssimano una soluzione in modo soddisfacente, tramite l'implementazione di metodi alle differenze finite o agli elementi finiti.

L'equazione di Richards prevede la conoscenza delle funzioni di conducibilità idraulica e di ritenzione idrica, cioè gli aspetti più complessi della dinamica idrica nella ZNS. L'accuratezza con cui è approssimata la soluzione numerica dell'equazione di Richards dipende dal modello utilizzato per definire queste funzioni tra tensione matriciale, umidità e conducibilità idraulica. I codici di simulazione dedicati al moto dei fluidi nella ZNS utilizzano delle relazioni empiriche per porre in relazione questi tre parametri. Ad esempio il codice HYDRUS [22], descrive le proprietà idrauliche utilizzando il modello empirico di van Genuchten (§ 3.1), di Brooks and Corey (§ 3.2) o di Vogel-Cislerova (§ 3.5); UNSAT-H [23] implementa ben otto diversi tipi di modelli empirici e FEFLOW [24] ne implementa sei, tra cui i già citati van Genuchten e Brooks e Corey. E' quindi opportuna una panoramica di alcuni dei modelli parametrici che sono stati elaborati negli ultimi decenni, evidenziandone, per quanto possibile, vantaggi e svantaggi; lo scopo è quello di permettere un utilizzo ragionato nel contesto dell'applicazione e di fornire un'informazione esemplificativa, in grado di evidenziare come sono stati risolti i problemi legati alla definizione delle relazioni che legano i principali parametri idraulici di un mezzo poroso non saturo. Una descrizione completa di tutti i modelli elaborati nella bibliografia di settore sarebbe ben più ampia, ma esulerebbe dalle finalità del presente lavoro, che tra i vari argomenti trattati vuole fornire una breve ma concreta analisi delle applicazioni dei principi di fisica del suolo e di idrologia dell'insaturo.

Nonostante gli sforzi compiuti dai ricercatori per elaborare i modelli parametrici descritti, permane ancora il problema di misurare i parametri stessi che caratterizzano i mezzi porosi studiati. Spesso si assumono valori parametrici in analogia con i dati misurati in contesti granulometrici, tessiturali e litologici simili a quelli che si stanno indagando, oppure utilizzando delle funzioni di pedotrasferimento (§ 3.6) che, sulla base delle caratteristiche fisiche di un mezzo poroso, derivano in modo efficace, ma pur sempre approssimativo, i parametri da applicare nei modelli stessi. In alternativa, la valutazione dei parametri può essere effettuata mediante misure di laboratorio, sebbene sia un approccio anch'esso approssimativo, perché poco rappresentativo della reale situazione complessiva di un'area indagata, che necessiterebbe della raccolta di un numero elevato di campioni. Le misure dirette in situ avviano in parte a quest'ultimo problema, anche se i metodi di determinazione della conducibilità idraulica e della tensione matriciale in funzione del contenuto idrico sono dispendiosi dal punto di vista delle risorse da impiegare e dei tempi di misurazione; in particolare, la valutazione sperimentale delle relazioni tra conducibilità e contenuto idrico è più impegnativa della valutazione delle relazioni tra contenuto idrico e tensione matriciale. Mediante test di infiltrazione diretta dalla superficie o semplice monitoraggio strumentale congiunto dei volumi idrici e delle tensioni matriciali del mezzo, è possibile definire le curve di ritenzione idrica e conducibilità, per poi confrontare i dati sperimentali

ottenuti con le curve teoriche dei modelli applicati e giungere alla definizione dei valori parametrici.

Risulta quindi evidente che ciascuna tecnica per valutare i valori parametrici da utilizzare nei modelli di simulazione o per definire le curve di ritenzione idrica e conducibilità idraulica presenti indubbi vantaggi e svantaggi, che vanno opportunamente pesati per giungere ad una soluzione che permetta di ottenere il migliore risultato in funzione degli obiettivi preposti, con le risorse disponibili. Nell'ambito della localizzazione di un deposito superficiale per rifiuti radioattivi, è opportuno applicare misure indirette che permettano di ottenere una visione quanto più rappresentativa di un intorno significativo dell'area su cui il deposito insisterà; allo stesso tempo è opportuno effettuare analisi puntuali sul mezzo poroso, per poter tarare le indagini indirette, affinare taluni parametri da utilizzare nei modelli e verificare anche la bontà di applicazione dei codici di simulazione. Ne consegue che per le finalità del caso di studio, l'integrazione tra diverse tecniche di misura e rilievo, che in certi casi sono perfettamente complementari, offrono una soluzione ottimale per una corretta caratterizzazione della Zona Non Saturata.

3.1. Modelli di van Genuchten e Gardner

Uno dei primi e più diffusi approcci per correlare il contenuto idrico e la tensione matriciale è stato elaborato da van Genuchten [25]. Il sistema insaturo è considerato come un insieme di pori a diametro variabile, casualmente interconnessi, dove prevalgono tre parametri empirici (α , m , n) che rappresentano la seguente relazione che lega θ e h :

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

dove

θ_r , θ_s , il contenuto idrico residuo e alla saturazione [-];

α , parametro proporzionale al valore di tensione di ingresso dell'aria (*air entry value*), corrispondente al punto di flesso della curva caratteristica θ , h ; secondo [26] il valore α è pari all'inverso della tensione di ingresso dell'aria [1/kPa];

n , indice di distribuzione della dimensione dei pori (*pore size distribution index*), che rappresenta la pendenza della curva caratteristica [-];

m , parametro che rappresenta l'asimmetria della curva del modello rispetto al punto di flesso, correlato ad n [-];

h , tensione matriciale, generalmente espressa in kPa, qui riportata in valore assoluto per facilitarne la notazione.

La Figura 6 rappresenta la funzione di ritenzione idrica in cui sono rappresentati i parametri del modello.

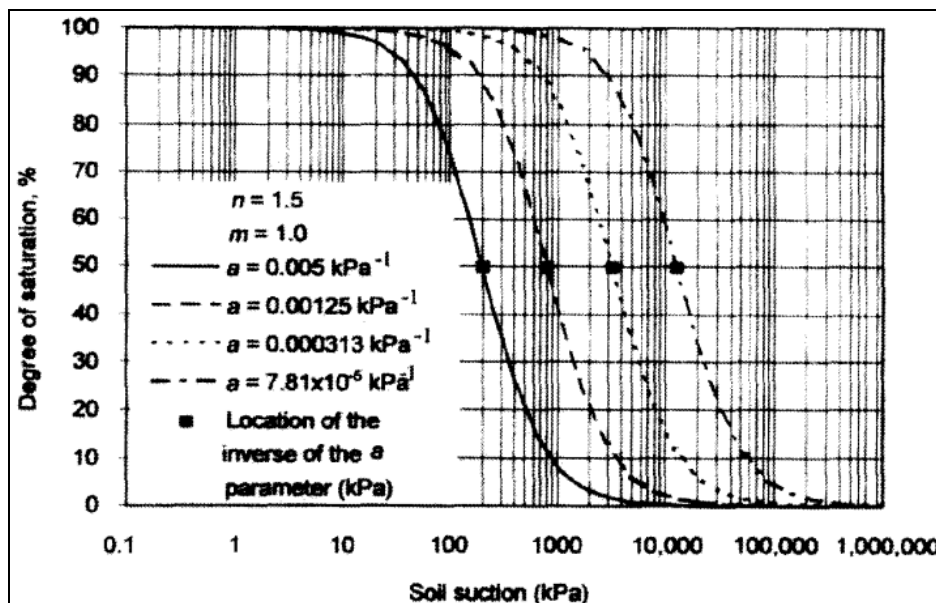


Figura 6. Curve di ritenzione idrica per il modello di van Genuchten, con valori costanti per i parametri m e n e variabili per α . [27].

Come visto, α , n , m sono parametri che definiscono la forma della curva che rappresenta la funzione descritta e possono essere determinati sperimentalmente su campioni del mezzo poroso, mediante specifiche correlazioni (ad esempio le funzioni di pedotrasferimento) o per analogia con contesti geologici simili; la precisione con cui si determinano questi parametri è propedeutica per la corretta applicazione del modello.

Il parametro m si può derivare direttamente da n , imponendo però delle restrizioni al modello stesso, ma consentendo un più semplice utilizzo. La semplificazione è basata sulla seguente relazione di Mualem [29]

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (6)$$


Come già evidenziato, nelle normali condizioni ambientali un mezzo non saturo non ha mai un valore pari a zero di θ_r ; questo parametro si può misurare in laboratorio o dedurre da appositi database, dedicati alle principali proprietà idrauliche dei suoli. Il contenuto idrico alla saturazione (θ_s) può essere misurato sperimentalmente in laboratorio, o relazionandolo alla porosità del suolo (solitamente inferiore del 5-10% a causa dell'aria che permane nelle porosità stesse) oppure si può dedurre da appositi database, come già citato per θ_r .

Il modello di van Genuchten ha una forma abbastanza complessa rispetto ad altri modelli, vista anche la necessità di dover disporre di 3 parametri in ingresso, se non si pone la restrizione di cui alla (6). Allo stesso tempo ha il vantaggio di rappresentare in modo abbastanza continuo la funzione di ritenzione idrica nella Zona Non Saturata, in molte condizioni. In particolare, la presenza di tre parametri garantisce un'ottima flessibilità della funzione, come dimostrato da numerosi dati sperimentali.

Nel modello, la funzione tra conducibilità idraulica e contenuto idrico è così espressa:

$$K(\theta_e) = K_s \sqrt{\theta_e} \left[1 - \left(1 - \theta_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (7)$$

dove θ_e è il contenuto idrico efficace di cui alla (2).

 Centro Ricerche Bologna	Sigla di identificazione SICNUC – PE46 002	Distrib. L	Pag. 24 di 54
---	---	----------------------	------------------

Il modello di van Genuchten per la curva di ritenzione idrica è successivo ad un altro modello, molto simile, quello di Gardner [28], dove la relazione è così espressa:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + \alpha h^n} \quad (8)$$

Il modello è più semplice per la presenza del solo parametro n in ingresso, ma la funzione non descrive accuratamente il comportamento della curva di ritenzione in prossimità del contenuto idrico residuo e alla saturazione.

3.2. Modello di Brooks e Corey

L'approccio impiegato in questo caso per definire la curva di ritenzione idrica è stato elaborato basandosi su un notevole numero di dati sperimentali, rilevati su suoli con caratteristiche molto differenti. Il sistema costituisce uno dei più semplici modelli individuati per rappresentare la curva di ritenzione idrica e può essere anche rappresentato come un caso limite del precedente modello di van Genuchten. Insieme a quest'ultimo, è uno dei modelli più utilizzati nei codici di simulazione, grazie alla sua semplicità. La relazione tra contenuto idrico e tensione matriciale è così rappresentata:

$$\theta(h) = \begin{cases} (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{h}{h_b}\right)^{-\lambda} + \theta_r & \text{se } h \geq h_b \\ \theta_c & \text{se } h < h_b \end{cases} \quad (9)$$

dove

h_b , tensione di ingresso dell'aria nel mezzo poroso [kPa], considerata positiva per semplicità di espressione;

λ , l'indice di distribuzione delle dimensioni dei pori [-]; se la distribuzione della dimensione dei pori è abbastanza uniforme, λ assume valori elevati, mentre assume bassi valori per distribuzione dei pori molto variabili.

La relazione è costante e pari al contenuto idrico saturo quando la tensione matriciale è inferiore alla tensione di ingresso dell'aria nel mezzo ed è una funzione esponenziale decrescente per tensioni superiori a tale valore. I parametri caratterizzanti le funzioni di Brooks e Corey, van Genuchten possono essere posti in relazione tra di loro secondo le seguenti funzioni:

$$\alpha = \frac{1}{h_b} \quad (10)$$

$$n = \lambda + 1 \quad (11)$$

$$m = \frac{\lambda}{(\lambda + 1)} \quad (12)$$

A differenza del modello di van Genuchten, che è caratterizzato da una buona continuità nella rappresentazione della curva di ritenzione idrica in molte condizioni, il modello di Brooks e Corey presenta dei limiti in presenza di suoli a granulometria fine (dai limi alle argille); in questo caso il valore di h_b non è ben definito e la distribuzione della dimensione dei pori è molto variabile. Infatti gli stessi autori evidenziano che il modello non è molto preciso in queste situazioni. Questo avviene perché la pendenza della funzione descritta nel modello è discontinua nell'intorno della tensione di ingresso dell'aria nel mezzo (a differenza di quanto invece accade

per il modello di van Genuchten). Per contro però, il modello è relativamente semplice e necessita di soli due parametri rispetto al precedente, senza dover imporre le restrizioni che portano, nel modello di van Genuchten, ad esprimere l'interdipendenza tra i parametri m e n .

La funzione di conducibilità idraulica proposta nel modello è la seguente

$$K(\theta) = K_s \theta_e^{(2+3\lambda)/\lambda} \quad (13)$$

3.3. Modello di Mualem

Il modello di Mualem [29] prende in esame la relazione tra conducibilità idraulica e contenuto idrico, secondo la relazione

$$K(\theta) = K_s K_r(\theta) \quad (14)$$

$$K(\theta_e) = \theta_e^v \left[\frac{\int_0^\theta d\theta/h}{\int_0^{\theta_{sat}} d\theta/h} \right]^2 \quad (15)$$

dove

v , il coefficiente che rappresenta il grado di interconnessione dei pori ed è stato stimato pari a 0,5 per una grande quantità di suoli a granulometria grossolana (come indicato dallo stesso autore del modello); il valore non è appropriato per suoli a granulometria fine;

K_s , K_r , la conducibilità idraulica satura e al contenuto idrico residuo.

