

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale

Corso di Laurea di Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

Indirizzo: Difesa del Suolo e Prevenzione dai rischi Naturali



**Studio idrogeologico dell'acquifero carsico
dell'Altopiano dei Sette Comuni (Provincia di Vicenza)**

RELATORE: Ing. Paola GATTINONI

Tesi di Laurea di:

Giuliana Marta ZAVARONI

Matr. n. 800783

Anno Accademico 2014 -2015

SOMMARIO

La gestione della risorsa idropotabile è una tematica in divenire sempre più importante e problematica data l'insistenza di aree urbane in continua espansione sui bacini idrografici. L'ormai considerevole pressione antropica sulle acque di falda in pianura porta a considerare gli acquiferi montani una risorsa di interesse idropotabile strategico. Fra questi ultimi gli acquiferi carsici rappresentano una riserva per il territorio italiano non trascurabile considerata l'estensione dei massicci calcarei delle aree alpine e prealpine. Tali acquiferi sono però particolarmente delicati dal punto di vista quali-quantitativo, in quanto presentano caratteristiche di vulnerabilità elevata e quindi necessitano di un particolare grado di tutela. Per questo, una serie di normative e di accordi sono stati introdotti a livello internazionale in materia di protezione delle risorse idriche destinate al consumo umano.

Il presente lavoro di tesi sviluppa lo studio idrogeologico di un acquifero montano di tipo carsico ubicato nell'area prealpina del Nord-Est italiano. Lo scopo dello studio è stato quello di caratterizzare l'acquifero in esame, per poi valutarne diverse strategie di protezione.

A questo scopo lo studio si è articolato nelle seguenti fasi:

- 1) Si è definito il modello concettuale dell'acquifero, a partire dai dati disponibili in bibliografia, da alcune prove con tracciante e dal monitoraggio in continuo di una sorgente.
- 2) Si sono delimitate le zone di salvaguardia con diversi metodi: a) il metodo del tempo di dimezzamento della massima portata annuale, fondato sull'analisi della curva di svuotamento delle sorgenti; b) il criterio geomorfologico-strutturale EPIK, specifico per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi carsici; c) criterio cronologico tramite simulazione numerica deterministica.
- 3) Si è sviluppato un modello numerico 3D per simulare il flusso delle acque sotterranee sia in stazionario sia in transitorio finalizzato all'applicazione del metodo cronologico.

Secondo il modello concettuale desunto dal lavoro di caratterizzazione, l'acquifero funziona diversamente a seconda della tipologia e dell'entità della ricarica. Si evidenzia un periodo di disgelo con abbondanti deflussi di acqua povera in minerali, preceduto da una situazione di scarsa ricettività degli impulsi precipitativi a causa della presenza idrica in forma solida nell'epicarso, e seguito da un periodo estivo in cui la risposta agli impulsi è immediata e il funzionamento è a "pistonaggio".

Tramite la valutazione effettuata con il metodo del tempo di dimezzamento si osserva che l'acquifero è molto vulnerabile all'inquinamento. Le estensioni delle zone di protezione ricoprono l'intero bacino e, con il metodo geomorfologico, si definiscono in particolare zone di Tutela Assoluta anche in aree ben distanti dal punto di captazione a causa dell'immediata comunicabilità delle cavità carsiche superficiali con l'area di emergenza.

Il modello è stato tarato e calibrato su diversi set di dati e ha permesso di riprodurre il funzionamento dell'acquifero in regime stazionario e transitorio.

I tre metodi concordano nel definire le zone di salvaguardia che si estendono all'intero bacino di alimentazione e in particolare richiedono protezione maggiore nell'area centrale e settentrionale caratterizzata dalla presenza superficiale di punti d'infiltrazione carsici.

ABSTRACT

The drinkable water's management is a topic more than ever important and complex due to the growth of urban areas that insist on hydrographic basins. The remarkable anthropic influence on aquifer situated on level ground leads to consider those in the mountain a key resource of drinkable water. Among them karst aquifers represents a not negligible resource for the Italian area due to the significant extent of karst rocks in the Alps and Pre-Alps. These are particularly at risk, in a quantity and quality point of view, as they have features high in vulnerability due to their nature and therefore they need a specific protection. Because of this a considerable number of laws and transnational agreements exist to protect water basins that are needed for anthropic employment.

The present work develops the hydrogeological study of a mountain karst aquifer situated in the North-East Italian Pre-Alps. This study aim is to characterize the aquifer under exam and than to evaluate protection strategies and is structured in the following steps:

- 1) Throughout the analysis of data collected from a spring, using a tracer and continuous monitoring, but also with those taken from scientific literature, we define the aquifer theoretical model.
- 2) Protection areas are marked with different techniques: the chronological half-life method of the maximum annual flow rate, based on emptying function, and the geo-morphologic structural EPIK criterion, specific for the analysis of karst aquifer vulnerability.
- 3) A numerical 3D model is developed to simulate the flow of underground water both in steady and transient time.

On the basis of the theoretical model deduced from the characterization, the aquifer has a different mode of operation depending on the quality and the quantity of the reload. A thawing period is underlined with plentiful outflows of minerals-lacking water. This period is forerun by a state of low receptivity to precipitation caused by ice in epikarst and followed by a summery period in which the response to the rain impulse is instantaneous and the mode of operation is piston-like.

Through the evaluation made with half-life method a high exposure to contamination is observed; the protection areas established with the geo-morphologic criterion extend over the whole basin and Total Protection Areas are set also far away from the drawing spot due to the fast connection between karst surface cave with the emergency area.

The model has been calibrated with different data sets and allows to reproduce the functioning of the aquifer both in steady and transient mode.

Sommario

SOMMARIO	2
ABSTRACT.....	4
PREMESSA.....	10
1. LA PROTEZIONE DELLE RISORSE IDRICHESOTTERRANEE NELLE AREE MONTANE	12
1.1 Gli acquiferi delle zone montane: acquiferi carsici.....	13
1.2 Protezione della risorsa idrica “a tutto campo”: Carte di vulnerabilità	16
1.2.1 La vulnerabilità e la redazione di carte di vulnerabilità	16
1.2.2 Il metodo EPIK.....	19
1.2.3 Il metodo SINCTACS	24
1.2.4 Il metodo COP	30
1.3. Protezione della risorsa idrica “di punto”: Zone di salvaguardia.....	30
1.3.1. Le aree di salvaguardia della normativa italiana.....	32
1.3.2. Le aree di salvaguardia della normativa svizzera.....	36
2. Caso di studio: L’acquifero carsico dell’altopiano dei Sette Comuni.....	39
2.1 Inquadramento geografico	39
2.2 Inquadramento morfologico.....	40
2.3 Inquadramento strutturale	43
2.4 Inquadramento litologico	45
2.5 Inquadramento idrogeologico	48
CARATTERIZZAZIONE DELL’ACQUIFERO.....	56
3.1 Bilancio idrico.....	57
3.1.1 Aspetti climatici.....	57
3.1.2 Portate defluenti dalle sorgenti	59
3.1.4 Collegamento tra l’acquifero carsico prealpino e l’acquifero poroso della pianura veneta	62
3.1.4 Bilancio.....	62
3.2. Prove di tracciamento.....	63
3.3. Monitoraggio in continuo della sorgente Covol dei Veci.....	67
3.3.1 Inquadramento della captazione monitorata	67
3.3.2 Metodologia e strumenti per l’acquisizione dei dati	69

3.3.3. Analisi dei dati	70
3.3.4. Elaborazione delle registrazioni del monitoraggio.....	83
3.3.5. Conclusioni	87
4. DELIMITAZIONE DELLE ZONE DI SALVAGUARDIA.....	89
4.1. Redazione della carta delle vulnerabilità: applicazione del metodo EPIK.....	90
4.1.1. Determinazione dei parametri	91
4.1.1.2. Sviluppo dell'epicarso.....	92
4.1.1.2. Protezione del terreno di copertura.....	93
4.1.1.3. Condizioni d'infiltrazione.....	95
4.1.1.4. Sviluppo della rete carsica	99
4.1.2 Assegnazione dei pesi.....	100
4.1.3. Valutazione della vulnerabilità	101
4. 3. Delimitazione delle aree di salvaguardia delle sorgenti dell'Oliero	103
5 Modello numerico: implementazione con MODFLOW	107
5.1 Scelta dell'approccio numerico risolutivo	107
5.2 Caratteristiche del modello	108
5.2.1 Dominio spaziale	108
5.2.2 Dominio temporale	110
5.2.3 Condizioni iniziali e al contorno.....	110
5.2.4 Proprietà idrauliche del mezzo: Conducibilità Idraulica.....	114
5.3. Calibrazione e risultati del modello	117
6. CONCLUSIONI	120
BIBLIOGRAFIA	123
SITOGRAFIA	125

Elenco delle Figure

Figura 1: Schematizzazione di un sistema idrogeologico carsico.	20
Figura 2: Valori di soggiacenza e relativi punteggi del metodo SINCTACS.	25
Figura 3: Conducibilità idraulica e relativi punteggi nel metodo SICTACS.	28
Figura 4: Complessi idrologici e relativi intervalli di conducibilità.	29
Figura 5: Schema procedurale del metodo EPIK.	38
Figura 6: Inquadramento dell'area dell'acquifero dell'Altopiano dei Sette Comuni.	39
Figura 7: Inquadramento morfologico dell'Altopiano dei Sette Comuni.	42
Figura 8: Sezioni che evidenziano l'assetto strutturale dell'area in cui emerge l'Altopiano dei Sette Comuni. (Pilli et al., 2012).	43
Figura 9: Sezione geologica schematica dell'assetto strutturale dell'altopiano dei Sette Comuni (ZAMPIERI, 1995)	44
Figura 10: Sezioni idrogeologiche dell'acquifero prealpino e accenni sulla comunicabilità con l'acquifero poroso della pianura veneta.	53
Figura 11: Inquadramento dell'area dove scorre il Torrente Ghelpah.	56
Figura 12: Precipitazioni medie mensili registrate alle stazioni di Asiago, Marcesina e Lusiana durante il periodo 1994/2012.	58
Figura 13: schema della sorgente valclusiana Covol dei Veci.	60
Figura 14: Inquadramento dei maggiori esattori dell'acquifero dell'Altopiano dei Sette Comuni con relative portate medie	61
Figura 15: Sorgenti esaminate durante l'esperienza di tracciamento. La freccia indica la connessione del flusso idrico ipogeo dal punto di immissione (inghiottitoio nel T. Ghelpach) alle sorgenti dell'Oliero	64
Figura 16: Individuazione dell'arrivo del tracciante alle diverse sorgenti monitorate. (Club Speleologico del Proteo, 2010).	65
Figura 17: Andamento delle concentrazioni di tracciante risultante dalle registrazioni dei valori dell'analisi spettro – fluorimetrica dei campioni d'acqua di alcune sorgenti monitorate durante la prova di tracciamento (Laboratori Arpav di Vicenza, 2010).	66
Figura 18: Inquadramento della sorgente del monitoraggio Covol dei Veci con direzione delle linee di flusso	68
Figura 19: Scala delle portate della sezione di monitoraggio della sorgente Covol dei Veci, costruita a partire da due valori misurati durante il monitoraggio e altri tre misure di portata presenti in bibliografia.	70
Figura 20: Idrogramma della sorgente di Oliero dell'anno idrologico 2009.	71
Figura 21: Idrogramma della sorgente di Oliero dell'anno idrologico 2010.	71
Figura 22: Registrazioni del monitoraggio della portata della sorgente Covol dei Veci condotto dal Club Speleologico del Proteo a partire dal 2008.	73
Figura 23: Raffronto portata effluente dalla sorgente Covol dei Veci e precipitazione registrata alla stazione meteorologica di Asiago.	74
Figura 24: Andamento dei valori di conducibilità elettrica e temperatura registrati alla sorgente Covol dei Veci durante il monitoraggio condotto dal Club Speleologico del Proteo raffrontati con l'andamento della pressione espressa in scala logaritmica.	75
Figura 25: Risposta del deflusso dalla sorgente Covol dei Veci al singolo evento precipitativo (giorno 8 Agosto 2009)	77

Figura 26: Risposta all'evento precipitativo della prima metà di Settembre 2009. Livello di picco di 229 cm a seguito di 161 mm di pioggia cumulata.	77
Figura 27: Raffronto dell'andamento di conducibilità elettrica e portata dell'acqua defluente dalla sorgente Covol dei Veci nella stagione primaverile dell'anno 2010 del monitoraggio condotto dal Club Speleologico del Proteo. La concordanza del picco di portata e conducibilità elettrica tipica della risposta "a pistonaggio" dell'acquifero.	81
Figura 28: Andamento dei valori di registrazione della temperatura dell'acqua defluente dalla sorgente Covol dei Veci acquisiti durante l'anno 2010 del monitoraggio condotto dal Club Speleologico del Proteo.	82
Figura 29: Raffronto dei picchi di temperatura con quelli di portata defluente dalla sorgente Covol dei Veci nella stagione invernale. La concordanza di picco viene interpretata con una risposta a pistonaggio dell'acquifero agli eventi metereologici.	83
Figura 30: Sezione schematica del modello concettuale (Pilli et al.,2012) che evidenzia il collegamento tra i due acquiferi montano e di pianura.	89
Figura 31: Schema procedurale del metodo EPIK.	91
Figura 32: Carta del parametro Epikarst del metodo EPIK applicato all'Altopiano dei Sette Comuni	93
Figura 33: Carta del parametro Protective cover del metodo EPIK applicato all'Altopiano dei Sette Comuni.	95
Figura 34: Carta del parametro Infiltration del metodo EPIK applicato all'Altopiano dei Sette Comuni.	98
Figura 35: Carta del parametro Karsst Network Developmet del metodo EPIK applicato all'Altopiano dei Sette Comuni.	100
Figura 36: Carta di vulnerabilità dell'Altopiano dei Sette Comuni costruita con metodo EPIK	102
Figura 37: Classi di vulnerabilità intrinseca in funzione del tempo di dimezzamento o della velocità di flusso.	103
Figura 38: Carta delle zone di salvaguardia derivante dall'applicazione del metodo EPIK.	106
Figura 39: Sezione NW-SE dell'Altopiano dei Sette Comuni: Quota minima della base dell'acquifero principale (PTM)	109
Figura 40: Griglia del modello MODEFLOW	110
Figura 41: RICHARGE	111
Figura 42: Schema fuori scala della sezione N-S che rappresenta il dislivello tra l'acquifero prealpino e quello di pianura (Pilli et al.,2012)	112
Figura 43: Torrente Ghelpach.	114
Figura 44: Aree a diversa conducibilità idraulica dello strato superficiale del dominio del modello numerico.	116
Figura 45: Andamento delle linee piezometriche del modello in stazionario.	118
Figura 46: Bilancio del flusso idrico del modello implementato in stazionario	119
Figura 47: Confronto tra le portate osservate e calcolate per il modello in condizioni stazionarie	119
Figura 48: Andamento delle linee piezometriche del modello in stazionario.	119

PREMESSA

Il presente lavoro di tesi sviluppa lo studio idrogeologico di un acquifero montano di tipo carsico ubicato nell'area prealpina del Nord-Est italiano. Lo scopo dello studio è stato quello di caratterizzare l'acquifero in esame, per poi valutarne diverse strategie di protezione.

L'interesse applicativo per tale tematica deriva dalla rilevanza della risorsa idropotabile localizzata in un sistema carsico per sua natura particolarmente vulnerabile agli inquinamenti e all'eccessivo sfruttamento.

In primo luogo viene fornito un quadro generale sui criteri di delimitazione delle zone di salvaguardia e sulle problematiche caratteristiche degli acquiferi carsici.

Nel secondo capitolo si fornisce un inquadramento geografico, geologico, strutturale e idrogeologico dell'Altopiano contenente l'acquifero a scala di bacino.

Nel capitolo successivo si è definito il modello concettuale dell'acquifero, a partire dai dati disponibili in bibliografia, da alcune prove con tracciante e dal monitoraggio in continuo di una sorgente.

Nel quarto capitolo ci si è occupati di delimitare le zone di salvaguardia: inizialmente si è adottato il metodo del tempo di dimezzamento della massima portata annuale, fondato sull'analisi della curva di svuotamento delle sorgenti; quindi si è applicato il criterio geomorfologico strutturale con metodo EPIK, specifico per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi carsici. Il calcolo delle aree è condotto attraverso la creazione di mappe tematiche avvalendosi del programma ArcGIS della ESRI che ha permesso la sovrapposizione di queste per creare la carta delle aree a diversa vulnerabilità.

Infine il modello concettuale è stato poi implementato in un modello numerico 3D utilizzando il codice di calcolo alle differenze finite MODFLOW. La simulazione è stata eseguita in stazionario e in transitorio, grazie ai dati di registrazione di afflussi e deflussi del monitoraggio in continuo. Questo risultato è stato l'input per la delimitazione delle zone di salvaguardia con metodo cronologico.

1. LA PROTEZIONE DELLE RISORSE IDRICHE SOTTERRANEE NELLE AREE MONTANE

Le risorse idriche sotterranee delle zone montane sono le acque che circolano all'interno di mezzi rocciosi fratturati/carsici.

La qualità delle acque sotterranee, dipende dalle caratteristiche idrogeologiche del sistema contenitore, dall'origine delle acque (generalmente meteorica), e dal tipo e dalla velocità di flusso che interessa il suolo e le rocce del sistema. Durante il flusso intervengono processi chimici, fisici e biologici che alterano le caratteristiche originarie dell'acqua circolante nell'acquifero, quali temperatura, gusto, odore, presenza di microorganismi e determinano la presenza di una certa quantità di sostanze disciolte. Oltre a questi fenomeni naturali, esistono poi attività antropiche che determinano variazioni delle caratteristiche delle acque e nella maggior parte dei casi, provocano un peggioramento della qualità.

Quando si registrano delle concentrazioni di sostanza disciolte che superano i limiti massimi imposti dalle norme nazionali o internazionali, le acque circolanti nell'acquifero sono considerate inquinate; e i limiti dipendono dagli usi a cui è destinata la risorsa idrica, come il consumo, l'uso agricolo o industriale.

Per garantire la qualità e la quantità delle acque sotterranee, specialmente di quelle destinate al consumo umano, è necessario definire dei metodi per la protezione delle risorse idriche che prevedano limitazioni di attività e insediamenti ai fini di tutela dell'acqua che sgorga dalle sorgenti.

La letteratura sulle metodologie di approccio per la protezione delle risorse idriche di acquiferi montani è minore di quella sviluppata per le acque captate in pianura tramite pozzi, poiché si sono volute dapprima tutelare le acque circolanti nel sottosuolo di aree maggiormente esposte all'inquinamento e più densamente popolate. Tuttavia, l'ormai considerevole pressione antropica sugli acquiferi di pianura, porta a considerare le acque montane una risorsa di interesse idropotabile non trascurabile. In Italia le acque captate da sorgenti in ambiente montano costituiscono una parte rilevante del bilancio idrico nazionale in quanto, secondo i dati FAO, 2012, le sorgenti forniscono il 13% del volume d'acqua complessivamente captata (contro l'84% del volume captato tramite pozzi in pianura).

I metodi di protezione delle risorse idriche sotterranee si suddividono in due grandi categorie a seconda della diversa scala che contemplano:

- i metodi "a tutto campo" sono costituiti da attività conoscitive che permettono di decidere interventi e provvedimenti di difesa strutturali e non strutturali da attuare sul

territorio del bacino imbrifero e prevedono la messa in sicurezza di aree o la realizzazione di carte di vulnerabilità;

- i metodi “di punto” sono interventi e provvedimenti di difesa atti a proteggere la captazione, che focalizzano l’attenzione sul punto di emergenza della risorsa idrica, tramite il monitoraggio delle sorgenti o la perimetrazione delle zone di salvaguardia.

Tra i metodi rientra anche il monitoraggio che è un intervento dinamico che costituisce l’elemento conoscitivo di partenza per implementare qualsiasi misura di protezione, ma in zona montana è parzialmente applicabile in quanto è molto difficile disporre di una rete di controllo attorno alla captazione; la realizzazione di carte di vulnerabilità e la perimetrazione delle zone di salvaguardia invece, sono strumenti di difesa adattabili all’ambiente montano per le sorgenti idropotabili e vengono applicati a seconda della scala della protezione che si può attuare relativamente alle disponibilità finanziarie dedicate.

Allo scopo di protezione della qualità e quantità della risorsa idrica in zona montana, vengono riportati di seguito una descrizione delle caratteristiche idrogeologiche dei sistemi acquiferi montani e un quadro sui metodi di protezione della risorsa idrica che contengono gli stessi.

1.1 Gli acquiferi delle zone montane: acquiferi carsici

Gli acquiferi delle zone montane sono costituiti da mezzi rocciosi fratturati/carsici che custodiscono la risorsa idrica e la restituiscono all’esterno per emersione naturale tramite sorgenti.

Differiscono da quelli alluvionali, costituiti di terra sciolta, tipici delle zone di pianura, per caratteristiche di permeabilità: infatti sono caratterizzati da una conducibilità idraulica derivante dalle caratteristiche geometriche di fratture e condotti, piuttosto che dalla porosità del terreno. Presentano quindi un elevato grado di eterogeneità che rende difficile lo studio della dinamica di circolazione idrica ipogea.

Gli acquiferi montani sono costituiti da un ammasso roccioso e da vuoti generati da fenomeni di raffreddamento, stratificazione, scistosità (che formano discontinuità primarie) oppure da fratture e faglie di origine tettonica, e da carsismo (che sono discontinuità acquisite); e accolgono al loro interno un flusso idrico che viene influenzato dalle caratteristiche geometriche del reticolo di tali vuoti.

Dal punto di vista idrogeologico, gli acquiferi costituiti da materiale roccioso, sono mezzi complessi molto difficili da modellizzare: infatti, mentre l’ammasso roccioso è supposto in prima approssimazione impermeabile rispetto ai vuoti che presenta; il reticolo fessurativo / carsico

presenta caratteristiche geometriche riferite alle singole imperfezioni presenti nella roccia dell'intero ammasso che sono impossibili da indagare singolarmente.

Le caratteristiche dei vuoti sono: l'apertura e la rugosità, che misurano lo spazio effettivo in larghezza in cui può scorrere l'acqua all'interno di ogni discontinuità; la frequenza delle discontinuità, che provoca variabilità spaziale del flusso a causa della sua spiccata eterogeneità areale e in profondità; la giacitura che determina l'orientazione del flusso a prescindere dalla direzione di permeabilità; e la persistenza intesa come l'estensione delle discontinuità nell'intero acquifero.

Esse sono responsabili dell'infiltrazione degli apporti meteorici, del flusso e della velocità di circolazione, quindi della qualità delle acque ipogee.

Se si considerano complessi idrogeologici con una circolazione idrica per porosità fissurale priva di condotti di dimensioni maggiori, è possibile modellare l'acquifero con uno o più continui equivalenti a seconda della struttura idrogeologica che dà luogo alla emergenza sorgentizia; e sono corrispondenti alla o alle famiglie di discontinuità dalle caratteristiche di permeabilità uniformi basate su rilievi e prove di campagna.

Invece per tutelare gli acquiferi in roccia che presentano una rete di condotti di origine carsica, oltre alle fessure diffuse tipiche di qualsiasi ammasso roccioso, ci si deve basare su una descrizione delle caratteristiche intrinseche che permetta di ricostruire la direzione e la velocità di circolazione in condotti di svariate dimensioni, anche molto elevate. Per tali acquiferi quindi, si usa piuttosto un approccio che suddivide l'intero ammasso in volumi dalle caratteristiche di flusso uniformabili che, seguendo la schematizzazione in verticale, può essere espressa dai seguenti blocchi: la superficiale d'alimentazione, la zona non satura, la zona satura, la base impermeabile, l'area di emergenza.

Gli acquiferi carsici sono una particolare categoria di acquiferi rocciosi rappresentata da quelli soggetti al fenomeno di carsismo che genera all'interno dell'ammasso fratturato ulteriori vuoti anche molto ampi. Sono particolarmente interessanti nella trattazione della protezione delle risorse idriche montane perché, oltre a rappresentare un'importante riserva idropotabile per il territorio nazionale, considerata l'estensione dei massicci calcarei delle aree alpine e prealpine, presentano caratteristiche di vulnerabilità molto elevate per loro natura e quindi necessitano di un elevato grado di tutela.

I massicci carsici sono importanti serbatoi idrici naturali dove l'acqua scorre con velocità molto differenti fino a essere drenata dalle sorgenti.

Sono costituiti da ammassi di roccia soggetti a un processo di dissoluzione chimica e fisica che genera complesse e profonde cavità in superficie e nel sottosuolo determinanti una struttura

con elevata anisotropia e notevole eterogeneità: essa è rappresentabile come una rete di condotti gerarchizzati ad alta permeabilità, dalla geometria complessa e variegata, circondata da un ammasso roccioso continuo a permeabilità bassa funzione della sua porosità; sovrastata da un territorio arido dovuta alla totale assenza deflussi idrici superficiali permanenti.

Infine presentano sorgenti che drenano portate direttamente dipendenti dalle precipitazioni e estremamente variabili, a causa della velocità con cui l'acqua defluisce.

Tale struttura comporta una diretta penetrazione degli afflussi meteorici nel sottosuolo, e quindi fa sì che una grossa quantità d'acqua possa infiltrarsi rapidamente nella rete di condotti ipogei, senza che un terreno di tipo poroso attenui la diffusione nell'acquifero. Nella rete di condotti ad alta permeabilità le velocità di flusso delle acque sotterranee sono molto variabili e possono raggiungere valori elevati, fino a diversi chilometri al giorno, in relazione alla diversa geometria dei condotti in cui l'acqua defluisce senza molte resistenze. Presentano quindi velocità di flusso idrico molto maggiori di quelle governate dalla struttura degli acquiferi porosi e per questo possono degradarsi maggiormente in termini qualitativi e quantitativi.

I sistemi carsici appaiono dunque vulnerabili in primo luogo nei confronti delle sostanze inquinanti che entrano in contatto con la risorsa idrica: eventuali sostanze esterne alteranti si propagano in soluzione all'interno dei condotti principali dell'acquifero senza incontrare molti ostacoli all'infiltrazione e al deflusso; cosicché l'attenuazione dei contaminati da parte della roccia è ridotta. Ciò non succede per la falda costituita da un mezzo poroso di tipo alluvionale che ha una capacità di auto depurazione maggiore di un acquifero con un deflusso governato da una rete di condotti perché il terreno consente un tipo di flusso più idoneo alla ritenzione di particelle estranee al flusso d'acqua.

In secondo luogo, i sistemi carsici sono considerati vulnerabili allo sfruttamento eccessivo della risorsa idrica che viene prelevata. Un utilizzo eccessivo e incontrollato delle riserve delle zone sature profonde dell'acquifero infatti può essere un pericolo perché esse a volte si muovono molto lentamente e richiedono anni o decenni per essere sostituite e un emungimento eccessivo può compromettere per sempre lo sfruttamento dell'intero acquifero.

In generale terreni dove l'acqua circola lenta sono considerati meno vulnerabili di sistemi in cui la circolazione idrica è veloce per cui strettamente influenzata dagli apporti esterni e con una possibilità di miscelazione ridotta.

La salvaguardia di ambienti soggetti a carsismo, per i quali è di fondamentale importanza la creazione e la corretta gestione di riserve naturali e, più in generale, di aree di protezione ambientale, risulta strategica per garantire a tutti, anche nel prossimo futuro, la disponibilità di acqua per gli usi umani.

1.2 Protezione della risorsa idrica “a tutto campo”: Carte di vulnerabilità

Le carte di vulnerabilità sono uno strumento non strutturale di difesa “a tutto campo” della risorsa idrica da attuare sull’intera area di ricarica di un acquifero.

Sono carte atte a fornire gli obiettivi per interventi di prevenzione e di protezione oltre che fornire indicazioni di tipo programmatico per la localizzazione di nuovi impianti industriali, discariche, opere di captazione.

Costituiscono un sistema di protezione della risorsa idrica sotterranea a scala di bacino che in zona montana risulta particolarmente utile a causa del legame diretto e immediato della sorgente con l’intera area di alimentazione riscontrabile soprattutto nei mezzi carbonatici carsificati; ovviamente se il bacino montano è interessato dalla presenza di attività antropiche.

Gli acquiferi carsici sono sistemi di ammassi rocciosi interessati da circolazione idrica, vulnerabili per loro natura. Presentano infatti una struttura fortemente eterogenea con permeabilità variabile che può essere anche molto elevata, dovuta all’azione del fenomeno carsico, a differenza degli acquiferi in terra o roccia; e questa è responsabile dell’elevato grado di vulnerabilità agli inquinanti e, anche se in misura minore, allo sfruttamento della risorsa idrica dell’acquifero.

Di seguito quindi si esprime il concetto di vulnerabilità in modo da focalizzare l’attenzione sugli aspetti da indagare per la redazione delle carte di vulnerabilità; e successivamente si espongono alcuni metodi per la redazione delle carte di vulnerabilità ambientale usati nell’ambito di acquiferi montani carsificati.

1.2.1 La vulnerabilità e la redazione di carte di vulnerabilità

Esistono tre diverse accezioni del termine vulnerabilità:

Si definisce vulnerabilità intrinseca o naturale di un acquifero all’inquinamento *“la suscettibilità specifica dei sistemi acquiferi, nelle loro diverse parti componenti e nelle diverse situazioni geometriche e idrodinamiche, ad ingerire e diffondere, anche mitigandone gli effetti, un inquinante fluido o idroveicolato tale da produrre impatto sulla qualità dell’acqua sotterranea, nello spazio e nel tempo”* (M.Civita,1987). Secondo questa definizione la vulnerabilità intrinseca di un acquifero dipende esclusivamente dalle sue condizioni naturali, superficiali e sotterranee, prescindendo dalla effettiva presenza di fonti di inquinamento.

Ma questo concetto non ha un contenuto applicativo e pianificatorio: Esso l’acquista quando la vulnerabilità intrinseca viene associata ai “Centri Di Pericolo” (intesi come potenziali fonti d’inquinamento) esistenti nel territorio in esame, e dei quali si pianifica la realizzazione. Si parla quindi di vulnerabilità integrata.

Tale concetto può essere ampliato ulteriormente se si considera la vulnerabilità naturale dell'acquifero in rapporto invece alla singola tipologia d'inquinante definendo la vulnerabilità efficace. Questa seconda definizione tiene conto del grado di danneggiamento che la risorsa subisce in funzione della qualità dell'acquifero intesa come capacità a rimanere immutato durante l'interazione con il contaminante. Per cui la vulnerabilità efficace dipende dalle caratteristiche di interazione oltre che dalle condizioni naturali dell'acquifero e tiene conto della capacità di auto depurazione del mezzo attraversato.

Tuttavia non è conveniente dal punto di vista temporale e finanziario compiere una valutazione di vulnerabilità relativa al tipo singolo di inquinamento, anche perché questo è difficilmente individuabile a priori e dipende da una numerosissima serie di fattori.

Nel presente studio, per l'individuazione dei parametri per la redazione delle carte di vulnerabilità si contempla la vulnerabilità intrinseca di un corpo idrico sotterraneo come funzione di diversi parametri quali la idrolitologia e struttura del sistema idrogeologico, la natura del suolo, il processo di ricarica, il flusso sotterraneo, i processi di interazione idrogeochimica.

La vulnerabilità delle idrostrutture carsificate è legata alla struttura non omogenea e non isotropa e può essere schematizzata come una rete di condotti ad alta permeabilità che presenta una forte gerarchizzazione dei rami dovuta alle tempistiche lente e progressive dei processi carsici; circondata da un ammasso roccioso a permeabilità bassa.

Queste particolari morfologie, proprio in quanto tendono a costituire vie preferenziali da e per il sottosuolo delle acque piovane, possono con altrettanta facilità trasportare sostanze inquinanti in grado di rendere inutilizzabili gli acquiferi che contribuiscono ad alimentare.

Una carta di Vulnerabilità intrinseca del territorio di un acquifero viene costruita elaborando i dati provenienti da più mappe tematiche che vengono sovrapposte in modo da ottenere i valori di vulnerabilità.

Secondo la definizione di Massimo Civita (1987) *“ una carta della vulnerabilità intrinseca offre uno scenario statico che territorizza la suscettibilità specifica del sistema acquifero, nelle sue diverse parti componenti e nelle diverse situazioni geometriche ed idrodinamiche, ad ingerire e diffondere, anche mitigandone gli effetti, un contaminante fluido idroveicolato tale da produrre impatto sulla qualità dell'acqua sotterranea, nello spazio e nel tempo”*.

Evidenzia il grado di esposizione delle falde alle contaminazioni, per fattori naturali e antropici in funzione di una serie di processi che hanno luogo nel sottosuolo, al di sotto del punto e/o zona d'impatto. Questo insieme di processi può essere suddiviso in tre principali fenomeni:

- infiltrazione efficace attraverso la superficie dell'acquifero, legata alla morfologia della superficie topografica, con l'annessa capacità di auto depurazione del suolo o del terreno di copertura;
- spostamento dell'acqua e del contaminante idroportato attraverso l'insaturo sino alla superficie piezometrica dell'acquifero, legata alla conducibilità idraulica e alla soggiacenza;
- dinamica del flusso sotterraneo e del contaminante idroportato nella zona satura dell'acquifero, legata al gradiente idraulico;
- abbattimento della concentrazione dell'inquinante fluido o idroportato nella zona di saturazione che determina la capacità di attenuazione dell'impatto inquinante propria del sistema acquifero.

Questi processi sono regolati da parametri propri della situazione idrogeologica e antropica, e quindi sono funzione della zona d'interesse. L'azione di attenuazione esercitata dall'insaturo è dovuta alle numerose interazioni chimiche, fisiche e biologiche tra suolo, acque sotterranee ed inquinanti, il cui impatto viene notevolmente mitigato.

Fra i metodi per la valutazione della vulnerabilità intrinseca degli acquiferi all'inquinamento (raggruppabili in tre grandi famiglie tipologiche: zonazione per aree omogenee; valutazione per modelli numerici; per sistemi parametrici; sviluppati a partire dagli anni '60) si considerano quelli per sistemi parametrici.

I metodi parametrici per l'individuazione delle aree dove è necessario adottare misure cautelative nell'uso del suolo si sviluppano secondo il seguente schema:

1. Vengono selezionati gli attributi sui quali effettuare la valutazione della vulnerabilità e si discretizza l'area di valutazione con una maglia a elementi regolari;
2. a ciascun parametro e ad ogni elemento della maglia di discretizzazione, viene assegnato un punteggio arbitrario in funzione del valore fisico del parametro e un peso moltiplicatore che evidenzia l'importanza dell'attributo nel contesto della valutazione di vulnerabilità;
3. tramite una stringa di pesi codificata si calcola il valore di vulnerabilità intrinseca di ogni elemento, valore che può essere più o meno quantitativo e qualitativo a seconda del sistema utilizzato, e poi la si normalizza:

$$V_i = \sum_i P_i W_i \quad \text{e} \quad V_n = \frac{V - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} * 100 ;$$

I sistemi parametrici si suddividono in: Sistemi a matrice (MS); Sistemi a punteggio semplice (RS); sistemi a punteggi e pesi (PCSM); Sistemi di valutazione d'impatto ambientale (EES); e nel

presente studio si considerano i sistemi a pesi e punteggi (PCSM).

Il primo PCSM messo a punto per la valutazione di vulnerabilità degli acquiferi è il metodo DRASTIC dell'USEPA (1983,1987): il nome del metodo è un acronimo formato con le iniziali dei sette parametri che lo caratterizzano ossia Depth to water, net Recharge, Aquifer media, Soil media, Topography, Impact of vadose zone, hydraulic Conductivity of the aquifer. A ciascun parametro si attribuisce un punteggio compreso tra 1 e 10 che viene moltiplicato poi per un peso variabile tra 1 e 5; sono utilizzate due linee di pesi moltiplicatori, la prima nei casi standard e la seconda nell'eventualità in cui sussista pericolo di inquinamento da fitofarmaci. L'indice di vulnerabilità si ottiene come sommatoria dei prodotti tra punteggi e pesi dei sette parametri.

Sulla base dell'esperienza di DRASTIC, partendo dalla necessità di adattare tale metodo alle numerosissime realtà idrogeologiche italiane, è stato elaborato dal GNDICI-CNR (Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche del Centro Nazionale per le Ricerche, Civita et al.) il metodo SINTACS descritto nel paragrafo seguente.

Oltre a quest'ultimo metodo saranno descritti altri due metodi a punteggi e pesi applicati nella protezione della risorsa idrica in area carsica si basa sullo studio della vulnerabilità di corpi idrici sotterranei in funzione di diversi parametri che considerano in particolare la litologia, la struttura e la geometria dell'idrostruttura, la natura dei suoli, la tipologia della vegetazione, la geometria delle coperture, i processi di carica e scarica del sistema idrogeologico, i meccanismi di mitigazione dei contaminanti che entrano nel sistema.

1.2.2 Il metodo EPIK

Il metodo EPIK è un sistema multi – attributo a punteggi e pesi che permette di calcolare un fattore di protezione che differenzia le zone a seconda del grado di tutela che necessitano, sommando i punteggi pesati di quattro attributi che descrivono la circolazione nell'acquifero.

E' una modalità di analisi sviluppata in Svizzera per studiare e mappare la vulnerabilità intrinseca degli acquiferi carsici presenti nel Paese.

La nascita del metodo è una diretta conseguenza dei particolari processi di propagazione dell'inquinante in un acquifero carsificato che presenta una struttura fortemente eterogenea e un'azione filtrante molto più bassa rispetto a quella di acquiferi costituiti da materiale incoerente. La struttura di questi acquiferi può essere considerata una rete di condotti ad alta permeabilità circondata da un gran volume di roccia a permeabilità bassa.

Il metodo prende in considerazione lo specifico comportamento basato su un particolare modello concettuale di sistema idrogeologico carsico (Figura 1) che include:

- una rete di condotti ad elevata conducibilità idraulica ($k > 10/1$ m/s) in cui si verifica circolazione verticale, che convoglia il flusso idrico circolante nella zona satura o drena la risorsa verso uno o più punti di fuoriuscita;
- un sistema di ricarica costituito da punti d'infiltrazione concentrata direttamente collegati con la rete carsica attraverso il quale si può avere un ingente ricarica dell'acquifero;
- un mezzo altamente fratturato detto epicarso che convoglia il resto della ricarica dell'acquifero in modo molto più lento, che si trova immediatamente al di sotto del suolo di copertura;
- un suolo di copertura che sovrasta l'ammasso roccioso in alcune aree e trattiene più o meno l'acqua prima che s'infiltri.

E' un metodo geomorfologico che tiene conto del tempo che impiega l'acqua ad infiltrarsi e classifica la vulnerabilità intrinseca degli acquiferi carsici all'inquinamento, fornendo un'informazione circa la veicolazione dell'inquinante dalla superficie al sottosuolo.

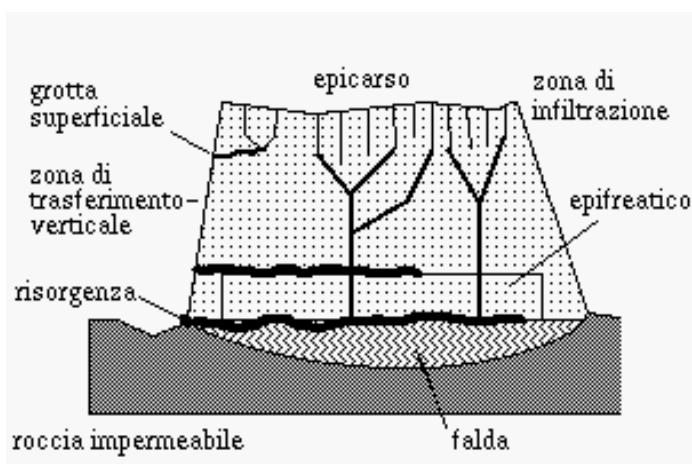


Figura 1: Schematizzazione di un sistema idrogeologico carsico.

Il nome (Doerfliger N., Jeannin PY, Zwahlen F., 1999) rappresenta l'acronimo dei quattro parametri usati per la sua valutazione, derivanti dalla schematizzazione del sistema carsico con un modello idrogeologico concettuale. Il bacino di alimentazione della captazione viene suddiviso in quattro superfici elementari caratterizzate e indicizzate secondo i quattro criteri considerati dal metodo che corrispondono a quattro caratteristiche che condizionano il flusso dell'acqua e il trasporto attraverso il sistema carsico:

- Epikarst (**E**);
- Protective Cover (**P**);
- Infiltration Condition (**I**);
- Karst Network Development (**K**).

Il modello idrogeologico concettuale che schematizza il sistema carsico nel metodo EPIK include innanzi tutto la zona dell'Epicarso.

L'**epicarso** è la porzione che si trova al di sotto del terreno consolidato, se questo è presente, costituita di roccia calcarea che tende a fratturarsi e fessurarsi a causa della dissoluzione delle rocce e della formazione di pressioni in prossimità della superficie del terreno. A causa della bassa conducibilità della roccia sottostante, che costituisce una barriera capillare caratterizzata da una lenta percolazione in fessure strette, l'epicarso è la zona in cui si formano degli acquiferi temporanei che lentamente drenano l'acqua fino alla zona satura. Può essere fortemente eterogeneo e quindi difficilmente analizzabile nel dettaglio; esso viene indirettamente caratterizzato a partire dalle geomorfologie individuabili nella cartografia esistente, come ad esempio, doline, faglie, inghiottitoi, grotte.

