

10. - VULNERABILITÀ DEGLI ACQUIFERI ALL'INQUINAMENTO E AREE DI SALVAGUARDIA DELLE OPERE DI CAPTAZIONE DELLE ACQUE SOTTERRANEE AD USO UMANO

La crescente consapevolezza dell'inquinamento ambientale prodotto dallo svolgimento di talune attività antropiche, ha fatto maturare la necessità di intraprendere adeguate misure di protezione delle risorse idriche sotterranee. Attività come la coltivazione delle cave, l'esercizio delle discariche, la depurazione delle acque reflue, lo spandimento di pesticidi e fertilizzanti provocano, infatti, il rilascio sul suolo di quantità variabili di inquinanti chimici e batteriologici, che l'azione dilavante delle acque meteoriche veicola poi in falda. Il problema assume un rilievo particolare in ambito regionale, a causa degli estesi affioramenti carbonatici fratturati e carsificati, che, com'è noto, favoriscono il rapido assorbimento delle acque meteoriche.

La protezione delle risorse idriche sotterranee può essere perseguita attraverso:

- il "*mapping*" della vulnerabilità intrinseca e integrata dei sistemi acquiferi all'inquinamento;
- la delimitazione delle aree di salvaguardia delle opere di captazione delle acque sotterranee destinate al consumo umano.

I due approcci sono complementari in quanto caratterizzati da un livello di dettaglio differente.

Il *mapping* della vulnerabilità è finalizzato a fornire una territorializzazione della suscettibilità all'inquinamento di un sistema acquifero nella sua globalità, molto utile nell'ambito di una pianificazione preventiva e/o correttiva dell'uso del territorio a medio e lungo termine, tesa a minimizzare il rischio di inquinamento delle risorse idriche sot-

terranee, che, come ovvio, è tanto maggiore quanto maggiore è la vulnerabilità dell'acquifero. La valutazione della vulnerabilità è l'attività principale da svolgere nell'ambito della "difesa a tutto campo" (CIVITA, 2005), necessaria per supportare i "decision makers", ovvero i soggetti preposti alla tutela del territorio, nello svolgimento di diverse attività, tra le quali:

- identificare le zone che meglio si prestano per l'insediamento di attività potenzialmente pericolose per l'acquifero sottostante e per l'estrazione di acqua da destinare al consumo umano;
- individuare le risorse idriche sotterranee strategiche, scarsamente soggette a rischio di inquinamento, da vincolare preventivamente (aree di riserva);
- identificare le priorità degli interventi nelle operazioni di disinquinamento degli acquiferi vulnerati (piani di risanamento);
- progettare le reti di monitoraggio.

La delimitazione delle aree di salvaguardia delle opere di captazione per l'approvvigionamento idrico ad uso potabile è finalizzata a preservare la qualità delle acque, per impedire concretamente che un fenomeno di inquinamento a carico dell'acquifero, possa raggiungere le opere di captazione compromettendo, in maniera irreversibile e improvvisa, la qualità delle acque destinate al consumo umano. Essa è quindi necessaria al fine di applicare la cosiddetta "difesa di punto" (CIVITA, 2005), ossia quell'insieme di attività che consentono, all'Ente Gestore del Servizio Idrico Integrato, di intraprendere misure alternative e tempestive, per garantire la protezione di dette acque con continuità ed efficienza. È da evidenziare, a tal proposito, che la delimitazione delle aree di salvaguardia implica contestualmente l'attivazione e la gestione, lungo il perimetro delle aree stesse, di un preordinato sistema di monitoraggio delle acque sotterranee, che consenta un controllo in continuo dei parametri chimico-fisici delle acque e, in caso di variazioni significative dei suddetti parametri, una tempestiva segnalazione dei processi di inquinamento della risorsa da proteggere. Ciò consente di adottare, in caso di inquinamento, un piano di emergenza che contempli sia gli interventi da attuare, per limitare l'impatto dell'inquinante

sulla qualità delle acque estratte, sia le fonti alternative di approvvigionamento idropotabile necessarie.

10.1. - LA VULNERABILITÀ ALL'INQUINAMENTO DEGLI ACQUIFERI

10.1.1. - *Definizioni di vulnerabilità intrinseca e integrata*

Secondo la definizione di Civita (1987) la vulnerabilità intrinseca di un acquifero all'inquinamento può essere espressa come "la suscettività specifica del sistema acquifero, nelle sue diverse parti componenti e nelle diverse situazioni geometriche e idrodinamiche, a ingerire e diffondere, anche mitigandone gli effetti, un inquinante fluido o idrovescolato tale da produrre impatto sulla qualità dell'acqua sotterranea, nello spazio e nel tempo" (CIVITA, 2005).

La vulnerabilità intrinseca si configura dunque come una caratteristica propria del sistema acquifero, la cui valutazione implicherebbe una corretta ripartizione in verticale del sistema nelle sue componenti, che la letteratura variamente definisce. Sono così individuate, nell'ordine, la zona epidermica, quella vadosa e poi quella freatica, fino in profondità ad una falda profonda, qualora sia effettivamente presente, salvo che non sia confinata. È ben evidente che la situazione effettiva dipende, in particolare, dalla litologia, dalla tettonica e dalle bizzarre connessioni idrauliche, in presenza di carsismo, come del resto già illustrato, ancorché indicativamente, nel capitolo 1.

I riferimenti allo spazio e al tempo contenuti nella definizione sono strettamente legati alla necessità di raffigurare la vulnerabilità come qualcosa di dinamico e non statico, cioè in stretta connessione ai molteplici fenomeni che intervengono nel meccanismo di contaminazione, ovvero nelle fasi di penetrazione dell'inquinante nel sistema acquifero e di propagazione dello stesso, a partire dal punto di immissione (COTECCHIA, 1982; COTECCHIA *et alii*, 1974).

Da quanto esposto si evincono la complessità e la molteplicità dei contenuti scientifici insiti nel concetto di vulnerabilità intrinseca, che rendono la valutazione in oggetto particolarmente difficile in quanto multidisciplinare.

Alla definizione della vulnerabilità intrinseca degli acquiferi all'inquinamento si affianca, dal punto di vista cartografico-operativo, la definizione di vulnerabilità integrata. Quest'ultima si ottiene sovrapponendo alla vulnerabilità intrinseca il campo di moto dell'acquifero e l'identificazione georeferenziata di:

- centri di pericolo (CDP), ovvero produttori di inquinamento puntuali;
- fonti di pericolo (FDP), ovvero produttori di inquinamento su base territoriale vasta (per esempio inquinanti di tipo agricolo);
- soggetti a rischio (SAR), ovvero bersagli dell'inquinamento.

Nel capitolo 19 sarà riportata l'analisi di alcuni casi di inquinamento concentrato che hanno interessato le risorse idriche sotterranee regionali. Si tratta di casi esemplari che illustrano la modalità con cui, a partire da un centro di pericolo, le sostanze inquinanti possono agevolmente raggiungere sia falde superficiali sia la falda profonda carbonatica cretacea, secondo meccanismi di trasferimento legati sia alle caratteristiche della sorgente inquinante sia alle locali condizioni idrogeologiche.

10.1.2. - *Valutazione della vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi carbonatici fratturati e carsificati*

La valutazione della vulnerabilità intrinseca di un sistema acquifero all'inquinamento presenta non poche difficoltà in contesti idrogeologici come quello pugliese, e ciò a causa delle vicissitudini tettoniche e dei fenomeni carsici subiti dagli acquiferi carbonatici che, nel tempo, hanno alterato localmente le condizioni geostrutturali delle rocce e il grado di vascolarizzazione della rete drenante, condizionando fortemente le modalità con cui si esplica l'alimentazione del sistema acquifero e lo stesso deflusso idrico sotterraneo.

In linea del tutto generale, la ricarica degli acquiferi carsici può essere di tipo autoctona, ossia proveniente dall'infiltrazione diretta locale, avente sia carattere diffuso sia concentrato, o alloctona, ossia proveniente da bacini contigui caratterizzati da importanti deflussi superficiali. Quando un acquifero carsico è ricoperto di terreni porosi discretamente permeabili si può poi avere una ricarica

diffusa per travaso da copertura permeabili (fig. 10.1).

Detta schematizzazione delle modalità di ricarica degli acquiferi carsici, allorché molto generale e semplificata, già indica le difficoltà insite nell'analisi della vulnerabilità degli acquiferi e della sua applicazione agli effetti della salvaguardia delle risorse idriche sotterranee.

L'assenza di centri di pericolo in corrispondenza di aree che presentano una elevata vulnerabilità intrinseca e l'ubicazione degli stessi in aree ove invece la vulnerabilità intrinseca è bassa, non garantisce di per se, in generale, una protezione alle risorse idriche sotterranee. Le aree a bassa vulnerabilità possono, infatti, contribuire alla ricarica degli acquiferi ubicati in prossimità delle aree ad alta vulnerabilità, anche a notevole distanza, e ciò in ragione della possibilità che la ricarica di questi ultimi avvenga in modo alloctono. L'acqua di pioggia insistente su porzioni di territorio caratterizzate da bassa vulnerabilità intrinseca può quindi, specie in occasione di eventi meteorici particolarmente intensi, infiltrarsi nel sottosuolo anche a notevole distanza, con la possibilità di raggiungere acquiferi fortemente vulnerabili, e ciò in ragione del ruscellamento superficiale facente capo alle forme carsiche di superficie.

Il disordine idraulico evidenziato in aree edificate della città di Bari a seguito dell'evento pluviometrico dell'ottobre 2005 illustra in maniera esemplare il concetto esposto. Nell'ambito del territorio regionale si osserva infatti un generale incremento della piovosità con l'aumentare della distanza dalla costa. Ciò significa che nell'ambito dei bacini idrografici sottesi dalla città di Bari (fig. 10.2; COTECCHIA, 2006), le altezze di pioggia maggiori toccano alle porzioni dei bacini più interne, poste nella media Murgia, in particolare nel settore sud-occidentale, ove sovente si manifestano piogge di tipo convettivo (cap. 7), caratterizzate da scrosci concentrati di elevata intensità. A seguito di eventi piovosi particolarmente intensi ed abbondanti, possono verificarsi condizioni di deflusso abbondante tale da dare luogo a trasferimenti verso valle di portate significative. Ciò è quanto accaduto in occasione dell'evento pluviometrico dell'ottobre 2005: intense piogge sono cadute su porzioni ri-

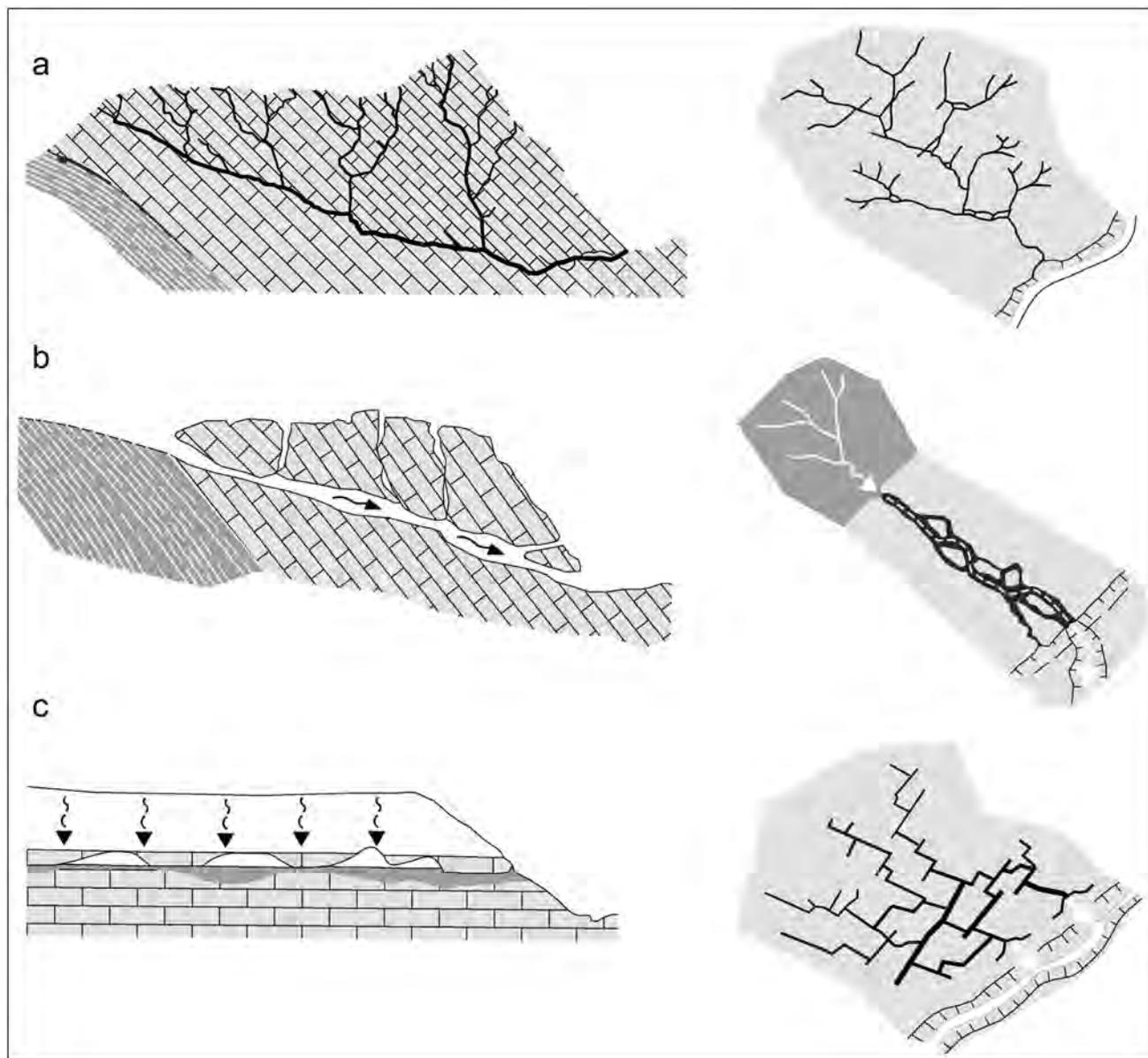


Fig. 10.1 - Alimentazione di un sistema acquifero carsico: a) autoctona, concentrata e diffusa; b) alloctona, concentrata; c) diffusa per travaso da coperture permeabili (mod., da DE WAELE & PICCINI, 2008).

– Recharge of a karst aquifer system: a) autochthonous, concentrated and diffuse; b) allochthonous, concentrated; c) diffuse through permeable covers (modified from DE WAELE & PICCINI, 2008).

strette del bacino del T. Picone, in cui confluiscono le Lama Baronali e Badessa (fig. 10.3) e si sono trasferite dall'area collinare e montana, molto a monte della città, all'area a quota bassa della Terra di Bari, in maniera analoga a quanto già verificatosi in occasione di un altro evento eccezionale, verificatosi nel 1926 (ALFIERI, 1927). La natura calcarea, tettonicamente fratturata e carsificata, quindi largamente permeabile, della Terra di Bari ha quindi determinato la lenta infiltrazione del notevole volume idrico caduto al suolo a notevole distanza.

Mediante la ricostruzione degli afflussi a partire dalle immagini satellitari all'infrarosso e l'applicazione di un modello afflussi-deflussi a parametri distribuiti, è stato stimato un afflusso meteorico totale nella parte superiore del bacino del torrente Picone pari a 18 milioni di m^3 , che su un bacino di estensione di 173 km^2 corrisponde ad un'altezza media totale delle precipitazioni di 104 mm. È stato inoltre stimato in 8.5 milioni di m^3 il volume d'acqua riversatosi nella città di Bari (COTECCHIA, 2006), evidenziando importanti connessioni idrau-

liche esistenti tra porzioni di territorio murgiano.

L'intero territorio murgiano è caratterizzato dalla presenza di incisioni morfologiche localmente dette lame, ma del tutto simili a quelle presenti in altre aree del bacino del Mediterraneo e note in letteratura come “*ephemeral stream*” (direttrici di deflusso effimere). Si tratta di incisioni morfologiche di norma asciutte, con andamento planimetrico abbastanza irregolare, che danno luogo ad un reticolo morfologico non gerarchizzato, discontinuo ed a luoghi incerto. Esse, pur non essendo dei corsi d'acqua, occasionalmente, a seguito di eventi pluviometrici particolarmente intensi o prolungati, danno luogo a fenomeni di deflusso superficiale, in quanto l'entità degli afflussi supera la capacità del terreno di assorbire e/o trattenere le acque di pioggia attivando così i fenomeni di ruscellamento.

La possibilità di attivazione idraulica di questi

elementi morfologici e la conseguente entità del deflusso sono quindi fortemente condizionati, oltre che dalle precipitazioni, anche dalla morfologia locale dei bacini interessati, i quali attraversano terreni generalmente molto permeabili. Infatti, solo in occasione di eventi di pioggia davvero eccezionali, il deflusso riesce a raggiungere le sezioni finali delle lame e riversarsi in mare. Esso spesso finisce per perdersi sia attraverso zone caratterizzate da pendenze molto basse a grande capacità di assorbimento sia in depressioni e/o in vaste aree interessate da attività agricole.

La letteratura internazionale evidenzia infatti come il coefficiente di deflusso negli “*ephemeral stream*” sia fortemente variabile e come un vero e proprio deflusso di tipo fluviale si verifichi solo occasionalmente a seguito di eventi di pioggia particolarmente concentrati nel tempo e nello spazio,

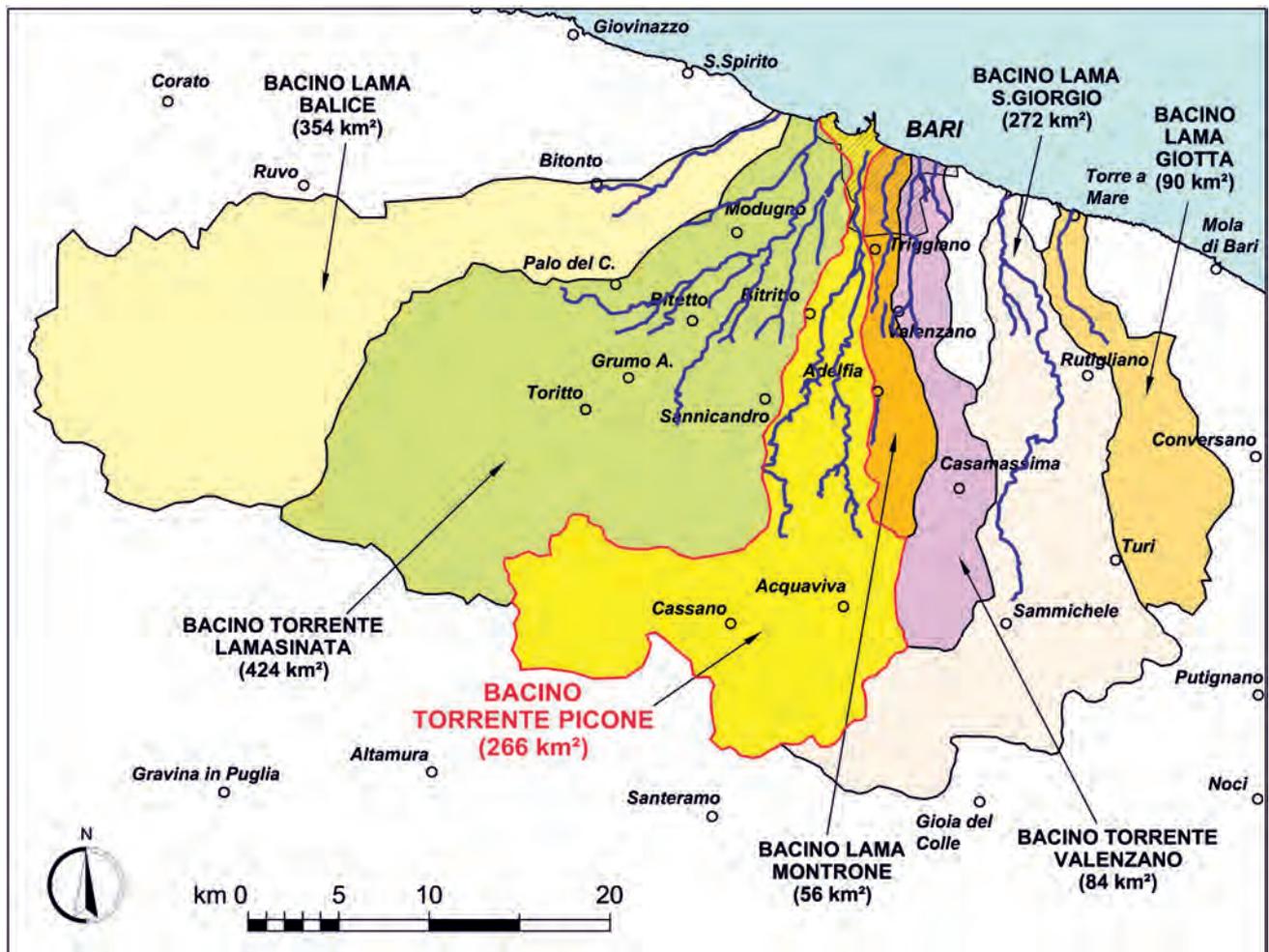


Fig. 10.2 - Bacini idrografici delle lame sottesi dalla città di Bari.
- *Catchments of ephemeral streams in the town of Bari.*

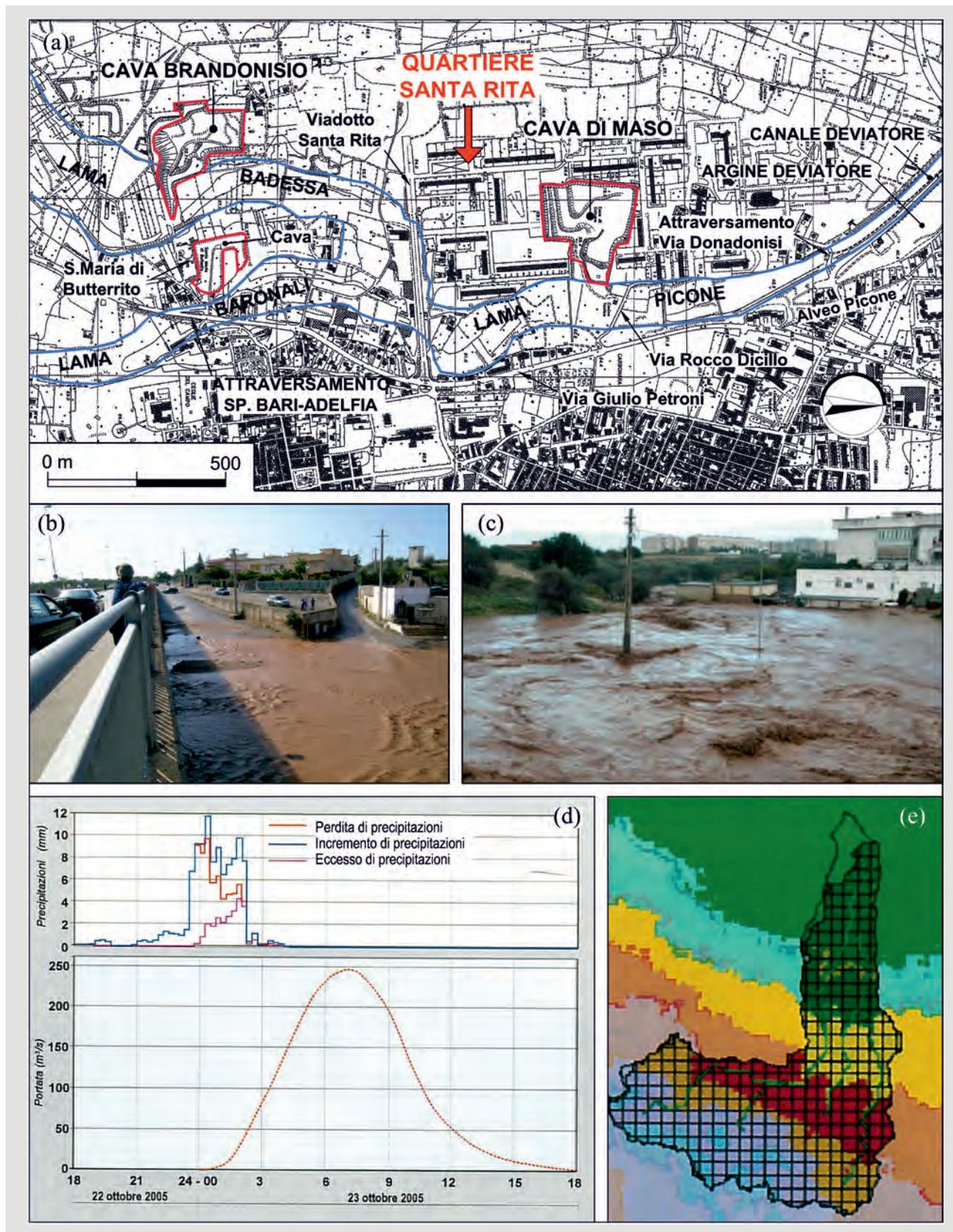


Fig. 10.3 - Confluenza delle lame Baronali e Badessa nel T. Picone (a), con gli effetti dell'alluvione prodottasi sulle sponde delle dette lame (b) e (c). Il grafico (d) indica il diagramma afflussi e l'idrogramma di piena ottobre 2005 del T. Picone laddove confluisce nel canale deviatore che protegge la città di Bari (e).

