

BOSSEA MMXIII

CONGRESSO NAZIONALE

LA RICERCA CARSOLOGICA IN ITALIA

Frabosa Soprana (Cn) – Grotte di Bossea
22-23 giugno 2013

ATTI

LABORATORIO CARSOLOGICO SOTTERRANEO DI BOSSEA
STAZIONE SCIENTIFICA DI BOSSEA CAI CUNEO – COMITATO SCIENTIFICO CENTRALE DEL CAI

Meccanismi di trasporto di massa nell’acquifero carsico costiero del Salento (Puglia): modello concettuale

FIDELIBUS M. DOLORES (*), SPECCHIO VITO (**)

RIASSUNTO

La ricostruzione del modello concettuale di acquiferi carsici richiede approcci metodologici specifici a causa della pratica impossibilità di conoscere la struttura degli stessi: approcci particolari sono tanto più richiesti quando per questi acquiferi si debba definire vulnerabilità intrinseca e zone di protezione o valutare il potenziale impatto degli inquinanti sulla qualità delle acque sotterranee. Dal punto di vista della caratterizzazione di tutti gli elementi necessari alla definizione del modello concettuale e quindi della vulnerabilità intrinseca e della vulnerabilità delle acque sotterranee, ma anche per molti altri aspetti idrogeologici, tra gli acquiferi che sono d’interesse della Regione Puglia, quelli carsici costieri, data l’aggiuntiva condizione al contorno che ne condiziona il comportamento idraulico, rappresentano un caso complesso. Allo scopo di esemplificare lo scenario di complessità che si può presentare nello studio di processi fondamentali quali quelli del trasporto di massa in acquiferi carsici costieri, sono illustrati i risultati dell’applicazione di traccianti naturali fisici nell’area del basso Salento. Dati chimici e profili multi-parametrici relativi ad un monitoraggio a frequenza trimestrale condotto presso i pozzi della rete di monitoraggio regionale nel periodo 1995-1996, nonché contenuti in isotopi stabili, sono utilizzati per formulare ipotesi in merito al ruolo svolto dai diversi sotto-sistemi carsici nel trasporto di massa dalla superficie alla falda profonda salentina per validare carte della vulnerabilità intrinseca.

KEY WORDS: *acquiferi carsici costieri, vulnerabilità intrinseca, vulnerabilità delle acque sotterranee, temperatura, traccianti naturali.*

INTRODUZIONE

Le acque sotterranee sono elemento essenziale nel soddisfacimento della domanda potabile della Regione Puglia. Il ricorso a tale risorsa diventa poi la soluzione più ricorrente in occasione di crisi idriche che determinano la riduzione di disponibilità delle risorse idriche superficiali addotte dalle regioni contigue.

In considerazione del valore che rivestono le opere di captazione di acque sotterranee destinate all’uso potabile è necessario provvedere alla definizione dei criteri per la

salvaguardia di tali opere. Nell’ambito della logica del complesso iter delineato sin dall’origine dalla Direttiva CE/2000/60, che, con inizio nell’anno 2000, indica l’orizzonte temporale del 2024 per la definizione completa di uno “Schema di Protezione delle Acque Sotterranee”, due principali elementi devono essere compiutamente sviluppati e integrati a tale scopo: una “zonazione” della superficie dei territori interessati e l’insieme delle “risoluzioni/risposte”, da comporre a grande e media scala, per la collocazione d’attività potenzialmente contaminanti.

La zonazione del territorio dovrà portare a definire le aree interessate in termini di vulnerabilità intrinseca e caratteristiche dei sistemi di flusso: nella pratica, la zonazione potrà essere ottenuta considerando tutti gli elementi che concorrono alla definizione delle caratteristiche geomorfologiche dei territori, dei campi d’esistenza degli acquiferi, delle caratteristiche idrauliche e geologico/strutturali degli stessi, con lo scopo finale di delimitare zone di protezione a vario grado, avendo anche classificato le acque sotterranee in termini di valore relativo/assoluto. Le “risoluzioni/risposte” dovranno indicare l’accettabilità di un particolare tipo d’attività inquinante in rapporto al pericolo potenziale da essi rappresentato e agli esiti della zonazione: le risposte dovranno essere sviluppate per centri di pericolo potenziale, quali possono essere le discariche di vario tipo, impianti di trattamento locali e spandimenti nella loro varietà possibile. Le “risoluzioni/risposte” definiranno i criteri e gli elementi di base per le relative progettazioni e le indagini appropriate per ogni condizione considerata.

Le “Linee guida per la tutela della qualità delle acque destinate al consumo umano e criteri generali per l’individuazione delle aree di salvaguardia delle risorse idriche” (art. 21 del D.lgs 152/99) forniscono indicazioni per la delimitazione delle aree di salvaguardia, identificando tre possibili criteri: geometrico, temporale e idrogeologico. Il terzo criterio trova applicazione in sistemi idrogeologici complessi.

Tale ultimo criterio è di complessa applicazione, sia con riferimento ai fattori naturali (complessità della caratterizzazione idrogeologica), sia per i fattori antropici e di carattere territoriale: in ogni caso esso è l’unico metodo applicabile nel contesto idrogeologico pugliese.

(*) Dipartimento di Ingegneria Civile Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica - DICATECh, Politecnico di Bari

(**) Geologo - Consulente Scientifico SOGESID

Nella pratica l'applicazione di un criterio idrogeologico significa indirizzare la gran parte dell'attenzione alla definizione del modello concettuale di funzionamento degli acquiferi: tale modello, usualmente fisico, descrive la sequenza e l'interconnessione delle aree di ricarica, la distribuzione delle permeabilità alla superficie del suolo e in profondità, le caratteristiche geologico-strutturali delle formazioni che costituiscono gli acquiferi e comprende la sequenza dei processi chimico-fisici agenti nell'ambito degli acquiferi stessi. Sicuramente, dal punto di vista della caratterizzazione di tutti gli elementi necessari alla definizione del modello concettuale e quindi della vulnerabilità intrinseca e della vulnerabilità delle acque sotterranee, tra gli acquiferi che sono d'interesse della Regione Puglia, quelli carsici rappresentano un caso a sé, data la particolare struttura e il conseguente comportamento idraulico. All'attualità, il livello delle informazioni geologiche e idrogeologiche disponibili su cui basare uno Schema di Protezione per le acque sotterranee pugliesi varia da zona a zona. Uno schema completo, basato su criteri idrogeologici, è oggi potenzialmente realizzabile solo in poche ristrette zone, laddove, per una serie di contingenze, si è concentrato l'interesse della ricerca e/o degli Enti preposti al controllo o sfruttamento delle acque sotterranee. Per la maggioranza del territorio non vi sono ancora adeguate informazioni geologiche che permettono di ricostruire, se non a scala regionale, le caratteristiche idrauliche del sottosuolo, per la parte insatura e satura, e quindi non è possibile produrre uno schema completo di protezione a breve termine.

Allo scopo di esemplificare lo scenario di complessità che si può presentare nello studio di processi fondamentali quali quelli d'infiltrazione e del trasporto degli inquinanti in aree carsiche (e di conseguenza della costruzione di affidabili scenari di vulnerabilità), dopo una disamina degli elementi che definiscono la suddetta complessità, sono illustrati i risultati dell'applicazione di traccianti ambientali fisici, chimici e isotopici ad aree del basso Salento.

Il Salento, infatti, costituisce uno degli scenari prioritari delle azioni di salvaguardia, in quanto la distribuzione delle opere di captazione per il comparto potabile investe prevalentemente l'area salentina.

VULNERABILITA' DEGLI ACQUIFERI CARSICI E CARSICI COSTIERI

L'approccio idrogeologico classico è generalmente inefficace nello studio di un acquifero carsico a causa della peculiarità del sistema idrologico, definito dall'insieme della sua struttura, comportamento idraulico ed evoluzione.

Con struttura di un sistema carsico si definisce l'organizzazione delle vie di flusso quale risulta dai processi carsici. Il comportamento idraulico è invece la risposta della struttura a un qualsiasi input ed è controllato dalle condizioni al contorno e dalla struttura stessa, che a sua volta può essere dedotta dallo studio del comportamento idraulico. L'evoluzione del sistema di solito complica la situazione, poiché le strutture derivanti da diversi stadi dello sviluppo del carsismo possono

sovrapporsi e quindi il comportamento idraulico può essere il risultato finale di tali sovrapposizioni (BAKALOWICZ *et alii*, 1995).

Queste caratteristiche "interne" del sistema s'inquadrano in caratteristiche "esterne", quali geologia (struttura geologica e petrografia), e morfologia, normalmente altrettanto peculiari quanto quelle del sistema idrologico. Se tra queste caratteristiche "esterne" è da annoverare anche la condizione al contorno di acquifero costiero, la complessità del sistema idrologico aumenta di molto (TULIPANO *et alii*, 2005). Le peculiarità delle caratteristiche "interne" e "esterne" di un acquifero carsico condizionano anche la definizione affidabile della vulnerabilità intrinseca: per tali fini, è ormai accettato dalla comunità scientifica che a oggi non vi siano metodi univoci (ZWALHEN, 2003).

Definire la vulnerabilità intrinseca significa avere uno strumento per proteggere tutto l'acquifero (la risorsa); definire la vulnerabilità delle acque sotterranee significa poter adottare dei criteri per proteggere una fonte specifica di approvvigionamento, accentrando per es. l'attenzione sulla porzione d'acquifero in cui si attesta un'opera di captazione.

La definizione della vulnerabilità intrinseca e della vulnerabilità delle acque sotterranee è basata su un modello origine-percorso-obiettivo, laddove l'origine rappresenta il luogo di rilascio di un potenziale inquinante, mentre il percorso è il cammino seguito dall'inquinante dall'origine sino all'obiettivo: per la protezione della risorsa l'obiettivo è la superficie della falda e il percorso da studiare è quello compiuto dall'acqua e dagli inquinanti attraverso l'insaturo, mentre per la protezione delle acque sotterranee (i.e. una specifica fonte) *il percorso include anche quello compiuto dalla superficie della falda verso un punto specifico all'interno della zona satura.*

La vulnerabilità delle acque sotterranee riferisce nella pratica della suscettività di un inquinante a essere trasmesso dalla superficie verso la zona satura e a raggiungere una specifica posizione in un sistema sotterraneo: in altre parole, essa è definita dal tempo necessario perché un inquinante arrivi in un determinato punto del sistema di flusso, avendone definito il punto d'ingresso. Diversamente, la vulnerabilità intrinseca di un acquifero è una misura della facilità con cui l'acqua s'infiltra e si muove verso l'acqua sotterranea: la vulnerabilità intrinseca, quindi, dipende dalle coperture che separano eventualmente l'acquifero dalla superficie topografica, dalle proprietà dell'acquifero nelle parti interessate dal percorso e dalle condizioni idrologiche; la vulnerabilità intrinseca è invece indipendente dalle caratteristiche chimiche dei potenziali inquinanti.

Chiaramente, la vulnerabilità all'inquinamento delle acque sotterranee a scala della fonte dipende non solo dalla vulnerabilità intrinseca dell'acquifero (per la parte che funge da area di ricarica per la fonte), ma anche dalla prossimità delle fonti d'inquinamento alle opere di captazione, dalle caratteristiche degli inquinanti e da altri fattori che possono accrescere/ridurre il carico complessivo dell'inquinante durante il suo trasporto verso la zona satura e, nell'ambito della zona satura, verso le fonti/opere di captazione. Nel momento in cui

un inquinante entra a far parte del sistema di flusso, infatti, il suo destino e le modalità complessive del trasporto verso la fonte dipenderanno, oltre che dal sistema di flusso (processi intrinseci), anche dallo specifico sistema geochemico caratterizzante l'acquifero (processi specifici): sistemi geochemici diversi hanno una diversa potenzialità rispetto alla riduzione del potenziale inquinante.

Il sistema antropico esterno va anch'esso riguardato come influente rispetto al sistema geochemico, poiché esso ha effetti spesso ancor più negativi sulla vulnerabilità delle acque sotterranee di quanto non l'abbia già come produttore di fonti d'inquinamento. Per es., sotto l'impatto di pratiche agricole che modificano il sistema di flusso in modo tale da aumentare la solubilità o la mobilità degli inquinanti più di quanto naturalmente consentito dalle condizioni geochemiche naturali, una risorsa idrica sotterranea può risultare più vulnerabile anche ad inquinanti naturali.

