UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI SCIENZE MM. FF. NN.
Dipartimento di Geoscienze
Direttore Prof. Cristina Stefani

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN
GEOLOGIA E GEOLOGIA TECNICA

IDROGEOLOGIA DELLA PIANA ISONTINA (ITA – SLO)

Relatore:
Prof. Paolo FABBRI

Correlatori:
Dott. Luca ZINI
Dott. Enrico ZAVAGNO

Laureanda: Cristina GERDOL

ANNO ACCADEMICO 2012/ 2013

INDICE

INTRODUZIONE 3

1 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO 5

1.1 La Pianura Friulana 6

1.2 La Piana Isontina 16

1.3 I corsi d'acqua principali della Piana Isontina 19

2 REGIME DEI CORSI D'ACQUA E DELLE FALDE 25

3 LA FALDA FREATICA DELLA PIANA ISONTINA 29

3.1 Misure freatimetriche 36

3.2 Ricostruzione delle isofreatiche 52

3.3 Monitoraggio in continuo 87

3.4 Analisi di serie storiche dei livelli di falda 102

4 GEOCHIMICA DELLE ACQUE DELLA PIANA ISONTINA 111

4.1 Caratteristiche generali delle acque della Pianura Friulana 111

4.2 Le acque della Piana Isontina 115

4.2.1 Acque superficiali 116

4.2.2 Acque sotterranee 117

4.3 Campionamenti 125

4.4 Isotopi stabili dell'acqua 149

4.5 Analisi di dati geochimici 177

5 CONCLUSIONI 201

BIBLIOGRAFIA 207

APPENDICE 211

RINGRAZIAMENTI 307

INTRODUZIONE

Il presente lavoro di tesi vuole fornire una caratterizzazione completa della Piana Isontina sia dal punto di vista idrogeologico che da quello della geochimica delle acque, ponendo particolare attenzione alla falda freatica. Attraverso la misura dei livelli freatimetrici, effettuata nel corso di 14 diverse campagne, si vuole ricostruire la geometria della superficie freatica, definendo le direzioni prevalenti dei deflussi sotterranei, e valutarne le variazioni nel tempo, individuando gli episodi di massima e minima alimentazione della falda. Si vogliono chiarire in particolare i rapporti tra la falda freatica goriziana ed i calcari del Carso Isontino, studiando l'andamento dei livelli nella zona nord-orientale della piana e specialmente nella sua porzione che si estende in territorio sloveno, mai considerata nei lavori precedenti. Al fine di ricostruire e valutare al meglio le variazioni della superficie freatica nel tempo, anche in relazione alle precipitazioni, vengono inoltre monitorati in continuo il livello di falda ed i parametri di conducibilità elettrica e temperatura in alcuni pozzi in territorio italiano e sloveno. Per valutare le massime escursioni di livello della falda, identificare eventuali trend e collocare il presente lavoro in un contesto temporale più ampio, vengono esaminate delle serie storiche di dati di livello relativi ad alcuni pozzi, distribuiti tra Alta e Bassa Pianura Isontina. Al fine di caratterizzare le acque della Piana Isontina da un punto di vista isotopico, vengono effettuate diverse campagne per il prelievo di campioni di acque sotterranee appartenenti alla falda freatica ed a livelli acquiferi più profondi e di alcuni di acque superficiali, su cui effettuare delle analisi volte a determinare il contenuto di isotopi dell'ossigeno e dell'idrogeno. Infine, per una caratterizzazione delle acque da un punto di vista strettamente geochimico, vengono presi in esame dati relativi ad analisi effettuate da ARPA FVG su campioni di acque appartenenti sia alla falda freatica che alle falde in pressione.

1 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

La zona oggetto di studio comprende la parte di Piana Isontina che si sviluppa a sud della zona collinare del Collio fino al mare, delimitata ad ovest dai corsi dei fiumi Torre ed Isonzo, ad est dal massiccio del Carso triestino e goriziano e che si estende nel settore nordorientale in territorio sloveno, nella piana dei comuni di Šempeter-Vrtojba e Miren-Kostanjevica (Figura 1.1).

Figura 1.1: Ubicazione dell'areale di studio.

La Piana Isontina costituisce la porzione più orientale della Pianura Friulana e presenta quindi caratteristiche genetiche ed idrogeologiche analoghe a quest'ultima.

1.1 La Pianura Friulana

La Pianura Friulana rappresenta il lembo orientale della Pianura Padana, anche se per le sue caratteristiche geologiche deve essere considerata indipendente rispetto all'evoluzione di quest'ultima, essendo caraterrizzata da maggiore acclività e da sedimenti in genere più grossolani.

La Pianura Friulana si estende a meridione delle Prealpi Carniche e Giulie tra i fiumi Livenza e Isonzo. È costituita da una potente coltre di sedimenti prevalentemente quaternaria che poggia su un basamento roccioso prequaternario. Il basamento nei pressi di Latisana è a circa 500 m di profondità, si eleva progressivamente verso est, arrivando a 250 m di profondità nel sottosuolo di Grado e a meno di 100 m nei pressi di Monfalcone, mentre si alza bruscamente verso nord ove si raccorda con i rilievi delle Prealpi Carniche e Giulie [*Nicolich et al.*, 2004; *Zini et al.*, 2008; *Zini et al.*, 2011].