– Confluence of the ephemeral streams Baronali and Badessa into the Picone stream (a), with the effects of the flood on the banks of the ephemeral streams (b) and (c). The chart (d) shows the inflow diagram and the flood hydrograph of October 2005 of the Picone stream at the site of confluence in the diversion channel protecting the town of Bari (e).

non sempre facilmente rilevabili dalla rete pluviometrica ordinaria, se non attraverso una fitta rete di pluviometri ed attraverso analisi satellitari (COTECCHIA *et alii*, 2006; CAMARASA, 2001).

Si tratta di fenomeni complessi e di difficile modellazione se non con modelli a parametri distribuiti (GABRIELE *et alii*, 2006, DOGLIONI *et alii*, 2012), per i quali, nei prossimi anni, occorrerà porre particolare attenzione, specialmente nelle porzioni di territorio caratterizzate da possibilità di precipitazioni di tipo convettivo che possono dar luogo a deflussi eccezionali, come quelle verificatisi a Bari nel 2005.

Altro aspetto ricorrente che può condurre ad una valutazione errata della vulnerabilità, è rappresentato dalla non conoscenza delle effettive condizioni geostrutturali dei terreni sovrastanti l'acquifero, quando impermeabili. La presenza di detti materiali concorre, infatti, all'assegnazione di una bassa vulnerabilità intrinseca dell'acquifero sottostante, in quanto sarebbe lecito ritenere, in dette condizioni, l'assenza di ogni forma di ricarica. In realtà, dette formazioni impermeabili, come ad esempio le argille pleistoceniche che spesso sovrastano gli acquiferi carsici regionali, hanno subito una tettonica recente che ha spesso determinato la formazione di fratture sub-verticali, che rappresentano delle rapide vie di infiltrazione delle acque meteoriche nel sottosuolo. L'individuazione di dette singolarità geostrutturali richiederebbe l'attenta analisi, a scala piuttosto ridotta, delle condizioni geologico-strutturali delle formazioni argillose, in genere di difficile attuazione negli studi che si conducono per la definizione della vulnerabilità. Alcune situazioni esemplari a tal riguardo possono ritrovarsi in ambienti idrogeologici come quelli che caratterizzano la Piana di Brindisi o il Salento, per i quali verrà data ampia trattazione nei capitoli 16 e 18. Nel caso della Penisola Salentina vanno poi considerati anche i rapporti esistenti tra i terreni miocenici e gli acquiferi cretacei. I terreni miocenici, come ad esempio la Pietra Leccese e le Calcareniti di Andrano, possono presentare, infatti, svariate condizioni idrogeologiche, in relazione alle vicissitudini tettoniche ed al carsismo cui sono state sottoposte (cap. 18), così come sinteticamente illustrato nella sezione VI-VI della tavola 4 (Carta

Idrogeologica, allegata al volume). Detti terreni, la cui matrice va considerata sostanzialmente impermeabile, possono presentare un grado di permeabilità dovuto alla fratturazione ed al carsismo molto variabile sia lungo la verticale sia lateralmente, tanto da rendere incerta la valutazione della vulnerabilità dell'acquifero profondo. Nei terreni miocenici possiamo, infatti, trovare falde superficiali separate da quella profonda o localmente comunicante con essa a causa di lineamenti geostrutturali. Le acque sotterranee contenute negli acquiferi miocenici possono poi essere a diretta comunicazione idraulica con la falda profonda cretacea. Possiamo poi trovare situazioni in cui i terreni miocenici presentano una permeabilità trascurabile tanto da determinare condizioni di bassa vulnerabilità per l'acquifero profondo. È chiara quindi la complessità insita nella determinazione della vulnerabilità degli acquiferi carsici cretacei a fronte di situazioni idrogeologiche che andrebbero studiate localmente sulla base di dati conoscitivi finalizzati a valutare le effettive condizioni geostrutturali delle formazioni mioceniche, spesso non disponibili.

Un ulteriore esempio relativo alla Terra di Bari dimostrante l'importanza di tener conto della presenza di connessioni idrauliche tra le componenti di un sistema idrogeologico ai fini della valutazione della vulnerabilità all'inquinamento, è dato dal rinvenimento in falda di acque radioattive di provenienza ignota in corrispondenza di una perforazione eseguita nel 1980 in prossimità della centrale Termoelettrica ENEL di Bari; il carotaggio della radioattività naturale gamma ha rilevato, in particolare, la presenza di due picchi ad alta radioattività, caratterizzati da 5000 e 1500 colpi per secondo, rispettivamente alle profondità di 11 m e 17 m dal piano campagna (fig. 10.4; COTECCHIA, 1982).

10.1.3. - Metodologie di mapping della vulnerabilità

I metodi di valutazione e cartografia della vulnerabilità sono in continua evoluzione. I numerosi metodi disponibili sono in genere molto legati alla fisiografia delle zone per i quali sono stati studiati, al numero e alla qualità dei dati disponibili, alle finalità degli studi, e più in generale al quadro in cui sono stati sperimentati (CIVITA, 1994, 2005).

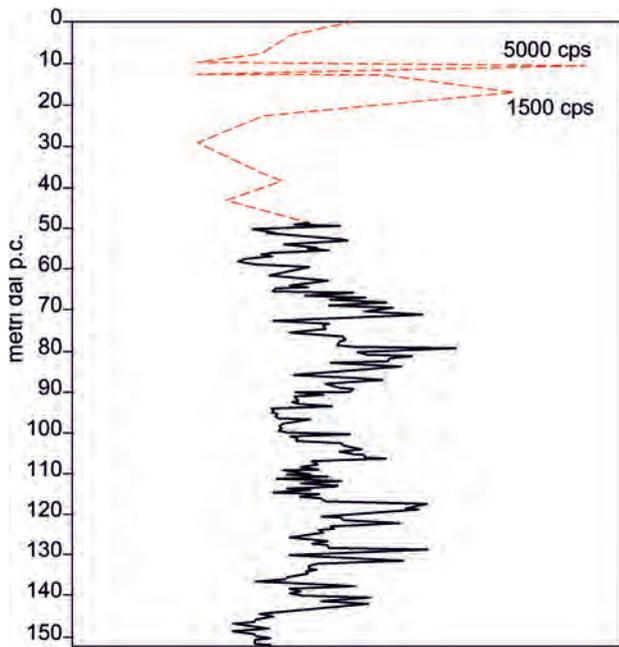


Fig. 10.4 - Carotaggio della radioattività naturale gamma dei terreni attraversati con la perforazione eseguita nel 1980 in prossimità della Centrale Termoelettrica Enel di Bari.

- Natural gamma ray log of formations drilled in 1980 in the proximity of the Enel Thermoelectric Power Station at Bari.

Da un punto di vista essenzialmente tipologico i metodi possono essere ripartiti in tre categorie:

- *metodologie di zonazione per aree omogenee* (ad esempio il metodo messo a punto dal Consiglio Nazionale delle Ricerche - GNDCI) - si tratta di sistemi di valutazione non troppo raffinati, che individuano le situazioni idrogeologiche-tipo riscontrabili sul territorio, alle quali è associata la valutazione del grado di vulnerabilità. Si applicano laddove la densità e l'affidabilità dei dati non è molto elevata, per cui è possibile restituire una cartografia a denominatore di scala medio-alto;

- *metodologie parametriche* - si tratta di sistemi di valutazione generalmente più sofisticati rispetto a quelli precedentemente descritti, la cui validità cresce nelle aree dove la densità e l'affidabilità dei dati è elevata e dove è possibile produrre cartografie a medio-basso denominatore di scala. Essi pervengono alla valutazione della vulnerabilità sulla base di determinati parametri, a ciascuno dei quali viene assegnato un punteggio in funzione dell'importanza assunta dallo stesso. Nell'ambito delle metodologie parametriche, le metodologie a punteggi e pesi costituiscono una ulteriore evoluzione, in

quanto consentono di evidenziare, attraverso l'utilizzo di un peso moltiplicatore del punteggio, anche la rilevanza assunta da ciascun parametro in particolari situazioni idrogeologiche e d'impatto antropico;

- *metodologie matematiche* - pervengono alla valutazione di un indice di vulnerabilità intrinseca sulla base di espressioni matematiche a variabile grado di complessità; esse richiedono una grande varietà di dati specialistici e risultano pertanto applicabili ad aree di piccole o piccolissime dimensioni, molto note dal punto di vista idrogeologico.

Alle tre tipologie di metodi di *mapping* sopra elencate corrispondono quindi diversi gradi di affidabilità delle relative carte di vulnerabilità intrinseca, e ciò in ragione della necessità di approfondire la conoscenza delle condizioni geologico-geostrutturali ed idrogeologiche del territorio. Si ha quindi che le metodologie di zonazione per zone omogenee, essendo applicate ai casi in cui non si dispone di dati di dettaglio ed affidabili, forniscono carte di vulnerabilità che, nei contesti complessi come quello regionale pugliese, sono da ritenere sicuramente poco affidabili, o comunque solo orientative. Passando alle metodologie parametriche e matematiche è possibile ottenere carte di vulnerabilità più efficaci, e ciò in ragione della necessità di indagare maggiormente il territorio.

A partire dagli anni '80 numerosi sono stati i metodi parametrici proposti. Tra i più importanti e riconosciuti dalla comunità scientifica internazionale ricordiamo:

- il metodo SINTACS, nato in Italia su proposta di CIVITA (1994) e CIVITA & DE MAIO (1997, 2000) come adattamento agli scenari idrogeologici nazionali dell'americano metodo DRASTIC (ALLER *et alii*, 1987). Il metodo consente di pervenire ad una valutazione quantitativa della vulnerabilità sulla base dell'assegnazione, a ciascuno dei 7 parametri utilizzati (Soggiacenza della superficie piezometrica, Infiltrazione efficace, Non saturo, Tipologia della copertura, Acquifero, Conducibilità idraulica dell'acquifero e Superficie topografica), di un punteggio variabile tra 1 e 10 in funzione della magnitudo del parametro, e di un peso, ovvero un moltiplicatore del punteggio, variabile tra 1 e 5 in funzione dell'importanza dello stesso parametro

nello specifico contesto idrogeologico. Proprio l'introduzione delle stringhe di pesi consente di definire la situazione d'impatto specifica dell'area (area soggetta ad impatto normale, area soggetta ad impatto rilevante, area soggetta a drenaggio, area carsica, area in rocce fessurate) rendendo il SINTACS un metodo di tipo universale, applicabile in qualsiasi scenario geologico e idrogeologico. Ad esempio, in presenza di acquiferi fratturati e carsici quali quelli regionali, il metodo attribuisce la massima enfasi ai parametri acclività, infiltrazione efficace, caratteristiche dell'acquifero e permeabilità, mentre attribuisce la minima enfasi all'azione combinata di soggiacenza ed insaturo, in modo da tenere in conto l'azione di collegamento rapido tra la superficie e l'acquifero operata dalle strutture carsiche. Dal momento però che il metodo SINTACS prevede la riduzione della vulnerabilità all'aumentare della acclività, esso risulta inadatto in presenza di un carso molto sviluppato e in particolare all'interno dei bacini di ricarica delle forme carsiche, conducendo ad una sottostima marcata della vulnerabilità. In dette condizioni si ha infatti che l'elevata acclività del suolo non conduce, in generale, ad una riduzione della vulnerabilità, e ciò in quanto l'elevata capacità di assorbimento delle forme carsiche di superficie può essere tale da determinare il quasi totale assorbimento delle acque di superficie anche in presenza di suoli molto acclivi;

- il metodo EPIK, sviluppato in Svizzera espressamente per gli acquiferi carbonatici carsici (DOERFLINGER & ZWAHLEN, 1998). Il metodo, che viene normalmente applicato per la *mapping* della vulnerabilità alla scala di 1:10.000, si basa su 4 parametri: lo sviluppo dell'epicarso (E), l'importanza della copertura protettiva (P), le condizioni di infiltrazione (I) e lo sviluppo della rete carsica (K), che vengono analizzati separatamente e quantificati, assumendo un valore variabile da 1 a 4. I parametri vengono poi combinati per determinare il fattore di protezione F in ogni punto del bacino, variabile tra 9 e 34;
- il metodo PI, nato in Germania per descrivere la vulnerabilità degli acquiferi in generale, ed in particolare anche di quelli carsici (GOLDSCHIEDER *et alii*, 2000). L'acronimo PI deriva dai 2 fattori presi in esame: copertura protettiva (P) e infiltrazione (I). Il

fattore copertura protettiva descrive la funzione protettiva espletata dagli strati di terreno sovrastanti il tetto dell'acquifero ossia suolo, sottosuolo e roccia non satura, e ciò in funzione del loro spessore e delle relative proprietà idrauliche. Il fattore infiltrazione quantifica il flusso concentrato che si sviluppa all'interno delle forme carsiche, anche per *by-pass* della copertura di protezione.

Recentemente, nell'ambito dell'azione *Europea Cost 620* sono stati proposti numerosi altri metodi per la mappatura della vulnerabilità nei sistemi acquiferi fratturati e carsici, concettualmente assimilabili al metodo PI (metodi COP, LEA, VULK e *Time-Input*). Tutti questi metodi sono basati sulla costruzione di un modello concettuale "sorgente-percorso-recettore": la sorgente è il punto della superficie topografica in cui avviene il rilascio del contaminante; il recettore è la risorsa idrica in esame, che deve essere protetta; il percorso è la via di migrazione che connette la sorgente al recettore, individuabile nel passaggio attraverso gli strati litologici sovrastanti la risorsa idrica. In caso di acquiferi confinati il recettore è ovviamente il tetto dell'acquifero e non la sua superficie piezometrica.

I fattori di valutazione su cui si basa un modello concettuale di base per gli studi di vulnerabilità sono quindi tre:

- "Overlying layers" (O);
- "Concentration of flow" (C);
- "Precipitation regime" (P).

Il fattore P rappresenta lo *stress* esterno applicato al sistema; a meno delle aliquote di evapotraspirazione e di deflusso superficiale, esso corrisponde al parametro "infiltrazione efficace" del metodo SINTACS. I fattori O e C rappresentano le caratteristiche interne del sistema: il fattore O valuta il grado di protezione dell'acquifero dovuto alla presenza degli strati litologici sovrastanti l'acquifero, mentre il fattore C valuta l'incidenza dei fenomeni di concentrazione del flusso idrico e di rapida infiltrazione delle acque in presenza di un epicarso molto sviluppato (doline, vore, inghiottitoi e fratture molto sviluppate). Detto ultimo fattore è quello che adatta la valutazione della vulnerabilità alle condizioni geolitologiche e strutturali specifiche dell'ambiente carsico. Proprio grazie al fattore C, i metodi COP, LEA, VULK e *Time-Input* risultano, in so-

stanza, idonei alla valutazione della vulnerabilità in contesti idrogeologici spiccatamente carsici, come dimostra l'applicazione, nell'ambito dell'Approccio Europeo (COST 620 Action), dei metodi SINTACS e COP ad un'area campione dell'Italia meridionale: il sistema carsico degli Alburni. Detta applicazione ha evidenziato sostanziali differenze nella valutazione della vulnerabilità con i due metodi; il metodo COP, enfatizzando il ruolo delle forme carsiche, risulta molto più severo, conducendo ad una valutazione della vulnerabilità più elevata rispetto a quello determinato con il metodo SINTACS (CORNIELLO, *et alii*, 2005).

Il modo in cui definire e combinare i tre fattori dà origine ai diversi metodi di mappatura della vulnerabilità intrinseca illustrati nel Cost 620.

Nel metodo COP, ad esempio, la definizione del parametro "*Concentration of flow*" dipende dalla posizione dell'area oggetto di indagine rispetto ai bacini di ricarica delle forme carsiche: se l'area ricade all'interno dei bacini di ricarica i fattori che concorrono a definire il parametro C sono la distanza dalla discontinuità carsica, la distanza dal corso d'acqua fossile (se presente), la presenza della vegetazione e l'acclività della superficie topografica; se l'area ricade all'esterno dei bacini di ricarica, i fattori che concorrono a definire il parametro C, sono le caratteristiche di fratturazione e di permeabilità delle rocce affioranti, la presenza di vegetazione e l'acclività della superficie topografica. È importante sottolineare che la presenza di vegetazione e l'acclività della superficie topografica, che compaiono nella valutazione del parametro C sia all'interno sia all'esterno dei bacini di ricarica, inducono un effetto opposto sulla vulnerabilità a seconda della posizione dell'area di studio rispetto al bacino di ricarica: all'interno del bacino, l'aumentare dell'acclività della superficie topografica e l'assenza di una copertura vegetale riducono la protezione dell'acquifero, in quanto favoriscono la veicolazione dell'inquinante in falda attraverso la discontinuità carsica; all'esterno del bacino, invece, l'aumentare dell'acclività della superficie topografica e l'assenza di una copertura vegetale aumentano la protezione dell'acquifero, in quanto favoriscono il rapido deflusso superficiale dell'acqua, limitando la sua infiltrazione.

A fronte della maggiore attenzione prestata al ruolo svolto dalle forme carsiche, i metodi PI, COP, LEA, VULK e *Time-Input* non tengono conto del flusso orizzontale che si esplica nell'acquifero, dal momento che essi considerano la risorsa idrica solo come bersaglio e non anche come possibile vettore del carico inquinante. I metodi infatti non considerano alcun parametro rappresentativo delle caratteristiche della zona di saturazione ed espressivo della suscettibilità dell'acquifero alla diffusione degli inquinanti, al contrario del metodo SINTACS, nel quale dette caratteristiche sono sintetizzate nei parametri "acquifero" (A) e "conducibilità idraulica" (C). In tal senso è possibile affermare che i metodi PI, COP, LEA, VULK e *Time-Input* permettono di valutare la vulnerabilità intrinseca dell'acquifero rispetto alla sola suscettibilità all'ingerimento degli inquinanti, mentre il metodo SINTACS consente di valutare la vulnerabilità intrinseca rispetto sia alla suscettibilità all'ingerimento sia alla suscettibilità alla diffusione degli inquinanti, pur con tutti i limiti sopra illustrati.

Quanto sopra esposto indica quindi la necessità di scegliere adeguatamente, in ogni contesto idrogeologico, la modalità con cui cartografare la vulnerabilità intrinseca degli acquiferi. Le differenze esistenti tra i vari metodi non sono formali. I vari metodi disponibili consentono, infatti, di esaltare alcuni aspetti, necessari per la corretta rappresentazione della vulnerabilità, rispetto ad altri, e la scelta deve ricadere su quelli ritenuti maggiormente rappresentativi nel particolare contesto idrogeologico che si sta esaminando. Le problematiche esposte sono quindi di fondamentale importanza, e ciò perché l'errata applicazione dei metodi di rappresentazione della vulnerabilità possono condurre a politiche di pianificazione, gestione e salvaguardia del tutto avulse dall'idraulica degli acquiferi, con importanti conseguenze economiche ed ambientali.

10.2. - LE AREE DI SALVAGUARDIA DELLE OPERE DI CAPTAZIONE DELLE ACQUE SOTTERRANEE DESTINATE ALL'USO POTABILE

Per aree di salvaguardia delle opere di captazione delle acque sotterranee destinate all'uso potabile si intendono quelle aree circostanti i punti di

prelievo nell'ambito delle quali apporre vincoli, divieti e regolamentazioni all'utilizzo del territorio, con il fine di prevenire il degrado qualitativo delle acque destinate al consumo umano.

La disciplina delle aree di salvaguardia viene introdotta nella Normativa nazionale con il Decreto del Presidente della Repubblica del 24 maggio 1988, n. 236 (art. 4, 5, 6 e 7), che recepisce la direttiva CEE n. 80/778 concernente la qualità delle acque destinate al consumo umano. Successivamente essa viene ripresa dal Decreto Legislativo dell'11 maggio 1999, n. 152 (art. 21), e con l'emendamento n. 258 del 18 agosto 2000, senza l'apporto di modifiche sostanziali a quanto previsto dal precedente decreto. Attualmente il riferimento normativo in materia di delimitazione delle aree di salvaguardia è rappresentato dal Decreto Legislativo del 3 aprile 2006, n. 152. L'art. 94 di detto Decreto distingue le aree di salvaguardia in zona di tutela assoluta, zona di rispetto e zona di protezione. Con riferimento, in particolare, alle opere di captazione delle risorse idriche sotterranee, esse sono così individuate:

- la zona di tutela assoluta (art. 94, comma 3) è costituita dall'area immediatamente circostante il pozzo, di raggio pari almeno a 10 metri, da adibire esclusivamente alle opere di captazione e alle infrastrutture di servizio;
- la zona di rispetto (art. 94, comma 4) è costituita dalla porzione di territorio circostante la zona di tutela assoluta, da sottoporre a vincoli e destinazioni d'uso tali da tutelare qualitativamente e quantitativamente la risorsa idrica captata; essa viene ulteriormente distinta in zona di rispetto ristretta e zona di rispetto allargata, in relazione alla tipologia dell'opera di presa o captazione e della situazione locale di vulnerabilità e rischio della risorsa. Nei sistemi fessurati o carsificati possono essere individuate anche una o più zone di rispetto non direttamente collegate all'opera di captazione (zone di rispetto aggiuntive), in corrispondenza delle quali siano stati verificati fenomeni di infiltrazione con collegamenti diretti alle risorse idriche captate nel pozzo;
- la zona di protezione (art. 94, comma 7) è costituita dall'area più esterna, che idealmente coincide con l'area di ricarica dell'acquifero, tale da assicu-

rare la protezione del patrimonio idrico.

La sola delimitazione delle aree di salvaguardia non garantisce tuttavia la conservazione nel tempo della qualità delle acque sotterranee, in quanto evidentemente non impedisce che al punto di prelievo giungano inquinanti provenienti da porzioni del territorio esterne alle stesse.

Si pone dunque la necessità di integrare la protezione statica, attivata attraverso la delimitazione delle aree di salvaguardia, con misure di protezione dinamica, ovvero con l'attivazione e la gestione di un preordinato sistema di monitoraggio delle acque sotterranee disposto lungo il perimetro delle aree di salvaguardia stesse. Attraverso l'attività di monitoraggio è possibile, infatti, controllare periodicamente i parametri chimico-fisici delle acque e segnalare tempestivamente, sulla base di variazioni significative dei suddetti parametri, eventuali processi di inquinamento della risorsa, e ciò tenuto conto anche della vulnerabilità dell'acquifero all'inquinamento. Detta segnalazione consentirebbe di adottare un piano di emergenza, che contempra sia gli interventi da attuare per limitare l'impatto dell'inquinante sulla qualità delle acque estratte, sia le fonti di approvvigionamento idropotabile alternative.

È importante osservare che l'adozione delle misure di protezione, tanto statiche quanto dinamiche, presuppone la presenza, nell'ambito degli organi preposti alla tutela delle risorse idriche sotterranee, di tecnici preparati in materia, in grado di aggiornare la delimitazione delle aree di salvaguardia, tenuto conto del carattere dinamico del sistema acquifero, e di decidere, in caso di emergenza, i provvedimenti urgenti da adottare e gli interventi da attuare a tutela della salute pubblica.

10.2.1. - *Definizioni*

Per un'adeguata comprensione dei criteri di delimitazione delle aree di salvaguardia è necessario considerare alcuni concetti e definizioni di idraulica delle acque sotterranee, e in particolare di idraulica dei pozzi.