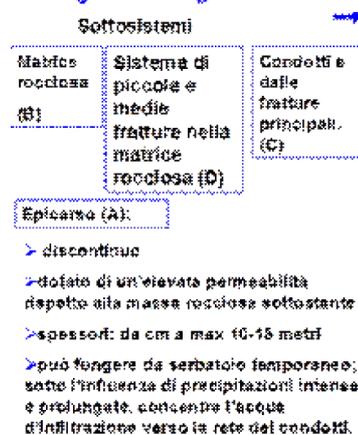
Molti diversi possibili approcci metodologici sono stati proposti per affrontare questi temi, tra cui quello definito "funzionale" (MANGIN, 1975): l'analisi d'idrogrammi delle sorgenti è strumento di osservazione del "funzionamento" del sistema carsico, sostanzialmente considerando l'acquifero come un black-box, alla ricerca di relazioni tra input e output. DROGUE (1971) e KIRALY (1975) hanno proposto un approccio strutturale: il sistema carsico è descritto schematicamente come una rete di canalizzazioni ad alta permeabilità con maglia chilometrica, immersa in un volume a bassa permeabilità di roccia fratturata e gli idrogrammi sono simulati per mezzo di modelli fisicamente basati. In entrambi gli approcci, le sorgenti sono considerate espressione della "risposta globale" del sistema carsico a eventi meteorici, ma nessuno dei due è risolutivo nello spiegare il funzionamento dei sistemi.

Eterogeneità organizzata e funzionamento del sistema carsico

L'eterogeneità organizzata (KIRALY, 1998) è il principale carattere distintivo di un acquifero carsico (Fig. 1). Essa è conseguenza dell'evoluzione dei processi carsici all'interno d'ammassi carbonatici: il grado d'evoluzione è riflesso, nella pratica, nella distribuzione della permeabilità intrinseca e, quindi, della conduttività idraulica. In generale la permeabilità intrinseca di un acquifero carsico è descritta in accordo a un modello a "tripla porosità", del tutto rispondente alla predetta eterogeneità organizzata, che considera la permeabilità intrinseca complessiva derivante da tre componenti: la permeabilità di matrice, di frattura e di condotto.

Le tre diverse permeabilità sono essenzialmente elementi indipendenti e, per ciascun acquifero reale la permeabilità è somma di questi tre elementi in varie proporzioni; vi sono tuttavia acquiferi carsici in cui un elemento può essere nettamente dominante. I campi idraulici connessi a ciascun tipo di permeabilità intrinseca operano evidentemente su scale differenti (JEANNIN, 1998). Il primo sistema, che fa capo alla matrice rocciosa, è assimilabile a un mezzo omogeneo isotropo: esso è caratterizzato da basse velocità di filtrazione e da una bassa conduttività idraulica, tra i 10^{-6} e i 10^{-7} m/s.

Eterogeneità organizzata



Reti costituite da canalizzazioni con maglia chilometrica, immerse in un volume a bassa permeabilità di roccia fratturata.

Ampio spettro di meccanismi di trasferimento e di tempi di residenza delle acque.

Questa variabilità non consente alcuna generalizzazione

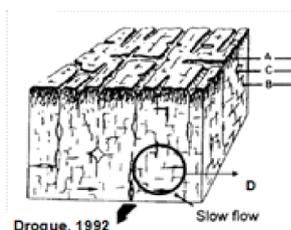


Fig. 1 – Eterogeneità organizzata in acquiferi carsici (DROGUE, 1992, modificata)

Il secondo sistema è associato al sistema di piccole e medie fratture nella matrice rocciosa: in questo caso il mezzo può risultare omogeneo in grande, ma non isotropo, essendo l'anisotropia legata alla direzione preferenziale delle fratture. Il terzo sistema è quello costituito dai condotti e dalle fratture principali. All'interno di quest'ultimo sistema il flusso non è più laminare. In linea generale si può affermare che, mentre la trasmissività si sviluppa nella rete di condotti, il ruolo di capacità d'immagazzinamento è assunto dal sistema annesso di fratture e dalla roccia meno permeabile che circondano la rete stessa.

La componente di condotto è il carattere più rilevante di un sistema carsico ed è la principale fonte d'indeterminazione nel suo studio. I sistemi dei condotti hanno geometrie complesse a causa delle numerose possibili influenze sulla loro evoluzione: essi possono essere sviluppati a diverso grado come risultato della loro storia geologica, idrogeologica, chimica, fisica e biologica. Non solo la geometria è difficilmente quantificabile, ma la posizione stessa della rete di condotti è, spesso, totalmente incognita, poiché non vi sono tecniche affidabili per ricostruire tale rete da osservazioni alla superficie.

Gli unici dati usualmente disponibili sono i risultati dei test con traccianti artificiali, che riescono a fornire informazioni in merito alla connessione tra input di superficie ed efflussi e sui tempi di transito, e i dati riguardanti gli idrogrammi e i chemogrammi delle sorgenti, che permettono in molti casi la quantificazione dei contributi volumetrici e qualitativi dei diversi elementi (matrice, fratture e condotti). Nella pratica, tuttavia, tali metodi sono applicabili solo a scala locale, laddove input e output sono relativamente vicini. La difficoltà di localizzare i condotti determina un alto livello d'incertezza nel determinare il funzionamento interno degli acquiferi carsici. La prevalenza di uno dei sistemi di permeabilità (definiti anche quali "serbatoi") e, nei diversi acquiferi, la diversa distribuzione dei sistemi stessi, inducono un ampio spettro di meccanismi di trasferimento di massa e di tempi di residenza delle acque: tale variabilità non consente alcuna generalizzazione d'entrambi i termini del problema (Fig. 2).



Fig. 2 – Schema delle relazioni tra fattori esterni e struttura nel determinare l'impatto degli inquinanti sulle acque sotterranee in acquiferi

In molti casi i modelli concettuali che descrivono i comportamenti osservati richiedono l'inclusione di un elemento intermedio, localizzato tra la superficie del suolo e la zona saturata, rappresentato dal cosiddetto epicarso (KIRALY, 1998). L'epicarso è quella parte della formazione carbonatica più vicina alla superficie topografica, dove la roccia è decompressa e soggetta all'alterazione: caratteristicamente l'epicarso è dotato di un'elevata permeabilità rispetto alla massa rocciosa sottostante. Questa zona carsica superficiale non è continua. Essa può avere spessori che vanno da centimetri a svariati metri e può contenere falde sospese che fungono da serbatoio temporaneo: sotto l'influenza di precipitazioni intense e prolungate l'epicarso può rapidamente concentrare l'acqua d'infiltrazione verso la rete dei condotti (Klimcouk, 2004). Molte delle caratteristiche dell'epicarso derivano, infatti, dal fatto che nel suo ambito l'infiltrazione è più agevole del deflusso. Il relativamente omogeneo campo di conduttività idraulica che si trova alla sommità dell'epicarso e che permette un'infiltrazione diffusa, diventa sempre più eterogeneo verso il "fondo": la diminuzione della permeabilità dell'epicarso con la profondità causa al suo letto una consistente componente laterale nel flusso, che converge verso le fessure che penetrano più in profondità. L'epicarso distribuisce la ricarica alla zona insatura sia come flusso veloce, sia lento: le risposte idrauliche e di trasporto di massa agli eventi meteorici dipendono dalla sua maturità e dal collegamento con la zona insatura, così come dall'intensità di pioggia e dalla storia delle precipitazioni antecedenti l'evento.

Parte dell'eterogeneità del sistema carsico, quindi, può essere determinata dallo sviluppo di un epicarso: poiché grandi volumi idrici possono essere immagazzinati vicino alla superficie per almeno diverse settimane fino a mesi durante i periodi di scarsa precipitazione, così dilazionando i loro trasferimento verso la zona saturata, appare chiaro quale ruolo possa svolgere l'epicarso nei confronti della definizione della vulnerabilità intrinseca e della vulnerabilità delle acque sotterranee all'inquinamento.

In occasione d'eventi meteorici importanti per intensità e/o durata o, in ogni modo, durante il periodo di ricarica della falda, una parte dell'acqua d'infiltrazione fluisce rapidamente attraverso i principali condotti: i processi di filtrazione non hanno efficacia in tali momenti, ma il potenziale di diluizione degli inquinanti è alto.

In seguito, anche l'epicarso risponde all'evento meteorico intenso e/o prolungato con il trasferimento ai condotti di quanto immagazzinato nel periodo precedente l'evento/ricarica (eventualmente concentrato quando non degradabile) verso la zona saturata. L'acqua che si muove attraverso i blocchi a minore permeabilità e che provvede il maggior contributo al deflusso sotterraneo passa più tempo nell'acquifero, favorendo i processi d'autodepurazione.

La conoscenza dettagliata delle caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero rappresenta quindi una precondizione per la definizione della vulnerabilità intrinseca della risorsa e delle acque sotterranee in ogni tipo di acquifero; a maggior ragione, data la loro complessità, tale conoscenza è necessaria per definire le diverse vulnerabilità di acquiferi carsici.

Nella maggior parte di tali acquiferi l'obiettivo è normalmente perseguito, come già detto, attraverso lo studio dettagliato del comportamento idraulico e chimico-fisico-isotopico delle sorgenti. Gli acquiferi carsici generalmente defluiscono, infatti, attraverso sorgenti (soggetto dello sfruttamento e delle pratiche di protezione) per le quali è sempre possibile individuare un bacino idrogeologico di limitata estensione e un sistema di flusso normalmente di tipo intermedio o locale.

Il comportamento delle sorgenti carsiche rappresenta la "risposta globale" degli acquiferi carsici agli eventi in ingresso. Poiché i dati disponibili sulla distribuzione tridimensionale dei parametri idraulici sono molto limitati, la più accessibile "risposta globale" è usata per desumere informazioni in merito all'infiltrazione e alle modalità del deflusso idrico sotterraneo, al campo idraulico e al grado di carsificazione dell'acquifero.

Presso le sorgenti è agevole organizzare misure in continuo (o sufficientemente ravvicinate) e campionamenti per seguire le variazioni temporali delle caratteristiche quantitative e qualitative: lo studio delle caratteristiche idrologiche delle sorgenti, quindi essenzialmente delle variazioni delle portate rispetto all'andamento delle precipitazioni, e delle variazioni conseguenti nella composizione chimica e isotopica delle acque drenate, consente normalmente di conseguire una conoscenza dei meccanismi di flusso e trasporto interessanti le sorgenti stesse.

L'idrogramma di una sorgente carsica da solo non permette sempre di distinguere i contributi dei diversi serbatoi possibili: se al dato idrologico si aggiunge invece quello della composizione chimica e isotopica delle acque, è possibile determinare l'origine delle acque che defluiscono nel tempo, poiché i diversi serbatoi presenti all'interno dell'acquifero hanno normalmente una ben chiara impronta chimica e isotopica. Le variazioni rispetto a uno input di precipitazione, laddove le sorgenti rappresentano lo sbocco di sistemi carsici

sviluppati (*conduit flow*), sono, spesso, immediate: il monitoraggio di tali sorgenti è impegnativo, poiché forti escursioni delle portate e dei valori dei parametri chimico-fisici si manifestano in tempi brevi. Le sorgenti a *conduit flow* richiedono misure e campionamenti più frequenti rispetto a quelli che si applicherebbero a sorgenti sgorganti da carsi meno sviluppati (*diffuse flow*). Conoscendo, tuttavia, il tipo di risposta di ciascuna sorgente, è relativamente semplice definire un adeguato protocollo di monitoraggio. La verifica diretta tramite misure di campo all'interno del mezzo carsico delle ipotesi formulate attraverso lo studio delle sorgenti è molto difficile: tuttavia, se le sorgenti rappresentano l'output di sistemi di flusso a carattere locale, le ipotesi possono trovare delle validazioni attraverso procedure di tracciamento artificiale.

Approccio metodologico per lo studio degli acquiferi carsici costieri pugliesi

Gli acquiferi carsici pugliesi sono di tipo costiero: essi, a causa della morfologia poco ondulata e della blanda topografia, presentano sistemi di flusso che si sviluppano essenzialmente a scala regionale e non presentano sorgenti interne, ma solo emergenze di tipo concentrato (costiere e sottomarine) sulla costa. Il deflusso a mare si svolge comunque anche in modo diffuso, laddove lo stato di fessurazione/fratturazione lo consente. Le acque al deflusso sono da poco a molto salmastre. Il deflusso diffuso non si presta evidentemente allo studio. Le sorgenti di tipo concentrato sono quasi tutte d'alta portata e con un contenuto salino grossomodo costante durante tutto l'anno: la presenza di una componente d'acqua salata maschera le caratteristiche chimiche ed isotopiche della componente d'acqua dolce, cioè quelle utili alla comprensione del contributo dei diversi serbatoi. In ogni caso le sorgenti concentrate rispondono a un bacino molto ampio, inadatto come dimensione a costruire ipotesi alla scala locale.