Integrando la funzione ed esprimendo la tensione in funzione del contenuto idrico, l'equazione $K(\theta_e)$ può essere ricondotta alla seguente:

$$K(\theta_e) = K_s \theta_e^v \left[\frac{f(\theta_e)}{f(1)} \right]^2 \quad (16)$$

La funzione $f(\theta_e)$ può essere espressa tramite il modello precedente di van Genuchten, tenendo conto della (6), che viene quindi ad assumere la forma

$$f(\theta_e) = \left(1 - \theta_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \quad (17)$$

Il modello in tal modo viene definito "Modello modificato di van Genuchten-Mualem", spesso utilizzato in campo modellistico per rappresentare la conducibilità idraulica in funzione del contenuto idrico efficace θ_e .

La funzione $f(\theta)$ può anche essere espressa tramite il precedente modello di Brooks e Corey:

$$f(\theta) = \alpha \frac{\gamma}{1+\gamma} \theta^{\left(\frac{1}{\gamma}+1\right)} \quad (18)$$

3.4. Modello di Campbell

L'approccio proposto da Campbell [30] è spesso utilizzato in unione con quello di van Genuchten in diversi ambiti modellistici ed è in parte analogo a quello di Brooks

e Corey; pone in relazione conducibilità idraulica, umidità e tensione matriciale mediante le seguenti:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_s \left(\frac{h}{h_b}\right)^{-1/b} & \text{se } h \geq h_b \\ \theta_s & \text{se } h < h_b \end{cases} \quad (19)$$

$$K = K_s \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^{2b+3} \quad (20)$$

dove

h_b , la tensione di ingresso dell'aria nel mezzo poroso;

b , parametro legato all'indice di distribuzione delle dimensioni dei pori [-];

Un approccio empirico per ottenere il valore di b è il seguente [31]:

$$b = d_g^{0,5} + 0,2\sigma \quad (21)$$

dove i parametri d_g e σ si possono calcolare mediante analisi granulometriche sulle principali frazioni (sabbie, limi e argille), da cui:

$$d_g = \exp \sum_{i=1}^3 m_i \ln(d_i) \quad (22)$$

$$\sigma = \exp \left[\sum_{i=1}^3 m_i (\ln d_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^3 m_i \ln d_i \right)^2 \right]^{0,5} \quad (23)$$

dove

m_i , la frazione in peso rispettivamente delle componenti sabbiosa, limosa e argillosa del campione;

d_i , il diametro medio geometrico rispettivamente delle componenti sabbiosa, limosa e argillosa del campione.

L'evidente vantaggio del modello consiste nella semplicità con cui è possibile ottenere i valori dei parametri da impiegare. Però, anche in questo caso come per il modello di Brooks e Corey, il modello permette una rappresentazione della curva di ritenzione idrica solo per valori di tensione superiori alla tensione di ingresso dell'aria nei pori.

3.5. Modello di Vogel-Cislerova

Il modello di Vogel-Cislerova [32] è un ulteriore affinamento dell'originario modello di van Genuchten, per aggiungere maggiore flessibilità nella descrizione della curva di ritenzione e conducibilità in prossimità del contenuto idrico alla saturazione. Le relazioni sono le seguenti:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_a + \frac{\theta_m - \theta_a}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & h < h_s \\ \theta_s & h \geq h_s \end{cases} \quad (24)$$

$$K(h) = \begin{cases} K_s K_r(h) & h < h_s \\ K_s & h \geq h_s \end{cases} \quad (25)$$

dove

$$K_r(\theta_e) = \theta_e \left[\frac{1 - F(\theta_e)}{1 - F(1)} \right]^2 \quad (26)$$

$$F(\theta_e) = [1 - (\theta_e)^{1/m}]^m \quad (27)$$

con

h_s , la minima altezza capillare per il mezzo, che dipende dal diametro dei pori ed è stata introdotta proprio per ovviare ai problemi di instabilità del modello (soprattutto nei casi di terreni fini) in condizioni prossime alla saturazione.

E' stata utilizzata la stessa notazione dei parametri precedentemente descritti per il modello di van Genuchten.


3.6. Le funzioni di pedotrasferimento

E' già stato ampiamente evidenziato che i parametri idraulici che caratterizzano un mezzo poroso non saturo e i coefficienti parametrici dei precedenti modelli non sono facilmente determinabili con metodi diretti o indiretti. Tra le varie soluzioni adottate per ovviare a questo problema, rientrano le funzioni di pedotrasferimento (*PedoTransfer Functions*, PTF), che permettono di derivare i parametri idrologici e i coefficienti dei modelli partendo da parametri del suolo quali tessitura, contenuto in sostanza organica, densità apparente, ecc.. In un'altra accezione, le PTF possono essere definite come relazioni funzionali che traducono le proprietà conosciute di un mezzo poroso in parametri non facilmente rilevabili, tipicamente i parametri idraulici, partendo dall'assunto che esista una correlazione matematica tra proprietà idrauliche e parametri fisici del mezzo stesso.

Inizialmente questi strumenti erano costruiti con equazioni di regressione statistica e si basavano sui dati di un gran numero di suoli/materiali, da cui si ricavano equazioni che rappresentavano la variabilità dei principali parametri idraulici. Grazie a successivi approfondimenti si è giunti a definire le funzioni di pedotrasferimento alla luce delle attuali necessità modellistiche e di studio [33], quindi alla luce dei modelli di relazione tra le proprietà idrauliche di un mezzo.

Il panorama delle PTF elaborate nel corso degli anni è molto vasto e necessiterebbe di un'indagine bibliografica dedicata. In generale si può affermare che la PTF viene scelta in funzione della disponibilità dei dati (o dalla possibilità del loro futuro rilievo), dal grado di accuratezza richiesto nei dati di output, nonché dalla scala di indagine che si deve gestire. Una parte delle PTF oggi disponibili sono state create con metodi empirici, partendo da set importanti di dati pedologici, rilevati in determinate aree, che poi sono trasposti per analogia in altri contesti pedologici. Si può comunque affermare che tutte le funzioni oggi utilizzate contengano al loro interno un certo grado di empirismo ed approssimazione.

Una categorizzazione preliminare ma efficace delle PTF risiede nella tipologia dei dati di input; nella prima categoria rientrano quelle PTF che derivano i parametri di

 Centro Ricerche Bologna	Sigla di identificazione SICNUC – PE46 - 002	Distrib. L	Pag. 28 di 54
---	---	----------------------	------------------

ritenzione idrica e conducibilità idraulica utilizzando i parametri fisici del materiale quale la distribuzione granulometrica (parametro pressoché utilizzato in tutte le PTF), contenuto di sostanza organica, densità apparente e reale. E' ovvio che questa classe di PTF approssima i parametri idraulici di output, perché non può tenere conto delle informazioni strutturali del suolo, quali presenza di macropori, fessurazioni e altre vie preferenziali di stoccaggio e flusso idrico. Nella seconda categoria rientrano le funzioni che utilizzano le cosiddette "informazioni di classe" del suolo, cioè la definizione dei parametri sulla base della tipologia generale di suolo (classe di appartenenza), tralasciando i parametri fisici particolari.

La complessità delle PTF varia in funzione di vari fattori, tra cui prima di tutto l'entità dei parametri di input; si possono rinvenire nella bibliografia di settore delle funzioni di pedotrasferimento che corrispondono a semplici tabelle dove, per particolare classi granulometriche, sono forniti i valori dei parametri di interesse. Esistono però anche funzioni molto più complesse, che implementano equazioni di regressione non lineare o tecniche basate su reti neurali, che rappresentano una moderna proposta per la soluzione del problema: mediante un approccio gerarchico è possibile inserire progressivamente i dati disponibili, per gradi di accuratezza successivi e giungere ad un output sempre più preciso in funzione del grado di approfondimento perseguito nell'inserimento dei dati di input [34]. Quest'ultimo approccio non è dei più semplici e per ovviare al problema sono stati elaborati dei sistemi informatici con agevoli interfacce grafiche.

Nell'ambito delle PTF, i modelli fisico-empirici sono nati grazie alla stretta similarità tra la curva di distribuzione granulometrica e la curva di ritenzione idrica; in questi modelli la distribuzione delle granulometrie è trasformata in una distribuzione delle dimensioni dei pori, che a sua volta può essere correlata ai vari contenuti idrici e quindi alle tensioni matriciali. Da queste relazioni si deriva la curva di conducibilità idraulica. Il modello empirico di Arya e Paris [35] si ispira a quest'ultimo principio e fu uno dei primi ad essere applicato per definire la curva di ritenzione idrica sulla base di parametri fisici quali densità apparente, distribuzione granulometrica, porosità del mezzo e sulla base di un parametro empirico (α); quest'ultimo è utilizzato per correlare le dimensioni delle particelle e le dimensioni dei pori ed è stato empiricamente posto pari a 1,38, fornendo ottime correlazioni per i suoli sabbiosi, mentre correlazioni molto meno precise per i suoli limosi e argillosi limosi; per questo motivo il modello è stato ulteriormente ampliato da altri ricercatori. Successivi studi condotti dagli stessi autori hanno evidenziato un parametro α variabile da 1,1 per le granulometrie più fini a 2,5 per quelle più grossolane. Ulteriori approfondimenti [36] hanno documentato una variazione di α in funzione della tensione matriciale, che quindi andrebbe descritta per ciascuna tipologia di mezzo poroso indagato. Nonostante la difficoltà di stimare il parametro α per vari tipi di suolo, il modello rimane ancora valido ed applicabile, anche con strumenti informatici creati ad hoc.

Un ulteriore interessante strumento per implementare gerarchicamente le funzioni di pedotrasferimento è il sistema ROSETTA [37], basato sulle reti neurali, che permette di determinare i valori dei parametri θ_r , θ_s , α , n , K_s , da utilizzare nel modello di van Genuchten (per quanto riguarda i parametri della curva caratteristica di ritenzione idrica) e nel modello di Mualem (per quanto riguarda i parametri di conducibilità idraulica satura e non satura). Il programma implementa 5 funzioni PTF sulla curva di ritenzione idrica e di conducibilità idraulica; proprio la struttura gerarchica del sistema permette di ottenere dati di output con una precisione e affidabilità proporzionale al grado di approfondimento nell'utilizzo dello strumento.

Fondamentalmente l'input è costituito in primis dalle classi granulometriche del sedimento studiato, a cui si possono aggiungere, se disponibili, la densità apparente e alcuni punti della curva di ritenzione idrica.

Nel caso in cui si voglia invece procedere in maniera celere e senza necessità di particolari dettagli, un approccio alternativo per l'utilizzo delle PTF consiste nell'accesso ai database creati da alcuni istituti di ricerca internazionali, che hanno analizzato un numero rilevante di suoli per derivarne le principali caratteristiche. Questi racchiudono i principali parametri pedologici per una moltitudine di tipologie di suolo, rilevati in contesti completamente differenti, per essere maggiormente rappresentativi. Tra questi database si citano UNSODA [38], HYPRES [39], WISE [40].

In generale, è opportuno sottolineare che va prestata particolare attenzione all'applicazione di una PTF elaborata per un ambito pedologico o una finalità molto differente rispetto al contesto che si vuole indagare; questo comporta inevitabili ripercussioni negative sulla bontà dei risultati finali. Molti autori hanno trovato ottime corrispondenze tra i dati sperimentali e quelli derivati dalle proprie funzioni di trasferimento, se riferiti al particolare contesto in cui questa era applicata; ma al di fuori dello specifico ambito pedologico, tessiturale, granulometrico, ecc. questa rispondenza perdeva parte del suo valore. E' necessaria un'analisi preliminare della provenienza e delle modalità di costruzione delle funzioni per selezionare quella più appropriata al contesto di studio.


In conclusione, si può evidenziare che le PTF non sono lo strumento più utile per indagini di dettaglio, dove invece è più opportuno uno studio condotto direttamente in situ, con la derivazione della specifica curva di ritenzione e della curva di conducibilità idraulica; però le PTF hanno l'indubbio vantaggio di fornire valori parametrici in modo abbastanza semplice e veloce, che possono essere utilissimi nelle prime fasi di caratterizzazione e simulazione, utilizzando un set di dati di input che può essere direttamente modulato dall'operatore in funzione delle proprie disponibilità e finalità. La scelta di procedere con il loro utilizzo dipende quindi dal grado di accuratezza ed affidabilità che si vuole raggiungere nei risultati finali.

3.7. Considerazioni sui dati sperimentali relativi all'utilizzo dei modelli

I modelli matematici elaborati per porre in relazione le principali proprietà idrauliche di un mezzo non saturo hanno evidenti potenzialità, ma anche un certo grado di approssimazione nel contesto dello studio e simulazione della dinamica idrica nella ZNS. I limiti attualmente presenti nella modellistica sono in gran parte imputabili alla complessità del sistema indagato e quindi non vedono una soluzione immediata, se non mediante l'utilizzo di metodi di studio specifici per il sito indagato e per gli obiettivi preposti, mediante l'individuazione di valori parametrici quanto più precisi e sito-specifici.