L'estrazione di acqua sotterranea da un pozzo produce un abbassamento del livello dell'acqua nel punto di prelievo, con la conseguente formazione di un cono di depressione che si raccorda asintoti-

camente alla superficie piezometrica in condizioni indisturbate; ciò determina, in prossimità del pozzo, un incremento della cadente piezometrica, da cui trae origine il moto di filtrazione diretto verso il pozzo stesso (figg. 10.5, 10.6). La depressione della superficie piezometrica nell'intorno del pozzo modifica le modalità con cui si esplica il flusso idrico sotterraneo. In conseguenza di detta depressione, infatti, alcune linee di flusso convergono verso il pozzo, alimentandolo, altre semplicemente deviano dalla propria traiettoria in condizioni indisturbate, proseguendo verso valle. Il passaggio dalle une alle altre linee di flusso costituisce lo spartiacque sotterraneo, assimilabile

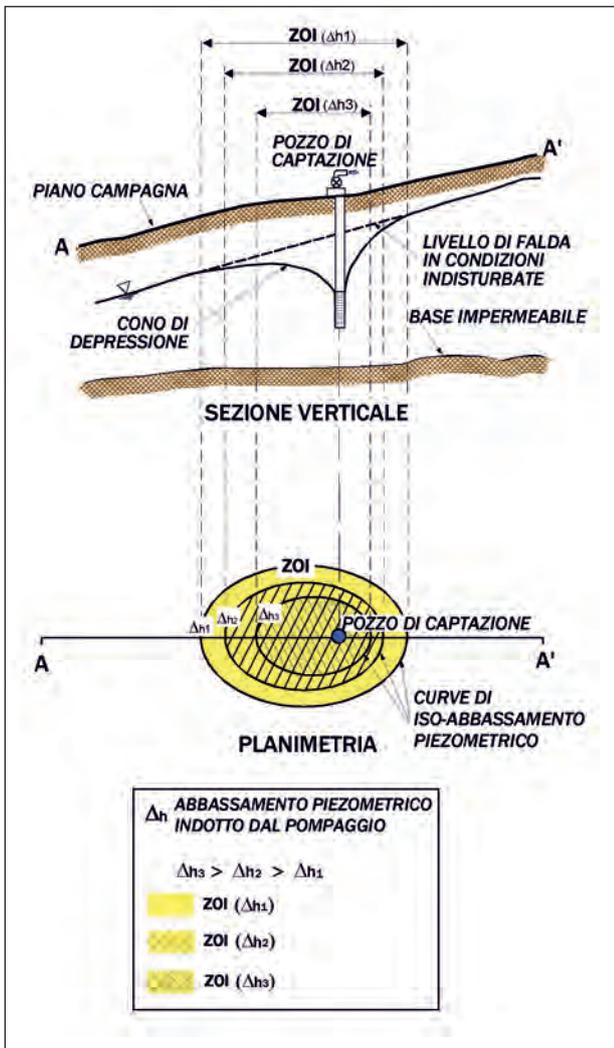


Fig. 10.5 - Cono di depressione della superficie di falda determinato da un pozzo in emungimento con indicazione di tre differenti aree di influenza (ZOI) corrispondenti a fissati valori di soglia della depressione piezometrica. - Cone of depression of the water table caused by a pumping well, showing the three different zones of influence (ZOI) corresponding to fixed threshold values of the piezometric drawdown.

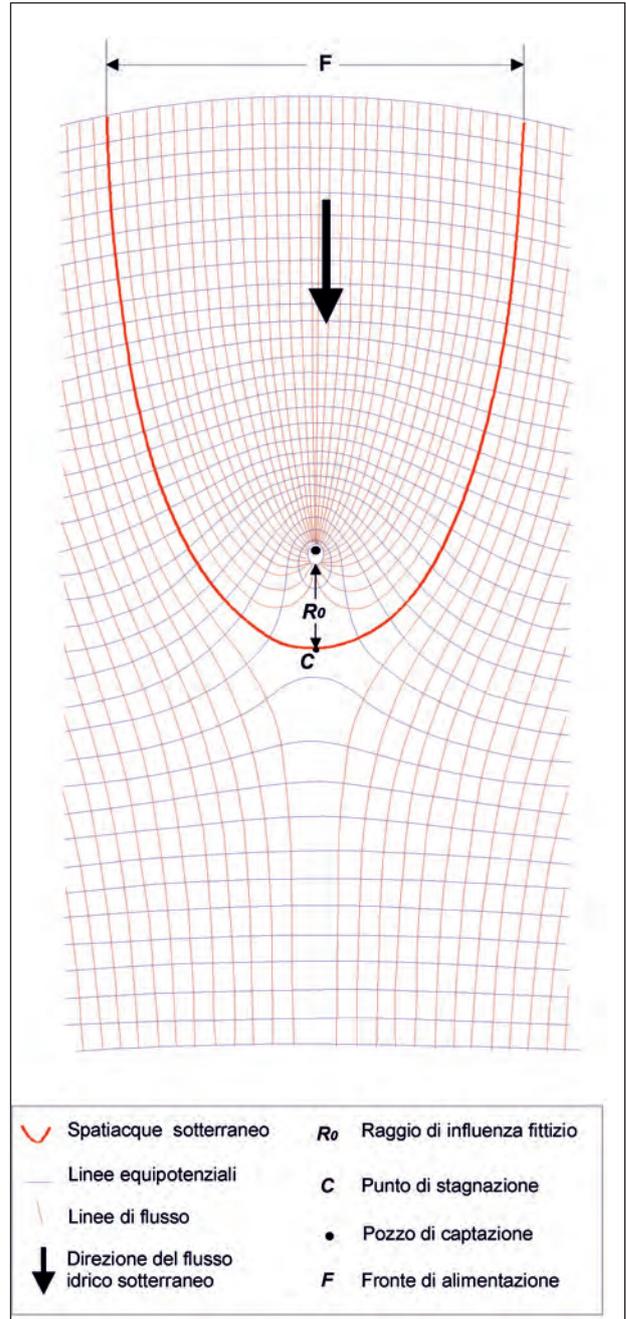


Fig. 10.6 - Reticolo di flusso in prossimità di un pozzo di captazione. - Flow net nearby a pumping well.

planimetricamente ad una parabola, il cui fuoco è occupato dal pozzo e il cui vertice (punto C), denominato punto di stagnazione, è caratterizzato dall'annullamento delle velocità di filtrazione. Si definiscono raggio di influenza fittizio o ridotto R_0 la distanza del punto di stagnazione dal pozzo di captazione, e fronte di alimentazione o di richiamo F l'ampiezza della parabola in direzione perpendicolare alla direzione del flusso (fig. 10.6).

Si possono definire pertanto, in prossimità del pozzo in emungimento, tre distinte aree:

- l'area di influenza (ZOI-Zone Of Influence);
- l'area di contribuzione (ZOC-Zone Of Contribution);
- l'area di trasporto (ZOT-Zone Of Transport).

Per "area di influenza" (ZOI) si intende la porzione di acquifero circostante il pozzo entro la quale il pompaggio determina un abbassamento Δh della superficie piezometrica che può ritenersi apprezzabile, superiore cioè ad un valore soglia preventivamente definito. Detta area è pertanto delimitata dalla curva di iso-abbassamento corrispondente a tale valore soglia (fig. 10.5). In un acquifero omogeneo ed isotropo, nell'ipotesi semplificativa di superficie piezometrica orizzontale in condizioni indisturbate, ovvero di gradiente idraulico dell'acquifero nullo, il cono di depressione è simmetrico rispetto all'asse del pozzo, e quindi l'area di influenza è circolare. Nella realtà, però, la superficie piezometrica non è orizzontale, ovvero l'acquifero è caratterizzato da un gradiente idraulico diverso da zero in virtù del quale si esplica il deflusso sotterraneo naturale. In detta condizione la pendenza del cono di depressione a monte è superiore a quella di valle, per cui ne risulta un'area di influenza asimmetrica rispetto al pozzo. L'asimmetria dell'area di influenza aumenta quindi all'aumentare del gradiente idraulico dell'acquifero.

Per "area di contribuzione" o di alimentazione o di cattura del pozzo (ZOC) si intende la porzione di acquifero entro la quale le linee di flusso convergono verso il pozzo, alimentandolo (fig. 10.7). Essa coincide approssimativamente con lo ZOI per bassi valori del gradiente idraulico. In dette condizioni, infatti, l'area entro cui l'abbassamento piezometrico assume un valore apprezzabili (ZOI) approssima l'area di alimentazione del pozzo (ZOC).

La delimitazione planimetrica di detta area, possibile attraverso l'applicazione di procedure analitiche o numeriche, risulta particolarmente importante ai fini della delimitazione delle aree di salvaguardia, in quanto solo nell'ambito di detta area l'acqua affluisce prima o poi al pozzo, sottraendosi al naturale deflusso verso valle. Nell'ambito di detta area vanno quindi apposti vincoli e limitazioni all'utilizzo del territorio per preservare la qualità

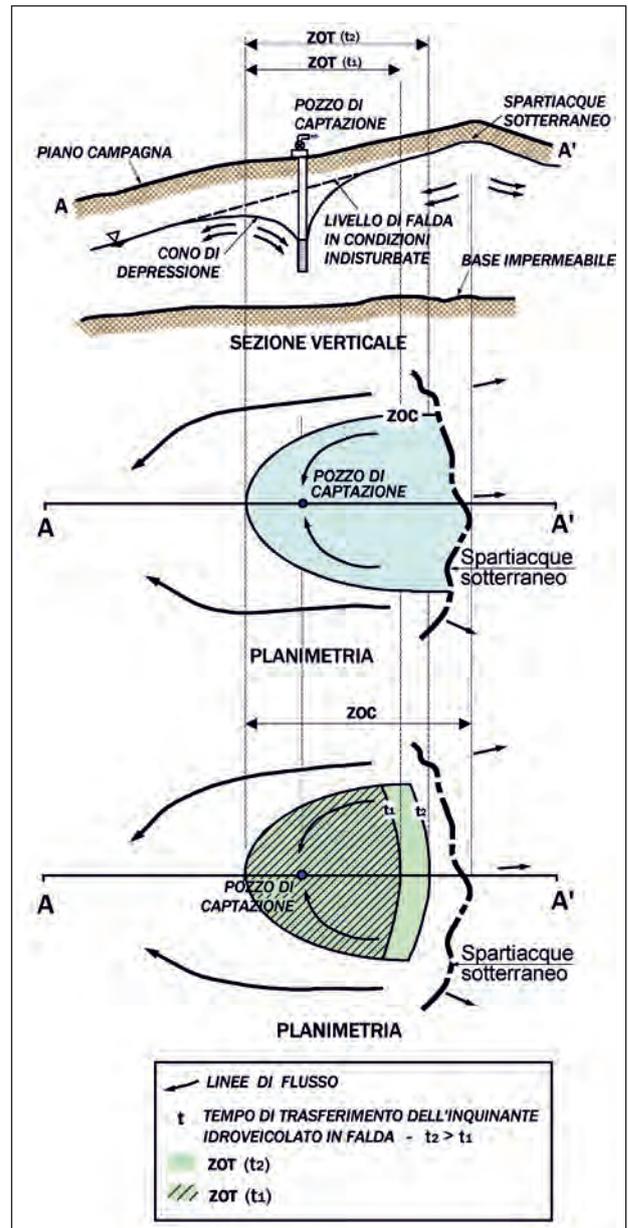


Fig. 10.7 - Cono di depressione determinato da un pozzo in emungimento con indicazione dell'area di alimentazione (ZOC) e dell'area di trasporto (ZOT) relativa a due diversi intervalli di tempo.

- Cone of depression produced by a pumping well, showing the zone of contribution (ZOC) and the zone of transport (ZOT) at two different time intervals.

delle acque destinate al consumo umano. La configurazione planimetrica della zona di alimentazione dipende dal valore del gradiente idraulico dell'acquifero: all'aumentare del gradiente, il raggio di influenza fittizio e il fronte d'alimentazione si riducono, e la ZOC assume una forma allungata in direzione monte-valle.

Per "area di trasporto" (ZOT) si intende la porzione di acquifero, circostante l'opera di captazione,

percorsa dalle particelle di un ipotetico inquinante idrovolato in falda in un intervallo di tempo assegnato, denominato tempo di trasferimento (fig. 10.7). Detta area risulta pertanto delimitata dal luogo dei punti caratterizzati da uguale tempo di trasferimento dell'inquinante in falda, detto isocrona. ZOT è, per definizione, sempre interna alla ZOC, ed è caratterizzata da un'ampiezza via via crescente all'aumentare del tempo di trasferimento dell'inquinante assunto per la sua delimitazione.

La valutazione del tempo di trasferimento di un inquinante dovrebbe a rigore essere effettuata tenendo conto di tutti i meccanismi e i processi implicati nel trasporto dell'inquinante stesso. Si osserva, infatti, che il trasporto di un soluto all'interno dell'acquifero saturo, avviene sia per advezione che per dispersione idrodinamica. Per effetto dell'advezione (o convezione) le particelle di soluto vengono trasportate dalla massa idrica in movimento lungo la direzione del moto, con velocità pari a quella media effettiva dell'acqua, v_e , data dalla nota relazione di Darcy:

$$v_e = [k]i/n \quad (10.1)$$

ove k è la conducibilità idraulica (m/s), i il gradiente (adimensionale) ed n la porosità efficace (adimensionale).

La dispersione idrodinamica si esplica invece attraverso la diffusione molecolare e la dispersione meccanica (par. 5.3). La diffusione molecolare è dovuta ai movimenti browniani che si verificano, sotto l'influenza dell'attività cinetica dei costituenti ionici o molecolari, nella direzione del gradiente di concentrazione, anche in assenza di moti dell'acqua. La dispersione meccanica è dovuta invece alla miscelazione meccanica del soluto, e può essere distinto in longitudinale e trasversale.

Altri processi, inoltre, intervengono durante il trasporto in falda dell'inquinante, quali i processi di adsorbimento, di degradazione chimico-fisica e di decadimento radioattivo.

10.2.2. - Criteri di delimitazione delle aree di salvaguardia

In materia di delimitazione delle aree di salvaguardia un documento di riferimento su scala internazionale è costituito dalle Linee Guida pubblicate dall'*Environmental Protection Agency* nel 1987: "Guide-

lines for delineation of wellhead protection areas" (EPA, 1987).

Tale documento individua cinque criteri per la delimitazione delle suddette aree, indicandone limiti e campi di applicazione:

- a) distanza dall'opera di captazione (*distance*);
- b) abbassamento del livello piezometrico indotto dal pompaggio (*drawdown*);
- c) tempo di trasferimento di un inquinante dalla sorgente di contaminazione all'opera di captazione (*time of travel*);
- d) limiti del flusso idrico sotterraneo (*flow boundaries*);
- e) capacità di assimilazione (*assimilative capacity*).

Il criterio della distanza dall'opera di captazione: esso prevede di individuare come area di salvaguardia un'area, circostante l'opera di captazione, di raggio arbitrario o calcolato mediante il cosiddetto "metodo del cilindro", sulla base cioè della portata emunta Q , di un tempo di trasferimento prefissato t , della porosità efficace dell'acquifero n e della lunghezza del tratto finestrato del pozzo H . A fronte di un'estrema semplicità applicativa ed economicità, tale criterio può condurre all'individuazione di limiti territoriali del tutto privi di significato, soprattutto nel caso di acquiferi eterogenei, anisotropi e caratterizzati da gradienti idraulici elevati, dal momento che esso prescinde completamente dai concetti fondamentali propri dell'idraulica dei pozzi. Esso, non garantendo un'efficace protezione delle risorse idriche sotterranee, è applicabile essenzialmente in una fase transitoria, in attesa di un più efficace dimensionamento delle aree da tutelare basato su specifici studi idrogeologici ed idraulici.

Il criterio dell'abbassamento del livello piezometrico indotto dal pompaggio: esso prevede di individuare come area di salvaguardia l'area di influenza del pozzo (ZOI) corrispondente ad un assegnato abbassamento piezometrico. L'adozione di tale criterio implica una stima accurata dei parametri idrogeologici dell'acquifero, quali trasmissività e coefficiente di immagazzinamento, l'assunzione di un valore soglia di abbassamento oltre il quale lo stesso è da ritenere trascurabile e l'individuazione dei valori di portata e di durata del pompaggio da assumere nel calcolo. Esso richiede quindi la determinazione di un maggior numero di parametri

idrogeologici rispetto al criterio della distanza precedentemente illustrato. Il criterio, tuttavia, risulta efficace solo in presenza di bassi valori di gradienti idraulici dell'acquifero, circostanza nella quale, come già accennato, l'area di influenza del pozzo ZOI coincide approssimativamente con l'area di alimentazione del pozzo stesso ZOC. In presenza di gradienti idraulici elevati l'applicazione del criterio condurrebbe infatti ad un eccessivo sovradimensionamento dell'area di salvaguardia a valle del pozzo e ad un sottodimensionamento a monte, con la conseguenza, da un lato, di apporre vincoli superflui a valle, dall'altro di non proteggere adeguatamente il pozzo dalle sostanze inquinanti provenienti da monte.

Sia il criterio della distanza sia quello dell'abbassamento del livello piezometrico non considerano le effettive velocità di filtrazione, per cui non risulta possibile stabilire l'intervallo di tempo entro il quale un inquinante intercettato in corrispondenza del perimetro dell'area di salvaguardia possa raggiungere il pozzo in emungimento. Essi non consentono quindi una efficace applicazione della protezione dinamica.

Il criterio del tempo di trasferimento: esso prevede di individuare come area di salvaguardia l'area di trasporto (ZOT) corrispondente ad un assegnato tempo di trasferimento di un inquinante dalla sorgente di contaminazione all'opera di captazione. Il criterio risulta essere scientificamente valido ed efficace in quanto basato sull'effettiva velocità di trasporto di un inquinante, la determinazione della quale necessita la modellazione dei processi di flusso e trasporto e dunque la raccolta di un gran numero di dati relativi alle condizioni di alimentazione e drenaggio dell'acquifero, ai suoi limiti al contorno, ai suoi parametri idrogeologici ed idrodispersivi, e ad eventuali fattori di ritardo e costanti di decadimento specifici dell'inquinante, rappresentativi dei fenomeni di adsorbimento e degradazione dell'inquinante stesso.

L'applicazione rigorosa del criterio, tenendo conto di tutti i meccanismi e processi implicati nel trasporto in falda di un soluto, risulta però alquanto complessa. Nell'ambito della perimetrazione delle aree di salvaguardia è pratica comune, pertanto, trascurare, nell'applicazione del criterio,

il meccanismo di dispersione idrodinamica ed i processi di adsorbimento, degradazione e decadimento, assumendo dunque cautelativamente le ipotesi di inquinante conservativo e di trasporto per sola advezione. Tali assunzioni semplificative possono essere adottate al fine di assegnare alla perimetrazione delle aree di salvaguardia una valenza generale, indipendente dalla componente inquinante, e di superare al tempo stesso le difficoltà connesse con la determinazione dei parametri specifici dell'inquinante.

Il criterio del tempo di trasferimento, nella sua formulazione rigorosa, può trovare invece applicazione nella delimitazione dell'area di influenza dei centri di pericolo, ovvero nella definizione della distanza entro la quale questi ultimi possono far risentire, in modo significativo, i propri effetti, attraverso la presenza di inquinanti in concentrazione superiore ad una soglia ammissibile.

Il criterio dei limiti del flusso idrico sotterraneo: esso prevede di individuare come area di salvaguardia l'intera area di alimentazione del pozzo (ZOC). L'applicazione di detto criterio richiede l'individuazione di tutti i limiti idrogeologici, intesi come elementi (stratigrafici, tettonici, geomorfologici) che condizionano la circolazione idrica sotterranea, e conduce in molti casi ad un sovradimensionamento dell'area di salvaguardia, attraverso una metodologia spesso soggettiva e non sempre pienamente determinata.

Dal momento che la perimetrazione delle aree di salvaguardia comporta l'adozione di vincoli che penalizzano l'uso pubblico e privato del territorio e delle risorse idriche in esso contenute, con un onere sociale ed economico non indifferente, il suddetto criterio è applicabile qualora il sovradimensionamento risulti accettabile, ossia nei casi di distanza ridotta tra la captazione e i limiti del flusso, o, in alternativa, quando si sia dimostrato su base scientifica l'inapplicabilità nel singolo contesto idrogeologico degli altri criteri.

Il criterio della capacità di assimilazione: esso prevede di individuare come area di salvaguardia la porzione di territorio circostante l'opera di captazione necessaria affinché avvenga una attenuazione del carico inquinante. Si osservi, infatti, che una sostanza inquinante rilasciata in superficie subisce

un processo di attenuazione sia nella porzione insatura, per effetto della capacità autodepurante del terreno, sia nella porzione satura, per effetto dei meccanismi di dispersione e diffusione e dei processi di adsorbimento, degradazione e decadimento che intervengono durante il trasporto in falda. Il criterio comporta o l'introduzione di un fattore di ritardo, variabile in funzione della tipologia di contaminante, oppure l'assegnazione a priori della concentrazione che si considera accettabile al pozzo, e quindi l'utilizzo di modelli di trasporto dei soluti per calcolare la distanza al di là della quale la concentrazione massima ammessa viene oltrepassata (GORLA, 2005). L'applicazione di tale criterio risulta complessa in quanto richiede l'introduzione di un gran numero di fattori specifici sia dell'acquifero sia dell'inquinante in esame, e la conoscenza del preciso istante in cui è avvenuta la contaminazione. Tale criterio, particolarmente efficace in presenza di contaminazioni prodotte in superficie (ad es. sversamenti accidentali), è utilizzabile in caso di una sola tipologia di carico inquinante, data la difficoltà di definire le caratteristiche chimico-fisiche dell'acquifero in presenza di contaminazione multipla.

10.2.3. - *Criteri di delimitazione delle aree di salvaguardia secondo la normativa italiana*

Abbiamo visto nei paragrafi precedenti i numerosi metodi atti, allorché con diverso grado di approssimazione, alla perimetrazione delle aree di salvaguardia, con i relativi campi e limiti di applicabilità. La scelta del metodo più idoneo per ogni particolare contesto idrogeologico e le relative attività da svolgere per la sua corretta applicazione, sono il primo passo verso la effettiva soluzione di una problematica così complessa. A tal riguardo le attuali normative nazionali non forniscono chiare indicazioni, lasciando alla sensibilità del singolo operatore detta scelta.

Il primo tentativo su scala nazionale di mettere ordine in questa materia risale a circa 10 anni fa, quando venivano pubblicate, sulla Gazzetta Ufficiale n. 2 del 03.01.2003 le "Linee Guida per la tutela delle acque destinate al consumo umano e criteri generali per l'individuazione delle aree di sal-

vaguardia di cui all'art. 21 del decreto legislativo 11 Maggio 1999 n. 152". Dette Linee Guida facevano dunque esplicito riferimento al D.Leg. 152/1999, oggi sostituito dall'attuale dl. 152/2006, che però è sostanzialmente immutato nelle parti riguardanti la definizione delle aree di salvaguardia.

I criteri generali per l'individuazione delle aree di salvaguardia considerati dalle Linee Guida del 2003 sono:

- il criterio geometrico, che si può far corrispondere al criterio della distanza dall'opera di captazione individuato dall' EPA;
- il criterio temporale, che si può far corrispondere al criterio del tempo di trasferimento di un inquinante dalla sorgente di contaminazione all'opera di captazione individuato dall' EPA, nell'ipotesi che il trasporto avvenga per sola advezione;
- il criterio idrogeologico, che si può far corrispondere al criterio dei limiti del flusso idrico sotterraneo dell'EPA.

Esse prevedono, in particolare, che la zona di tutela assoluta venga delimitata attraverso l'applicazione del criterio geometrico, la zona di rispetto (ristretta ed allargata) attraverso l'applicazione del criterio temporale o, in presenza di condizioni idrogeologiche di particolare complessità, del criterio idrogeologico, mentre la zona di protezione attraverso l'applicazione del criterio idrogeologico.

Il criterio geometrico si basa sul concetto di distanza dall'opera di captazione. A fronte di un'estrema semplicità applicativa ed economicità, abbiamo visto che tale criterio può condurre all'individuazione di limiti territoriali del tutto privi di significato, soprattutto nel caso di acquiferi eterogenei, anisotrope, caratterizzati da gradienti idraulici elevati, dal momento che esso prescinde completamente dai concetti fondamentali propri dell'idraulica dei pozzi. Esso dunque non garantisce un'efficace protezione delle risorse idriche sotterranee, ed è applicabile essenzialmente in una fase transitoria, in attesa di un più efficace dimensionamento delle aree da tutelare basato su specifici studi idrogeologici, in accordo con quanto previsto dalle Linee Guida del 2003. A tal riguardo si fa notare che le Linee Guida non considerano il criterio dell'abbassamento piezometrico individuato dall'EPA. Si fa però osservare che detto criterio potrebbe es-

sere utilizzato per le perimetrazioni provvisorie della zona di rispetto in luogo di quello geometrico.

Il criterio temporale si basa sul concetto di tempo di sicurezza, attraverso il quale è possibile tracciare la curva isocrona per integrazione del campo di velocità di filtrazione. Se si ipotizza che l'inquinante si sposti all'interno del mezzo saturo dell'acquifero per sola advezione, come per altro espressamente richiesto dalle Linee Guida del 2003, il suo tempo di arrivo all'opera di captazione, partendo dal perimetro dell'isocrona, sarà pari proprio al tempo di sicurezza. La durata del tempo di sicurezza è quindi legata al tempo necessario per ricorrere ad un approvvigionamento idrico alternativo e/o adottare misure di disinquinamento o contenimento del plume inquinante.