Date le suddette caratteristiche, in Puglia la captazione delle acque dolci per uso civile e irriguo avviene solo attraverso pozzi, anche molto profondi quando localizzati nelle parti più interne del territorio. Qualsiasi tipo di studio può quindi contare essenzialmente su misure condotte in pozzo. Sfortunatamente, i protocolli di monitoraggio e le metodologie d'interpretazione dei dati delineati per le sorgenti carsiche non sono agevolmente adattabili a pozzi. Le misure in pozzo, per essere rappresentative dei processi naturali di flusso e trasporto, devono interessare tutta la colonna idrica intercettata dalla perforazione e le misure devono essere condotte in condizioni statiche.

Già questo rappresenta un limite, poiché, nonostante i pozzi pubblici e privati (autorizzati e abusivi) siano numerosissimi, la maggior parte di essi è dotata di impianti di sollevamento che impediscono l'ingresso delle sonde e dei campionatori. Presso queste opere è possibile solo il campionamento in condizioni di esercizio: in questo caso le misure dei parametri chimico-fisici e isotopici possono fornire solo un'indicazione della risposta media di tutto lo spessore acquifero interessato dall'opera di

captazione.

Per ottenere una visione esaustiva del sistema acquifero occorrono, in teoria, informazioni lungo tutto lo spessore saturo. Purtroppo, data la limitata disponibilità di tecniche adeguate, solo alcuni parametri chimico-fisici possono essere agevolmente misurati in continuo con sonde lungo il profilo del pozzo (pH, Temperatura, Potenziale di ossido-riduzione, Ossigeno disciolto, Conduttività elettrica). Diversamente, la composizione chimica e isotopica delle acque sotterranee deve essere rilevata in laboratorio e quindi la relativa informazione può essere ottenuta solo con riferimento a campioni prelevati in condizioni statiche su tratti discreti della colonna idrica.

In ogni caso, sia i profili lungo la verticale del pozzo, sia i campionamenti a varie quote non possono che essere discontinui nel tempo: nella pratica non è possibile conoscere in maniera continua alcuno dei parametri chimico-fisici misurabili, a meno di riferirsi a profondità fisse e limitatamente a quei parametri misurabili con sonde specifiche. L'assenza di un unico punto per le misure (come la scaturigine di una sorgente) aumenta il numero delle variabili da considerare: se presso una sorgente la variabilità da studiare è quella nel tempo, presso un pozzo tale variabilità è nel tempo e nello spazio. Questa condizione rende quindi necessaria la progettazione di un monitoraggio ad hoc, che si differenzia, quindi, da quello attuabile nella maggior parte degli acquiferi carsici presso lo sbocco delle sorgenti.

CASO DI STUDIO: IL SALENTO

Caratteristiche geologiche e idrogeologiche generali

Per la natura carsica del territorio, la Penisola Salentina è quasi priva d'idrografia superficiale. Sono presenti reticoli idrografici che si attivano solo temporaneamente in occasione di precipitazioni di forte durata/intensità (corsi d'acqua effimeri): i reticoli hanno recapito finale a mare o in specchi d'acqua salmastra o in inghiottitoi carsici e in doline nelle zone interne della penisola.

I depositi carbonatici Mesozoici che costituiscono il basamento della Penisola Salentina sono molto permeabili per fratturazione e carsismo, mentre quelli terziari e quaternari (Fig. 3c), presentano un'ampia gamma di valori di permeabilità. L'acquifero principale è costituito dalla formazione carbonatica Mesozoica e in esso circola la cosiddetta falda profonda; nelle formazioni di copertura circolano falde superficiali di limitata potenzialità.

La falda profonda si estende con continuità dal Mare Adriatico al Mare Ionio. Fessurazione e fratturazione, effetti dell'intensa attività tettonica che ha interessato la piattaforma, hanno favorito una diffusa attività carsica, sia vadosa sia freatica, alla quale si aggiunge il carsismo in zona di transizione: il carsismo vadoso, freatico e di transizione si è sviluppato a varie quote durante la regressione Wurmiana e la successiva trasgressione post-glaciale, detta Flandriana (18-5.5 ka) (CALÒ *et alii*, 2005), originando livelli preferenziali sub-orizzontali che interconnettono la rete di fratture e fessure.

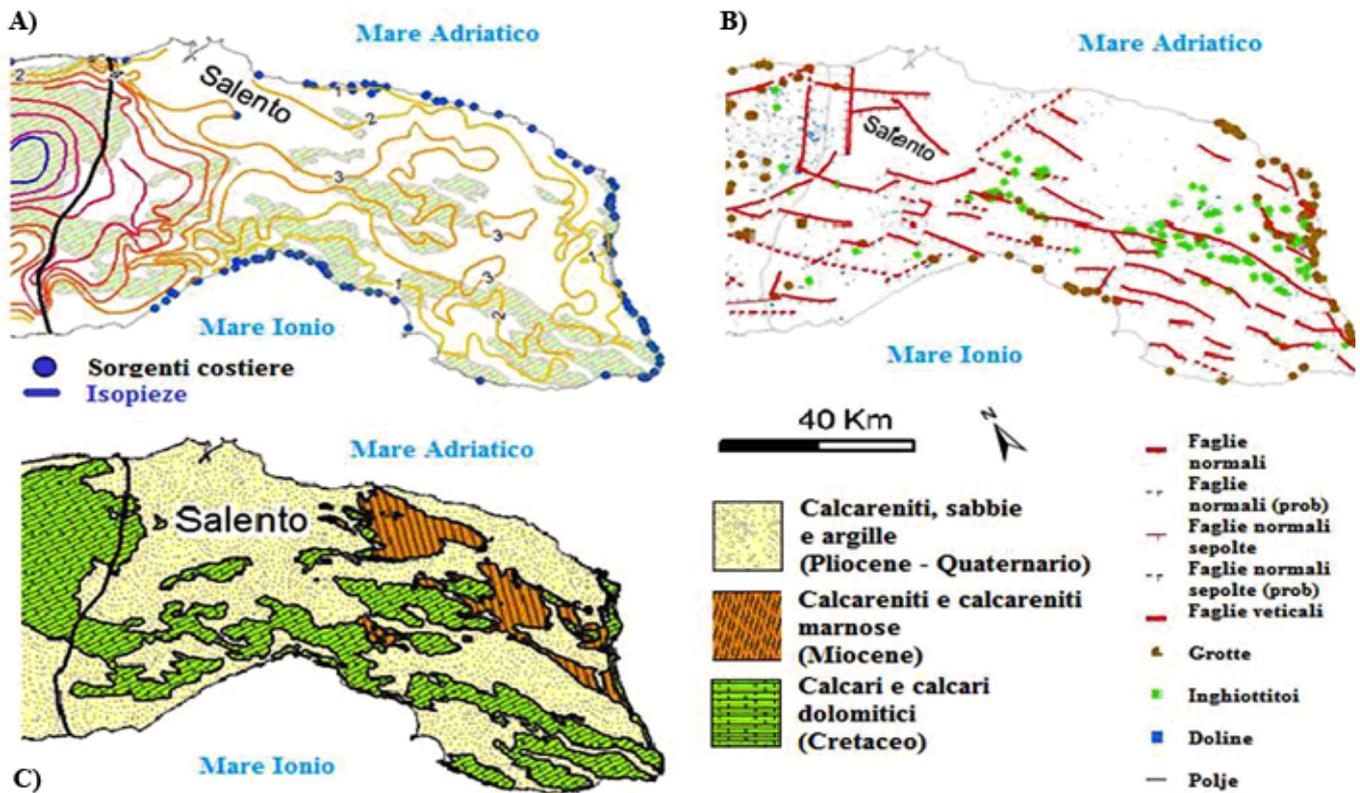


Fig. 3 – a) Locazione delle sorgenti costiere. b) Carta delle vore, inghiottitoi e discontinuità tettoniche. c) Carta dei principali depositi carbonatici.

L'insieme dei vuoti diagenetici fornisce all'acquifero Mesozoico salentino un grado di permeabilità mediamente alto, correlabile ai bassi carichi (max circa 4,5 m slm) (Fig. 3a) e gradienti idraulici. L'intensa storia tettonica del Salento ha comportato anche ribassamenti importanti del basamento carbonatico (Fig. 4b) che determinano localmente una circolazione "in pressione" della falda.

La falda profonda è alimentata sia per infiltrazione diffusa delle acque meteoriche, sia mediante infiltrazione concentrata attraverso vore, inghiottitoi e discontinuità (Figg. 3b e 4a); un peculiare aspetto morfologico della Penisola è dato dai bacini endoreici (Fig. 4c) nei quali le acque di ruscellamento trovano recapito finale in forme carsiche superficiali. All'alimentazione contribuiscono anche le falde superficiali attraverso passaggi stratigrafici laterali e discontinuità tettoniche.

Date le leggi dell'equilibrio tra acque dolci e salate, i bassi carichi idraulici e la condizione penisulare, la falda, sostenuta alla base da acqua salata di origine marina di recente o antica ingressione (FIDELIBUS *et alii*, 2011a), presenta una configurazione lenticolare, con spessori massimi intorno agli 80 m nella parte centrale della Penisola. Lo stato qualitativo delle acque dolci di falda è stato progressivamente compromesso, a partire dagli anni '60 del XX° secolo, in rapporto al tasso di sfruttamento elevato richiesto in buona parte dal comparto irriguo. Il corpo d'acqua dolce a salinità inferiore agli 0,5 g/L si è progressivamente ridotto di volume, mentre vaste porzioni di acquifero sono state occupate da acque a contenuto salino maggiore, come dedotto dai profili

della Conduttività Elettrica condotti sin dagli anni '70 in pozzi-spia trivellati per il controllo degli equilibri tra acque dolci e salate e raggiungenti le acque salate a letto delle acque dolci.

Nella Fig. 5 è riportato un quadro sintetico delle variazioni registrate tra il 1970 e il 2008 lungo la colonna idrica di uno dei pozzi-spia (Surbo, SR), ubicato nella parte orientale della penisola. E' chiara la diminuzione nel tempo dello spessore delle acque a TDS inferiore a 0,5 g/L e la contemporanea espansione della zona di transizione, con annesso sprofondamento delle acque salate a contenuto salino maggiore di 42 g/L. Il tutto senza variazione apprezzabile del carico idraulico ambientale, attraverso un meccanismo di trasporto di sali verso l'alto (Tulipano e Fidelibus, 2002) attivato in risposta allo squilibrio creato dal sovrasfruttamento.

L'individuazione delle principali aree di ricarica della falda profonda è possibile attraverso la ricostruzione del campo termico nel saturo (FIDELIBUS *et alii*, 2011b). La temperatura delle acque sotterranee può assumere, infatti, il ruolo di tracciante del movimento dell'acqua sotterranea e può essere usata per individuare le caratteristiche dei sistemi di flusso. Nella pratica, l'interpretazione del disturbo causato dalla convezione forzata sul campo termico conduttivo, definito attraverso la correlazione di dati di temperatura misurati nel saturo, permette di riconoscere, specie in acquiferi caratterizzati da alta anisotropia della conducibilità idraulica ($K_v > K_h$), aree di ricarica, zone a diversa permeabilità, vie di deflusso preferenziale, comunicazione tra falde, ed estensione delle aree affette da salinizzazione/intrusione marina.