Figura 1.2: Principali unità fisiografiche del bacino idrogeologico del Friuli Venezia Giulia: i bacini montani, il Carso, l'Alta Pianura e la Bassa Pianura. (da Zini *et al.*, 2011)

Dal punto di vista idrogeologico la Pianura Friulana è divisibile in due zone principali, l'Alta Pianura a nord e la Bassa Pianura Friulana a sud, separate dalla Linea delle Risorgive (Figura 1.2). Questa è una fascia che si sviluppa da SE a NO per circa 100 km (40 km in Destra Tagliamento e 60 km in Sinistra), dalle foci del Timavo alla base del Cansiglio, caratterizzata da estesi ed abbondanti affioramenti di acque sotterranee che si manifestano in maniera pressoché continua lungo tutta la sua estensione. L'ampiezza di questa fascia è dell'ordine di diverse centinaia di metri ed è variabile nello spazio e nel tempo, in funzione delle condizioni di alimentazione. I fenomeni che si sviluppano lungo la Fascia delle Risorgive sono conseguenza del fatto che la potente successione di depositi fluviali, fluvio-glaciali e marini che costituiscono la pianura presenta, da monte verso valle, granulometrie progressivamente più fini, con frequenti intercalazioni argillose di notevole estensione e spessore, determinando così una graduale e generale diminuzione della permeabilità ed una conseguente riduzione della sezione filtrante delle falde. In questa zona le acque di falda affiorano parzialmente in superficie, dando origine ai corsi d'acqua di risorgiva (Figura 1.3) [*Vatta*, 1992; *Zini et al.*, 2011].

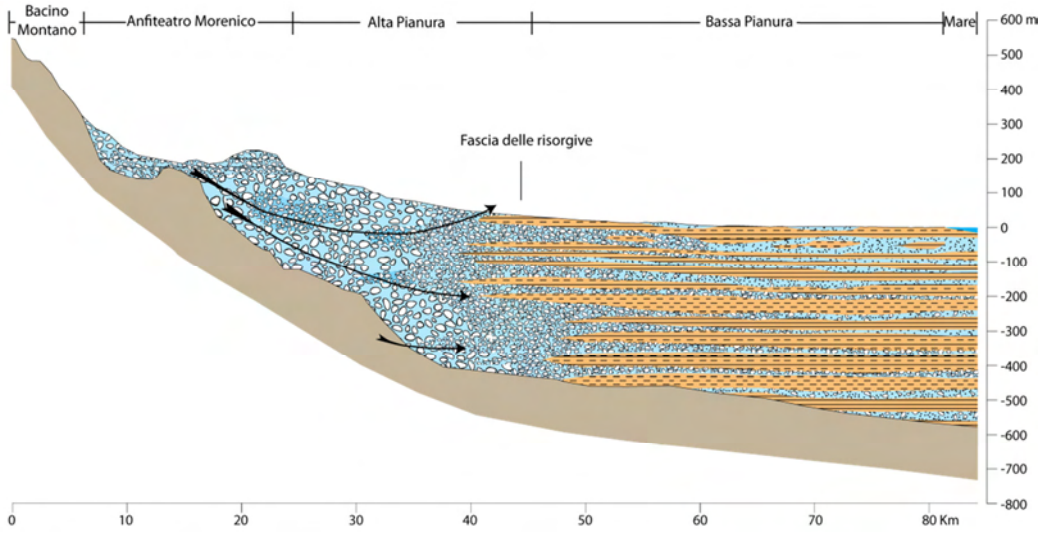


Figura 1.3: Sezione idrogeologica schematica della Pianura Friulana. In celeste i depositi ghiaiosi e sabbiosi permeabili in cui risiedono la falda freatica e i sistemi di acquiferi artesiani, in arancione i depositi limoso-argillosi impermeabili, in beige il basamento pre-quaternario. Le frecce indicano le direzioni preferenziali di deflusso. (da Zini *et al.*, 2011)

In regione esistono due principali Fasce delle Risorgive, che hanno origine in seguito ad un brusco salto di permeabilità: ad oriente la Fascia delle Risorgive della Bassa Friulana, che corre da Codroipo a Monfalcone, ad occidente la fascia che sta alla base del conoide di Pordenone. Esse si uniscono, ma solo da un punto di vista geografico, dato che non presentano caratteristiche genetiche perfettamente identiche. A monte della morena del Tagliamento, ai piedi di Gemona ed Osoppo, si sviluppa una Fascia di Risorgive più limitata e completamente staccata dalle precedenti [*Mosetti*, 1983].

L'Alta Pianura e la falda freatica

A monte della Fascia delle Risorgive, le alluvioni che costituiscono l'Alta Pianura sono caratterizzate per la grande maggioranza da ghiaia, che domina e contraddistingue tutto il deposito. In profondità la ghiaia è cementata qua e là in banchi di conglomerato, spessi anche decine di metri e intercalati con ghiaia sciolta, sabbia e qualche lente di argilla discontinua. Solo a maggiori profondità appaiono intercalazioni argillose più consistenti. Questo materasso ghiaioso presenta uno spessore di centinaia di metri, che supera gli 800 m verso SO, mentre ad est la potenza della coltre si attenua progressivamente (200-300 m), fino a svanire presso gli affioramenti delle formazioni manoso-arenacee del Friuli Orientale, e dei calcari del Carso. Questi depositi, appartenenti al Quaternario, presentano una permeabilità estremamente elevata, tanto che tutti i corsi d'acqua che li attraversano vengono assorbiti dopo un tragitto più o meno lungo, tranne nei periodi di piena. L'unica eccezione è costituita dall'Isonzo che attraversa però un tratto esiguo e marginale del deposito alluvionale. L'origine di questa formazione ghiaiosa è da ricondurre alla rapidissima erosione dei bacini montani dopo l'ultima glaciazione [*Mosetti*, 1983; *Nicolich et al.*, 2004; *Zini et al.*, 2011]. Le caratteristiche litologico-granulometriche ed i parametri di permeabilità dei depositi dell'Alta Pianura variano notevolmente, ma nel complesso il comportamento idrogeologico può considerarsi discretamente omogeneo. Nella parte più settentrionale dell'Alta Pianura, dove la percentuale di ghiaia è superiore al 65-70% con punte dell'80-90%, i valori medi di permeabilità ottenuti con prove

superficiali variano fra 10^{-3} e 10^{-4} m/s. Prove di pompaggio effettuate fino a profondità a cui prevale nettamente la frazione ghiaiosa (200 m) evidenziano valori di permeabilità attorno a 10^{-3} m/s, mentre per le ghiaie sabbioso-limose, in prossimità della Fascia delle Risorgive, i valori di permeabilità sono tipicamente di 10^{-5} m/s [*Zini et al.,* 2008].