Il criterio idrogeologico si basa sulle peculiarità idrogeologiche del sistema acquifero e sul riconoscimento dei suoi limiti fisici. Si rende a tal fine necessario determinare l'estensione dell'acquifero e la sua struttura geologica, definire i rapporti esistenti tra acque superficiali e le acque sotterranee, tra eventuali acquiferi superficiali e profondi, e definire il bacino idrico sotterraneo. La corretta applicazione del criterio idrogeologico richiede, infatti, l'acquisizione di un gran numero di dati per la stesura di diverse carte tematiche (geologica, idrogeologica, geomorfologica, idrochimica) la cui valutazione congiunta ed interpretazione da parte di tecnici specializzati in materia consentono di trasporre il criterio in metodo operativo, giungendo a delimitare concretamente le aree di salvaguardia. Il livello di dettaglio con cui tali dati devono essere acquisiti deve essere necessariamente elevato se il fine ultimo è quello di delimitare le aree di rispetto e non le aree di protezione, per le quali invece il criterio idrogeologico trova una sua naturale collocazione in base alle già citate Linee Guida. L'applicazione del criterio idrogeologico può portare, infatti, a far coincidere le aree di salvaguardia con la porzione di acquifero alimentante il pozzo, attraverso l'individuazione dei limiti fisici ed idrogeologici dell'acquifero stesso (spartiacque, bordi impermeabili). La sua applicazione nella perimetrazione delle zone di rispetto dei pozzi comporta spesso un loro notevole sovradimensionamento, con la conseguente apposizione di vincoli inutili

sull'uso del territorio, e ciò in modo particolare nel contesto idrogeologico pugliese, a causa delle difficoltà connesse con la determinazione dei limiti fisici dell'acquifero e delle zone di alimentazione. L'applicazione del criterio risulta poi spesso soggettiva, non essendo basata su elementi di dimensionamento univoci ed in assenza di chiare guide tecniche e metodologiche da seguire.

Il criterio idrogeologico, nel contesto regionale pugliese caratterizzato da acquiferi presentanti una notevole estensione areale, comporterebbe, per altro, problemi non solo in fase di perimetrazione delle aree di salvaguardia, ma anche in fase di effettiva gestione delle stesse, nell'ottica di una protezione dinamica, ad integrazione di quella statica, che consenta periodicamente, attraverso la predisposizione di una fitta rete di monitoraggio, il controllo della qualità delle acque sotterranee destinate al consumo umano e l'eventuale aggiornamento della perimetrazione delle aree di rispetto a seguito di variazioni intervenute nel tempo.

10.2.4. - *Gli studi di delimitazione delle aree di salvaguardia condotti in ambito regionale*

È da rilevare che attualmente la Regione Puglia non ha ancora provveduto, in maniera concreta, alla delimitazione definitiva delle aree di salvaguardia e all'applicazione dei relativi vincoli, nonostante il lungo tempo trascorso dall'emanazione del D.P.R. 236/1988 e nonostante detta delimitazione fosse stata individuata quale obiettivo di priorità assoluta già nell'ambito della Variante al Piano Regolatore Generale degli Acquedotti del 1992.

In assenza di detta delimitazione si considerano provvisoriamente come zone di rispetto le aree circolari circostanti l'opera di captazione di raggio pari ad un minimo di 200 metri.

Nell'ambito del territorio regionale le difficoltà connesse alla caratterizzazione idrogeologica su scala locale, in un intorno adeguato dell'opera di presa, derivanti sia dal disordine idraulico vigente sia dalla diffusa presenza di acquiferi carbonatici fratturati e carsicizzati per i quali l'eterogeneità e l'anisotropia variano fortemente nello spazio, hanno per anni ritardato l'applicazione della normativa nazionale in materia di protezione delle

acque destinate al consumo umano, ostacolando la concreta delimitazione delle aree di salvaguardia in parola.

Un primo tentativo di delimitazione delle aree di salvaguardia dei pozzi potabili è stato condotto nell'ambito di una apposita convenzione, conclusasi nel dicembre 1997, tra Regione Puglia e Politecnico di Bari (Dipartimento di Ingegneria delle Acque - Istituto di Geologia Applicata e Geotecnica, responsabili scientifici i Proff. M. Ranieri e V. Cotecchia). In tale occasione la Regione incaricava il Politecnico di eseguire "Studi ed indagini finalizzati all'individuazione delle aree di salvaguardia delle risorse idriche sotterranee destinate all'uso potabile nella Regione Puglia". Le indagini venivano focalizzate in corrispondenza di specifiche aree del territorio regionale (Valenzano (BA), Monopoli (BA), Corigliano d'Otranto (LE) e Galatone (LE)), rappresentative degli acquiferi cretacei della Murgia e del Salento. In corrispondenza delle quattro aree venivano delineati i lineamenti stratigrafici e strutturali e veniva condotto uno studio idrogeologico adeguato.

Il criterio di perimetrazione utilizzato nell'ambito dello studio è stato quello temporale, che presuppone la schematizzazione matematica dei processi di flusso idrico e di trasporto, allo scopo di ricostruire, una volta fissate le condizioni al contorno e individuate le caratteristiche geoidrologiche del territorio in esame, il reticolo di flusso relativo alla situazione in esame. La schematizzazione in parola è stata operata con il metodo del "poroso equivalente", mediante l'ausilio del codice di calcolo numerico SUTRA.

Lo studio eseguito è pervenuto ad un risultato concreto in termini di delimitazione delle zone di rispetto solo per le aree di Valenzano e Monopoli, caratterizzate da una qualità e una quantità di dati tale da consentire un'adeguata caratterizzazione idrogeologica dell'acquifero. Per le aree di Corigliano d'Otranto e Galatone i dati disponibili non risultavano idonei ad effettuare un'attendibile ricostruzione della superficie piezometrica della falda profonda, impedendo di fatto l'esecuzione di qualsiasi studio di perimetrazione delle zone di rispetto.

Allo studio citato ha fatto seguito, in ambito CNR-CERIST (Consiglio Nazionale delle Ricer-

che Centro di Studio sulle Risorse Idriche e la Salvaguardia del Territorio), la redazione di cartografie della vulnerabilità intrinseca degli acquiferi nelle aree pilota di Valenzano (COTECCHIA *et alii*, 1999) e Corigliano d'Otranto (COTECCHIA *et alii*, 2000).

Le problematiche riguardanti la definizione della Vulnerabilità e la perimetrazione delle aree di salvaguardia relativamente al distretto estrattivo di Valenzano, ed in particolare in un'area ricadente anche nel comune di Casamassima, sono state poi riprese nell'ambito del "Progetto Integrato per la Salvaguardia del Territorio" finanziato dalla Fondazione CARIPOLO e dal Dipartimento di Progettazione e Gestione dei Sistemi Agro-Zootecnici e Forestali dell'Università degli Studi di Bari (COTECCHIA *et alii*, 2007). Detto lavoro fornisce un contributo metodologico per la corretta perimetrazione della zona di rispetto dei pozzi in un'area rappresentativa dell'acquifero murgiano, oltre che riproporre le modalità con cui è stata redatta la relativa Carta della Vulnerabilità, e ciò a partire dai risultati raggiunti negli studi precedentemente svolti. Stante l'importanza dell'argomento trattato, i risultati raggiunti in detto progetto di ricerca saranno illustrati nel paragrafo successivo, mentre la Tavola 6 allegata riporta la Carta della vulnerabilità dell'area pilota di Casamassima-Valenzano, opportunamente rielaborata ed aggiornata. Nel paragrafo 15.14 sarà invece affrontato il problema della perimetrazione delle aree di salvaguardia in un'area costiera della Murgia, ossia del distretto estrattivo di Monopoli - Polignano a Mare ed infine, nel paragrafo 18.5, saranno affrontate le problematiche riguardanti la definizione della Vulnerabilità e la perimetrazione della zona di rispetto dei pozzi potabili per l'area pilota di Corigliano d'Otranto.

10.3. - VULNERABILITÀ ALL'INQUINAMENTO E DELIMITAZIONE DELLE AREE DI SALVAGUARDIA NEL DISTRETTO ESTRATTIVO DI CASAMASSIMA-VALENZANO (AREA IDROGEOLOGICA DELLA MURGIA)

L'analisi delle problematiche inerenti la definizione della vulnerabilità intrinseca e la perimetrazione delle aree di salvaguardia delle opere di captazione potabili nell'area murgiana di Casamas-

sima - Valenzano (BA) (fig. 10.8) presenta notevole interesse stante l'importanza della stessa ai fini dell'approvvigionamento idropotabile della regione e le conoscenze generali ivi già acquisite nell'ambito di studi pregressi in merito alle caratteristiche geologiche ed idrogeologiche (COTECCHIA *et alii*, 2007), che ha consentito di tracciare un percorso metodologico di validità generale.

Le incertezze insite nell'assunzione di tutti i parametri di *input* necessari per la perimetrazione delle aree di salvaguardia ha suggerito lo sviluppo di analisi parametriche, illustrate in questo paragrafo, finalizzate ad individuare i principali parametri idrogeologici che in futuro sarà necessario ricercare con il dovuto grado di approfondimento.

10.3.1. - *Inquadramento geologico e idrogeologico*

Il distretto estrattivo di Casamassima – Valenzano ricade nell'area idrogeologica della Murgia, costituita da rocce carbonatiche cretacee della piattaforma apula (parr. 1.2, 15.1). Lungo i bordi della Murgia ed in talune limitate aree interne affiorano, in trasgressione sul substrato carbonatico, depositi clastici plio-pleistocenici. Nell'area di Casamassima-Valenzano, in particolare, il substrato carbonatico è rappresentato dal Calcarea di Bari, mentre i depositi plio-pleistocenici si identificano con la Calcarenite di Gravina e le Argille

di Rutigliano.

La Murgia presenta una morfologia prettamente tabulare, caratterizzata da una serie di vasti ripiani che si ribassano verso mare per il tramite di scarpate, a luoghi alquanto ripide e a luoghi poco acclivi, alte poche decine di metri.

Per quanto attiene all'idrogeologia, la Murgia costituisce un ampio e potente acquifero costiero con sede nelle rocce calcaree e calcareo-dolomitiche del Mesozoico (cap. 15). La circolazione idrica sotterranea si esplica in pressione, eccetto lungo una ristretta fascia costiera.

Da precedenti studi condotti (COTECCHIA *et alii*, 1999a, 1999b) risulta che nell'area di Casamassima - Valenzano l'acquifero profondo, avente sede nelle rocce calcaree e calcareo-dolomitiche del Mesozoico, è frazionato in numerosi livelli, in conseguenza della variabilità dello stato di fratturazione e carsismo. La porzione di ammasso roccioso posta a monte, ricadente nei settori SE e SW, altimetricamente più elevati, presenta una frequenza di orizzonti fratturati inferiore rispetto alla porzione a valle (settori NW e NE) dell'area esaminata. Inoltre si riscontra un aumento della fratturazione in direzione SE-NW, lungo la quale sembra aumentare anche la conducibilità idraulica (tav. 3, allegata al volume).

La variabilità dello stato di fratturazione e carsismo condiziona il deflusso idrico sotterraneo,

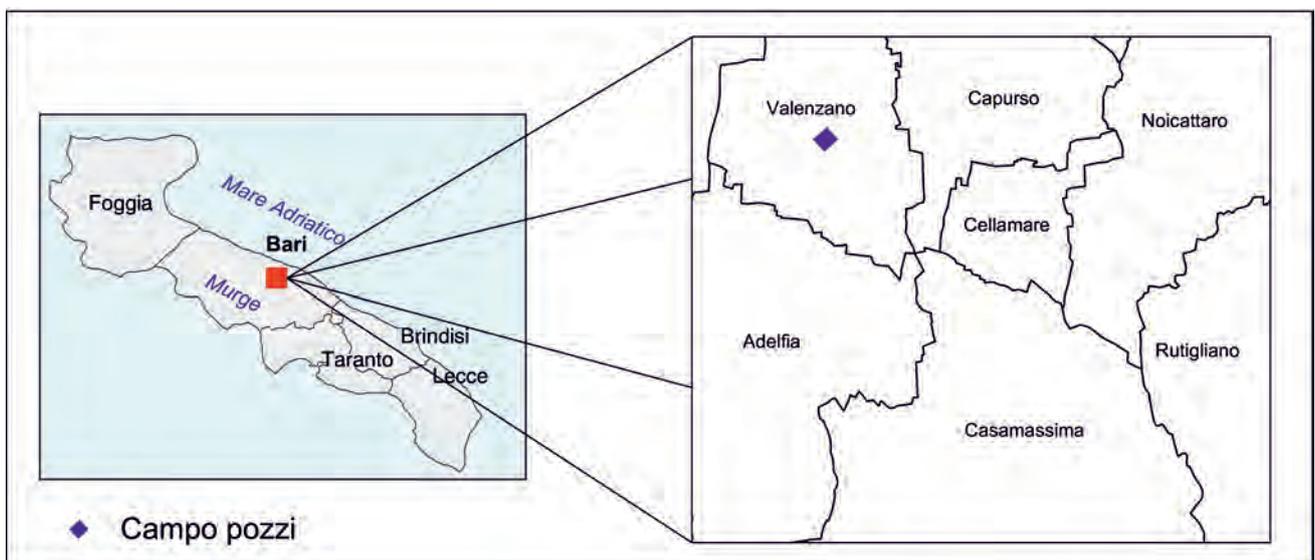


Fig. 10.8 - Area pilota di Casamassima-Valenzano.
- *Pilot area of Casamassima-Valenzano.*

che si esplica secondo due principali direzioni (tav. 6, allegata al volume): la prima, S-N devia nei pressi di Adelfia, verso NE, seguendo l'ipotetico asse Adelfia-Capurso; la seconda, SW-NE ad est di Casamassima, successivamente devia verso NW. È plausibile che, nella porzione centrale dell'area esaminata, nei dintorni di Casamassima, si risenta di un condizionamento strutturale che si sviluppa secondo l'asse N-S e che, nei quadranti SW e SE dell'area, funge da spartiacque sotterraneo. Lungo la fascia di territorio che congiunge Valenzano, Capurso e Noicattaro, topograficamente meno elevata, le due linee di flusso principali si uniscono e corrono perpendicolarmente alla linea di costa.

I valori della conducibilità idraulica sono compresi tra 10^{-4} e 10^{-3} cm/s, con valore medio di $1,23 \times 10^{-3}$ cm/s. Le velocità di filtrazione, misurate con l'utilizzo di traccianti, sono comprese tra 0,06 e 5,20 m/g, crescenti nel passare dalla zona topograficamente più elevata a quella meno. Inoltre, frequentemente, si sono riscontrate correnti verticali dirette dall'alto verso il basso, favorite dall'interconnessione di più livelli idrici conseguenti alla perforazione.

La presenza di livelli rocciosi fratturati e carsificati a varie altezze stratigrafiche, variamente intersecantesi, rende l'acquifero quanto mai vulnerabile all'eventuale rilascio in superficie di sostanze inquinanti.

10.3.2. - Valutazione della vulnerabilità dell'acquifero all'inquinamento

La valutazione della vulnerabilità intrinseca dell'acquifero in corrispondenza dell'area pilota di Casamassima-Valenzano è stata effettuata attraverso l'applicazione del metodo SINTACS, che ha condotto alla redazione della Carta della Vulnerabilità integrata dell'acquifero all'inquinamento in scala 1:25000, secondo quanto riportato in COTECCHIA *et alii*, 1999b, e rielaborata in occasione del presente progetto di ricerca (tav. 6, allegata al volume). Dall'esame di detta Carta risulta che la vulnerabilità dell'acquifero murgiano in corrispondenza dell'area pilota di Valenzano è alquanto variabile. La vulnerabilità è alta in gran parte del territorio indagato e tende ad aumentare nel settore centro-settentrionale, raggiungendo il

valore massimo in corrispondenza di due soli punti coincidenti con delle doline. L'incremento di vulnerabilità nella porzione centro-settentrionale dell'area pilota è legato prevalentemente alle locali condizioni idrodinamiche dell'acquifero, in quanto attribuibile al parametro Tipologia dell'Acquifero contemplato nel metodo SINTACS (par. 10.1). Mediamente vulnerabile risulta, invece, l'acquifero in corrispondenza dei principali centri abitati.

10.3.3 - Delimitazione delle aree di salvaguardia delle opere di captazione potabile

Per la delimitazione delle zone di rispetto dei pozzi potabili l'attenzione è stata focalizzata su un singolo campo pozzi, sino in agro di Valenzano, composto da 4 pozzi di estrazione di proprietà dell'Acquedotto Pugliese, indicati con le sigle E17, E18, E19 e E20 (fig. 10.9). Detti pozzi sono caratterizzati da una portata di esercizio rispettivamente pari a 15.5 l/s, 16 l/s, 14.5 l/s e 23 l/s, per un totale di 69 l/s (fonte AQP, 2005). Sulla base di dati recenti risulta che detti pozzi sono solo occasionalmente attivati dall'AQP.

Dalle stratigrafie risulta che detti pozzi, profondi rispettivamente 330 m, 370 m, 340 m e 302 m dal piano campagna (quota piano campagna=100 m s.l.m.), sono rivestiti, con tubo presumibilmente cieco, nel tratto iniziale di lunghezza 200 m, senza cementazione dell'intercapedine tra le pareti del foro e il tubo di rivestimento (fig. 10.10). Il livello statico misurato nell'ottobre 1988 lungo le colonne idriche di detti pozzi si è attestato a circa 28 m s.l.m.

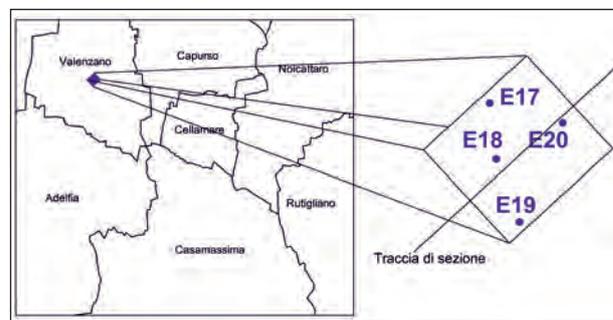


Fig. 10.9 - Ubicazione del campo pozzi appartenente al distretto estrattivo di Casamassima-Valenzano dell'Acquedotto Pugliese.

- Location of the well field belonging to the pumping district of Casamassima-Valenzano of the Apulian Aqueduct.

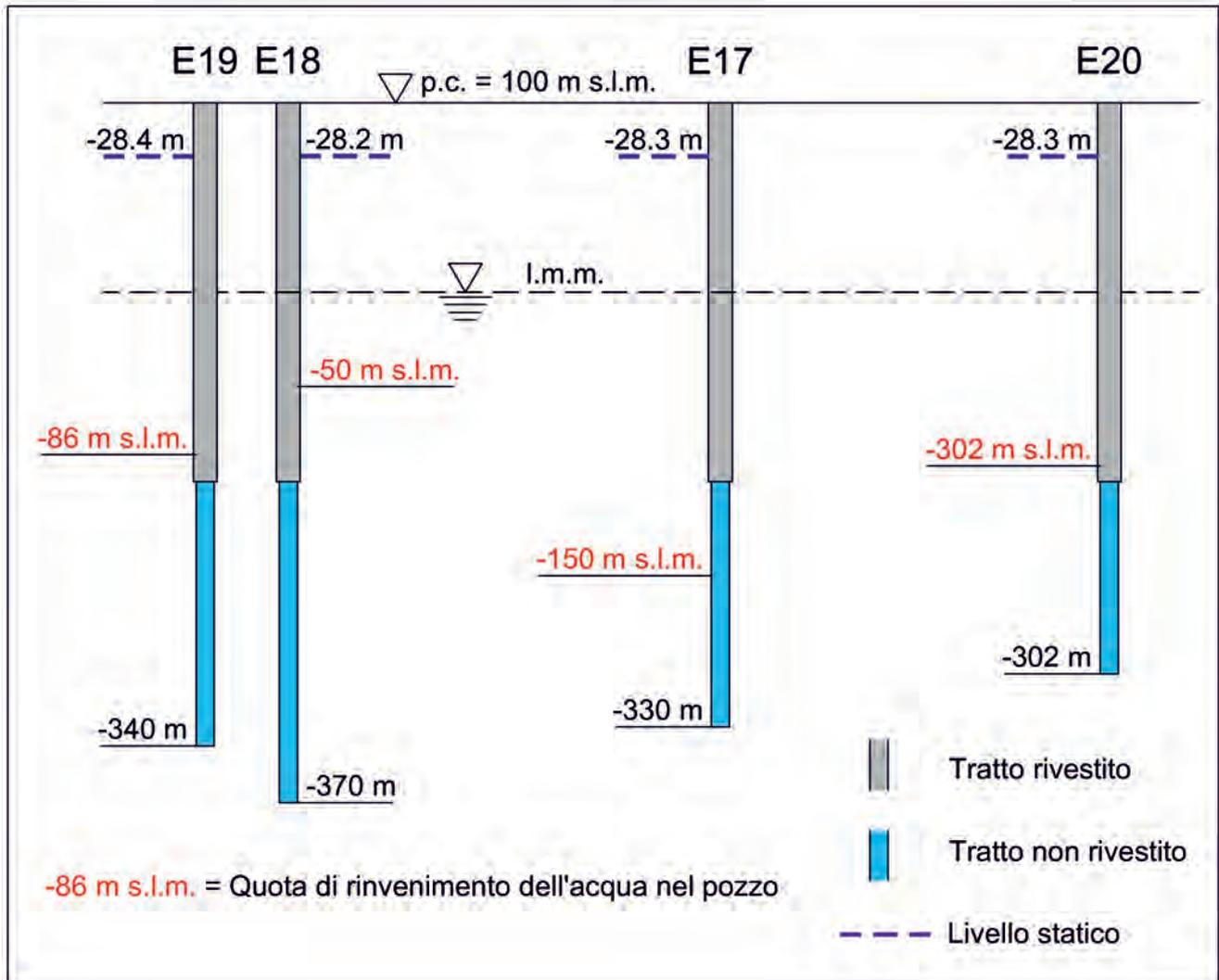


Fig. 10.10 - Schematizzazione dei quattro pozzi AQP desunta dalle stratigrafie, in corrispondenza della sezione verticale la cui traccia è indicata in figura 10.9.
 - Sketch of four AQP wells, as from the borehole logs, at the section shown in figure 10.9.

10.3.3.1. - Caratterizzazione idraulica dell'acquifero

La caratterizzazione del sistema acquifero costituisce un passo fondamentale essendo esso propedeutico sia alla scelta sia alla successiva applicazione del criterio di delimitazione delle zone di rispetto dei pozzi potabili. Nel caso di acquiferi permeabili fondamentalmente per carsismo e/o fratturazione è necessario valutare, in primo luogo, se il mezzo è assimilabile, alla scala del problema di studio, ad un mezzo poroso equivalente, avvalendosi dei criteri di valutazione già descritti al paragrafo 2.2. Nel caso in esame, secondo quanto dettagliatamente descritto in COTECCHIA *et alii*, 2007, risulta che:

- le prove di portata eseguite in regime permanente forniscono legami portata/depressione lineari per un ampio intervallo di portata e nella maggior parte dei pozzi;
- la distribuzione spaziale dei coefficienti di permeabilità dell'acquifero risulta essere log - normale;
- i carotaggi multiparametrici evidenziano una uniformità nella distribuzione delle caratteristiche chimico-fisiche dell'acqua di falda, confermata dai risultati delle analisi chimiche di laboratorio;
- la distribuzione dei carichi piezometrici risulta regolare;
- le velocità di filtrazione misurate con il metodo del tracciante in pozzo singolo (par. 9.3) indicano condizioni di moto laminare.

La valutazione congiunta dei diversi indicatori del comportamento idrodinamico dell'acquifero conduce, quindi, ad ipotizzare che le numerose fratture dell'ammasso roccioso siano tra loro intimamente collegate a formare una rete di drenaggio alquanto diffusa e ben distribuita, almeno alla scala di un adeguato volume elementare rappresentativo (REV, par. 2.2). In tale contesto, le locali condizioni di carsificazione e fratturazione dell'ammasso non influenzano in modo singolare le modalità con cui si esplica la circolazione idrica sotterranea, che pertanto possono essere assimilate, con sufficiente approssimazione, a quelle tipiche degli acquiferi porosi.