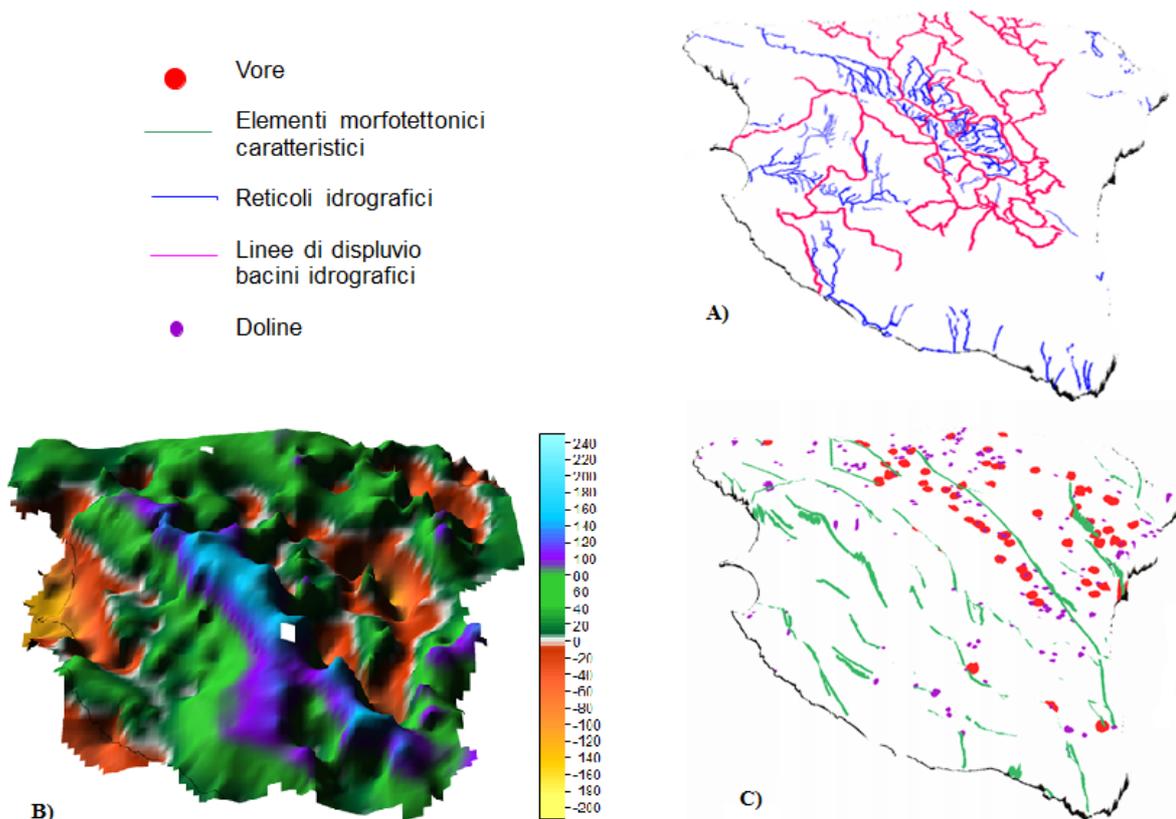


Fig. 4 – Basso Salento: a) Delineazione di alcuni bacini endoreici e relativo reticolo; b) andamento del tetto del basamento Mesozoico (m s.l.m.); c) elementi morfotettonici caratteristici, doline e vore.

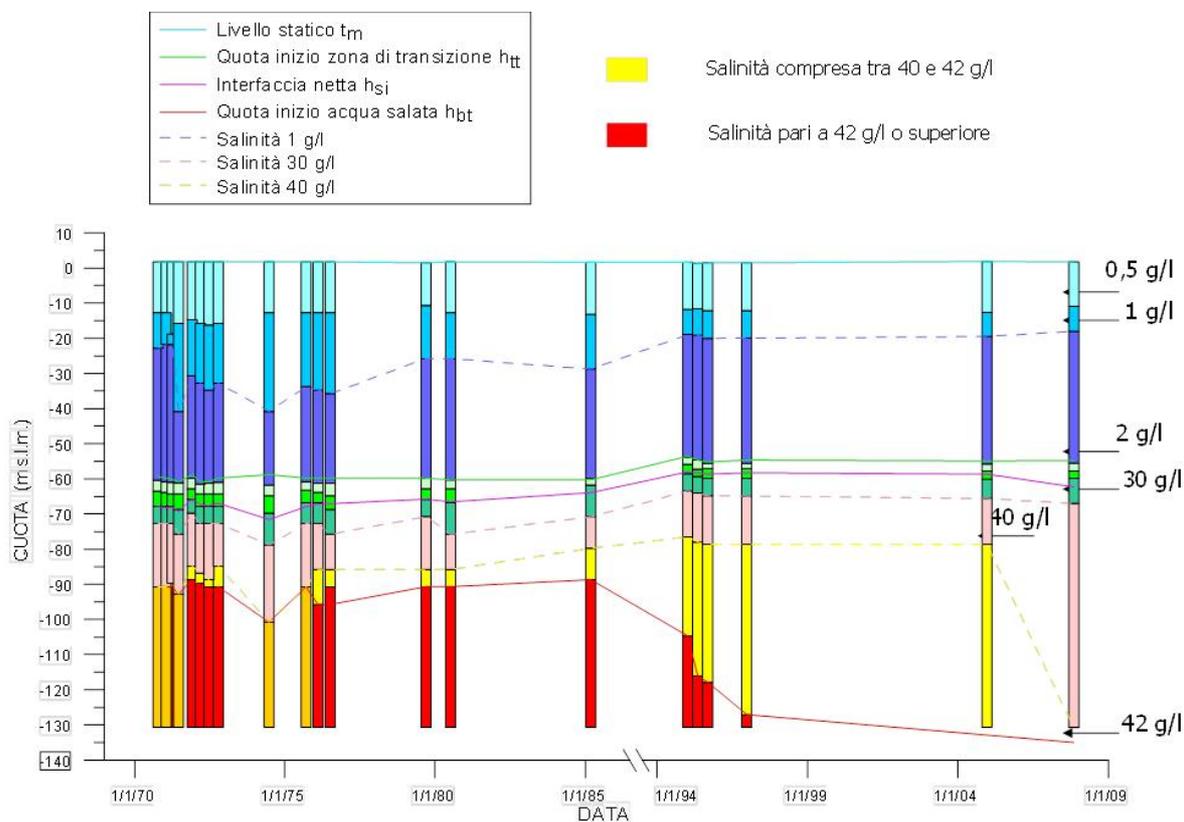


Fig. 5 – Pozzo spia Surbo (SR) – Variazione nel tempo (1972-2008), lungo la colonna idrica del pozzo spia, degli spessori delle acque a diverso contenuto salino (TDS, g/L)

La ricostruzione del campo termico del saturo (falda profonda) a varie quote nell'ambito della Penisola Salentina indica che un importante flusso di ricarica proviene dall'acquifero della Murgia, posto al confine nord-occidentale, mentre un'area di ricarica principale si colloca nel basso Salento in corrispondenza delle coperture post-Mesozoiche (Fig. 6).

Traccianti ambientali nella costruzione del modello di trasporto di massa

Sulla base di quanto sinteticamente prima esposto è chiaro che ricostruire il modello concettuale del funzionamento del sistema carsico del Salento è un processo sufficientemente complesso.

La delineazione dei possibili meccanismi di trasferimento degli inquinanti alla falda carsica costiera salentina e la definizione di un possibile approccio per la validazione della vulnerabilità intrinseca sono stati delineati attraverso metodologie che fanno uso di traccianti ambientali fisici, chimici e isotopici, secondo un approccio multi-metodologico e

multi-parametrico.

I dati fisici, chimici e isotopici utilizzati nello studio derivano sia da indagini di ricerca, sia dalla Rete di Monitoraggio Regionale per il controllo dello stato qualitativo delle acque sotterranee. Il primo importante sforzo di monitoraggio delle falde pugliesi è stato compiuto nel periodo fine 1994-inizio 1997 attraverso la costituzione della predetta Rete.

Nel Salento, la rete comprendeva 43 pozzi (definiti "strumentati" e idonei al campionamento in condizioni statiche), di cui 13 raggiungevano la zona di transizione (acque salmastre) o anche le acque salate sotterranee. La Rete attuale, riformulata e aggiornata nel 2006 (Fig. 7), è costituita di 35 pozzi strumentati e include gran parte dei precedenti pozzi.

Il campionamento del biennio 1995-1996 fu condotto con frequenza trimestrale, se pur con molte lacune riguardanti il numero di pozzi testati in ogni ciclo di misura. Questa frequenza è stata cambiata nel monitoraggio 2007-2012, quando la Rete di Monitoraggio, con varie implementazioni, è stata utilizzata per il cosiddetto Progetto Tiziano: in tal caso le frequenze di monitoraggio sono state semestrali.

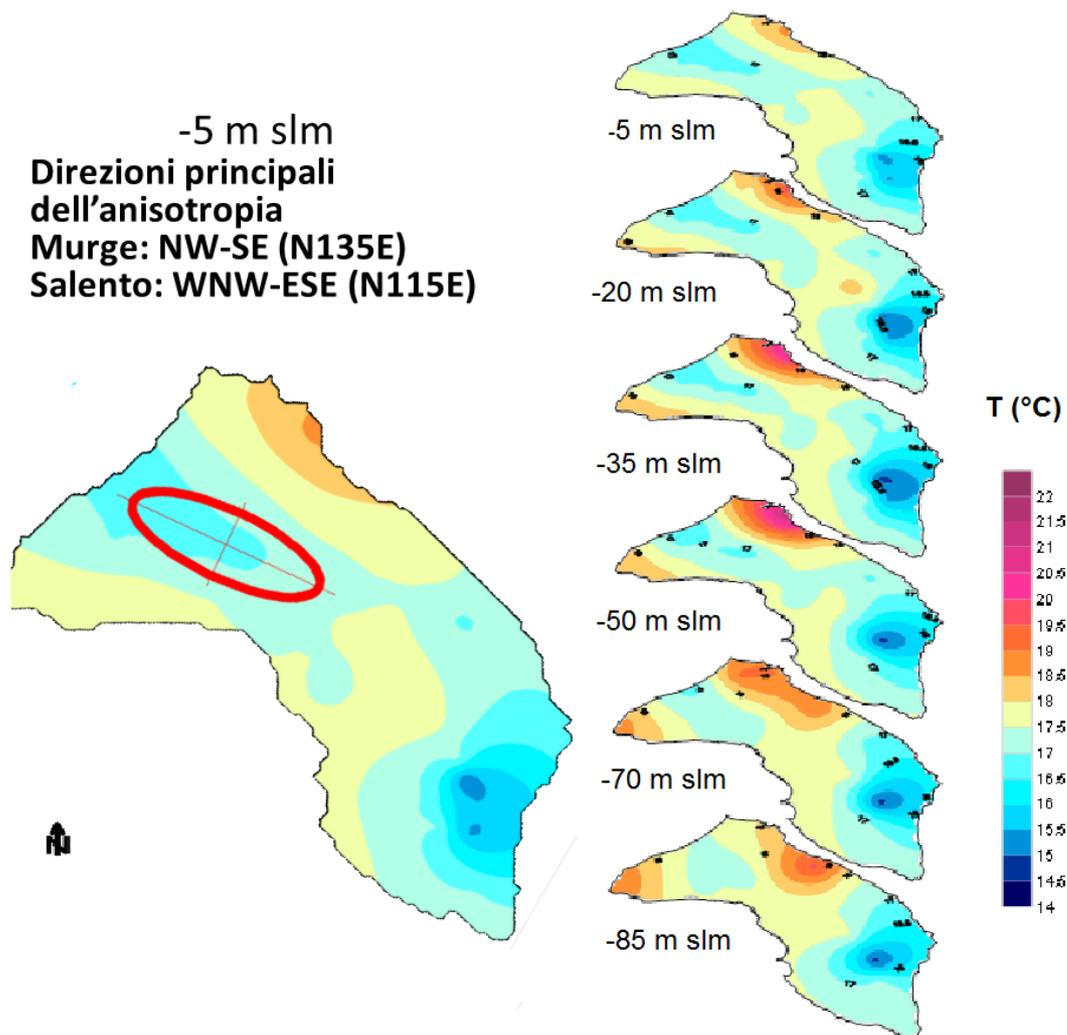


Fig. 6 – Ricostruzione del campo termico del Salento (°C) tra le quote -5 e -85 m slm.

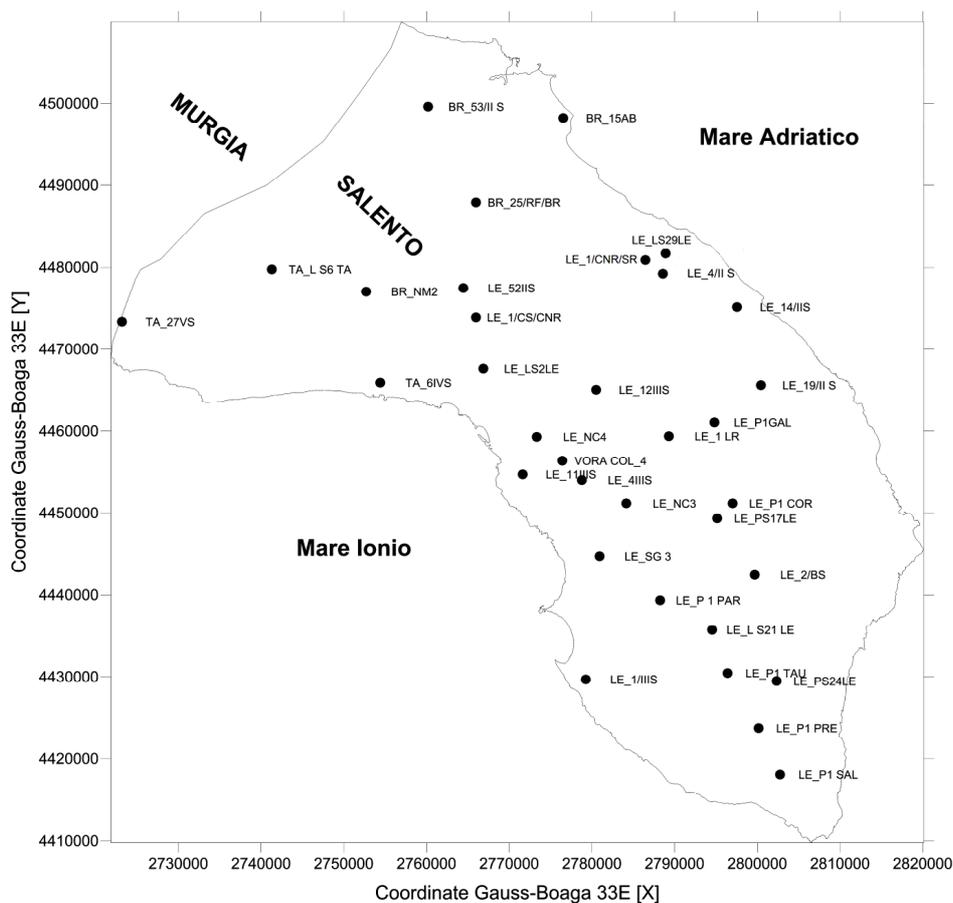


Fig. 7 – Penisola Salentina: ubicazione dei pozzi “strumentati” della rete di Monitoraggio Regionale (2006) per il controllo dello stato quali-quantitativo delle acque sotterranee

E' per questo motivo che lo studio proposto sul trasporto di massa si basa sui dati precedenti, più affidabili per la maggior frequenza di campionamento.