Il parametro E considera gli effetti in termini di immagazzinamento delle precipitazioni meteoriche (pioggia e neve) e di concentrazione del flusso attraverso i condotti verticali ed è quantificato secondo tre classi (come mostrato in Tabella 1):

Epicarso	Classe Epikarst	Morfologia Carsica
Altamente sviluppato	E1	Shaft, sinkholes o doline (da tutti i tipi di genesi), polje, campi karren, sorgenti, grotte, inghiottitoi
Moderatamente sviluppato	E2	Zone intermedie nell'allineamento di doline, valli secche, codule
Piccolo o Assente	E3	Assenza di fenomeni morfologici propri dell'ambiente carsico, zone a bassa densità di fratturazione

Tabella 1: Classi dell'attributo Epikarst. Tratta da Tesi di dottorato.

L'epicarso può trovarsi al di sotto di un terreno di copertura indicizzato dal secondo attributo del metodo:

la **protezione dei terreni di copertura** è l'attributo che descrive il terreno non consolidato al di sopra dell'acquifero che fornisce uno scudo all'infiltrazione diretta dell'acqua meteorica nell'epicarso ed è valutato a seconda del suo spessore. Include sia il suolo che strati geologici di copertura come i depositi quaternari o altri orizzonti non carsici, come argilla e arenarie. La sua rilevanza nella valutazione della vulnerabilità sta nella grande capacità d'attenuazione degli inquinanti dipendente dalle caratteristiche dei suoli quali spessore, tessitura/struttura, contenuto di sostanze organiche e minerali d'argilla, grado di saturazione dell'acqua e conducibilità idraulica dell'inquinante; ma gli elementi base per la classificazione dello strato

sono lo spessore della copertura e a sua conducibilità idraulica dai quali si distinguono quattro classi (Tabella 2):

Copertura del suolo	Classi parametro P	Caratteristiche	
		Se il suolo giace sul calcare o su strutture geologiche ad alta permeabilità, per esempio detriti di falda e depositi glaciali	Se il suolo giace su strutture geologiche a bassa permeabilità, per esempio argilla e silt
Assente	P1	0–20 cm di suolo	0-20 cm di suolo su strutture che hanno uno spessore minore di 1 m
Intermedia P1-P3	P2	20-100 cm di suolo	20-100 cm di suolo su strutture che hanno uno spessore minore di 1 m
Intermedia P2-P4	P3	100-200 cm di suolo	100 cm di suolo e spessore della struttura geologica a bassa permeabilità >1m
Presente	P4	>200 cm di suolo	>100 cm di suolo e struttura detritica di bassissima conducibilità idraulica o spessore dello strato impermeabile (per esempio argilla) >8 m

Tabella 2: Classi dell'attributo Protective cover. Tratta da Tesi di dottorato.

Il terzo parametro del metodo indicizza l'**infiltrazione** intesa come tipo di ricarica che alimenta l'acquifero. Permette di classificare diverse porzioni di superficie dell'acquifero a seconda del modo con cui l'acqua esterna si infila che può essere più o meno concentrato o diffuso: l'acqua di precipitazione, raggiunto il suolo, tende a concentrarsi lungo delle direzioni preferenziali dando luogo a corsi d'acqua perenni o meno; quella invece che non si concentra lungo i corsi d'acqua, costituisce la ricarica diffusa per l'acquifero carsico.

Tale parametro valuta la vulnerabilità dell'acquifero alla contaminazione in funzione delle condizioni di infiltrazione che dipendono in particolare della pendenza del territorio e della copertura vegetale, ovvero l'uso del suolo.

Le aree che presentano punti d'ingresso concentrati sono classificate con una classe a cui corrisponde il valore di protezione minore e la massima vulnerabilità; le aree che in funzione dell'uso del suolo e della pendenza presentano un tipo di infiltrazione più diffusa invece appartengono a classi meno vulnerabili.

Ogni area è classificata secondo le quattro categorie riportate nella tabella seguente (Tabella 3):

Condizioni d'infiltrazione	Classi di I	Caratteristiche
Concentrata	I1	Correnti temporanee o perenni – correnti temporanee o perenni alimentanti inghiottitoi e doline – aree d'influenza (codule) di queste correnti appena menzionate, includenti sistemi di drenaggio artificiale
Intermedia I1-I3	I2	Aree d'infiltrazione concentrata (senza sistemi di drenaggio artificiale) con pendenza >10% per campi coltivati, e >25% per prati e pascoli
Intermedia I2-I4	I3	Aree d'infiltrazione concentrata (senza sistemi di drenaggio artificiale) con pendenza
diffusa	I4	Il resto del territorio

Tabella 3: Classi dell'attributo Infiltrazione.

Attraverso l'epicarso la ricarica dell'acquifero giunge alla rete di condotti descritta dall'attributo K.

L'attributo **“sviluppo della rete carsica”** modella il movimento idrico, veicolo degli eventuali contaminanti, che avviene all'interno dell'ammasso roccioso profondo: descrive l'insieme dei condotti principali scavati dal processo carsico che comprende cunicoli e caverne, fessure e fratture, condotte e canali preferenziali del flusso ipogeo. Esso contribuisce più o meno al valore di vulnerabilità da calcolare a seconda dello sviluppo e dell'interconnessione dei condotti e in funzione del grado di dissoluzione che ha subito la roccia. Ogni tipo di rete carsica può essere classificata secondo le tre categorie descritte nella Tabella 4.

Rete carsica	Classi di K	Caratteristiche
Rete carsica ben sviluppata	K1	Presenza di rete carsica ben sviluppata (rete con ampiezza dei canali dal decimetro al metro)
Rete carsica poco sviluppata	K2	Presenza di una rete carsica poveramente sviluppata (piccola rete di condotti o poveramente connessi o apertura dei condotti minore del decimetro)
Solo acquifero fratturato	K3	Presenza di sorgenti di emergenza attraverso terreni porosi. Acquiferi non carsici e solo fessurati

Tabella 4: Classi dell'attributo K del metodo EPIK.

Per l'intera area d'interesse si usa scegliere un unico valore dell'attributo K perché non è reperibile uno studio di dettaglio dello sviluppo della rete carsica per questioni sia economiche, sia logistiche, dal momento che alcune cavità della rete si sviluppano per moltissimi chilometri o sono d'impossibile accesso.

La procedura adottata per la valutazione della vulnerabilità col metodo EPIK è costituita di due momenti: uno dedicato agli *Attributi del fattore di protezione*; l'altro riguarda il *Calcolo del fattore di protezione – classe di vulnerabilità*.

Quindi, dopo aver classificato ogni porzione del territorio considerato secondo i quattro attributi del metodo, si assegna un valore a ciascuno di essi che cresce fino a quattro, a partire da uno, al decrescere della vulnerabilità; e si quantifica l'influenza che ogni parametro esercita ai fini della vulnerabilità finale, assegnando un coefficiente di peso per ogni attributo. Infine si calcola il *fattore di protezione* per ogni cella rappresentante una porzione del territorio di alimentazione. Per punteggi elevati degli attributi si ha una vulnerabilità minore dell'area studiata, per cui è più intuitivo calcolare il valore del fattore di protezione rispetto all'indice di vulnerabilità: con punteggi alti degli attributi si ottiene un alto valore di protezione.

1.2.3 Il metodo SINCTACS

Il metodo SINTACS è un sistema a parametri e pesi per la valutazione della vulnerabilità di un acquifero che prende in considerazione 7 parametri.

Nasce sulla base del primo metodo di valutazione della vulnerabilità degli acquiferi a punteggi e pesi nominato DRASTIC dell'USEPA (Aller et al. 1987), partendo dalla necessità di adattare il primo alle diverse realtà idrogeologiche italiane.

I 7 attributi considerati sono: la Soggiacenza della falda (**S**), l'Infiltrazione efficace (**I**) in funzione del substrato e della copertura, Il Non saturo (**N**) dall'azione auto depurante, la Tipologia della copertura (**T**), l'Acquifero (**A**) inteso come i suoi caratteri idrogeologici, la Conducibilità idraulica (**C**), la Superficie topografica (**S**) che comprende l'acclività e le caratteristiche morfologiche.

L'area considerata deve essere discretizzata, generalmente con elementi finiti quadrati di una griglia regolare; e per ogni quadrato areale si devono calcolare i valori dei suddetti parametri.

A ognuno dei parametri è attribuito un punteggio da una scala che va da 1 a 10 a seconda delle caratteristiche litologiche, morfologiche, idrogeologiche, idrauliche, pedologiche dell'area, considerate tramite gli attributi.

La **Soggiacenza** indica la profondità della superficie piezometrica misurata dal piano campagna e quantifica, in particolare, il tempo di transito di un contaminante disciolto nell'acqua nello strato insaturo dell'acquifero. Serve a considerare la durata delle azioni di auto depurazione e d'attenuazione dello strato a prescindere dalle sue condizioni idrogeologiche.

La superficie piezometrica oscilla come il regime delle acque e presenta escursioni spaziali da punto a punto in funzione della diversa carsificazione dei volumi rocciosi interessati dalle acque, presentandosi quindi come una superficie irregolare frutto del variare della trasmissività idraulica.

Nella pratica si può ottenere raccordando le quote delle sorgenti con quelle delle acque freatiche riconosciute durante il regime normale nell'acquifero carbonatico evitando i picchi eccezionali.

Il punteggio del parametro del metodo si attribuisce secondo il decremento iperbolico riportato nell'abaco di Figura 2, che assegna punto massimo alle acque superficiali e minimo per quelle che si riscontrano a una profondità di 100 metri.

Nel caso di acquiferi carsificati il metodo è modificato moltiplicando i valori proposti per 3 dove si riscontra un carsismo giovane, per 5 se è di tipo avanzato oppure per 10 se il carsismo dell' è di tipo maturo.

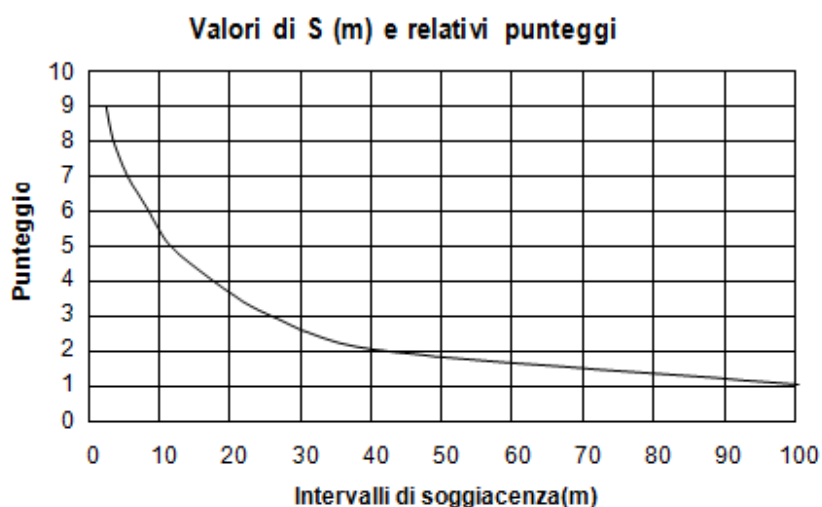


Figura 2: Valori di soggiacenza e relativi punteggi del metodo SINCTACS.

L'**infiltrazione efficace** è l'attributo che indicizza la quantità d'acqua che entra nel sistema; ed è importante nella valutazione della vulnerabilità perché da esso dipende il trascinarsi e la diluizione del contaminante inizialmente nell'insaturo poi nella porzione satura. Esso dipende sia da condizioni meteorologiche che dalla geomorfologia e idrogeologia dell'acquifero pertanto operativamente viene calcolato utilizzando sia la precipitazione efficace sia il cosiddetto indice d'infiltrazione determinato in base alle caratteristiche del suolo se è presente con spessore significativo o in base alla litologia superficiale.

Per definire il valore dell'indice il metodo propone due tabelle valide in caso di suolo assente o esiguo oppure in caso di suolo più potente del metro; d'altra parte se in superficie è presente invece un corpo idrico che scambia acqua con l'acquifero sottostante o dove sono presenti aree agricole, si dovrebbe correggere incrementandolo.

Nel caso di acquiferi carsificati il metodo è modificato moltiplicando i valori di infiltrazione efficace per 0.1, 0.2, 0.3 in funzione dei tre tipi di carsismo (cioè giovane, avanzato e maturo).

Il **non saturo** è il parametro che quantifica l'azione dei processi chimico fisici di auto depurazione e di attenuazione dell'inquinamento che avviene nell'insaturo. Esso dipende dallo spessore della roccia compresa tra il sottosuolo e la zona satura dell'acquifero (o base del livello confinante superiore per acquiferi in pressione); e dalle sue condizioni litologiche, ovvero, granulometria, presenza di limi o argille, per le rocce permeabili e fatturazione o carsismo se le rocce sono compatte.

Complessi idrogeologici	Parametro N
Alluvioni grossolane	6-9
Calcari carsificati	8-10
Calcari fessurati	4-9
Dolomie fessurate	2-5
Alluvioni medio-fini	3-6
Complessi sabbiosi	4-7
Arenarie, conglomerati	5-8
Plutoniti fessurate	3-5
Alternanze (Flysh)	2-5
Vulcaniti fessurate	5-10
Marne, Argilliti	1-2
Morene grossolane	4-6
Morene medio-fini	2-4
Argille, limi, torbe	1-2
Piroclastiti diverse	2-5
Metamorfiti fessurate	2-6

Tabella 5: Intervalli di punteggi per il parametro N in base alla litologia

In ambiente carsico tuttavia tale parametro ha un'influenza bassa o nulla sulla protezione, a prescindere dallo spessore.

La **tipologia** dei suoli di copertura rappresenta un parametro fondamentale nella mitigazione dell'impatto dei contaminanti e nella vulnerabilità intrinseca degli acquiferi dal momento che quantifica la prima linea di difesa del sistema acquifero. È influenzata da due diversi gruppi di parametri:

- il primo caratterizza processi di assorbimenti, filtrazione, capacità di drenaggio, grado di umidità e infiltrazione (granulometria, tessitura -spessore effettivo -massa volumica -porosità totale -quantità d'acqua disponibile per la vegetazione -conducibilità idraulica);
- il secondo gruppo invece è costituito da parametri che influiscono sul grado di adsorbimento di un composto chimico da parte del suolo (-Il pH -La capacità di scambio cationico -Il contenuto di sostanza organica -Il contenuto di argilla).

Suoli	Punteggio T
Sottile o assente	10
Ghiaia pulita	9,5-10
Sabbia pulita	8,9-9,5
Sabbioso	8-8,5
Torba	7,5-8,2
Argillo-sabbioso	6,2-7
Franco sabbioso	5,5-6
Franco-sabbioso-limoso	4,5-5,2
Franco	4-5
Franco-limoso	3,5-4,2
Franco limo-argilloso	3-4
Franco-argilloso	2-3
Argillo-limoso	1,4-2
Suolo humifero	1,2-2
Argilloso	1-1,3

Tabella 6: Intervalli di punteggi del parametro T relativo alle diverse classi tessiturali del suolo

L'**aquifero** è l'attributo che descrive la capacità di abbattimento della concentrazione dell'inquinante della zona satura. Considera i processi di dissoluzione, dispersione, assorbimento a cui è sottoposto il flusso ipogeo al di sotto della superficie piezometrica, dopo avere superato le difese della copertura e dell'insaturo. In questo parametro si considerano le caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero (come la lunghezza e tortuosità dei percorsi di flusso), il grado di porosità, la composizione lito-mineralogica e la permeabilità.

Nel caso di acquiferi soggetti a fenomeni di carsismo avanzati, per la determinazione del punteggio di tale attributo si trascurano i contributi dei volumi meno carsificati, dato che il carico idraulico favorisce il flusso nei condotti, a discapito della velocità nei volumi adiacenti meno permeabili.

Complessi idrogeologici	Punteggio A
Alluvioni grossolane	8-9
Calcari carsificati	9-10
Calcari fessurati	6-9
Dolomie fessurate	4-7
Alluvioni medio-fini	6-8
Complessi sabbiosi	7-9
Arenarie, conglomerati	4-9
Plutoniti fessurate	2-4
Alternanze (flysch)	5-8
Vulcaniti fessurate	8-10
Marne, Argilliti	1-3
Morene grossolane	6-8
Morene medio-fini	4-6
Argille, limi, torbe	1-3
Piroclastiti diverse	4-8
Metamorfiti fessurate	2-5

Tabella 7: Punteggi dei diversi complessi idrologici (del parametro A)

La **conducibilità idraulica** quantifica la capacità di spostamento dell'acqua nel non saturo, quindi la velocità con la quale l'inquinante idroportato (dalla densità equiparabile a quella dell'acqua) fluisce, per lo più orizzontalmente. Tale attributo dipende dalla trasmissività e dallo spessore dell'acquifero.

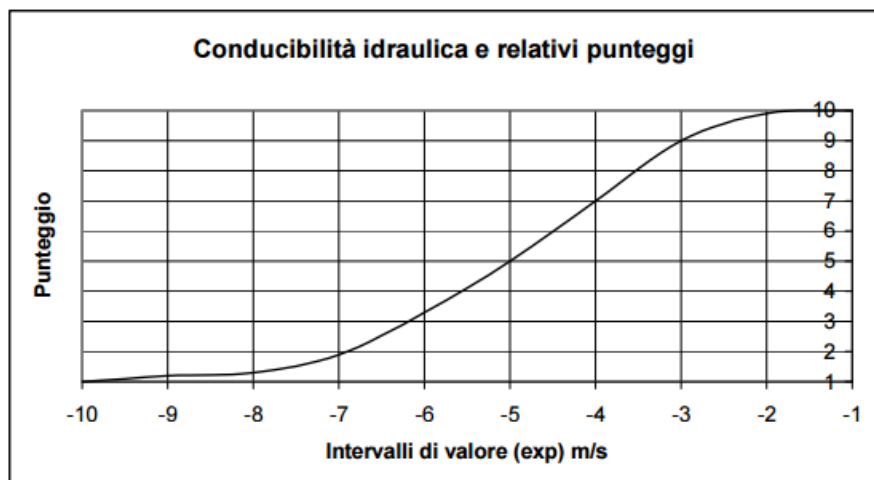


Figura 3: Conducibilità idraulica e relativi punteggi nel metodo SICTACS.

Complessi idrogeologici	C (m/s)
Ghiaie	$10^{-3} - 0$
Sabbie pulite	$10^{-6} - 10^{-2}$
Sabbie limose	$10^{-7} - 10^{-3}$
Limi	$10^{-10} - 10^{-5}$
Depositi glaciali	$10^{-12} - 10^{-6}$
Argille	$10^{-13} - 10^{-9}$
Piroclastiti	$10^{-10} - 10^{-5}$
Argilliti-marne	$10^{-13} - 10^{-9}$
Dolomie	$10^{-9} - 10^{-6}$
Calcari e marmi	$10^{-9} - 10^{-2}$
Arenarie	$10^{-10} - 10^{-6}$
Vulcaniti	$10^{-12} - 10^{-2}$
Rocce cristalline	$10^{-13} - 10^{-4}$

Figura 4: Complessi idrologici e relativi intervalli di conducibilità.

Una volta stabiliti i punteggi per ogni parametro, si procede al calcolo del fattore di protezione da cui la vulnerabilità dell'acquifero con metodologia tipica dei modelli a punteggi e pesi prima riportata.

L'ultimo parametro è l'**acclività della superficie topografica** da cui dipendono il ruscellamento e la velocità di spostamento dell'acqua (e quindi dell'inquinante) sulla superficie, a pari condizioni di precipitazione. La facilità d'infiltrazione nell'acquifero, sintomo di vulnerabilità, diminuisce col diminuire della pendenza: zone pianeggianti favoriscono il ristagno e quindi sono classificate con un punteggio elevato; le aree che presentano un gradiente topografico elevato ricevono punteggi bassi di parametro S, per la scarsa attitudine dei suolo pendenti all'assorbimento del fluido in ingresso dato che imprimono una forza di gravità che spinge al ruscellamento superficiale. Punteggio del metodo SINTACS riportato in Tabella 8.

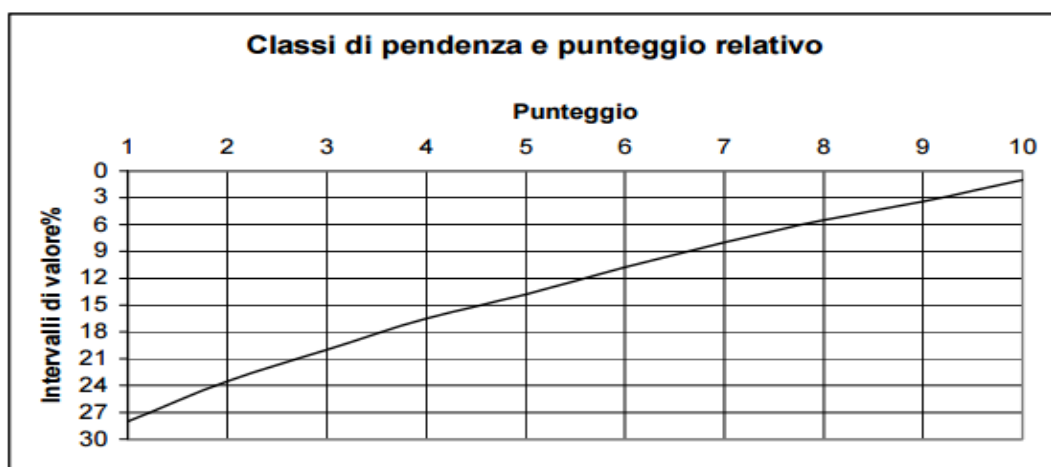


Tabella 8: Punteggio del parametro S relativo alle diverse classi di pendenza.

1.2.4 Il metodo COP

Il metodo COP (Visa et al., 2006) è un metodo di valutazione delle vulnerabilità intrinseca degli acquiferi alla contaminazione di inquinanti. Il sistema di valutazione è stato sviluppato in accordo all'European Approach (Daly et al. 2002; Goldscheider and Popescu 2004), e validato parzialmente per l'applicazione agli acquiferi carsici dopo essere stato applicato a due acquiferi del Sud della Spagna dalle diverse caratteristiche idrologiche e idrogeologiche.

Si basa sul fatto che la protezione del bacino sotterraneo sede della risorsa idrica è fornita dagli strati di suolo sovrastanti in termini di proprietà e di spessore; è influenzata dal tipo di infiltrazione che può essere concentrata o diffusa; e varia in funzione dell'intensità della precipitazione di ricarica.

La precipitazione meteorica che investe la superficie di un bacino, in parte viene assorbita immediatamente da esso (precipitazione efficace), e in parte dà luogo a ruscellamento, quindi a una concentrazione del deflusso di ricarica, in funzione della sua abbondanza con cui può saturare o meno il suolo. Durante l'infiltrazione e la percolazione dell'acqua nella zona insatura, le sostanze disciolte sono soggette a fenomeni di filtrazione, di alterazione chimica e di degradazione batterica / enzimatica. Tuttavia se l'ingresso nell'acquifero avviene in modo concentrato, i processi di alterazione indotti dal mezzo della zona insatura, sono ben passati.

Questa interpretazione del deflusso idrico in un acquifero, porta alla quantificazione del livello di protezione della risorsa tramite il calcolo dei tre parametri del metodo C, O, P.

L'attributo **O**, che sta per "*Overlying layers*", considera la tipologia del suolo e dell'insaturato.

Il parametro **C**, che sta per "*Flow Concentration*", contempla le modalità di infiltrazione delle acque. Quantifica tutte le situazioni per cui si verifica un calo della protezione fornita dall'insaturato a causa di infiltrazione diretta e concentrata dell'acqua nell'acquifero.

Il parametro **P**, che sta per "*Precipitation*", tiene conto del regime delle precipitazioni che determina la modalità di ingresso della ricarica. Più le precipitazioni sono intense e meno è efficace la protezione dell'acquifero.

1.3. Protezione della risorsa idrica "di punto": Zone di salvaguardia

Le zone di salvaguardia sono uno degli strumenti fondamentali per tutelare la qualità delle acque sotterranee ad uso idropotabile degli acquiferi vulnerabili ai contaminanti e allo sfruttamento.

La perimetrazione delle zone di salvaguardia costituisce uno strumento di protezione statica/passiva atto alla difesa "di punto" del territorio interessato dalla captazione della risorsa idropotabile.

La definizione delle aree di salvaguardia, con l'imposizione dei vincoli che limitino l'utilizzo del territorio, si limita ad escludere la possibilità che un processo di inquinamento si inneschi all'interno delle aree definite. Per avere la garanzia completa di una protezione delle opere di captazione idropotabile nei riguardi di processi di inquinamento provenienti dall'esterno delle fasce di salvaguardia bisognerebbe anche disporre una rete di monitoraggio (protezione dinamica) lungo il perimetro delle aree di rispetto sulla quale programmare un periodico controllo della qualità della falda interessata dalle opere di captazione.

A partire dalla necessità di tutelare la risorsa idrica mediante le zone di salvaguardia sono state introdotte una serie di normative per regolamentarne la perimetrazione.

Di seguito viene fornito un quadro normativo di riferimento relativo alle zone di salvaguardia secondo la legislazione italiana e svizzera, essendo quest'ultima particolarmente interessante per gli acquiferi di tipo carsico, a partire dalla direttiva europea in materia.

A livello europeo la direttiva 2000/60/CE (*Water Framework Directive, WFD*) fornisce un quadro di riferimento per l'azione comunitaria in materia di acque ai fini di tutelare e gestire le risorse idriche.

In particolare la [Direttiva 2006/118/CE](#) sulla " protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento", stabilisce:

- Criteri per valutare il buono stato chimico delle acque sotterranee;
- Criteri per individuare e invertire le tendenze significative e durature all'aumento dell'inquinamento;
- Linee guida per la fissazione di valori soglia da parte degli Stati Membri.

Ogni stato membro ha recepito le indicazioni della direttiva 2000/60/CE integrando le normative in vigore per la delimitazione delle zone di salvaguardia.

In Italia, la Direttiva 2000/60/CE è stata recepita nell'ordinamento nazionale italiano tramite il Decreto Legislativo 152/2006; la Direttiva 2006/118/CE è stata recepita invece tramite il D. Lgs. n. 30 del 16 Marzo 2009.

Si identificano tre zone di salvaguardia che dipendono dal tipo di sorgente o pozzo, dalla vulnerabilità e dal rischio d'inquinamento; sono delimitate utilizzando il criterio spaziale, il criterio temporale, il criterio idrogeologico o un criterio misto. Per gli acquiferi carsici o fessurati, si considerano delle zone specifiche.

In Svizzera sono stabilite tre zone di salvaguardia e la loro delimitazione è calcolata usando un raggio fisso per la prima zona e un criterio temporale per le altre due zone.

Per gli acquiferi carsici e fessurati si usano specifici indici di vulnerabilità ed è stato sviluppato un metodo specifico per mappare la vulnerabilità intrinseca degli acquiferi carsici presenti nel Paese: il metodo EPIK (Doerfliger N., Jeannin PY, Zwahlen F., 1999).

1.3.1. Le aree di salvaguardia della normativa italiana

Il principale riferimento normativo a livello statale è attualmente costituito dall'art. 94 del d.lgs. 3 aprile 2006, n. 152, che disciplina le risorse idriche utilizzate a scopo idropotabile, prevedendo specifiche aree di salvaguardia.

Il Decreto Legislativo 152/2006 all'art. 94, disciplina l'individuazione e la definizione delle Aree di Salvaguardia delle risorse idriche, delegando alle Regioni la definizione delle direttive e delle linee guida per la perimetrazione delle stesse.

Le linee guida per la tutela della qualità delle acque destinate al consumo umano e i criteri generali per l'individuazione delle aree di salvaguardia delle risorse idriche di cui all'art. 21 D. Lgs. 152/99 dell'Accordo Stato-Regioni-Province autonome del 12/12/2002, ribadiscono e sanciscono il concetto che *"la delimitazione delle aree di salvaguardia rappresenta una delle misure che consente la tutela dei corpi idrici"*, attraverso la prevenzione e la riduzione dell'inquinamento ed il perseguimento degli usi sostenibili e durevoli delle risorse idriche, prima di tutto di quelle destinate al consumo umano, erogate mediante acquedotto di pubblico interesse.

Le *Aree di salvaguardia* sono distinte in:

- 1) **Zona di tutela assoluta** adibita esclusivamente alle opere di captazione ed alle infrastrutture di servizio; deve avere un'estensione di almeno 10 m di raggio dal punto di captazione, e per quanto possibile, deve essere recintata e protetta da eventuali esondazioni di corpi idrici limitrofi e provvista di canalizzazioni per il deflusso delle acque meteoriche.
- 2) **La zona di rispetto** è costituita dall'area immediatamente a ridosso della zona di tutela assoluta o ad essa collegata da percorsi preferenziali utilizzati da acque di deflusso veloce, pur essendo poste a distanza delle opere di captazione o di derivazione; area a cui sono da imporsi vincoli molto restrittivi e destinazioni d'uso tali da tutelare qualitativamente e quantitativamente la risorsa idrica captata.
- 3) **La zona di protezione** è quell'area immediatamente circostante alle Zone di Rispetto, i cui limiti esistenti coincidono preferibilmente con quelli dell'intero bacino di alimentazione della falda ed a cui possono essere imposti i vincoli territoriali relativamente meno restrittivi di quelli delle Zone più interne.

Il bacino corrisponde all'area di alimentazione nella quale avviene l'infiltrazione diretta delle acque meteoriche, alle aree di alimentazione indiretta eventuali ed a quelle aree di contatto con i corpi idrici superficiali dai quali le acque sotterranee traggono eventualmente alimentazione (Conferenza Permanente per i Rapporti tra lo Stato, le Regioni e le Province Autonome, 2003; modificata).

All'interno delle zone di protezione, le regioni individuano e disciplinano delle aree, al fine di proteggere le acque sotterranee, anche quelle non ancora utilizzate per l'uso idropotabile:

- Area di ricarica della falda;
- Emergenze naturali ed artificiali della falda;
- Zone di riserva (comma 8, art. 94, D. Lgs: 152/06)

La Zona di riserva comprende i territori che, interessati da risorse idriche pregiate, possono essere delimitati e gestiti per preservare nel tempo la quantità e la qualità, anche ai fini di un loro possibile utilizzo, con particolare riferimento a quelle dotate di caratteristiche di potabilità (Conferenza Permanente per i Rapporti tra lo Stato, le Regioni e le Province Autonome, 2003; modificata).

Criteri di delimitazione delle aree di salvaguardia

Le aree di salvaguardia sono individuate, come prevede l'Accordo del 12 Dicembre 2002, secondo i seguenti criteri generali:

- 1) Le aree di salvaguardia di sorgenti, pozzi e punti di presa della acque superficiali sono suddivise in zona di tutela Assoluta, zona di rispetto, e zona di protezione.
- 2) I criteri per la delimitazione delle aree di salvaguardia e l'estensione delle diverse zone sono stabiliti in funzione delle caratteristiche geologiche, idrogeologiche, idrologiche e idrochimiche delle sorgenti, dei pozzi e dei punti di presa della acque superficiali.

Le singole zone sono delimitate secondo i seguenti criteri:

- a) **Criterio geometrico:** consiste nel prefissare le dimensioni delle aree di salvaguardia a prescindere da eventuali considerazioni di carattere tecnico. Di norma è adottato per la delimitazione della zona di tutela assoluta ("*almeno 10 metri di raggio dal punto di captazione*", comma 3 art. 94 D. Leg. 152/60), e , in via provvisoria, in attesa che la Regione la delimiti, o con il criterio temporale o con quello idrogeologico, per la perimetrazione delle zone di rispetto di pozzi e sorgenti;
- b) **Criterio temporale:** consiste nel definire le dimensioni delle aree di salvaguardia in funzione del tempo di sicurezza, inteso come intervallo temporale prefissato che consente di eliminare o mitigare gli effetti di un eventuale inquinante idrotrasportato

nell'acquifero saturo (in condizioni di deflusso, sia naturali sia indotti dal pompaggio) intervenendo a distanza di sicurezza dal punto di captazione, mediante l'attivazione di sistemi di disinquinamento delle acque sotterranee, ovvero mediante misure di approvvigionamento idrico alternativo. Si applica per la delimitazione definitiva della zona di rispetto di pozzi ed eventualmente di sorgenti, laddove applicabile, quindi in scenari idrogeologici generalmente poco complessi, ben riconosciuti e ben documentati. La metodologia riportata nell'Accordo per l'applicazione del criterio temporale è:

- Ricostruzione delle caratteristiche idrogeologiche del sottosuolo;
- Ricostruzione della morfologia della superficie piezometrica in condizioni statiche;
- Ricostruzione della morfologia della superficie piezometrica in condizioni dinamiche (quindi simulando il pozzo in emungimento con portata concessa):
- Ricostruzione delle principali direttrici di flusso idrico sotterraneo;
- Ricostruzione delle linee isocrone, tenendo conto di un inquinante idrotrasportato, con un tempo di ritardo pari a 1;
- Scelta delle aree delimitate dalle linee isocrone corrispondenti ai tempi di sicurezza predefiniti, rispettivamente, per la zona di Rispetto Ristretta e per quella Allargata.

c) **Criterio idrogeologico**: consiste nel definire i limiti delle aree di salvaguardia mediante considerazioni tecnico- scientifiche basate su tutte le conoscenze esistenti sull'idrodinamica sotterranea e sulle caratteristiche stratigrafico – strutturali dell'acquifero.

Esso è di norma adottato:

- Per la delimitazione della Zona di Tutela Assoluta, quando è ritenuto insufficiente il diametro minimo di 10 metri;
- Per il posizionamento della recinzione all'interno della Zona di Tutela Assoluta, quando non è possibile recintare l'intera area di diametro 10 metri;
- Per la delimitazione delle Zone di Rispetto, in presenza di scenari idrogeologici complessi (Conferenza Permanente per i Rapporti tra lo Stato, la Regione e le Province Autonome, 2003):
- Per la delimitazione delle Zone di Riserva;
- Per la delimitazione delle Zone di Sicurezza.

Per l'applicazione di tale criterio, bisogna basarsi su studi geologici, idrogeologici, idrologici, idrochimici e microbiologici, e sui dati storici delle caratteristiche quali-quantitative della risorsa interessata.

Risulta che, dovendosi affidare a considerazioni logiche basate su tutti i criteri idrogeologici disponibili, non si deve escludere la possibilità di sconfinare in un criterio misto fondato, cioè, sull'applicazione del criterio temporale e di quello idrogeologico.

Il criterio misto consiste quindi nell'applicazione parziale ma simultanea di almeno due dei criteri prima citati.

Vincoli e prescrizioni delle aree delimitate

Per attuare la protezione delle risorse idriche contenute negli acquiferi, è necessario definire le *Aree di salvaguardia* dal momento che al loro interno vengono posti divieti, vincoli e prescrizioni finalizzati alla prevenzione del degrado quali - quantitativo delle acque.

A tale proposito il D. Lgs. 152/2006, come già prevedeva l'accordo 12 Dicembre 2002 della Conferenza Permanente per i Rapporti Stato – Regioni – Province Autonome, definiscono in maniera precisa i divieti, i vincoli e le regolamentazioni.

In particolare, secondo l'art. 94, comma 4, del D. Lgs. 152/2006, nella *zona di tutela assoluta* sono vietate tutte le attività antropiche, con esclusione di quelle connesse con la gestione dell'opera di captazione e delle acque.

Nella *zona di rispetto* sono vietati l'insediamento dei seguenti centri di pericolo e lo svolgimento delle seguenti attività:

- a) Dispersioni di fanghi ed acque reflue, anche se depurati;
- b) Accumulo di concimi chimici, fertilizzanti o pesticidi;
- c) Spandimenti di concimi chimici, fertilizzanti o pesticidi, salvo che l'impiego di tali sostanze sia effettuato sulla base delle indicazioni di uno specifico piano di utilizzazione che tenga conto della natura dei suoli, delle colture compatibili, delle tecniche agronomiche impiegate e della vulnerabilità delle risorse idriche;
- d) Dispersione nel sottosuolo di acque meteoriche provenienti da piazzali e strade;
- e) Aree cimiteriali;
- f) Aperture di cave che possono essere in connessione con la falda;
- g) Apertura di pozzi ad eccezione di quelli che estraggono acque destinate al consumo umano e di quelli finalizzati alla variazione della estrazione ed alla protezione delle caratteristiche qualitative della risorsa idrica;
- h) Gestione di rifiuti;
- i) Stoccaggio di prodotti ovvero sostanze chimiche pericolose e sostanze radioattive;
- j) Centri di raccolta, demolizione e rottamazione di autoveicoli;
- k) Pozzi perdenti;

l) Pascolo e stabulazione di bestiame che eccede i 170 Kg per ettaro di azoto presente negli effluenti, al netto delle perdite di stoccaggio e distribuzione. È comunque vietata la stabulazione di bestiame nella zona di rispetto ristretta. (comma 5, art. 21, D. Lgs. 152/99). Per gli insediamenti o le attività di cui sopra, preesistenti, ove possibile e comunque ad eccezione delle aree cimiteriali, sono adottate le misure per il loro allontanamento: in ogni caso deve essere garantita la loro messa in sicurezza.

Inoltre, all'interno delle zone di rispetto, si prevede anche regioni e provincie autonome disciplinino strutture o attività quali (nel comma 5 dello stesso articolo):

- a) fognature;
- b) edilizia residenziale e relative opere di urbanizzazione;
- c) opere varie, ferrovie e in genere infrastrutture di servizio;
- d) pratiche agronomiche e contenuti dei piani di utilizzazione di cui alla lettera "c" del comma 4.

Nella *zona di protezione* le opere e le attività da vietare, o da mettere in sicurezza, sono sostanzialmente quelle previste per le zone di rispetto, con la differenza che alcuni divieti non sono assoluti, ma vengono sostituiti da prescrizioni.

1.3.2. Le aree di salvaguardia della normativa svizzera

In Svizzera sono stabilite tre zone e la loro delimitazione è calcolata usando un raggio fisso per la prima zona e un criterio temporale per le altre zone:

- la zona di protezione attorno al punto di captazione è delimitata con un raggio di 10 metri (S1);
- la zona intermedia è definita individualmente (S2);
- la zona esterna si estende con un raggio doppio della zona intermedia (3).

La normativa si fonda sulle seguenti basi legali: Costituzione federale del 18 Aprile 1999; Legge federale del 24 Gennaio 1991 sulla protezione delle acque; Ordinanza federale del 28 Ottobre 1998 sulla protezione delle acque.

La protezione delle acque sotterranee che i cantoni sono tenuti a garantire si basa sulla delimitazione delle aree di protezione e sulle relative carte di protezione. Viene pianificata suddividendo il territorio da proteggere in diversi settori:

- La captazione (sorgenti, pozzi);
- Le zone di protezione delle acque sotterranee S1, S2 e S3 , volte alla protezione di captazione di pubblico interesse;

- Il settore d'alimentazione, finalizzato al risanamento mirato dei bacini imbriferi nei quali viene captata acqua potabile qualitativamente compromessa o per cui sussiste un concreto rischio di compromissione (per le acque superficiali);
- Le aree di protezione delle acque sotterranee, create per proteggere le acque sotterranee in vista di una futura utilizzazione dell'acqua potabile;
- Il settore di protezione delle acque, volto a garantire la tutela generale delle falde utilizzabili (per acque superficiali);
- Altri settori: territorio rimanente.

I settori, le zone e le aree vengono individuate dai cantoni e vengono inseriti nelle carte di protezione delle acque. Le misure di protezione sono graduate in base al tipo settore, zona o area. Le carte di protezione delle acque sono uno strumento di primaria importanza per l'applicazione delle disposizioni legali in Svizzera.

In regioni carsiche il criterio di delimitazione delle aree di salvaguardia usato in Svizzera è il metodo EPIK.

In queste regioni la velocità di flusso delle acque sotterranee è ben diversa, ed l'azione filtrante del sottosuolo molto più bassa rispetto a quella garantita dal materiale incoerente, quindi non basta un criterio del tempo di permanenza per delimitare la zona S2.

Le aree coinvolte nell'alimentazione delle sorgenti sono molto ampie, e per questo è la vulnerabilità dell'acquifero dell'intero bacino di alimentazione a determinare la dimensione delle zone di protezione delle acque sotterranee.

Per calcolare la vulnerabilità del bacino di alimentazione della captazione da proteggere è stato sviluppato un metodo specifico per le zone carsiche denominato "metodo EPIK".

EPIK è un metodo a punteggi e pesi la cui procedura è costituita di tre tappe:

- 1) valutazione e rilievo cartografico dei quattro parametri che considera;
- 2) Calcolo del fattore di protezione;
- 3) Delimitazione delle zone di protezione.