E' importante sottolineare che nella ZNS le proprietà idrauliche quali conducibilità idraulica e tensione matriciale sono parametri che subiscono una variabilità spaziale, ma anche temporale in funzione del contenuto idrico. Le variazioni possono essere anche dovute ad agenti esterni quali l'attività della microfauna, dei microorganismi, la dinamica dell'apparato radicale dei vegetali in prossimità della superficie; tutti fattori in grado di incidere sulla sua struttura. Questi sono aspetti che rendono complessa l'individuazione di valori appropriati e stabili nel tempo.

Un esempio su tutti in merito alla definizione dei valori delle proprietà idrauliche è rappresentato dalla conducibilità idraulica, le cui misure sono quelle maggiormente soggette ad errore. Ricerche condotte in tal senso hanno evidenziato che questa

 Centro Ricerche Bologna	Sigla di identificazione SICNUC – PE46 - 002	Distrib. L	Pag. 30 di 54
---	---	----------------------	------------------

misura può essere effettuata con un buon grado di precisione su sedimenti con granulometria medio grossolana, cioè materiali che hanno una piccola variabilità della distribuzione della dimensione dei pori; al contrario, per sedimenti fini e medio fini, le misure sono soggette a errori ben più rilevanti, anche tenendo conto della difficoltà e della tempistica richiesta nell'esecuzione delle misure [41]. Per di più, come visto, i valori della conducibilità satura sono dipendenti dalle eventuali vie preferenziali del mezzo poroso (fratture, fessurazioni, macropori, ecc.); queste strutture non hanno nulla a che vedere con la distribuzione dimensionale dei pori. Anche i dati ricavati dalle analisi su singoli campioni di sedimento possono essere estrapolati per altri domini dell'area indagata solo con grande attenzione, se si vogliono ottenere valori parametrici affidabili, da applicare ai modelli analizzati. Ricorrere ai riferimenti bibliografici e alle attinenze con contesti di studio analoghi può essere una soluzione ottimale per una prima analisi delle problematiche; nonostante i precedenti limiti, l'utilizzo di valori parametrici direttamente rilevati in situ mediante misure dirette, indirette o prelievo di campioni diventa fondamentale per le finalità dell'analisi di sicurezza di un deposito superficiale per rifiuti radioattivi, sebbene questo approccio comporti un impegno di risorse importante.

4. Tecniche per la caratterizzazione dei parametri idrologici e per il monitoraggio della Zona Non Saturata

L'analisi delle tecniche di indagine descritte nel seguito rappresenta una visione d'insieme delle opportunità di studio disponibili per la caratterizzazione e il monitoraggio della Zona Non Saturata. La determinazione dei principali parametri che caratterizzano la dinamica idrica nella ZNS si basa ad oggi su una serie di metodi, di cui alcuni standardizzati e altri che sono ampiamente utilizzati ma non sottoposti a procedure standard di applicazione.

I metodi di analisi diretta o indiretta, così come le indagini condotte direttamente in situ o in laboratorio, rappresentano ambiti differenti di studio e non è possibile privilegiare un ambito rispetto ad un altro in senso assoluto; è invece più opportuno scegliere la tecnica che meglio risponde alle proprie esigenze di studio, in funzione dei tempi e delle risorse disponibili. Spesso è molto utile avvalersi della complementarietà nell'utilizzo degli strumenti di rilievo dei dati, per poter confrontare i valori sperimentali con tecniche differenti. Entrambe le tipologie di approccio sono accomunate da vantaggi e svantaggi e dal fatto che i valori ottenuti dalle misurazioni sono sempre affetti da una certa percentuale di errore, che va valutato a priori e opportunamente gestito.

4.1. Lisimetri/Coppe porose a suzione per il prelievo di campioni di acqua nel mezzo non saturo

I lisimetri o coppe porose a suzione sono gli strumenti per l'estrazione di soluzioni liquide da un mezzo poroso e permettono il prelievo di un campione alquanto rappresentativo, senza intervenire in maniera distruttiva sul sistema indagato. I due termini utilizzati per definirli (lisimetri, coppe porose a suzione) sono spesso intercambiabili; per la precisione il termine coppa porosa identifica una parte del lisimetro, cioè l'elemento filtrante che permette la raccolta del campione di soluzione circolante nel suolo. I lisimetri sono stati sviluppati nel settore agronomico per valutare la dinamica dei nutrienti presenti nel suolo, ma ben presto sono stati utilizzati nel campo geologico ambientale per caratterizzare la ZNS. Sono strumenti per il campionamento puntuale, quindi danno principalmente delle utili informazioni sulla dinamica qualitativa delle soluzioni presenti nel sistema.

Lo strumento è costituito da un elemento permeabile filtrante (la vera e propria coppa porosa), realizzato in materiale inerte, solitamente ceramico, posto in profondità, collegato ad una tubazione plastica che svolge il compito di collegare l'elemento filtrante con la superficie del suolo (Figura 7). La tubazione è quindi sigillata mediante una chiusura ermetica, che permette il passaggio di uno/due capillari; uno di questi si spinge, all'interno dello strumento, sino all'interno della coppa porosa ed è utilizzato per il prelievo della soluzione campionata dallo strumento. A questo è affiancato un secondo tubo capillare, che è utilizzato per creare la depressione all'interno dello strumento prima del campionamento. In alternativa, un unico capillare può essere utile per entrambi gli scopi.

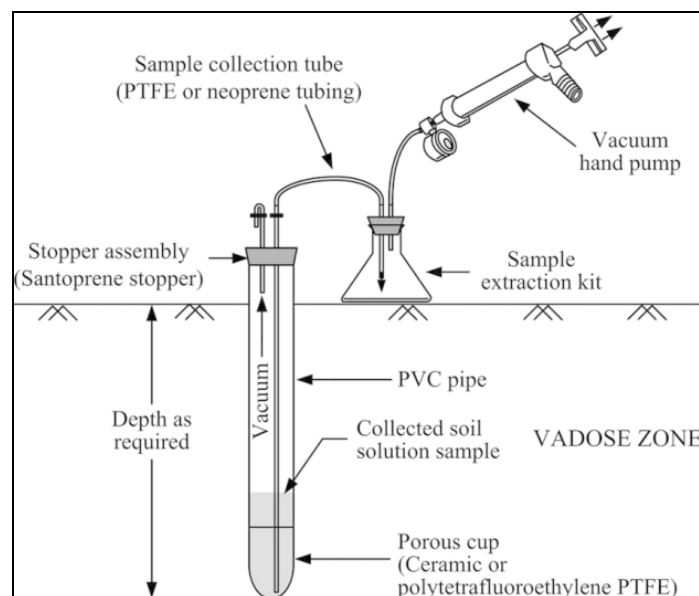


Figura 7. Immagine schematica della struttura di un lisimetro [42].

L'installazione dello strumento nel terreno deve essere effettuata evitando perturbazioni eccessive degli orizzonti attraversati, perforando con strumenti di diametro leggermente inferiore o pari a quello del lisimetro, per garantire una buona adesione con il materiale circostante durante la successiva installazione; si deve evitare che lo spazio immediatamente adiacente il lisimetro, che conduce verso la superficie del suolo, costituisca una via preferenziale di flusso per l'infiltrazione dalla superficie o in generale per i movimenti dell'acqua verso gli orizzonti più profondi del suolo. In particolare, prima della sua messa in posto è utile cospargere il lisimetro con una miscela di acqua e sedimento estratto durante la perforazione; questa accortezza permette alla coppa porosa-tubazione di aderire adeguatamente al terreno circostante e creare continuità tra il sedimento e lo strumento. In presenza di materiali argillosi o comunque di un'elevata percentuale di granulometrie fini, si può optare per "rivestire" l'esterno della sola coppa porosa con un sedimento più grossolano, quale sabbia quarzosa; l'intervento apporta un'alterazione al sistema nell'immediato intorno della coppa porosa, ma crea una maggiore permeabilità idraulica verso le pareti esterne della stessa, favorendo il flusso e quindi agevolando il campionamento. Quest'ultimo intervento va però attentamente valutato in funzione delle effettive necessità contingenti; talvolta si rende necessario per poter ottenere una quantità di campione adatta per le successive analisi. La parte del lisimetro che fuoriesce sulla superficie del suolo può essere coperta con un materiale impermeabile, per evitare l'esposizione diretta alla luce del sole ed ai fenomeni di gelo-disgelo, ma anche per isolare la parte del suolo immediatamente adiacente il lisimetro, affinché questa non diventi una via preferenziale di flusso verso il suolo.

Prima dell'installazione sarebbe opportuno procedere ad un lavaggio accurato degli strumenti, utilizzando una soluzione debolmente acida (tenendo conto della tipologia di materiale con cui lo strumento è realizzato, per evitare di danneggiarlo); ad esempio una soluzione con acido cloridrico a bassa molarità, seguita da acqua deionizzata. Il processo elimina eventuali contaminazioni indotte nello strumento durante il processo produttivo, prima della sua messa in posto.

Il principio su cui si basa il funzionamento consiste nella creazione di una depressione all'interno del sistema coppa porosa-tubazione, mediante una pompa

ad aspirazione di superficie, in grado di vincere la tensione matriciale che lega l'acqua nel mezzo poroso non saturo; questa depressione permette all'acqua matriciale di penetrare attraverso le pareti della coppa porosa, che rappresenta l'elemento filtrante. Esistono anche lisimetri che non prevedono la creazione di una depressione al loro interno, ma permettono unicamente alle soluzioni di entrare nella coppa porosa a seguito delle variazioni di tensione che si creano naturalmente nel terreno.

La prima fonte di errore nell'utilizzo di questi strumenti consiste proprio nell'applicare una depressione inferiore alla tensione matriciale, che non permette quindi all'acqua di essere prelavata superando le forze di adesione con la matrice solida. L'entità della depressione imposta deve essere funzione della tipologia di terreno: per materiali limoso argillosi la tensione sarà superiore rispetto a materiali limoso sabbioni o sabbiosi. Ma la depressione da creare è anche funzione della quantità di soluzione necessaria per le successive analisi e della disponibilità idrica del suolo al momento in cui si attua l'operazione. In caso di mezzi porosi particolarmente secchi, il lisimetro può impiegare giorni per raccogliere un quantitativo di acqua sufficiente per eventuali analisi.

A seguito della depressione, la soluzione non subisce importanti variazioni della sua composizione chimico-fisica, visto anche il materiale inerte che costituisce lo strumento. Maggiore attenzione va prestata però nel caso in cui il campione si debba utilizzare per analisi isotopiche; in tal caso, un'eccessiva depressione può indurre il frazionamento isotopico proporzionale all'entità stessa della depressione. Non vi sono però sistemi per ridurre il problema nei lisimetri a suzione e quindi si deve tenere conto di questo eventuale aspetto quando si campiona con elevate depressioni. Dopo aver effettuato la depressione è utile, dopo alcuni minuti, effettuare un controllo della pressione esistente all'interno della coppa porosa, mediante un manometro collegato allo strumento. Esistono diverse soluzioni in commercio; se lo strumento è chiuso in superficie da un sistema dotato di tappo in gomma, è sufficiente un manometro dotato di ago, in grado di misurare agevolmente la depressione, senza indurre sensibili variazioni.

In condizioni ambientali normali e con un buon contenuto idrico nel mezzo poroso, sono necessarie alcune ore per permettere alla soluzione di penetrare all'interno della coppa porosa; il tempo di attesa è comunque sito-specifico e va testato direttamente nell'area sperimentale. Il prelievo del campione dalla coppa porosa avviene mediante una pompa di superficie che crea il vuoto all'interno di un contenitore di campionamento, a sua volta collegato al tubo capillare che si spinge sino all'interno della coppa stessa; per profondità non elevate, si può quindi aspirarne il contenuto, tenendo conto però che la depressione, se elevata, può provocare una parziale evaporazione dell'acqua. Per profondità elevate si dovrà prelevarne il contenuto dalla coppa inviando una pressione in profondità, alla base dello strumento, collegando la pompa di superficie al capillare di depressione e chiudendo ermeticamente il lisimetro: la pressione convogliata nella tubazione spinge l'acqua verso la superficie, che potrà risalire attraverso il capillare di campionamento, che sarà stato collegato al raccoglitore del campione. Quest'ultima procedura non induce una degasazione del campione di acqua, a differenza della precedente. Il campione di acqua così prelevato andrà gestito secondo le normali procedure previste per evitare contaminazioni e degradazioni delle sue caratteristiche chimico-fisiche; l'approccio ottimale consisterebbe nell'adozione di un sistema di garanzia di qualità.

Particolare attenzione va prestata alla scelta dello strumento, in termini di materiali e caratteristiche costruttive, per ridurre al minimo le problematiche relative alla difficoltà o addirittura all'impossibilità di effettuare i campionamenti delle soluzioni, per difetti insiti nello strumento. Primo tra tutti il problema relativo alla mancata chiusura ermetica, in particolare nella connessione tra la coppa porosa ed il tubo rigido che la collega alla superficie. Ulteriori problematiche possono presentarsi nel campionamento delle parti più superficiali della ZNS per il ridotto contenuto idrico nel mezzo, ad esempio in caso di scarse precipitazioni.