Durante il periodo di monitoraggio occorre un evento di precipitazione “estremo” che interessò sia la Murgia sia il Salento. L'evento piovoso dell'Agosto 1995 si sviluppò in tali territori dal 14 agosto, raggiungendo il massimo d'intensità nei giorni tra il 15 e il 20: nella sola stazione di Collepasso (Salento) furono registrati, per il solo mese di Agosto, 277 mm. La Fig. 8 mostra le precipitazioni totali mensili registrate presso le stazioni pluviometriche salentine dal gennaio '95 al dicembre '96. Presso la rete di monitoraggio erano contestualmente effettuati campionamenti in condizioni statiche che si attestavano nella parte più superficiale della falda: la frequenza di tali campionamenti (grosso modo trimestrale) rispecchiava quella della realizzazione di profili multi-parametrici e di misure del livello statico. Due orizzonti di misura rispettivamente precedevano e seguivano l'evento estremo: ciò rappresenta una circostanza favorevole per lo studio del trasporto d'inquinanti, in quanto, come già illustrato, sotto la pressione di eventi estremi (pioggia intensa e/o di lunga durata) la rimozione d'inquinanti dai sottosistemi di un sistema ca ha luogo in maniera più efficiente.

L'effetto di rimozione è più evidente se un periodo secco o

con basse precipitazioni viene prima dell'evento estremo, come in realtà si è verificato per il caso esaminato. Durante tali periodi gli inquinanti possono accumularsi/degradarsi nei sottosistemi: in seguito, sotto la pressione causata dall'evento di pioggia estrema, i sotto-sistemi generalmente rilasciano, in tempi diversi e con diverse ma evidenti impronte chimiche, ciò che viene accumulato/degradato in periodi di siccità.

Lo studio si basa quindi sul fatto che le acque di falda, a seguito d'eventi pluviometrici eccezionali, mostrano normalmente (in uno stesso punto di misura) chemogrammi (variazioni temporali di parametri chimici) che parlano dei contributi dei diversi sottosistemi/serbatoi. Se guardiamo al processo di alimentazione e ai possibili serbatoi dell'insaturo che possono trasferire le acque d'infiltrazione verso la superficie libera della falda, possiamo ipotizzare che le acque provenienti da tali serbatoi giungano in tempi diversi a tale superficie: la composizione chimica delle acque che si campionano alla superficie della falda è di fatto il risultato della miscelazione a vario grado delle diverse componenti di alimentazione. Attraverso l'interpretazione delle relazioni tra gli andamenti dei parametri chimici (chemogrammi), delle precipitazioni e della piezometria si può giungere all'identificazione dei diversi possibili serbatoi che alimentano la falda e alla definizione del meccanismo di trasporto.

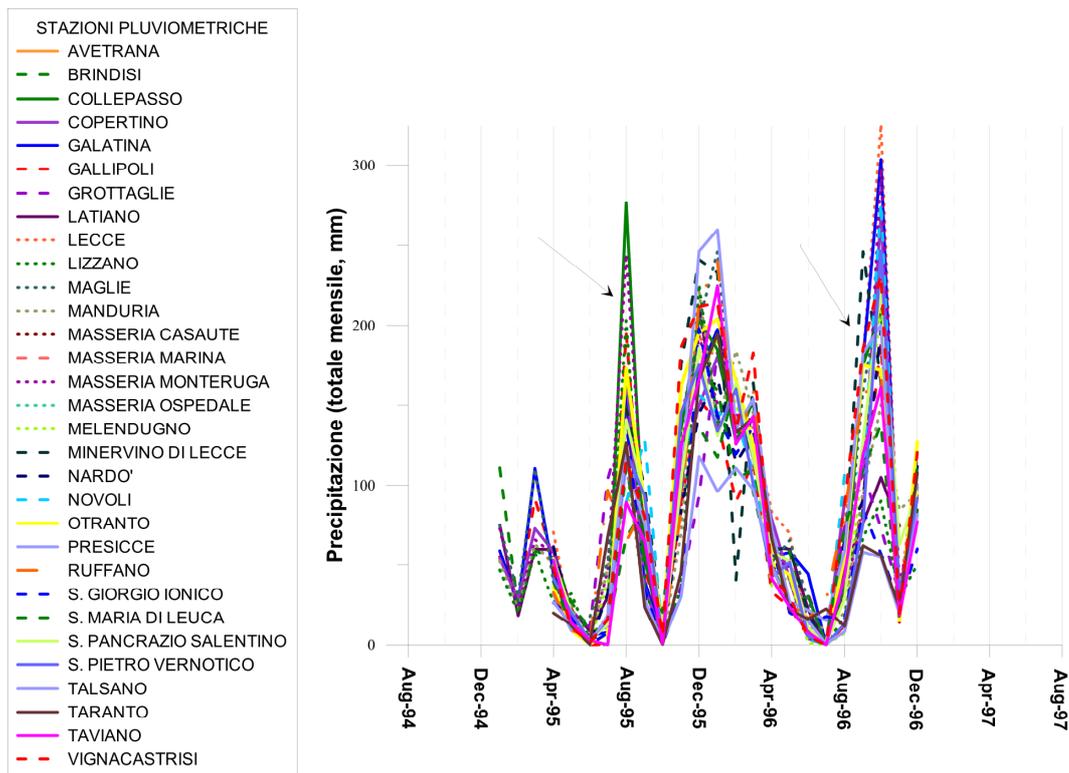


Fig. 8 – Precipitazione totale mensile registrata presso le stazioni pluviometriche del Salento (gennaio 1995 – dicembre 1996).

La Fig. 9 mostra l'andamento delle concentrazioni dei nitrati rilevate sui campioni prelevati presso i pozzi della rete di monitoraggio ricadenti nell'area Salentina durante il periodo 1995-1996. Solo alcuni dei 35 andamenti sono inclusi nel grafico: in molti casi vi è lacuna di misura o le differenze di concentrazione nel tempo sono tali da non essere facilmente evidenziabili nell'insieme.

I nitrati mostrano picchi post-evento fino a circa 55 mg/L, mentre concentrazioni tipiche del fondo naturale (circa 5 mg/L) erano misurate prima dell'evento stesso: vi è dunque, nei casi selezionati, un arricchimento post-evento in nitrati di un ordine di grandezza. Il tempo d'arrivo del picco dei nitrati in falda è mediamente di 1 mese: tale intervallo di tempo deve essere considerato con cautela, perché il campionamento potrebbe aver interessato indifferentemente la fase ascendente del picco o la sua fase discendente, vale a dire che il vero picco potrebbe essersi verificato realmente prima o dopo il campionamento: di conseguenza il ritardo reale potrebbe essere più breve o più lungo di un mese. Le più alte concentrazioni dei nitrati nella fase post-evento in ogni caso rimangono un dato di fatto: queste dovrebbero caratterizzare le acque residenti nell'epicarso, nelle quali i nitrati si concentrano durante i periodi non-alimentanti. Il tempo trascorso tra l'evento estremo e la verifica dei picchi di concentrazione in falda si può riferire, quindi, al tempo medio di trasferimento, sotto effetto pistone, dall'epicarso alla falda, dei volumi d'acqua contenuti nell'epicarso stesso, attraverso la rete di fratture e/o condotti che attraversano l'insaturo.

Dopo il settembre 1995 la maggior parte delle analisi sono incomplete: in tal modo il controllo non riesce a riconoscere gli

effetti di un altro evento di precipitazione estremo (nel mese di ottobre del 1996, Fig. 8), che era preceduto da un periodo di basse o nulle precipitazioni come per il precedente evento dell'Agosto 1995. La conclusione delle attività di monitoraggio nel dicembre 1996 impedisce ulteriori osservazioni.

Gli andamenti del CO per lo stesso insieme di pozzi (Fig. 10) sono speculari rispetto a quelli dei nitrati. Il Carbonio Organico è un buon tracciante naturale degli apporti diretti d'acque superficiali: a differenza di altri traccianti naturali, si può considerare che il Carbonio Organico Totale (TOC) provenga solo dall'attività biologica nel suolo e che non vi siano altri apporti alla superficie del suolo stesso o all'interno dell'acquifero che ne possano variarne la concentrazione.

Il contenuto di CO nel suolo può raggiungere i 300 mg/l e solitamente non supera i 100 mg/l nei fiumi. Il TOC nelle acque di falda è normalmente minore di 1 mg/l: in generale esso varia tra i 10 mg/l per acque sotterranee superficiali e di recente alimentazione, sino a 0.5 mg/l per le acque sotterranee profonde. Le concentrazioni in falda sono inversamente proporzionali al tempo di residenza a causa dei processi d'ossidazione della materia organica: per tale ragione, variazioni del TOC nelle acque sotterranee possono indicare il coinvolgimento di acque a diverso tempo di residenza.

Infatti, durante una piena, un aumento del TOC nelle acque di una sorgente carsica indica l'arrivo di acque di basso tempo di residenza; durante il periodo di recessione le acque di sorgente hanno tempi di residenza maggiori e mostrano concentrazioni di TOC significativamente inferiori rispetto a quelli osservati durante la piena (BATIOT, 2002; BATIOT *et al.*, 2003, EMBLANCH *et alii*, 1998).

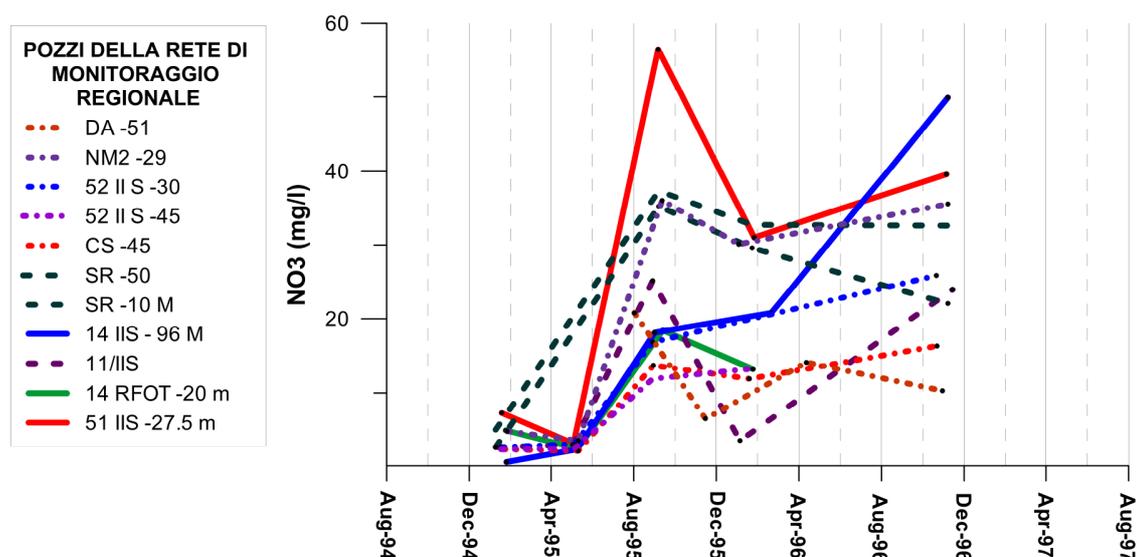


Fig. 9 – Andamento dei nitrati nelle acque sotterranee campionate nei pozzi della Rete di monitoraggio salentina (1995-1996).