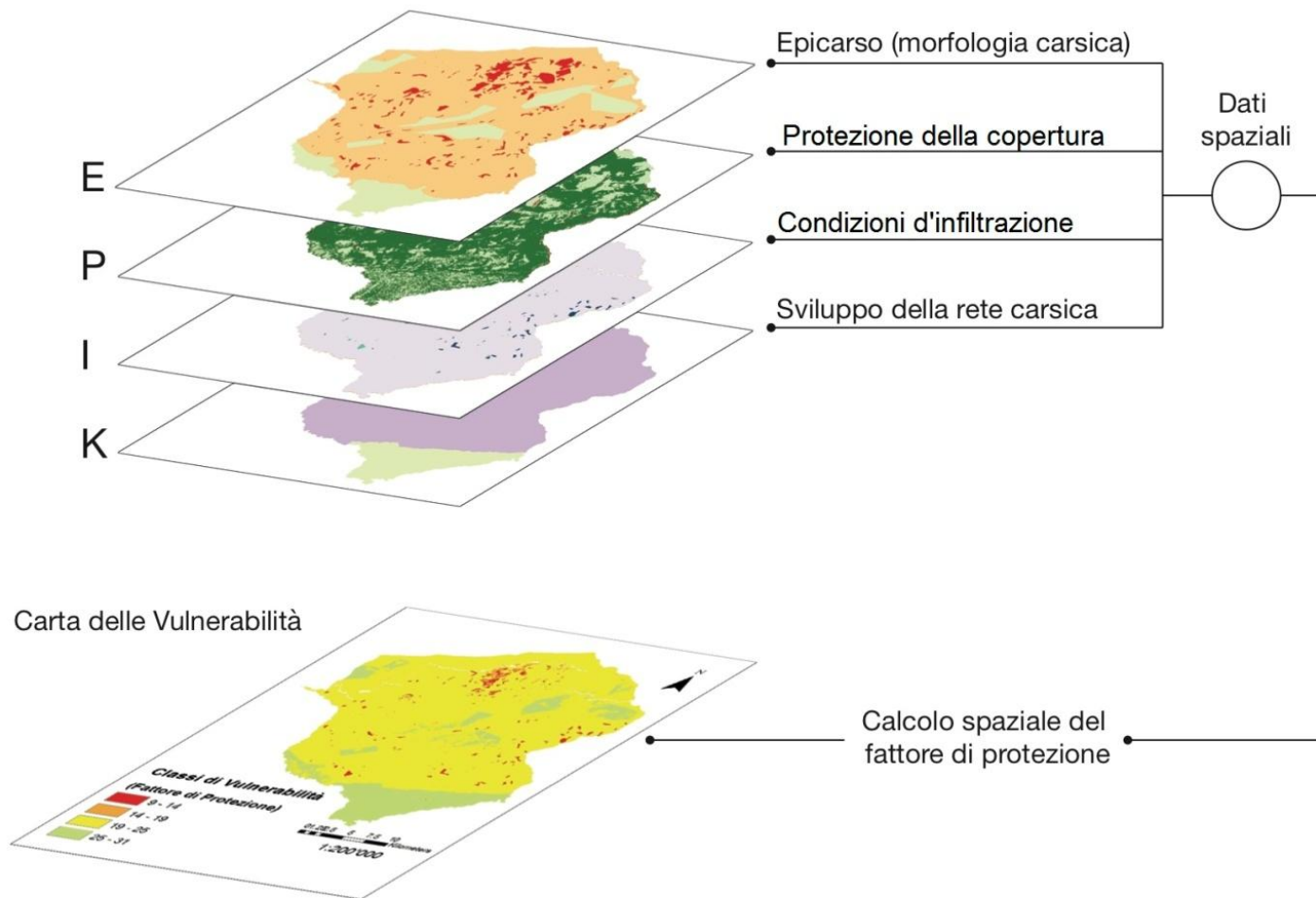


Figura 5: Schema procedurale del metodo EPIK

2. Caso di studio: L'acquifero carsico dell'altopiano dei Sette Comuni

2.1 Inquadramento geografico

L'Altopiano dei Sette Comuni è collocato al centro della fascia delle Prealpi dell'Italia nord-orientale e presenta una forma vagamente rettangolare. Più in particolare è ubicato nella parte settentrionale della regione Veneto, in provincia di Vicenza, confinante a Nord con la provincia di Trento e a Est con la provincia di Belluno. (figura 6)



Figura 6: Inquadramento dell'area dell'acquifero dell'Altopiano dei Sette Comuni

Si estende per circa 600 Km² e si sviluppa in altitudine tra i 600 e 2300 m sul livello del mare.

Dal punto di vista morfologico si presenta isolato dai territori circostanti dalle profonde valli in cui scorrono a Nord e a Est dal fiume Brenta e a Ovest dal fiume Astico; a Nord-Ovest è delimitato dall'Altopiano di Lavarone, che rappresenta l'unica continuità in quota e lo collega

politicamente col Trentino; e a Sud si raccorda con le colline del Marosticano, che separano l'altopiano dall'alta pianura veneta.

Politicamente l'altopiano geografico non accoglie solo i sette comuni storici da cui il nome, ma rientra nell'amministrazione di un numero doppio di comuni, principale dei quali Asiago, e di due regioni, Veneto e Trentino.

Tali agglomerati urbani si sviluppano in alta quota, prevalentemente sulla superficie planare estesa al centro dell'altopiano e accolgono una modesta cifra di abitanti pari a 21200 che però cresce durante la stagione turistica (95000 abitanti, Zanovello, 1995), comportando una pressione antropica sul territorio non indifferente.

2.2 Inquadramento morfologico

L'altopiano dei Sette Comuni costituisce un acquifero carsico di alta montagna che presenta una complessità morfologica legata al concorso di processi carsici che hanno interessato prevalentemente le rocce carbonatiche (dolomie e calcari), con quelli caratteristici degli ambienti di alta montagna in condizioni di rapido cambiamento climatico.

L'altopiano carsico in esame può essere suddiviso in quattro unità morfologiche:

- La scarpata meridionale, collegata con la pianura veneta e che ricopre un dislivello altimetrico di 1000 metri.
- L'altopiano meridionale, che sovrasta la scarpata con quote che vanno dai 1100 ai 1500 m s. l. m. Accoglie la conca di Malga Paù, depressione carsica di maggiore dimensione, e la Busa Fonda, una delle doline di grandi dimensioni, che si trova nel comune di Lusiana .
- La conca mediana, dove la superficie si abbassa con quote comprese tra i 1000 e i 1100 metri, e dove si sono sviluppati i maggiori centri insediativi dell'altopiano (Asiago, Gallio, Enego, ecc.), oltre alla valle del Ghelpach, su cui scorre un torrente stagionale che con andamento sinuoso confluiva nella Val d'Assa.
- l'altopiano sommitale settentrionale dalle quote comprese tra i 1500 e i 2300 m. Esso si estende da Sud a Nord per circa 10 km presentando, a partire da Sud, una scarpata articolata incisa dalla Val di Nos e Val di Campomulo, e successivamente la Val d'Assa; e in senso Est – Ovest per oltre 20 km, crescendo in altimetria a partire dal settore nordorientale dalle quote tra i 1300 e 1700m della conca della Marcesiana, verso le cime più elevate dell'altopiano (Cima Dodici e Cima Portuale, che superano i 2300m).

Molte delle aree carsiche si presentano come altopiani e ciò si spiega considerando l'azione conservativa del fenomeno stesso. Nelle aree carsiche le acque penetrano in profondità

scavando un reticolo di cavità sotterranee evitando così di incidere un reticolo idrografico con annesso sistema di versanti in superficie.

L'altopiano è inciso profondamente da due valli: la Val Frenzela che scende nella Valle del Brenta percorrendo molto ripidamente più di un migliaio di metri fino a raggiungere Valstagna; e la Val d'Assa a Ovest che divide il massiccio montuoso del Monte Verena dalla parte più elevata dell'altopiano settentrionale culminante nella vetta di quota 2341 m di Cima Dodici. La Val d'Assa si approfondisce rapidamente a partire da Roana fino a confluire nella Valdastico all'altezza di Pedescala.

La conca mediana è invece solcata da una valle poco profonda che va dalla zona di Gallio fino alla Val d'Assa, ed è percorsa da un torrente effimero, Torrente Ghelpach: lungo circa 12 km con tragitto sinuoso verso Ovest, è connotato come torrente stagionale essendo secco per gran parte dell'anno.

La conformazione territoriale dell'Altopiano determina la presenza di problematiche per la salvaguardia della risorsa idrica circolante nell'acquifero da fonti inquinanti. Infatti la presenza di una estesa piana al di sopra dell'ammasso favorisce lo sviluppo di agglomerati urbani e di attività antropiche.

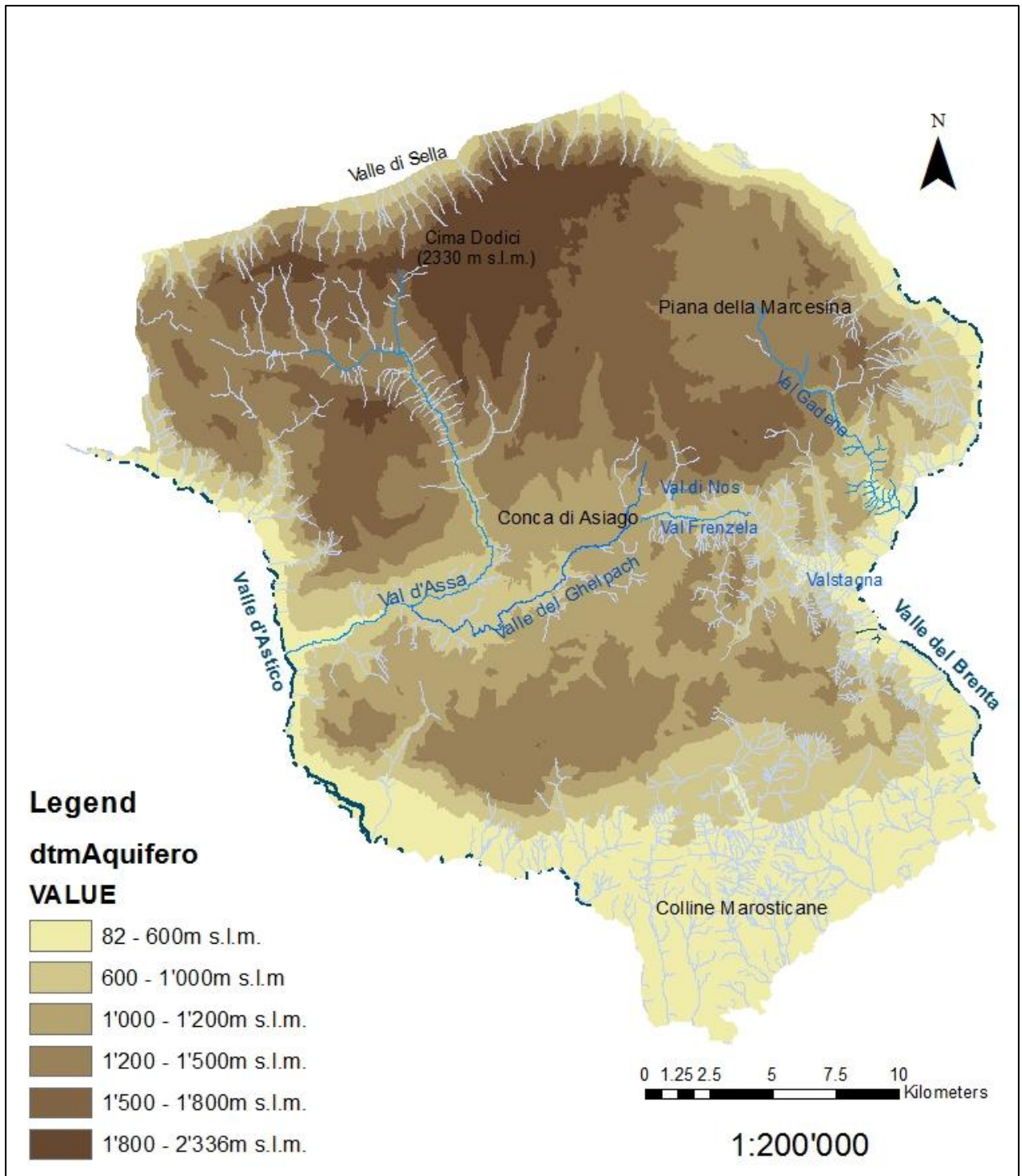


Figura 7: Inquadramento morfologico dell'Altopiano dei Sette Comuni.

2.3 Inquadramento strutturale

L'Altopiano dei Sette Comuni presenta un assetto strutturale derivante dal sollevamento dell'altopiano rispetto alla pianura veneta ed è dovuto alla compressione tra la placca Europea e la microplacca Adriatica.

Si sviluppa in una fascia di faglie e sovrascorrimenti sud-vergenti che interessa la zona sudorientale delle Alpi in cui assume una particolare importanza la linea Bassano-Valdobbiadene: il sovrascorrimento che separa il sistema strutturale montano da quello dell'alta pianura veneta costituiti da formazioni idrogeologiche sfasate verticalmente di oltre 3000 m.

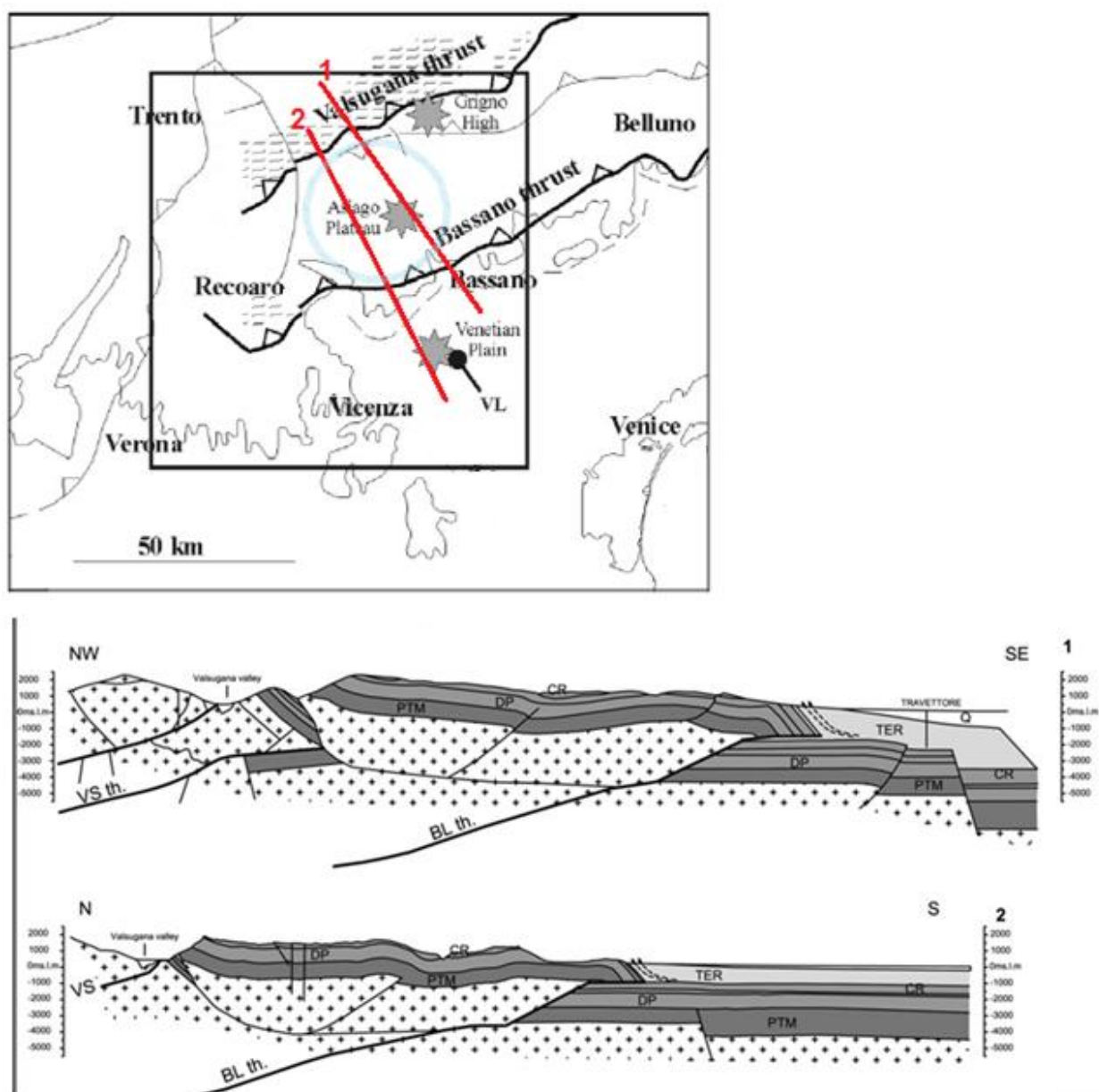


Figura 8: Sezioni che evidenziano l'assetto strutturale dell'area in cui emerge l'Altopiano dei Sette Comuni. (Pilli et al., 2012)

L'emersione del massiccio roccioso è avvenuta lungo due importanti sovrascorrimenti regionali che interessarono e dislocarono il basamento cristallino più profondo, portandolo a contatto con formazioni più recenti. Come mostra la Figura 9 l'altopiano si trova tra la linea Bassano – Valdobiadene a Sud e il retro scorrimento nord-vergente attivato da un importante evento tettonico, la linea della Val di Sella nella Valsugana a Nord.

Nella parte interna invece l'altopiano è deformato da una serie di ampie pieghe con direzione valsuganese (N 70-80° E) e vergenti a Sud: anticlinale Monte Verena-Monte Cucco, anticlinale di Monte Lisser, sinclinale di Gallio); le ampie pieghe sono dislocate da un fascio di faglie sub verticali a direzione compresa tra N 10E- N25W.

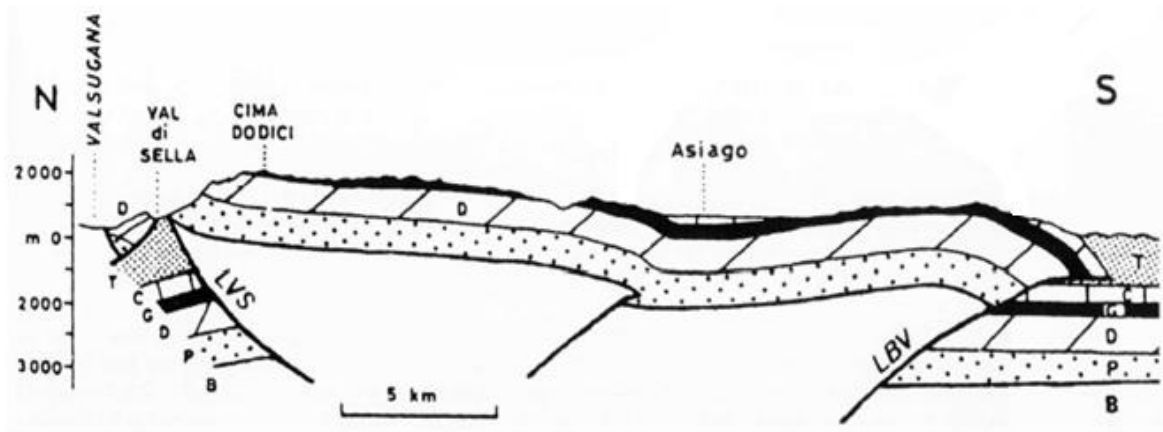


Figura 9: Sezione geologica schematica dell'assetto strutturale dell'altopiano dei Sette Comuni (ZAMPIERI, 1995)
 Legenda: P: formazioni del Permiano sup. e del Triassico inf. E medio; D: Dolomie del Triassico sup.; G: Calcarei di piattaforma del Giurassico; C: calcari pelagici del Cretaceo; T: formazioni del Terziario; LVS: Linea della Val di Sella; LBV: linea Bassano-Valdobiadene

Per quanto riguarda i sistemi di fratture, nella zona sommitale dell'altopiano non ve ne sono degni di nota; il pendio meridionale invece, soprattutto sulla base è solcato da numerose faglie subverticali ad andamento circa Nord- Sud, che suddividono lo stesso versante in una serie di blocchi di formazioni cretacee (progetto SAMPAS, 2006).

2.4 Inquadramento litologico

La storia geologica dell'Altopiano dei Sette Comuni è testimoniata dalle formazioni rocciose che affiorano lungo le scarpate e le valli sottostanti della Valsugana a Nord, della Valdastico a Ovest e della Valle del Brenta a Est.

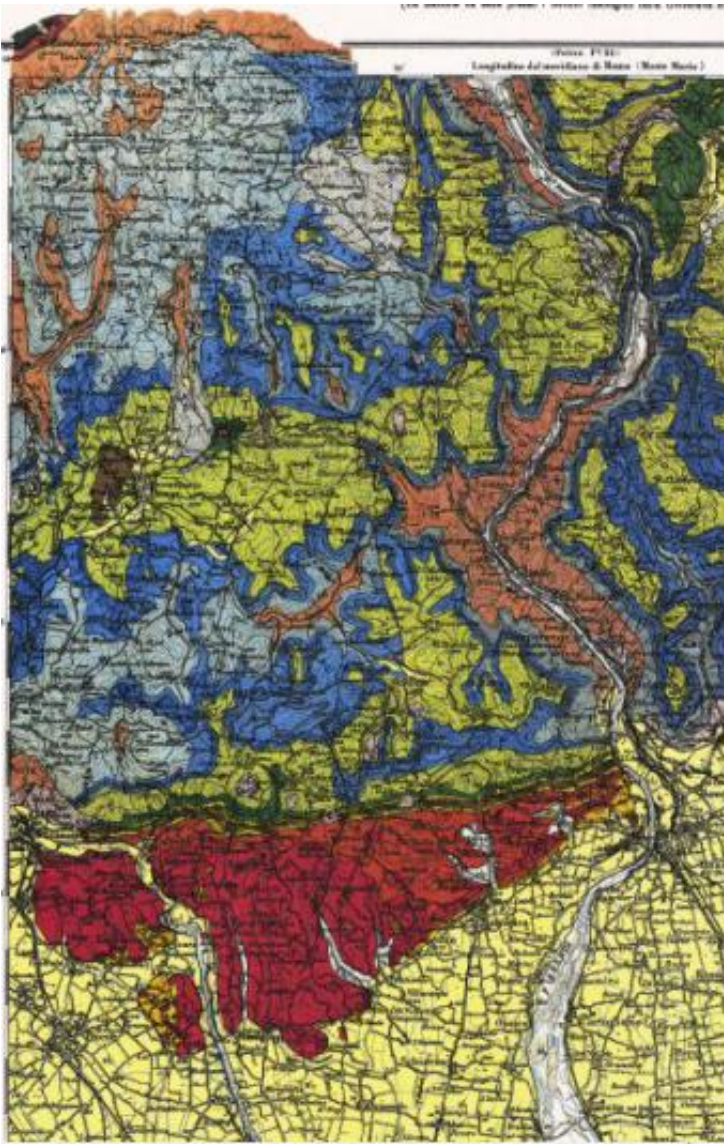
Alla base del versante settentrionale nella Valsugana vengono a giorno le rocce più antiche della serie stratigrafica dell'altopiano. Le rocce più antiche sono le *filladi quarzifere pre-permiche* che compongono il basamento cristallino impermeabile; e sono sovrastate, in discordanza angolare, da oltre settecento metri di *sedimenti terrigeno-calcarei* di età da permiana a triassica che costituiscono la base dell'acquifero carsico.

Al di sopra del basamento impermeabile, come mostrato nella tabella 9 (pag.55), si trova quindi la *serie carbonatica* che ospita l'acquifero principale, costituita da una varietà di ambienti paleogeologici: la Dolomia Principale (Triassico Superiore) di colore grigia, bianca e rosata, che raggiunge spessori di 600-800 m e costituisce il primo strato della serie di roccia carsificata; sopra si trovano i Calcari Grigi (Giurassico inferiore) che occupano uno spessore compreso tra i 300 e i 600 m; questi ultimi sono stati coperti dai sedimenti carbonatici che oggi formano il Rosso Ammonitico Veneto (Giurassico Medio Superiore).

La serie sede dell'acquifero principale è sovrastata da calcari bianchi della formazione del Biancone (Cretaceo) di spessore complessivo di circa 300 m, seguito dai depositi calcareo - argillosi della Scaglia Rossa (Cretaceo superiore – Terziario).

Sulla superficie dell'altopiano sono poi diffusi i terreni di copertura quaternaria, sia morenici che di origine fluviale – glaciale nel seguito descritti con relativa collocazione planimetrica.

Alcuni accumuli morenici sono ben riconoscibili sui due fianchi della Val d'Assa, tra Roana e Camporovere, allo sbocco della Val di Nos, tra Asiago e Gallio e intorno alla conca della Marcesina; altri depositi morenici sono riscontrabili a Castelletto di Rotzo e ad Enego. Per quanto riguarda i sedimenti ghiaiosi di origine fluvioglaciale, si trovano soprattutto nella conca di Asiago. I depositi detritici più rilevanti si trovano lungo le scarpate principali dell'altopiano, mentre depositi alluvionali ghiaiosi ricoprono i fondovalle dell'Astico e del Brenta. Infine si menzionano depositi argillosi misti a frammenti di selce derivanti dalla dissoluzione carsica che ha agito sui calcari giurassici e cretacei: questi si trovano depositati sul fondo di depressioni carsiche o di antiche forme vallive come a Malga Pian di Granezza o a Nord di Monte Frola.



C R E T A C E O		CRETACEO INFERIORE - Arginatei nei calcari di Bellerophon e in altri calcari di Bellerophon e in altri calcari di Bellerophon.
		CRETACEO SUPERIORE (Mala) - (Tiroliense) calcari e marne calcaree con <i>Pylaeoniscus</i> e <i>Platystrophia</i> .
		CRETACEO SUPERIORE (Mala) - (Tiroliense) calcari e marne calcaree con <i>Pylaeoniscus</i> e <i>Platystrophia</i> .
		CRETACEO SUPERIORE (Mala) - (Tiroliense) calcari e marne calcaree con <i>Pylaeoniscus</i> e <i>Platystrophia</i> .
T R I A S S I C O		TRIASSICO SUPERIORE (Bellerophon e Carnico) - Calcari e marne calcaree con <i>Strophomena</i> e <i>Strophomena</i> .
		TRIASSICO MEDIO (Ladinico) - Calcari e marne calcaree con <i>Strophomena</i> e <i>Strophomena</i> .
		TRIASSICO INFERIORE (Gurktal) - Calcari e marne calcaree con <i>Strophomena</i> e <i>Strophomena</i> .
		TRIASSICO INFERIORE (Gurktal) - Calcari e marne calcaree con <i>Strophomena</i> e <i>Strophomena</i> .

O L I G O C E N E		OLIGOCENO (Cattolano) - Arginatei nei calcari di Cattolano e in altri calcari di Cattolano.
		OLIGOCENO (Mantova) - Arginatei nei calcari di Mantova e in altri calcari di Mantova.
		OLIGOCENO (Salsomaggiore) - Arginatei nei calcari di Salsomaggiore e in altri calcari di Salsomaggiore.
		OLIGOCENO (Imbabene) - Arginatei nei calcari di Imbabene e in altri calcari di Imbabene.
M I O C E N E		MIOCENO SUPERIORE (Piacentino) - Arginatei nei calcari di Piacenza e in altri calcari di Piacenza.
		MIOCENO MEDIO (Tortoniano) - Arginatei nei calcari di Tortona e in altri calcari di Tortona.
		MIOCENO INFERIORE (Langhe) - Arginatei nei calcari di Langhe e in altri calcari di Langhe.
		MIOCENO INFERIORE (Langhe) - Arginatei nei calcari di Langhe e in altri calcari di Langhe.

Q U A T E R N A R I O		QUATERNARIO - Depositi recenti e materiali di frane recenti.
		QUATERNARIO - Depositi recenti e materiali di frane recenti.
		QUATERNARIO - Depositi recenti e materiali di frane recenti.
		QUATERNARIO - Depositi recenti e materiali di frane recenti.
M I O C E N E		MIOCENO SUPERIORE (Piacentino) - Arginatei nei calcari di Piacenza e in altri calcari di Piacenza.
		MIOCENO MEDIO (Tortoniano) - Arginatei nei calcari di Tortona e in altri calcari di Tortona.
		MIOCENO INFERIORE (Langhe) - Arginatei nei calcari di Langhe e in altri calcari di Langhe.
		MIOCENO INFERIORE (Langhe) - Arginatei nei calcari di Langhe e in altri calcari di Langhe.

CARTA GEOLOGICA DELLE TRE VENEZIE

Foglio 37 della Carta d'Italia al 100.000 dell'Istituto Geografico Militare.

RILEVATA A CURA DELLA SEZIONE GEOLOGICA DELL'UFFICIO IDROGRAFICO DIRETTA DAL PROF. GIORGIO DAL PIAZ

(La Sezione ha sede presso l'Istituto Geologico della Università di Padova)

B/

2.5 Inquadramento idrogeologico

Il massiccio dell'Altopiano dei Sette Comuni si identifica come complesso idrogeologico calcareo del gruppo degli acquiferi in rocce carbonatiche di tipo carsico.

Presenta un'estensione planimetrica di circa 600 km² con quote che variano da 600 a 2300m sul livello del mare e una potenzialità idrica superiore ai 15 m³/s.

L'acquifero dell'altopiano dei Sette Comuni presenta i seguenti limiti idrogeologici:

- A Nord e a Est, i limiti morfologici costituiti dalla profonda incisione della Valle del Brenta, lungo la quale scorre l'omonimo fiume;
- Ad Ovest la valle dove scorre il fiume Astico;
- A Sud, l'acquifero perde il carattere carsico, presentandosi come acquifero interessato dall'infiltrazione per fessurazione. Questa massa rocciosa costituisce solo il 12% dell'altopiano e va a terminare con le colline che si elevano dalla pianura veneta.
- In profondità invece il limite dell'acquifero carsico è costituito dai sedimenti terrigeno-carbonatici del Permiano e Triassico medio (Formazione PTM in Fig. 5), che si sviluppano tra il basamento cristallino impermeabile regionale e la dolomia carsificata.

L'idrostruttura può così essere descritta a partire dalla base dell'acquifero (come mostrato in Tabella 9):

- I sedimenti terrigeno - calcari che sovrastano il basamento cristallino sono rocce impermeabili che costituiscono l'*aquitard*.
- L'*acquifero principale* è ospitato dallo strato di Dolomia Principale e Calcari Grigi con uno spessore di almeno 900 m.
- Con sopra l'*aquitard* che rallenta l'acqua che s'infiltra costituito da Biancone e dai depositi della Scaglia Rossa.
- In superficie il setto impermeabile che forma l'*aquiclude* è costituito dai depositi di copertura quaternaria. Questi creano un setto o diaframma impermeabile continuo attraverso il quale non avviene filtrazione d'acqua e delimitano l'acquifero superiormente se si tratta di un acquifero confinato.

Le rocce del massiccio presentano una conducibilità idraulica molto variabile tipica degli ammassi ricciosi, in funzione del grado di fratturazione e di sviluppo del fenomeno carsico: le Dolomie fratturate carsiche presentano generalmente una conducibilità idraulica tra i 10⁻⁹ e i

10^{-6} m/s; calcari e marne se carsificate raggiungono valori dell'ordine di 10^{-2} m/s se fratturati di 10^{-9} . (Marco Petitta, Le acque sotterranee, 2008).

Le principali sorgenti sono concentrate nella valle che delimita l'acquifero a Est, hanno una portata molto elevata e presenta variabilità rapidissima, che testimonia l'immediata dipendenza dei deflussi dalle precipitazioni, pur essendo molto vasta l'area di alimentazione dell'acquifero.

L'altopiano costituisce un acquifero carsico di alta montagna che presenta una complessità morfologica legata al concorso di processi carsici che hanno interessato prevalentemente la serie di sedimenti carbonatici (Tabella 9), con processi caratteristici degli ambienti di alta montagna in condizioni di rapido cambiamento climatico.

Un'evidenza della presenza del fenomeno carsico è la mancanza di una circolazione attiva nella rete idrografica superficiale: nonostante la notevole estensione dell'Altopiano e la consistente piovosità che interessa la zona, il sistema di drenaggio superficiale è quasi inattivo, caratterizzato da valli secche e canyon inattivi con forme morfologiche tipiche del paesaggio di origine fluvio - carsica nella parte meridionale e centrale e morfologie glaciali - carsiche nella porzione settentrionale (Pilli et al., 2012): sono circa 1300 le cavità carsiche che sono state censite, di cui una profonda più di 1000 m (Sauro et al., 1991).

Oltre alle cavità cariche la superficie dell'altopiano è interessata da conche tetto-carsiche, come la conca di Asiago, la conca di malga Pau, depressione carsica maggiore, e la Busa fonda, nonché le doline, sono concentrate in aree ad alta piovosità ed hanno una morfologia endoeroica che contribuisce a concentrare le acque piovane determinando fenomeni d'infiltrazione concentrata. L'infiltrazione avviene quindi attraverso le forme carsiche superficiali e la circolazione idrica segue principalmente le forme carsiche ipogee.

L'assetto strutturale, descritto nel paragrafo 2.2, concorre a determinare la direzione del deflusso presente nella rete di condotti superficiali e profondi: il deflusso è direzionato spesso dalla tettonica e in particolare dalle faglie che tagliano tutte le strutture trasversalmente favorendo interconnessione tra i settori idrogeologici differenti.

La situazione di altipiano, avendo struttura a piega a scatola, tende ad avere un drenaggio centripeto in superficie, che passa poi a deflussi laterali lungo gli assi principali.

La base dell'acquifero si presenta generalmente inclinata verso est a causa di un sistema di faglie meridiane che tendono a rialzare la parte occidentale. Tali faglie agiscono sia da barriere che da assi drenanti che tagliano tutti gli strati presenti permettendo l'interconnessione tra i vari settori dell'acquifero.

Il sistema strutturale sopra descritto quindi condiziona il drenaggio idrico profondo dell'Altopiano dal punto di vista idrogeologico, che trova sbocco verso il lato orientale, dove vi sono i maggiori esautori carsici (Oliero, Ponte Subiolo, Campolungo sul Brenta e Campese) e verso il margine nordest (Selva di Grigno), mentre il drenaggio verso la Valle dell'Astico a Ovest è considerato ininfluenza.

Le acque ipogee dell'ammasso carsico, vengono quindi drenate principalmente dalle sorgenti concentrate alla base del versante orientale del massiccio, nella valle del Brenta in prossimità di Valstagna. Si stima che tale sistema sorgentizio abbia complessivamente una portata media annua di circa 1500 l/s. e, insieme alla Sorgente di Ponte Subiolo, drenano circa i 2/3 delle precipitazioni che cadono sull'Altopiano di Asiago (Boifava, Dal Molin, Marchetto, 2013).

La portata effluente dalle sorgenti è complessivamente elevata e presenta variabilità rapidissima, che testimonia l'immediata dipendenza dei deflussi dalle precipitazioni, pur essendo molto vasta l'area di alimentazione dell'acquifero. Dall'inizio delle precipitazioni, tale portata aumenta di diversi metri cubi al secondo, nel giro di poche ore, determinando uno sfasamento temporale fra afflussi e deflussi fra le 6 e le 12 ore (Celi & Sauro, 1995; Gennari et al. 1987).

Il complesso sorgentizio più importante è quello di Oliero è costituito da due sorgenti di origine carsica che emergono a 150 m s. l. m. dalla Dolomia Principale, a pochi metri di distanza tra loro: Cogol dei Siori ha valori di portata compresi tra i 20 e gli 0.8 m³/s con valori massimi di 40 m³/s; l'altra sorgente, Cogol dei Veci presenta a sua volta valori d'efflusso tra i 20 e 0.2 m³/s con picchi di 100 m³/s.

Alimenta il brevissimo fiume omonimo con una portata media complessiva di 11 m³/s (Boifava, Dal Molin, Marchetto, 2013), che va a sfociare nella Valle del Brenta dopo circa 150m. (Altri due studi, condotti da Dal Pra e Stevan nel 1969, e dal magistrato alle acque negli anni 1925-1926, avevano già indicato in 11 e 13/15 m³/s rispettivamente i valori medi complessivamente competenti alle due sorgenti di Oliero).

Il complesso di Oliero presenta dunque valori che evidenziano la sua importanza nel quadro idrogeologico locale; ma entrambe le sue sorgenti, come è tipico nell'ambiente carsico, soffrono di inquinamento microbiologico di origine prevalentemente antropica a seguito degli eventi piovosi: le condizioni sono particolarmente delicate data l'insistenza antropica quantitativamente riportata nel primo paragrafo (21200 abitanti che arrivano a 95 000 durante l'estate).

Situato ad una quota poco superiore delle due precedenti, il laghetto di Ponte Subiolo, anche detto Risorgenza dell'Elefante Bianco, è un punto d'acqua che contribuisce a drenare l'acqua dell'altopiano verso il Fiume Brenta con un contributo di 3 m³/s.

Tra gli esautori carsici di interesse vi è anche la Sorgente Campesana, situata a 6 km a valle dell'Oliero a quota leggermente inferiore, che presenta uno sfasamento temporale maggiore (tra le 10 e le 20 ore secondo Dal Pra & Stevan, 1969) e un'area di alimentazione presumibilmente sita a quote inferiori: presenta temperature e durezza dell'acqua defluente più elevate rispetto a quelle registrate a Oliero.

L'acquifero dell'Altopiano dei Sette Comuni si trova all'interno di un complesso idrogeologico più ampio nel contesto regionale.

E' stata presunta infatti una comunicabilità idraulica tra l'acquifero carsico montano e l'acquifero poroso della pianura veneta che dalle colline pedemontane dell'altopiano si estende fino alla laguna di Venezia. La connessione sotterranea riguarderebbe l'unità carbonatica dell'ammasso prealpino e la stessa formazione sepolta sotto la pianura veneta attraverso faglie che tagliano l'intero spessore terziario formando un percorso difficilmente individuabile nel substrato. Il modello concettuale in cui l'acqua delle riserve carsiche ha un effetto sulla pressione e sul flusso delle acque freatiche della pianura, è stato proposto da Pilli et al. in un articolo pubblicato nel 2012.

Inoltre potrebbe essere ipotizzabile un acquifero comunicante tra l'altopiano di Asiago e del Grappa, nonostante essi siano superficialmente interrotti da valli trasversali (dove scorre il Fiume Brenta) a Est dell'altopiano dei Sette Comuni.

Le unità idrogeologiche sopra descritte e la continuità di queste in un'area che si espande oltre i confini del sistema studiato sono riportati nella Figura 10.

Nella terza parte del presente studio si concentra l'attenzione alla zona di recapito dell'acquifero di cui fanno parte le sorgenti di Oliero.





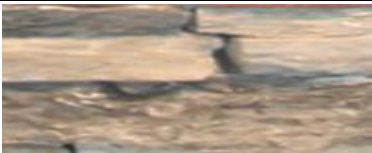

	SPESSORE		FORMAZIONE	CARSIFICABILITA'	ACQUIFERO
Quaternario	/		Suolo di copertura Unità vulcanico arenacea	/	Aquiclude
Cretaceo	70 - 150		Scaglia Rossa	buona	Aquitard
	3- 300		Biancone	scarsa	
Giurassico	10 - 30		Rosso ammonitico	Eccellente	Aquifer
	300 - 600		Calcarei Grigi	eccellente	
Triassico	500 - 800		Dolomia Principale	buona	
	700	/	Sedimenti terrigeno-calcarei	/	Aquitard
	/	/	Basamento Cristallino	/	Aquiclude

Tabella 9: Successione stratigrafica dell'idrostruttura dell'Altopiano dei Sette Comuni



HYDROGEOLOGICAL UNIT	HYDRAULIC CONDUCTIVITY
Q Quaternary	High (Porous Aquifer)
CR Tertiary	Low (Fractured Aquitard)
DP Upper Trias-Cretaceous	Very High (Karstic Aquifer)
PTM Permian-lower Trias	Low-High (Fractured Aquifer/Aquitard)
Prepermian Basement	Very Low (Fractured regional Aquiclude)

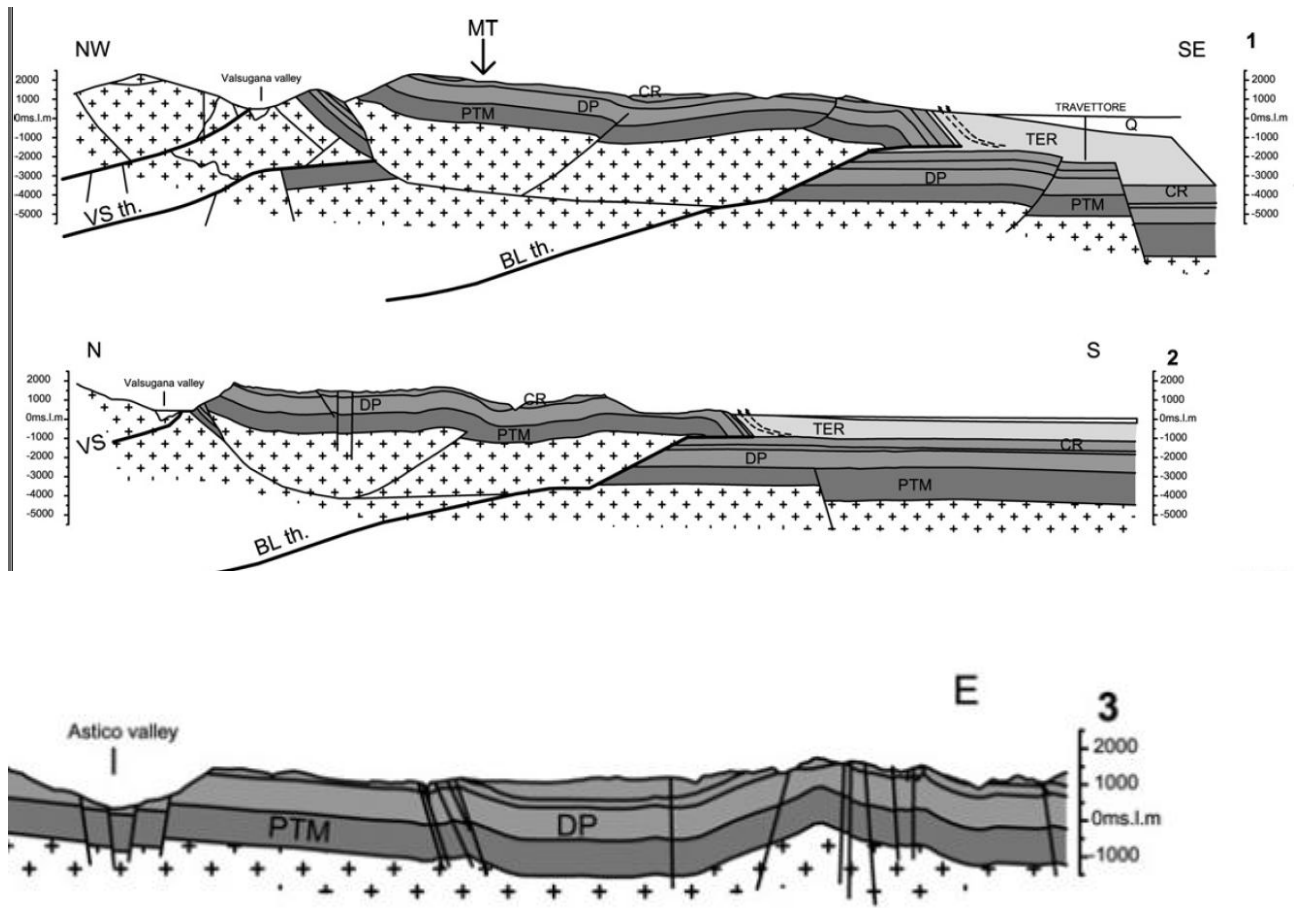


Figura 10: Sezioni idrogeologiche dell'acquifero prealpino e accenni sulla comunicabilità con l'acquifero poroso della pianura veneta.