I dati disponibili, pur essendo sufficienti a dimostrare l'equivalenza dell'acquifero fratturato ad uno poroso, non sono tuttavia idonei a caratterizzare in modo completo l'acquifero dal punto di vista idraulico per la perimetrazione delle aree di salvaguardia. Le prove di portata eseguite sui pozzi disponibili hanno consentito di determinare, secondo quanto verrà più avanti specificato, il coefficiente di permeabilità dell'acquifero, da ritenere però valido solo in un intorno del pozzo. Dette prove sono inoltre di incerta interpretazione, e ciò a causa della non perfetta conoscenza delle caratteristiche costruttive dei pozzi. Non sono disponibili prove che consentano di determinare la porosità efficace dell'acquifero. Incertezze permangono inoltre sulla distribuzione dei carichi piezometrici, di fatto non nota se non con riferimento alle indagini eseguite negli anni '90 (par. 10.2.3). Detti parametri idrogeologici saranno quindi oggetto di un'analisi parametrica.

10.3.3.2. - Scelta del criterio di delimitazione delle zone di rispetto dei pozzi

L'ipotesi di assimilabilità dell'acquifero fratturato e carsico dell'area pilota di Casamassima-Valenzano ad un mezzo poroso equivalente, ha condotto alla scelta del criterio temporale ai fini della delimitazione delle zone di rispetto dei pozzi ad uso potabile.

La scelta di detto criterio, tra i due suggeriti dalle Linee Guida per la delimitazione definitiva delle aree di rispetto, ossia il criterio temporale ed il criterio idrogeologico, è in generale da preferire, consentendo esso di pervenire ad una efficace e razionale

tutela delle risorse idriche sotterranee, attraverso una obiettiva perimetrazione della zona di rispetto. Nel caso in esame, l'applicazione del criterio idrogeologico sarebbe, infatti, particolarmente complessa in virtù essenzialmente della grande estensione dell'acquifero oggetto di studio e delle difficoltà insite nella definizione dei limiti idrogeologici dello stesso. Le difficoltà sarebbero, per altro, accentuate dal carattere prevalentemente confinato dell'acquifero oggetto di studio; tale carattere implica l'alimentazione dell'acquifero a grande distanza dall'area in esame, ovvero in corrispondenza delle zone più interne della Murgia, lì dove i calcari fratturati e carsicizzati sono prevalentemente affioranti, e conseguentemente rende necessaria l'esecuzione di indagini su vasta scala, che comporterebbero sicuramente costi elevatissimi.

D'altra parte, l'applicazione del criterio idrogeologico in presenza di una conoscenza non approfondita sulla struttura idrogeologica, basata ad esempio sulle informazioni attualmente disponibili e riassunte nella Carta della Vulnerabilità, potrebbe condurre ad un eccessivo sovradimensionamento delle aree di rispetto, inaccettabile ai fini pratici in quanto estremamente penalizzante per l'utilizzo del territorio e lo sviluppo socio-economico dello stesso.

10.3.3.3. - Modellazione del flusso idrico sotterraneo in condizioni di moto bidimensionali

Una volta selezionato il criterio temporale si è proceduto a definire il "tempo di sicurezza", in riferimento al quale individuare le traiettorie percorse da un ipotetico inquinante idroveicolato in falda, nell'ipotesi cautelativa che il trasporto avvenga per sola advezione, ovvero che la velocità dell'inquinante sia uguale a quella dell'acqua.

Il percorso metodologico è proseguito poi con l'applicazione del criterio attraverso l'implementazione di codici di calcolo numerici di riconosciuta affidabilità, applicabili ai mezzi porosi: in particolare, il codice MODFLOW (MCDONALD & HARBAUGH, 1988), per la modellazione del flusso idrico sotterraneo, e il codice MODPATH (POLLOCK, 1994), correlato al MODFLOW, per il successivo tracciamento delle traiettorie delle par-

ticelle e quindi dell'individuazione dell'isocrona relativa al tempo di sicurezza assunto.

La modellazione del flusso idrico sotterraneo è stata condotta in regime stazionario, inizialmente in condizioni bidimensionali (simulazione base bidimensionale), cui ci si riferisce in questo paragrafo, poi in condizioni tridimensionali (simulazione base tridimensionale), secondo quanto verrà illustrato nel paragrafo successivo.

Le condizioni bidimensionali costituiscono condizioni limite di comportamento in quanto ipotizzano che il flusso dell'acqua si esplica esclusivamente nel piano, assumendo quindi le stesse caratteristiche del moto su tutte le sezioni orizzontali dell'acquifero. In presenza di emungimenti, tale ipotesi è valida, a rigore, solo nel caso di acquifero confinato, omogeneo ed isotropo, di spessore costante ed estensione illimitata, totalmente penetrato da un pozzo (pozzo completo), il quale dovrebbe quindi presentare uno sviluppo del tubo filtro tale da interessare l'intero spessore dell'acquifero (fig. 10.11). L'estensione delle condizioni bidimensionali a contesti ove non risultino valide dette ipotesi, costituisce dunque una semplificazione della realtà fisica, adottabile, entro certi limiti e senza che la soluzione perda di significatività, solo a valle di considerazioni che consentano di valutare attentamente la validità delle semplificazioni apportate. Le condizioni tridimensionali, invece, tenendo conto delle reali modalità di flusso della falda, conducono in generale

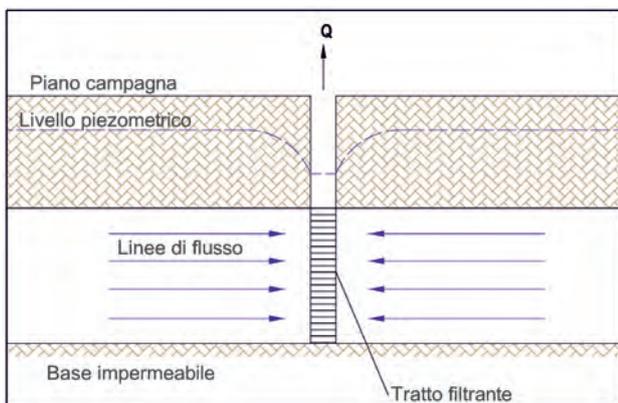


Fig. 10.11 - Condizioni di moto piano determinate dall'emungimento di un pozzo totalmente penetrante in un acquifero confinato, omogeneo ed isotropo, di spessore costante ed estensione illimitata.

– Plane flow conditions resulting from pumping through a well penetrating the entire depth of a confined, homogeneous and isotropic aquifer, with constant thickness and unlimited extent.

ad una soluzione più aderente alla realtà, a fronte però di una maggiore quantità di dati richiesti e di una maggiore complessità di calcolo.

Simulazione Base - Lo studio qui illustrato non è stato finalizzato a delimitare in maniera definitiva le aree di rispetto dei pozzi di estrazione, e ciò a causa della carenza dei dati idrogeologici e di uso della falda necessari. Esso è stato quindi finalizzato ad individuare la metodologia da adottare ed il livello di dettaglio con cui i diversi parametri idrogeologici necessari devono essere acquisiti, affinché il criterio temporale possa rappresentare uno strumento efficace per la protezione della risorsa idrica captata. A partire da ipotesi parametriche orientative, comunque credibili, è stata eseguita la modellazione del flusso, denominata "simulazione base", utilizzata come punto di partenza per la successiva analisi parametrica.

In una fase iniziale è stata simulata una porzione di acquifero nell'ipotesi di moto di filtrazione piano al fine di evidenziare con chiarezza l'influenza dei singoli parametri idrogeologici sulla delimitazione dell'area di rispetto del campo pozzi; per la stessa ragione sono state inizialmente adottate le ipotesi semplificative di omogeneità ed isotropia dell'acquifero, delegando poi ad una fase successiva, quella dell'analisi parametrica, il compito di investigare l'influenza di tali ipotesi. È stato dunque costruito un modello bidimensionale rappresentante un acquifero confinato di spessore unitario, omogeneo ed isotropo, totalmente penetrato dai quattro pozzi.

La portata prelevata da ciascun pozzo, riferita allo spessore unitario di acquifero, è stata ottenuta dividendo la portata di esercizio per la lunghezza del tratto filtrante del pozzo. In assenza di precise informazioni circa le caratteristiche costruttive delle opere di captazione e le relative modalità di condizionamento, si è ipotizzato di far coincidere la lunghezza filtrante con la lunghezza del tratto compreso tra la quota di rinvenimento dell'acqua nel pozzo, misurata *in situ*, e la quota del fondo foro (fig. 10.10).

Tale assunzione relativa allo spessore filtrante dei pozzi è stata suggerita dalla considerazione che, in assenza di cementazione dell'intercapedine tra il tubo di rivestimento e le pareti del foro, che isoli idraulicamente la porzione di acquifero sfruttata da quella più superficiale, un'aliquota della portata

emunta perviene al pozzo per effetto della percolazione in detta intercapedine, cui si aggiunge un'altra aliquota derivante dal drenaggio attraverso eventuali giunti della tubazione di rivestimento (fig. 10.12). È ovvio che la lunghezza del tratto filtrante condiziona fortemente la risposta idrodinamica della falda all'emungimento, per cui i risultati ottenuti nel presente studio sono da ritenersi validi unicamente sotto l'ipotesi assunta.

In mancanza di dati più dettagliati, la direzione del flusso idrico sotterraneo e il gradiente idraulico medio sono stati valutati approssimativamente a partire dalla ricostruzione della piezometria effet-

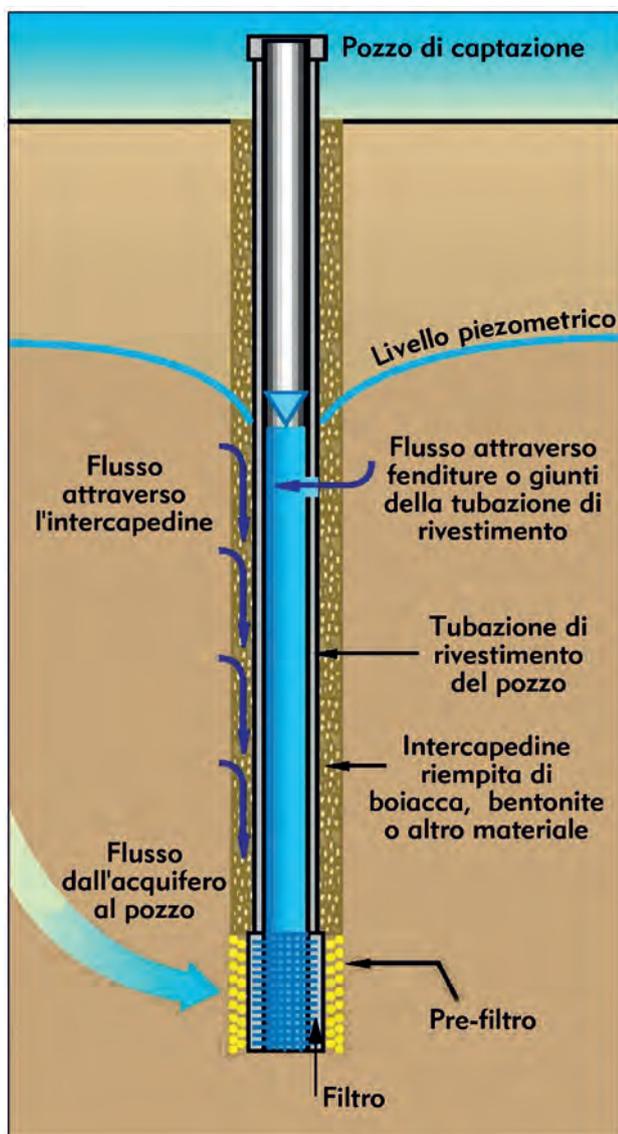


Fig. 10.12 - Modalità con cui l'acqua perviene al pozzo durante l'emungimento.
- Modes by which water flows to the well upon pumping.

tuata dal Politecnico di Bari nell'ambito degli studi di individuazione delle aree di salvaguardia delle risorse idriche sotterranee ad uso potabile nella Regione Puglia (par. 10.2.3). La direzione del flusso, nell'ipotesi assunta di mezzo poroso ed isotropo, per il quale i vettori velocità di filtrazione sono ortogonali alle isopieziche, è N-E, come illustrato in tavola 6, con gradiente idraulico medio pari a 3‰.

In assenza di limiti idrogeologici naturali, o condizioni al contorno fisicamente esistenti nella realtà, in prossimità del campo pozzi, è stato necessario assegnare al modello delle condizioni al contorno non fisicamente esistenti. In mancanza di valori noti dei carichi piezometrici in un sufficiente numero di punti nell'intorno del campo pozzi oggetto di studio, i contorni laterali sono stati schematizzati come impermeabili, avendo orientato il modello nella direzione del flusso idrico, mentre i contorni di monte e di valle sono stati schematizzati a carico costante, imponendo una cadente piezometrica uniforme nell'intero dominio, pari al 3‰, e dunque una differenza di carico Δh tra i contorni pari a $3L/1000$, dove L è la dimensione del dominio nella direzione del flusso (fig. 10.13). La distanza tra i contorni del modello è stata determinata attraverso un'analisi di sensibilità, in modo da ottenere una risposta del modello agli stress idraulici indotti dall'emungimento, nella porzione di acquifero oggetto di analisi, che sia da

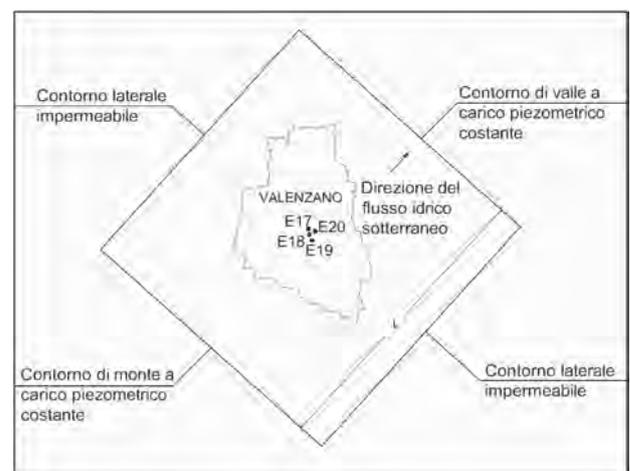


Fig. 10.13 - Condizioni al contorno adottate nel modello di calcolo, con individuazione dei quattro pozzi AQP e dei limiti amministrativi del Comune di Valenzano.

- Boundary conditions adopted in the calculation model, with indication of the four AQP wells and the administrative boundaries of the Municipality of Valenzano.

essa indipendente (FRANKE *et alii*, 1987). L'analisi di sensitività suddetta è stata condotta considerando, in particolare, tre distinti modelli, centrati rispetto al campo pozzi, di dimensioni planimetriche pari a 6 km x 6 km, 9 km x 9 km e 11 km x 11 m, discretizzati planimetricamente in celle di dimensioni pari a 50 m x 50 m, opportunamente ridotte a 15 m x 15 m in un opportuno intorno del campo pozzi, in modo da pervenire ad una modellazione del flusso adeguatamente dettagliata in prossimità di quest'ultimo, senza per altro appesantire i tempi di calcolo.

I valori assegnati ai parametri conducibilità idraulica definiti nei tre modelli sono stati determinati con il codice numerico a partire dalle prove di portata disponibili, secondo una procedura di calibrazione di tipo *trial-and-error*, consistente nel confrontare, per ciascun pozzo, le depressioni piezometriche misurate in sito nel corso della prova

di portata (tab. 10.1) con le depressioni calcolate dal codice simulando la prova stessa, e modificando, in conseguenza dell'errore commesso, il valore di conducibilità idraulica. La simulazione viene poi ripetuta assumendo il nuovo valore di conducibilità idraulica. Tale procedura è stata ripetuta finché la differenza tra le depressioni calcolate e quelle misurate in sito è risultata inferiore ad un valore prestabilito, assunto pari a 10 cm, e ha condotto al valore finale di conducibilità idraulica, per ciascun pozzo, riportata in tabella 10.2 per ciascuno dei domini di calcolo considerati. Il valore del parametro adottato per ciascun modello è stato poi ottenuto mediando i singoli valori ottenuti nello stesso modello per ciascun pozzo.

È importante sottolineare che il valore di conducibilità idraulica desunto attraverso siffatta procedura non va inteso quale valore caratterizzante l'acquifero in senso assoluto, ma piuttosto quale

Tab. 10.1 – Risultati delle prove di portata eseguite nel luglio 1990 nei quattro pozzi AQP appartenenti all'area pilota di Casamassima-Valenzano.

– Results of pumping tests performed in July 1990 in the four AQP wells in the pilot area of Casamassima Valenzano.

Pozzo	Gradino					
	1°		2°		3°	
	Portata (l/s)	Depressione (m)	Portata (l/s)	Depressione (m)	Portata (l/s)	Depressione (m)
E 17	6.6	2.5	11.5	4.5	14.5	5.5
E 18	3.4	0.5	9.6	2	15.1	3.5
E 19	8.1	2	13.2	3	17.3	5.5
E 20	11.2	3.5	15.5	4.5	18.7	5.5

Tab. 10.2 – Valori di conducibilità idraulica (cm/s) calcolati per i quattro pozzi considerati nello studio dell'area pilota di Casamassima-Valenzano, adottando 3 differenti modelli numerici e la formula di De Glee.

– Hydraulic conductivity values (cm/s) calculated for the four wells considered in the study of the pilot area of Casamassima-Valenzano, by adopting 3 different numerical models and the formula by De Glee.

Pozzo	Determinazione con il modello numerico (3 km x 3 km)	Determinazione con il modello numerico (9 km x 9 km)	Determinazione con il modello numerico (11 km x 11 km)	Determinazione analitica (DE GLEE, 1930)
E 17	$3,90 \times 10^{-3}$	$4,08 \times 10^{-3}$	$4,08 \times 10^{-3}$	$1,25 \times 10^{-3}$
E 18	$2,28 \times 10^{-3}$	$2,40 \times 10^{-3}$	$2,40 \times 10^{-3}$	$2,83 \times 10^{-3}$
E 19	$2,38 \times 10^{-3}$	$2,54 \times 10^{-3}$	$2,54 \times 10^{-3}$	$1,85 \times 10^{-3}$
E 20	$3,59 \times 10^{-3}$	$3,91 \times 10^{-3}$	$3,91 \times 10^{-3}$	$1,81 \times 10^{-3}$

valore che, inserito nelle equazioni del moto di filtrazione, consente di ricostruire, seppure in modo approssimato, la piezometria dinamica, sotto le condizioni al contorno assunte alla base del modello di calcolo. Esso è dunque strettamente connesso alle ipotesi semplificative che di volta in volta si adottano. Tale valore, inoltre, non va considerato a rigore valido nell'intero dominio, ma costituisce una stima di larga massima del parametro conducibilità idraulica, da impiegare quale dato di riferimento nell'intero dominio, nell'ipotesi assunta di omogeneità ed isotropia dell'acquifero.

La tabella 10.2 riporta altresì, per confronto, i valori di conducibilità idraulica ottenuti per ciascun pozzo attraverso l'applicazione di formule analitiche (DE GLEE, 1930), a partire dai dati sperimentali desunti dalle prove di portata. Si osservi che i valori di conducibilità determinati con il codice numerico, nell'ipotesi di moto di filtrazione piano, sono dello stesso ordine di grandezza dei valori di conducibilità determinati analiticamente, ma non coincidono con essi, stante le diverse ipotesi che sono alla base del calcolo. Va inoltre osservato che i valori di conducibilità idraulica calcolati adottando il modello numerico avente dimensioni 9 km x 9 km sono uguali a quelli ottenuti adottando invece le dimensioni 11 km x 11 km. Il calcolo ha quindi evidenziato l'adeguatezza del dominio di filtrazione di dimensioni 9 km x 9 km, ai fini della modellazione del flusso idrico sotterraneo in presenza di emungimento dai 4 pozzi AQP, dal momento che, aumentando ulteriormente le dimensioni del dominio, la distribuzione dei carichi piezometrici nell'area di studio non varia in modo significativo (COTECCHIA *et alii*, 2007). Quest'ultimo è stata quindi adottato nelle successive simulazioni.

La procedura adottata per il tracciamento dell'isocrona è quella del *backward particle tracking*, consistente nel disporre un certo numero di particelle attorno al campo pozzi e nel simulare le traiettorie da esse descritte in un dato intervallo di tempo, a ritroso, ovvero in verso opposto a quello del flusso idrico sotterraneo.

In tale fase è stato dunque introdotto nella modellazione l'ulteriore parametro porosità efficace, fondamentale per il calcolo delle velocità di filtra-

zione e quindi per la delimitazione dell'isocrona attraverso la procedura del "*particle tracking*". La determinazione di tale parametro nello specifico contesto idrogeologico risulta alquanto complessa, trattandosi di un acquifero confinato, permeabile per fratturazione e carsismo. La presenza di fratture e cavità carsiche, in luogo dei meati intergranulari di un acquifero poroso, conferisce infatti all'acquifero un carattere marcatamente eterogeneo, con una notevole variabilità spaziale dei parametri idrogeologici in generale e della porosità efficace in particolare. Ciò determina un'evidente notevole difficoltà nel determinare sperimentalmente, attraverso prove in sito, il valore corretto della porosità efficace. Va poi evidenziato che in un acquifero freatico il valore di porosità efficace è legato al coefficiente di immagazzinamento. In tal caso il parametro è valutabile orientativamente a partire dalle prove di portata, attraverso il confronto tra i volumi d'acqua edotti dalla pompa in corrispondenza di un dato gradino della prova e i corrispondenti volumi del cono di depressione, valutabili attraverso misure del livello piezometrico nell'intorno del pozzo in emungimento. In un acquifero confinato, quale quello oggetto di studio, tale corrispondenza, invece, non sussiste, per via della compressibilità sia della matrice solida sia dell'acqua sotterranea.

In mancanza di dati sperimentali, il valore di porosità efficace adottato nella modellazione, pari al 3%, è stato assunto considerando un valore interno al *range* indicato quale tipico per i calcari fessurati (CIVITA, 2005).

Anche il livello di discretizzazione spaziale è stato quindi oggetto di attenta valutazione, al pari dell'estensione areale del modello, attraverso un'analisi di sensitività. In particolare, sono stati posti a confronto i risultati ottenuti considerando dimensioni delle celle di 100 m x 100 m, 50 m x 50 m e 25 m x 25 m, ridotte a 15 m x 15 m nell'intorno del campo pozzi. Il calcolo ha evidenziato che, per dimensioni delle celle minori di 50 m x 50 m, al ridurre delle dimensioni delle celle, sia le isopieziche sia la configurazione delle traiettorie percorse dalle particelle in un prefissato intervallo di tempo non variano significativamente (le variazioni degli spazi percorsi dalle particelle sono dell'ordine di ± 5 m),

mentre i tempi di esecuzione del calcolatore aumentano di gran lunga (COTECCHIA *et alii*, 2007). Si è deciso pertanto di adottare, per le successive simulazioni, dimensioni delle celle di 50 m x 50 m rappresentando queste un buon compromesso tra livello di dettaglio richiesto per il corretto tracciamento delle isocrone e brevità dei tempi di elaborazione.

Una volta determinati l'estensione areale del modello e il livello di discretizzazione spaziale ottimali, è stata avviata la simulazione del flusso idrico sotterraneo in regime stazionario, ottenendo in *output* la carta delle isopieziche in condizioni di emungimento dai quattro pozzi (fig. 10.14). Si osservi che i carichi piezometrici sono riferiti al con-

torno di valle del modello, cui è attribuito, per semplicità, carico piezometrico nullo. La morfologia della superficie piezometrica della falda così determinata non tiene conto dell'esistenza di altre eventuali opere di captazione in condizioni di esercizio ubicate nell'area di interesse, in prossimità dei pozzi potabili.

È evidente la deformazione della superficie piezometrica per effetto dell'emungimento, caratterizzata da un abbassamento massimo di 13,3 m rispetto alla condizione indisturbata, localizzato in corrispondenza del pozzo E20. In effetti, sulla base dei dati assunti, detto pozzo è quello che emunge la maggiore portata per spessore unitario di acquifero.