L'utilizzo dei lisimetri a suzione permette il prelievo di campioni delle soluzioni circolanti nella Zona Non Saturata al fine di analizzare chimicamente e isotopicamente le acque di percolazione. Questi aspetti permettono la caratterizzazione geochimica del sistema e danno utili indicazioni circa l'eventuale migrazione di eventuali radionuclidi nel mezzo poroso. Nell'ottica del monitoraggio, il loro utilizzo permette di prelevare campioni di acqua in cui rilevare eventuali tracce di radioattività o di altri inquinanti indesiderati nelle aree adiacenti un deposito di rifiuti radioattivi. Un evidente vantaggio nel loro impiego risiede nella possibilità di estrarre campioni che possono essere considerati abbastanza rappresentativi delle condizioni del sito di studio. La possibilità di ripetere i campionamenti permette di ottenere una visione delle variazioni temporali delle caratteristiche chimico-fisiche ed isotopiche delle soluzioni circolanti. L'installazione di batterie di strumenti su aree più o meno vaste e a profondità differenti offre la possibilità di ottenere una buona indicazione circa la variabilità spaziale dei segnali indagati, soprattutto lungo il profilo verticale. Un ulteriore vantaggio si riscontra nella durevolezza del sistema di campionamento, visto che lo strumento, una volta installato in un'area protetta e controllata, garantisce la sua funzionalità per anni [43]. Questo permette di programmare il campionamento delle soluzioni anche su ampie aree, considerato che l'impiego di risorse per l'installazione degli strumenti può essere distribuito su un lasso di tempo abbastanza lungo.

Una delle problematiche emerse in passato nell'utilizzo dei lisimetri consiste nella contaminazione dei campioni di acqua da parte dei materiali con cui è realizzato lo strumento. Per ovviare al problema, sono stati impiegati materiali quanto più inerti possibile dal punto di vista chimico per realizzare la coppa porosa, quali i materiali ceramici (adatti per il campionamento dei principali anioni, quali nitrati, solfati, cloruri, bromuri, ecc.), vetrosi (adatti per il campionamento di pesticidi, composti organici, fosfati e altri anioni), plastici (ottimi per il campionamento di metalli pesanti, ma anche adatti per i principali anioni). Per quanto riguarda la tubazione di connessione verso la superficie si utilizza normalmente il PVC.

E' ormai consolidato il fatto che la depressione imposta nelle coppe porose, per quanto elevata, riesca a prelevare solo le soluzioni circolanti nei mesopori e macropori del mezzo non saturo, non certo una quantità consistente di quella presente nei micropori, saldamente legata alle pareti dei granuli. Il campionamento è quindi effettuato su una soluzione che non è del tutto rappresentativa del chimismo della fase liquida nel mezzo poroso. Allo steso modo, la depressione creata nel sistema provoca una minima variazione nel sistema dei flussi idrici nel mezzo durante il periodo di campionamento, perturbando il sistema stesso, anche se in misura del tutto trascurabile. Un ulteriore limite che si riscontra nell'impiego di questi strumenti consiste nel fatto che i campionamenti si svolgono normalmente nell'arco delle 24h, per permettere alle soluzioni di entrare all'interno della coppa porosa; non è quindi possibile effettuare campionamenti successivi nel breve periodo (dell'ordine delle ore), vista anche la ridotta disponibilità di acqua matriciale

che può verificarsi in certi periodi all'interno della ZNS. Il fattore tempo è quindi fondamentale nell'ambito degli elementi di giudizio circa l'installazione di un simile sistema di campionamento. La bibliografia di settore è ricca di studi condotti per valutare l'affidabilità di questo sistema di campionamento e per evidenziarne i limiti citati. Tuttavia i lisimetri, nonostante le limitazioni del caso che si devono tenere in debita considerazione, rimangono lo strumento più adatto per prelievi puntuali di soluzioni circolanti nella ZNS.

Per completezza di informazione, è opportuno evidenziare che il campionamento delle soluzioni in un mezzo non saturo può essere effettuato in laboratorio direttamente su campioni di suolo, mediante centrifugazione; una tecnica distruttiva non proponibile per analisi periodiche, condotte sul medio-lungo termine, su ampie aree. Per l'analisi dei nutrienti in campo agronomico, sono state anche elaborate membrane assorbenti e sistemi costituiti da resine ioniche in grado di catturare le specie chimiche di interesse, ma di scarso interesse per le finalità di questo studio. E' utile segnalare una particolarità: in ambito nucleare, spesso si è utilizzato un po' impropriamente il termine lisimetro, ereditandolo da altri settori ambientali. In alcuni impianti nucleari sono state realizzate aree sperimentali per verificare il condizionamento di rifiuti o il loro corretto stoccaggio, utilizzando volumi confinati di terreno, generalmente cilindrici, di dimensioni metriche, all'interno del quale si inserivano rifiuti condizionati e strumenti di monitoraggio e prelievo delle soluzioni circolanti [44] [45]. L'insieme di questi sistemi di confinamento, controllo e prelievo è stato definito con il termine "lisimetro", che però non ha la medesima accezione del termine adottato in questo report e nel contesto dei tradizionali studi geologico ambientali sui mezzi porosi non saturi.

4.2. Tensiometri per la misura diretta della tensione matriciale

Il tensiometro è lo strumento utilizzato per la misura della tensione matriciale dell'acqua in un mezzo poroso non saturo, quindi indirettamente del suo contenuto idrico. La sua struttura è del tutto analoga a quella dei lisimetri di cui al paragrafo precedente, essendo realizzata all'estremità da una coppa porosa, saldamente legata ad una tubazione di lunghezza tale da connetterla alla superficie del suolo. All'interno lo strumento è riempito per buona parte di acqua, lasciando però un margine di spazio alla fase gassosa; il tensiometro è quindi sigillato ermeticamente, per evitare scambi di pressione con l'atmosfera. Periodicamente si può intervenire sul contenuto in acqua all'interno del tensiometro, per migliorare le sue prestazioni. Nel corso del tempo, l'acqua presente all'interno del tensiometro, opportunamente sigillato, raggiunge l'equilibrio con quella presente nel suolo, nell'immediato intorno della coppa porosa; infatti la permeabilità della coppa porosa permette lo scambio di massa tra l'interno del tensiometro e il suolo, mantenendo l'equilibrio tra la tensione matriciale e la tensione che si instaura all'interno dello strumento. Il flusso tra il suolo e l'interno del tensiometro è bidirezionale: nel momento in cui la pressione interna del tensiometro supera quella presente nel suolo, l'equilibrio si instaura mediante un flusso di acqua verso il suolo; nel caso in cui la pressione interna del tensiometro sia invece inferiore a quella nella porosità del mezzo, il flusso avverrà dal mezzo non saturo verso l'interno del tensiometro. In entrambi i casi, il sistema di misura reagisce alle variazioni di tensione matriciale del mezzo non saturo, per ristabilire un equilibrio. Le variazioni di tensione si ripercuotono quindi sulla tensione presente nel tratto di tubazione verso la superficie, occupato dall'aria. Con un manometro si misura la tensione creata all'equilibrio, che quindi riflette quella presente nel terreno alla profondità in cui è posta la coppa porosa.

Alcune tipologie di tensiometri sono dotati alla sommità di un apposito contenitore per acqua al fine di permettere il mantenimento di un apposito livello di liquido in grado di entrare in equilibrio col suolo, e di un manometro permanente per effettuare le letture senza necessità di intervento da parte dell'operatore. In alternativa si utilizza un manometro dotato di ago, che perfora il tappo in gomma/silicone che chiude ermeticamente il tensiometro.

I tensiometri sono utili per valutare indirettamente la dinamica idrica nel mezzo poroso, mediante misure sulle variazioni della corrispondente tensione matriciale; si possono così ottenere profili verticali dei valori di tensione lungo il profilo stratigrafico, per individuare le aree in cui è presente un eventuale ristagno idrico con concentrazione di soluti (ad esempio per fenomeni di barriera capillare) o le aree in cui è maggiore l'effetto di infiltrazione o di evaporazione.

Un ulteriore vantaggio nell'impiego di questi strumenti consiste nella possibilità di automatizzarne la misura mediante trasduttori di pressione collegati ad un datalogger e ad un sistema di memorizzazione ed eventualmente di trasmissione dei dati. Questa soluzione permetterebbe misure quasi "in continuo" sulle variazioni delle tensioni matriciali, tenendo però conto dell'inerzia nella risposta dello strumento alle variazioni stesse. Associando misure di tensione e misure di contenuto idrico volumetrico condotte direttamente in situ (con una delle tecniche di cui al seguito) è possibile determinare la curva di ritenzione idrica con buona affidabilità.

Lo svantaggio principale dei tensiometri consiste nell'impossibilità di misurare in modo affidabile variazioni di tensione inferiori a -80 KPa, che si possono rilevare in presenza di un'elevata percentuale di materiali fini. In questo caso alcune misure potrebbero essere falsate, soprattutto in prossimità del limite inferiore citato. E' anche necessaria una continua manutenzione dello strumento, ad esempio per eventuali rabbocchi del contenuto idrico al fine di ottenere misure affidabili.

4.3. Tecniche di misura indiretta del contenuto idrico

Il contenuto idrico nella ZNS può essere misurato per via indiretta, misurando parametri fisici, che sono in stretta correlazione con l'umidità presente nel mezzo. Alcuni metodi si basano sulle variazioni nella trasmissione di un campo elettromagnetico o nella trasmissione di radiazioni ionizzanti; la loro propagazione è infatti correlata alla presenza di acqua e ioni in soluzione all'interno del mezzo indagato. Misurando uno o più parametri che qualificano la propagazione di questi segnali, è quindi possibile risalire al volume d'acqua presente nelle porosità.

4.3.1. Time Domain Reflectometry (TDR)

La tecnica TDR, comunemente definita riflettometria nel dominio del tempo, permette di valutare in maniera indiretta il contenuto volumetrico di acqua in un mezzo poroso insaturo sfruttando le caratteristiche di propagazione (velocità) delle microonde nel mezzo stesso. La velocità di propagazione è proporzionale alle caratteristiche del sistema attraversato, alla presenza di acqua e alla sua salinità, che apportano variazioni alla permittività elettrica del terreno in cui le microonde si propagano. Nel dettaglio, la permittività elettrica ha un valore pari a circa 1 in aria, compreso tra 3 e 5 nei sedimenti e pari a circa 80 in acqua. Per tale ragione il contenuto idrico ne influenza fortemente il valore, che in questo caso è misurato

mediante un segnale generato da un campo elettrico non stazionario, emesso e ricevuto dallo strumento.

Una sonda TDR è costituita da un generatore di impulsi elettrici a gradino, associato ad un rilevatore di impulso, collegato ad un oscilloscopio e un microprocessore per elaborare i segnali ricevuti. Le frequenze utilizzate possono oscillare da 1 MHz a 1 GHz. La sonda, a contatto con il mezzo poroso, invia un segnale, rilevandone nel contempo il tempo di transito di andata e ritorno lungo il terminale della sonda stessa, per derivarne la permittività elettrica e da questa il relativo contenuto idrico. La traduzione del valore di permittività in un valore di umidità è possibile grazie a funzioni di correlazione, che dipendono dalla tipologia di strumento e quindi sono direttamente fornite dalle aziende produttrici. Le sonde sono realizzate con un numero variabile di elettrodi, per adattarsi a diverse condizioni. Un esempio dell'applicazione della tecnica TDR è riportato in [46], mentre un'accurata descrizione dei principi fisici che ne regolano l'applicazione è riportata in [47].

Per completezza di informazione e per evidenziare la solidità della tecnica, è bene aggiungere che storicamente si sono affermate due impostazioni per relazionare contenuto idrico e permittività del suolo; la prima impostazione è nettamente empirica, senza una base teorica che supporti l'evidenza, e prevede una relazione sperimentale tra i due parametri, come elaborata in [48]. La seconda impostazione si basa invece su un'elaborazione teorica che supporta i dati sperimentali, così come elaborato dal modello esposto in [49]. Sono disponibili in commercio strumenti che già dispongono dell'elettronica in grado di implementare la relazione tra dati di permittività e contenuto idrico, eliminando il problema di interpretazione degli stessi da parte dell'operatore. Le funzioni di correlazione presenti in questi strumenti sono state realizzate dopo prove di laboratorio, che non riflettono ovviamente tutti i possibili contesti in cui gli strumenti si troveranno ad operare; da qui deriva l'importanza di un buon lavoro di calibrazione dello strumento, nel caso si necessiti di misure di precisione o si operi in contesti geologico-ambientali particolari.

La tecnica di misura è influenzata dalle temperature del suolo; è quindi opportuno procedere alle misure sempre nello stesso momento della giornata, se queste sono condotte in prossimità della superficie del suolo, dove l'effetto delle variazioni giornaliere di temperatura può essere rilevante; questa precauzione non annulla del tutto la variabilità del parametro, ma ne riduce gli effetti.

Il dato misurato dalla sonda riflette indirettamente il volume medio di acqua presente in un intorno specifico della sonda, che è definito come il volume cilindrico di materiale che circonda gli elettrodi, di diametro pari a circa la distanza tra gli elettrodi stessi e di altezza pari all'altezza della sonda infissa nel terreno (Figura 8). Nell'ambito dello studio di un profilo di suolo plurimetrico, si ottiene quindi un valore approssimativamente puntuale del contenuto idrico.