L'acqua di percolazione meteorica e quella dispersa dai corsi d'acqua superficiali provenienti dalle aree montane vanno a costituire una falda freatica che si estende dai rilievi montani fino alla Fascia delle Risorgive. La falda freatica non satura totalmente il materasso alluvionale, infatti nella zona di Udine, ad esempio, la tavola d'acqua si può trovare anche a 40 m di profondità dal piano campagna. La superficie della falda presenta un gradiente dell'1-2‰ da nord verso sud, che determina il deflusso delle acque verso valle [*Cucchi et al.*, 1999a; *Mosetti*, 1983; *Zini et al.*, 2011].

Si ritiene che i depositi alluvionali dell'Alta Pianura in Sinistra Tagliamento siano interamente sostenuti dal basamento roccioso pre-Quaternario, fino alla Fascia delle Risorgive. La situazione è diversa in Destra Isonzo: tra le ghiaie e il substrato roccioso compatto si interpone uno spessore via via crescente di depositi marini, per lo più argillosi. La presenza del basamento sotto le alluvioni quaternarie è stata accertata solo in alcune zone della pianura, per lo più marginali, mediante perforazioni:

- Piana di Gorizia: basamento in flysch a 60-80 m sotto il piano campagna (Figura 1.4);
- Grado: basamento arenaceo a circa 250 m di profondità;
- Cassegliano (San Pier d'Isonzo): basamento calcareo appena sotto i 200 m dal piano campagna (Figura 1.4).
- Cesarolo (appena oltre il confine regionale): basamento calcareo alla profondità di 720 m, e forse di flysch già a 600 m.

Il bordo orientale della Pianura Friulana è interessato, più che da ghiaie, da depositi di conglomerato che poggiano direttamente sul basamento di flysch, senza l'intercalazione di ghiaia sciolta [*Mosetti,* 1983].