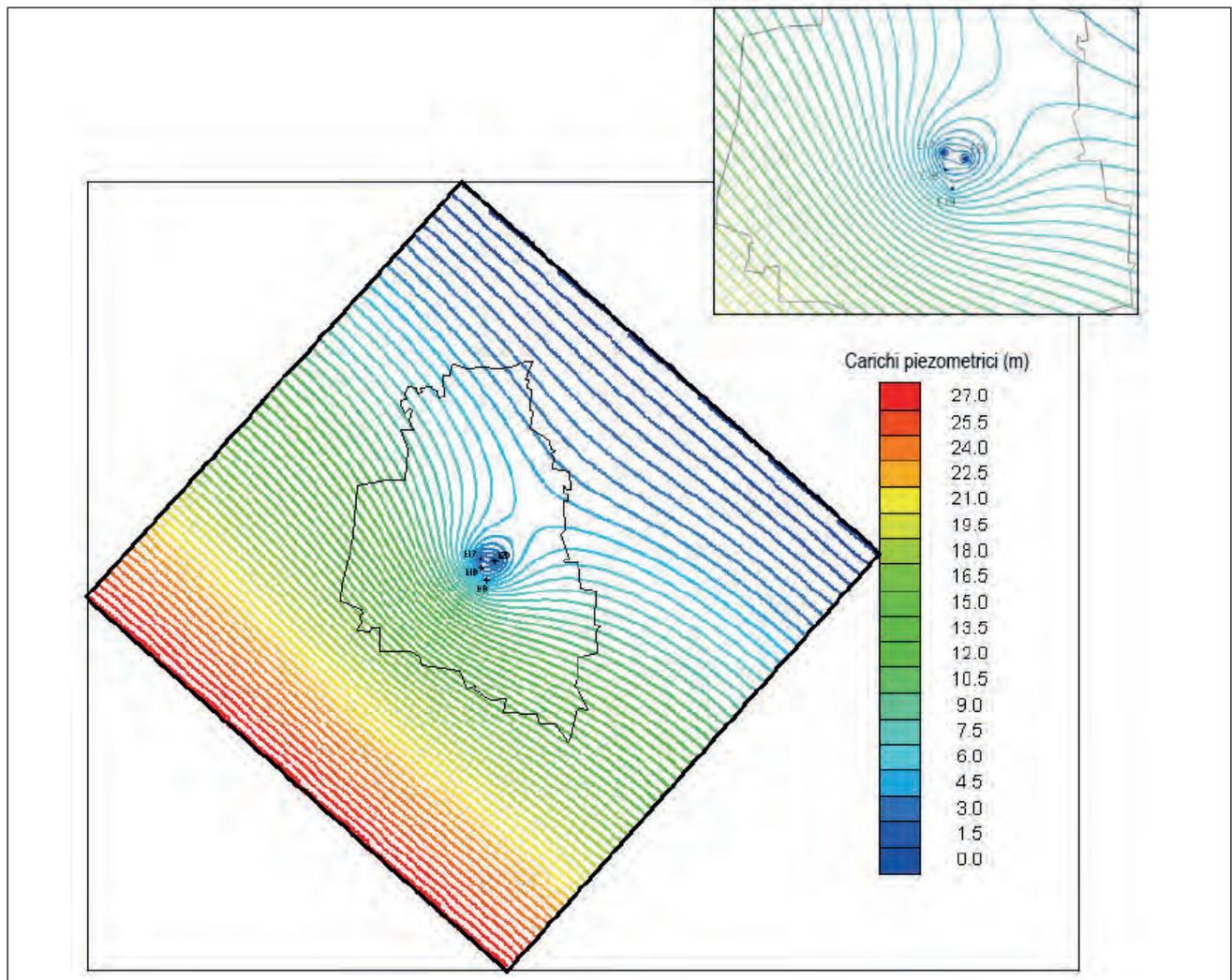


Fig. 10.14 - Analisi bidimensionale - Simulazione base - Carta isopiezica dinamica sovrapposta alla delimitazione dei limiti amministrativi del Comune di Valenzano (i carichi piezometrici in metri, sono riferiti al contorno di valle del modello).

- Two-dimensional analyses - Basic simulation - Dynamic water table contour map superimposed on the administrative boundaries of the Municipality of Valenzano (piezometric heads, in meters, refer to the downstream boundary of the model).

Tale risposta macroscopica del sistema non deve sorprendere se si considera che l'estrazione operata attraverso i quattro pozzi induce nell'acquifero notevoli sollecitazioni idrauliche, tanto che ben tre quarti della portata naturale che fluisce attraverso la porzione di acquifero simulata è prelevata dai 4 pozzi. Dal calcolo risulta infatti una portata naturale d'acqua che entra nella porzione di acquifero analizzato, in corrispondenza del contorno di monte, pari complessivamente a 0,74 l/s, di cui 0,55 l/s vengono prelevati dai pozzi.

Con l'ausilio del codice MODPATH e del suo visualizzatore grafico MODPATH - Plot è stato possibile rappresentare planimetricamente l'area di cattura del campo pozzi, da intendere quale porzione di acquifero entro la quale le linee di flusso convergono verso il campo pozzi, attraverso la già citata procedura denominata *backward particle tracking*.

La delimitazione planimetrica della zona di cattura risulta particolarmente importante nel presente studio, in quanto consente di valutare l'estensione massima di acquifero entro la quale deve essere necessariamente racchiusa l'isocrona, indipendentemente dal tempo di sicurezza adottato per il suo tracciamento: solo nell'ambito di detta zona, infatti, l'acqua affluisce ai pozzi in emungimento, sottraendosi al naturale deflusso verso valle. Ne consegue che la specifica porzione di territorio entro la quale applicare vincoli e limitazioni d'uso al fine di preservare la qualità della risorsa idrica captata (zona di rispetto) va individuata all'interno di detta zona, o addirittura, cautelativamente, farla coincidere con essa. In quest'ultimo caso si tratta evidentemente di un criterio che conduce ad un forte sovradimensionamento della zona di rispetto, che risulterebbe accettabile solo se i limiti idrogeologici del sistema a monte sono prossimi alle opere di captazione (EPA, 1987). In caso contrario la zona di cattura risulta di fatto indeterminata a monte, così come rappresentato in figura 10.15, dove è riportata la delimitazione dell'area di cattura del campo pozzi oggetto di studio, sovrapposta alla piezometria dinamica precedentemente determinata con il codice MODFLOW. Essa, infatti, termina sul contorno assunto a monte del modello. Si osservi come, avendo assunto l'ipotesi di isotropia del mezzo poroso, le traiettorie delle particelle che individuano l'area di cattura risultano

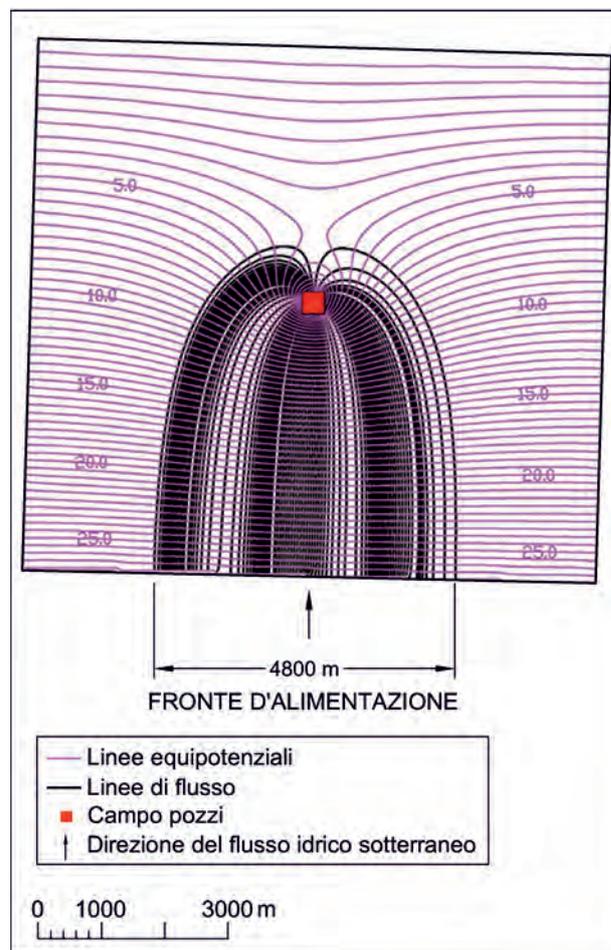


Fig. 10.15 - Analisi bidimensionale - Simulazione base - linee isopieziche durante il pompaggio e area di cattura del campo pozzi.
- Two-dimensional analysis - Basic simulation - water table contour lines upon pumping and zone of contribution of the well field.

in ogni punto ortogonali alle isopieziche in condizioni di emungimento. Il fronte d'alimentazione dell'area di cattura, definito come larghezza massima misurata perpendicolarmente alla direzione del flusso idrico sotterraneo, risulta pari a circa 4.800 m, e il raggio d'influenza fittizio o ridotto, definito come distanza del punto di stagnazione dal campo pozzi, risulta pari a circa 750 m.

Si è quindi proceduto alla delimitazione della zona di rispetto dei quattro pozzi, o più propriamente della zona di rispetto allargata, applicando il criterio temporale.

L'isocrona, ossia il luogo di punti caratterizzati da uguale tempo di arrivo delle particelle, è stata definita facendo uso del codice MODPATH, attraverso la già citata tecnica del *backward particle tracking*, interrompendo il tracciamento delle traiettorie al tempo $t = 365$ giorni dall'inizio della simulazione.

La scelta del tempo di sicurezza deriva dalla constatazione dell'elevata vulnerabilità intrinseca dell'acquifero in esame, così come riportata nella Carta della Vulnerabilità relativa al bacino pilota di Valenzano-Casamassima (tav. 6, f.t.).

In figura 10.16 sono indicate le grandezze geometriche utilizzate per indicare le dimensioni, posizione e forma dell'isocrona, così da rendere agevole il confronto con i risultati ottenuti dall'analisi parametrica illustrata nel punto successivo. In figura 10.17 è rappresentata l'isocrona ottenuta nella simulazione base involuando i punti terminali delle traiettorie percorse dalle particelle di un ipotetico inquinante idroveicolato in falda in un intervallo di 365 giorni. Come si può osservare la lunghezza totale è pari a 970 m, con una lunghezza a monte di 300 m e una lunghezza a valle di 270m, e la larghezza è pari a 925 m; la superficie della zona di rispetto risulta pari a 718.714 m². La forma dell'isocrona è caratterizzata da alcune irregolarità dovute all'asimmetria nell'ubicazione planimetrica dei pozzi rispetto al baricentro del campo pozzi e alle diverse portate di emungimento dei pozzi stessi.

- Analisi Parametrica: partendo dalla simulazione base precedentemente illustrata, è stata dunque avviata un'analisi parametrica per valutare l'influenza dei singoli parametri idrogeologici introdotti nel modello sulla delimitazione dell'area di rispetto.

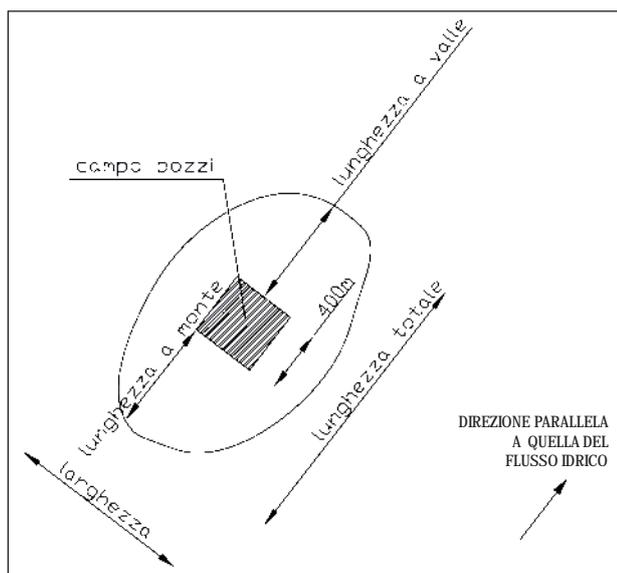


Fig. 10.16 - Schematizzazione delle grandezze geometriche utilizzate per definire l'isocrona in forma e posizione.

- Sketch of the geometry used to define shape and position of isochrones.

È stato quindi variato, di volta in volta, il valore di ciascuno dei quattro parametri di *input* (porosità efficace, gradiente idraulico, conducibilità idraulica e portata di prelievo), mantenendo costanti i rimanenti. In particolare, i valori dei parametri sono stati variati all'interno di un intervallo ritenuto plausibile per il particolare contesto idrogeologico, sulla base dei dati sperimentali disponibili o, in assenza di questi, sulla base dei dati di letteratura. Al fine poi di rilevare con chiarezza il *trend* della variazione delle dimensioni dell'isocrona al variare del valore del parametro investigato, tale intervallo è stato anche opportunamente esteso oltre i valori presumibili per l'acquifero oggetto di studio.

In corrispondenza delle diverse combinazioni dei parametri idrogeologici in ingresso sono state ripetute le simulazioni del flusso e sono state determinate le corrispondenti isocrone, per ciascuna delle quali sono state valutate le grandezze geometriche caratteristiche definite in figura 10.16.

Dall'analisi comparata delle configurazioni delle diverse isocrone ottenute dal calcolo è possibile trarre le seguenti considerazioni:

- porosità efficace (n) (fig. 10.18): un aumento della porosità efficace si traduce in una riduzione delle dimensioni della zona di rispetto, sia nella direzione del flusso, sia in quella ad essa perpendicolare: si passa da dimensioni della zona di rispetto nelle direzioni parallela e perpendicolare a quella del flusso pari rispettivamente a 1.574 m e 1.503 m nel caso di porosità efficace uguale a 1%, a dimensioni pari a 650 m e 605 m nel caso di porosità efficace uguale a 10%. Ciò è facilmente intuibile in quanto, all'aumentare della porosità efficace, diminuisce la velocità di filtrazione e dunque lo spazio percorso dall'acqua in prefissato intervallo di tempo (365 giorni nel caso specifico). La legge con cui le dimensioni dell'isocrona si riducono all'aumentare della porosità efficace nello specifico contesto idrogeologico analizzato segue approssimativamente la funzione potenza e ciò significa che il modello è fortemente sensibile alle variazioni del valore del parametro porosità efficace per valori molto bassi dello stesso, compresi approssimativamente nell'intervallo 1-4%, mentre per valori superiori non vengono indotte significative variazioni nelle dimensioni dell'isocrona. La circostanza che la lunghezza e larghezza dell'iso-

crona seguono approssimativamente la stessa legge garantisce la conservazione della forma dell'isocrona, la quale dunque non varia al variare del parametro porosità efficace.

- Gradiente idraulico (i) (fig. 10.19): un aumento del gradiente idraulico determina un aumento della lunghezza a monte (in quanto aumenta la velocità di filtrazione), una riduzione della lunghezza a valle e, in misura trascurabile, della larghezza, secondo leggi approssimativamente lineari. In particolare il calcolo ha indicato che un aumento della cadente piezometrica favorisce una forma della zona di rispetto sempre più ellittica e allungata verso monte, e un punto

di stagnazione sempre più prossimo al campo pozzi. Nello specifico contesto idrogeologico analizzato l'influenza del valore di tale parametro, se letta in termini quantitativi, è piuttosto ridotta. A tal riguardo si deve osservare che l'isocrona risulta essere sempre interna all'area ove l'influenza del campo pozzi sulla distribuzione dei carichi piezometrici è rilevante, sicché il risultato è molto più sensibile alle variazioni sulla piezometria indotte dal pompaggio più che a variazioni naturali. Si passa, infatti, da dimensioni della zona di rispetto nella direzione del flusso e in quella ad essa perpendicolare pari rispettivamente a 963 m e 925 m nel caso di gradiente

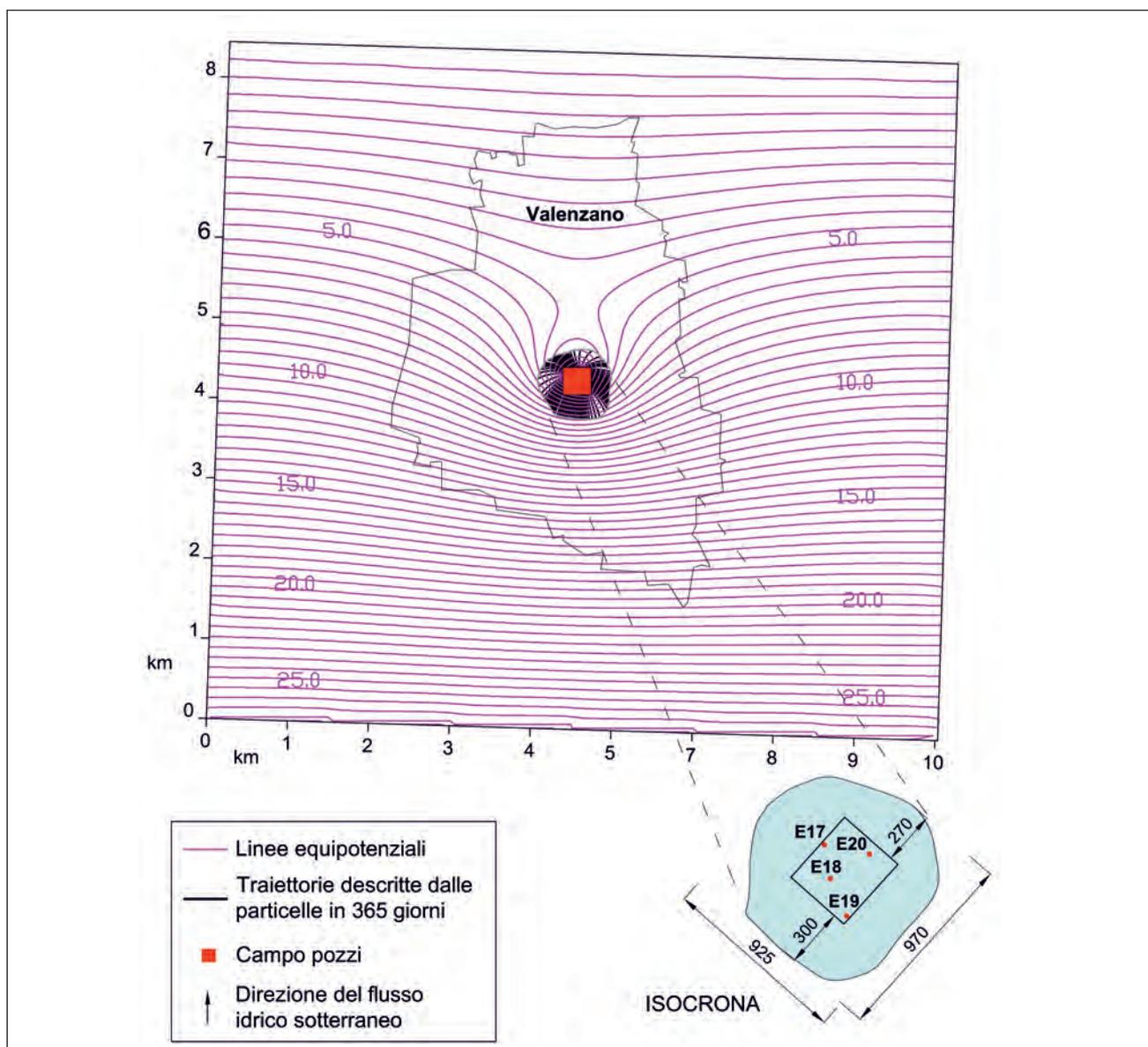


Fig. 10.17 - Analisi bidimensionale - Simulazione base - linee isopieziche durante il pompaggio e Isocrona a 365 giorni.
 - Two-dimensional analysis - Basic simulation - water table contour lines upon pumping and 365 days isochrone.

idraulico uguale allo 0.2% a dimensioni di 980 m e 920 m nel caso di gradiente idraulico pari all'0.6%. La grandezza più sensibile al parametro gradiente

risulta essere in particolare la lunghezza a monte.
 - Conducibilità idraulica (k) (fig. 10.20): un aumento della conducibilità idraulica determina un incre-

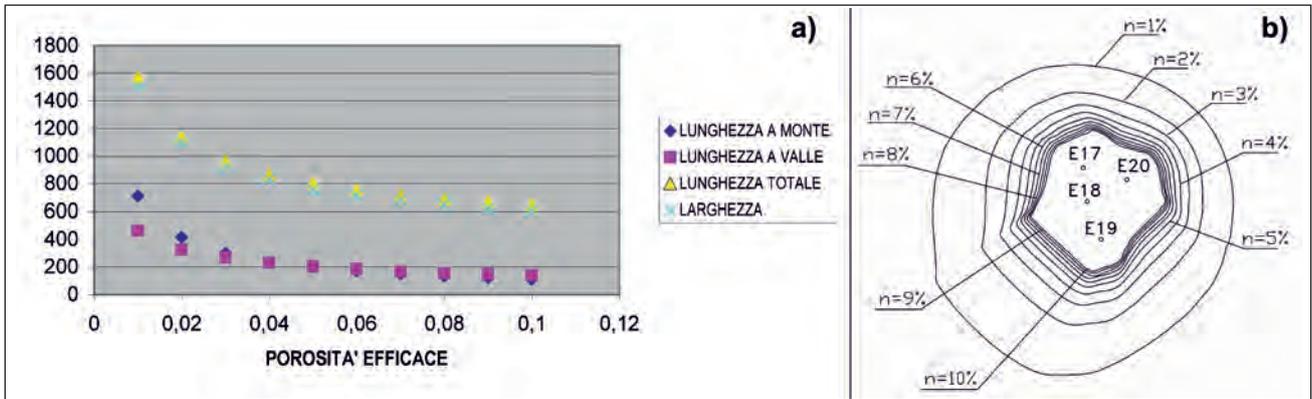


Fig. 10.18 - Risultati dell'analisi parametrica in condizioni piane: a) variazione delle grandezze geometriche della zona di rispetto al variare della porosità efficace; b) configurazione della zona di rispetto al variare della porosità efficace dell'acquifero.
 - Results of the parametric analysis in plane conditions: a) variation of the geometry of the protection zone with changes in the effective porosity of the aquifer; b) configuration of the protection zone with changes in the effective porosity of the aquifer.

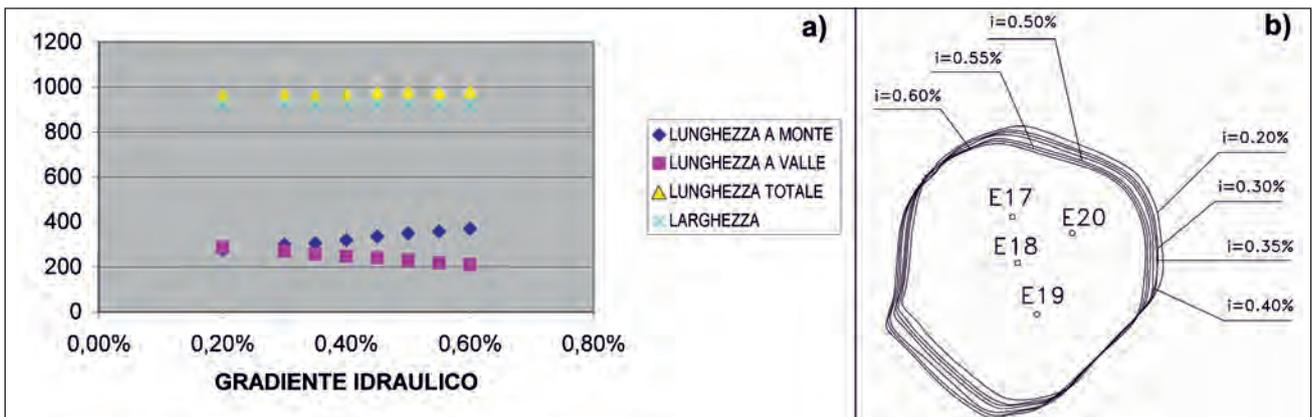


Fig. 10.19 - Risultati dell'analisi parametrica: a) variazione delle grandezze geometriche della zona di rispetto al variare del gradiente idraulico; b) configurazione della zona di rispetto al variare del gradiente idraulico dell'acquifero.
 - Results of the parametric analysis: a) variation of the geometry of the protection zone with the variation of the hydraulic gradient; b) configuration of the protection zone with the variation of the hydraulic gradient of the aquifer.