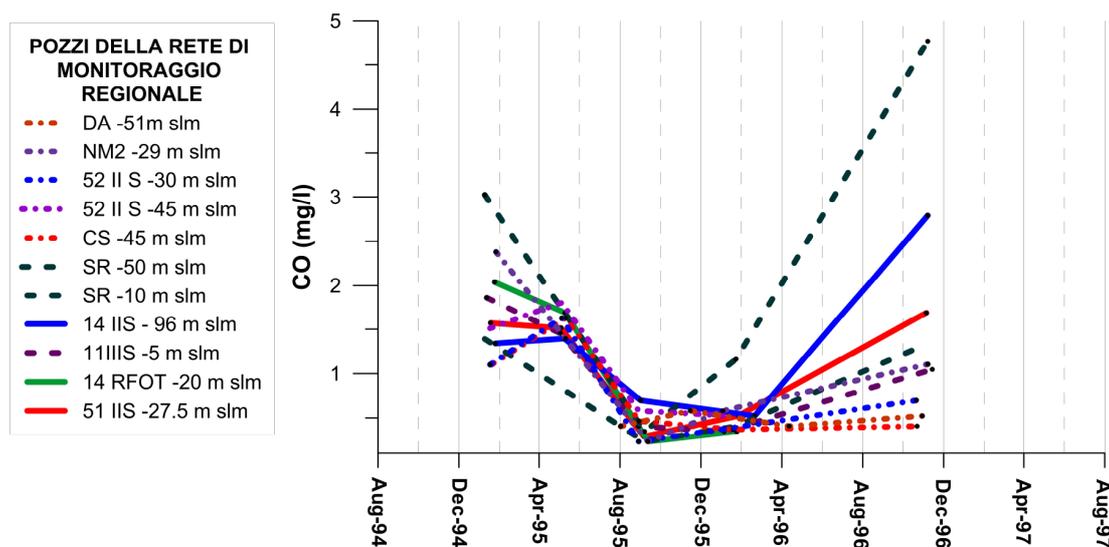


Fig. 10 – Andamento della concentrazione del Carbonio Organico nelle acque sotterranee campionate nei pozzi della Rete di monitoraggio salentina (1995-1996).

Le analisi condotte sui campioni prelevati nella rete di monitoraggio nel periodo 1995-1996 si riferiscono con molta probabilità (non si hanno specifiche in merito) alle sostanze organiche disciolte (DOC), ma è dimostrato che non v'è sostanziale differenza tra TOC e DOC nelle acque carsiche: per tale ragione il DOC (nel seguito coincidente con il CO) può essere considerato alla stessa stregua del TOC.

È da notare come in tutti i pozzi del monitoraggio considerati il CO si abbatta di circa un ordine di grandezza dall'estate all'autunno 1995. Tale abbattimento dei valori del CO a valle dell'evento estremo, accoppiato al contemporaneo aumento dei nitrati, supporta l'ipotesi che le acque che giungono in falda dopo l'evento siano dotate di un certo grado di maturità, ossia provengano da un serbatoio intermedio tra il suolo e la zona satura nel quale esse hanno avuto il tempo di

essere sottoposte a processi di degradazione della materia

Le stesse acque considerate per la ricostruzione degli andamenti sono state sottoposte anche ad analisi dei costituenti maggiori. Purtroppo in alcuni casi le analisi chimiche sono affette da alti errori che impediscono di utilizzare i dati con affidabilità. In ogni caso i dati validati indicano che le concentrazioni dei cloruri aumentano dopo l'evento. Diversamente il calcio diminuisce e il magnesio aumenta: di conseguenza varia anche il rapporto Ca/Mg.

L'aumento dei cloruri (ioni conservativi, non-reattivi) è indice di aumento del tempo di residenza delle acque. La diminuzione del rapporto Ca/Mg in acquiferi carbonatici è anch'esso un indicatore di tempo di residenza e nega che le acque post-evento siano acque di recente infiltrazione: queste ultime sono normalmente di facies bicarbonato-calcica e con

alto rapporto Ca/Mg. Negli acquiferi carbonatici, infatti, le acque di facies bicarbonato-calcico-magnesiaca si ritrovano nelle parti più lente del sistema di flusso (acque più mature dal punto di vista dell'interazione acqua-roccia).

Il fatto che all'aumento dei nitrati corrisponda una diminuzione del rapporto Ca/Mg è un'ulteriore indicazione della possibilità che le acque analizzate post-evento provengano da un serbatoio nel quale esse hanno avuto il tempo di "maturare", sia dal punto di vista dell'interazione acqua-roccia che dal punto di vista dell'abbattimento del carico organico, con conseguente diminuzione anche dell'ossigeno. Questo serbatoio non può che essere l'epicarso.

L'aumento dei nitrati e la contestuale diminuzione del CO post-evento, così come le variazioni degli altri parametri considerati, non sono correlati a un aumento dei livelli piezometrici: i carichi idraulici aumentano solo nel marzo '96, a seguito dell'importante ricarica invernale. Questo fatto indica che le variazioni chimiche osservate nel periodo post-evento sono causate da volumi idrici modesti, che non sono in grado di modificare sensibilmente i carichi idraulici, ma in grado di modificare temporaneamente la qualità delle acque sotterranee.

L'analisi degli andamenti dei suddetti parametri permette di ipotizzare, in relazione all'evento piovoso eccezionale dell'agosto '95, che la trasmissione dei carichi inquinanti e dell'alimentazione nelle aree in studio siano avvenute secondo lo schema di Fig. 11:

- nel periodo in cui le precipitazioni sono scarse e/o l'evapotraspirazione è alta, il flusso di alimentazione che arriva alla zona satura proviene essenzialmente dalla superficie-suolo tramite le rete discreta di vore e inghiottitoi che aggirano l'epicarso e la zona insatura;

- questo è giustificato, nelle zone di ricarica e in condizioni di flusso di base, da medie concentrazioni di carbonio organico (CO) e da alti rapporti Ca/Mg (acque di breve tempo di residenza);

- il resto delle precipitazioni infiltranti si trasferisce all'epicarso che provvede al loro immagazzinamento: il contributo dell'epicarso all'alimentazione in questo periodo è piuttosto limitato;

- in condizioni di piena, come quelle verificatisi a partire dall'evento dell'agosto '95, la portata addotta dalle vore e dagli inghiottitoi rimane costante o aumenta leggermente, ma l'effetto sulla falda non è apprezzabile;

- la maggior parte dei volumi alimentanti proviene dall'epicarso che, saturo, defluisce lateralmente verso le fratture ed i condotti sub-verticali;

- sotto effetto pistone i volumi immagazzinati all'interno dell'epicarso vengono spostati: essi sono caratterizzati da alti tempi di residenza, come dimostrano i bassi contenuti di carbonio organico, le alte concentrazioni di nitrati ed i bassi rapporti Ca/Mg;

- in seguito, anche i volumi d'infiltrazione relativi all'evento raggiungono la zona satura, dopo essere transitati attraverso l'epicarso. In tal caso, giungono alla falda acque che non hanno passato molto tempo nel sottosuolo, marcate da contenuti di CO più alti, concentrazioni in nitrati più basse e rapporti Ca/Mg di nuovo alti.

Il meccanismo delineato è reso visibile dall'intervento di un evento piovoso eccezionale che seguiva una fase di relativa assenza di precipitazioni alimentanti: ciò implica che questa successione di eventi di trasferimento risulti visibile solo sotto estremo stress del sistema. Certamente l'evento piovoso deve

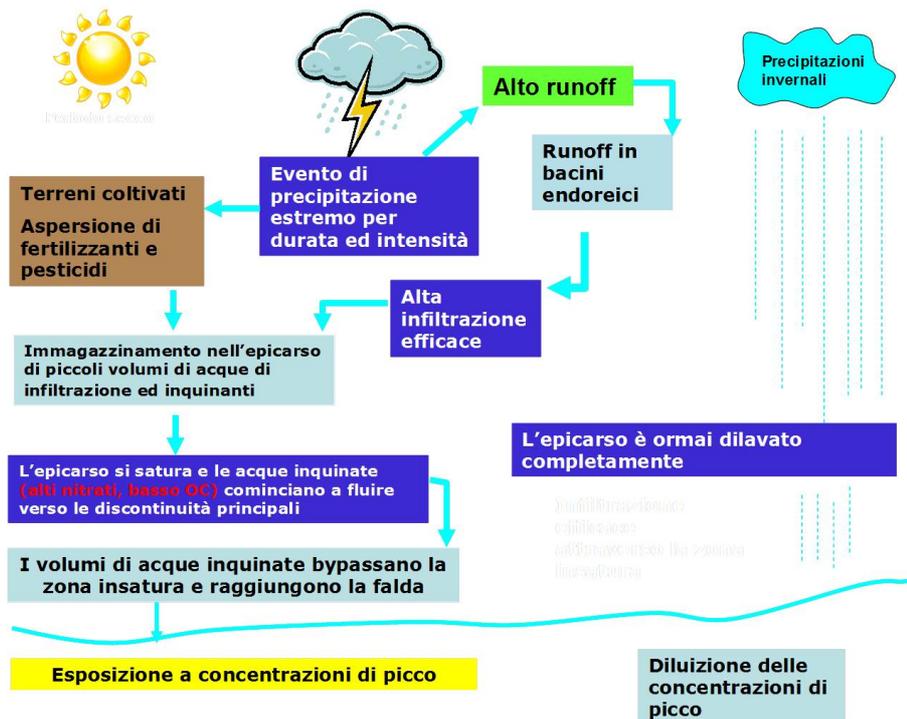


Fig. 11 – Modello concettuale relativo al trasporto d'inquinanti dalle aree di alimentazione dell'acquifero carsico salentino

produrre un'infiltrazione efficace sufficientemente elevata rispetto al volume immagazzinato nei diversi serbatoi presenti al di sopra dell'acquifero. Eventi di piccola entità, di volume complessivo inferiore a quello dell'acqua presente in questi serbatoi, producono solo riflessi minimi nella condizione della falda. Quanto sopra suggerisce che l'inquinamento da nitrati dipende sia dalla struttura del sistema carsico, sia dalla dinamica delle precipitazioni, soprattutto quando avviene alternanza di periodi secchi e umidi.

Lo stato qualitativo delle acque sotterranee, in questo scenario, non può essere definito da un'indagine limitata a un solo orizzonte temporale, anche se ampia e densa riguardo i punti e i parametri misurati: gli andamenti illustrati suggeriscono che diversi e diversamente preoccupanti scenari di inquinamento possono essere determinati nelle diverse stagioni con diverse dinamiche di precipitazione.

Allo scopo di sintetizzare gli effetti della dinamica delle precipitazioni, la Fig. 12 mostra quattro scenari, ottenuti interpolando i dati relativi alle concentrazioni dei nitrati (campioni più superficiali) riferiti a periodi quadrimestrali. I primi due scenari mostrano la distribuzione delle concentrazioni dei nitrati prima dell'evento estremo, mentre il terzo e il quarto scenario riguardano rispettivamente il periodo successivo all'evento e quello della ricarica invernale. A parte l'incertezza sulla significatività statistica di tali carte, dovuta alla non omogenea distribuzione dei pozzi di monitoraggio e alla bassa densità dei punti di misura, di certo si può affermare che la situazione si evolve notevolmente durante i 16 mesi considerati.

Il periodo post-evento mostra le maggiori concentrazioni di nitrati: esso è preceduto da un periodo in cui si delinea solo un iniziale aumento delle concentrazioni, probabilmente a causa dell'inclusione di agosto nel periodo stesso. Se ne desume che il pericolo d'esposizione a concentrazioni di picco di sostanze inquinanti/contaminanti è, per la falda, dipendente dal tempo di ritorno di piogge di notevole intensità/durata: tuttavia, tali eventi hanno il potenziale di causare aumenti delle concentrazioni degli inquinanti in falda solo se preceduti da periodi di siccità.

Il rischio non è evidentemente limitato ai nitrati, che, in ogni caso, sono inquinanti conservativi e non possono essere rappresentativi del comportamento d'inquinanti reattivi: solo un attento monitoraggio di tutti gli altri parametri d'inquinamento può fornire informazioni attendibili delle potenzialità dei meccanismi di trasferimento delineati attraverso lo studio dei nitrati nella determinazione del pericolo d'inquinamento dovuto ad altri inquinanti. L'evidenza quantitativa del meccanismo di trasferimento e della risposta impulsiva del sistema carsico non può essere interpretata direttamente come evidenza di una maggiore o minore connessione dell'epicarso alla falda: ciò sarebbe possibile solo a parità di distribuzione del nitrato suscettibile di diluizione nelle acque di precipitazione alla superficie del suolo.