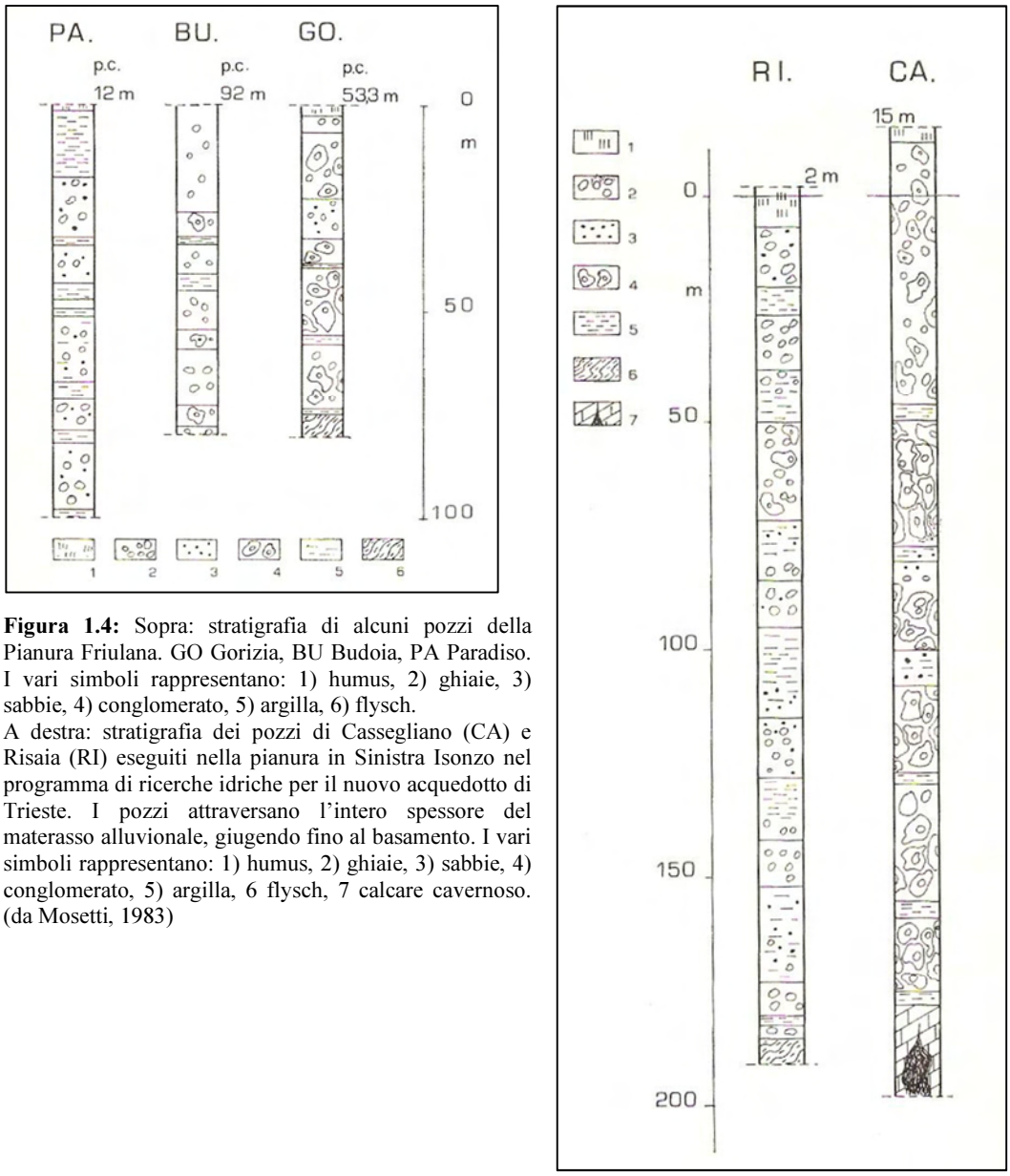


Figura 1.4: Sopra: stratigrafia di alcuni pozzi della Pianura Friulana. GO Gorizia, BU Budoia, PA Paradiso. I vari simboli rappresentano: 1) humus, 2) ghiaie, 3) sabbie, 4) conglomerato, 5) argilla, 6) flysch.
A destra: stratigrafia dei pozzi di Cassegliano (CA) e Risaia (RI) eseguiti nella pianura in Sinistra Isonzo nel programma di ricerche idriche per il nuovo acquedotto di Trieste. I pozzi attraversano l'intero spessore del materasso alluvionale, giugendo fino al basamento. I vari simboli rappresentano: 1) humus, 2) ghiaie, 3) sabbie, 4) conglomerato, 5) argilla, 6 flysch, 7 calcare cavernoso. (da Mosetti, 1983)

La Bassa Pianura e i sistemi multifalda

Man mano che ci si sposta verso sud, come già detto, i depositi alluvionali che costituiscono la pianura presentano granulometrie via via più fini: le ghiaie ed i conglomerati passano, in modo graduale, dall'essere predominanti nell'Alta Pianura a comparire in lenti assottigliate e digitate in corrispondenza della Fascia delle Risorgive. A sud di quest'ultima predominano frazioni granulometriche appartenenti alle sabbie argillose, ai limi e alle argille. L'alternanza di questi sedimenti impermeabili ad orizzonti ghiaioso-sabbiosi, spesso limosi, più

permeabili, ha portato all'instaurarsi di un complesso multifalda, connesso all'acquifero freatico, e quindi alla formazione di una complessa sequenza di sistemi di acquiferi sovrapposti, confinati o semiconfinati [*Zini et al.,* 2008*; Zini et al.,* 2011].

Le caratteristiche litostratigrafiche del sottosuolo sono relativamente disomogenee e differiscono sensibilmente da zona a zona, in relazione alla diversa genesi dei depositi. I materiali ed i sedimenti che costituiscono gli acquiferi rappresentano il prodotto della deposizione avvenuta durante il Quaternario e, considerando i sistemi più profondi, a partire dal Miocene. Durante questo periodo il susseguirsi di diverse fasi climatiche e paleogeografiche ha determinato differenti facies deposizionali con variazioni laterali e verticali [*Mosetti,* 1983*; Zini et al.,* 2011]. Durante il LGM, i bacini dei maggiori sistemi fluviali di tutto l'arco alpino ospitavano grandi ghiacciai dalle cui fronti si originavano degli scaricatori glaciali caratterizzati da una notevole portata liquida e solida. Le acque di fusione del ghiacciaio del Tagliamento alimentavano varie distinte correnti fluvioglaciali, che, giunte all'altezza dell'odierna Fascia delle Risorgive, avevano perso molta dell'originaria capacità di trasporto e sedimentavano materiale fine, dapprima alternandolo a depositi ghiaiosi, poi in più cospicue ed omogenee masse limoso-argillose alternate a sabbie. I depositi di questa sequenza, attribuita all'acme LGM (fase peniglaciale), sono costituiti da sedimenti fini della piana inondabile come limi-argillosi e argille e talvolta da limitati corpi sabbiosi di canale a geometria lenticolare. Nella successiva fase cataglaciale, durante il ritiro del ghiacciaio, Tagliamento, Cormor e Torre hanno sedimentato su un'area molto estesa, lasciando tracce dei loro paleoalvei sabbioso-ghiaiosi su tutta la superficie della Bassa friulana. Questi dossi ghiaiosi sono aggradanti sulla pianura peniglaciale [*Fontana,* 2006]. Nel post-LGM la fusione dei ghiacci causò un rapido innalzamento marino. Questo fenomeno non si verificò simultaneamente in tutto l'Adriatico e la morfologia delle coste giocò un ruolo fondamentale; si generarono così delle situazioni differenziate anche tra zone adiacenti. Nelle aree in cui i corsi alpini sfociavano durante l'Olocene si riconosce spesso un ciclo trasgressivo-regressivo, composto da un'iniziale espansione marina sulla pianura

preesistente, seguita dall'instaurarsi di un ambiente lagunare o deltizio, talvolta caratterizzato dalla successiva progradazione dei sistemi fluviali. Queste fasi di ingressione e di regressione marina hanno condizionato e determinato la deposizione di sedimenti marini più fini [*Fontana,* 2006*; Mosetti,* 1983]. I materiali più permeabili, contenenti le falde artesiane, rappresentano quindi dei paleoalvei (sabbiosi o sabbioso-argillosi) che scorrevano in paleopianure, successivamente sommerse e ricoperte da sedimenti marini. La larghezza relativa delle lenti permeabili che ospitano la falda è conseguenza delle ampie divagazioni che compivano i corsi d'acqua, anche durante le variazioni del livello marino e corrispondentemente del fondale [*Mosetti*, 1983]. Tra la Fascia delle Risorgive e l'area perilagunare si trovano così materiali misti, sia sabbioso-argillosi che limoso-argillosi e talora organici, mentre più a sud prevalgono depositi fini limoso-argillosi. In alcuni casi, al di sotto delle argille marine, sono presenti ghiaie depositate da antichi corsi d'acqua le cui foci erano vicine alla costa. Questo è il caso delle porzioni delle falde isontine più vicine al mare, che da freatiche diventano artesiane, conservando però, almeno per un certo tratto, la loro natura ghiaiosa [*Mosetti*, 1983].