L'installazione delle sonde, a meno di rilievi superficiali, deve essere effettuata mediante uno scavo che permetta di accedere al profilo del suolo, con inevitabile perturbazione del profilo stratigrafico stesso. In alternativa esistono sonde che sono posizionabili all'interno di una tubazione in materiale plastico, precedentemente infissa nel suolo. Generalmente si installano sonde a profondità differenti, per monitorare il profilo di umidità; il limite di questa tecnica è rappresentato dalla profondità di studio, che non può essere eccessivamente elevata per le evidenti difficoltà di posizionamento degli strumenti. In generale, le sonde esplicano al meglio le loro funzionalità negli strati più superficiali del profilo, non oltre i 2-3 metri dal piano di campagna, dove sono maggiori le variazioni del contenuto idrico e dove

è possibile effettuare anche varie misure in momenti diversi della giornata, veloci ed affidabili (ad esempio, in caso di intense precipitazioni).

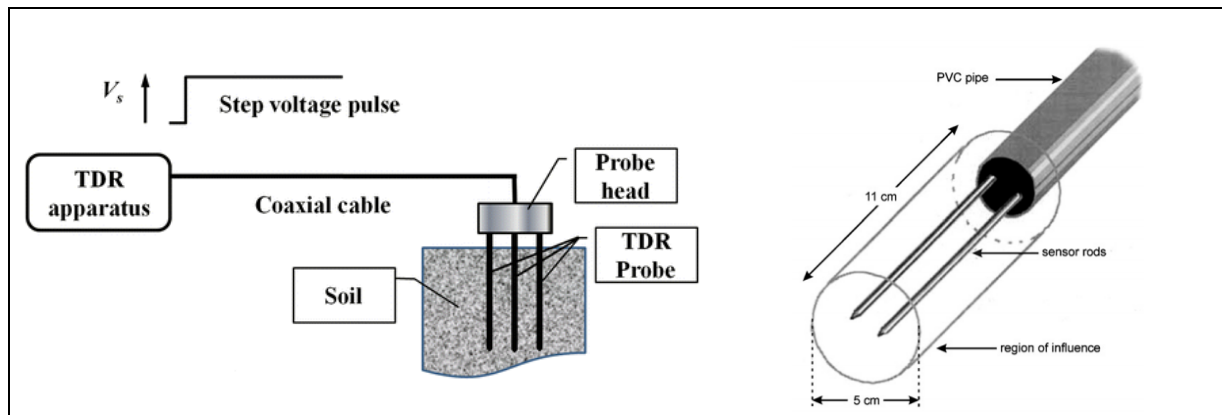



Figura 8. Schematismo di un sistema TDR ^[50] e del tratto terminale della sonda di misura ^[51].

Le sonde si prestano bene all'utilizzo in modalità remota e parzialmente automatizzata, mediante datalogger e strumenti per la gestione dei dati ed eventuale trasmissione telemetrica (rete GSM). In tal senso la tecnologia è più che consolidata. In questa e nelle successive soluzioni tecniche di misura, lo sviluppo della telemetria ha dato un impulso fondamentale a sistemi di monitoraggio anche su aree non presidiate, per periodi tempo mediamente lunghi, ma anche per applicazioni su scala ridotta e in cui la disponibilità di risorse è limitata. Ad esempio, la possibilità di combinare più sonde nel profilo stratigrafico, in una configurazione multiplexing, e di rilevare i valori di umidità nel suolo contemporaneamente a più profondità permetterebbe di valutare l'avanzamento di un fronte di infiltrazione, cioè un utile metodo sia ai fini del monitoraggio, sia per validare i codici di simulazione direttamente in situ.

Sono anche disponibili sul mercato delle sonde TDR portatili utilizzate soprattutto in ambito agronomico, per la misura dell'umidità del suolo, che possono essere utilizzate solo nei primi orizzonti superficiali del profilo, a meno di uno scavo in profondità per favorirne il posizionamento periodico prima della misura. La maggior parte di queste e delle successive sonde descritte, permettono anche misure di salinità e di temperatura.

Un vantaggio nell'utilizzo di questa tecnica, se si decide che la qualità della misura può essere accettabile, consiste nella possibilità di effettuare misure senza obbligo di calibrazione delle sonde. In caso contrario, la calibrazione può comunque essere condotta se si necessita di una particolare precisione o se si opera in contesti particolari: suoli molto porosi con elevato contenuto idrico o in suoli molto densi, a bassa porosità. Per ovviare al problema dei suoli con elevato contenuto di argilla, si può operare con sonde in grado di lavorare ad alte frequenze, cioè prossime a 1 GHz, che permette anche di ridurre l'influenza della temperatura sulla misura.

Le sonde TDR forniscono un valore del contenuto idrico, mentre i tensiometri forniscono il valore della tensione matriciale, è quindi possibile, combinando le due strumentazioni, giungere alla costruzione della curva di ritenzione idrica che lega umidità e tensione matriciale, associando un valore di contenuto idrico per ciascun valore di tensione. Questa è una valida soluzione per la definizione della curva direttamente in situ, ovviamente per gli orizzonti che possono essere interessati dall'installazione degli strumenti.

 Centro Ricerche Bologna	Sigla di identificazione SICNUC – PE46 002	Distrib. L	Pag. 39 di 54
---	--	---------------	------------------

4.3.2. Frequency Domain Reflectometry (FDR)

La tecnica FDR, comunemente definita riflettometria nel dominio delle frequenze, ha finalità identiche alla precedente, cioè misurare il contenuto volumetrico di acqua in un mezzo poroso non saturo. Si basa sulla misura delle variazioni nella propagazione di un campo elettromagnetico, utilizzando una misura di frequenza dei segnali in uscita e in ingresso da uno specifico circuito oscillatore; da queste variazioni di frequenza si può risalire al contenuto idrico nel suolo. Il procedimento è analogo a quanto visto per le sonde TDR e utilizza una funzione per tradurre i segnali rilevati in volume di acqua nell'intorno del sensore. La tecnologia è relativamente più veloce della TDR nell'effettuazione delle misure (la risposta dei sensori è più celere), ma a differenza delle sonde TDR, i sensori FDR vanno opportunamente tarati in funzione della tipologia di terreno che si sta indagando [52]. Le tecniche sono utilizzate sia in situ che in laboratorio, come del resto per le sonde TDR.

La procedura di installazione è analoga alla precedente tecnica TDR, con analoghi vantaggi e svantaggi, tra cui la difficoltà di installazione a profondità superiori di qualche metro dalla superficie del suolo. Questa tecnica presenta l'indubbio vantaggio di effettuare misure rapide ed affidabili, facilmente ripetibili, anche mediante la realizzazione di un sistema parzialmente automatizzato e gestibile in remoto come accennato nel precedente paragrafo.

4.3.3. Tecniche con sonde "Theta" e con sonde di tipo capacitivo

Lo strumento è costituito da 4 elettrodi, che isolano un volume cilindrico di terreno; attraverso tre di questi elettrodi, sono inviate delle onde radio verso il quarto elettrodo, posto al centro del volume di terreno indagato. La deformazione delle onde radio è funzione del contenuto idrico volumetrico. In particolare si opera rilevando la variazione di ampiezza dell'onda, più che quella di frequenza, perché la sua deformazione è legata alla permittività elettrica del mezzo e quindi al suo contenuto idrico. Solitamente si opera con frequenze prossime a 100 MHz, per annullare gli effetti dovuti alla presenza degli ioni in soluzione, che influenzano anch'essi la permittività elettrica; ne consegue che le variazioni rilevate sono, con ottima approssimazione, imputabili unicamente al contenuto idrico. L'umidità rilevata è rappresentativa dell'intorno del volume isolato dagli elettrodi e può quindi essere considerata una misura puntuale lungo il profilo stratigrafico. Queste sonde si possono installare in modo semplicissimo mediante inserzione nel terreno su un fronte di scavo, tenuto conto delle modifiche indotte nel mezzo che si sta indagando, come precedentemente esaminato, oppure mediante una tubazione protettiva pre-infissa nel terreno. Anche per questa tipologia di strumenti, i limiti sono legati alle profondità raggiungibili, al massimo di alcuni metri dalla superficie del suolo. Il vantaggio di questo tipo di strumenti è l'elevata versatilità di applicazione in molte tipologie di mezzi porosi non saturi, garantendo un'elevata affidabilità delle misure.

A differenza della precedente, la sonda con sensori di tipo capacitivo si basa su misure di variazione di frequenza del campo elettrico in un mezzo poroso, come la precedente tecnica FDR; ma in questo caso la sonda è costituita da un condensatore, realizzato da due elettrodi separati da materiale plastico. Il campo elettrico generato intercetta il mezzo poroso all'esterno della tubazione di contenimento, infissa nel terreno. Un oscillatore all'interno della sonda misura la

frequenza di risonanza del campo elettrico, che dipende dalla capacità elettrica del sedimento, a meno delle interazioni con il tubo di contenimento. La capacità è a sua volta una funzione della permittività elettrica del mezzo poroso, che dipende dal contenuto idrico (generalmente misurato in volume).

Si installano mediante una tubazione pre-infissa nel terreno, con un diametro leggermente superiore a quello della sonda stessa per permetterne un agevole inserimento, ma minimizzando al contempo la presenza di aria tra le pareti del tubo e lo strumento da inserire, per ridurre le interferenze negative nei rilievi. Un vantaggio dello strumento risiede nella sua relativa economicità, nonché nella semplicità di impiego e nella bassa sensibilità alle variazioni di temperatura. Per contro, il suo utilizzo in terreni con elevata componente argillosa necessita di una specifica taratura, vista la sensibilità verso questo tipo di materiale.

4.3.4. Sonda a neutroni

Un'altra tecnica di misura indiretta dell'umidità dei terreni, sviluppata a partire dagli anni '50 del novecento, riguarda l'utilizzo di una sorgente radioattiva (ad esempio americio₂₄₁) in grado di emettere neutroni veloci che vanno a collidere in modo elastico con gli atomi presenti nel mezzo poroso. La perdita di energia è tanto più elevata quanto maggiori sono le collisioni con particelle di massa simile; gli atomi di idrogeno presentano queste caratteristiche e la loro concentrazione è diretta conseguenza della presenza di molecole d'acqua. L'azione cosiddetta termalizzante può essere imputata quasi completamente alla presenza di idrogeno nel mezzo poroso e quindi la presenza di neutroni lenti (neutroni termici) è proporzionale all'umidità presente.

Uno speciale detector presente nella sonda (a brevissima distanza dalla sorgente di emissione) rileva la quantità di neutroni lenti per unità di tempo, dopo il percorso all'interno del terreno. Il valore del conteggio dei neutroni termici lenti è correlato al contenuto idrico mediante una specifica curva di taratura; l'operazione è normalmente effettuata direttamente da un microprocessore installato nella sonda, che rileva i dati del conteggio e li traduce in valori di contenuto idrico. Le sonde prevedono la memorizzazione di più curve di taratura, in modo da facilitarne l'utilizzo. I produttori forniscono strumenti con curve di taratura standard, che ovviamente non sono adattabili a tutti i tipi di terreno; per questa ragione è fondamentale l'operazione di calibrazione di cui al seguito.

La misura si effettua dopo installazione di un'apposita tubazione nel suolo (installazione verticale od orizzontale), con geometria e dimensioni tali da contenere la sonda, che normalmente ha forma cilindrica, con altezza che oscilla da 20 cm a 30 cm e diametro da 3 cm a 5 cm; la dimensione della tubazione infissa nel mezzo poroso non deve superare eccessivamente le dimensioni dello strumento, perché la presenza di aria attorno alla sonda influisce sulle misure; l'ideale è quindi disporre di una tubazione in grado di contenere la sonda e quindi permetterne l'inserimento e l'estrazione senza frizioni. La tubazione installata è mantenuta in situ, mentre lo strumento vero e proprio è utilizzato ed installato solo durante le misurazioni.

I materiali della tubazione di contenimento influiscono sulle misure: il PVC è da escludersi per l'assorbimento dei neutroni, mentre è da preferire l'alluminio, che non altera il percorso dei neutroni e non è soggetto a corrosione nei suoli, oppure l'acciaio in particolari contesti. La tubazione deve essere isolata dalla superficie del suolo (preferibilmente con chiusura ermetica dopo l'utilizzo) per evitare infiltrazioni di acqua che ne possono pregiudicare la funzionalità o falsare le misure.

La sonda necessita però di una specifica calibrazione, che può essere effettuata direttamente in situ, in aree adiacenti il sito sperimentale. Lo scopo della calibrazione è quello di individuare la legge empirica di correlazione tra conteggio dei neutroni e contenuto idrico; si effettuano misure a profondità differenti, affiancate dal prelievo di campioni di suolo alle medesime profondità, adiacenti i punti di misura della sonda. I campioni sono quindi sottoposti a misura del contenuto idrico in laboratorio per costruire una curva di taratura. Un altro sistema di taratura prevede di operare direttamente e solo in laboratorio, su campioni di terreno rappresentativo del sito di studio; questi sono quindi essiccati, inseriti in contenitori in cui è immesso un contenuto di acqua conosciuto e quindi misurati con la sonda a neutroni. Si ottengono quindi i valori di conteggio per determinati contenuti di acqua.