CARATTERIZZAZIONE DELL'ACQUIFERO

Per caratterizzare l'acquifero dell'Altopiano dei Sette Comuni si è effettuato un bilancio idrogeologico a scala di bacino, raccogliendo e raffrontando i dati di afflussi e deflussi disponibili, e si sono analizzati i dati relativi alle acque defluenti dalle sorgenti. Inoltre si analizzano delle prove con tracciante atte a verificare la comunicabilità tra la superficie di ricarica dell'Altopiano e le sorgenti alla base; nonché esperienze di monitoraggio in continuo finalizzate allo studio della correlazione entrate - uscite dell'acquifero.

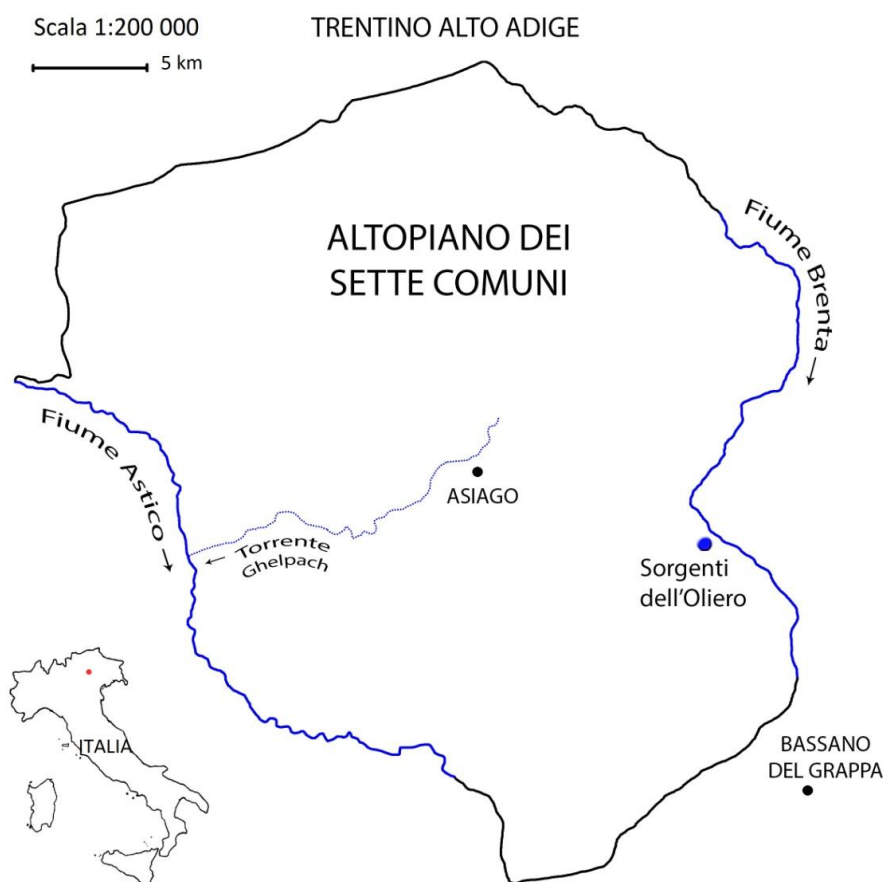


Figura 11: Inquadramento dell'area dove scorre il Torrente Ghelpah.

In particolare, vengono considerati i dati delle analisi condotte dal Club Speleologico del Proteo e la Provincia di Vicenza – Settore risorse idriche – nel 2008: le prove di tracciamento che verificano la comunicabilità tra le acque del Torrente Ghelpach e quelle emergenti dalle sorgenti di Oliero (Covol dei Veci e Covol dei Siori) riportati nella carta di Figura 11; e il monitoraggio in continuo della sorgente Covol dei Veci delle caratteristiche idriche di pressione (da cui il livello idrometrico nella sezione di misura), temperatura e conducibilità elettrica per due anni.

3.1 Bilancio idrico

La ricarica del vasto acquifero dell'Altopiano dei Sette Comuni deriva dalle infiltrazioni meteoriche; i deflussi sgorgano principalmente dalle sorgenti carsiche situate a Est, ma è contemplato anche un percorso di uscita idrica sotterraneo rappresentato da una possibile connessione con un acquifero situato a Sud.

Per effettuare un bilancio idrico quindi, si considerano gli aspetti climatici, le portate defluenti dalle sorgenti principali, eventuali connessioni idriche sotterranee con l'esterno del volume analizzato quantitativamente e infine si correlano i valori dei tre ambiti. Tale correlazione permette di capire infatti la quantità d'acqua interessante l'acquifero carsico dell'Altopiano dei Sette Comuni e la direzione del deflusso al suo interno.

3.1.1 Aspetti climatici

Il clima dell'Altopiano dei Sette Comuni è di tipo alpino caratterizzato da abbondanti precipitazioni distribuite su tutto l'arco dell'anno e temperature medie annuali relativamente basse (7.4°C), più rigide sulle vette dell'Altopiano e più miti sul versante meridionale collinare.

Per quanto concerne la piovosità, si osservano variazioni che vanno dai 1200 mm/anno ai 1700 mm/anno secondo i dati raccolti dal Servizio Idrografico del Magistrato alle Acque durante il trentennio che va dal 1961 al 1990, rielaborati dal centro agro-meteorologico ARPAV di Teolo.

La documentazione della *Carta idrogeologica dei Sette comuni* (Regione Veneto, 2006) mostra una carta dell'entità delle precipitazioni medie annue (Figura). La fascia centrale risulta più piovosa rispetto a quella meridionale e settentrionale.

Analizzando i dati di singole stazioni meteorologiche (medie mensili registrate negli anni che intercorrono tra 1994/96 e 2012 calcolate dai dati forniti dalla Regione Veneto), si nota come le piogge più abbondanti si verificano di media nei mesi di Maggio e Giugno con massimi secondari nei mesi di Agosto e Novembre (Figura 12).

Per quanto riguarda le precipitazioni nevose, di regola intervengono nevicate soprattutto alle quote più elevate nel periodo che va da Dicembre a Febbraio che producono un accumulo al suolo permanente fino ai mesi di Marzo o Aprile.

Dai dati meteorologici disponibili, si prende in considerazione un valore intermedio tra i limiti di variazione della precipitazione annua registrata pari a 1550 mm/anno.

Le precipitazioni interessanti la superficie dell'altopiano non costituiscono completamente solo il volume di ricarica dell'acquifero ma si dividono in evapotraspirazione del suolo superficiale, deflusso superficiale e sotterraneo.

Si considera poi che gli imponenti fenomeni di carsismo che interessano la superficie dell'Altopiano, rendono quasi del tutto marginale il contributo di deflusso dei corsi d'acqua presenti sulla superficie dell'altopiano in alcuni periodi dell'anno, ad eccezione di importanti eventi di piena (F. Trentin, 2013).

Si considera una evapotraspirazione media annua di 480 mm/anno, media stimata tra i valori raccolti negli anni 1961 fino al 1990 (*Carta idrogeologica, 2006*).

Al fine del bilancio idrologico, si è stimato il volume di ricarica dell'acquifero, considerando insieme le precipitazioni l'evapotraspirazione e il deflusso superficiale.

Se si contempla un'estensione superficiale ricettiva di 600 km², si ottiene approssimativamente un volume di ricarica di 21 m³/s.

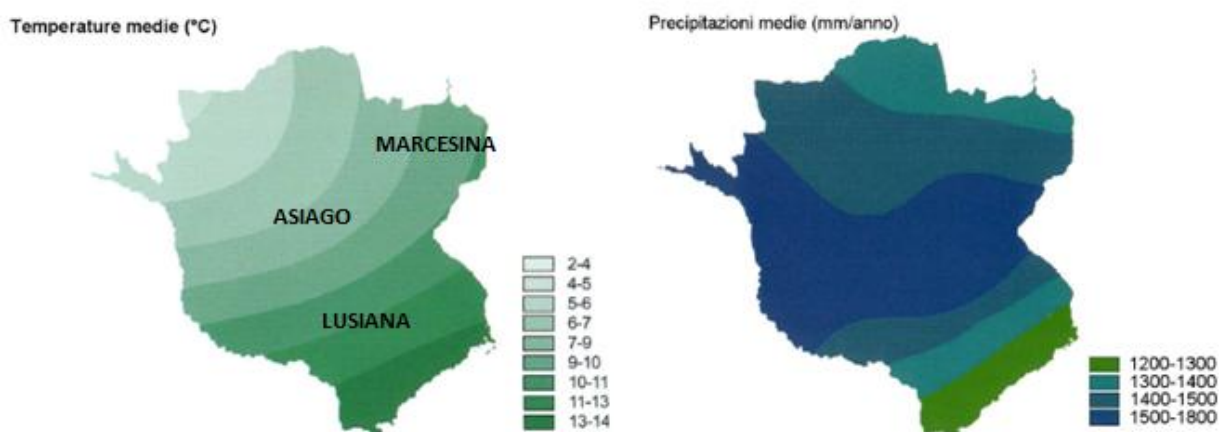


Figura 2: Temperature medie e piovosità (*Carta Idrogeologica, 2006*)

Precipitazione media mensile dal 1994/96 al 2012

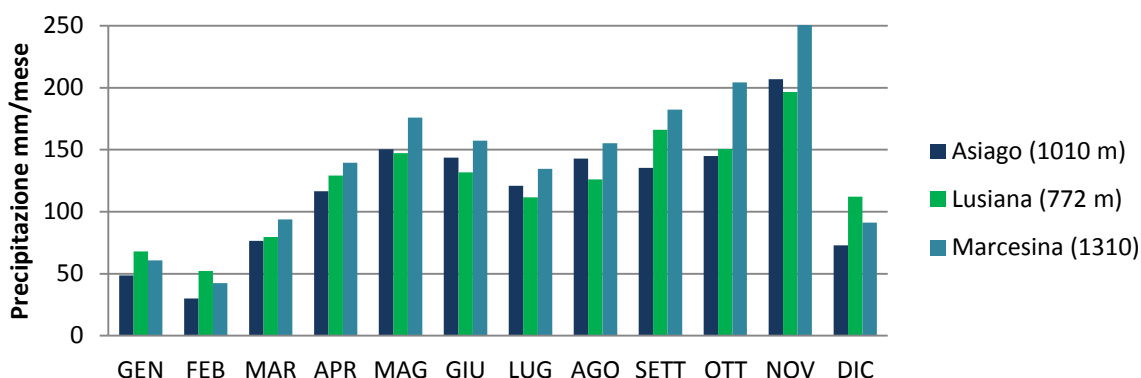


Figura 12: Precipitazioni medie mensili registrate alle stazioni di Asiago, Marcesina e Lusiana durante il periodo 1994/2012.

3.1.2 Portate defluenti dalle sorgenti

Le portate uscenti dall'acquifero si localizzano principalmente alla base dello stesso, intorno alla quota di 150 m s.l.m. Non interessano le sorgenti ad alta quota che, come la rete di corsi d'acqua che incide la piana di Asiago, drenano portate trascurabili e rimangono secche per gran parte dell'anno.

L'acqua infatti dalla superficie topografica situata a quote oltre i 1000 m s.l.m., s'infiltra rapidamente nel sottosuolo attraverso cavità e inghiottitoi e il fenomeno di dissoluzione carsica si spinge in profondità deformando le formazioni carbonatiche per diverse centinaia di metri. All'interno dell'ammasso quindi scorrono veri e propri corsi d'acqua sotterranei con affluenti, laghetti, cascate, con circolazione sia a pelo libero che in pressione.

La maggior parte dell'acqua in circolazione è convogliata verso la Valsugana a Est, a causa delle caratteristiche tettoniche dell'altopiano; è drenata dal sistema di sorgenti situate nella valle del Brenta, in prossimità di Valstagna: le sorgenti dell'Oliero (Covol dei Veci e Covol dei Siori), Ponte Subiolo (detta anche dell'Elefante Bianco), Nassa e Stue. Si tratta di 5 sorgenti di tipo valclusiano, cioè alle quali l'acqua giunge attraverso alcuni sifoni in grotta, che dopo un breve percorso si immettono nel fiume Brenta. Esse drenano una portata stimata complessivamente $15\text{m}^3/\text{s}$ (dal Pra & Stevan 1969).

Le più famose e copiose fra queste sono le sorgenti di Oliero, il cui sviluppo ipogeo è documentato dalle esplorazioni speleo subacquee che si sono spinte per centinaia di metri (Casati, 2006) rappresentato nella sezione riportata in Figura 13.

Le sorgenti più antiche dell'altopiano sono ormai in zona vadosa e ad oggi funzionano in condizioni di *troppo pieno*, ma presentano comunque alcuni sifoni attivi interni. Sono situate a NE sospese a 350 m dal fondo della Valle del Brenta: la Grotta della Bigonda è la principale.

Se questa è la situazione alla base del massiccio, in quota le condizioni idriche cambiano completamente in quanto la presenza d'acqua rappresenta una rarità. Le principali sorgenti in quota si trovano in Val d'Assa a Ovest e nella piana della Marcesina a Est e presentano una portata media annua di $0.04\text{ m}^3/\text{s}$ e $0.03\text{ m}^3/\text{s}$ rispettivamente.

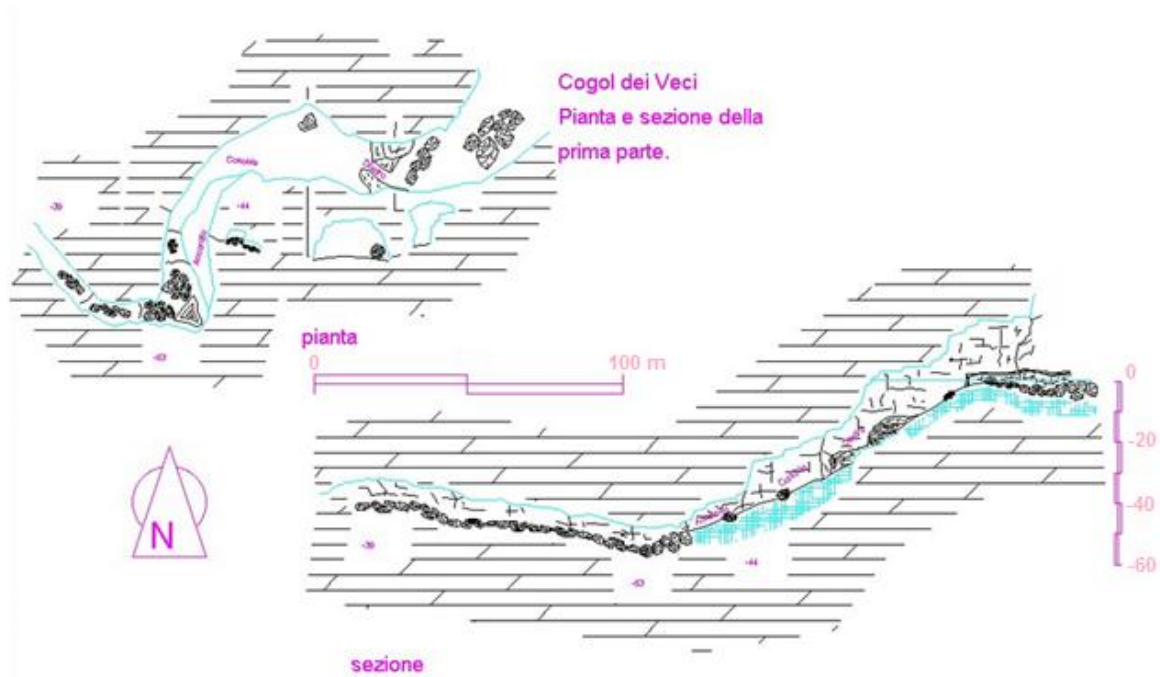


Figura 13: schema della sorgente valclusiana Covol dei Veci.

Dai valori registrati alle principali sorgenti riportati nella tabella seguente (Tabella 10) si stima un deflusso sorgentizio complessivamente di circa $15 \text{ m}^3/\text{s}$.

NOME E QUOTA	PORTATA [l/s]	CAPTATA/NON CAPTATA	TIPO
Covol dei Siori (150m)	6600	captata	Carsica
Covol dei Veci (150m)	4300	captata	carsica
Ponte Subiono (155m)	3200	captata	carsica
Nassa (145m) "Rea"?	350	Non captata	carsica
Stue (130m)	40	Non captata	carsica
Gruppo Fontanazzo & Prati di Preda (260m)	78.5	Non captata	Non carsica
Pisan (200m)	60	captata	carsica

Tabella 10: Portate delle principali sorgenti alla base dell'Altopiano dei Sette Comuni.

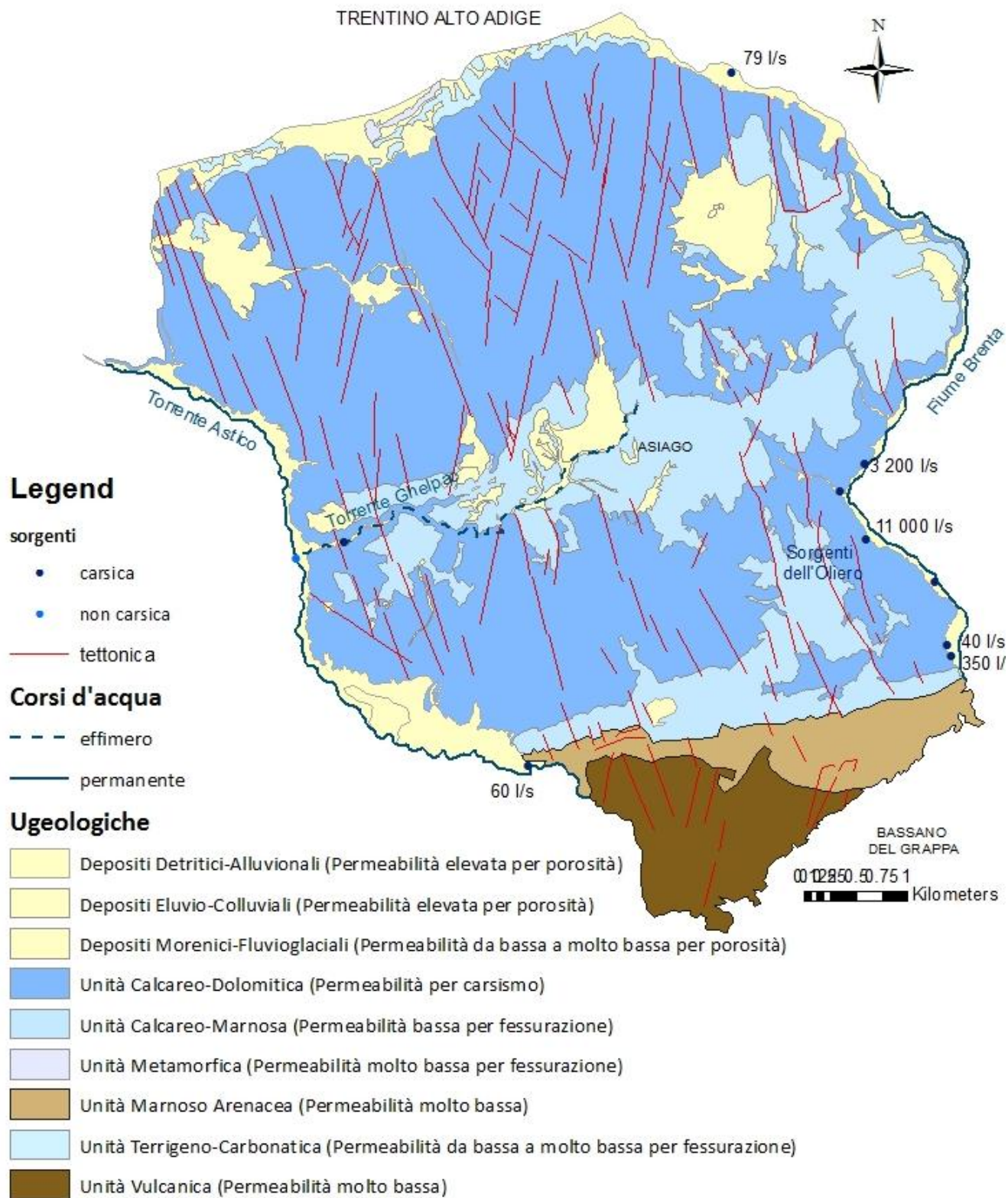


Figura 14: Inquadramento dei maggiori esattori dell'acquifero dell'Altopiano dei Sette Comuni con relative portate medie

3.1.4 Collegamento tra l'acquifero carsico prealpino e l'acquifero poroso della pianura veneta

Come afferma l'articolo di Pilli et al., (2012) nel calcolo del bilancio dell'acquifero poroso di pianura, le infiltrazioni idriche superficiali non possono essere considerate l'unico componente della ricarica perché esisterebbe un deficit che viene ricoperto dal contributo carsico che giunge dal basso.

Tale considerazione concorderebbe con un'interpretazione quantitativa afflussi e deflussi dell'acquifero prealpino che considera una parte di scambio idrico sotterraneo tra i due acquiferi: fra i 29,5 m³/s di ricarica e i 15 m³/s deflusso sorgentizio, intercorre un 50% di acqua interessante l'acquifero che ragionevolmente potrebbe essere attribuita a perdite diverse dalle sole evapotraspirazione e drenaggio superficiale.

Secondo i dati compatibili con le medie del Nord Italia, un 20% della ricarica dell'acquifero corrisponderebbe al ruscellamento superficiale; tuttavia in ambiente con un tale grado di carsificazione 5.9 m³/s drenati dai corsi d'acqua superficiali sono inverosimili, se si pensa anche che le acque del Torrente Ghelpach, che è il corso d'acqua principale, scompaiono nel sottosuolo in corrispondenza di un inghiottitoio. E' più verosimile pensare che circa due terzi delle precipitazioni, dopo brevi percorsi superficiali, vengono assorbiti dal massiccio carsico.

Per cui essendo 19.6 m³/s l'infiltrazione efficace calcolata secondo le precedenti considerazioni e 15 m³/s i deflussi sorgentizi si potrebbero stimare per differenza 4.6 m³/s di perdite sotterranee dell'acquifero carsico.

Tale volume d'acqua tuttavia non è misurabile direttamente.

3.1.4 Bilancio

E' possibile effettuare un bilancio idrogeologico approssimativo dell'area studiata a partire dai valori di apporti e deflussi idrici calcolati nei paragrafi precedenti, considerando in aggiunta il fenomeno dell'evapotraspirazione.

Risulta il bilancio idrologico riportato in tabella che raccoglie valori relativi a un arco temporale di un anno.

Area	Precipitazioni medie annue (1961-1990 e 1994-2012)	Evapotraspirazione media annua (1961-1990)	Precipitazioni efficaci	Portata media annua alle 5 sorgenti principali	Deflussi superficiali & altri deflussi sotterranei
600 km ²	1550 mm	480 mm	1070 mm	789 mm	281 mm

La direzione del flusso derivante dal bilancio di apporti meteorici con deflussi sorgentizi è N-SE. Le quantità in gioco sono dell'ordine di centinaia e migliaia di litri al secondo.

3.2. Prove di tracciamento

Le prove di tracciamento sono svolte in sito preliminarmente con lo scopo di determinare i collegamenti tra la zona di ricarica e quella di recapito dell'acquifero e di stabilire i tempi di percorrenza nonché quelli di diluizione della sostanza estranea nell'acqua ipogea.

In particolare le prove considerate hanno come obiettivo quello di rilevare nei punti di emergenza alla base dell'acquifero diffusi nella Valle dell'Astico e nella valle del Brenta, che costituiscono il sistema in uscita, un tracciante, che viene immesso nelle acque di un torrente effimero che scorre sull'altopiano dei Sette Comuni.

L'esperienza eseguita con i traccianti qui riportata è stata eseguita dal Club Speleologico del Proteo in stretta collaborazione con ARPAV, Servizio acque interne dell'Area tecnico-scientifica nell'ambito dello "studio idrogeologico e idrochimico dell'altopiano di Asiago e delle sorgenti dell'Oliero" del 2012.

La prova ha inizio nel centro della piana sovrastante l'acquifero dell'Altopiano dei Sette Comuni, dove si trova una vasta conca con una superficie che va dai 1000 ai 1100 m s. l. m., delimitata marginalmente dalle profonde valli dei due fiumi Astico e Brenta e a Nord e a Sud da versanti che si raccordano con sovrastanti altipiani.

La conca mediana è caratterizzata dall'incisione del torrente Ghelpach che dalla zona di Gallio si snoda in modo sinuoso verso ovest fino a confluire nella Valle d'Assa; accoglie, in alcuni mesi dell'anno, le acque del torrente per un percorso lungo 12 km caratterizzato dalla presenza di numerosi inghiottitoi.

In corrispondenza di un inghiottitoio situato lungo il Torrente Ghelpach in località Morar sono stati rilasciati 25 kg di fluoresceina, un composto chimico a basso impatto ambientale e molto colorante anche a basse concentrazioni.

A valle invece, sono stati monitorati i captori, precedentemente posizionati nelle varie emergenze presenti nell'area dell'acquifero selezionate per l'esperimento: in una dozzina di sorgenti ubicate attorno all'Altopiano di Asiago lungo la Valle del Brenta e la Valle d'Astico come evidenziato in Figura 4.

I captori sono stati prelevati e sostituiti il giorno seguente e successivamente con cadenza settimanale e sottoposti ad analisi da parte del Laboratorio Arpav di Vicenza.

I campioni d'acqua prelevati alle sorgenti sono stati analizzati dal Laboratorio ARPAV di Vicenza tramite Analisi spettro- fluorimetriche che valutano le concentrazioni di fluoresceina disciolta in

acqua misurando le emissioni luminose emesse alla particolare lunghezza d'onda dello strumento.



Figura 15: Sorgenti esaminate durante l'esperienza di tracciamento. La freccia indica la connessione del flusso idrico ipogeo dal punto di immissione (inghiottitoio nel T. Ghelpach) alle sorgenti dell'Oliero

Nome sorgente	Comune	Località	Punto di prelievo
Acquedotto di Pedescala	Valdastico	Pedescala	Sorgente captata da AVS
Il Fontanon	Valdastico	Pedescala	Sorgente che si getta nell'alveo del T. Assa
Le Buse	Valdastico	Casotto	Captazione per uso privato
Piasan	Caltrano	Camisino	Sorgente captata da AVS
Stue	Bassano	Campese	Sorgente non captata con opera di presa in muratura
Rea Nasse	Bassano	Campese	Sorgente non captata con opera di presa in muratura
Borin	Campolongo sul B.	Campolongo sul B.	Sorgente che si getta direttamente nel F. Brenta
Oliero	Valstagna	Oliero	Covolo dei Siori
Valstagna	Valstagna	Valstagna	Captazione per uso locale
Fontana Moretti	Valstagna	Fontoli	Sorgente che si getta direttamente nel F. Brenta
Laghetto Bigonda	Selva di Grigno	Selva di Grigno	

Tabella 11: Sorgenti prese in esame durante l'esperienza di tracciamento

Ne risulta che:

- Solo due sorgenti su undici monitorate sono risultate positive: la Sorgente di Oliero e la Sorgente Borin, situata più a valle lungo la valle del Brenta. Mentre sono andati perduti i risultati relativi ai captori di due sorgenti lungo la Valle del Brenta (S. Rea e Stue) e di una sorgente della Valle d'Astico (Il Fontanon a Pedescala) perché trafugati o asportati dalle piene;
- l'arrivo del tracciante alle sorgenti dell'Oliero è sfasato di alcune settimane rispetto all'arrivo alla sorgente Borin, nonché la completa dissoluzione del fluorescente nelle acque defluenti dalle sorgenti, come mostra l'istogramma 3d di Figura 16;

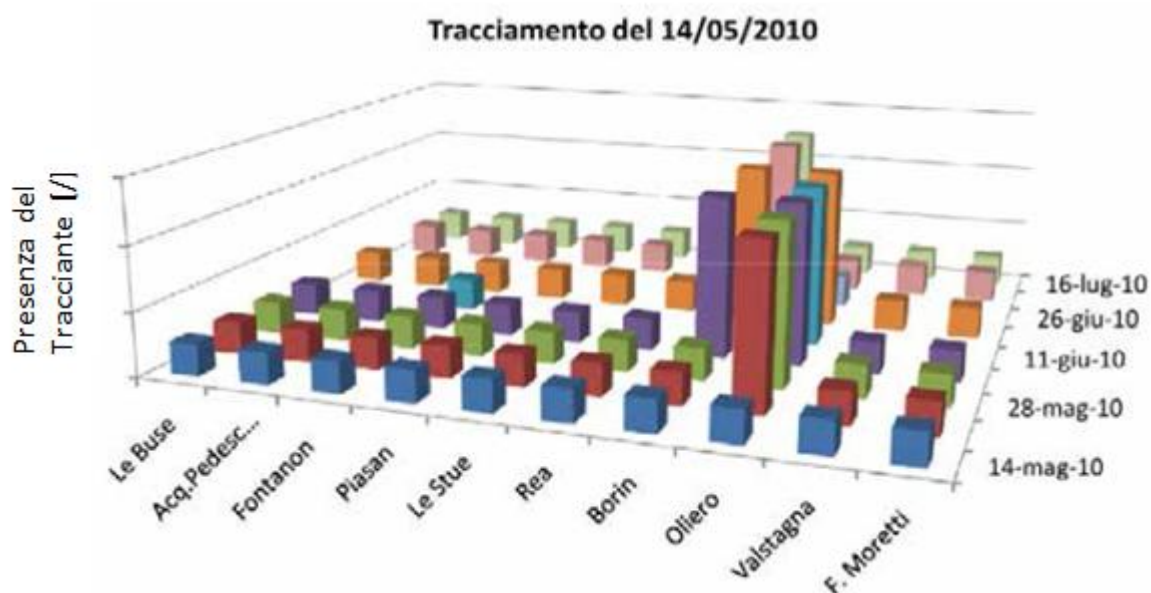


Figura 16: Individuazione dell'arrivo del tracciante alle diverse sorgenti monitorate. (Club Speleologico del Proteo, 2010).

- Inoltre, le concentrazioni di fluoresceina estratte dai campioni d'acqua prelevati da alcune sorgenti, mostrano come valori apprezzabili siano stati riscontrati soltanto nelle acque defluenti dalla sorgente di Oliero. L'andamento evidenzia che i valori delle concentrazioni dell'agente estraneo disciolto, che si palesa nelle acque di Oliero già dopo la prima settimana dall'immissione a monte, ritornano sotto la concentrazione limite di rilevabilità nel giro di circa un mese.

L'andamento delle concentrazioni rilevate nelle settimane seguenti la prova è mostrato nel grafico di Figura 17 che riporta in ordinata i valori misurati dallo strumento dell'analisi spettro – fluorimetrica: lo strumento misura l'intensità luminosa emessa alla particolare lunghezza d'onda

dello strumento, a seconda della concentrazione di fluoresceina nel campione d'acqua considerato.

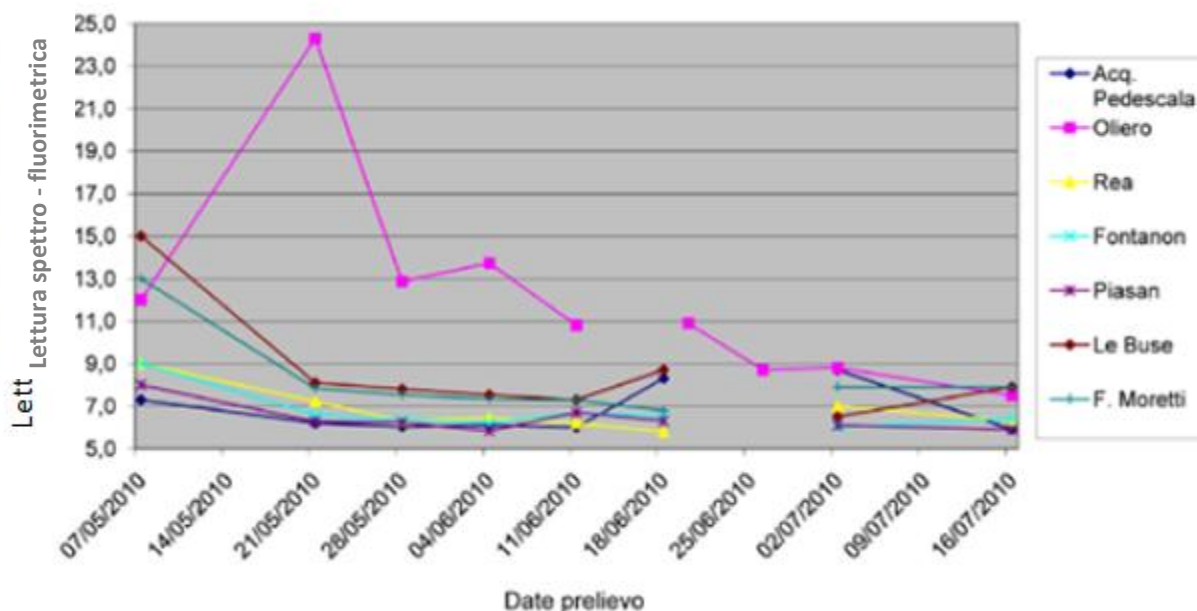


Figura 17: Andamento delle concentrazioni di tracciante risultante dalle registrazioni dei valori dell'analisi spettro – fluorimetrica dei campioni d'acqua di alcune sorgenti monitorate durante la prova di tracciamento (Laboratori Arpav di Vicenza, 2010).

- Infine si è rilevato che tutte le sorgenti poste lungo la valle dell'Astico sono risultate negative alla prova, indicando quindi l'assenza di tracciante disciolto.

Le prove hanno accertato l'esistenza di una connessione idrologica tra la zona situata a Ovest di Asiago nei a 1000 m s.l. m. e le sorgenti dell'Oliero; mentre hanno escluso il collegamento di tale ricarica con le altre emergenze site attorno all'acquifero.

I flussi ipogei che circolano nell'acquifero carsico dell'Altopiano dei Sette Comuni, seguono prevalentemente la direzione che porta all'emergenza verso Est, in particolare dalla superficie della conca centrale dell'ammasso fino alle sorgenti di Oliero nella Valle del Brenta; e la copiosità delle acque circolanti garantisce una mitigazione completa di una sostanza inquinante tale da contrastarne l'effetto in meno di un mese di deflusso.

E' possibile stimare la velocità di trasporto di una sostanza disciolta nell'acqua dell'acquifero: considerando una distanza di circa 12 km, con un dislivello di 900 m, dalla conca di Asiago alle sorgenti di Oliero e un tempo di arrivo del tracciante dell'ordine delle 12-24 h, valutato dalle analisi dei captori, si stima una velocità di 1000-500 m/ora (cioè 0.3-0.14 m/s).

Tale valore è confrontabile con l'esperienza con tracciante per valutare i tempi di percorrenza delle acque sotterranee del sistema carsico condotta nel 1986 (riportata da Gennari, Landi & Sauro, 1989): il tracciante è stato immesso presso un inghiottitoio lungo il letto del Ghelpach ed è stato rilevato circa 24 h dopo alle sorgenti di Oliero. Considerando un tempo di transito di 24 h e una distanza planimetrica dall'immissione alla stazione di misura di 11 km, la velocità di circolazione è stata stimata di circa 460 m/ora.

3.3. Monitoraggio in continuo della sorgente Covol dei Veci

L'esperienza di monitoraggio in continuo di una sorgente è svolta in sito con lo scopo di studiare il funzionamento del punto di emergenza dell'acqua da un acquifero legata al deflusso intrinseco nello stesso, per un periodo sufficientemente lungo da tenerne conto delle variazioni stagionali. Quando si prevede nello specifico la registrazione degli apporti (valori delle precipitazioni) e delle uscite (portate e valori chimico-fisici delle acque sgorganti), serve a comprendere il funzionamento idrologico di un sistema carsico.

In particolare, il monitoraggio considerato ha come obiettivo quello di valutare le variazioni delle caratteristiche quali pressione, temperatura e conducibilità elettrica, dell'acqua che defluisce dalla sorgente Covol dei Veci dell'Oliero da elaborare per stimare il funzionamento qualitativo afflussi-deflussi dell'acquifero dell'Altopiano dei Sette Comuni. Inoltre i dati di pressione che rappresentano il livello idrico dell'acqua che sgorga dalla sorgente, raffrontati con i dati della precipitazione che alimenta il bacino idrografico annesso, forniscono le basi per la creazione di un modello quantitativo dello svuotamento del bacino carsico.

Il monitoraggio della sorgente Covol dei Veci alla base delle elaborazioni eseguite, è stato condotto dal Club Speleologico del Proteo a partire dal 2008 e i dati di precipitazione sono stati messi a disposizione dal Centro Meteorologico di Teolo della Regione del Veneto.

3.3.1 Inquadramento della captazione monitorata

La sorgente valchiusana Covol dei Veci è ubicata nella valle del Brenta presso Valstagna, alle pendici dell'Altopiano dei Sette Comuni (sito in provincia di Vicenza) che costituisce il suo bacino idrografico di alimentazione.

Presenta, assieme alle altre risorgenze della zona di Valstagna (Oliero, Ponte Subiolo, Rea e Stue), una portata complessiva media annua stimata di circa 15 m³/s; e, insieme alla Sorgente adiacente Covol dei Siori e a quella poco più a monte di Ponte Subiolo, drena circa i 2/3 delle precipitazioni che investono la superficie dell'Altopiano di Asiago (Dal Prà & Stevan, 1969 e Dal Prà, 1974).

Le acque defluenti da tale sorgente vanno ad alimentare il fiume Brenta che scorre nella valle a Est dell'ammasso carsico e sono soggette a pompaggio dall'acquedotto di Oliero che attinge una portata di 235 l/s quando necessario per integrare il fabbisogno idrico dell'Altopiano.