Il complesso multifalda è costituito da 11 sistemi di acquiferi sovrapposti, confinati e semiconfinati, denominati, dal più superficiale al più profondo, con lettere dell'alfabeto dalla A alla M [*Stefanini and Cucchi*, 1976; *Zini et al*., 2011]:

- Sistema di acquiferi "A": ha il tetto posizionato generalmente fra i 10/20 m s.l.m.m. in corrispondenza delle risorgive nella zona di Pordenone ed i -50 m s.l.m.m. nella fascia perilagunare. È quasi sempre presente e ha un andamento molto articolato che posiziona il tetto generalmente tra i -20/-30 e i -50 m dal piano campagna. Il sistema è contenuto in numerosi orizzonti permeabili, da prevalentemente ghiaiosi a nord, fino a ghiaioso-sabbiosi e sabbiosi a sud, intercalati a livelli argillo-limosi impermeabili. La potenza complessiva degli orizzonti varia da pochi metri ad una cinquantina di metri.
- Sistema di acquiferi "B": ha il tetto posizionato generalmente fra i -30/-40 m s.l.m.m. in corrispondenza della Fascia delle Risorgive nel pordenonese

ed i -90 m s.l.m.m. nella fascia perilagunare. Posizionato in genere fra i -70 e i -90 m dal piano campagna, si approfondisce da nord verso sud in maniera piuttosto regolare. Il sistema è abbastanza continuo ed è contenuto in un intervallo permeabile ghiaioso, nelle aree settentrionali della Bassa Pianura, e sabbioso in quelle meridionali. Lo spessore medio del sistema è 13 m.

- Sistema di acquiferi "C": è presente con buona continuità in tutta la Bassa Pianura, consiste in due livelli permeabili prevalentemente sabbiosi ("C_{alto}" e "C_{basso}"), quasi sempre ben distinti anche se talora non hanno evidente continuità laterale. Il tetto del livello "C_{alto}" è posizionato tra -60/-70 m s.l.m.m. e -120 m s.l.m.m., e quindi tra -110 e -120 m di profondità dal piano campagna. Lo spessore medio del sistema (tetto "C_{alto}" - letto "C_{basso}") è circa di 14.5 m, con spessori dei singoli livelli molto variabili.
- Sistema di acquiferi "D": comprende un insieme di sottili livelli permeabili che si presentano in genere distinti in due raggruppamenti principali (livelli "D_{alto}" e "D_{basso}"). Il tetto è situato a quote tra -110/-120 m s.l.m.m. in corrispondenza della Fascia delle Risorgive nel pordenonese e -155 m s.l.m.m. in corrispondenza della costa. Il sistema si sviluppa quindi tra -140 e -160 m di profondità dal piano campagna. Il tetto si approfondisce da nord verso sud. I due livelli si succedono a pochi metri di distanza fino talvolta a congiungersi in senso verticale. Il livello "D_{alto}" è costituito da uno o più livelli di sabbie o sabbie debolmente ghiaiose, il livello "D_{basso}" è formato da un livello sabbioso-ghiaioso continuo che verso Est passa a sabbie grossolane o sabbie. Lo spessore medio del sistema (tetto "D_{alto}" - letto "D_{basso}") è di circa 15 m.
- Sistema di acquiferi "E": il tetto si rinviene a quote variabili da -150 m s.l.m.m. a -200 m s.l..m.m.. La profondità del tetto ai margini nord ed est è quindi ubicata a -175 m dal piano campagna, mentre altrove le profondità sono comprese tra -180 e -210 m dal piano campagna. Il sistema di acquiferi è dato da un intervallo permeabile costituito da ghiaie grossolane a nord, e ghiaie sabbioso-limose verso sud, talvolta sdoppiato in livelli secondari. Lo

spessore medio del sistema è di circa 14 m. Le acque di questo sistema sono di interesse geotermico, raggiungono infatti temperature massime di 29°C in alcune zone della Laguna di Grado e Marano.

- Sistemi di acquiferi "F": consiste in un insieme complesso di livelli permeabili ravvicinati, da ghiaioso-sabbiosi a sabbiosi cementati e ghiaiosi, intercalati da sottili orizzonti di limi e argille, più abbondanti verso meridione e localmente assenti. Nel complesso è abbastanza continuo nei settori meridionali della Bassa Pianura dove , a tratti, si divide in due livelli permeabili: "F_{alto}" e "F_{basso}". Il tetto del sistema si trova tra -190 m s.l.m.m. in corrispondenza del monfalconese, -200 m s.l.m.m. lungo la Fascia delle Risorgive nel pordenonese e -240/-250 m s.l.m.m. nell'area di Latisana. La profondità del tetto varia quindi da -190 a -260 m dal piano campagna. Lo spessore medio del sistema (tetto "F_{alto}" - letto "F_{basso}") è di circa 17 m. Le sue acque raggiungono temperature massime di 34°C nelle aree della Laguna di Grado e Marano e sono quindi di interesse geotermico.
- Sistema di acquiferi "G": il tetto si approfondisce da est verso ovest, passando da -250 m s.l.m.m. nei pressi di Grado, fino ad oltre -300 m s.l.m.m. nella zona di Latisana. La profondità del tetto varia quindi da -250 a -310 m da piano campagna. Il sistema interessa intervalli sabbiosi, talvolta cementati o debolmente ghiaiosi. A est di Grado si chiude sulle propaggini del substrato roccioso lungo l'Isonzo. Il suo spessore medio è di 11 m. Le acque di questo sistema sono di interesse geotermico, raggiungendo temperature di poco superiori a 25°C nell'area fra Marano e Latisana e massime di 35°C nella Laguna di Grado.
- Sistema di acquiferi "H": si tratta di un sistema composito, in cui si riconoscono due livelli permeabili principali ben distinti: "H_{alto}" e "H_{basso}". Il tetto del sistema "H_{alto}" è rinvenibile a profondità di -320 m s.l.m.m. nella Laguna di Grado e -370 m s.l.m.m. nei pressi di Latisana e tra Pasiano di Pordenone e Brugnera. La profondità del tetto varia quindi da -320 m a -390 m dal piano campagna. Il tetto del livello "H_{basso}" va da -380 m s.l.m.m. nei pressi di Marano a -420 m s.l.m.m. nei pressi di Latisana. La profondità del