La misura fornisce il contenuto idrico medio di un volume di suolo sferico di alcuni decimetri di raggio intorno al punto di misura (sfera di influenza). La dimensione del volume interessato dal percorso dei neutroni è proporzionale al contenuto idrico; maggiore è la presenza di acqua e minore la distanza percorsa dai neutroni. Di questo aspetto si deve tenere presente per la programmazione dei punti di misura, per non scegliere posizioni il cui campo di misura si influenzi vicendevolmente, ottenendo valori che sono in parte sovrapponibili.

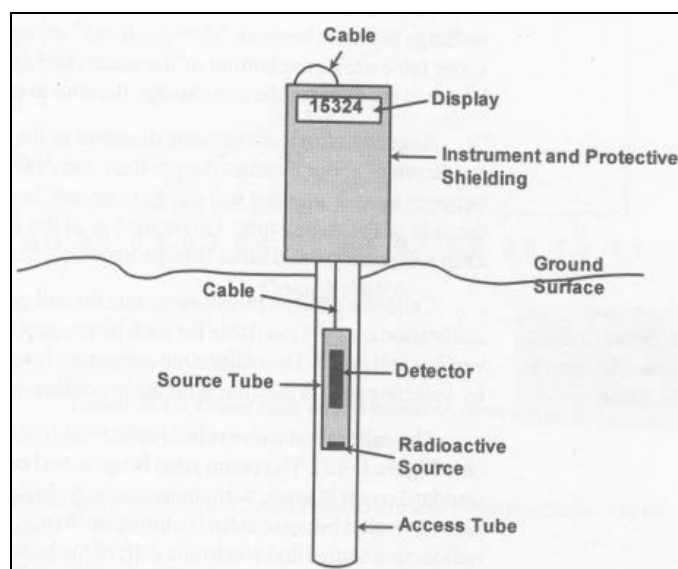


Figura 9. Rappresentazione schematica di una sonda a neutroni.

Il principale svantaggio nell'uso della sonda a neutroni, oltre al costo, riguarda le implicazioni di sicurezza che ne regolano l'utilizzo e quindi la necessità di utilizzo da operatori autorizzati e specializzati, vista la sorgente radioattiva che costituisce il fulcro del sistema di misura. Questo ne ha limitato l'impiego, nonostante le attuali sonde presentino sistemi di schermaggio dalla sorgente radioattiva molto efficaci. Un ulteriore svantaggio risiede nell'installazione della tubazione di contenimento, che crea inevitabili perturbazioni nel sistema.

Le misure non possono essere automatizzate visto che la sonda è disinstallata dopo i rilievi e non può essere lasciata sul posto per evidenti motivi di sicurezza. I rilievi in prossimità della superficie del suolo (pochi cm di profondità) sono viziati dall'inevitabile "fuga" verso l'atmosfera di parte dei neutroni, che non sono catturati dal suolo; quindi sono da evitare misure prossime alla superficie per almeno i primi 15-20 cm di profondità, per poter schermare le radiazioni verso l'esterno. In

alternativa, per ovviare in parte al problema nel caso si necessiti di misure in prossimità del piano di campagna, è possibile utilizzare una schermatura superficiale per limitare la diffusione dei neutroni all'interfaccia suolo-atmosfera. Questo accorgimento permette anche di limitare l'esposizione dell'operatore all'emissione neutronica. Le misure possono essere anche falsate in presenza di elevati quantitativi di sostanza organica, che catturano i neutroni emessi dalla sorgente, fornendo valori di umidità superiori a quelli realmente presenti.

Le misure sono alquanto accurate dopo la taratura nel sito di studio; un ulteriore vantaggio consiste nella loro velocità di esecuzione: meno di un minuto per acquisire un conteggio affidabile. Il volume del mezzo poroso che è interessato dalla misura è più elevato rispetto alle tecniche indirette precedentemente descritte e anche rispetto ai volumi monitorati dai tensiometri; questo può costituire un vantaggio se si vogliono effettuare particolari valutazioni sulla dinamica idrica senza dover interpolare dati puntuali. Quindi la misura non è propriamente puntuale della profondità del suolo, ma rappresentativa di un volume di suolo pari ad alcuni decimetri di raggio intorno alla sorgente.

Le sonde attuali sono facilmente maneggiabili e non necessitano di un'alimentazione elettrica esterna, basandosi su batterie interne ricaricabili, generalmente con tensioni di 12 V. Questi aspetti rendono la sonda facilmente impiegabile in situ, anche in condizioni disagiati.

La possibilità di misurare il contenuto idrico nel suolo può essere affiancato, come visto per le tecniche TDR e FDR precedenti, dalle misure tensiometriche; lo scopo è quindi quello di ricostruire la curva di ritenzione idrica del mezzo poroso. È opportuno installare i tensiometri e la tubazione che ospiterà la sonda a distanze ridotte, per ottenere dati rappresentativi di un volume di terreno omogeneo, ma allo stesso tempo a distanza tale da non creare interferenze reciproche.

4.4. Cenni alle indagini di laboratorio su campioni di un mezzo poroso non saturo

I metodi di misura da condurre in laboratorio per la determinazione dei principali parametri fisici di un mezzo poroso sono ampiamente standardizzati e descritti nella bibliografia specifica. Per completezza di informazione, vista la descrizione fornita per le metodologie di indagine da condurre direttamente sul sito, è parso opportuno riportare nel seguito alcuni cenni a queste metodiche, con alcuni riferimenti al significato stesso dei singoli parametri; senza però approfondire un argomento, quello dei metodi ufficiali di analisi dei suoli, che esula dalle finalità del presente lavoro e può essere reperito nella bibliografia di settore.

Un campione di terreno prelevato per analisi di laboratorio, vista l'eterogeneità del contesto geologico e pedologico della ZNS, rappresenta un volume abbastanza piccolo rispetto al dominio che si vuole indagare; il dato ottenuto è quindi puntuale e può presentare problemi di rappresentatività del sistema. I metodi di laboratorio sono generalmente distruttivi e non ripetibili sullo stesso campione; le campagne di misura su ampie aree e per un elevato numero di campioni sono molto dispendiose in termini di tempo e risorse da impiegare. Nonostante questi aspetti, le misure di laboratorio possono fornire dati molto interessanti per la taratura degli strumenti e delle tecnologie indirette di misura, nonché fornire un valore ai parametri richiesti nei moderni codici di simulazione. Anche per questi motivi si è ritenuto utile includere una loro sintetica descrizione.

4.4.1. Misura del contenuto idrico

Il metodo termogravimetrico in laboratorio è largamente utilizzato per la misura dell'umidità di un campione di terreno ed è stato codificato dallo standard ASTM D 2216/80 *Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass*. Il contenuto di acqua, come già ampiamente descritto, rappresenta il volume occupato dalla fase liquida in un mezzo poroso e può essere espresso in termini di massa della fase fluida, in termini volumetrici, oppure come grado (percentuale) di saturazione rispetto al totale della porosità. La procedura prevede di misurarne il valore pesando il campione di terreno prima e dopo essiccazione in forno ad una temperatura di $110 \pm 5^\circ\text{C}$ per 12-16 h; dalla massa relativa al contenuto idrico si passa alla percentuale di umidità attraverso la densità dell'acqua e la densità apparente del campione.

Il contenuto idrico volumetrico deriva dalla ovvia relazione:

$$\theta = \frac{V_{liq}}{V_{soi}} \quad (28)$$

che può essere espresso come grado di saturazione rispetto al volume totale dei pori:


$$S = \frac{V_{liq}}{V_{gas} + V_{liq}} \quad (29)$$

Il vantaggio risiede nella semplicità di esecuzione delle prove, nella loro economicità e nella precisione ed affidabilità dei dati misurati, nonché nel fatto che il metodo è standardizzato, quindi diffusissimo nei laboratori di analisi. Però allo stesso tempo non possiede il requisito di versatilità e rapidità che sarebbe necessario in campagne di misura su ampie aree, ripetute nel tempo. Da evidenziare che, come già ampiamente sottolineato, parte del volume liquido residuo continuerà a permanere all'interno del campione anche dopo essiccazione in forno (acqua di ritenzione o igroscopia). Questo metodo di misura diretta si può considerare funzionale per la taratura degli strumenti di rilievo indiretto prima descritti.

4.4.2. Misura della conducibilità idraulica

La conducibilità idraulica o permeabilità è la misura della proprietà di un mezzo a consentire il passaggio di un fluido o di un gas al suo interno. Nei mezzi porosi non saturi si pone l'importante distinzione, già ampiamente vista, tra conducibilità satura e non satura e si definisce una funzione di correlazione tra conducibilità idraulica e contenuto idrico del mezzo. La stima dei valori può essere effettuata mediante metodi indiretti, che sono utili in una fase di caratterizzazione preliminare, rimandando ad una fase di maggiore dettaglio le misure in situ o in laboratorio.

La permeabilità può essere misurata in laboratorio mediante le tradizionali prove con permeametri a carico costante, per materiali ad elevata permeabilità, e a carico variabile per materiali a bassa permeabilità. Tra le misure dirette in situ (anche se esulano dal contesto di questo paragrafo) si citano le prove mediante infiltrometri, che hanno il vantaggio di poter essere ripetibili dopo un certo periodo di tempo. Per contro possono essere molto lente per terreni fini e si basano su alcune assunzioni di partenza, quali terreno omogeneo, condizioni isoterme e non rigonfiamento del materiale. Esistono poi tutta una serie di determinazioni empiriche per derivare i

 Centro Ricerche Bologna	Sigla di identificazione SICNUC – PE46 002	Distrib. L	Pag. 44 di 54
---	---	----------------------	------------------

valori di conducibilità idraulica sulla base della distribuzione granulometrica, che sono utili per una prima valutazione del tutto approssimativa del valore di permeabilità [53].

Per definire in laboratorio una curva di conducibilità idraulica, in funzione del contenuto idrico, uno dei metodi di laboratorio più diffusi è quello di Wind, elaborato negli anni '60 del novecento, con le integrazioni successive [54]. La tecnica permette di costruire prima la curva di ritenzione idrica, quindi di derivare i valori di K in funzione dell'umidità, mediante tecniche di evaporazione. Esistono anche altri metodi indiretti di laboratorio, che permettono la valutazione della curva di conducibilità idraulica mediante la misura di altri parametri del non saturo, quali la conduttività elettrica del mezzo stesso [55]; oppure mediante centrifugazione dei campioni, secondo il metodo QSC (*Quasi-Steady Centrifuge Method*) [56].

4.4.3. Determinazione della curva di ritenzione idrica

I metodi in situ per la misura dell'umidità e dei corrispondenti valori di tensione forniscono valori rappresentativi dei sedimenti indagati, che non hanno subito importanti variazioni in loco durante le prove. Misure dirette condotte in laboratorio agiscono invece su campioni disturbati, con tutti i limiti del caso.

I sistemi oggi disponibili sono diversi; alcuni sono applicati da decenni, come le piastre di Richards, costituite da una camera a pressione, confinata da una membrana in cellulosa che permette il passaggio della sola fase fluida e non di quella gassosa; i valori dell'umidità presente nel mezzo poroso per particolari valori di pressione imposti nella camera sono misurati per pesatura del campione. In questo modo è possibile interpolare una curva di ritenzione idrica. Un altro metodo per la determinazione della curva di ritenzione è quello del punto di rugiada, che però, nonostante l'accuratezza, ha lo svantaggio di essere sensibile alla presenza degli ioni in soluzione e di funzionare bene solo per tensioni intermedie o molto negative. Il metodo di Wind, analizzato per le misure di conducibilità in laboratorio è anche utilizzato per misure di tensione matriciale, contenuto idrico. Altro metodo da citare per misure su coppie di valori tensione, umidità è quello di Stackman [57].

Vista la variabilità dei metodi di indagine, per ottenere curve di ritenzione affidabili sarebbe oltremodo utile combinare tecniche diverse in funzione del range di tensioni che si vogliono misurare. In particolare il metodo Stackman è funzionale per gli intervalli di tensione prossimi alla saturazione, il metodo delle piastre di Richards per valori intermedi della curva di saturazione, mentre il metodo del punto di rugiada per valori di tensione molto negativi [58]. In laboratorio si possono poi applicare tutta un'altra serie di metodi indiretti per la determinazione della curva di ritenzione idrica, che si basano anche sulle misure delle proprietà elettriche del mezzo poroso. Per una disamina più approfondita si rimanda a [59].

4.4.4. Misura della densità apparente e reale

La densità apparente rappresenta il rapporto tra la massa totale del campione (comprensiva di tutte le fasi presenti) ed il suo volume ed è espressa in kg/m^3 . La misura è riferita al campione di materiale secco, dopo passaggio del campione in stufa a 105 °C per 24 ore; la densità in questione è definita "apparente" perché il volume totale include anche quello della porosità. E' determinabile mediante rapporto tra la massa della frazione solida e il volume totale del campione:

$$\rho_a = \frac{M_s}{V_T} \quad (30)$$

La densità reale rappresenta invece il rapporto tra la massa della frazione solida del terreno, a meno della fase gassosa e liquida, ed il volume della stessa; in tal caso le porosità non sono prese in considerazione e la densità reale è sempre maggiore della densità apparente. La densità reale è quindi la densità media dei granuli che compongono la fase solida del mezzo poroso ed è quindi dipendente dalla mineralogia del mezzo. E' anch'essa espressa nei termini di kg/m^3 ed è normalmente misurata mediante il picnometro, dopo essiccazione del campione in stufa a $105\text{ }^\circ\text{C}$. La relazione è data dal rapporto tra la massa ed il volume della frazione solida del campione:

$$\rho_r = \frac{M_s}{V_s} \quad (31)$$

La densità reale ha un valore medio per i suoli pari a circa $2,65\text{ kg/m}^3$. E' decisamente più bassa in presenza di elevate quantità di humus e sostanza organica, mentre aumenta in presenza di suoli ricchi in ematite o altri minerali ferrosi.