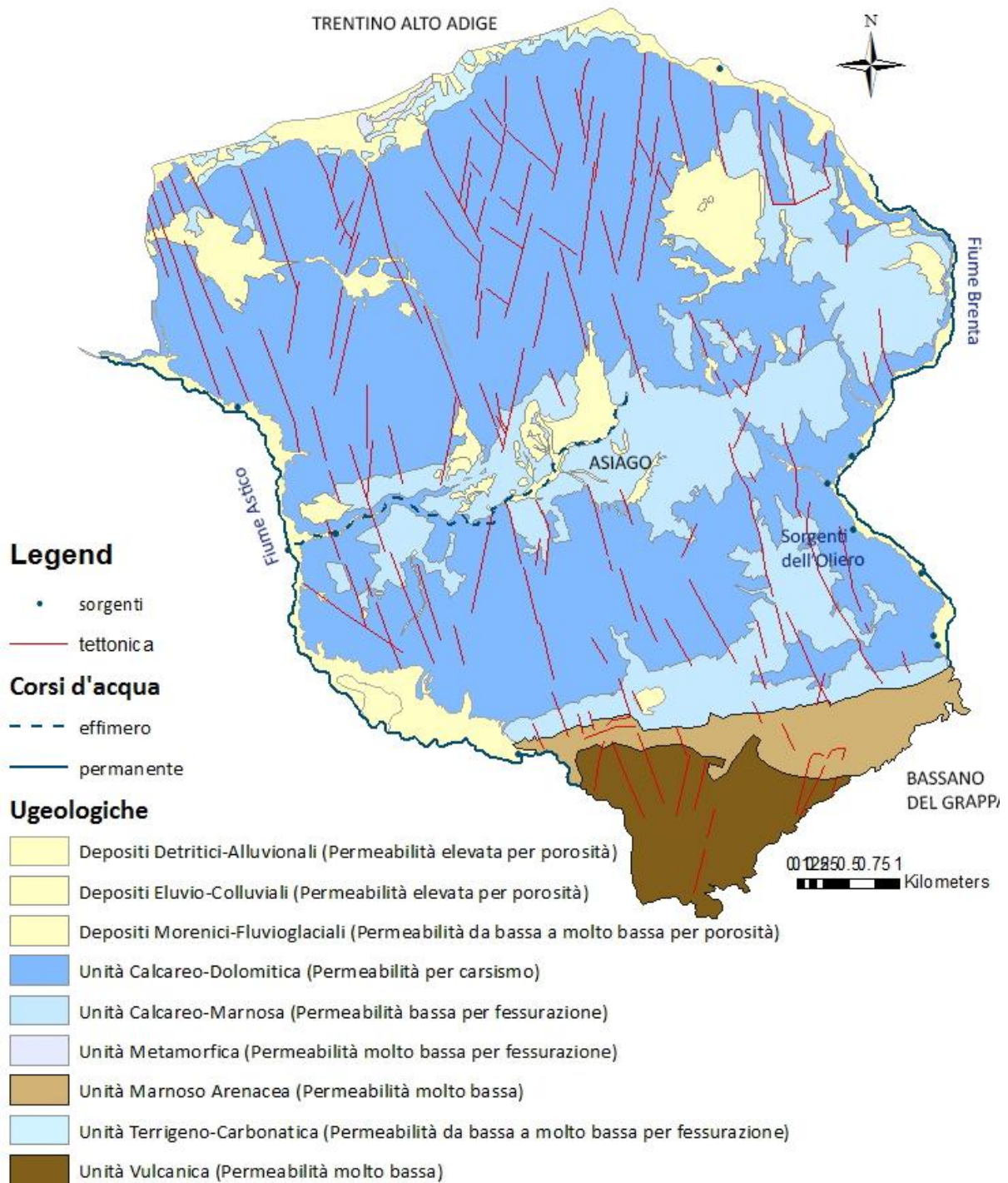


Figura 18: Inquadramento della sorgente del monitoraggio Covol dei Veci con direzione delle linee di flusso

3.3.2 Metodologia e strumenti per l'acquisizione dei dati

Nell'ottobre del 2008 è stata installata una sonda multiparametrica (un modello della serie DL70 multi della ditta STS) in una sezione della sorgente Covol dei Veci, una delle sorgenti dell'Oliero. La sonda ha registrato, con cadenza mezz'oraria e per una durata di due anni, i valori dei seguenti parametri chimico-fisici dell'acqua:

- Temperatura (I dati di temperatura misurati hanno una risoluzione di 0.1°C ed una accuratezza di +/- 0.25 °C);
- Conducibilità (la conducibilità viene misurata con una risoluzione di 1 µS/cm ed una accuratezza di +/- 2 µS/cm);
- Pressione da cui si può ricavare il livello idrometrico della sezione monitorata (per un intervallo di pressione che va da 1 a 5 bar, con una risoluzione < 0.01%FS ed una accuratezza ≤0.25 bar).

I parametri delle acque sotterranee acquisiti ogni mezzora sono stati raffrontati ai dati pluviometrici della stazione di Asiago, registrati con cadenza oraria.

Il livello idrico nella sezione di misura della sorgente viene quindi misurato tramite un trasduttore di pressione e da esso è possibile ottenere i valori di portata uscente tramite un'opportuna scala delle portate.

Nel corso del monitoraggio sono state eseguite due misure di portata utilizzando metodo correntometrico, per cui si determina il range di velocità dell'acqua di una determinata sezione accoppiato al suo rilievo geometrico. Da questi, correlati con alcuni valori estremi di portata desunti dalla bibliografia (Dal Prà & Stevan,1969 e Meneghel et al., 1986), si è cercato di ricostruire, sia pur con evidenti limiti attribuibili alla scarsità di misure di portata disponibili il seguente diagramma di scala delle portate (è infatti opportuno disporre di un congruo numero di misure, distribuite su tutta la possibile escursione dei livelli, raggiungibile dal corso d'acqua in ogni momento, quindi per regimi di magra, di morbida e di piena).

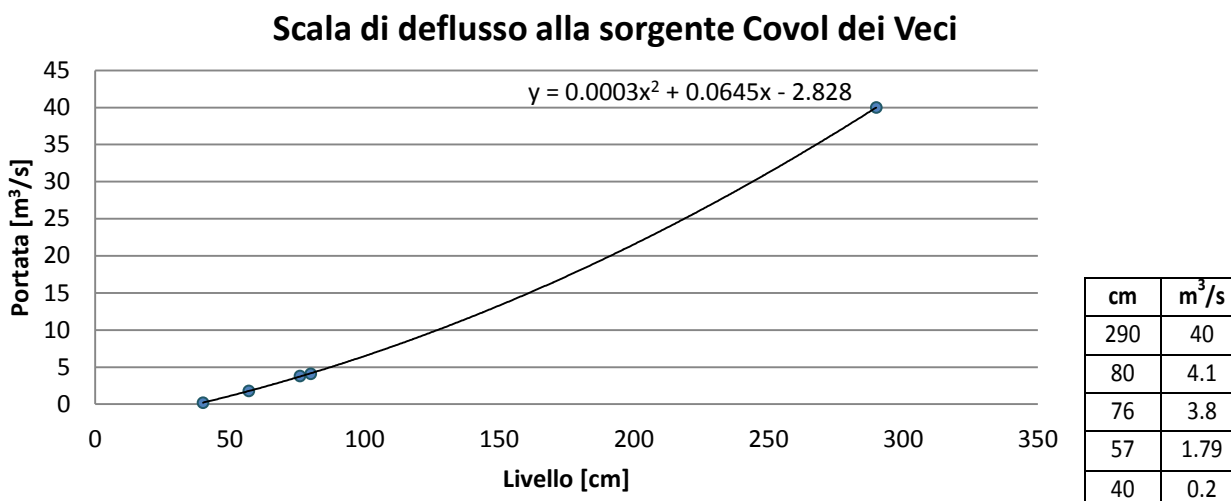


Figura 19: Scala delle portate della sezione di monitoraggio della sorgente Covol dei Veci, costruita a partire da due valori misurati durante il monitoraggio e altri tre misure di portata presenti in bibliografia.

3.3.3. Analisi dei dati

Le sequenze di dati analizzate evidenziano innanzitutto una stretta relazione tra la portata defluente e le precipitazioni tipico di un sistema con un'elevata organizzazione del deflusso.

Grandi variazioni del livello idrico caratterizzano la sorgente e ad ogni variazione di livello corrispondono immediatamente variazioni di temperatura e conducibilità.

I valori monitorati si riassumono in:

- variazioni di livello che raggiungono i 253 cm, con impulsi rapidi ed improvvisi che si sovrappongono a un trend generale di crescita nei mesi primaverili e autunnali;
- valori di conducibilità elettrica mediamente attorno ai 288 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con picchi massimi di 333 $\mu\text{S}/\text{cm}$ nei periodi carenti di deflusso, e minimi di 218 $\mu\text{S}/\text{cm}$ quando le portate sono abbondanti;
- andamenti di temperatura oscillanti tra i 7,7 gradi e i 10,1 mantenendosi per lo più intorno al valore medio di 8,7 gradi.

Tali andamenti sono evidenti nei grafici di Figura 22 che mostrano i dati registrati nei due anni di monitoraggio delle acque defluenti dalla sorgente Covol dei Veci, escludendo due mesi centrali che sono risultati privi di misurazioni a causa di un problema strumentale.

L'idrogramma del sistema carsico vadoso, presenta picchi molto netti, simili a quelli dei corsi d'acqua superficiali, nella roccia infatti il fenomeno carsico ha scavato veri e propri fiumi sotterranei oltre che allargamenti simili a laghi in cui l'acqua ruscella, precipita in cascata o staziona.

L'anno idrologico è stato individuato dal mese di settembre come mostrano le curve di Figura 20 e Figura 21, anche se per l'anno 2009 non sono disponibili alcune registrazioni quindi non

vengono riportate. Il periodo di ricarica è individuato tra i mesi di Marzo e Aprile e quello di svuotamento tra i mesi di Aprile e Luglio con in particolare un periodo di esaurimento che parte da fine Maggio o inizio Giugno.

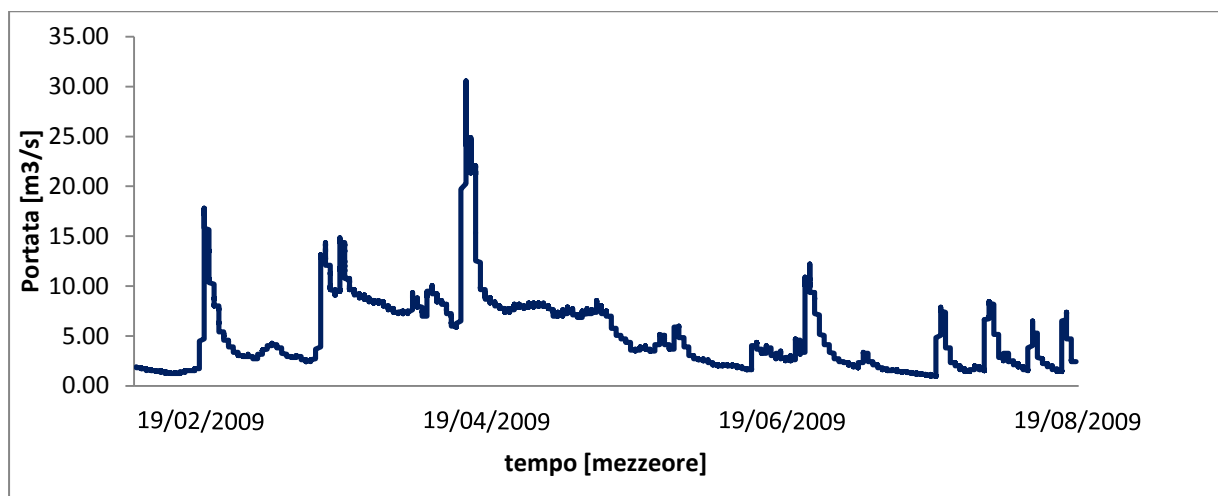


Figura 20: Idrogramma della sorgente di Oliero dell'anno idrologico 2009.

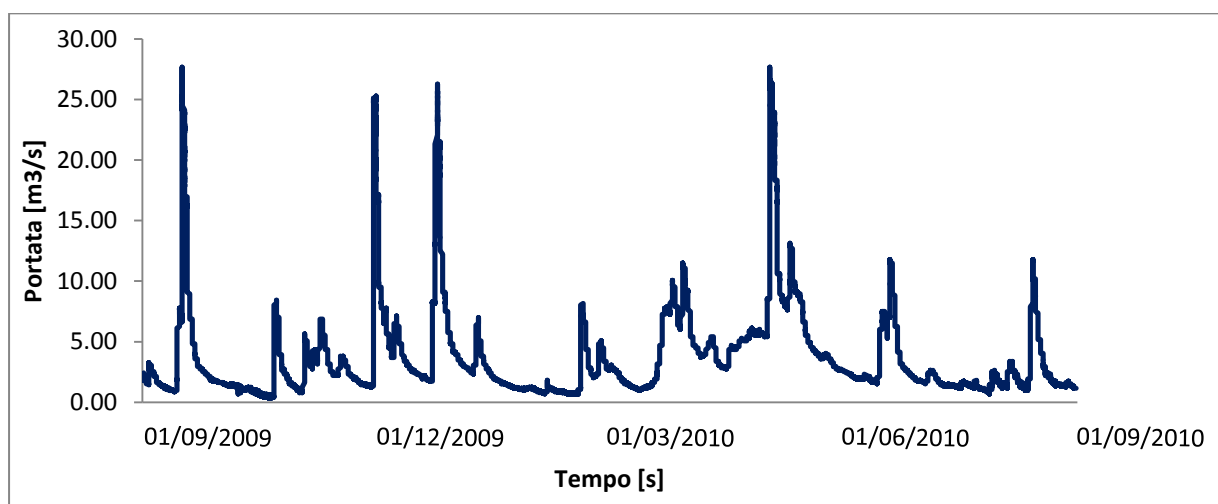


Figura 21: Idrogramma della sorgente di Oliero dell'anno idrologico 2010.

L'analisi dei dati si basa inizialmente sul raffronto dei dati di precipitazione con i valori di portata uscente ricavati dai livelli idrometrici, tramite la scala delle portate precedentemente calcolata (Figura 19).

L'idrogramma di Figura 23 mostra una stretta relazione tra le misure derivanti da stazioni distanti vari chilometri come è tipico di un sistema con un'elevata organizzazione del deflusso. Tuttavia la complessità della risposta di alcuni eventi fa intendere l'eterogeneità dell'acquifero carsico analizzato, costituito da zone con allagamenti permanenti.

In generale si hanno elevati picchi di portata nei mesi autunnali; portate mediamente elevate nei mesi primaverili; e leggeri picchi nel periodo estivo a causa dello stato "svuotato" in cui si

ritrovano i serbatoi sotterranei permanenti dell'acquifero a seguito dell'ingente deflusso primaverile.

Dall'analisi degli andamenti delle riportati in Figura 22 e dagli idrogrammi ricavati di Figura 23, è possibile evidenziare inoltre i valori corrispondenti al deflusso di base. Si prende come deflusso di base dell'acqua alla sorgente il valore minimo misurato durante l'anno di monitoraggio: 320 l/s corrispondenti a 41 cm di livello misurato per il 2009; e 682 l/s corrispondenti a 45 cm di altezza idrica alla sorgente nel 2010. Nella stagione primaverile, a causa degli apporti idrici derivanti dal disgelo, il deflusso di base si mantiene attorno ai 6000 l/s corrispondente a un valore di livello idrico misurato attorno ai 100 cm.

Da tali valori le massime piene hanno determinato degli aumenti di livello idrico di circa 2m nel 2009 e 2,5 m nel 2010 (che corrisponde a una portata superiore ai 40 000l/s).

I valori medi nei due anni coincidono e sono pari a un livello registrato di 80 cm corrispondente alla portata media annua estrapolata di 4 100 l/s .

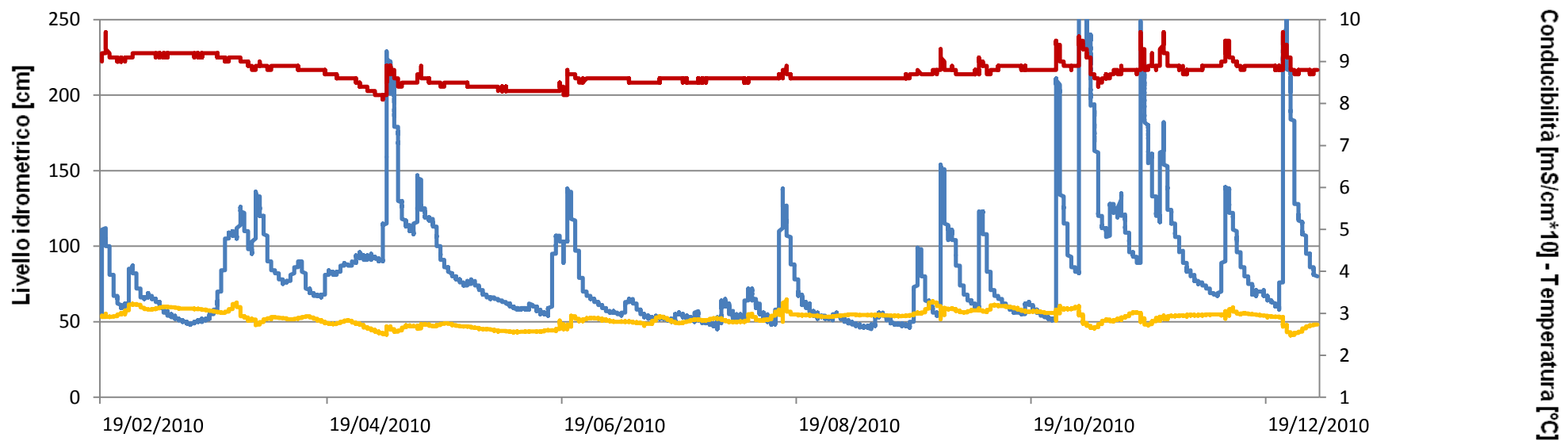
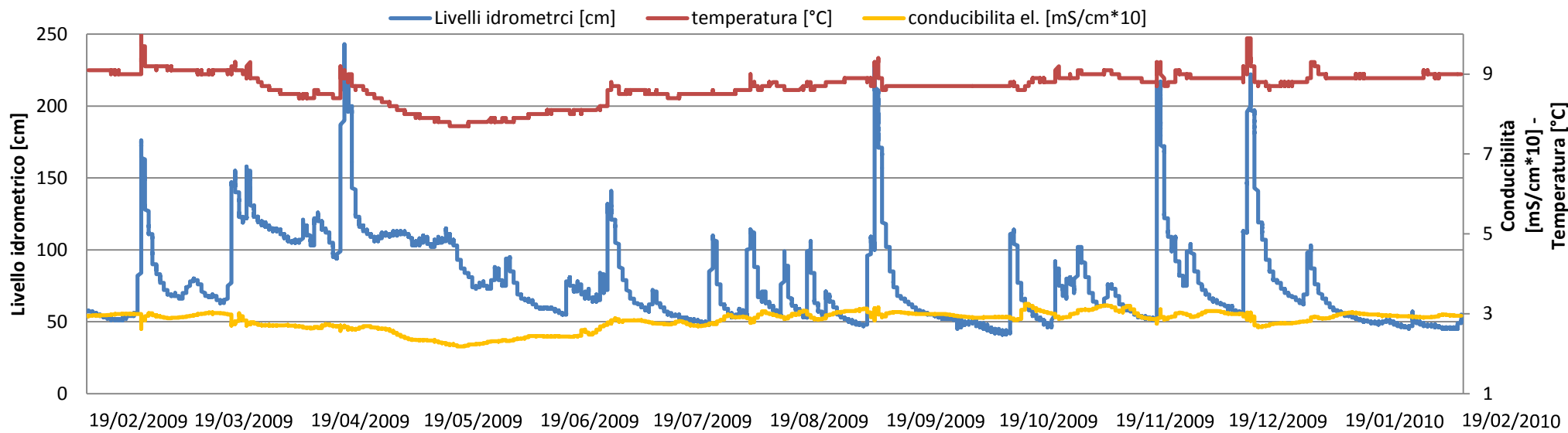


Figura 22: RegISTRAZIONI del monitoraggio della portata della sorgente Covol dei Veci condotto dal Club Speleologico del Proteo a partire dal 2008

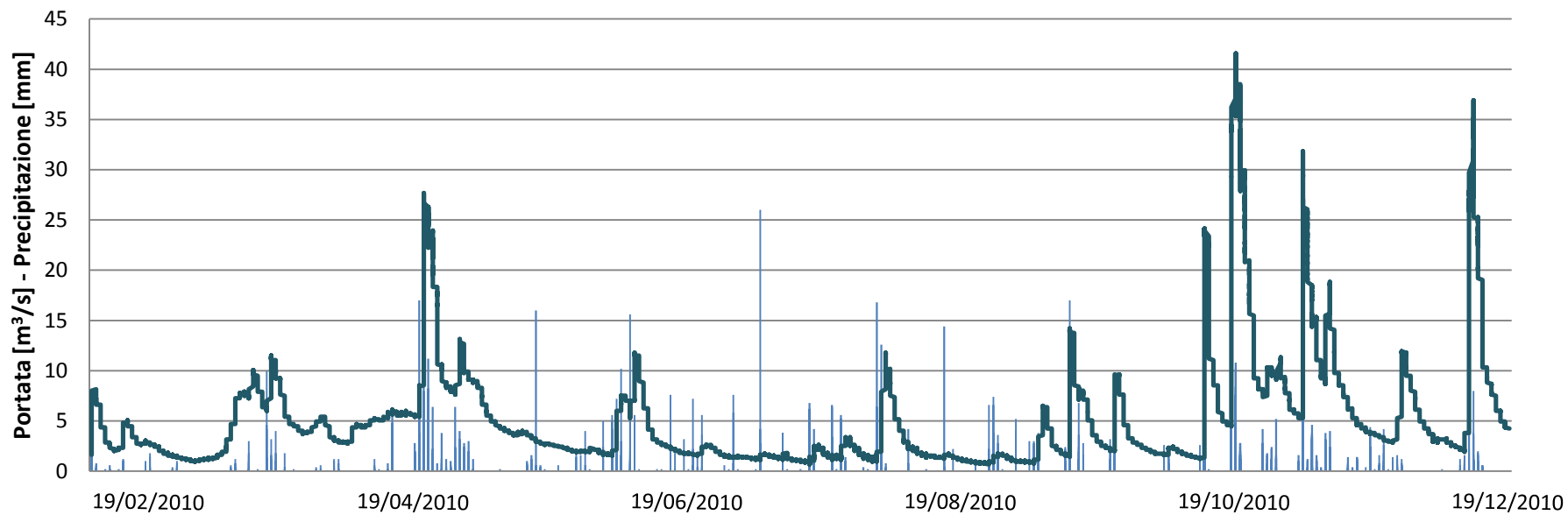
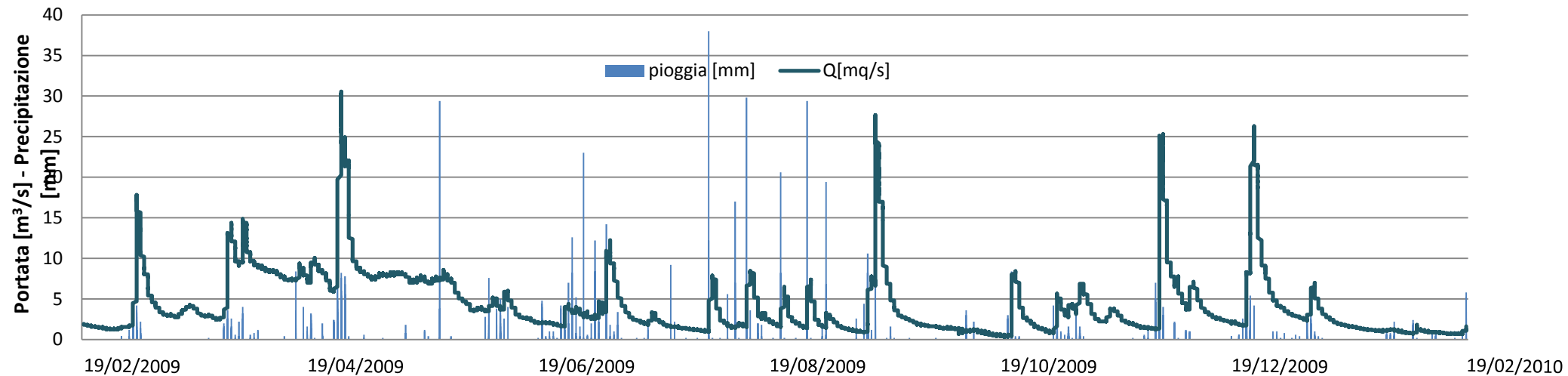


Figura 23: Raffronto portata effluente dalla sorgente Covol dei Veci e precipitazione registrata alla stazione meteorologica di Asiago

Registrazioni annuali per valutare gli andamenti stagionali

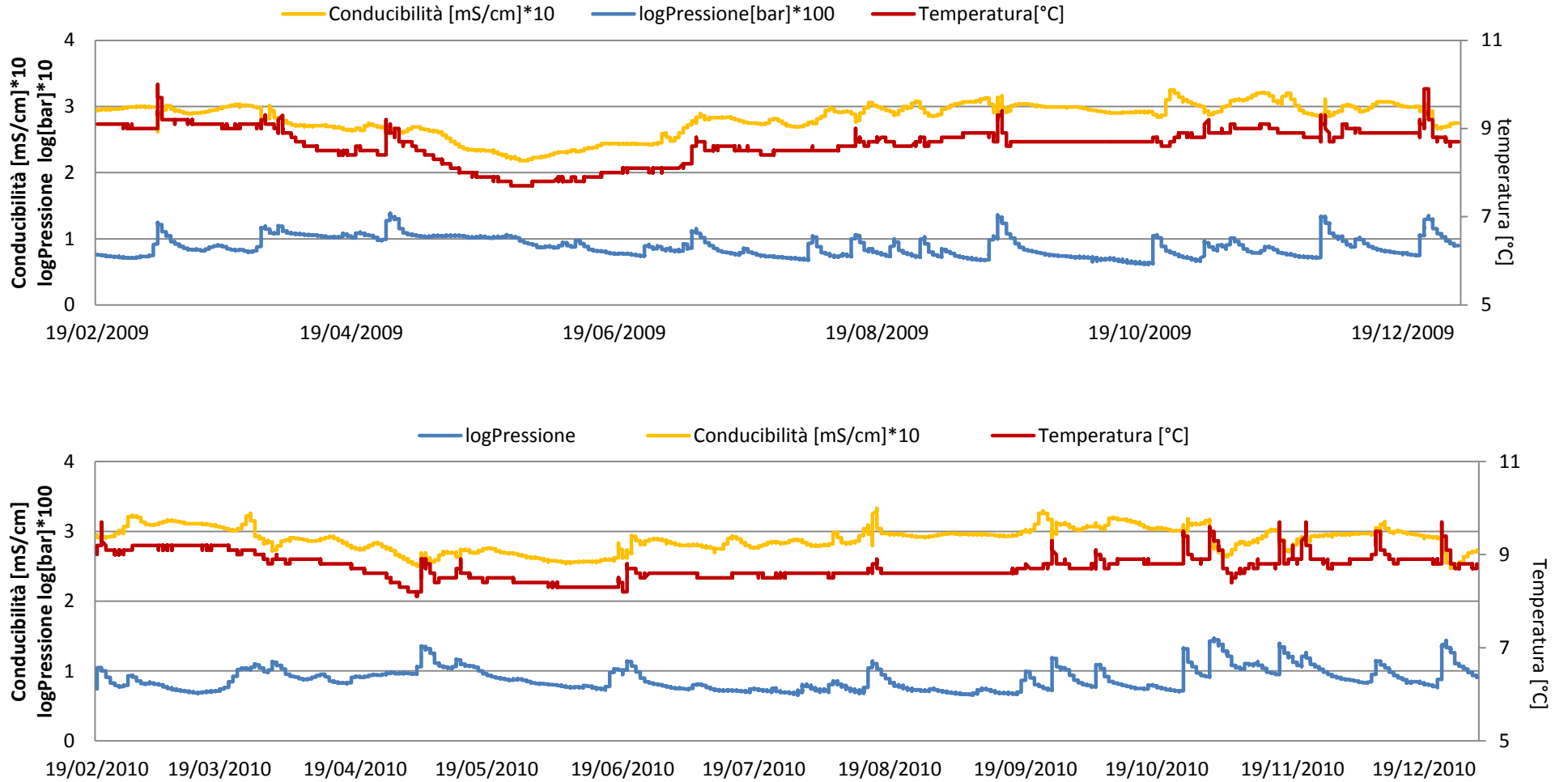


Figura 24: Andamento dei valori di conducibilità elettrica e temperatura registrati alla sorgente Covol dei Veci durante il monitoraggio condotto dal Club Speleologico del Proteo raffrontati con l'andamento della pressione espressa in scala logaritmica

Considerando i singoli picchi, corrispondenti alle risposte del sistema a ogni evento meteorico, si deduce che l'aumento di portata (o di livello idrometrico) segue di poche ore l'evento meteorologico, mentre il picco della stessa si esaurisce in 200 ore approssimativamente. La stretta relazione tra gli apporti meteorologici e il deflusso dalla sorgente monitorata, è puntualizzata quantitativamente dal raffronto delle registrazioni del singolo evento di pioggia del 3 Agosto 2009: in circa 24 h si registra un dislivello di pressione di 5900 bar (passando da una pressione di 4900 a una di 11000 bar); e tale picco si smaltisce in circa 100 h a seguito delle quali si ripristina un livello corrispondente a 5300 bar prima che si verifichino altri rovesci (Figura 25).

Durante l'evento di Settembre 2009 (Figura 26) invece, essendo la precipitazione più abbondante e persistente, la risposta è caratterizzata da un picco di livello idrometrico di circa 2,3 metri raggiunto dopo circa 70 ore dall'inizio della ricarica, e un esaurimento dello stesso che impiega più di 300 ore (12 giorni).

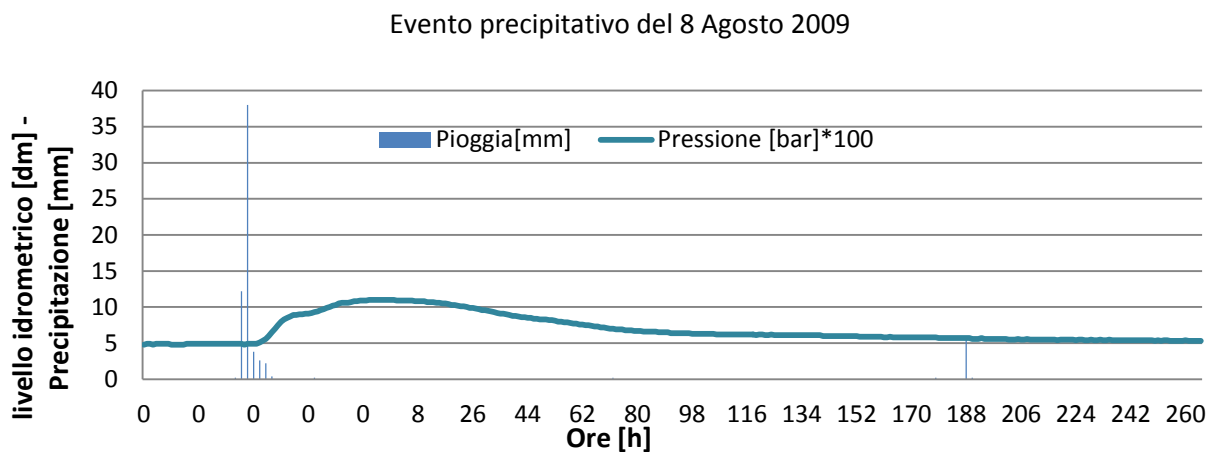


Figura 25: Risposta del deflusso dalla sorgente Covol dei Veci al singolo evento precipitativo (giorno 8 Agosto 2009)

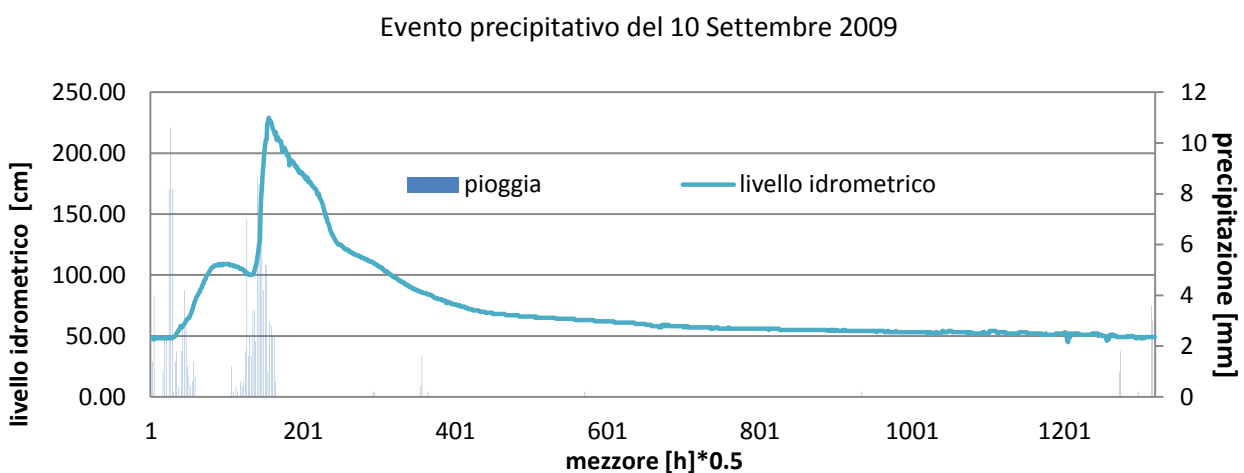


Figura 26: Risposta all'evento precipitativo della prima metà di Settembre 2009. Livello di picco di 229 cm a seguito di 161 mm di pioggia cumulata.

Lo studio dei dati di monitoraggio procede con una sequenza di dati che illustra il raffronto tra i valori di pressioni e la variazione di conducibilità e temperatura nelle acque della sorgente di Oliero. Dal confronto dei grafici delle registrazioni riportati in Figura 22 risulta evidente che ad ogni variazione di livello - espresso dall'andamento delle pressioni - corrispondono repentine variazioni di temperatura e conducibilità.

Considerando globalmente gli andamenti annuali (riportati in Figura 24) si evidenziano due fasi distinte:

- durante il periodo primaverile – estivo, in particolare da Aprile a Giugno compresi, la conducibilità elettrica dell'acqua defluente dalla sorgente è mediamente più bassa in quanto una maggiore quantità d'acqua fluente nell'acquifero, si traduce in un abbassamento della concentrazione di sali disciolti;
- nei mesi di Febbraio e Marzo invece l'acqua monitorata alla sorgente risulta particolarmente mineralizzata, per una minore diluizione, e presenta livelli più elevati di temperatura, sintomo di una moderata infiltrazione degli apporti meteorici esterni che sono più freddi.

(La variazione di pressione e quindi di livello è riportata nei grafici di Figura 24 in scala semilogaritmica affinché i valori visualizzati siano raffrontabili con quelli degli altri due parametri monitorati).

Si deduce pertanto l'influenza degli apporti idrici dovuti al fenomeno di disgelo sulle caratteristiche chimico - fisiche della risorsa idrica: nel periodo che va da Aprile a Giugno compresi, buona parte della ricarica dell'acquifero deriva dallo scioglimento dei ghiacci che sovrastano l'Altopiano nel periodo invernale e implica un deflusso più abbondante ma dalle caratteristiche chimiche più povere.

Considerando le variazioni dei singoli eventi di precipitazione, e quindi i singoli picchi di pressione, invece, si analizza il tipo di risposta della sorgente alla ricarica e si determina il funzionamento idrogeologico del sistema.

Si riscontrano due opposte reazioni delle caratteristiche chimiche delle acque agli aumenti idrici conseguenti il singolo evento meteorico:

- Ad aumenti di portata defluente possono conseguire temporanei abbassamenti del livello di mineralizzazione dell'acqua, ovvero picchi inversi nell'andamento dei valori di conducibilità elettrica registrata. Si parla di "*risposta per sostituzione*" per cui l'acqua di ricarica si trasferisce direttamente alla sorgente, scorrendo nei condotti sotterranei del sistema "a dreno dominante" evitando la lenta circolazione circostante nella roccia permeabile o negli allagamenti permanenti sotterranei; (Indicata nelle tabelle con colore bordeaux).
- se ad aumenti di portata corrispondono invece dei picchi positivi conducibilità elettrica, allora si definisce la "*risposta a pistonaggio*", per cui la pioggia infiltrata provoca una mobilitazione per spinta idrostatica delle acque immagazzinate da tempo nei serbatoi permanenti e quindi più ricche di sali minerali (indicata nelle tabelle con colore blu).

Le stesse considerazioni sono da farsi sulle variazioni dell'altro parametro registrato alla sorgente che si discosta momentaneamente dal valor medio in corrispondenza dei picchi di pressione.

Nel **periodo invernale**, in particolare da inizio Gennaio a fine Marzo, i valori dei parametri misurati non presentano consistenti variazioni: nel 2010 si registrano variazioni dei livelli che non superano i 100 cm, che non alterano particolarmente le caratteristiche chimico-fisiche della sorgente.

In questi mesi infatti l'area di alimentazione dell'Altopiano accoglie una precipitazione esigua (Figura 12) e soprattutto prevalentemente nevosa, oltre che presentare temperature sotto lo zero; e quindi è ricoperta di un terreno ghiacciato che costituisce un'impermeabilizzazione temporanea al drenaggio ipogeo.

I livelli idrici sono bassi e il tipo di risposta di drenaggio all'evento precipitativo è a "pistonaggio" tranne che per l'episodio di fine Marzo in cui una variazione di livello più consistente (90 cm) diminuisce di molto le acque circolanti nell'acquifero.

Nel **periodo primaverile**, che va da inizio Aprile sino a metà Giugno, i livelli idrometrici registrati presentano valori che si mantengono al di sopra dei 100 cm suggerendo una stima del deflusso di base corrispondente a una portata $6 \text{ m}^3/\text{s}$. Inoltre i valori medi registrati di temperatura e conducibilità diminuiscono: il picco minimo si osserva a fine Maggio nell'anno 2009 quando si registrano 7.7°C di temperatura e $220 \mu\text{S}/\text{cm}$ di conducibilità elettrica. Essi testimoniano l'arrivo alla sorgente delle acque di disgelo, fredde e meno mineralizzate, dopo che si sono mescolate con quelle della zona freatica.

Dalla tabella si osserva che quando si parte da un deflusso di base consistente il funzionamento del sistema è prevalentemente per sostituzione: il bacino è saturo di acqua e gli ingressi defluiscono senza mescolarsi con le acque ristagnanti nell'acquifero, cioè non modificando molto le caratteristiche chimico-fisiche.

Nel 2009 la risposta dell'acquifero all'ingresso d'acqua concentrato è per sostituzione poiché i livelli idrometrici si mantengono sopra i 100 cm sempre; nell'anno 2010 invece il livello di deflusso di base della stagione di disgelo superato il mese di Aprile è inferiore ai 100 cm e la risposta agli eventi precipitativi che prevale è tipica di un sistema "a pistonaggio" (Figura 27).

Nella **stagione estiva** la risposta del sistema è quasi costantemente a pistonaggio come mostrato il tabella seguente, a supportare la spiegazione che tale risposta consegue condizioni di livello di deflusso basso.

L'acquifero si trova in condizioni "di magra" a causa degli ingenti deflussi che hanno caratterizzato il precedente periodo di disgelo e quindi i singoli eventi meteorici di ricarica determinano moderati picchi di livello idrometrico e emersione di acque mineralizzate dalla prolungata permanenza negli allagamenti permanenti.

		GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	
Pioggia cumulata 2010	mm	62	86	62	
Dislivello idrometrico	cm	da 70 a 100	da 50 a 110	da 60 a 80	da 60 a 150
Conducibilità elettrica	mS/cm	da 0.27 a 0.3	da 0.29 a 0.3	da 0.3 a 0.33	0.3 a 0.28

		APRILE	MAGGIO	GIUGNO	
Pioggia cumulata 2009	mm	250	40	152	
Dislivello idrometrico	cm	da 100 a 150	da 100 a 250		
Conducibilità elettrica	mS/cm	da 0.3 a 0.27	0.26 a 0.255		
Pioggia cumulata 2010	mm	33	268	163	
Dislivello idrometrico	cm	da 100 a 140	da 90 a 230	da 50 a 100	Da 100 a 145
Conducibilità elettrica	mS/cm	da 0.28 a 0.27	da 0.25 a 0.27 a 0.255	da 0.255 a 0.27	da 0.26 a 0.29

		LUGLIO	AGOSTO		SETTEMBRE
Pioggia cumulata 2009	mm	118	224		187
Dislivello idrometrico	cm	da 60 a 140	da 50 a 110	da 50 a 110	da 50 a 240
Conducibilità elettrica	mS/cm	0.27 a 0.28	0.28 a 0.3	0.28 a 0.3	0.3 a 0.31
Pioggia cumulata 2010	mm	123	147		
Dislivello idrometrico	cm		da 50 a 70	da 50 a 140	da 60 a 150
Conducibilità elettrica	mS/cm		0.27 a 0.3	psp	0.3 a 0.28

		OTTOBRE	NOVEMBRE		DICEMBRE
Pioggia cumulata 2008			230		166
Dislivello idrometrico	cm		da 40 a 160	da 70 a 140	
Conducibilità elettrica	mS/cm		0.3 a 0.28		
Pioggia cumulata 2009	mm	68	207		148
Dislivello idrometrico	cm	da 60 a 140	da 40 a 90		da 50 a 240
Conducibilità elettrica	mS/cm	0.27 a 0.28	0.29 a 0.28 a 0.32		0.3 a 0.31
Pioggia cumulata 2010	mm	246	365		208
Dislivello idrometrico	cm	Da 50 a 210	da 80 a 290	da 90 a 250	da 60 a 150
Conducibilità elettrica	mS/cm	0.3 a 0.28 a 0.32	0.31 a 0.26	0.3 a 0.27	0.3 a 0.28

Tabella 12: Correlazioni dei dati relativi ai picchi di liello idrico defluente dalla Sorgente Covol dei Veci . Il colore Bordeaux indica un tipo di risposta per sostituzione mentre il colore blu evidenzia il funzionamento a pistonaggio del sistema acquifero.