tetto varia quindi da -360 a -420 m dal piano campagna. Il sistema di acquiferi è posto al di sotto di un acquitardo argilloso-limoso con spessore medio di 80 m ed interessa alcuni intervalli sabbiosi, sabbioso ghiaiosi, talvolta debolmente cementati. I livelli "H_{alto}" e "H_{basso}" hanno rispettivamente uno spessore medio di 13 e 15 m. Questo sistema è il più esteso e utilizzato fra quelli di interesse geotermico, presentando buone caratteristiche idrauliche e termiche, con temperature oltre i 35°C nell'area tra Latisana e Precenicco.

- Sistema di acquiferi "I+L+M": questi sistemi di acquiferi profondi sono contenuti in orizzonti porosi, di potenza ed estensione variabili, sicuramente intercalati nelle formazioni di età miocenica costituenti il basamento prequaternario. Questi sistemi di acquiferi sono raggiunti da pochi pozzi e le informazioni su di essi sono quindi ancora limitate. Non è stata accertata la continuità idraulica laterale fra gli orizzonti riconosciuti nel sottosuolo del pordenonese e quelli del basso Tagliamento. In quest'ultima area i sistemi sono caratterizzati da acque termali con alto contenuto in soluti e temperature superiori ai 35°C. Le acque dei sistemi "I" ed "L" raggiungono temperature superiori ai 35°C nella zona di Pertegada-Isola Picchi-Aprilia Marittima, mentre l'aquifero "M" supera i 45°C nell'area circostante Aprilia Marittima. Il sistema di acquiferi "I" interessa livelli prevalentemente sabbiosi, talvolta sabbioso-ghiaiosi, debolmente cementati nelle Molasse Mioceniche. È lenticolare e discontinuo, ma particolarmente permeabile con corpi dello spessore variabile tra 5 e 20 m e ha il tetto tra -450 m e -470 m s.l.m.m.. Il sistema di acquiferi "L" è localizzato in un intervallo di arenarie poco cementate o di sabbie cementate del Tortoniano ed ha spessore variabile da 10 a 30 m. Il tetto è posto con buona continuità lungo l'asta fluviale del Fiume Tagliamento, a profondità da -500 fino a -540 m s.l.m.m.. Il sistema di acquiferi "M" è contenuto in orizzonti permeabili per fratturazione, appartenenti alla successione arenacea del Miocene Superiore. Nell'area veneto-orientale, in Destra Tagliamento, il tetto del sistema può essere posto a profondità superiori a -590 m s.l.m.m. [*Zini et al.*, 2011].

Tale situazione schematica non è sempre riscontrabile, in quanto le caratteristiche litostratigrafiche mutano sia arealmente che verticalmente. Gli 11 sistemi di acquiferi riconosciuti non sono quindi falde uniformi e continue, ma spesso contenute in acquiferi che variano in spessore e profondità, oltre che in litologia. Inoltre in alcuni casi bisogna considerare la possibilità di locali interconnessioni fra le falde a causa della non completa impermeabilità di alcuni acquicludi [*Zini et al.*, 2008; *Zini et al.*, 2011].

Non si hanno molte informazioni sulle caratteristiche idrogeologiche dei materiali costituenti gli acquiferi e gli acquitardi. Prove di laboratorio su campioni prelevati negli orizzonti produttivi indicano valori di permeabilità di 10^{-5}-10^{-6} m/s, cioè di alcuni ordini di grandezza inferiori a quelli relativi ai livelli prettamente ghiaiosi. Misure di permeabilità effettuate su alcuni campioni argilloso-limosi prelevati in profondità mostrano valori di 10^{-10}-10^{-11} m/s che indicano la loro sostanziale impermeabilità [*Zini et al*., 2008].

1.2 La Piana Isontina

La Piana Isontina rappresenta il lembo più orientale della Pianura Friulana e presenta quindi caratteristiche genetiche ed idrogeologiche analoghe a quest'ultima. Essa è costituita per la quasi totalità dai depositi alluvionali quaternari dei corsi d'acqua Torre, Judrio, Versa ed Isonzo. Questi corsi d'acqua al loro sbocco in pianura hanno deposto materiali molto grossolani e verso valle sedimenti via via più fini, portando così alla formazione di due zone distinte per caratteristiche granulometriche e di permeabilità dei depositi:

- L'Alta Pianura a monte della Fascia delle Risorgive, limitata a nord dalle colline del Collio e a sud dall'Altopiano carsico, costituita da materiali prevalentemente grossolani e molto permeabili;
- La Bassa Pianura, a valle della Fascia delle Risorgive, limitata ad est dall'Altopiano del Carso e a sud dal mare, costituita da materiali prevalentemente argillosi o sabbioso-argillosi, la cui permeabilità è molto bassa o nulla.

Alta e Bassa Pianura sono separate dalla Fascia delle Risorgive che ha un andamento generale da NO a SE. Lungo questa fascia affiorano le acque freatiche dell'Alta Pianura che si innalzano progressivamente verso valle per la diminuzione di permeabilità del mezzo filtrante in seguito alla già citata diminuzione della granulometria dei depositi alluvionali. L'affioramento di queste acque è anche favorito dall'emersione, lungo la zona delle Risorgive, di orizzonti argillosi impermeabili che a monte sostenevano le acque freatiche [*Cucchi et al.*, 2002; *Stefanini and Cucchi*, 1976].