Esiste quindi la necessità di una quantificazione dei carichi inquinanti, che va operata sulla base di un'analisi dell'uso del suolo, e della valutazione dell'infiltrazione efficace relativamente all'evento estremo preso in considerazione, considerando anche la presenza di bacini endoreici. Queste

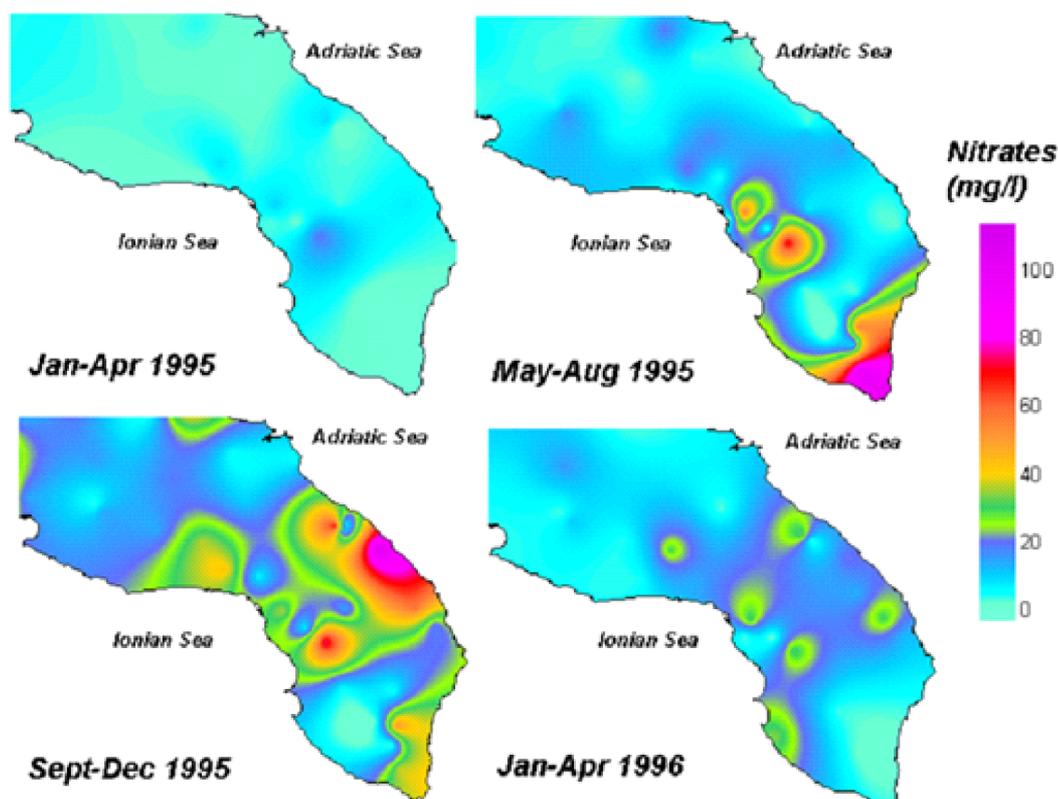


Fig. 12 – Ricostruzione della distribuzione delle concentrazioni dei nitrati (mg/L) nella parte più superficiale della falda per orizzonti quadrimestrali (1995-1996).

valutazioni rappresenteranno la base di una validazione quantitativa del modello concettuale di trasferimento degli inquinanti. Solo a valle di tale validazione, sarà possibile una normalizzazione dell'effetto dei carichi e l'individuazione delle aree più vulnerabili *sensu stricto*.

Altri elementi consentono comunque di validare le ipotesi sulla vulnerabilità intrinseca dei territori. Nella Fig. 13 è riportata la traccia di una sezione dell'acquifero carsico costiero salentino (AA') e l'ubicazione di 4 pozzi presso i quali nel 1994 furono condotte analisi chimiche ed isotopiche delle acque campionate in condizioni dinamiche.

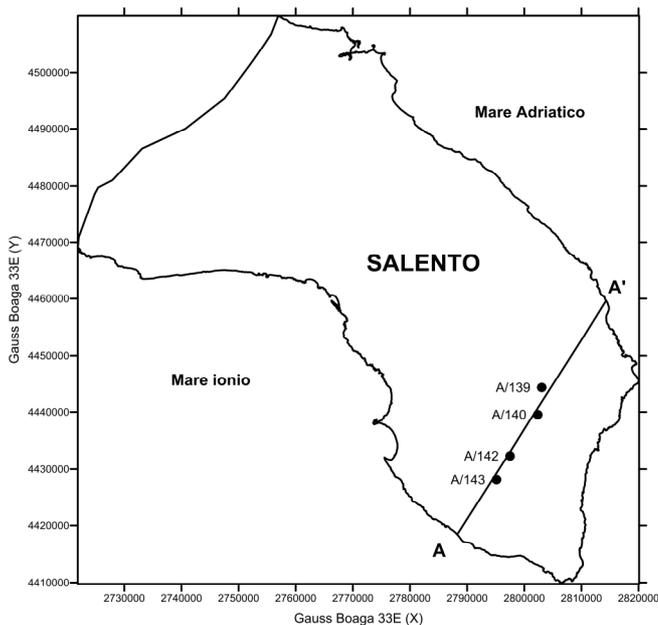


Fig. 13 – Ubicazione della traccia di sezione AA' e dei campionamenti isotopici (1994)

Nella Fig. 14 sono rappresentati più elementi di informazione relativamente alla sezione AA'. La Fig. 14a riporta gli elementi morfotettonici caratteristici, le litologie di superficie e la distribuzione delle "voe" (termine locale che individua gli inghiottitoi) in rapporto alla traccia di sezione. La Fig. 14b, oltre al profilo altimetrico, riporta informazioni su punti discreti riguardo il tetto dei calcari, come desunto dalle perforazioni disponibili: il massimo ribassamento rilevato da tali perforazioni lungo la sezione è dell'ordine dei -150 m slm. La Fig. 14c mostra l'andamento delle isoterme lungo la sezione, ricostruite sulla base di profili termici condotti lungo la colonna idrica dei pozzi della Rete di Monitoraggio nell'autunno 1995. La Fig. 14d riporta uno stralcio della carta della vulnerabilità intrinseca redatta per il Piano di Tutela delle Acque della Regione Puglia (REGIONE PUGLIA, 2005) secondo il metodo C.O.P. (ZWAHLEN, 2003), uno dei metodi specificatamente elaborati dagli esperti europei per gli acquiferi carsici.

L'insieme dei dati rappresentati indica che le acque più fredde del sistema circolano "in pressione" in corrispondenza dei maggiori ribassamenti del basamento: il contorno delle isoterme bolla a 14.5-15 °C segnala un raffreddamento anche dell'ambito delle coperture dove non vi è circolazione: la temperatura, letta nella colonna idrica del pozzo, indica in ogni

caso la temperatura delle formazioni attraversate dalla perforazione. Le stesse isoterme chiudono verso la superficie in corrispondenza di una lineazione tettonica importante, accompagnata da numerose "voe". La concavità delle isoterme sostanzialmente indica una via preferenziale e veloce di infiltrazione lungo la lineazione e di circolazione nella parte satura ribassata. Lateralmente si evidenziano altre due circolazioni preferenziali alimentate da aree di ricarica minori.

Tale indicazione trova conferma alla luce dei valori degli isotopi stabili del deuterio e dell'ossigeno (Fig. 15): anche se i campionamenti delle acque analizzate sono riferiti a condizioni dinamiche e a un anno precedente (1994), i dati isotopici comunque confermano che le acque della bolla provengono dalle quote più alte dell'area e sono molto dolci (0.27 g/L), mentre gli altri valori, riguardati anche alla luce del TDS, indicano la presenza di acque più mature in corrispondenza di altre aree di ricarica minori o soggette all'influenza delle acque salate sotterranee.

L'area dell'anomalia fredda, interpretabile come area maggiormente vulnerabile riguardo la diretta connessione con la superficie, corrisponde, nella discretizzazione del metodo COP, ad una vulnerabilità moderata, mentre in corrispondenza delle due aree di ricarica minori la vulnerabilità è rispettivamente elevata e alta. Questa incongruenza non permette di validare, almeno nell'area esaminata, lo stesso metodo COP, che evidentemente non contempla il ruolo dell'epicarso e delle discontinuità nella trasporto di massa dalla superficie alla falda.

CONCLUSIONI

Una serie di considerazioni può essere svolta a valle di queste ipotesi sul funzionamento del sistema e delle fenomenologie che portano all'alimentazione della falda profonda e alla trasmissione dei carichi inquinanti.

Il monitoraggio, pur registrando informazioni a distanze temporali molto ampie, è un mezzo d'indagine che ha reso possibile la costruzione d'ipotesi plausibili sui meccanismi di trasporto delle sostanze disciolte nelle acque dei vari sottosistemi. E' evidente tuttavia che la distribuzione dei punti di monitoraggio, la cadenza delle operazioni di misura e campionamento, la profondità dei campionamenti, vanno definite ad hoc in relazione al sistema da controllare. Nessun protocollo generico di monitoraggio può essere applicato al controllo delle falde pugliesi senza profonde rimodulazioni. In ambienti carsici la cadenza temporale dei campionamenti non è in realtà facile da definire a priori, perché essa dipende dalla risposta del sistema agli impulsi provenienti dalla superficie. Tra gli elementi da verificare vi sono la presenza e il funzionamento dell'epicarso, specie nelle zone dell'acquifero laddove è segnalata la possibilità di prelievo per il comparto potabile. Un prezioso aiuto per la comprensione del trasporto in mezzo carsico verrebbe dalla verifica diretta della sua estensione, e dal monitoraggio, attraverso opportuni pozzi interessanti il suo spessore, opportunamente strumentati, delle acque in esso contenute.

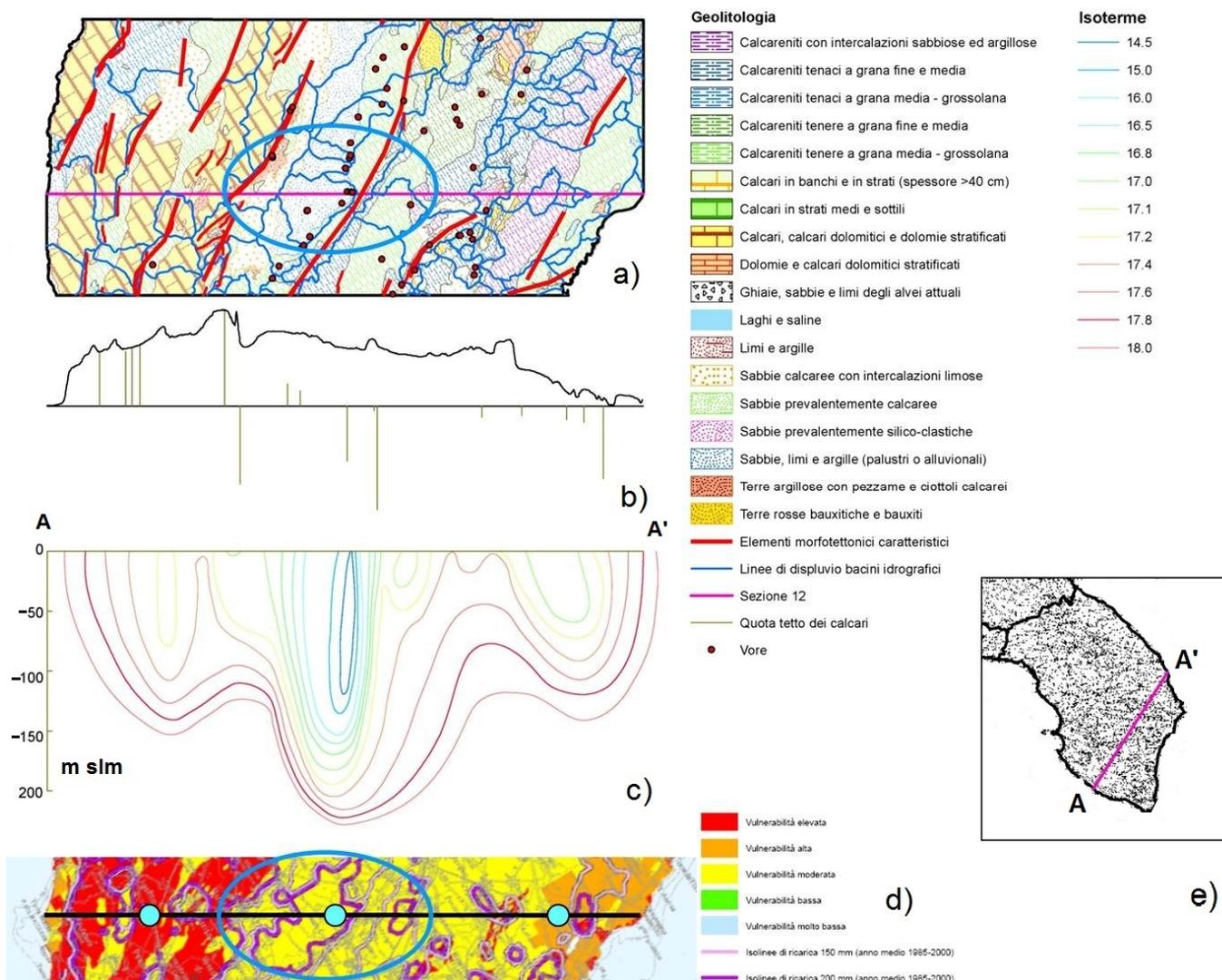


Fig. 14 – Sezione verticale (AA') dell'acquifero Mesozoico Salentino: a) carta geolitologica, elementi morfotettonici e forme carsiche superficiali; b) campo termico; c) stralcio della carta della vulnerabilità intrinseca (metodo COP, Regione Puglia, 2005); e) ubicazione della traccia di sezione