Raffronto conducibilità elettrica – portata per il singolo evento precipitativo

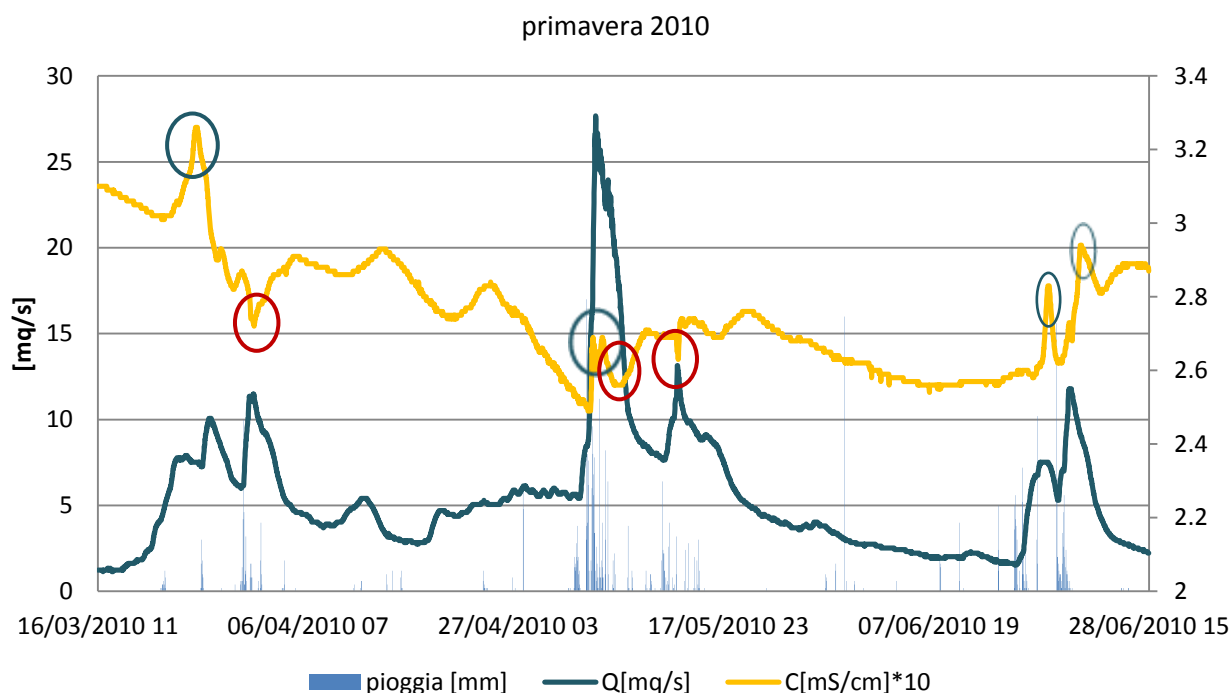


Figura 27: Raffronto dell'andamento di conducibilità elettrica e portata dell'acqua defluente dalla sorgente Covol dei Veci nella stagione primaverile dell'anno 2010 del monitoraggio condotto dal Club Speleologico del Proteo. La concordanza del picco di portata e conducibilità elettrica tipica della risposta "a pistonaggio" dell'acquifero.

Il tipo di risposta del sistema all'ingresso, sembra quindi dipendere dal livello d'acqua di base.

Se per esempio si considera il periodo del disgelo, quando la stagione è caratterizzata da un deflusso di base inferiore ai 100 cm (vedi andamenti del 2010), la risposta al singolo evento di pioggia è "a pistonaggio"; quando il livello idrico di base defluente è superiore ai 100 cm (vedi andamenti registrati dall'inizio di Aprile alla fine Maggio 2009), le uscite dal sistema tendono a formarsi per sostituzione dal momento che durante gli episodi di pioggia l'acqua che giunge alla sorgente presenta dei picchi negativi di conducibilità seppur molto piccoli.

Questa dipendenza è confermata dalle risposte riscontrate nei mesi fra Luglio e Ottobre 2010, dove il livello di deflusso di base è 60 cm (inferiore ai 100) e la risposta ai singoli eventi precipitativi è sempre "a pistonaggio".

Una conferma ulteriore di questo tipo di funzionamento dipendente dal deflusso di base è la situazione mostrata nelle registrazioni dell'autunno 2010. Le frequenti e abbondanti piogge (che hanno provocato anche uno scioglimento nivale con conseguente consistente apporto idrico) hanno instaurato un deflusso di base superiore agli 80 cm, più simile a quello riscontrato in primavera dovuto al disgelo rispetto agli stessi

periodi registrati negli altri anni (2008, 2009), definito “piena nivo-pluviale”; questo stato del sistema ha provocato evidenti e marcate risposte in uscita “per sostituzione”.

Si conclude deducendo che il tipo di funzionamento dell’acquifero dipenda dal livello di base: se inferiore ai 90 cm l’acqua di ricarica spinge idrostaticamente la risorsa mineralizzata; se invece l’acquifero è saturo e il livello di base supera i 100 cm, ad aumenti di volumi di ricarica corrispondono deflussi di acque più diluite e più povere di Sali minerali della media.

Per quanto riguarda gli andamenti di temperatura essi oscillano tra i 7,7 gradi e i 10,1 mantenendosi per lo più intorno al valore medio di 8,7 gradi.

Dagli andamenti delle Figura 28 e Figura 29, le variazioni termiche della sorgente presentano lo stesso segno delle variazioni di pressione nel senso che a forti aumenti di pressione provocati da ingenti apporti d’acqua di ricarica dell’acquifero corrispondono modesti innalzamenti dei gradi di temperatura dell’acqua in uscita.

L’effetto di “pistonaggio” prima descritto tipico di almeno ogni inizio dell’evento di piena, può essere confermato dagli innalzamenti di temperatura dell’acqua che esce dalla sorgente in corrispondenza delle piogge.

Tendenzialmente i picchi di temperatura sono tutti positivi dal momento che ci vuole meno tempo per l’acqua ad acquisire la temperatura del sottosuolo rispetto che mineralizzarsi. Soltanto ingenti apporti provocano fuoriuscite più fredde, ma generalmente la temperatura dell’acqua interna non scende mai troppo.

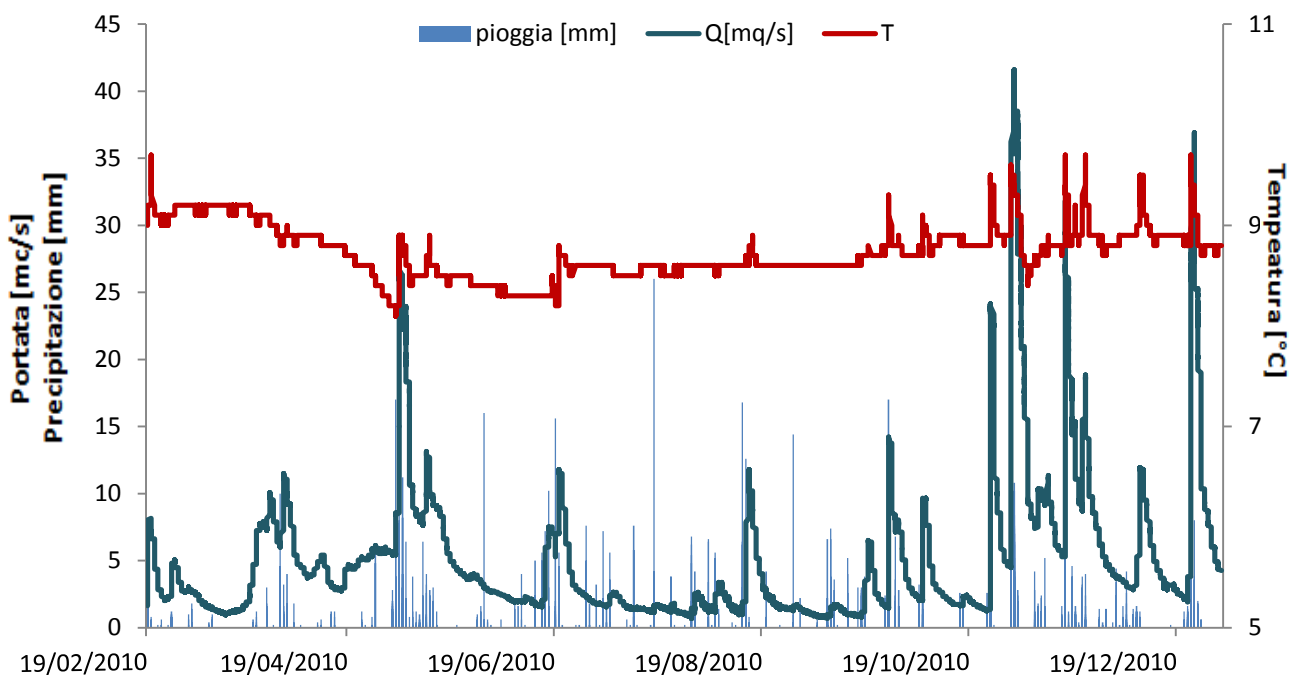


Figura 28: Andamento dei valori di registrazione della temperatura dell’acqua defluente dalla sorgente Covol dei Veci acquisiti durante l’anno 2010 del monitoraggio condotto dal Club Speleologico del Proteo.

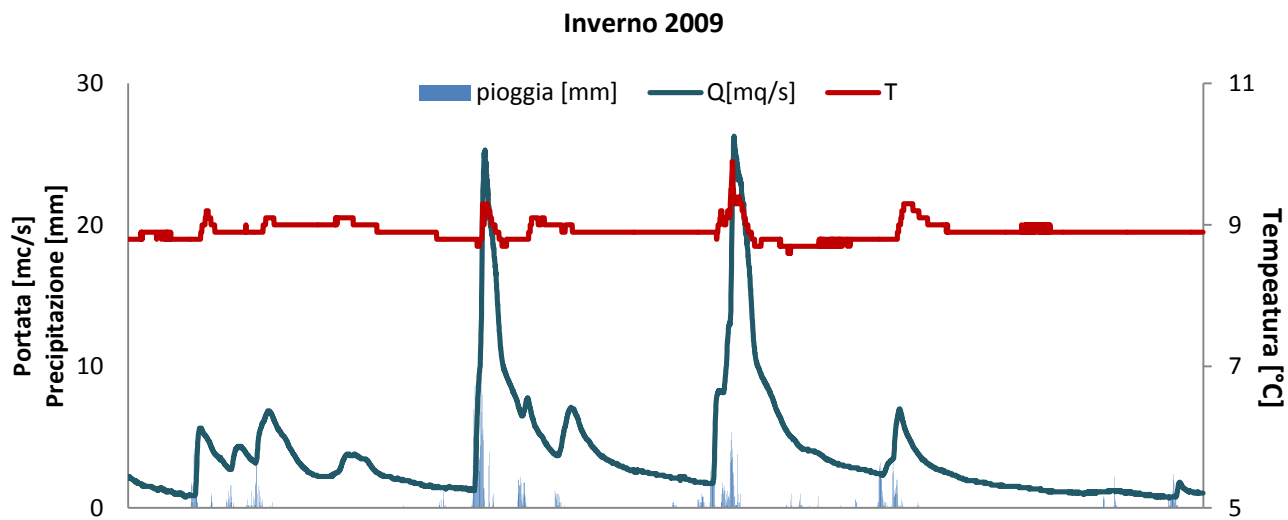


Figura 29: Raffronto dei picchi di temperatura con quelli di portata defluente dalla sorgente Covol dei Veci nella stagione invernale. La concordanza di picco viene interpretata con una risposta a pistonaggio dell'acquifero agli eventi metereologici.

3.3.4. Elaborazione delle registrazioni del monitoraggio

Con lo scopo di indagare il regime idrodinamico della sorgente, si sono calcolate delle curve di svuotamento dell'Acquifero dei Sette Comuni a partire dagli idrogrammi registrati durante il monitoraggio della sorgente di Oliero, Covol dei Veci.

Le curve di svuotamento modellano l'idrogramma di magra, ovvero l'andamento della portata defluente nel tempo dal picco di massimo, al punto di inversione della funzione Portata/Tempo, quando l'idrogramma è di nuovo influenzato dall'arrivo delle acque di neoinfiltrazione. Esse interpretano la sovrapposizione del flusso legato alla presenza dell'infiltrazione nel non saturo e il normale efflusso retto dalle riserve regolatrici dell'acquifero.

In particolare la curve di esaurimento riguarda soltanto quel tratto della curve di svuotamento che segue lo svuotamento del picco di portata massimo, cioè che comincia dove diminuisce la pendenza della curva di svuotamento. Riguarda l'esaurimento delle riserve regolatrici che rappresentano il volume d'acqua contenuto nell'acquifero grazie alla ricarica oltre il volume permanente.

La modellazione matematica degli ideogrammi sorgivi, contempla le formulazioni proposte da Boussinesque (o più comunemente note come Formula di Tison) e da Maillet.

Il modello proposto da Maillet (1911) è di tipo esponenziale e descrive solo il tratto di esaurimento delle riserve regolatrici. Può essere rappresentato dall'equazione:

$$Q = Q_0 e^{-\alpha t}$$

dove Q è il flusso al tempo t dall'inizio della curva di esaurimento della sorgente e governa la velocità di svuotamento del sistema (maggiore è e più veloce è lo svuotamento del sistema) [m^3/s]; Q_0 è il flusso all'inizio del tratto [m^3/s]; e α è il coefficiente di esaurimento [$1/s$].

Tale modellazione è estesa da Forkasiewicz e Palok (1967) tramite una somma di esponenziali tipo Maillet:

$$Q = Q_{01}e^{-\alpha_1 t} + Q_{02}e^{-\alpha_2 t} + Q_{03}e^{-\alpha_3 t}$$

I cui termini rappresentano, in ordine: il fenomeno di ruscellamento superficiale e svuotamento di fratture e condotti; lo svuotamento di fratture e condotti secondari; e il deflusso di base; e i simboli sono i parametri prima descritti per la curva di Maillet.

La formula di Tison (1960), rivista da Droug (1972), modella lo svuotamento dell'acquifero con l'espressione di decremento iperbolico seguente:

$$Q = \frac{Q_0}{(1 + \alpha t)^n}$$

Si calcola la curva di svuotamento e si stima l'errore di ciascun modello per scegliere i parametri rappresentativi.

Considerando l'andamento dell'idrogramma del 2009, il massimo di portata è stato registrato il 28 Aprile e corrisponde a $30 m^3/s$.

La modellazione di Tison & Drougue è quella che meglio segue l'andamento medio delle riserve idrica dell'acquifero drenato dalla SorgenteCovol dei Veci.. Essa è definita dai seguenti parametri:

coefficiente di esaurimento α di 0.025 e esponente n di 0.55.

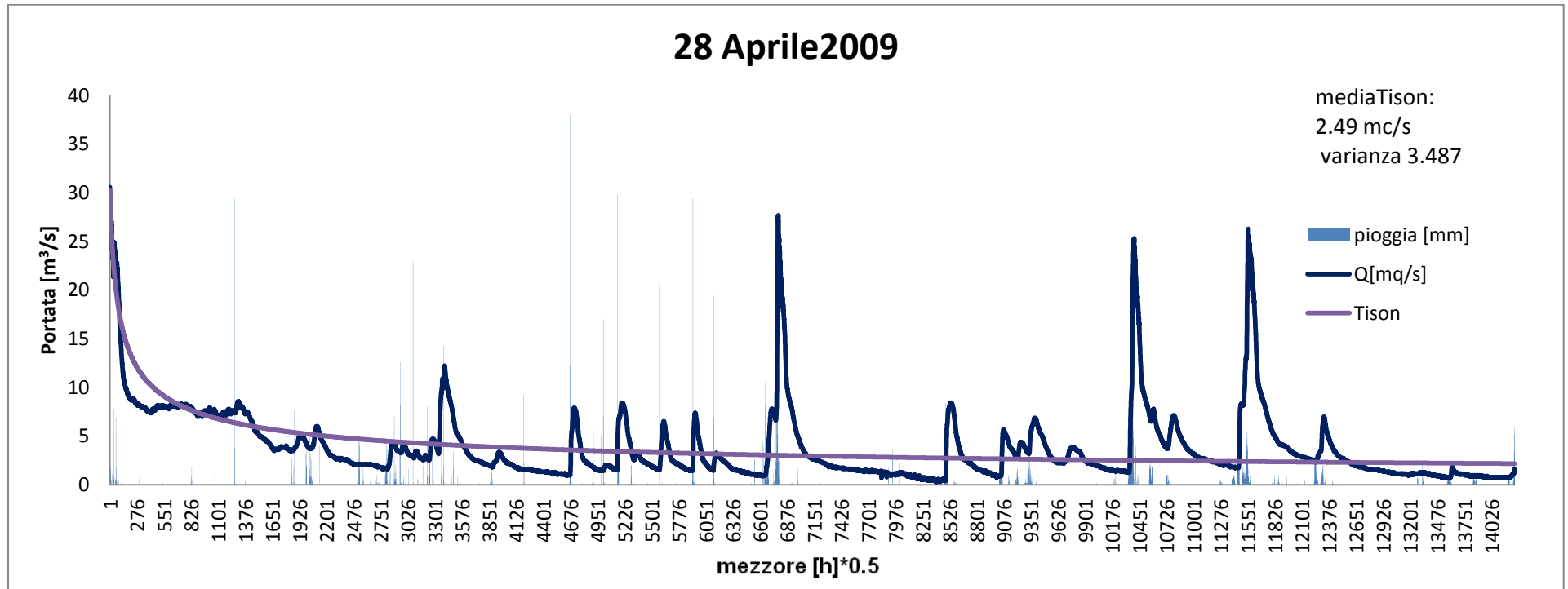
Se si focalizza l'attenzione sul singolo evento precipitativo è possibile valutare la modalità di svuotamento del sistema carsico. Tale picco si smaltisce in circa 100 giorni a seguito dei quali si ripristina un deflusso intorno al valore medio di $4,1 m^3/s$.

Per quanto riguarda l'anno 2010, il massimo della portata è stato registrato l'1 Novembre 2010 e la modellazione del regime di svuotamento dell'acquifero tramite le curve di svuotamento è meno significativa rispetto all'anno precedente perché considera solo 2 mesi di registrazioni di deflusso sorgentizio (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

Somma di esponenziali con coefficienti di svuotamento che fanno interpretare:

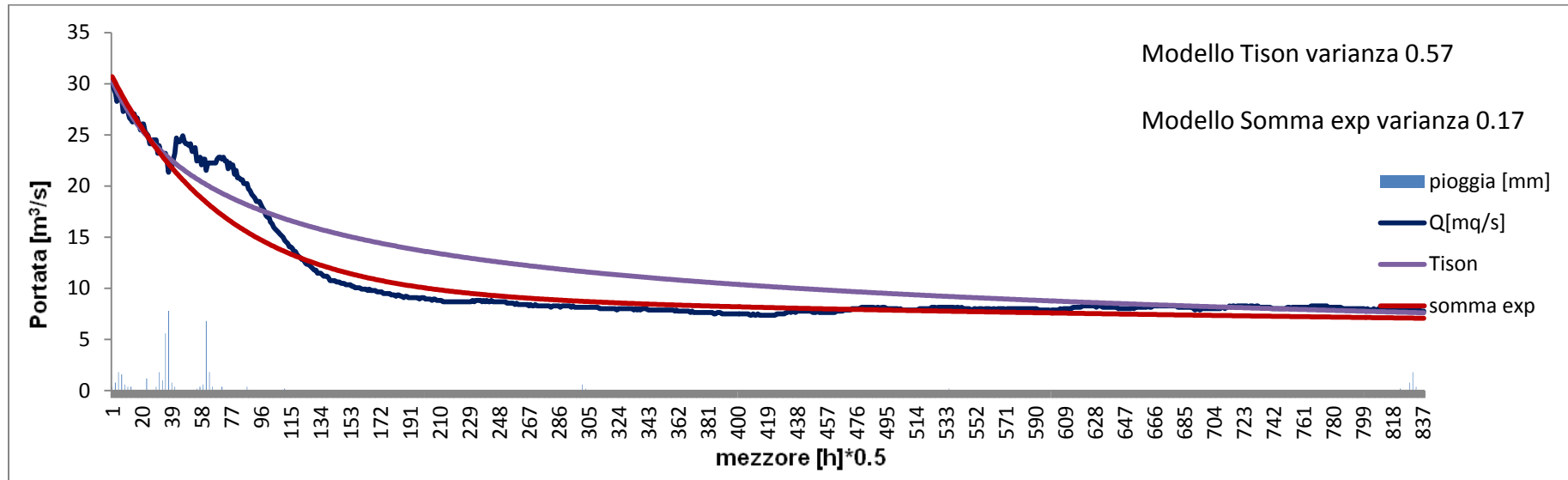
- il fenomeno di ruscellamento superficiale e svuotamento di fratture e condotti rapido ($\alpha=0.006$);
- lo svuotamento di fratture e condotti secondari velocissimo ($\alpha=0.5$);
- il deflusso di base lento ($\alpha=0.0002$).

Modellazione della curva di svuotamento dei dati di portata defluente dalla sorgente Covol dei Veci nell'anno 2009



Parametri del modello di Tison	
α	0.025
n	0.55

28 Aprile – 15 Maggio 2009



modello di Tison	
α	0.025
n	0.55

Somma di esponenziali		
Q01	Q02	Q03
21.50	4.50	5.00
alfa1	alfa2	alfa3
0.014	0.0009	0.000009

3.3.5. Conclusioni

Dalle osservazioni raccolte e dalle analisi elaborate, è possibile concludere che il bacino idrogeologico dell'Altopiano dei Sette Comuni sia alimentato da infiltrazioni di origine meteorica; i deflussi sgorgano principalmente dalle sorgenti carsiche di tipo valchiusano situate a Est, ma è contemplato anche un percorso di uscita idrica sotterraneo rappresentato da una possibile connessione con un acquifero di pianura.

Al fine del bilancio idrologico, dai dati meteorologici disponibili, si prende in considerazione un valore medio della precipitazione annua registrata pari a 1550 mm/anno, e uno di evapotraspirazione di 480mm. Se si contempla un'estensione superficiale ricettiva di 600 km², si ottiene approssimativamente un afflusso meteorico totale annuo di 20,35 m³/s.

I deflussi invece sono costituiti da una portata sorgentizia media annua stimata complessivamente 15 m³/s. E' stata accertata l'esistenza di una connessione idrologica tra la zona situata a Ovest di Asiago nei a 1000 m s.l. m. e le sorgenti dell'Oliero tramite un'esperienza con tracciante; mentre è stato escluso il collegamento di tale ricarica con le altre emergenze attorno all'acquifero. La sostanza estranea diluita nell'acqua d'infiltrazione compare durante i primi 7 giorni alla sorgente a valle, dove raggiunge la massima concentrazione dopo due settimane per tornare sotto i limiti di rilevabilità nel giro di un mese circa.

La velocità di circolazione è stata stimata intorno ai 500 m/ora.

Uno dei maggiori esattori dell'acquifero è la Sorgente Covol dei Veci che è stata sottoposta a monitoraggio. E' caratterizzato da un legame molto stretto con le precipitazioni, che evidenzia la vulnerabilità di questa fonte, ma dal punto di vista dei quantitativi idrici risulta essere molto affidabile.

Il massiccio carsico dell'Altopiano dei Sette Comuni presenta un esteso sistema d'infiltrazione costituito da numerose condotte drenanti di origine carsica e da un network di fratture molto denso, in grado di trasferire assai rapidamente gli scorrimenti idrici superficiali nel sottosuolo. Ospita un vasto acquifero che è costituito principalmente da un carso saturo molto evoluto, esteso sia lateralmente che verticalmente, la cui funzionalità idrodinamica è riconducibile a quella di una rete di condotti a dreno primario dominante, in grado di frazionare efficacemente le portate dalla sorgente Covol de Veci durante il periodo di svuotamento. Nello stesso acquifero è presente inoltre, una rete di condotti interconnessa e molto trasmissiva, in grado di allontanare rapidamente dall'acquifero gli afflussi connessi all'infiltrazione a seguito però di un'interazione non indifferente ma di breve durata col carso saturo.

Dall'analisi di monitoraggio dei parametri chimici si deduce l'influenza degli apporti idrici dovuti al fenomeno di disgelo che va da Aprile a Giugno che implica un deflusso più abbondante ma dalle caratteristiche chimiche più povere.

Il funzionamento dell'acquifero sembra dipendere dal livello di base: se inferiore ai 90 cm (misurati dal fondo della sezione di misura della sorgente) l'acqua di ricarica spinge idrostaticamente la risorsa

mineralizzata; se invece l'acquifero è saturo e il livello di base supera i 100 cm, ad aumenti di volumi di ricarica corrispondono deflussi di acque più diluite e più povere di Sali minerali della media.

Se si ragiona in termini di infiltrazioni eventualmente contaminate da un inquinante, si può affermare che nel periodo di piena, quando il livello dei deflussi è più alto, dal momento che l'acqua raggiunge la sorgente molto rapidamente, le riserve sotterranee permanenti non vengono contaminate permanentemente ma la fuoriuscita è immediata; inoltre le uscite sono molto diluite.

Quando invece il deflusso è di magra il contaminante eventualmente disciolto nelle acque d'infiltrazione può essere più impattante per le riserve permanenti regolatrici; ma d'altra parte non uscendo nell'immediato, è garantito un il processo di diluizione dato dalla permanenza nella roccia e dalla diluizione con le acque nuove.

Tale considerazione è supportata, per quanto riguarda il periodo di "piena", dai risultati dell'esperienza con tracciante che descrivono un'elevata tendenza alla contaminazione che viene smaltita in tempi assai brevi data la velocità di scorrimento delle acque dell'acquifero nei mesi di Maggio e Giugno, periodo caratterizzato da un deflusso di base elevato per la sorgente di Oliero.

Sarebbe interessante poter confermare il funzionamento prima descritto anche per quanto riguarda i periodi di magra analizzando i tempi di risposta a un'acqua d'infiltrazione diluita con tracciante immessa nel mese di Agosto per esempio.

Infine dall'interpretazione tramite il calcolo della curva di svuotamento, si può solo confermare l'affidabilità quantitativa delle riserve regolatrici. Infatti lo stretto legame tra precipitazione e sorgente non permette di stimare la divisione quantitativa del flusso legato alla presenza dell'infiltrazione nel non saturo rispetto al normale deflusso retto dalle riserve regolatrici dell'acquifero.

Tale interpretazione potrebbe assumere significato restringendo la finestra temporale delle registrazioni modellate a un campo in cui successivi afflussi non influenzino l'andamento dello svuotamento dell'acquifero.

4. DELIMITAZIONE DELLE ZONE DI SALVAGUARDIA

La delimitazione delle aree di salvaguardia delle sorgenti che drenano acqua in area carsica, è di fondamentale importanza per la natura di questi ambienti, come spiegato nel capitolo 1; soprattutto se si pensa che l'ormai considerevole pressione antropica sugli acquiferi di pianura, porta a considerare le acque montante, una risorsa di interesse idropotabile non trascurabile.

Gli acquiferi carsici oltre a rappresentare un'importante riserva idropotabile per il territorio nazionale considerata l'estensione dei massicci calcarei delle aree alpine e prealpine, presentano caratteristiche di vulnerabilità molto elevate per loro natura e quindi necessitano di un elevato grado di tutela.

In particolare poi, l'acquifero dell'Altopiano dei Sette Comuni gioca un ruolo strategico sulle riserve regionali del Veneto: come afferma l'articolo di Pilli et al. (2012), è necessario tenere conto dell'interdipendenza tra l'acquifero carsico dell'area prealpina e l'acquifero poroso della pianura di Venezia, a livello della gestione regionale delle riserve idriche sotterranee. Secondo questo modello infatti le infiltrazioni idriche superficiali non possono essere considerate l'unico componente della ricarica nel calcolo del bilancio dell'acquifero poroso perché esisterebbe un deficit che viene ricoperto dal contributo carsico che giunge dal basso.

Considerando questo modello concettuale (schematizzato nella sezione di Figura 30, risulta ancora più necessario preservare fortemente il consumo qualitativo e quantitativo delle risorse della zona prealpina che percolano nel sistema fratturato che costituisce il collegamento ipotizzato e si conferisce una maggior importanza alla protezione delle risorse vulnerabili dell'altopiano.

Le principali sorgenti carsiche che circondano l'altopiano, di "troppo pieno" del sistema, costituiscono una buona opportunità per sviluppare un uso sostenibile delle risorse idriche e, a causa della loro elevata vulnerabilità, devono essere fermamente preservate dall'inquinamento.

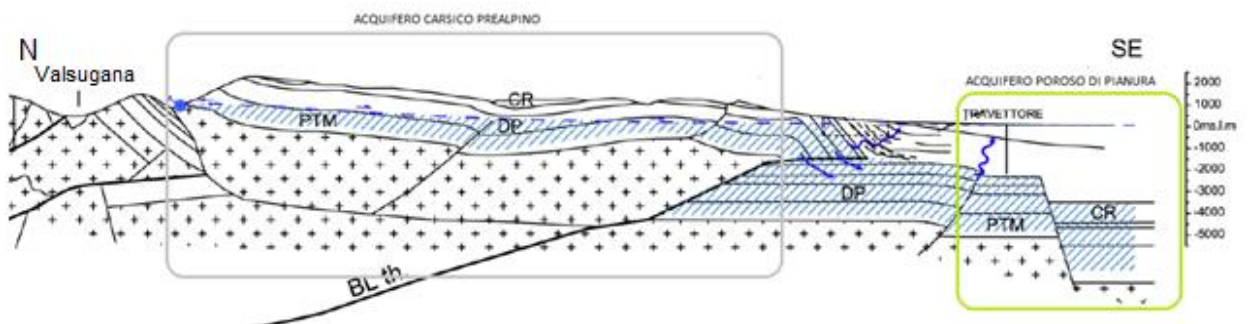


Figura 30: Sezione schematica del modello concettuale (Pilli et al.,2012) che evidenzia il collegamento tra i due acquiferi montano e di pianura.

E' in quest'ottica che nel seguente capitolo si determinano le aree di salvaguardia delle principali sorgenti carsiche dell'acquifero prealpino e si costruisce a questo scopo la carta delle vulnerabilità dell'Altopiano.

Come riportato nel primo capitolo, la normativa nazionale considera il tempo di percorrenza delle acque nell'acquifero come il criterio base per la delimitazione delle aree di salvaguardia, anche in ambiente carsico. Tale approccio, valido per gli acquiferi porosi, non è altrettanto applicabile agli acquiferi contenuti in ammassi carbonatici dove le aree di salvaguardia risulterebbero troppo vaste e non differenzierebbero l'eterogeneità dell'idrostruttura.

La carta delle vulnerabilità delle captazioni rappresenta perciò una consistente base alternativa per la delimitazione delle aree di salvaguardia dal momento che contempla tutti i parametri che governano la possibile infiltrazione e propagazione di un inquinante in un acquifero carsico, come previsto dalla normativa svizzera.

Con questo approccio vengono perimetrare non solo le aree limitrofe alle sorgenti ma anche tutti i territori che, seppur distanti, sono in diretta connessione coi punti di prelievo.

4.1. Redazione della carta delle vulnerabilità: applicazione del metodo EPIK

L'Altopiano dei Sette Comuni costituisce un grande acquifero di tipo carsico e per la valutazione della vulnerabilità dell'area si è scelto di applicare il metodo EPIK in quanto metodo appositamente sviluppato per gli acquiferi in roccia soggetti al fenomeno carsico.

Il metodo EPIK permette di calcolare un fattore di protezione che differenzia le zone a seconda del grado di tutela che necessitano dal momento che organizza l'informazione sulla veicolazione dell'inquinante dalla superficie al sottosuolo degli acquiferi.

E' un sistema multi – attributo a punteggi e pesi che somma i valori di quattro parametri che descrivono la circolazione nell'acquifero.

Per rappresentare la vulnerabilità del territorio attraverso il metodo parametrico EPIK, ci si è avvalsi di un G.I.S. (Geographic Information System) con funzionalità di analisi spaziale: per elaborare e sovrapporre i dati cartografici si è usato il programma ArcGIS della ESRI.

Per redigere la carta della vulnerabilità delle acque sotterranee dell'Altopiano dei Sette Comuni sono state create e sovrapposte per somma pesata quattro carte tematiche a cui sono stati attribuiti determinati punteggi per ogni parametro; per somma pesata si sono ottenuti i valori della vulnerabilità intrinseca di ogni diverso areale del territorio considerato (secondo lo schema procedurale mostrato nella Figura 31).

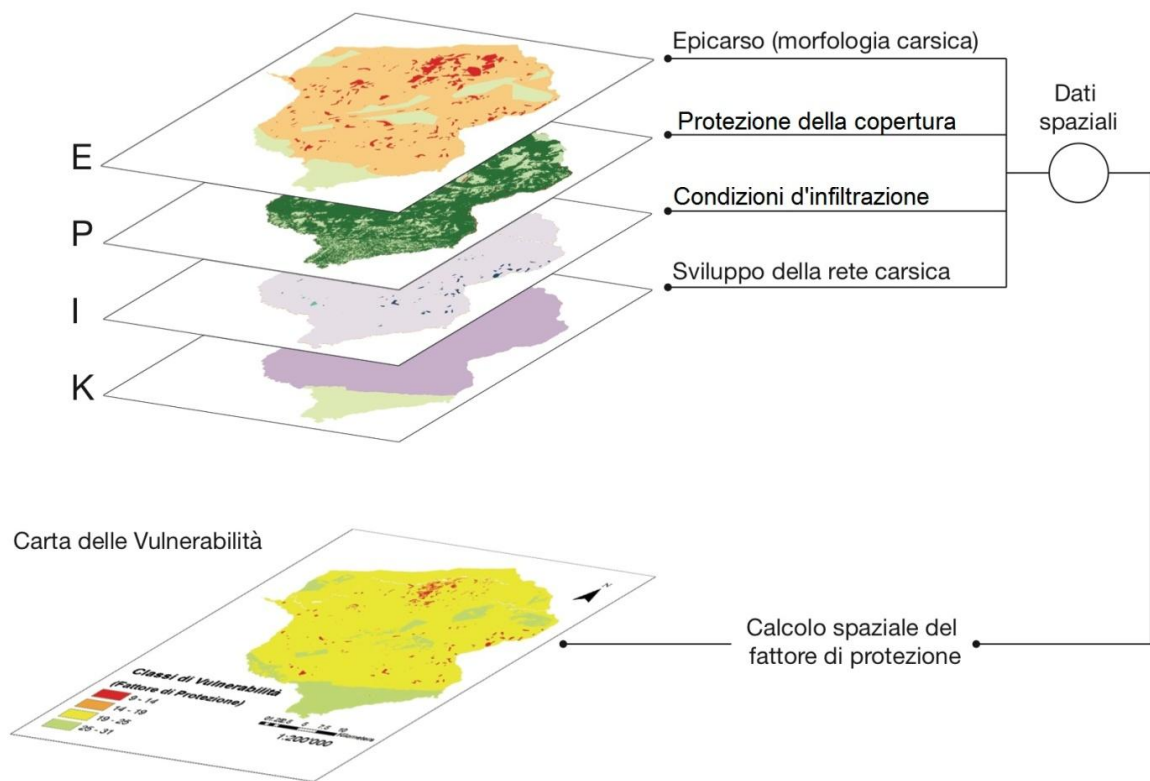


Figura 31: Schema procedurale del metodo EPIK.

4.1.1. Determinazione dei parametri

Il metodo EPIK si basa su quattro parametri che, come riportato nel capitolo 1, rappresentano ognuno un aspetto caratterizzante degli acquiferi carsici:

- E **Epikarst**
(Epicarso)
- P **Protective Cover**
(Copertura protettiva del suolo)
- I **Infiltration Condition**
(Condizioni d’Infiltrazione)
- K **Karst Network Development**
(Grado di sviluppo della rete carsica).

Per ognuno degli attributi del metodo si sono costruite le rispettive carte, utilizzando, per un’analisi dettagliata, un modello raster che prevede la suddivisione del territorio carbonatico in studio, in celle quadrate di lato pari a 10 m.

4.1.1.2. Sviluppo dell'epicarso

Il primo parametro preso in considerazione dal metodo riguarda lo sviluppo dell'epicarso.

Descrive la porzione al di sotto del terreno consolidato, se questo è presente, costituita di roccia calcarea che tende a fratturarsi e fessurarsi a causa della dissoluzione delle rocce e della formazione di pressioni in prossimità della superficie del terreno.

La struttura dell'epicarso viene indirettamente caratterizzata a partire dalle geomorfologie individuabili nella cartografia esistente che riporta il territorio superficiale, come ad esempio, doline, faglie, inghiottitoi, grotte; e viene classificata in una delle tre classi riportate in tabella:

Epicarso	Classe Epikarst	Morfologia Carsica
Altamente sviluppato	E1	Shaft, sinkholes o doline (da tutti i tipi di genesi), polje, campi karren, sorgenti, grotte, inghiottitoi
Moderatamente sviluppato	E2	Zone intermedie nell'allineamento di doline, valli secche, codule
Piccolo o Assente	E3	Assenza di fenomeni morfologici propri dell'ambiente carsico, zone a bassa densità di fratturazione

Tabella 13: Classi dell'attributo Epikarst. Tratta da Tesi di dottorato.

Sulla carta idrogeologica dell'Altopiano dei Sette Comuni a scala di dettaglio 1.50'000 sono stati individuati gli elementi puntuali raffiguranti le cavità e le sorgenti carsiche.

Le aree ad elevata concentrazione di teli elementi caratteristici sono state perimetrare in modo da definire le estensioni areali appartenenti alla classe E1 tipica di un epicarso ben sviluppato. Le porzioni di superficie che racchiudono i poligoni in classe E1 e che comprendono quegli elementi puntuali singolari non censiti nei raggruppamenti di elementi carsici sono state classificate in E2; infine alla restante parte che non presenta alcun affioramento di morfologia carsica, è stato assegnato il valore della classe E3.

A questo punto si è discretizza l'area con celle di 10 metri di lato in modo a assegnare un valore univoco a ogni elementino: 1 per la prima classe; 2 per le celle che rientrano in aree E2 e 3 per le restanti

La carta tematica derivante da elaborazione GIS è riportata in Figura 32.

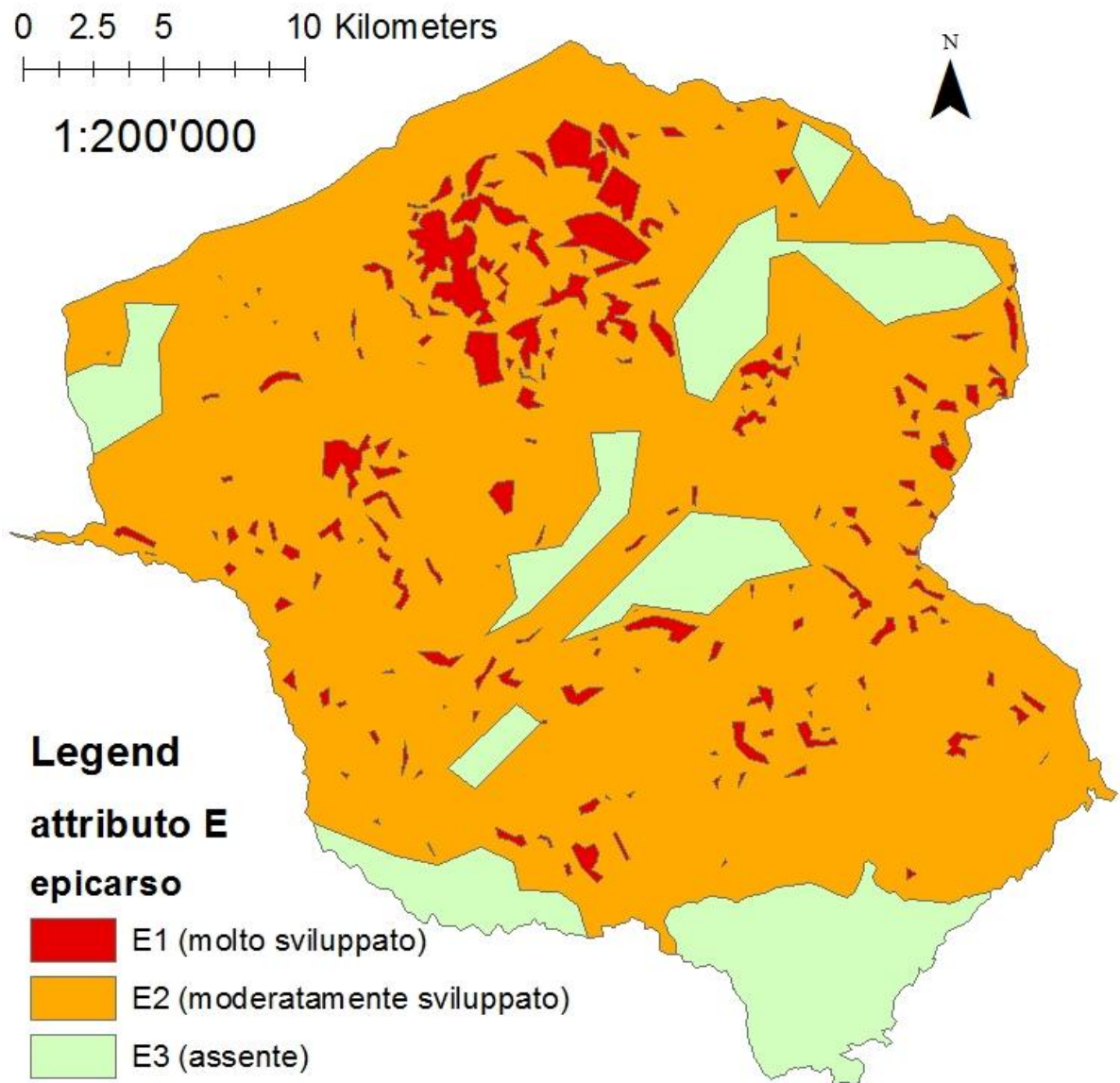


Figura 32: Carta del parametro Epikarst del metodo EPIK applicato all'Altipiano dei Sette Comuni

4.1.1.2. Protezione del terreno di copertura

Il parametro definito dalla lettera P nel metodo EPIK descrive lo strato di terreno di tipo sciolto che sovrasta le rocce dell'acquifero, dove l'acqua di precipitazione impatta prima di potersi infiltrare nelle fratture o nei condotti, ove presente.