Tutti i fiumi montani disperdono durante il loro percorso una grande quantità d'acqua nell'Alta Pianura. Queste perdite di subalveo e laterali sono talmente elevate che alcuni fiumi, come il Torre e lo Judrio, rimangono per la maggior parte dell'anno senza portate liquide. Queste acque d'infiltrazione, unitamente a quelle piovane, a quelle di ruscellamento dei rilievi collinari e a quelle provenienti per via sotterranea dalle masse rocciose vanno a costituire la falda freatica dell'Alta Pianura. Verso valle si innestano da sud nell'Alta Pianura delle estese lenti argillose che, nella Bassa Pianura, portano all'instaurarsi di un complesso multifalda con una sequenza di sistemi di acquiferi sovrapposti, confinati o semiconfinati [*Cucchi et al.*, 2002; *Stefanini and Cucchi*, 1976; *Vatta*, 1992].

A monte della Fascia delle Risorgive sono presenti anche alcune falde artesiane o pseudoartesiane molto profonde (fino a 200 m dal piano campagna in località San Pier d'Isonzo) che ricevono contributi del vicino massiccio calcareo carsificato del Carso isontino. Questa condizione si manifesta nelle aree di emungimento dell'acquedotto di Gorizia, dove si rinvengono acque localmente in pressione per la presenza di conglomerati intercalati nelle alluvioni sciolte, e di quello di Trieste i cui pozzi in località San Pier d'Isonzo prelevano in profondità da falde artesiane confinate tra orizzonti argillosi [*Cucchi et al.*, 2002].

I rilievi collinari settentrionali sono costituiti da flysch marnoso-arenaceo, quelli del Carso da calcari intensamente carsificati. Il materasso alluvionale poggia su calcari o su torbiditi silico-clastiche e nella zona apicale presenta spessori notevoli (tra 50 e 80 m); lungo l'allineamento Mariano del Friuli –

Soleschiano si registrano le massime potenze (200-300 m), con depositi ghiaiosi che raggiungono il basamento.

Il basamento si approfondisce progressivamente e regolarmente da nord a sud e verso la costa il substrato si rinviene a profondità di 250 m [*Nicolich et al*., 2004]. Indagini geofisiche hanno permesso di identificare una profonda incisione del basamento roccioso (fino a 300-400 m dal piano campagna), ubicata in corrispondenza del margine orientale sepolto dell'altopiano carsico. Essa assume i caratteri di forra nel tratto tra il Carso isontino e il rilievo di Medea [*Berlasso and Cucchi*, 1991; *Cucchi et al.*, 2002]. Il substrato calcareo affiora dalla coltre alluvionale nel colle di Medea e a Gradisca, mentre nel Colle del Castello di Gorizia e presso Farra il substrato affiorante è in facies di flysch (Figura 1.5) [*Cucchi et al.*, 2002; *Stefanini and Cucchi*, 1976; *Vatta*, 1992].

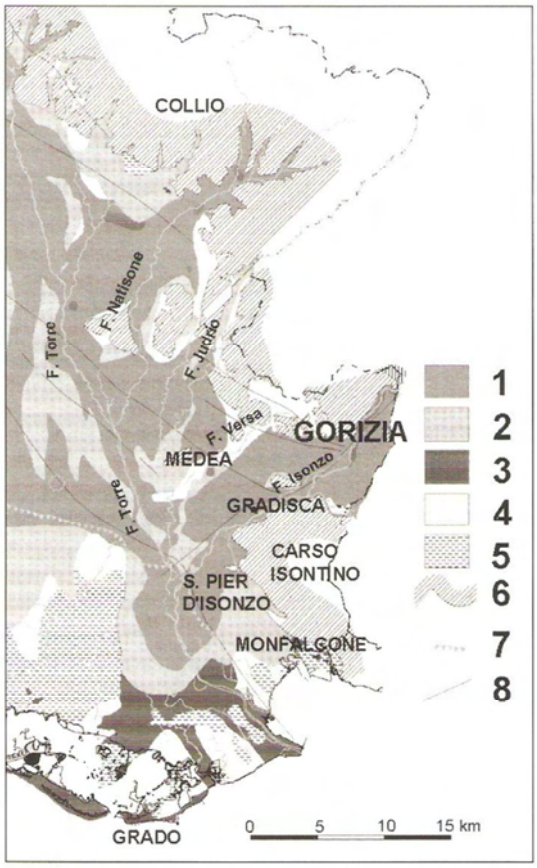


Figura 1.5: Carta geolitologica della Piana Isontina: 1) depositi di pianura prevalentemente ghiaiosi, 2) depositi di pianura prevelentemente ghiaioso-sabbiosi, 3) depositi di pianura prevalentemente sabbiosi, 4) depositi di pianura prevalentemente sabbioso-limosi, 5) depositi di pianura prevalentemente limoso-argillosi, 6) limite dei rilievi, 7) Linea delle Risorgive, 8)faglie. (da Cucchi *et al.*, 2002)