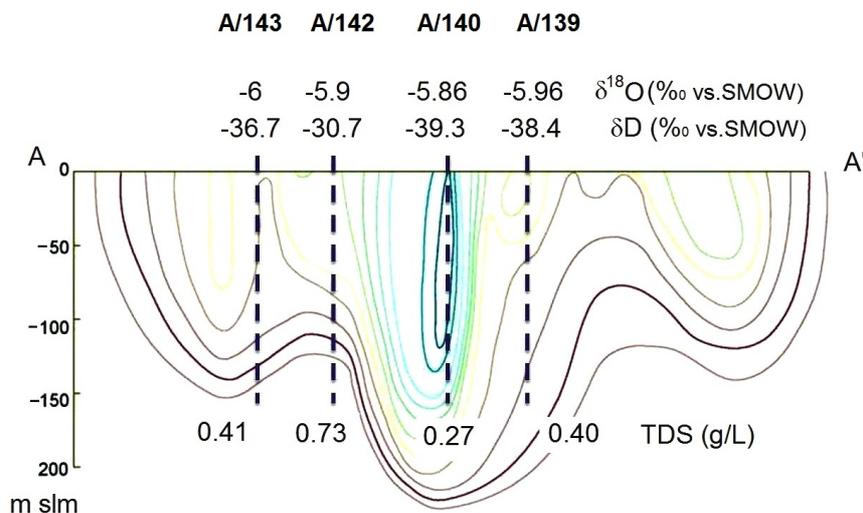


Fig. 15 – Sezione termica AA' (traccia in Figura 13); le linee tratteggiate rappresentano le tracce di quattro perforazioni di pozzi per acqua (ubicazione in Figura 13) di profondità indicativa (dati non disponibili). In corrispondenza delle perforazioni sono riportati i valori di concentrazione degli isotopi stabili dell'idrogeno e dell'ossigeno e il contenuto salino delle acque sotterranee misurati su campioni prelevati (1994) in condizioni dinamiche.

Sempre con riferimento al verificarsi di eventi piovosi eccezionali occorre:

- raccogliere informazioni sull'input superficiale, per es. presso vore e/o inghiottitoi verso i quali si dirigono le acque di ruscellamento;
- verificare nello stesso tempo l'esistenza di flussi temporanei in forme carsiche ipogee e campionare i flussi che temporaneamente si originano al loro interno;
- definire alte frequenze dei campionamenti a valle degli eventi; le analisi dovrebbero focalizzare su alcuni costituenti guida, traccianti delle diverse fonti possibili di alimentazione;
- definire periodicamente la stratificazione verticale delle concentrazioni degli inquinanti/contaminanti e/o traccianti guida (campionamenti a più profondità) onde comprendere i meccanismi di trasferimento laterale nella zona satura;
- monitorare in continuo un numero critico di pozzi riguardo al loro carico piezometrico in concomitanza alla registrazione degli eventi pluviometrici;
- estendere le analisi, almeno in periodi particolari, anche agli isotopi stabili.

Quanto sopra, se effettuato durante e dopo l'eventuale verificarsi di un evento eccezionale, presso i pozzi della rete di monitoraggio localizzati nelle vicinanze delle aree del prelievo potabile renderebbe credibile ed accurata l'analisi delle condizioni di rischio di inquinamento delle falde e la definizione delle aree di salvaguardia per il potabile.

Per cogliere l'obiettivo della protezione delle acque sotterranee in generale (vulnerabilità intrinseca) e delle fonti di prelievo (a qualsiasi titolo) occorre quindi un metodo di studio rigoroso, basato su una dettagliata conoscenza geologica, geomorfologica e idrogeologica dell'acquifero e delle parti che interessano le opere di captazione da proteggere.

Ciò significa, tra l'altro qualificare le caratteristiche litologiche delle coperture e degli acquiferi rispetto alle loro proprietà idrauliche, ricostruire le condizioni geologico-strutturali condizionanti l'alimentazione e il deflusso (a diversa scala, da quella regionale sino a quella locale), e riconoscere i meccanismi di trasferimento degli inquinanti dalla superficie alla falda. In questi ambiti di conoscenza le ricostruzioni del campo termico e del contenuto salino hanno la funzione di fornire scenari per la validazione sia delle rappresentazioni della vulnerabilità intrinseca e delle acque sotterranee, sia dei risultati delle eventuali modellazioni dei processi di flusso e trasporto.

Rispetto alla definizione della vulnerabilità intrinseca per sistemi carsici occorre in sintesi tener in conto che:

- ciascun sistema ha caratteristiche proprie che lo rendono diverso dagli altri sistemi, il che impedisce qualsivoglia generalizzazione;
- i sistemi carsici sono eterogenei e anisotropi, per cui l'interpolazione o l'estrapolazione di dati idraulici di campo e di laboratorio vanno condotte con molta cautela;
- l'infiltrazione è sia di tipo diffuso, sia concentrato e le coperture forniscono un certo grado di protezione, ma molti meccanismi possono portare al loro completo by-pass (ruolo degli elementi morfo-tettonici, dei bacini endoreici, delle forme carsiche epigee e ipogee);

- i sistemi carsici hanno reazioni idrauliche spesso immediate a eventi idrologici estremi, laddove importante è il ruolo dell'epicarso, che ha la funzione di immagazzinare e concentrare il flusso di ricarica, aumentando da una parte la protezione naturale del sistema nei confronti degli inquinanti soggetti a processi di degradazione e abbattimento, dall'altra aumentando la vulnerabilità, con riguardo agli inquinanti conservativi;

- i bacini idrogeologici degli acquiferi carsici possono essere molto ampi con sistemi di flusso che si estendono su larghe distanze (riconoscimento della scala del sistema di flusso);

- le proprietà litologiche, mineralogiche e geochemiche delle formazioni acquifere e gli effetti dovuti all'interazione dei diversi sistemi di permeabilità determinano specifiche condizioni per i processi di autodepurazione, di attenuazione fisica quali la dispersione, la diluizione e controllano le quantità di contaminanti che possono infiltrarsi.

OPERE CITATE

- BAKALOWICZ M., DREW D., ORVAN J., PULIDO BOSCH A., SALAGA L., SARIN A., TULIPANO L., 1995 - *The characteristics of karst groundwater systems*, COST Action 65 Final Report - Hydrogeological aspects of groundwater protection in karstic areas. Chapter 1: 349-369, <http://bookshop.europa.eu/en/cost-action-65-pbCGNA16547/>
- BATIOT C., 2002 - *Etude expérimentale du cycle du carbone en régions karstiques. Apport du carbone organique et du carbone minéral à la connaissance hydrogéologique des systèmes. Site expérimental de Vaucluse, Jura, Larzac, Région Nord-Montpelliéraine, Nerja (Espagne)*. PhD Thesis, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, Avignon.
- BATIOT C., EMBLANCH C., BLAVOUX B., 2003 - *Total Organic Carbon (TOC) and magnesium (Mg²⁺): two complementary tracers of residence time in karstic systems*. Comptes Rendus - Geoscience, 335(2): 205-214.
- CALÒ G.C., TINELLI R., LUCREZIO D., STANI M., 2005 - *Riscontri delle oscillazioni eustatiche Flandriane nelle acque profonde degli acquiferi Salentini (Puglia)*. Giornale di Geologia Applicata, 2, 341-347.
- EMBLANCH C., BLAVOUX B., PUIG J.M., MUDRY J., 1998 - *Dissolved Organic Carbon of Infiltration Within the Karst Hydrosystem*. Geophysical Research Letter, 25(9), 1459-1462.
- DROGUE C., 1971 - *Coefficient d'infiltration ou infiltration efficace, sur les roches calcaires*. Actes colloque d'hydrologie en pays calcaire, Besançon : 121-131.
- DROGUE C., 1992 - *Hydrodynamics of karstic aquifers: experimental sites in the mediterranean karst, Southern France*. In: Back W., Herman J.S. & Paloc H. (Eds), Hydrogeology of selected karst regions, International contributions to Hydrogeology, 13: 133-149, Heinz Heise, Hannover.

- FIDELIBUS M.D., 2011 - *Pollution transport mechanisms in a regional karst aquifer under extreme precipitation events (Murgia, Southern Italy)*. In: Proc. H2Karst, 9th Conf. on Limestone Hydrogeology. Besancon, Francia, 1-3 Settembre 2011, Imprimerie de l'Université de Franche-Comté, ISBN: 978-2-7466-3694-1: 177-180.
- FIDELIBUS M.D., CALÒ G., TINELLI R., TULIPANO L., 2011a - *Salt ground waters in the Salento karstic coastal aquifer (Apulia, Southern Italy)*. In: Lambrakis N., Stournaras G. Katsanou K. Eds., *Advances in the Research of Aquatic Environment, Environmental Earth Sciences Series*. 1, 407-415, Berlino: Springer Verlag, ISBN: 978-3-642-19901-1.
- FIDELIBUS M.D., TULIPANO L., D'AMELIO P., 2011b - *Convective thermal field reconstruction by ordinary kriging in karstic aquifers (Puglia, Italy): geostatistical analysis of anisotropy*. In: Carrasco F., Durán Valsero J.J. & LaMoreaux J.W. (Eds), *Advances in Research in Karst Media - Environmental Earth Series*. Vol. XX, 203-208, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, ISBN: 978-3-642-12485-3, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-12486-0_31
- JEANNIN P.Y., 1998 - *Structure et comportement hydraulique des aquifères karstiques*, PhD thesis, Neuchâtel, Speleo Projects, Basel, Switzerland, ISBN 3-908495-08-3.
- KIRALY L., 1975 - *Rapport sur l'état actuel des connaissances dans le domaine des caractères physiques des roches karstiques*. In: Burger A. & Dubertet L. (Eds), *Hydrogeology of karstic terrains*. International Union of Geological Sciences: 53-67.
- KIRALY L., 1998 - *Modelling karst aquifers by the combined discrete channel and continuum approach*. *Bulletin d'Hydrogéologie*, 16: 77-98.
- KLIMCHOUK A.B.: 2004 - *Towards defining, delimiting and classifying epikarst: Its origin, processes and variants of geomorphic evolution*. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, 2 (5): 1-13, http://speleogenesis.com/directory/karstbase/publication.php?old_id=3263
- REGIONE PUGLIA, 2005 - *Piano di Tutela delle Acque della Regione Puglia. Relazione generale*. <http://www.regione.puglia.it/index.php?page=documenti&id=29&opz=getdoc>
- TULIPANO L., FIDELIBUS M.D., 2002 - *Mechanisms of groundwater salinisation in a coastal karstic aquifer subject to over-exploitation*. In: Boekelman R.H., Hornschuh J.C.S., Olsthoorn T.N., Oude Essink G.H.P., Peute L. & Stark J.M. (Eds), *Proc. SWIM 17th*, Delft-The Netherlands, 2002: 262-272, Delft Univ. of Technology, ISBN: 90-800089-8-2.
- TULIPANO L., FIDELIBUS M.D., PANAGOPOULOS A. (Eds), 2005 - *Groundwater management of coastal karstic aquifers*. Final Report of Cost Action 621, EUR 21366, Office for Official Publications of the EC, <http://bookshop.europa.eu/en/the-main-coastal-karstic-aquifers-of-southern-europe-pbKINA20911/>, ISBN:92-898-0015-1.
- ZWAHLEN F. (Ed.), 2003 - *Vulnerability and Risk Mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers*. Final Report of Cost Action 620, Office for Official Publications of the EC, Luxembourg, <http://bookshop.europa.eu/en/cost-action-620-pbKINA20912/>, ISBN: 92-894-6416-X.