Esso contribuisce alla protezione dell'acquifero a seconda dello spessore col quale si presenta il suolo di copertura ed è classificato secondo gli intervalli di altezza che presenta il terreno di superficie in relazione agli orizzonti geologici su cui si sviluppa, in base alla tabella di conversione dell'attributo (Tabella 2).

Copertura del suolo	Classi parametro P	Caratteristiche	
		Se il suolo giace sul calcare o su strutture geologiche ad alta permeabilità, per esempio detriti di falda e depositi glaciali	Se il suolo giace su strutture geologiche a bassa permeabilità, per esempio argilla e silt
Assente	P1	0–20 cm di suolo	0-20 cm di suolo su strutture che hanno uno spessore minore di 1 m
Intermedia P1-P3	P2	20-100 cm di suolo	20-100 cm di suolo su strutture che hanno uno spessore minore di 1 m
Intermedia P2-P4	P3	100-200 cm di suolo	100 cm di suolo e spessore della struttura geologica a bassa permeabilità >1m
Presente	P4	>200 cm di suolo	>100 cm di suolo e struttura detritica di bassissima conducibilità idraulica o spessore dello strato impermeabile (per esempio argilla) >8 m

Tabella 14: Classi dell'attributo Protective cover. Tratta da Tesi di dottorato.

La carta del parametro P (riportata in Figura 33), che assegna al territorio valore 1 se il terreno di copertura è totalmente assente fino a valore 4 se è particolarmente protettivo, può essere ottenuta dalla *carta dei suoli* del veneto in scala 1 : 250'000 e dalla più dettagliata *carta dell'uso del suolo* regionale Corinne Land Cover alla scala 1: 10'000.

In particolare la carta pedologica dei suoli del Veneto fornirebbe lo spessore del suolo di copertura direttamente anche se non in modo completo per ogni terreno ma presenta una scala di dettaglio troppo generica; si sono determinati gli spessori degli strati di copertura indirettamente formulando considerazioni sulla carta più dettagliata dell'*uso del suolo* regionale.

Si sono raggruppati in classe P1 le porzioni di terreno che presentano roccia nuda o con scarsa vegetazione in quanto è evidente l'impossibilità della presenza di suolo o i corpi d'acqua; in classe P2 i terreni coltivati o i prati dal momento che si suppongono coperti di un tipo di vegetazione con un apparato radicale non troppo profondo.

Non potendo definire con precisione il valore di spessore del suolo non sono state differenziate due classi intermedie di suolo di copertura ma si è ricondotto tutto il territorio mediamente vegetato alla classe P2 restando a favore di sicurezza.

Laddove sono presenti aree boschive, uliveti o terreni coltivati a vite, è evidente che lo spessore del suolo non può essere limitato, e a questi terreni si è deciso di assegnare la classe P4, corrispondente ad uno spessore del suolo maggiore di 100 cm; nella stessa classe P4 sono state inserite le aree antropizzate per cui in suolo risulta impermeabile.

0 1.25 2.5 5 7.5 10
Kilometers

1:200'000

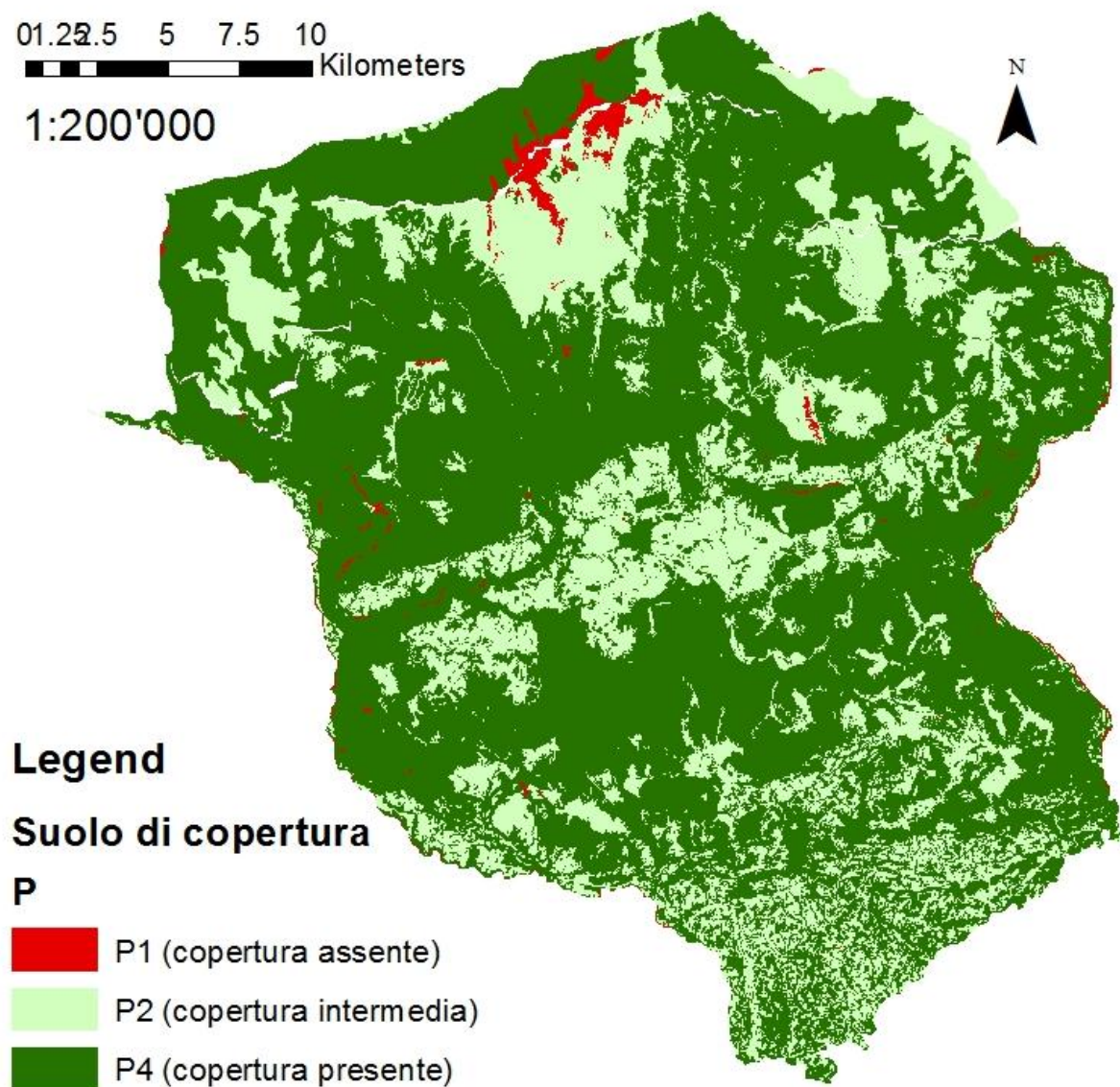


Figura 33: Carta del parametro Protective cover del metodo EPIK applicato all'Altopiano dei Sette Comuni

4.1.1.3. Condizioni d'infiltrazione

Il parametro I, come già detto nel primo capitolo, riguarda le condizioni d'infiltrazione nell'acquifero carsico che possono essere diffuse o concentrate in una circoscritta via preferenziale. La distinzione della quattro classi per tale attributo è stata eseguita seguendo le linee guida della Tabella 3 riportata:

Condizioni d'infiltrazione	Classi di I	Caratteristiche
Concentrata	I1	Correnti temporanee o perenni – correnti temporanee o perenni alimentanti inghiottitoi e doline – aree d'influenza (codule) di queste correnti appena menzionate, includenti sistemi di drenaggio artificiale
Intermedia I1-I3	I2	Aree d'infiltrazione concentrata (senza sistemi di drenaggio artificiale) con pendenza >10% per campi coltivati, e >25% per prati e pascoli
Intermedia I2-I4	I3	Aree d'infiltrazione concentrata (senza sistemi di drenaggio artificiale) con pendenza
diffusa	I4	Il resto del territorio

Tabella 15: Classi dell'attributo Infiltrazione.

Innanzitutto per la classificazione dell'area in esame secondo il parametro di infiltrazione si distinguono le aree caratterizzate dalla presenza di cavità carsiche rilevabili come fori sulla superficie dalla restante parte del suolo; e di queste areole nelle quali è possibile riscontrare una infiltrazione fluida di tipo concentrato si distinguono quelle per cui è più o meno diretta.

Si è assegnata la classe che rappresenta l'infiltrazione concentrata a tutte quelle porzioni di territorio che presentano i cosiddetti "losing stream", cioè correnti perdenti temporanee o permanenti: nella pratica della cartografia, l'attributo I1 è stato assegnato alle areole individuate dalla sovrapposizione della carta tematica degli elementi idrici e da quella che riporta gli elementi di classe E1 costruita per il primo parametro del metodo; derivanti cioè dall'intersezione tra un corso d'acqua e un poligono rappresentante una cavità carsica.

Le classi I2 e I3 sono state valutate in funzione dei due parametri riportati in tabella e cioè l'uso del suolo, la pendenza. La carta dell'uso del suolo è la stessa usata per la valutazione del parametro "P" mentre quella delle pendenze è stata ricavata processando il modello digitale del terreno, DTM a scala 20x20 con inquadramento sull'area d'interesse (un file raster che contiene i valori delle quote del terreno).

Alle celle corrispondenti alle aree coperte da prati e che contemporaneamente presentano valori di pendenza superiore al 25%, è stata assegnata la classe 2 dell'attributo I; come anche alle unità areali che si trovano ricoperte di suolo coltivato e pendono nello spazio di oltre il 10%. Il motivo del diverso limite di pendenza considerato per i due diversi tipi di suolo è che i terreni meno densamente vegetati, come possono ritenersi i suoli coltivati rispetto ai prati, in cui la vegetazione cresce selvatica, vengono considerati più favorevoli all'infiltrazione diretta (dove possibile a causa della presenza di cavità); i terreni che presentano una vegetazione più folta

invece sono in grado di schermare più efficacemente l'infiltrazione diretta nel terreno favorendo quella di tipo diffuso o comunque necessitano di trovarsi su superfici in condizioni di pendenza maggiore per favorire un flusso concentrato. Tale processo di infiltrazione è evidentemente favorito infatti da un'inclinazione maggiore della superficie di assorbimento.

La classe I4, che rappresenta la più favorevole condizione di infiltrazione cioè quella di tipo diffuso, è stata assegnata alla restante parte del territorio, corrispondente principalmente alle aree boschive.

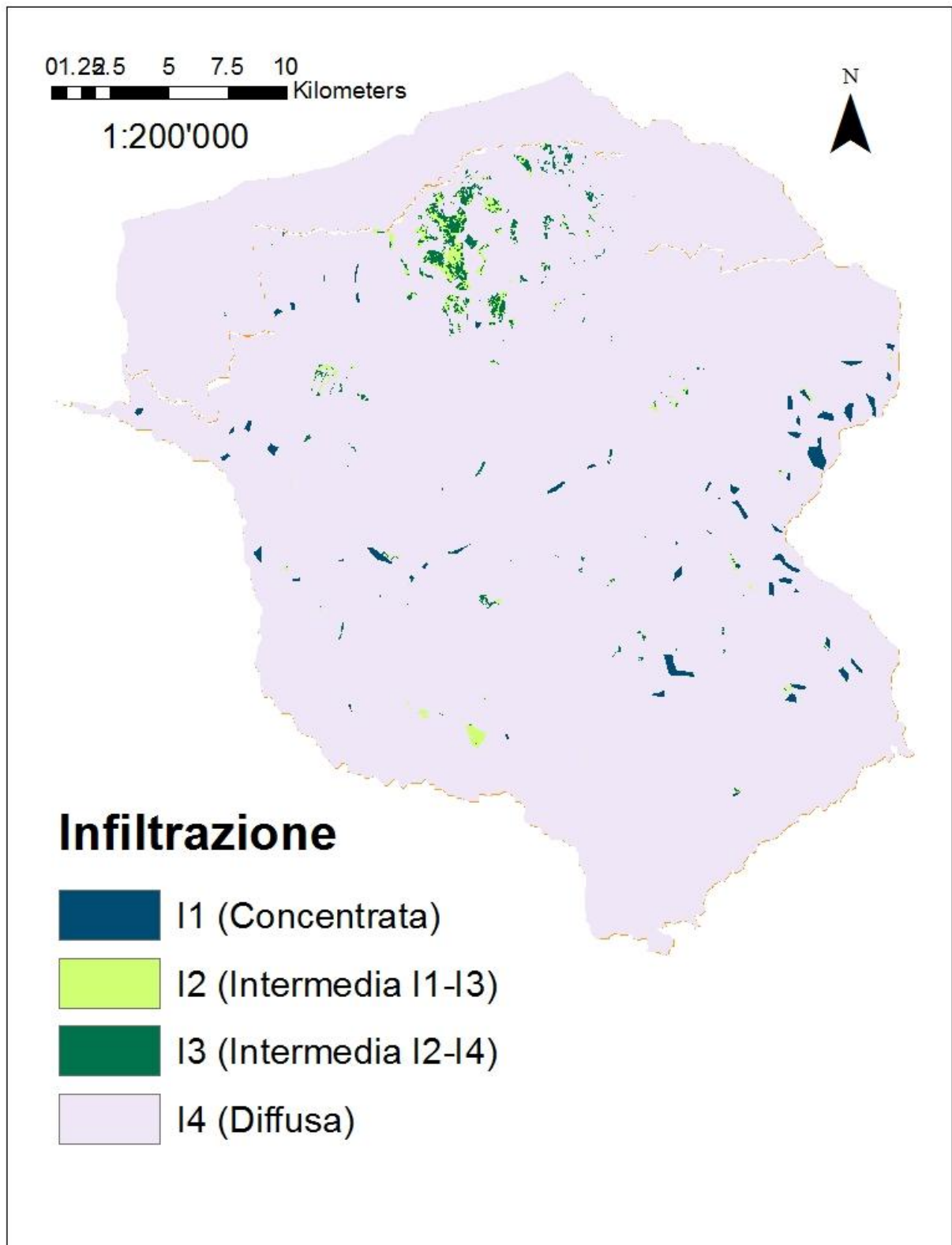


Figura 34: Carta del parametro Infiltration del metodo EPIK applicato all'Altopiano dei SetteComuni

4.1.1.4. Sviluppo della rete carsica

Per valutare l'ultimo attributo del metodo EPIK bisogna considerare lo sviluppo del carsismo nell'Altopiano dei Sette Comuni costituente l'acquifero.

Ovviamente una descrizione precisa dello sviluppo della rete carsica non è possibile in quanto caratteristica sepolta, tuttavia esistono indicazioni sufficienti per stabilire un'adeguata valutazione dell'attributo K.

Dagli studi di monitoraggio riportati nel capitolo Terzo, dedicato alla caratterizzazione dell'acquifero, si è potuto affermare che la maggior parte dell'ammasso roccioso presenta una rete ben sviluppata; si sono escluse da questa categoria invece la porzione corrispondente alle colline pedemontane del marosticano in quanto costituite di materiale roccioso tipico di acquiferi fratturati ma non soggetti a carsificazione.

Nella carta tematica seguente corrispondente a tale attributo sono rappresentate le due porzioni di territorio distinte per valore di K:



Figura 35: Carta del parametro Karsst Network Developmet del metodo EPIK applicato all'Altopiano dei SetteComuni

4.1.2 Assegnazione dei pesi

La combinazione dei quattro parametri finalizzata alla determinazione del fattore di protezione in qualsiasi punto del bacino, viene effettuata attribuendo un peso specifico diverso per ognuno .

Ogni attributo incide con un'importanza differente sulla vulnerabilità finale dell'acquifero agli inquinanti. Tali pesi sono stabiliti su basi empiriche e come è riportato nella tabella che segue (Tabella 16):

Attributo	Coefficiente	Peso
Epikarst	a	3

Protective Cover	b	1
Infiltration Condition	c	3
Karst Network Development	d	2

Tabella 16: Coefficienti moltiplicatori (pesi) relativi ai quattro parametri del metodo EPIK.

Ai parametri che descrivono l'epicarso e la modalità di infiltrazione è associato il peso maggiore quindi risultano più importanti e determinanti nella determinazione della classe di vulnerabilità.

4.1.3. Valutazione della vulnerabilità

La combinazione dei quattro parametri consente di determinare il valore del fattore F di protezione in qualsiasi punto del bacino mediante la relazione:

$$F = a * E + b * P + c * I + d * K$$

Con *F*: Fattore di protezione;

a,b,c,d : pesi relativi agli attributi;

E, P, I, K : attributi del metodo.

Il fattore di protezione viene calcolato per ogni cella del dominio, mediante l'operazione di analisi spaziale in grado di compiere il programma arcGIS grazie al principio di "map algebra" (Tomlin, 1992).

L'aumentare del punteggio, indica un crescente grado di protezione per l'acquifero carsico, e un punteggio basso di F risulta per zone altamente vulnerabili come riportato nella tabella sottostante:

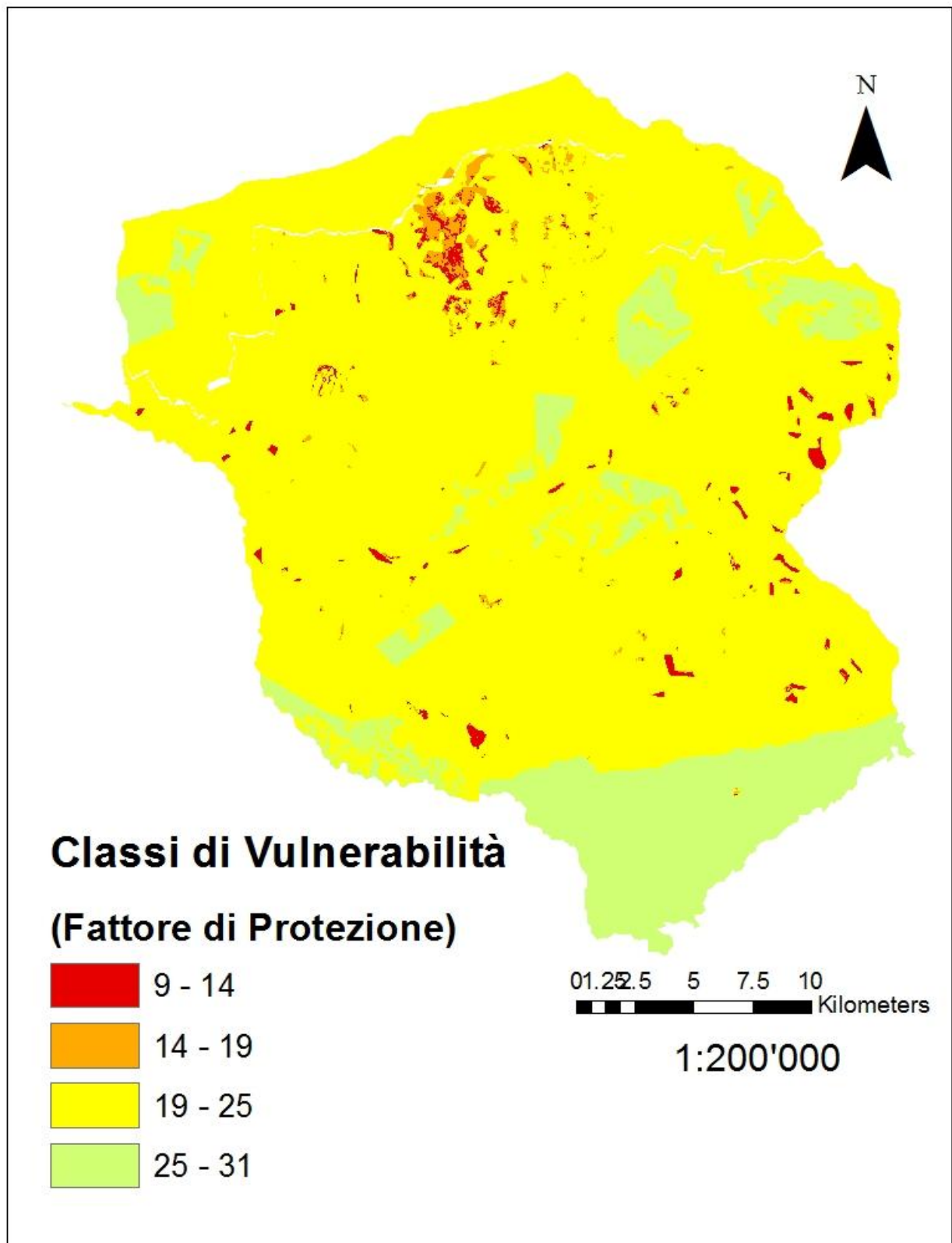


Figura 36: Carta di vulnerabilità dell'Altopiano dei Sette Comuni costruita con metodo EPIK

4. 3. Delimitazione delle aree di salvaguardia delle sorgenti dell'Oliero

Nel seguente paragrafo si determinano le aree di salvaguardia delle principali sorgenti carsiche dell'acquifero prealpino a partire dalla zonazione della carta delle vulnerabilità dell'Altopiano, dopo aver constatato che altri metodi non permettono una sufficiente differenziazione della superficie dell'altopiano.

Le principali metodologie reperite in letteratura per la perimetrazione delle aree di salvaguardia delle sorgenti montane (US EPA, 1987; Blau, 1990; Civita, 1988) presuppongono la conoscenza della struttura idrogeologica del bacino di alimentazione e la disponibilità di dati sperimentali sui deflussi.

Si distinguono in particolare due metodi:

- **Metodo del tempo di dimezzamento**, che fonda sull'analisi della curva di svuotamento della sorgente;
- **Metodo svizzero**, che si basa sulla predisposizione di carte di protezione.

Secondo il primo metodo, il dimensionamento si basa sulla valutazione della vulnerabilità intrinseca, che deve essere valutata attraverso la determinazione di :

- Tempo di dimezzamento (t_D) della portata massima annua;
- Velocità di flusso (u) della falda alimentante la sorgente.

I valori limite per classificare le aree sono:

Classe di Vulnerabilità intrinseca	Tempo di dimezzamento (t_D) giorni	Velocità di Flusso (u) m/s
ELEVATA A	Meno di 5	Oltre 10^{-2}
ALTA B	Tra 5 e 25	Tra 10^{-2} e 10^{-3}
MEDIA C	Tra 25 e 50	Tra 10^{-3} e 10^{-4}
BASSA D	Oltre 50	Meno di 10^{-4}

Figura 37: Classi di vulnerabilità intrinseca in funzione del tempo di dimezzamento o della velocità di flusso.

Nei casi in cui il tempo di dimezzamento o la velocità del flusso non convergono sulla stessa classe di vulnerabilità intrinseca si assume la condizione più cautelativa.

Nell'anno 2009 la portata di picco si verifica il 28 Aprile e l'andamento dell'idrogramma della sorgente, riportato nel capitolo 3, è stato riprodotto da una curva di Tison. Secondo il modello la portata massima si dimezza dopo poco più di due giorni e mezzo.

Il tempo di dimezzamento della portata massima annua calcolato per l'anno 2009, è inferiore a 5 giorni per cui l'acquifero ricade tutto in classe A di vulnerabilità intrinseca elevata.

Le stesse considerazioni valgono per l'anno 2010 come riportato nella seguente tabella:

	Tempo	Portata
2009	28 /4 alle h: 10:00	30 m ³ /s
	30 /4 alle h: 14.00	15 m ³ /s
2010	1/11 alle h: 11.30	40 m ³ /s
	3 /11 alle h: 2.00	20 m ³ /s

Tabella 17: Dati per il calcolo del tempo di dimezzamento della portata massima annuale.

Quindi l'acquifero ricade tutto in classe A che indica vulnerabilità elevata e non è dunque possibile differenziare tre zone a diverso grado di protezione.

La carta delle vulnerabilità delle captazioni rappresenta perciò una consistente base alternativa per la delimitazione delle aree di salvaguardia dal momento che contempla tutti i parametri che governano la possibile infiltrazione e propagazione di un inquinante in un acquifero carsico, come previsto dalla normativa svizzera.

Con questo approccio vengono perimetrare non solo le aree limitrofe alle sorgenti ma anche tutti i territori che, seppur distanti, sono in diretta connessione coi punti di prelievo.

Il secondo metodo considerato, il metodo svizzero, prevede un dimensionamento che si basa sempre sulla valutazione della vulnerabilità intrinseca, ma valutata attraverso il metodo EPIK per gli acquiferi carsici.

Di seguito è riportata la carta delle zone di salvaguardia secondo la classificazione del metodo svizzero:

Fattore di protezione calcolato con metodo EPIK	Zona di salvaguardia
Da 9 a 19	S1
Da 20 a 25	S2
Oltre 25	S3

Tabella 18: Zone di salvaguardia secondo il metodo svizzero basato sulla carta di vulnerabilità del metodo EPIK

Si nota come considerando la classificazione del metodo svizzero scompare la distinzione areale di vulnerabilità relativa alla pendenza del terreno, parametro contemplato nel calcolo del parametri I (infiltrazione) del metodo EPIK.

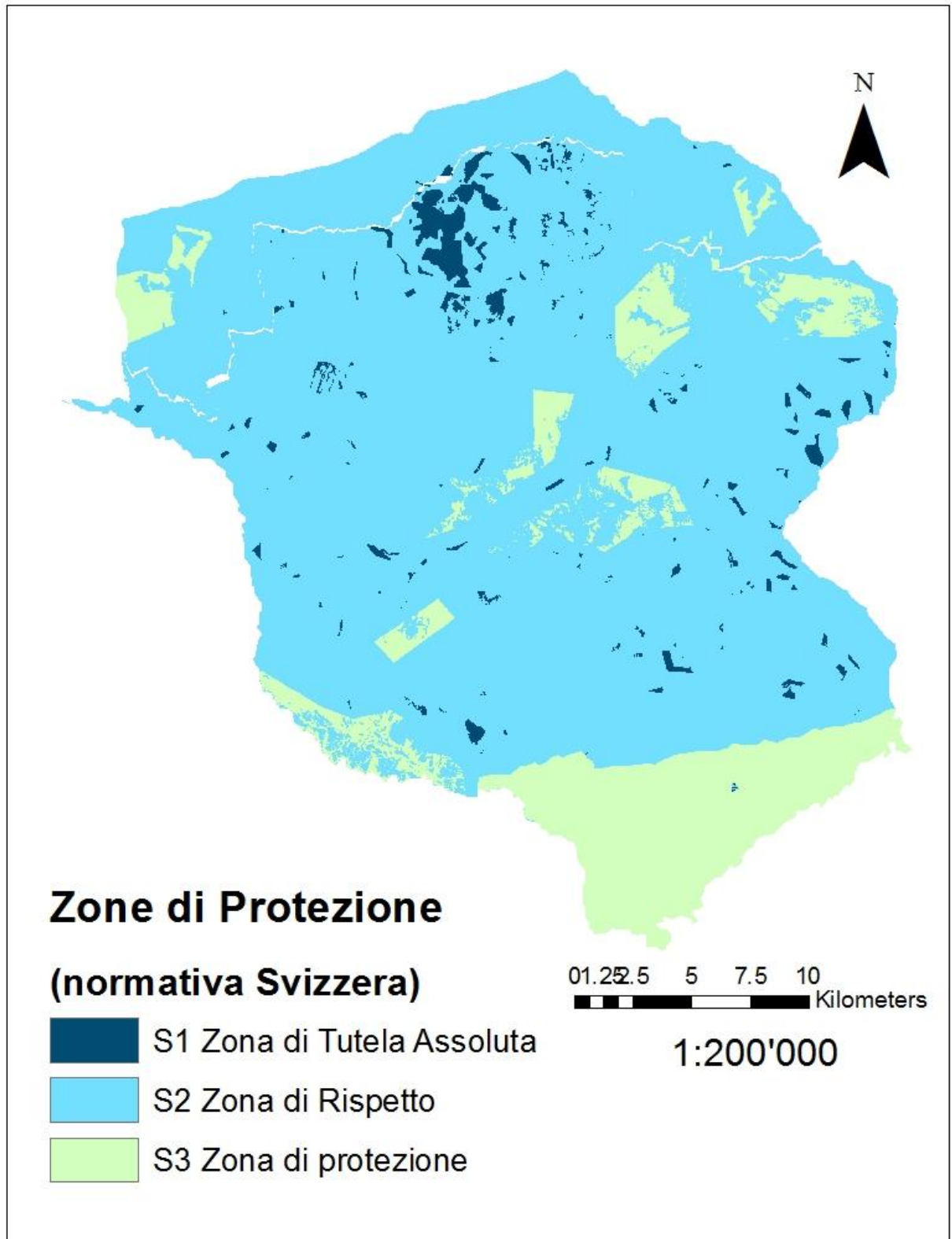


Figura 38: Carta delle zone di salvaguardia derivante dall'applicazione del metodo EPIK

5 Modello numerico: implementazione con MODFLOW

A partire dal modello concettuale, si procede con la modellazione matematica del flusso idrico all'interno dell'acquifero dell'Altopiano dei Sette Comuni.

Si sceglie di usare un *modello darciano* che assimila il mezzo roccioso fratturato e carsico con un mezzo continuo equivalente; in particolare il software MODFLOW versione 6 (McDonald & Harbaugh, 1988).

Modflow è un codice di calcolo che utilizza un modello matematico numerico 3D alle differenze; è in grado di simulare la dinamica delle acque sotterranee in condizioni di terreno saturo e delle particelle di inquinanti in falda in conseguenza di un evento di contaminazione.

5.1 Scelta dell'approccio numerico risolutivo

Il modello darciano semplifica l'ammasso fratturato e carsico sede dell'acquifero con un mezzo poroso continuo e può essere considerato valido data la scala di analisi: una *very large field* (secondo la classificazione di Bear e Berkowitz, 1987), abbastanza ampia cioè da poter assimilare il flusso all'interno del mezzo carsico a quello in un continuo, con i singoli vuoti enormi ma di dimensioni relative riconducibili a una porosità, in rapporto all'intero bacino. Inoltre studi precedenti hanno dimostrato che tale semplificazione può portare a risultati accettabili nella modellazione del flusso in un mezzo fratturato carsico se:

- le fratture e i condotti carsici formano un sistema piuttosto uniforme e ben interconnesso (Croci et al., 2003);
- l'obiettivo della modellazione è quello di simulare la portata di una sorgente (Scanlon et al., 2003);
- si dispone unicamente dei dati di portata della sorgente ai fini della calibrazione del modello (Angelini e Dragoni, 1997).

Sulla base delle considerazioni fatte nel capitolo 3 e della relativa ricostruzione dell'area di interesse riportata nel capitolo 4 (nella costruzione dei "layer" degli attributi del metodo EPIK), si può affermare che il flusso idrico è dominato prevalentemente dai condotti carsici scavati all'interno dell'intero ammasso e quindi avviene all'interno di un mezzo assimilabile a un continuo equivalente.

In particolare, il dominio è stato suddiviso in 190 x 186 celle quadrate di dimensione costante pari a 200 m per lato.

Tale discretizzazione del dominio determina un volume delle celle dell'ordine dei 10^7 m^3 superiore al *volume rappresentativo elementare* (Bear, 1972), di 10^6 m^3 per un acquifero carsico (Civita, 2005).

I condotti carsici esplorati raggiungono dimensioni di diametro enormi, e la falda freatica dell'altopiano è costituita da giganteschi fiumi sotterranei, con condotte larghe ed alte anche decine di metri, tuttavia l'ampiezza di questi fori rimane molto al disotto delle dimensioni del volume elementare (10^3 contro 10^7 m^3); inoltre avendo valutato la presenza di una rete carsica di grado ben sviluppato (cap. 4, determinazione del parametro K del metodo EPIK) è soddisfatta anche la condizione prima riportata sull'interconnessione dei condotti.

5.2 Caratteristiche del modello

Le caratteristiche fondamentali di un modello numerico sono:

- Dominio spaziale
- Dominio temporale
- Condizioni iniziali e al contorno
- Proprietà idrauliche del mezzo (valori e distribuzione)

5.2.1 Dominio spaziale

Il dominio spaziale modellato ha una superficie di circa $38 * 37 \text{ km}^2$ che si è scelto di discretizzare in pianta con una griglia rettangolare composta da 190 righe e 190 colonne, con passo tra righe e colonne di 200 m.

L'area effettivamente interessata dalla modellazione è perimetrata da un contorno, riportato in nero in figura, rappresentante la condizione di non flusso che implica l'impermeabilità. Tale condizione ricade al di fuori dell'ammasso roccioso delimitato dalle valli del Fiume Brenta a Nord e a Est, dalla valle dell'Astico a Ovest, e dalle colline pedemontane a Sud costituite da un mezzo roccioso in cui la rete carsica non esiste è sviluppata.

In verticale si è scelto un dominio spaziale costituito da un unico "layer" che rappresenta l'acquifero principale e che possiede lo spessore determinante le dimensioni del dominio.

Lo sviluppo del dominio in direzione z verticale è ricavato infatti considerando:

- lo spessore dell'acquifero principale carsico, che va da un minimo di 900 metri a un massimo di 1400 m (essendo 300m e 600 m lo spessore minimo e massimo riscontrato in cui risiedono i Calcari Grigi e 600 m e 800 m lo spessore della Dolomia Principale), e che è sovrastato da almeno 300 metri di materiale roccioso;

- tenendo conto assieme della morfologia dell'altopiano che presenta una superficie variabile dai 900 ai 2300 metri sul livello del mare nella parte più settentrionale.

Ne risulta una posizione del limite inferiore dell'acquifero (incontro col basamento terrigeno – calcareo impermeabile) che varia tra i valori risultanti dalla differenza di quota e spessore: da una quota massima di 1100 metri sul livello del mare (2300-1400-300) in alcune zone e una minima di 800 metri sotto il livello del mare (900-1700). Valori concordanti con quelli approssimativamente ricavabili dalla figura in Figura 39.

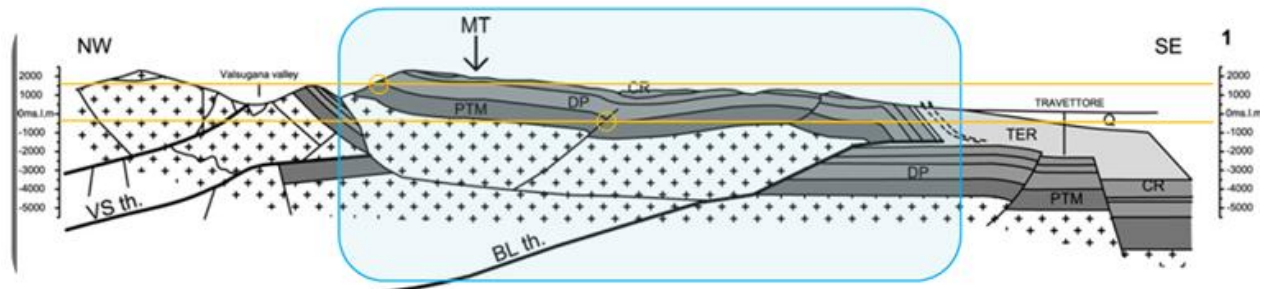


Figura 39: Sezione NW-SE dell'Altopiano dei Sette Comuni: Quota minima della base dell'acquifero principale (PTM) è intorno ai -500 m; la massima è 1500 m.

Tali considerazioni sono utili a definire il limite inferiore e superiore che può assumere il dominio nel modello numerico. Si semplifica l'andamento superficiale dell'Altopiano scegliendo una quota media di 1500 m s.l.m. La base dell'acquifero invece è modellata a una quota intorno ai -500 m.

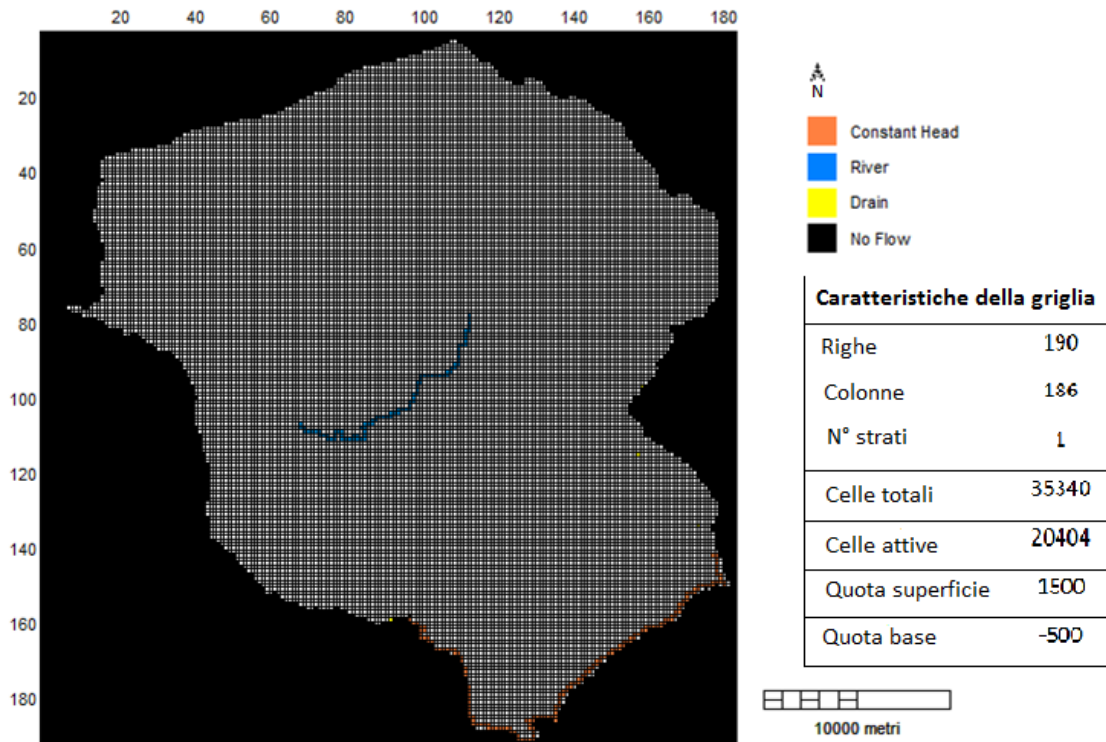


Figura 40: Griglia del modello MODEFLOW

5.2.2 Dominio temporale

Le simulazioni numeriche sono realizzate in regime di flusso stazionario e questo significa che le proprietà fisiche attribuite al modello e le relative condizioni al contorno possono essere variabili nello spazio ma non nel tempo. La quantità d'acqua che attraversa il sistema aperto acquifero è costante nel tempo: vige la condizione di equilibrio per cui la portata entrante coincide con la portata uscente.

5.2.3 Condizioni iniziali e al contorno

Dal momento che le simulazioni numeriche sono realizzate in condizioni stazionarie, si assegnano le condizioni al contorno che resteranno invariate per tutto l'arco temporale (unico). La ricarica del sistema e le aree di non flusso sono condizione al contorno di flusso noto (condizione al contorno di Neuman).

La condizione di NON FLUSSO definisce le aree impermeabili e quindi determina i confini del dominio modellato sulla griglia che sono stati riportati nel precedente paragrafo sul *Dominio spaziale*.

La condizione di RECHARGE consente di simulare l'ingresso del liquido superficiale dovuto all'infiltrazione verticale delle precipitazioni meteoriche che piovono sulla superficie del

dominio. Essa viene assegnata attribuendo un valore medio di piovosità espresso in mm/anno tra i dati relativi a tutto l'altopiano. Nel modello MODFLOW tutti i valori sono stati espressi in m/s.

Come si evince dalle considerazioni riportate nel paragrafo del bilancio idrologico del capitolo terzo, 1550 sono i millimetri di pioggia che vengono mediamente accumulati sull'altopiano nell'arco di un anno.

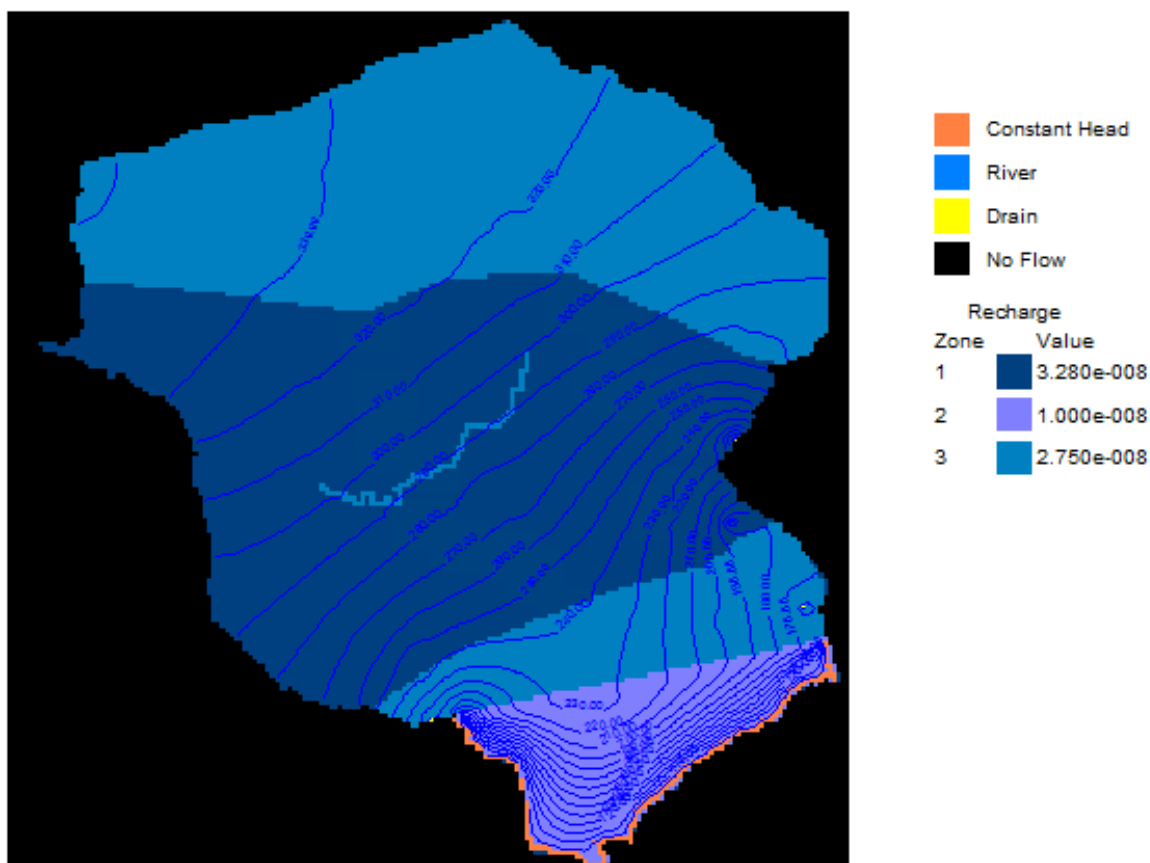


Figura 41: RICHARGE

Si è inserita poi una condizione al contorno che specifica i valori che la soluzione deve assumere su una superficie (condizione di Dirichlet): CONSTANT HEAD. Nell'area a Sud-Est del bacino è infatti ipotizzabile una via di comunicazione tra le risorse idriche dell'acquifero montano e la falda dell'alta pianura veneta (Pilli et al, 2012) che viene considerata imponendo un determinato livello piezometrico.