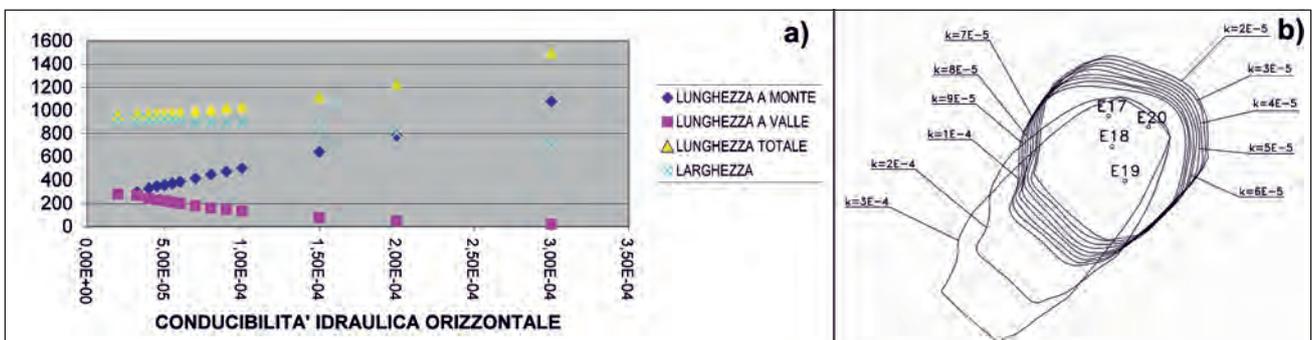


Fig. 10.20 - Risultati dell'analisi parametrica: a) variazione delle grandezze geometriche della zona di rispetto al variare della conducibilità idraulica dell'acquifero; b) configurazione della zona di rispetto al variare della conducibilità idraulica dell'acquifero.
 - Results of the parametric analysis: a) variation of the geometry of the protection zone with the variation of the hydraulic conductivity of the aquifer; b) configuration of the protection zone with the variation of the hydraulic conductivity of the aquifer.

mento della lunghezza a monte (in quanto aumenta la velocità di filtrazione), un decremento della lunghezza a valle e della larghezza, favorendo una forma della zona di rispetto sempre più ellittica e un punto di stagnazione sempre più vicino al campo pozzi, in analogia a quanto osservato per il gradiente idraulico. Si passa da valori di ampiezza dell'isocrona nelle direzioni parallela e perpendicolare a quella del flusso idrico pari rispettivamente a 958 m e 925 m nel caso di conducibilità idraulica orizzontale pari a 2×10^{-3} cm/s, a valori di 1.498 m e 704 m nel caso di conducibilità idraulica orizzontale pari a 3×10^{-1} cm/s. Nel caso specifico si osserva una minore sensibilità delle dimensioni dell'isocrona al parametro conducibilità idraulica per valori bassi dello stesso, compresi orientativamente nell'intervallo compreso tra $2 \div 5 \times 10^{-3}$ cm/s.

- Portata di prelievo (Q) (fig. 10.21): un aumento della portata di prelievo determina un aumento delle dimensioni dell'isocrona senza sostanziali variazioni di forma. Si passa da un valore di ampiezza dell'isocrona nelle direzioni parallela e perpendicolare a quella del flusso idrico pari rispettivamente a 760 m e 720 m nel caso di emungimento da ciascun pozzo di una portata pari a 0.5 volte la portata di esercizio ad un valore di ampiezza pari a 1.130 m e 1.100 m nel caso di emungimento da ciascun pozzo di una portata pari a 1.5 volte la portata di esercizio. La sensibilità del modello al parametro si mantiene approssimativamente costante nell'intervallo analizzato, essendo grossomodo lineare la variazione di dimensioni di isocrona in relazione alle variazioni di portata.

Le simulazioni numeriche condotte hanno evidenziato in sostanza la grande importanza del parametro porosità efficace sulla delimitazione delle aree di salvaguardia, soprattutto per valori molto bassi dello stesso. Si osserva infatti che una riduzione della porosità efficace dal 4% all'1% determina il raddoppio della lunghezza totale dell'isocrona. Ne consegue che anche una variazione molto piccola del parametro, di appena tre punti percentuali, correlabile all'incertezza nella sua determinazione, comporterebbe un significativo errore nella delimitazione dell'area di salvaguardia. Le simulazioni hanno evidenziato inoltre una significativa sensibilità del modello al parametro conducibilità idraulica, soprattutto per valori più elevati dello stesso.

In figura 10.22 è mostrato l'involuppo di tutte le isocrone ottenute dalle simulazioni al variare dei singoli parametri idrogeologici, con l'indicazione dei centri di pericolo presenti nell'area, dal quale si evince che alcuni centri di pericolo sono interni a detto involucro. L'individuazione della zona di rispetto come involucro delle isocrone potrebbe risultare utile nel caso in cui, nell'impossibilità di assegnare un valore numerico ai parametri conducibilità idraulica o gradiente, si preferisca considerare cautelativamente per essi un intervallo di variazione. Non è possibile, infatti, individuare, per detti parametri, valori cautelativi ai fini della delimitazione delle zone di rispetto, dal momento che molto spesso al variare di questi si osservano variazioni di forma della zona di rispetto, oltre che di ampiezza.

- Determinazione degli effetti dovuti ad anisotro-

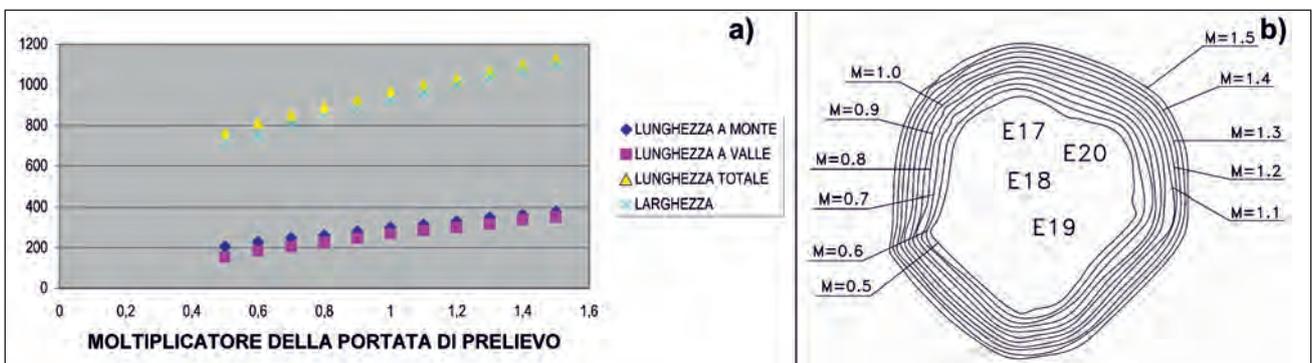


Fig. 10.21 - Risultati dell'analisi parametrica in condizioni piane: a) variazione delle grandezze geometriche della zona di rispetto al variare della portata emunta dai pozzi; b) configurazione della zona di rispetto al variare della portata emunta dai pozzi.

- Results of the parametric analysis in plane conditions: a) variation of the geometry of the protection zone with the variation of the well discharge; b) configuration of the protection zone with the variation of the well discharge.

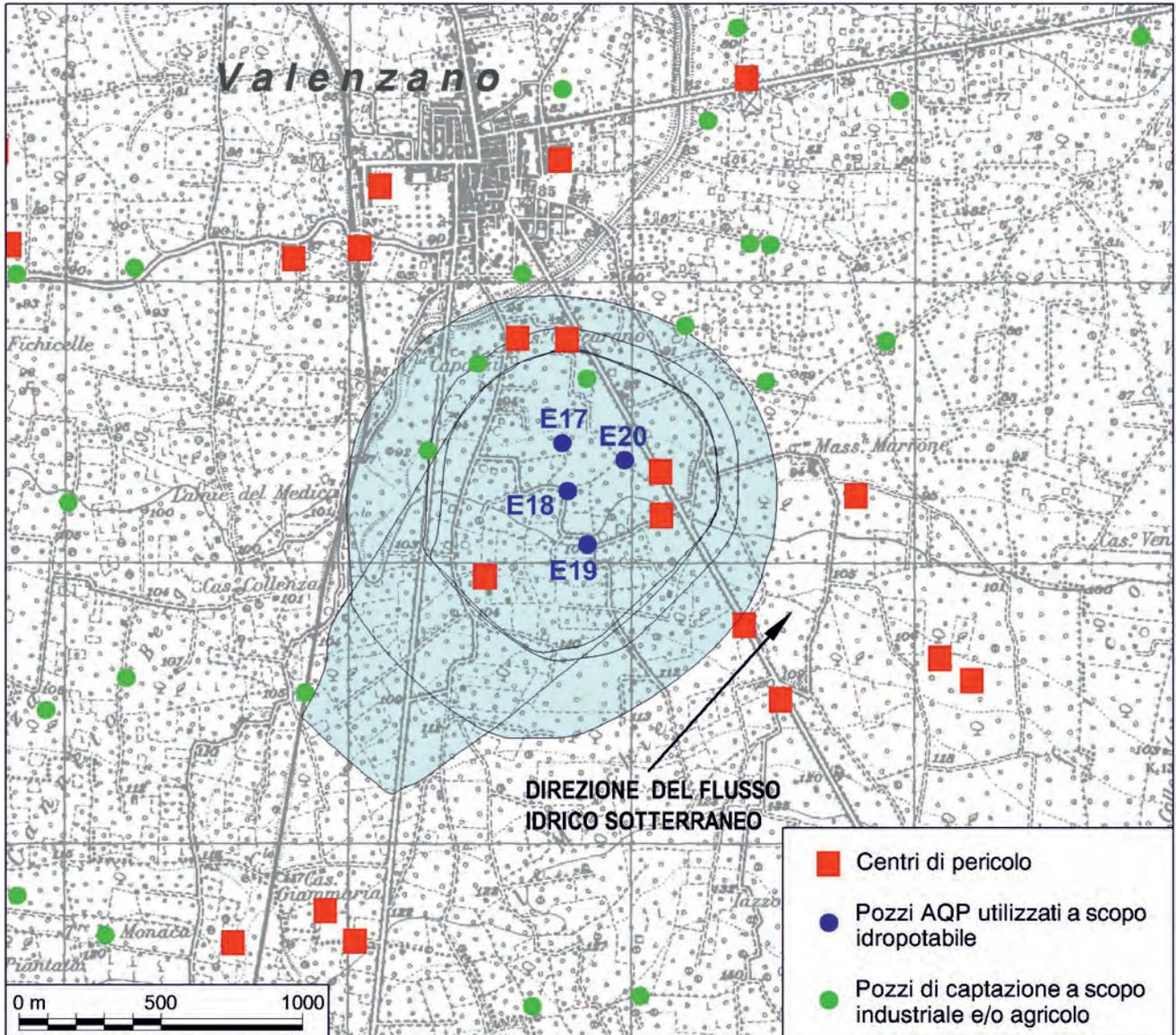


Fig. 10.22 - Inviluppo delle isocrone ottenute al variare dei parametri idrogeologici utilizzati nell'analisi parametrica.
 - *Ischrone envelope with the variation of the hydro-geological parameters used in the piezometric analysis.*

pie orizzontali: l'ipotesi di isotropia dell'acquifero adottata nella simulazione base presenta evidentemente il vantaggio di semplificare la caratterizzazione del mezzo acquifero. Tale ipotesi deve essere tuttavia oggetto di attenta valutazione ai fini di una corretta delimitazione delle aree di salvaguardia dei pozzi. Il non considerare l'anisotropia dell'acquifero, particolarmente quando marcata, può condurre, infatti, ad un tracciamento non corretto della direzione e del verso del flusso idrico sotterraneo, cui consegue un'errata individuazione delle aree da sottoporre a vincoli (BARENBLATT *et alii*, 1990). L'anisotropia può comportare, infatti, la

non ortogonalità tra le linee di flusso e le linee equipotenziali, e quindi un'errata determinazione della zona di cattura del pozzo (fig. 10.23). In termini pratici il non tener conto di tale evenienza può comportare l'adozione di inutili vincoli in aree esterne a quelle di alimentazione del pozzo, e viceversa la non apposizione di vincoli nella effettiva area di rispetto.

In un acquifero anisotropo la conducibilità idraulica deve essere espressa in termini tensoriali:

$$\underline{v} = [k] i \quad (10.2)$$

dove \underline{v} ed i sono, rispettivamente, il vettore velocità di filtrazione e gradiente idraulico. La definizione del

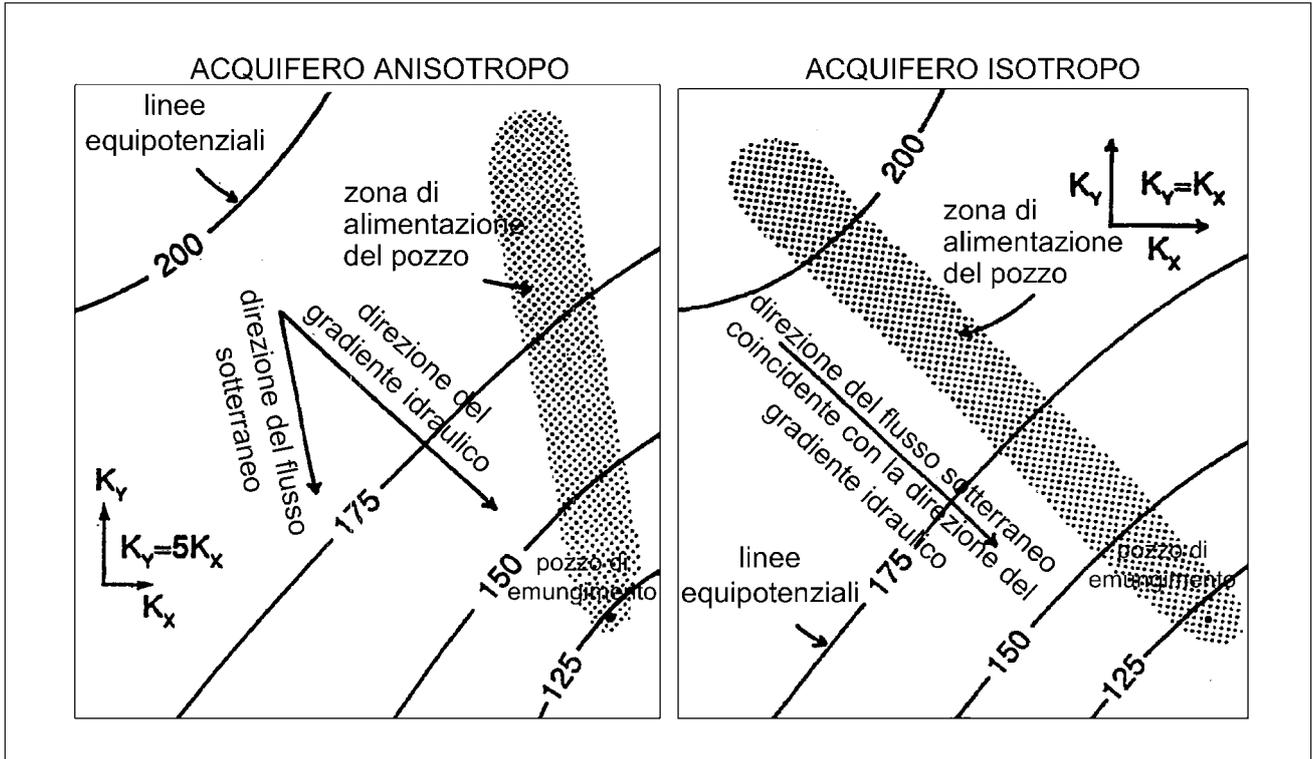


Fig. 10.23 - Effetto dell'anisotropia orizzontale dell'acquifero sull'orientazione della zona di alimentazione di un pozzo (ZOC) (da BRADBURY *et alii*, 1991).
 - Effect of the horizontal anisotropy of the aquifer on the orientation of the contribution zone to a well (ZOC) (from BRADBURY *et alii*, 1991).

tensores delle permeabilità $[k]$ richiede la determinazione di quattro componenti distinte nello spazio bidimensionale o nove componenti se ci si riferisce allo spazio tridimensionale. In virtù della proprietà di simmetria di cui gode il tensore, tali componenti si riducono a tre nello spazio bidimensionale e sei nello spazio tridimensionale. Se poi si fanno coincidere le direzioni del sistema di riferimento con quelle principali della conducibilità idraulica, il tensore diventa diagonale, e di conseguenza è necessario assegnare due autovalori nello spazio bidimensionale e tre in quello tridimensionale.

La determinazione di tali componenti del parametro conducibilità necessiterebbe l'esecuzione di una prova di portata, con osservazioni del livello piezometrico in un congruo numero di pozzi ubicati nell'intorno di quello in emungimento, pari almeno al numero di componenti da determinare; dunque almeno tre pozzi per valutare il grado di anisotropia orizzontale, ed almeno sei per valutare il grado di anisotropia spaziale. Nelle analisi che seguono si è formulata l'ipotesi semplificativa che la direzione del flusso idrico sia una direzione prin-

cipale del tensore della conducibilità idraulica. Assegnato il valore di conducibilità lungo tale direzione è stato quindi necessario assegnare solo il grado di anisotropia, qui definito come il rapporto tra la conducibilità idraulica nella direzione parallela a quella del flusso idrico indisturbato e quella nella direzione ad essa ortogonale. Nel caso specifico in esame si dispone di misure piezometriche condotte nei quattro pozzi di emungimento in corrispondenza delle prove di portata eseguite in ciascuno di essi, che però non hanno consentito la valutazione del locale grado di anisotropia orizzontale dell'acquifero, in quanto non hanno evidenziato variazioni di livello piezometrico significative.

Al fine di valutare l'incidenza dell'anisotropia dell'acquifero sulla delimitazione delle aree di rispetto, sono state effettuate diverse simulazioni variando il grado di anisotropia orizzontale nell'intervallo compreso tra 0.2 e 3 (il valore unitario corrisponde al caso di acquifero isotropo).

Il calcolo (fig. 10.24) evidenzia che l'ampiezza dell'isocrona nelle direzioni parallela e perpendicolare a quella del flusso idrico passano rispettiva-

mente da valori pari 1.194 m e 755 m nel caso di grado di anisotropia pari a 3, a corrispondenti ampiezze pari a 753 m e 1.250 m nel caso di grado di anisotropia pari a 0.2. Al ridursi della conducibilità idraulica in direzione parallela a quella del flusso idrico diminuisce la lunghezza totale ed aumenta la larghezza dell'isocrona. La diversa legge di variazione delle grandezze lunghezza e larghezza implica, per altro, una notevole variazione di forma dell'isocrona. Ne consegue che risulta confermato quanto già annunciato in precedenza, ossia che il trascurare i caratteri di anisotropia orizzontale dell'acquifero può condurre, da un lato, all'apposizione di vincoli superflui in aree esterne alle aree che effettivamente alimentano i pozzi di captazione nel tempo di sicurezza, dall'altro, a non considerare alcuna misura di protezione e salvaguardia in aree che viceversa andrebbero sottoposte ad idonea tutela.

10.3.3.4. - Modellazione del flusso idrico sotterraneo in condizioni di moto tridimensionali

Nell'analisi eseguita nell'ipotesi di moto di filtrazione piano sono stati trascurati gli effetti tridimensionali determinati dal fatto che tutti i pozzi esaminati sono solo parzialmente penetranti nell'acquifero, il quale è sostenuto alla base da acqua

di mare di intrusione continentale. Al fine di valutare entro quali limiti detta ipotesi semplificativa può ritenersi valida, è stata eseguita una modellazione del flusso idrico in condizioni tridimensionali, adottando la stessa porzione di acquifero, di estensione areale 9 km x 9 km, usata per l'analisi piana. Detta analisi ha inoltre consentito di indagare come la variazione di spessore dell'acquifero e la presenza di eterogeneità ed anisotropie verticali, possono influenzare la perimetrazione delle aree di salvaguardia.

La quota q del tetto dell'acquifero è stata assunta pari -50 m s.l.m., ossia coincidente con la quota più elevata di rinvenimento dell'acqua nei pozzi 4 pozzi usati nell'analisi (pozzo E18 in fig. 10.10). Al fine di individuare il livello di base della circolazione idrica sotterranea è stata adottata l'ipotesi di esistenza di una interfaccia netta acqua dolce - acqua di mare, considerata orizzontale e fissa nell'area in esame, e posta ad quota ' \bar{h} ' rinvenibile dall'applicazione dell'equazione di Ghyben - Herzberg (par. 2.3), assumendo un coefficiente:

$$\gamma = \frac{\rho_d}{\rho_s - \rho_d} = 38. \quad (10.3)$$

Quest'ultimo è riconosciuto in Puglia all'incirca come valore minimo, nell'ipotesi di considerare la

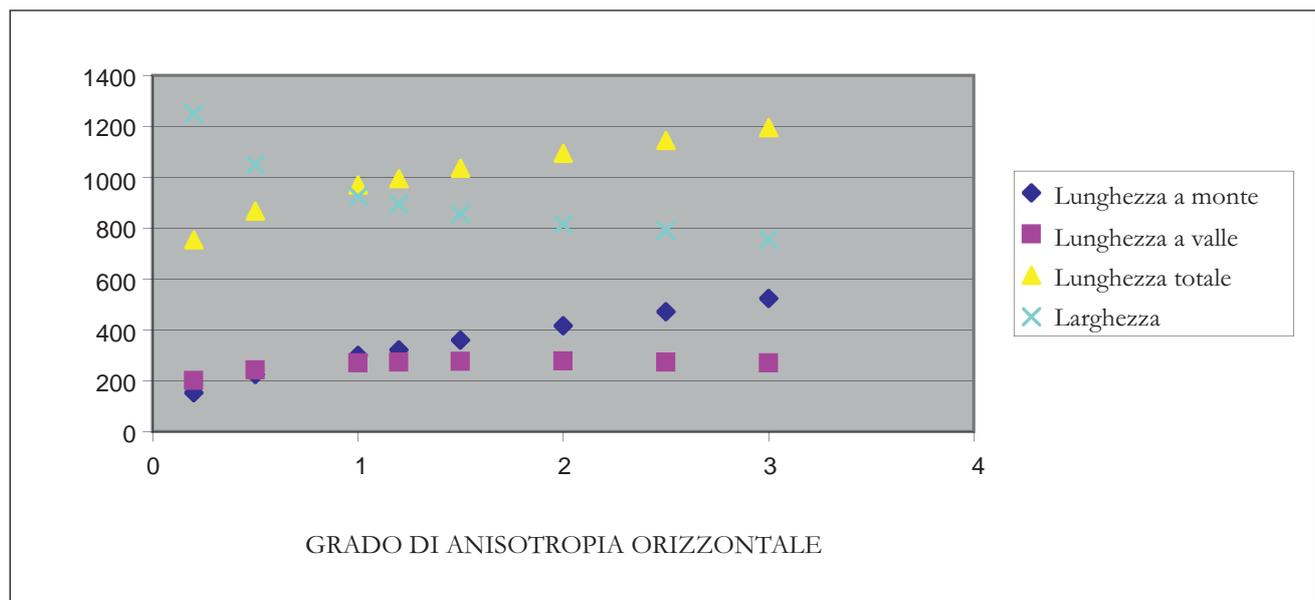


Fig. 10.24 - Variazione delle grandezze geometriche dell'isocrona al variare del grado di anisotropia orizzontale dell'acquifero.
- Variation of the isochrones geometry with variation in the horizontal anisotropy of the aquifer.

interfaccia coincidente con il tetto della zona di transizione (par. 2.3).

Assumendo un carico piezometrico “*l*” della falda pari a 28 m (fig. 10.10), si ottiene un profondità della base dell’acquifero rispetto al livello mare pari a:

$$h = 28 \times 38 = 1.064 \text{ m} \quad (10.4)$$

Lo spessore *S* dell’acquifero risulta quindi pari a:
 $S = h + q = (1064 - 50) = 1014 \text{ m} \approx 1000 \text{ m}.$ (10.5)

In figura 10.25 è rappresentata la schematizzazione di acquifero adottata.

Il dominio di calcolo è stato discretizzato planimetricamente in 13.340 blocchi aventi forma rettangolare, di dimensioni 100 m x 100 m, opportuna-

mente ridotte a 30 m x 30 m nelle immediate vicinanze del campo pozzi. Così come eseguito per l’analisi piana, la bontà del livello di discretizzazione adottato è stata valutata attraverso un’analisi di sensibilità, qui non descritta per brevità.