4.4.5. Misura della porosità

La porosità fornisce una valutazione dell'entità di pori presenti nel campione, inclusi anche quelli che non sono interconnessi tra di loro ed il volume totale del campione. Si calcola per via indiretta utilizzando la densità apparente e reale di cui ai precedenti paragrafi, secondo la relazione:

$$\phi = \frac{\rho_r - \rho_a}{\rho_r} \quad (32)$$

ed è espressa come indice o percentuale rispetto al volume totale.


Esiste una proporzionalità inversa tra la dimensione dei granuli e la porosità: al diminuire della dimensione dei granuli, la dimensione dei pori diminuisce, ma la porosità aumenta.

L'indice dei vuoti è in stretta relazione con la porosità, ma evidenzia il rapporto esistente tra il volume dei pori (occupato dalle fasi liquida e gassosa) e il volume della sola fase solida (non il volume totale). Si può esprimere come indice, secondo la relazione:

$$e = \frac{V_g + V_l}{V_s} \quad (33)$$

La relazione con la porosità può essere espressa come nel seguito:

$$e = \frac{\phi}{1 - \phi} \quad (34)$$

 Centro Ricerche Bologna	Sigla di identificazione SICNUC – PE46 002	Distrib. L	Pag. 46 di 54
---	--	---------------	------------------

4.4.6. Misura della superficie specifica

La superficie specifica rappresenta la sommatoria delle aree superficiali dei granuli contenuti nell'unità elementare di massa considerata o, in modo complementare, la superficie totale delle pareti dei pori per unità di massa (o di volume); dal punto di vista matematico è data dal rapporto tra la superficie di un granulo e la sua massa ed è espressa in m^2/g . Materiali argillosi o ad elevato contenuto di sostanza organica presentano un'elevata superficie specifica; in generale al diminuire della dimensione dei granuli, aumenta la superficie specifica. Per i minerali argillosi i valori medi della superficie specifica sono di centinaia di m^2/g , mentre per sedimenti sabbiosi si hanno valori medi di decine di m^2/g .

Uno dei metodi di misura più utilizzati è il cosiddetto metodo BET (*Brunauer–Emmett–Teller*), che si basa sull'assorbimento di azoto grazie alla teoria di Langmuir, che tratta l'assorbimento delle molecole di un gas sulla superficie di un solido.

Il valore della superficie specifica influisce sulla dinamica delle soluzioni che circolano in un mezzo poroso, visto che la capacità di ritenzione di ioni o molecole complesse da parte della frazione solida è proporzionale alla superficie specifica. Questo parametro influisce anche sulla forma della curva di ritenzione idrica.

4.5. La chimica e la geochimica isotopica nella caratterizzazione della dinamica idrica nella Zona Non Saturata

4.5.1. Ruolo degli studi geochimici

I metodi precedentemente descritti per il prelievo di campioni di acqua nel mezzo non saturo sono finalizzati alla successiva esecuzione di analisi chimiche ed isotopiche. La finalità delle indagini chimiche sulle soluzioni circolanti nella ZNS può essere così riassunta:

- prima caratterizzazione geochimica delle soluzioni;
- definizione dello “stato zero” dell'area di deposito, per la parte attinente il chimismo del mezzo insaturo;
- monitoraggio dei segnali chimici che possono indicare fenomeni di infiltrazione/evaporazione;
- supporto nelle prove di tracciamento al fine di caratterizzare l'area di deposito;
- monitoraggio della presenza di eventuali radionuclidi (fase di esercizio e post-chiusura).

Le analisi chimiche da condurre sui campioni di acqua prelevati dalla ZNS possono essere associate alla caratterizzazione geochimica delle fasi mineralogiche presenti nel mezzo, per ottenere una visione complessiva ed esaustiva del sistema indagato. Questo anche nell'ottica di studio dei coefficienti di distribuzione riferiti ai radionuclidi, che costituiscono parte fondamentale nell'analisi di sicurezza di un impianto nucleare.

Il chimismo delle acque nel mezzo non saturo va analizzato nel contesto dei segnali chimici delle precipitazioni, per verificare la loro utilità come traccianti naturali nell'interpretazione dell'infiltrazione nelle parti più superficiali del suolo oppure per quantificare gli effetti dell'evapotraspirazione. Da questi fenomeni dipende il movimento degli inquinanti verso gli acquiferi. Allo stesso tempo, l'analisi di caratterizzazione del chimismo della ZNS va effettuata nell'eventuale contesto delle

acque di falda, se questa sono in una situazione dove si possano ipotizzare dei consistenti rapporti di scambio tra i due sistemi.

E' opportuno un utile approfondimento sul sistema di campionamento delle soluzioni circolanti nella Zona Non Saturata, a completamento di quanto già descritto nel § 4.1. L'impiego dei lisimetri a suzione rappresenta una tecnica di prelievo diretto, non distruttivo, direttamente in situ delle soluzioni circolanti, cioè una tecnica di campionamento affidabile, comprovata dalle numerose applicazioni sperimentali, sebbene siano emersi alcuni limiti nel corso del loro utilizzo. Nel passato alcuni autori hanno sollevato delle critiche circa la possibilità di utilizzo dei lisimetri a suzione, con coppe porose ceramiche, per ottenere uno spettro completo dei principali anioni e cationi [60] [61]; ad esempio è stata verificata la non rappresentatività per i valori dei fosfati e nitrati che sarebbero in parte intercettati dal materiale costituente le coppe porose in ceramica, che quindi non possono essere considerate completamente inerti. Le coppe porose in teflon risolverebbero questo problema. Non sono stati invece rilevati problemi per quanto riguarda la misura dei principali cationi. E' stata anche segnalata l'ossidazione di alcune specie chimiche durante il campionamento, quali ioni ferro, manganese, ammonio [62]. La depressione indotta all'interno della coppa porosa comporta una degassazione del contenuto liquido, che perde gli eventuali composti volatili e la CO₂, con relativo aumento del pH.

Un ulteriore svantaggio risiede nella rappresentatività dei dati su vaste aree, visto che il prelievo è da considerarsi puntuale e indicativo del volume in un intorno della coppa porosa. Per questa ragione le considerazioni che si possono estrapolare dai dati chimici delle soluzioni circolanti dovrebbero essere ristrette al campo puramente qualitativo, per comprendere ad esempio la dinamica dell'infiltrazione/evapotraspirazione, velocità di infiltrazione di fronti umidi, interpretazione qualitativa di prove di tracciamento, ecc. Il prelievo in suoli disturbati per la presenza di vie preferenziali di flusso non trova riscontri particolarmente negativi; i dati vanno però interpretati con una maggiore attenzione critica, visto che il sistema di campionamento veicola al suo interno l'acqua senza discriminazione della sua provenienza (tra macropori o micropori). In particolare è favorito il prelievo dalle vie preferenziali di flusso, dove i quantitativi sono maggiori, con inevitabile diluizione del segnale chimico. Nonostante non vi sia possibilità di rimediare completamente a questi problemi, è bene essere al corrente dei limiti dello strumento per un suo impiego ottimale negli studi chimici della ZNS.

4.5.2. Ruolo della geochimica isotopica

Il frazionamento di isotopi stabili di alcuni elementi chimici può avvenire per fenomeni chimico-fisici e biologici; il suo studio fornisce utili informazioni sui fenomeni che lo hanno generato e può offrire un contributo importante alla comprensione della dinamica idrica nei sistemi naturali.

Il frazionamento consiste nella separazione dei diversi isotopi di uno stesso elemento durante processi chimico-fisici (adsorbimento, evaporazione, condensazione, precipitazione, ecc.) e biologici (fotosintesi), con conseguenti diverse concentrazioni delle specie nelle differenti fasi: l'isotopo più leggero di un elemento si concentra nella fase meno densa. Esempio tipico è costituito dall'evaporazione di una soluzione acquosa, dove gli isotopi più leggeri di idrogeno e ossigeno delle molecole d'acqua si concentrano nella fase vapore. Nel prosieguo ci si riferirà agli studi da condurre utilizzando i rapporti isotopici di ossigeno e

idrogeno della molecola d'acqua. Anche l'impiego di isotopi radioattivi è molto utile in campo ambientale; il Trizio e il ^{14}C sono comunemente utilizzati per datazioni delle acque profonde e per studi di dinamica del bilancio idrico, così come il ^{36}Cl in ambito nucleare per definire la velocità di infiltrazione in contesti rocciosi atti alla localizzazione di depositi di rifiuti radioattivi [63].


E' possibile esprimere l'indice di frazionamento isotopico come il rapporto tra la specie più pesante e quella più leggera di un medesimo elemento, confrontato con uno standard internazionale di riferimento; il risultato è espresso in parti per mille. Per il rapporto degli isotopi stabili dell'idrogeno (H^2/H^1) e dell'ossigeno ($\text{O}^{18}/\text{O}^{16}$) nella molecola d'acqua, lo standard di riferimento è il cosiddetto SMOW (*Standard Mean Oceanic Water*), che riflette il valore medio dei rapporti isotopici di ossigeno e idrogeno dell'acqua oceanica.

Nello specifico caso di studio, lo scopo della geochimica isotopica è quello di valutare le variazioni isotopiche indotte sugli isotopi stabili di idrogeno e ossigeno, per derivarne i fenomeni che le hanno indotte, da quantificare in base ad un valore di riferimento locale (ad esempio il valore di riferimento stagionale per le acque meteoriche nei processi di infiltrazione diretta dalla superficie del suolo). Quindi la geochimica isotopica è un mezzo di indagine utile per definire il movimento dell'acqua in forma liquida o gassosa nella Zona Non Saturata. La tecnica deve essere integrata con altre metodologie di studio, per giungere ad un'interpretazione corretta dei processi in atto. Queste indagini, nell'ambito della caratterizzazione dell'area di deposito, sono utili per lo studio sulla ZNS nell'area adiacente il sito, più che nella zona sottostante il deposito stesso; è possibile comprendere i flussi idrici di infiltrazione ed evapotraspirazione, da cui dipende la dinamica e la concentrazione dei radionuclidi eventualmente presenti nel suolo, nonché le relazioni con il contesto mineralogico e biologico presente nel mezzo insaturo. Questi fenomeni devono essere interpretati nel complesso del continuum atmosfera-suolo-piante-acquiferi per capire come migra ed evolve il segnale isotopico in queste matrici ambientali.

La tecnologia è altresì utilissima per contribuire alla quantificazione del bilancio idrico del sito, con particolare riferimento alla quota parte dell'infiltrazione idrica diretta dalla superficie che giunge negli acquiferi; ma è anche l'unico strumento in grado di evidenziare l'evaporazione dalla superficie di falda, tramite la frangia capillare, che può dare origine a fenomeni di condensazione nella ZNS, con una variazione del contenuto idrico nelle porosità che sarebbe altrimenti difficilmente interpretabile. Questi fenomeni di evaporazione, condensazione e infiltrazione idrica nella ZNS sono parte determinante nella migrazione degli inquinanti.


Per quanto riguarda la ricarica diretta dalla superficie del suolo, è necessaria l'identificazione del segnale isotopico stagionale delle precipitazioni, che varia in funzione della latitudine, dell'altitudine e ovviamente della stagione (segnali isotopicamente più arricchiti nei mesi estivi e più impoveriti nei mesi invernali). Il primo marker da seguire è quindi il segnale isotopico di input meteorico che attraversa la ZNS, associato all'analisi dei segnali isotopici delle acque interstiziali ed eventualmente di falda, per contribuire fattivamente alla definizione del quadro dettagliato ed esaustivo del contesto idrogeologico.

Così come visto per gli studi sulla chimica delle acque interstiziali, è necessario il campionamento mediante lisimetri a suzione, che attualmente costituiscono lo strumento principale per questo tipo di indagini nei suoli; vi è anche la possibilità di estrarre l'acqua interstiziale mediante centrifugazione di campioni di suolo e sottoporla ad analisi isotopica, ma il processo può indurre variazioni al segnale,

 Centro Ricerche Bologna	Sigla di identificazione SICNUC – PE46 - 002	Distrib. L	Pag. 49 di 54
---	---	----------------------	------------------

anche importanti. Altre tecniche prevedono ad esempio l'utilizzo della spettroscopia laser gassosa su campioni di suolo, dopo aver raggiunto l'equilibrio tra la fase liquida e quella di vapore dell'acqua interstiziale in un sistema a pressione, umidità e temperatura controllata [64]. In entrambi i casi, le misure sono di tipo distruttivo, non ripetibili e si possono condurre su un certo numero di campioni per limitare l'impegno necessario al campionamento. Le tecniche sono quindi adatte in caso di prima caratterizzazione di un'area o in caso di calibrazione e confronto con altre tecniche di studio, ma non sono attuabili per caratterizzazione e monitoraggio per periodi prolungati su ampie aree. Qualsiasi sia il metodo di prelievo dei campioni, è necessario che lo si mantenga per tutta l'attività di studio, per disporre di dati confrontabili.