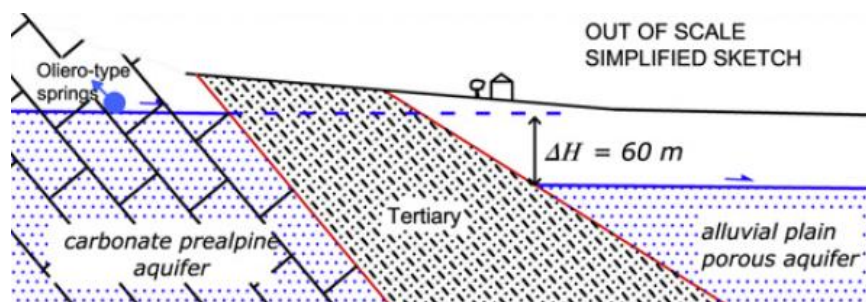


Figura 42: Schema fuori scala della sezione N-S che rappresenta il dislivello tra l'acquifero prealpino e quello di pianura (Pilli et al., 2012)

Infine si riportano nel modello matematico i valori riguardanti l'acqua che scorre dai corpi idrici superficiali che sono condizioni al contorno di tipo misto (condizione di Cauchy). Le sorgenti, come i fiumi, i torrenti, i laghi e le paludi sono corpi idrici superficiali che possono sia apportare acqua al sistema delle acque sotterraneo, sia agire come zone di scarico a seconda del gradiente idraulico a cui sono sottoposti.

Fra queste condizioni al contorno quella di DRAIN simula l'effetto di un corpo di flusso esterno al bacino sul flusso delle acque sotterranee rimuovendo acqua dal modello.

Le sorgenti per esempio funzionano da dreno se il carico all'interno della cella è inferiore rispetto alla quota della sorgente. Se invece il carico diventa inferiore rispetto alla quota, la sorgente diventa inattiva.

Le sorgenti che si è scelto di inserire nel modello sono quelle più copiose dove si registrano valori medi di portata di oltre i 50 l/s : Covol dei Siori e Covol dei Veci che presentano le stesse caratteristiche di quota e dimensione e si trovano a distanza di pochi metri una dall'altra; e Ponte Subiolo.

DRAIN	QUOTA [m]	COORDINATE (Monte Mario)	PORTATA [l/s]	SEZIONE
Sorgente Covol dei Siori	150	1'707'149.611 5'080'250.495	6600	4-5 metri di larghezza 3-4 metri di altezza
Sorgente Covol dei Veci	150	1'707'149.611 5'080'189.849	4300	3 m di larghezza
Sorgente Ponte Subiolo	152	1'707'077.300 5'083'281.855	3200	2 m di larghezza 9 m di altezza
Sorgente Nassa	145	1'710'405.446 5'075'820.937	350	Non nota
Sorgente Stue	130	1'710'714.210 5'075'280.599	40	Non nota
Sorgente Pisan	200	1'693'347.590 5'070'956.145	60	Non nota
Prati di Preda E Fontanazzo	260	1'701'702.387 5'099'252.017	70	Non nota

Tabella 19: Dati delle principali sorgenti da cui si determinano le condizioni di "DRAIN" del modello matematico MODFLOW

Le sorgenti di Oliero (Covol dei Siori, Covol dei Veci) si trovano a pochi metri di distanza l'una dall'altra quindi per poterle rappresentare nel dominio del modello si è infittita la griglia nell'area interessata.

La condizione di cauchy che rappresenta l'apporto idrico al flusso sotterraneo dovuto alle acque ruscellanti in superficie, è la condizione di RIVER.

Nel dominio considerato il sistema di drenaggio superficiale è praticamente inattivo essendo costituito di valli secche e canyon inattivi . L'unico corpo idrico considerato nel modello è il corso d'acqua principale che solca la superficie della conca mediana dell'altopiano per 12 km è il Torrente Ghelpach (Figura 43); gli altri corsi d'acqua presenti sono trascurati perché non contribuiscono numericamente alle portate considerate defluenti nell'intero bacino.

I parametri assegnati alle celle interessate dal deflusso del torrente sono:

- River stage elevation [m s.l.m.]: la quota del pelo libero del corso d'acqua ed è il valore che determina il carico posseduto nella sezione rappresentata da una cella;
- River bottom elevation [m s.l.m.]: è la quota del letto del fiume, dove avviene l'infiltrazione;
- Conducance [m^2/s]: indica la resistenza che incontra un flusso che si instaura tra il corpo idrico superficiale in questione e l'acquifero sotterraneo. La conduttanza viene calcolata tramite la formula:

$$C = \frac{WL}{b} K$$

Essendo W e L rispettivamente la larghezza della sezione e la lunghezza del fiume; e b e K lo spessore e la conducibilità idraulica dello strato di terreno di cui è costituito il letto del fiume.

Il torrente ha un livello idrometrico mediamente a una quota variabile tra i 1050 m a Est dove nasce e 900 m verso Ovest, una profondità della corrente intorno ai 0.5m variabile durante l'anno dal momento che per vari mesi le acque non sono presenti in superficie perché s'infiltrano direttamente nel sottosuolo o sono ghiacciate, una larghezza media di 1 m e un fondo prevalentemente scavato nel terreno roccioso che presenta una conducibilità idraulica elevata.

Le acque del Torrente, come mostrato in figura dovrebbero confluire nella val d'Assa ed essere così drenate al di fuori del confine Ovest dell'acquifero; tuttavia, a causa della presenza di importanti inghiottitoi lungo il suo percorso, gran parte della risorsa idrica, ora sparisce, assorbita da un inghiottitoio carsico, qualche kilometro superato Asiago.

RIVER	QUOTA [m]		COORDINATE [Monte Mario]		CONDUCIBILITA' IDRAULICA del letto
Torrente Ghelpach	1050	900	1688791 5081359	1698070 5087050	10^{-5} - 10^{-7}

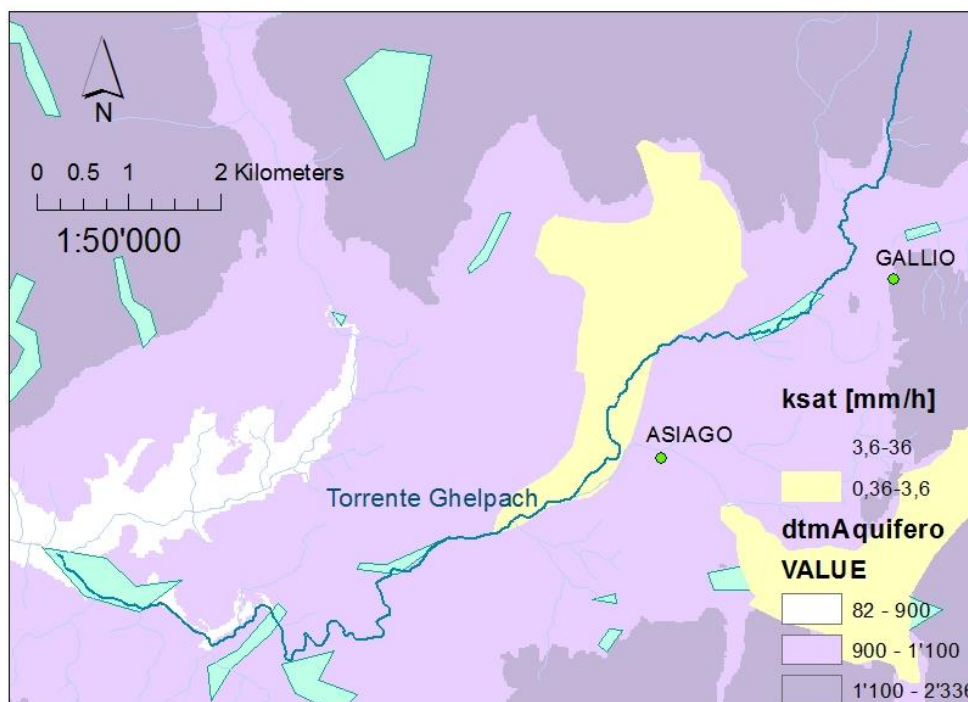


Figura 43: Torrente Ghelpach

5.2.4 Proprietà idrauliche del mezzo: Conducibilità Idraulica

Per quanto riguarda le caratteristiche fisiche del mezzo, si divide il dominio in 3 zone a differente permeabilità in base alle caratteristiche geologiche dell'altopiano descritte nel capitolo 2 e alla presenza di cavità carsiche.

La permeabilità è valutata dal software modflow tramite la grandezza di conducibilità idraulica in quanto riferita alle condizioni di terreno saturo. Per scegliere dei valori di conducibilità che descrivano la capacità dell'ammasso studiato di farsi attraversare dal liquido, si analizzano le caratteristiche delle unità idrogeologiche.

La serie dei sedimenti carbonatici che costituisce l'acquifero principale è altamente permeabile a causa delle fratture e soprattutto del carsismo: è costituita da uno strato maggiore di Dolomia Principale (spesso 600-800 metri) e uno sovrastante di spessore medio di Calcari Grigi (300-600metri) (Documentazione della Carta idrogeologica, 2006). I condotti carsici, responsabili dell'aumento di più ordini di grandezza della conducibilità idraulica dell'acquifero, hanno scavato l'ammasso carbonatico costituente l'acquifero principale fino al basamento metamorfico. Il basamento è composto da *sedimenti terrigeno - carbonatici* di età da permiana a triassica impermeabili che oltre a costituire la base dell'acquifero dell'Altopiano dei Sette comuni, costituiscono il basamento idrogeologico regionale.

Nell'area dell'altopiano sono state esplorate 1300 cavità carsiche con profondità che possono raggiungere i 1000 m; e si riscontrano anche sotto i depositi di sedimenti dell'altopiano.

Si considera uno strato di roccia altamente carsificata costituita di dolomia o calcare che presenta una permeabilità determinata dal grado di carsificazione.

Da valori di conducibilità idraulica riscontrabili in letteratura:

Complessi idrogeologici	Fratturati	Carsificati
Dolomie	10^{-8} m/s	$10^{-8} - 10^{-5}$ m/s
Calcari	10^{-5} m/s	$10^{-5} - 10^{-2}$ m/s

Tabella 20: Valori di conducibilità idraulica riportati in letteratura.

Avendo considerato un elevato grado di sviluppo della rete carsica si scelgono i valori massimi di ciascun complesso e si calcola un valore intermedio dalla media pesata in base allo spessore dei singoli complessi rocciosi (considerando lo spessore della dolomia Principale il doppio rispetto a quello del calcare Grigio).

La conducibilità scelta è pari a 10^{-4} m/s (360 mm/h).

Inoltre per tener conto dell'ingente infiltrazione resa possibile dalla presenza delle cavità carsiche come le doline, gli inghiottitoi raggruppati in poligoni, si considerano delle aree a conducibilità idraulica maggiore dell'ordine dei 10^{-2} m/s.

Dalla carta delle permeabilità (Carta delle Permeabilità del Veneto in scala 1:100000, ricavata dalla carta dei Suoli) si considera una classe di conducibilità rappresentativa dello sviluppo della rete carsica sotterranea e si sceglie come valore il limite superiore per il deflusso verticale e l'inferiore per descrivere il flusso nel piano orizzontale. L'acquifero principale si assegna un'unica zona ad elevata permeabilità caratterizzata da una conducibilità circa uniforme nello spazio dal momento che il grado di sviluppo della rete carsica non privilegia il percorso verticale rispetto all'orizzontale, anche se si abbassa di un ordine di grandezza il valore in verticale per tener conto del differente carico idraulico.

Alla conducibilità dell'acquifero si aggiungono le zone caratterizzate da un valore di conducibilità idraulica molto più elevata per la presenza degli elementi carsici superficiali. Il valore inserito nel modello matematico è ottenuto aggiungendo due ordini di grandezza al massimo riscontrato nella carta delle permeabilità, per considerare la capacità di farsi attraversare dal flusso fluido dei vuoti costituiti dalle doline o dalle cavità presenti (Figura 44).

Infine si perimetra una zona a conducibilità molto più bassa dovuta allo scarso sviluppo della rete carsica tipico delle colline a Sud dell'Altopiano (le cui caratteristiche idrogeologiche sono state riportate nel capitolo 2).

In conclusione, si compila il tensore di conducibilità idraulica che definisce le proprietà fisiche del modello matematico dell'acquifero distinguendo 3 zone:

(Vedi valori di Conducibilità idraulica riportati in Tabella 21)

Conducibilità idraulica	k_x [m/s]	k_y [m/s]	k_z [m/s]
1(Acquifero)	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}
2 (Cavità Carsiche)	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}
3 (colline pedemontane)	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}

Tabella 21: valori di Conducibilità idraulica del modello matematico dell'acquifero dell'Altopiano dei Sette Comuni.

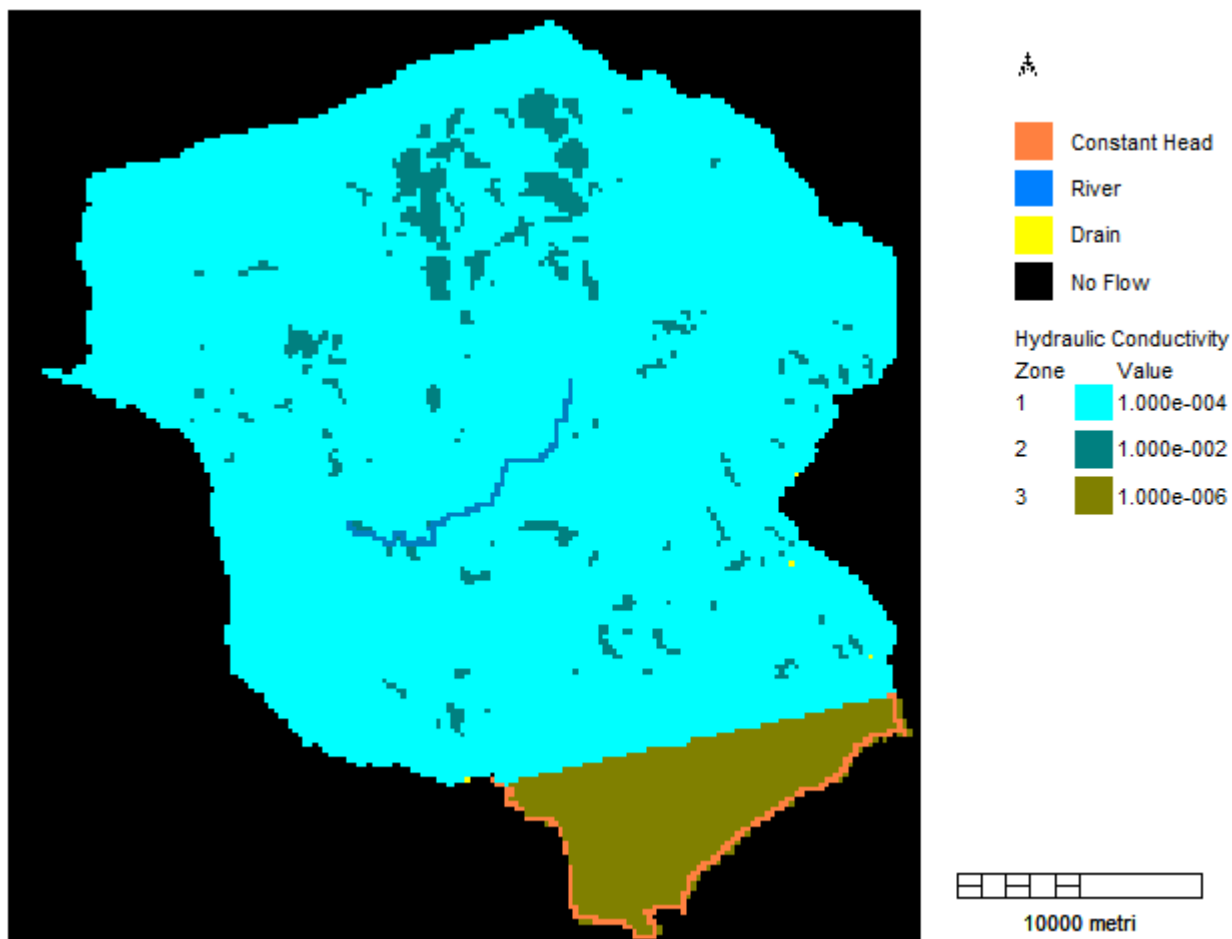


Figura 44: Aree a diversa conducibilità idraulica dello strato superficiale del dominio del modello numerico.

5.3. Calibrazione e risultati del modello

Inseriti tutti i dati disponibili sulle caratteristiche prima elencate, si passa alla fase di calibrazione del modello matematico di flusso, che permette di affinarlo a partire dai valori di ingressi e uscite misurati di cui si dispone. In questa fase si cerca di minimizzare gli scarti tra i valori sperimentali e quelli calcolati dal software, in corrispondenza dei punti di misura a disposizione, attraverso la modulazione dei parametri idrogeologici del modello.

Per calibrare il modello implementato è stata utilizzata la tecnica di tipo *trial and error*, per cui sono stati variati manualmente i parametri che sono stati all'inizio definiti per ogni cella della griglia secondo il seguente processo: si avvia la simulazione e si confrontano i valori nuovi ottenuti con quelli sperimentali e, se l'errore nei risultati simulati è basso, si considera accettabile la calibrazione, altrimenti si variano ancora le condizioni al contorno ed i valori dei parametri. Il procedimento viene ripetuto fino ad ottenere dei risultati di simulazione convenientemente simili ai dati disponibili.

I valori sperimentali usati per la calibrazione, sono stati le portate delle 5 sorgenti inserite, che risultano ben distribuite nell'area di emergenza dell'acquifero (a Est dell'Altopiano).

I parametri che sono stati sottoposti alla calibrazione sono:

- I valori della conducibilità idraulica [m/s];
- La conduttanza dei dreni [m²/s];
- La quota dei dreni

Inizialmente si sono variati i valori di conducibilità idraulica sia dell'intero dominio sia delle sorgenti (da cui dipende la conduttanza), perché rappresenta il parametro più incerto inserito nel modello.

Successivamente è stato necessario variare anche la quota a cui si trovano le sorgenti per raffinare i risultati dei deflussi e minimizzare lo scarto coi valori reali. Infatti sebbene si tratti di un parametro facilmente misurabile, la quota di queste sorgenti, necessaria a definire il carico idraulico nel dominio modellizzato, può non essere quella dell'effettivo punto di emersione dal momento che si tratta di esautori carsici valchiusani (come descritto nel secondo capitolo).

La visualizzazione dei risultati della simulazione è possibile sia sotto forma di isopiezometriche che di grafici e qui si sono riportati i più significativi: Figura 48 e Figura 46 che riportano il bilancio tra i volumi entranti e uscenti.

I valori desunti dal modello concettuale e quelli ricavati dal modello matematico sono in linea tra loro.

La portata complessiva defluente dalle sorgenti del modello numerico è di $14.91 \text{ m}^3/\text{s}$; la restante parte del volume di ricarica è costituita dalle perdite che passano dall'acquifero Prealpino all'acquifero di pianura a Sud dell'Altopiano attraverso l'aquitard fratturato: $8.16 \text{ m}^3/\text{s}$ è la portata stimata dal modello che contribuisce all'alimentazione dell'acquifero poroso.

Per quanto riguarda i singoli deflussi sorgentizi si può notare come i valori di portata calcolati si avvicinino molto ai valori osservati; infatti i punti calcolati dal modello si dispongono lungo una retta a quarantacinque gradi.

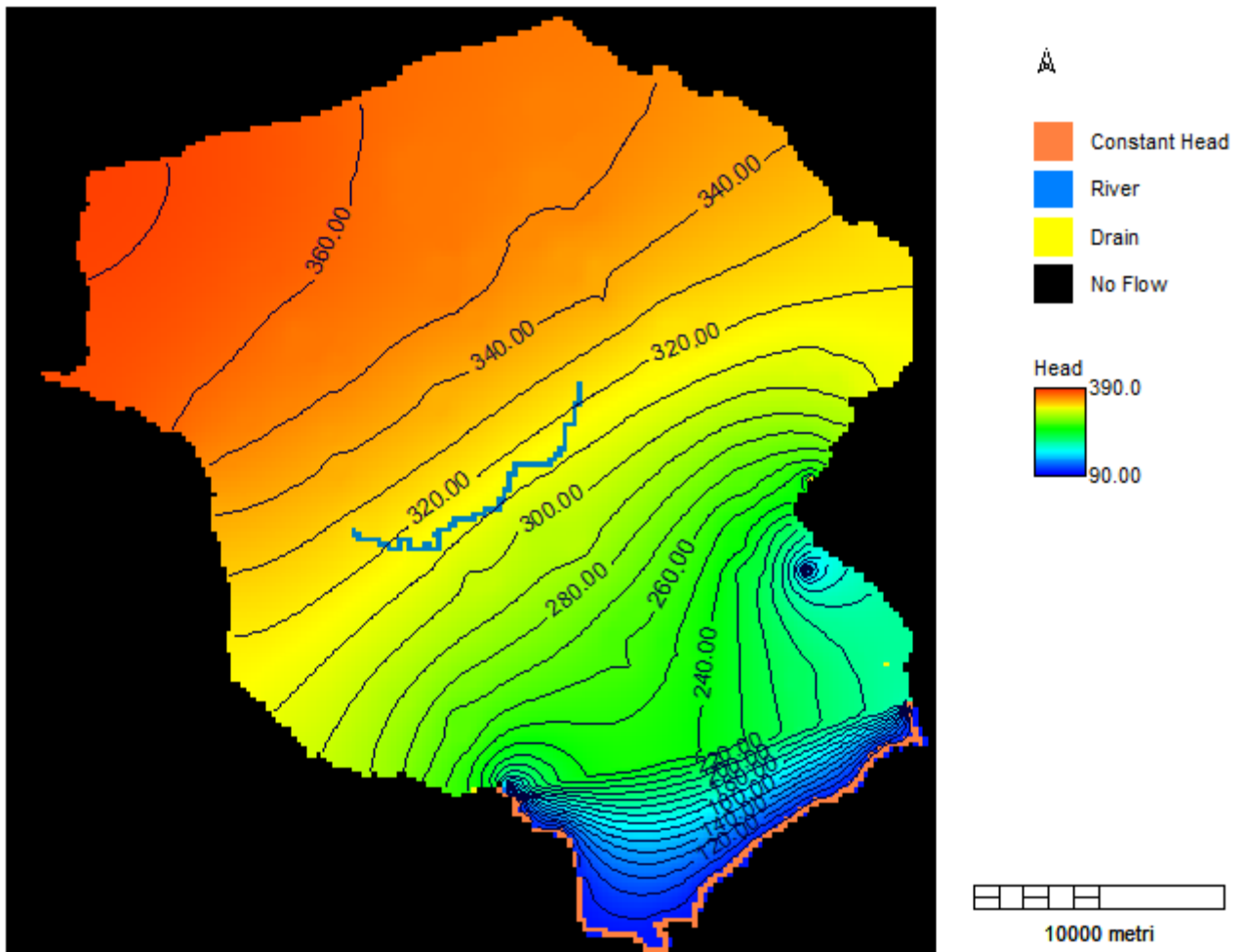


Figura 45: Andamento delle linee piezometriche del modello in stazionario.

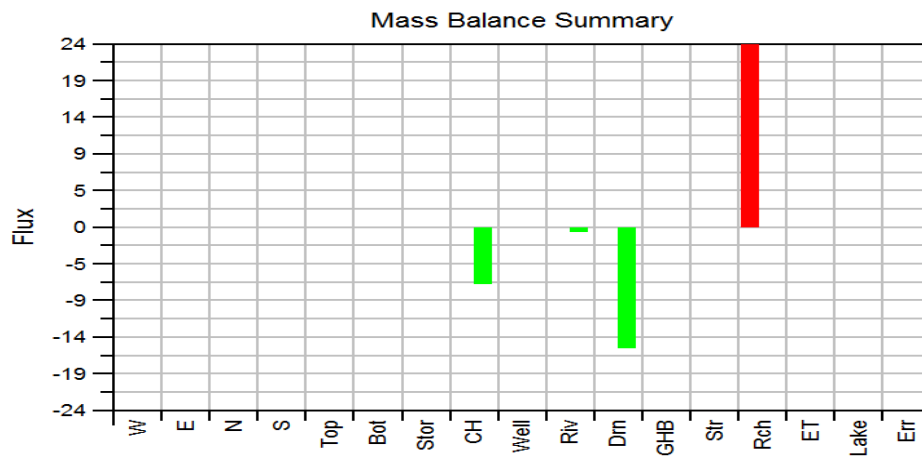


Figura 46: Bilancio del flusso idrico del modello implementato in stazionario

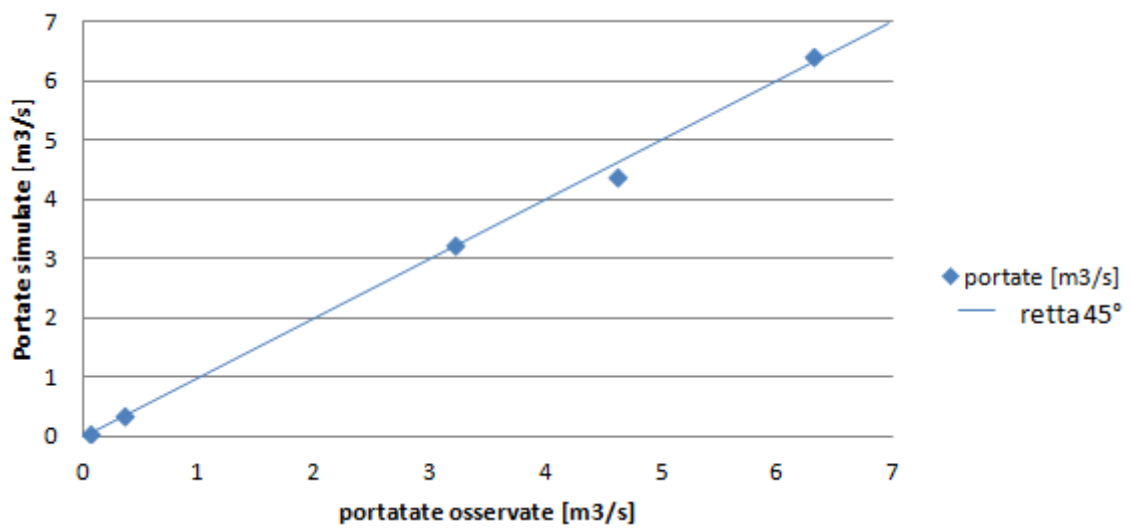


Figura 47: Confronto tra le portate osservate e calcolate per il modello in condizioni stazionarie

Sorgenti	Valori osservati medi annui [m ³ /s]	Valori simulati [m ³ /s]
Covol dei Siori	6.3	6.410
Covol dei Veci	4.6	4.396
Moretti	3.2	3.230
Nassa	0.35	0.360
Pisan	0.6	0.064

Figura 48: Andamento delle linee piezometriche del modello in stazionario.

6. CONCLUSIONI

In questo lavoro di tesi si è cercato di presentare e approfondire alcuni aspetti legati alla salvaguardia della risorsa idrica in ambiente carsico e in particolare si è cercato di definire un modello concettuale conveniente alla salvaguardia di un acquifero contenuto in un altopiano soggetto alla corrosione carsica; al fine di poter individuare le zone a maggior rischio di contaminazione.

L'area di studio è collocata nel contesto morfologico delle Prealpi dell'Italia nord-orientale e ricade all'interno dei confini amministrativi della provincia di Vicenza e di Trento. Di quest'area si è preso in considerazione l'altopiano, separato dai territori circostanti da due profonde valli e interessato dal processo carsico che ha deformato le rocce carbonatiche, dolomie e calcari di cui è principalmente costituito.

A partire da un inquadramento del territorio dal punto di vista morfologico e idrogeologico, soffermandosi sull'importanza di questi aspetti per quanto riguarda la disponibilità di acqua, si è poi definito il funzionamento dell'acquifero e un modello concettuale dell'area, tramite l'analisi dei dati registrati durante le prove con tracciante e di monitoraggio in continuo di una sorgente, oltre che raccolti dalla bibliografia esistente.

Il bacino idrologico dell'Altopiano dei Sette Comuni sia alimentato da infiltrazioni di origine meteorica; i deflussi sgorgano principalmente dalle sorgenti carsiche di tipo valchiusano situate a Est, ma è contemplato anche un percorso di uscita idrica sotterraneo rappresentato da una possibile connessione con un acquifero di pianura.

Al fine del bilancio idrologico, si prende in considerazione un valore medio della precipitazione annua registrata pari a 1550 mm/anno. Se si contempla un'estensione superficiale ricettiva di 600 km², si ottiene approssimativamente un afflusso meteorico totale annuo di 29,5 m³/s, che privato del valore medio evapotraspirazione annua, che interessa la superficie dell'altopiano, diventa di circa 21 m³/s. I deflussi invece sono costituiti da una portata sorgentizia media annua stimata complessivamente 15 m³/s.

E' stata accertata l'esistenza di una connessione idrologica tra la zona situata a Ovest di Asiago nei a 1000 m s.l. m. e le sorgenti dell'Oliero tramite un'esperienza con tracciante; mentre è stato escluso il collegamento di tale ricarica con le altre emergenze attorno all'acquifero. La sostanza estranea diluita nell'acqua d'infiltrazione compare durante i primi 7 giorni alla sorgente a valle,

dove raggiunge la massima concentrazione dopo due settimane per tornare sotto i limiti di rilevabilità nel giro di un mese circa.

La velocità di circolazione è stata stimata intorno ai 500 m/ora.

Dal monitoraggio di uno dei maggiori esautori (la Sorgente Covol dei Veci), si deduce che l'acquifero è caratterizzato da un legame molto stretto con le precipitazioni, che evidenzia la vulnerabilità di questa fonte, ma dal punto di vista dei quantitativi idrici risulta essere molto affidabile grazie all'abbondanza dei deflussi.

Il massiccio carsico dell'Altopiano dei Sette Comuni presenta un esteso sistema d'infiltrazione costituito da numerose condotte drenanti e da un network di fratture molto denso, in grado di trasferire assai rapidamente gli scorrimenti idrici superficiali nel sottosuolo. Ospita un vasto acquifero che è costituito principalmente da un carso saturo molto evoluto, esteso sia lateralmente che verticalmente, la cui funzionalità idrodinamica è riconducibile a quella di una rete di condotti a dreno primario dominante, in grado di frazionare efficacemente le portate dalla sorgente Covol de Veci durante il periodo di svuotamento. Nello stesso acquifero è presente inoltre, una rete di condotti interconnessa e molto trasmissiva, in grado di allontanare rapidamente dall'acquifero gli afflussi connessi all'infiltrazione a seguito però di un'interazione non indifferente ma di breve durata col carso saturo.

Dall'analisi di monitoraggio dei parametri chimici si deduce l'influenza degli apporti idrici dovuti al fenomeno di disgelo che va da Aprile a Giugno che implica un deflusso più abbondante ma dalle caratteristiche chimiche più povere.

Il funzionamento dell'acquifero sembra dipendere dal livello di base: se livello idrico riferito alla base della sezione di misura, se inferiore ai 90 cm l'acqua di ricarica spinge idrostaticamente la risorsa mineralizzata; se invece l'acquifero è saturo e il livello di base supera i 100 cm, ad aumenti di volumi di ricarica corrispondono deflussi di acque più diluite e più povere di Sali minerali della media.

Tale considerazione è supportata, per quanto riguarda il periodo di "piena", dai risultati dell'esperienza con traccianti che descrivono un'elevata tendenza alla contaminazione che viene smaltita in tempi assai brevi data la velocità di scorrimento delle acque dell'acquifero nei mesi di Maggio e Giugno, periodo caratterizzato da un deflusso di base elevato per la sorgente di Oliero.

Sarebbe interessante poter confermare il funzionamento prima descritto anche per quanto riguarda i periodi di magra analizzando i tempi di risposta a un'acqua d'infiltrazione diluita con tracciante immessa nel mese di Agosto per esempio.

Infine dall'interpretazione tramite il calcolo della curva di svuotamento, si può solo confermare l'affidabilità quantitativa delle riserve regolatrici. Infatti lo stretto legame tra precipitazione e sorgente non permette di stimare la divisione quantitativa del flusso legato alla presenza dell'infiltrazione nel non saturo rispetto al normale deflusso retto dalle riserve regolatrici dell'acquifero.

Per la valutazione della vulnerabilità intrinseca dell'area di studio si è applicato il criterio geomorfologico strutturale attraverso il metodo Epik, che permette di costruire la carta della vulnerabilità della captazione che divide l'intera superficie di alimentazione dell'acquifero preposto in classi. Si sono dunque delimitate le zone di salvaguardia a partire da questa secondo l'approccio della normativa svizzera, che ha permesso la perimetrazione, non solo delle aree limitrofe alle sorgenti, ma anche tutti i territori che, seppur distanti, sono in diretta connessione coi punti di prelievo. Il metodo del tempo di dimezzamento della massima portata annuale, fondato sull'analisi della curva di svuotamento, infatti, non ha permesso la suddivisione del bacino in quanto ricadente tutto in indistintamente in classe di vulnerabilità intrinseca elevata.

Infine si è sviluppato un modello numerico finalizzato alla all'applicazione del criterio cronologico tramite simulazione deterministica in stazionario e in transitorio grazie ai dati di registrazione di afflussi e deflussi del monitoraggio in continuo.

La disponibilità di dati meteorologici rappresentativi ha consentito infatti lo sviluppo di un modello idrogeologico in grado di simulare la risposta delle sorgenti al bacino di alimentazione osservato, a seguito della calibrazione eseguita mediante i valori risultanti dall'elaborazione dei dati registrati durante il monitoraggio della sorgente di Oliero.

Il modello è in grado di riprodurre in modo soddisfacente, dato il notevole grado di semplificazione adottato, il regime idrologico naturale delle sorgenti, con alcuni limiti, infatti se con la calibrazione si è ottenuto un errore del 20 %, la validazione del modello ha riportato un errore del 30%.

Il modello implementato potrebbe essere migliorato di molto aggiungendo l'elevazione dettagliata della superficie dell'altopiano che influisce di molto sull'infiltrazione della ricarica, come si è potuto constatare durante la costruzione della mappa di vulnerabilità.

BIBLIOGRAFIA

ALLEGRINI M. (2004): Contributo allo studio delle risorse idriche nell'Altopiano di Asiago. Tesi di Laurea di 2° livello, Ing. Civile, Università degli Studi di Padova

ALWATHAF Y., EL LANSOURI B. (2011): Assessment of aquifer vulnerability based on GIS and ARCGIS Methods: A case study of the Sana'a Basin (Yemen), *Journal of water resource and protection*, 3, 845-855

ARPAV (2011): Valutazione della permeabilità e dei gruppi idrogeologici dei suoli del veneto

ARPAV (2011): Caratterizzazione climatica a scopo forestale delle comunità montane della regione veneto, allegato dell'atlante climatico del veneto

ARPAV (2012): Studio idrogeologico e idrochimico dell'altopiano di Asiago e delle sorgenti dell'Oliero

BIAVA F. (2013): Delimitazione delle zone di salvaguardia dell'acquifero carbonatico del Gran Sasso. Tesi di Laurea di 2° livello, Ing. Per l'Ambiente e il Territorio, Politecnico di Milano.

BIOFAVA F., DAL MOLIN L., MARCHETTO G. del CLUB SPELEOLOGICO DEL PROTEO (2013): Studio idrogeologico e idrochimico dell'altopiano di asiago e delle sorgenti dell'Oliero; *Speleologia Veneta* vol. 21

BISAGLIA M., CISOTTO A., STOCCO R. (2013): La salvaguardia degli acquiferi Linee Guida; Autorità di bacino dell'alto adriatico, Cooperazione transfrontaliera Italia - Slovenia

CIVITA M. (2005): *Idrogeologia applicata e ambientale*, Casa Editrice Ambrosiana, Mi.

CUCCHI F., ZIGNI L., CALLIGARIS C. (2015): *Le acque del carso classico Progetto Hydrokarst*, EUT Edizioni Università di Trieste & ZRC SAZU Institut za raziskovanje krasa

DRAMIS F., SAURO U., (2004): *Altopiani carsici*, n 60 di *Carsismo*, Università degli studi di Roma e Università degli studi di Padova

GATTINONI P. (2009): *Tipo e comportamento delle sorgenti: alcuni esempi lombardi*; Dispensa, MI

GRUPPO SPELEOLOGICO SETTECOMUNI : *L'altopiano dei sette comuni. Il massiccio carsico morfologie superficiali e profonde*; Museo dell'acqua- Asiago

KOEK R., MAGNANA B., HOCHBICHLER E. (2007): *KATER II, Handbook: Final report regarding the land use category forestry*, University of natural resources and applied life sciences, Vienna

MINISTERO DELL'AMBIENTE (2009): *Attuazione della direttiva 2006/118/CE, relativa alla protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento – D.Lgs, 16 Marzo 2006, n. 30*, Roma.

PEANO G. : *Le acque carsiche: Studio, utilizzazione e tutela*; Comitato scientifico centrale del C.A.I.

PILLI A., SAPIGNI M., ZUPPI G. M. (2012): *Kartik and alluvional aquifers: a conceptual model for the plain – Prealps system (northeastern Italy)*; *Journal of Hidrology*

POLEMIO M. et al. (2009): *Karstic aquifer vulnerability assessment methods*

REGIONE VENETO (2004): Carta idrogeologica dell'Altopiano dei Sette Comuni – Revisione in scala 1:50 000, a cura di AURIGHI M., FIORANI F., MORETTI M., NORDIO M., SOCCORSO C., 40 pp., Venezia

REGIONE VENETO (2006): Carta di vulnerabilità delle acque sotterranee dell'altopiano dei Sette Comuni; a cura di AURIGHI M., CUCCHI F., FRANCESCHINI G., NORDIO M., SOCCORSO C., ZINI L., realizzata nell'ambito del progetto KATER II

SCESI L., GATTINONI P. (2007): La circolazione idrica negli ammassi rocciosi, Casa Editrice Ambrosiana, Mi.

SCESI L., GATTINONI P. (2012): Methods and Models to Determine the Groundwater Flow in Rock Masses: Review and Examples; Nova science publisher Inc, New York.

SOCIETA' SPELEOLOGICA ITALIANA, SPELEOLOGIA VENETA (2011): L'acqua che berremo, speleologi ed istituzioni difendono la risorsa più preziosa

SECCI R., URAS G. (2011): Comparazione fra metodiche per la valutazione della vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi. Applicazione all'acquifero del Sulcis Iglesiente (Sardegna meridionale)

TURPAUD P., ZINI L., RAVBAR N., CUCCHI F. (): " La protezione delle acque sotterranee", Università di Trieste e Institut ZRC SAZU

TOFFOLETTO F., BARBIERI G., GRANDESSO P., STEFANI C., VISONA' D., (): Carta geologica d'italia scala 1:50 000 Foglio geologico 82 Asiago

TRENTIN F. (2013): Modellazione idrologica del bacino idrografico del fiume Astico. Tesi di Laurea di 2° livello, Ing. Civile, Università degli Studi di Padova

SITOGRAFIA

<http://www.arpav.veneto.it/temi-ambientali/acqua/direttiva-2000-60-ce>

<http://www.eniscuola.net/argomento/le-grotte/le-grotte-e-lacqua/gli-acquiferi-carsici/>

<http://www.isprambiente.gov.it/Media/carg>

<http://idt.regione.veneto.it/app/metacatalog>

<http://geoportale.provincia.vicenza.it/home.asp>

<http://www.appa.provincia.tn.it/>

<http://www.protezionecivile.tn.it/territorio/Cartografia/>

<http://gggmodon.it/>

<http://dati.trentino.it/>

<http://www.fao.org/>

http://193.206.192.231/carta_geologica_italia/tavoletta.php?foglio=37