Verticalmente l’acquifero è stato suddiviso in otto unità. Detta suddivisione, che non scaturisce dalla necessità eseguire una diversificazione di unità idrogeologiche avendo ipotizzato l’acquifero omogeneo, è stata introdotta al fine di definire adeguatamente i diversi tratti filtranti dei pozzi. L’ottava unità, che si estende fino alla base dell’acquifero, di spessore 780 m, è stata ulteriormente discretizzata

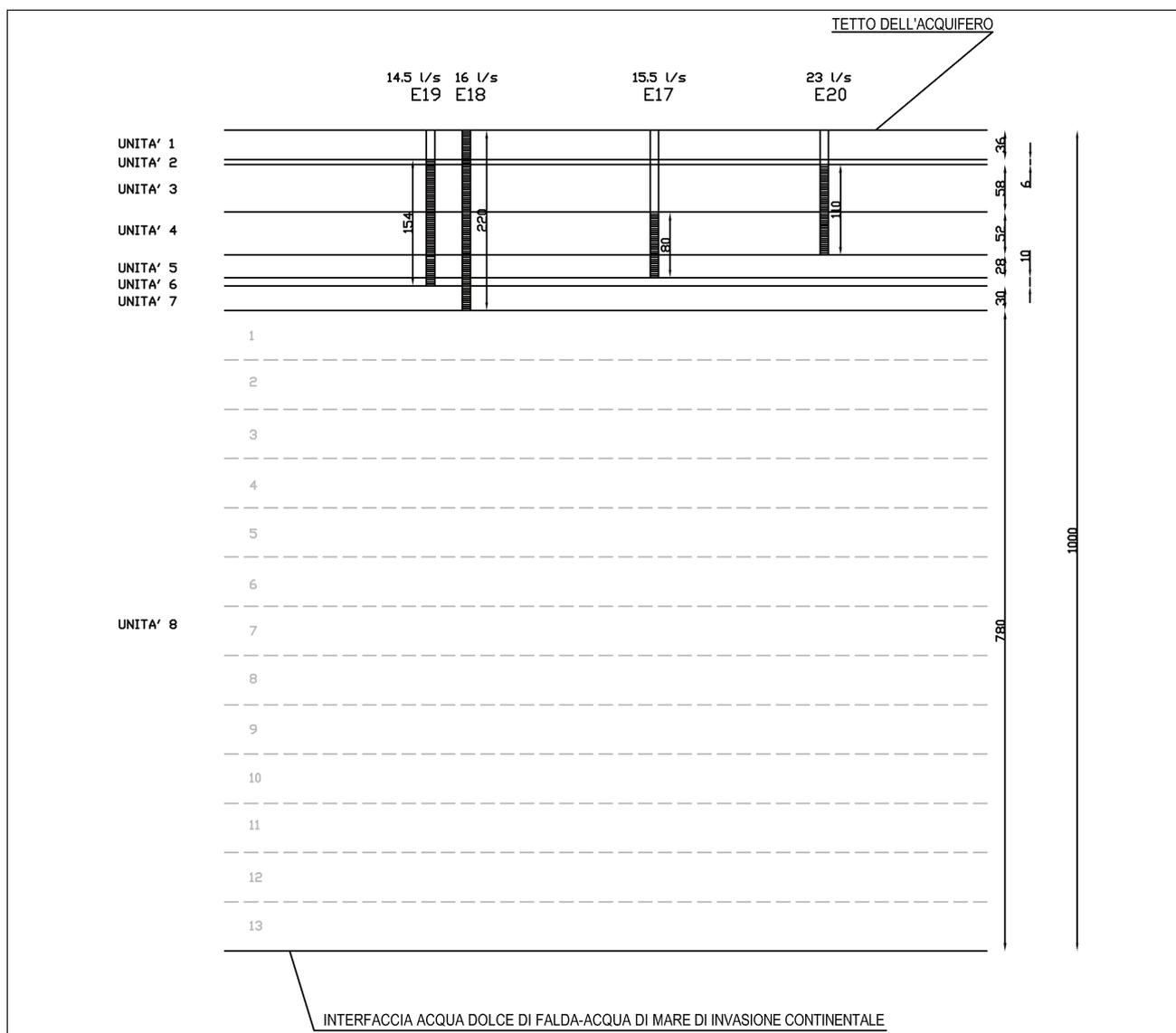


Fig. 10.25 - Schematizzazione dell’acquifero adottata nel modello tridimensionale e relativa discretizzazione verticale, con indicazione dei pozzi usati nell’analisi e dei relativi tratti filtranti.

– Sketch of the aquifer adopted in the three-dimensional model and related vertical discretization, with indication of the wells used in the analysis and the related well screens.

in 13 strati di spessore uniforme, al fine di pervenire, a quote inferiori alla quota di attestazione del pozzo più profondo (E18), ad una soluzione numerica più precisa del campo di moto.

Le condizioni al contorno imposte al modello sono le stesse assunte nell'analisi piana, con le ovvie estensioni allo spazio tridimensionale.

- Simulazione Base: anche in questo caso è stata inizialmente eseguita una simulazione base, adottando la porosità efficace ed gradiente piezometrico assunti nell'analisi piana, ossia, rispettivamente, 3% e 3‰. Il valore di conducibilità idraulica, pari a $7.85E-04$ cm/s, è stato ottenuto per calibrazione del modello tridimensionale sulla base delle prove di portata effettuate sui quattro pozzi oggetto di studio, eseguita con la metodologia già illustrata per il caso bidimensionale.

La modalità di definizione della portata di prelievo dei pozzi adottata nel modello risulta differente rispetto a quanto assunto nel modello bidimensionale, in cui essa è stata assunta pari alla portata di esercizio del pozzo rapportata allo spessore filtrante, avendo assunto uno spessore di acquifero unitario. Nel modello tridimensionale viene invece analizzato l'intero spessore di acquifero e ciò rappresenta la fondamentale differenza tra i due casi di moto esaminati. La portata di esercizio è stata quindi ripartita tra le varie unità attraversate dal pozzo (fig. 10.25) proporzionalmente al relativo spessore. Ciò implica che la portata viene emunta uniformemente lungo l'asse del pozzo, situazione non rigorosamente valida ma che, nel caso specifico, comporta un errore ridotto, avendo schematizzato l'acquifero come un mezzo omogeneo e presentando quindi le varie unità idrogeologiche introdotte lo stesso coefficiente di permeabilità.

In condizioni di moto tridimensionali, ove le componenti verticali delle linee di flusso non sono trascurabili, non è possibile definire una superficie piezometrica della falda se non riferendosi ad uno specifico piano orizzontale (par. 2.5). Il codice numerico MODFLOW restituisce in *output* le linee isopieziche a diverse quote del modello.

In figura 10.26 è riportata la carta delle isopieziche relativa all'unità 4 del modello, ossia quella da cui viene estratta la maggiore portata essendo intercettata da tutti i pozzi (fig. 10.25). Dal con-

fronto di tale carta con quella ottenuta invece in condizioni di moto piano (fig. 10.14), si evince che gli effetti tridimensionali determinano una significativa riduzione delle variazioni piezometriche indotte dal pompaggio, sia a monte sia a valle del campo pozzi, rispetto a quanto è rilevabile dall'analisi bidimensionale. Gli effetti tridimensionali comportano dunque una mitigazione dei gradienti idraulici dovuti all'emungimento e quindi anche delle velocità di filtrazione e ciò, già si intuisce, comporta significative ripercussioni sulla perimetrazione della zona di rispetto.

L'analisi del campo di moto indotto dal pompaggio in condizioni tridimensionali finalizzata a determinare l'area di cattura del pozzo e l'isocrona, quest'ultima determinata, come nel caso di moto piano, assumendo un tempo di sicurezza pari a 365 giorni, è stata eseguita con l'ausilio del codice di calcolo MODPATH, con la stessa procedura adottata nell'analisi piana. Come abbiamo già anticipato, il modello tridimensionale comporta una significativa differenza delle caratteristiche del moto sui vari piani orizzontali, per cui la procedura di delimitazione dell'area di cattura e dell'isocrona è stata eseguita su ciascuna unità individuata nel modello, e il risultato finale è ottenuto come inviluppo dei risultati relativi alle singole unità.

La zona di cattura (fig. 10.27) è caratterizzata da un fronte d'alimentazione dell'estensione di circa 3.000 m, contro i 4800m ottenuti nell'analisi piana, e da un raggio d'influenza fittizio di 450 m circa, contro i 750 m dell'analisi piana. L'isocrona a 365 giorni (fig. 10.28) è caratterizzata invece da una lunghezza totale di 695m e da una larghezza di 675 m, con una superficie delimitata di circa 360.000 m². Il modello tridimensionale comporta quindi, nel caso esaminato, una riduzione del 30% circa delle dimensioni e del 50 % circa dell'area dell'isocrona rispetto a quella ottenuta in condizioni di moto di filtrazione piano.

È evidente quindi che gli effetti tridimensionali comportano una notevole riduzione della zona di rispetto determinata con il criterio temporale.

- Determinazione degli effetti dovuti ad eterogeneità verticali: tralasciando le infinite possibilità circa la distribuzione ed il tipo di eterogeneità, si è indagato solo un particolare tipo di eterogeneità,

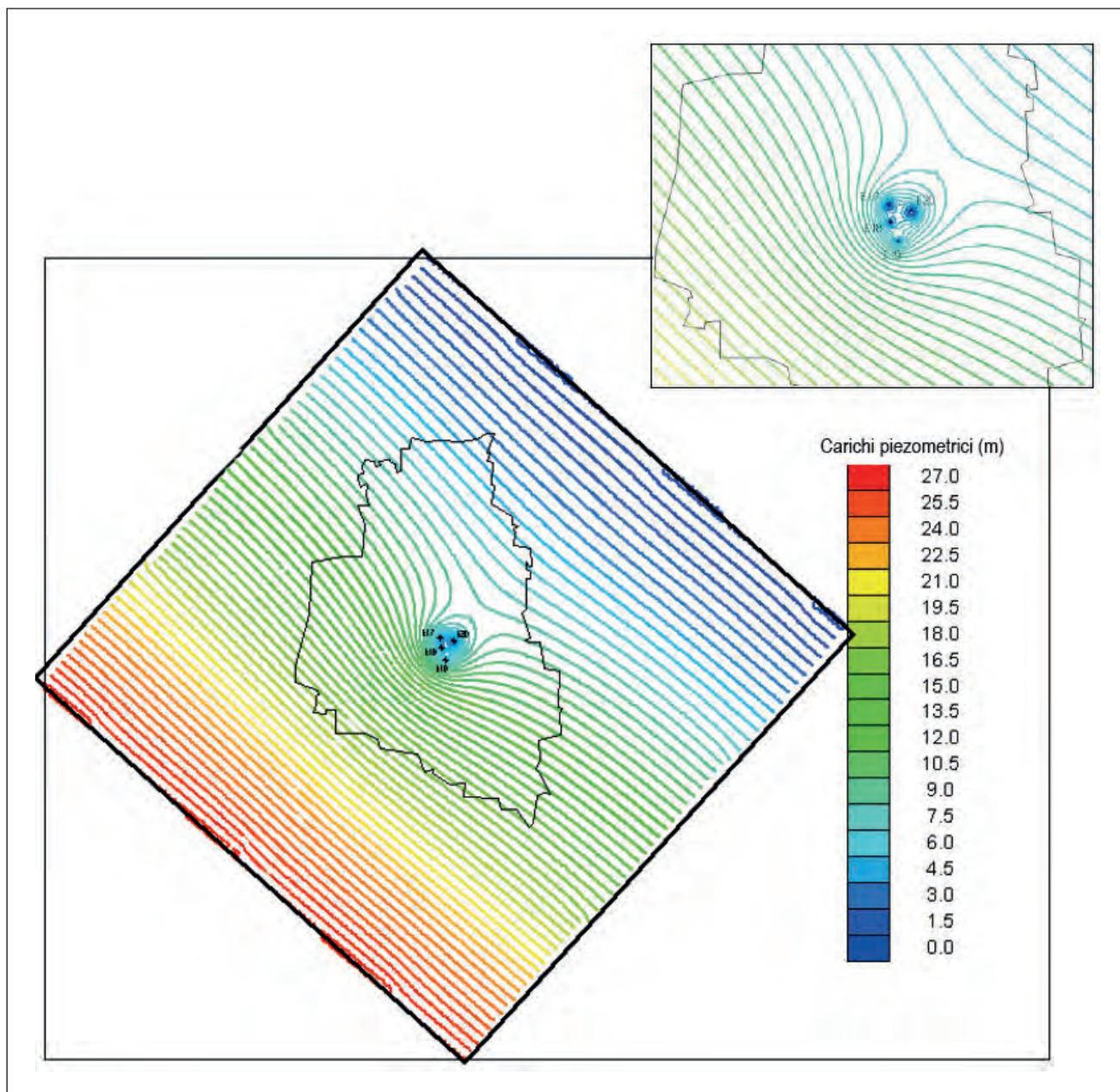


Fig. 10.26 - Analisi tridimensionale - Simulazione base - Carta delle linee isopieziche durante il pompaggio relative all'unità 4 del modello (fig. 10.25), sovrapposta alla delimitazione dei limiti amministrativi del Comune di Valenzano (i carichi piezometrici, espressi in metri, sono riferiti al contorno di valle del modello).
 - Three-dimensional analysis - Basic simulation - Map of water table contour lines upon pumping relative to unit 4 of the model (fig. 10.25), superimposed on the administrative boundaries of the Municipality of Valenzano (piezometric heads, expressed in meters, refer to the downstream boundary of the model).

quella in direzione verticale, frequente negli ammassi permeabili per fratturazione e carsismo.

È sicuramente ragionevole, infatti, ipotizzare che la conducibilità idraulica dell'acquifero si riduca con la profondità, per effetto sia della minore incidenza della fratturazione della roccia e del carsismo, sia della minore apertura delle fratture presenti in virtù del maggiore carico litostatico gravante sulla roccia. Una riduzione progressiva di

conducibilità idraulica dell'acquifero con la profondità, nel campo compreso tra 10^{-1} a 10^{-4} cm/s, è stata ad esempio rilevata sperimentalmente in una perforazione profonda circa 250m dal piano campagna nella Murgia barese (par. 15.8).

Sono state quindi eseguite ulteriori due simulazioni ipotizzando una riduzione della conducibilità idraulica a partire dalla profondità di 370m dal piano campagna (corrispondente al tetto dell'unità

8 di fig. 10.25), rispettivamente di uno e due ordini di grandezza rispetto alla conducibilità idraulica delle unità superiori.

Il risultato ottenuto è un ampliamento dell'isocrona al diminuire della conducibilità idraulica dell'unità 8. Tale risultato era intuibile in quanto, al diminuire della conducibilità idraulica dell'unità 8, si riduce la partecipazione al moto dell'unità stessa. In sostanza i pozzi prelevano meno acqua dalle porzioni inferiori e quindi, per il principio di conservazione della massa, aumenta l'acqua prelevata dalle unità sovrastanti, qui assunte a maggior permeabilità. Ciò comporta un incremento della componente orizzontale delle velocità di filtrazione negli strati più superficiali e, di conseguenza, un incremento delle dimensioni planimetriche dell'isocrona. L'assunzione di un modello tridimensionale presentante la riduzione di conducibilità idraulica con la profondità qui analizzata ha comportato, in particolare, una riduzione delle dimensioni dell'isocrona del 20% circa rispetto a quelle ottenute in condizioni piane. Nella simulazione base tridimensionale, condotta invece in ipotesi di acquifero omogeneo, era stata ottenuta una riduzione delle dimensioni dell'isocrona rispetto al caso piano del 30% circa. Ne consegue che, l'aver assunto un modello tridimensionale con l'anisotropia verticale prima descritta, induce una riduzione di superficie della zona di rispetto del 35% circa rispetto al caso piano, contro il 50% che invece era stato ottenuto nel modello tridimensionale con acquifero omogeneo. In pratica l'effetto globale determinato da una riduzione della permeabilità degli strati più profondi dell'acquifero è quello di attenuazione degli effetti tridimensionali, fornendo un risultato più simile a quello ottenuto in condizioni di moto piano.

- Determinazione degli effetti dovuti ad anisotropie verticali: il modello tridimensionale risulta idoneo ad indagare anche l'influenza della presenza di anisotropie verticali nell'acquifero, non analizzabili con il modello piano. Dette anisotropie, come per le eterogeneità, sono di fatto spesso presenti negli acquiferi permeabili per carsismo e fratturazione.

In generale, la presenza di fratture e cavità carsiche conferisce infatti all'acquifero una marcata ani-

sotropia, in particolare nelle giaciture verticali. L'influenza dell'anisotropia verticale è stata valutata variando la conducibilità idraulica verticale K_z rispetto a quella orizzontale, assunta per semplicità isotropa ($K_x=K_y$). In particolare sono state condotte due simulazioni, una riducendo il valore di conducibilità verticale di un ordine di grandezza e un'altra ponendo la conducibilità verticale pari a zero.

Il risultato ottenuto è un incremento delle dimensioni dell'isocrona al diminuire della conducibilità idraulica verticale. In particolare, assumendo un valore nullo di conducibilità verticale, le dimensioni dell'isocrona si approssimano alle dimensioni ottenute nell'analisi piana. Ciò deriva dalla circostanza che, annullandosi la permeabilità verticale del mezzo, il flusso dell'acqua si esplica esclusiva-

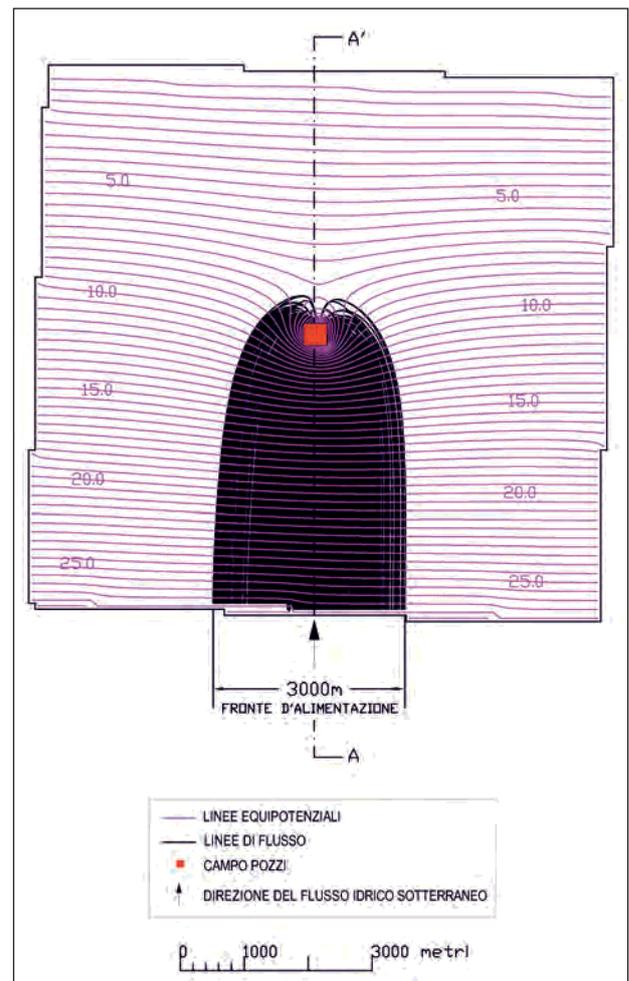


Fig. 10.27 - Analisi tridimensionale - Simulazione base - linee isopieziche durante il pompaggio relativo all'unità 4 del modello (fig. 10.25) e area di cattura del campo pozzi.

- Three-dimensional analysis - Basic simulation - water table contour lines upon pumping relative to unit 4 of the model (fig. 10.25) and zone of contribution of the well field.



Fig. 10.28 - Analisi tridimensionale - Simulazione base - Isocrona a 365 giorni, sovrapposta alla delimitazione dei limiti amministrativi del Comune di Valenzano.

- *Three-dimensional analysis - Basic simulation - 365 days isochrone, superimposed on the administrative boundaries of the Municipality of Valenzano.*

mente nel piano orizzontale e le condizioni di moto tridimensionale si riconducono a quelle piane. Tuttavia il risultato ottenuto per $K_z=0$ non è numericamente identico a quello ottenuto nella corrispondente simulazione piana, a causa sia delle diverse modalità di assegnazione delle portate di emungimento da parte del codice di calcolo, sia della diversa calibrazione del modello.

- Determinazione degli effetti dovuti alla variazione di spessore dell'acquifero: una variazione di spessore dell'acquifero, analizzata in condizioni di moto piane, corrisponde semplicemente ad un incremento della portata d'acqua estratta dai pozzi nell'elemento di spessore unitario analizzato, in quanto è necessario, in detto modello semplificato, ipotizzare che i pozzi siano completamente penetranti nell'acquifero. Detta influenza è quindi duale a quella già analizzata, in condizioni piane, quando si è variata la portata di emungimento dei pozzi.

L'analisi dell'influenza dello spessore dell'acquifero condotta invece in condizioni di moto tridimensionale consente di valutare in che modo,

eventuali errori commessi nella stima della profondità dell'acqua di mare, incidono sulle effettive condizioni di moto indotte dai pozzi, e quindi sul tracciamento dell'isocrona.

Nel modello tridimensionale si è quindi proceduto ad indagare l'influenza dello spessore dell'acquifero assumendo per esso un intervallo di variazione compreso tra 250 m e 1000 m, quest'ultimo valore relativo alla simulazione base. Il calcolo ha evidenziato che una riduzione di spessore determina un incremento dell'ampiezza della zona di rispetto sia in direzione parallela sia in direzione perpendicolare a quella del flusso idrico; ciò in quanto al diminuire dello spessore aumenta la velocità di filtrazione. Si osserva però che detto incremento è significativo solo se si assumono valori di spessore dell'acquifero inferiori a 750 m.

10.3.4. - Conclusioni

Al fine di eseguire la delimitazione delle aree di salvaguardia dei pozzi potabili è necessario partire da una corretta caratterizzazione idraulica del sistema acquifero, essendo questa propedeutica tanto alla scelta quanto alla successiva applicazione del più idoneo criterio di perimetrazione delle zone di rispetto.

Nello specifico contesto idrogeologico indagato, tale caratterizzazione conduce ad assimilare l'acquifero fratturato e carsico ad un mezzo poroso equivalente, consentendo di optare, ai fini della delimitazione delle zone di rispetto, per l'applicazione del criterio temporale. Peraltro tutti gli elementi che guidano la scelta del criterio da applicare, ovvero l'economicità, la comprensibilità, l'applicabilità e la modificabilità, inducono a preferire, nello specifico contesto indagato, il criterio temporale, consentendo quest'ultimo di pervenire ad una più efficace e razionale tutela delle risorse idriche sotterranee rispetto al criterio idrogeologico, cui le Linee Guida Nazionali del 2003 rinviavano limitatamente a contesti idrogeologici di particolare complessità.

La metodologia adottata per l'applicazione del criterio temporale è la modellazione numerica del flusso idrico sotterraneo associata al tracciamento delle linee di flusso. Detta modellazione è stata rea-

lizzata nell'ipotesi di moto di filtrazione sia piano sia tridimensionale, attraverso l'implementazione di codici di calcolo, specifici per i mezzi porosi, di riconosciuta affidabilità e sostanziale semplicità d'uso. Detti codici costituiscono uno strumento tecnicamente rigoroso per l'applicazione del criterio temporale, la cui validità ed efficacia sono, però, subordinate alla quantità e qualità dei dati di *input*; a tal riguardo va evidenziato che le incertezze insite nella definizione delle condizioni al contorno, dei valori dei parametri idrogeologici e delle caratteristiche costruttive dei pozzi e relative portate di emungimento si traducono in corrispondenti incertezze nella delimitazione delle aree di salvaguardia, così come le analisi parametriche eseguite in questo paragrafo dimostrano.

Le analisi parametriche eseguite dimostrano l'importanza di acquisire, in un opportuno intorno dei pozzi oggetto di tutela, una conoscenza dettagliata sia delle caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero, sia delle caratteristiche geometriche dei pozzi e relative modalità di condizionamento, ai fini della perimetrazione delle zone di rispetto dei pozzi potabili. Ciò vale sia per i pozzi potabili oggetto di studio sia per eventuali ulteriori opere di captazione esistenti sul territorio in prossimità dei pozzi da salvaguardare. Di particolare importanza risultano la definizione delle altezze piezometriche della falda indisturbata, della porosità efficace ed il coefficiente di permeabilità dell'acquifero, oltre che l'individuazione di eventuali eterogeneità ed anisotropie.

Sulla base dei risultati delle simulazioni numeriche condotte è lecito affermare che, in generale, l'ipotesi semplificativa di moto bidimensionale sovradimensiona le zone di rispetto dei pozzi potabili rispetto all'ipotesi, più aderente alla realtà, di moto tridimensionale. Le condizioni di moto bidimensionali rappresentano condizioni limite di comportamento che consentono una rappresentazione abbastanza semplificata della realtà, adeguata per la delimitazione dell'isocrona in presenza di sistemi idrogeologici semplici, ma del tutto inadeguata in presenza di sistemi complessi, per via dell'incapacità del modello di tener conto di talune caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero e costruttive dei pozzi, determinanti ai fini della valutazione cor-

retta delle velocità di filtrazione, quali la parziale penetrazione dei pozzi in falda, l'accentuata anisotropia verticale, la variabilità spaziale delle condizioni al contorno, l'eterogeneità ed anisotropie in direzione verticale. Nel contesto idrogeologico analizzato, infatti, l'isocrona relativa alla simulazione tridimensionale base risulta caratterizzata da dimensioni ridotte di circa il 30% rispetto alle dimensioni dell'isocrona ottenuta nella simulazione bidimensionale base, cui corrisponde una riduzione dell'area della zona di rispetto del 50% circa. Va infine evidenziato che la presenza di anisotropie verticali che comportano una riduzione del coefficiente di permeabilità verticale rispetto a quello orizzontale o di eterogeneità che comportano una riduzione del coefficiente di permeabilità degli strati di acquifero profondi, disposti sotto la base dei pozzi, comportano un avvicinamento della soluzione determinata in condizioni tridimensionali con quella determinata invece in condizioni piane.