Per quanto riguarda il campionamento con i lisimetri a suzione, si rimanda quindi a precedenti paragrafi § 4.1 e § 4.5.3 per le relative informazioni. E' importante sottolineare che il campionamento delle acque da sottoporre ad analisi isotopica va eseguito con particolare cura, soprattutto per quanto riguarda la conservazione dei campioni, al fine di evitare variazioni al segnale isotopico, quali l'esposizione a fonti di calore, alla luce del sole per periodi prolungati, in luogo caldo e secco, ecc. Anche in questo caso è quindi necessaria una procedura di campionamento e gestione dei campioni da redigere e applicare con estrema attenzione.

 Centro Ricerche Bologna	Sigla di identificazione SICNUC- PE46- 002	Distrib. L	Pag. 50 di 54
---	---	----------------------	---------------

Riferimenti bibliografici

- [1] Winograd, I.J., 1972. Near surface storage of solidified high-level radioactive waste in thick (400-2,000 foot) unsaturated zones in the Southwest. Geological Society of America Abstracts, 4, 7, 708-709.
- [2] NEA, 2017. Communication on the safety case for a deep geological repository. OECD Publishing, Paris.
- [3] Seher, H., Navarro, M., Artmann, A., Larue, J., Roloff, R., Weiß, D., 2016. Modelling contaminant transport in generic landfills for decommissioning waste from German nuclear power plants. Progress in Nuclear Energy, 89, 46–56.
- [4] LeCain, G.D., Stuckless, J.S., 2012. Hydrology of the unsaturated zone, Yucca Mountain, Nevada. Hydrology and geochemistry of Yucca Mountain and vicinity, Southern Nevada and California, Geological Society American Memories, 209, 9–72.
- [5] Robinson, B.A., Chu, S., Lu, Z., 2012. Simulation of radionuclide transport through unsaturated fractured rock: Application to Yucca Mountain, Nevada. Vadose Zone Journal, 11 (4).
- [6] Nichols, W.D., 1987. Geohydrology of the unsaturated zone at the burial site for low level radioactive waste near Beatty, Nye County, Nevada. U.S. Geological Survey Water-Supply, Paper 2312, 52 p.
- [7] Striegl, R.G., Prudic, D.E., Duval, J.S., Healy, R.W., Landa, E.R., Pollock, D.W., Weeks, E.P., 1996. Factors affecting tritium and 14-carbon distributions in the unsaturated zone near the low-level radioactive-waste burial site south of Beatty, Nevada. US Geological Survey. Open File Rep, 96-110.
- [8] Benes, V., Janu, M., Holub, J., 1997. Modelling of contaminant transport from the repository of institutional radioactive wastes in the Richard II mine in the Czech Republic. International Atomic Energy Agency.
- [9] Skuratovic, Z., Mazeika, J., Petrošius, R., Martma, T., 2016. Investigations of the unsaturated zone at two radioactive waste disposal sites in Lithuania. Isotopic Environmental Health Studies, 52 (4–5), 544–552.
- [10] Petre, I., Didita, L., Ionescu, A., Deaconu, V., 2003. Contributions to safety assessment of the radioactive waste disposal facilities. In NEMEA-2 Workshop neutron measurements, evaluation and applications, Book of Abstracts.
- [11] Arsene, C., Negoiu, D., 2001. Experimental research of 3H migration in unsaturated soils of Saligny-site. SIEN 2001, International Symposium on Nuclear Energy, Nuclear Energy Development in the South-East Europe, 509.
- [12] Mallants, D., Karastanev, D., Antonov, D., Perko, J., 2007. Innovative in-situ determination of unsaturated hydraulic properties in deep loess sediments in north-west Bulgaria. ASME, 11th International Conference on Environmental Remediation

and Radioactive Waste Management, Parts A and B, 733-739, Bruges, Belgium, September 2–6, 2007.

[13] El-Ghonemey, H., 2004. SCLS Groundwater conceptual model. Nuclear sciences and technology services. British Nuclear Fuels Ltd..

[14] Tuller, M., Or, D., 2003. Retention of water in soil and the soil water characteristic curve. In Encyclopedia of soils in the environment. Vol. 4. Ed. D. Hillel. Elsevier Ltd., Oxford, UK. pp. 278–289.

[15] Kuang, X., Jiao, J.J., 2014. A new equation for the soil water retention curve. European Journal of soil science, 65 (4), 584-593.

[16] Daanen, R.P., Nieber, J.L., 2009. Model for coupled liquid water flow and heat transport with phase change in a snowpack. Journal of Cold Regions Engineering, 23 (2), 43-68.

[17] Richards, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. Physics, 1, 318–333.

[18] Beven, K., German, P., 1982. Macropores and water flow in soils. Water Resources Research, 18, 1311-1325.

[19] van Genuchten, M.Th., Wierenga, P.J., 1976. Mass transfer studies in sorbing porous media. Analytical solutions. Soil Science Society of American Journal 40, 473–481.

[20] Germann, P.F., 1985. Kinematic wave approach to infiltration and drainage into and from soil macropores, Transactions of American Society of Agricultural and Biological Engineers, 28, 745-749.

[21] Chen, P., Wei, C., Ma, T., 2015. Analytical model of soil-water characteristics considering the effect of air entrapment. International Journal of Geomechanics, 15 (6).


[22] Šimůnek, J., Van Genuchten, M. Th., Šejna, M., 2006. The HYDRUS software package for simulating two-and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Technical manual, version, 1, 241.

[23] Fayer, M.J., Jones, T.L., 1990. "UNSAT-H version 2.0: Unsaturated soil water and heat flow model," PNL-6779, Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington.

[24] Trefry, M.G., Muffels, C., 2007. FEFLOW: a finite-element ground water flow and transport modeling tool. Ground Water, 45 (5), 525–528.

[25] van Genuchten, M.Th., 1981. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, 44, 892-898.

[26] van Genuchten, M.Th., Nielsen, D.R., 1985. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. Annales Geophysicae, 3 (5), 615-628.

 Centro Ricerche Bologna	Sigla di identificazione SICNUC- PE46- 002	Distrib. L	Pag. 52 di 54
---	---	----------------------	---------------

[27] Sillers, W.S., Fredlund, D.G., Zakerzadeh, N., 2001. Mathematical attributes of some soil–water characteristic curve models. *Geotechnical and Geological Engineering*, 19, 243–283.

[28] Gardner, W.R., 1956. Mathematics of isothermal water conduction in unsaturated soils. Highway Research Board Special Report 40, International Symposiums on Physico-Chemical Phenomenon in Soils, 1956, Washington, DC, USA, 78–87.

[29] Mualem Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12, 513-522.

[30] Campbell, G.S., 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Science*, 117, 311–314.

[31] Shirazi, M.A., Boersma, L., 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Science Society of American Journal*, 48, 142–147.

[32] Vogel, T., Cislérova, M., 1988. On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve. *Transport in Porous Media*, 1988, 3 (1), 1-15.

[33] Bouma, J., 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advances in Soil Science*, 9, 177- 213.

[34] Schaap, M.G., Leij, F.J., van Genuchten, M.Th., 1998. Neural network analysis for hierarchical prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of American Journal*, 62, 847–855.

[35] Arya, L.M., Paris, J.F., 1981. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle size distribution and bulk density data. *Soil Science Society of American Journal*, 45, 1023–1030.


[36] Basile, A., D’Urso, G., 1997. Experimental corrections of simplified methods for predicting water retention curves in clay-loamy soils from particle-size determination, *Soil Technology*, 10, 261–272.

[37] Schaap, M.G., Leij, F.J., van Genuchten M.Th., 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Soil Science Society of American Journal*, 251, 352-361.

[38] Leij, F., Alves, W.J., van Genuchten, M.Th., Williams, J.R., 1996. The UNSODA Unsaturated Soil Hydraulic Database, User's Manual Version 1.0. EPA/600/R-96/095, National Risk Management Laboratory, Office of Research and Development, Cincinnati, OH, USA.

[39] A. Lilly, 1997. A description of the HYPRES database (Hydraulic properties of European Soils), in: A. Bruand, O. Duval, J.H.M. Wösten, A. Lilly (Eds.), *The Use of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology Research*, Proceedings Second Workshop of the Project Using Existing Soil Data to Derive Hydraulic Parameters for Simulation Modelling in Environmental Studies and in Land Use Planning. Orléans, France, 10–12 October 1996, 161–184.

- [40] Batjes, N.H., 1996. Development of a world data set of soil water retention properties using pedotransfer rules, *Geoderma*, 71, 31–52.
- [41] van Genuchten, M.Th., Leij, F.J., Yates, S.R., 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, ADA, OK 74820 (EPA/600/2-91/065).
- [42] Fares, A., Deb, S.K., Fares, S., 2009. Review of vadose zone soil solution sampling techniques. *Environmental Reviews*, 17 (1), 215-234.
- [43] Titus, B.D., Kingston, D.G., Pitt, C.M., Mahendrappa, M.K., 2000. A lysimeter system for monitoring soil solution chemistry. *Canadian Journal of Soil Science*, 80 (1), 219-226.
- [44] Rakesh, R.R., Narayan, P.K., Wattal, P.K., Anil Kumar, S., Hanumantha Rao, B., Sridhar, V., Singh, D.N., 2008. In-situ lysimetric studies for radionuclide migration in undisturbed unsaturated soil under geoenvironmental conditions. The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG) 1-6 October, 2008.
- [45] McConnell, J.W., Rogers, R.D., Jastrow, J.D., Sanford, W.E., Larsen, I.L., Sullivan, T.M., 1995. Results after ten years of field testing low-level radioactive waste forms using lysimeters. Lockheed Idaho Technologies Co., Idaho Falls, ID, United States. INEL, 95/00187.
- [46] Malicki, M.A., Plagge, R., Roth, C.H., 1996. Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil. *European Journal of Soil Science*, 47, 357–366.
- [47] Robinson, D.A., Jones, S.B., Wraith, J.M., Or, D., Friedman, S.P., 2003. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry. *Vadose Zone Journal*, 2003, 2, 444–475.
- [48] Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 1980, 16, 574–582.
- [49] Roth, K., Schulin, R., Flüher, H., Attinger, W., 1990. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resources Research* 26 (10), 2267–2273
- [50] Jung, S., Drnevich, V.P., Abou Najm, M.R., 2013. Temperature Corrections for Time Domain Reflectometry Parameters. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139, 5.
- [51] Skierucha, W., Wilczek, A., Alokina, O., 2008. Calibration of a TDR probe for low soil water content measurements. *Sensors and Actuators A: Physical*, 147 (2), 544–552.
- [52] Skierucha, W., Wilczek, A., 2010. A FDR sensor for measuring complex soil dielectric permittivity in the 10–500 MHz frequency range. *Sensors*, 10, 3314-3329.

 Centro Ricerche Bologna	Sigla di identificazione SICNUC- PE46- 002	Distrib. L	Pag. 54 di 54
---	---	----------------------	---------------

- [53] Alyamani, M.S., Sen, Z., 1993. Determination of hydraulic conductivity from grain size distribution curves. *Ground Water*, 31, 551–555.
- [54] Tamari, S., Brucler, L., Halbertsma, J.M., Chadoeuf, J., 1993. A simple method for determining soil hydraulic properties in laboratory. *Soil Science Society of America Journal*, 57, 642-651.
- [55] Doussan, C., Ruy, S., 2009. Prediction of unsaturated soil hydraulic conductivity with electrical conductivity, *Water Resources Research*, 45, W10408.
- [56] Caputo, M.C., Nimmo, J.R., 2005. Quasi steady centrifuge method for unsaturated hydraulic properties. *Water Resources Research*, 41, W11504.
- [57] Stackman, W.P., Valk, G.A., van der Harst. G.G, 1969. Determination of soil moisture retention curves, I. 3rd revised ed. Istitute fir Land and Water Management Research, Wageningen, the Netherlands.
- [58] Campbell, G.S., Shiozawa, S.. 1992. Prediction of hydraulic properties of soils using particle-size distribution and bulk density data. In “Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils”, p. 317–328, University of California, Riverside.
- [59] Campbell, G.S., 1988. Soil water potential measurement: an overview. *Irrigation Science*, 9, 4, 265-273.
- [60] Hansen, E.A., Harris, A.R., 1975. Validity of soil-water samples collected with porous ceramic cups. *Soil Science Society of American Journal*, 39, 528-536.
- [61] Levin, M.J., Jackson, D.R., 1977. A comparison of in site extracts for sampling soil water, *Soil Science Society of American Journal*, 41, 535-536.
- [62] Stumm, W., Morgan, J.J., 1981. *Aquatic Chemistry*. John Wiley, New York, 1981.
- [63] Levy, S., Chipera, S., Woldegabriel, G., Fabryka-Martin, J., Roach, J., Sweetkind, D., 1999. Flow-Path Textures and Mineralogy in Tuffs of the Unsaturated Zone, in *Faults and Subsurface Fluid Flow in the Shallow Crust*. Ed. W.C. Haneberg, P.S. Mozley, J.C. Moore and L.B. Goodwin, American Geophysical Union, Washington, D. C.
- [64] Wassenaar, L.I., Hendry, M.J., Chostner, V.L., Lis, G.P., 2008. High resolution pore water delta deuterium and oxygen-18 measurements by water (liquid)-water (vapor) equilibration laser spectroscopy. *Environmental Science Technology*, 42, 9262–9267.