1.3 I corsi d'acqua principali della Piana Isontina

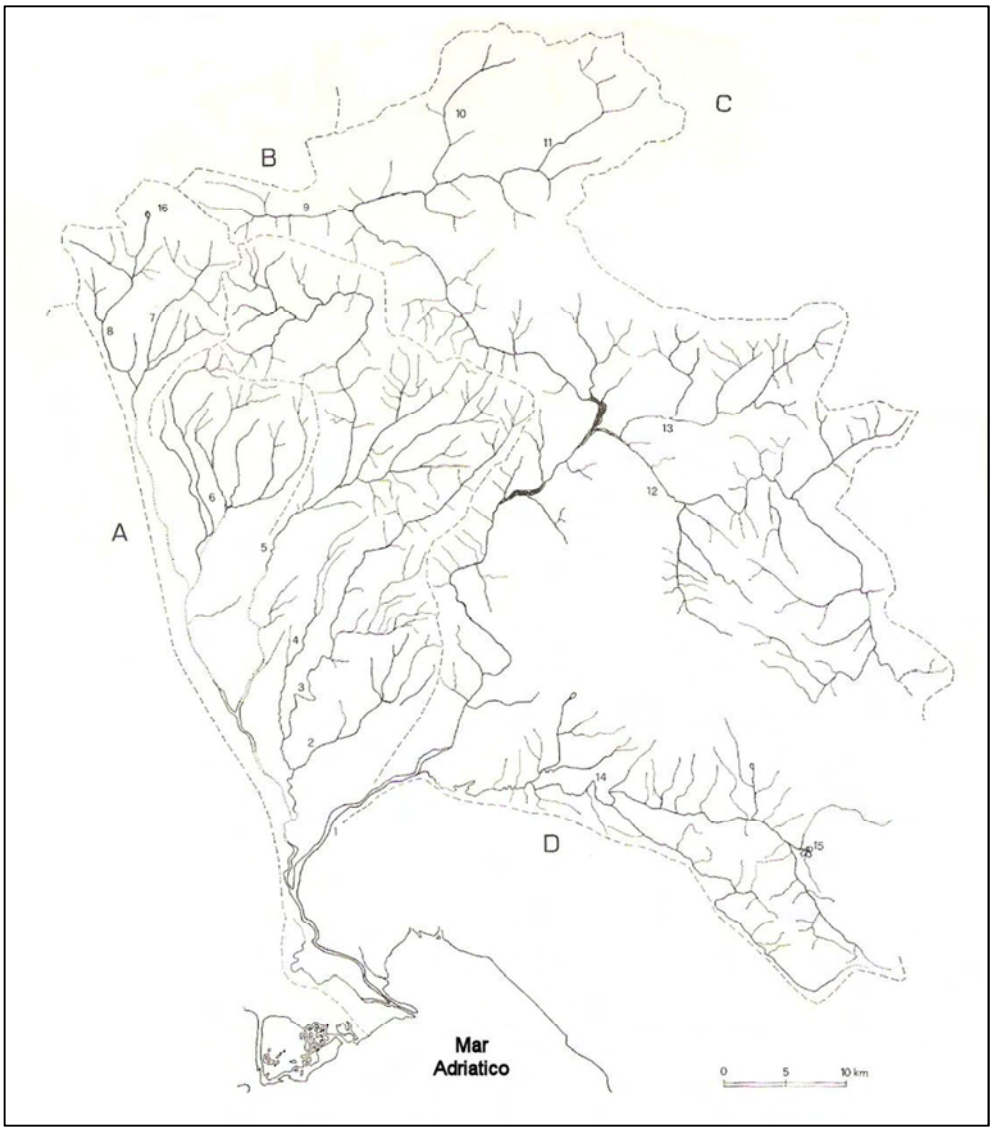


Figura 1.6: Il bacino dell'Isonzo e i bacini adiacenti con lo sviluppo del reticolo idrografico. Corsi 2-8: bacino del Torre-Natisone e corsi minori (5 Natisone). Corsi 1-11: corso dell'Isonzo. Corso 14: Vipacco. Corsi 12-13: Idria e Bacia. 15: sorgenti del Vipacco. 16: sorgenti del Torre di Tanaviele. (da Mosetti, 1983)

L'Isonzo

L'Isonzo è il più importante corso d'acqua della Piana Isontina, nasce a 1100 m d'altitudine sulle Alpi Giulie e scorre per i due terzi della sua lunghezza (136 km) in territorio sloveno. Il bacino dell'Isonzo (compresi i bacini del Torre e Natisone) ha una superficie di circa 3300 km^2 sulla sezione di Pieris (Figura 1.6). Il fiume ha una portata media di circa 100 m^3/s presso Gorizia, allo sbocco in

pianura, e di 150 m^3/s alla foce. Il corso del fiume presenta due tratti distinti: il tratto montano di alimentazione, dalle sorgenti al Confine di Stato, interamente in territorio sloveno, ed il tratto di pianura, prevalentemente di dispersione ed alluvionamento. In quest'ultimo tratto, a causa di movimenti tettonici, si sono succedute fasi deposizionali e fasi erosive che hanno interessato le alluvioni preesistenti e, localmente, il substrato pre-Quaternario [*Gratton*, 2000; *Mosetti*, 1983; *Vatta*, 1992].

L'Isonzo è un fiume dal comportamento particolare, sia per gli apporti che vi giungono, sia per le perdite che subisce; questo comportamento è riconducibile alla storia geologica del fiume, che in epoche differenti si è impostato in posizioni diverse. Sotto la copertura ghiaiosa e conglomeratica che costituisce la Piana Isontina si trova l'antica valle scavata nelle arenarie del flysch dal Paleoisonzo. Secondo alcuni autori il fiume, uscito dallo sbocco di Salcano, deviava verso est, con un corso completamente diverso dall'attuale, scendendo direttamente verso sud, in direzione del vallone di Doberdò. Man mano che la piana di Gorizia è stata riempita dalle alluvioni, l'Isonzo ha deviato il suo corso sempre più verso la sua Destra idrografica [*Gratton*, 2000; *Mosetti*, 1983].

Attualmente l'Isonzo dalle pendici SO del Monte Calvario attraversa diagonalmente la Piana Isontina, verso Farra e il Carso, e ai piedi di questo riceve il suo maggior affluente, il Vipacco. Fino al Confine di Stato l'Isonzo scorre incassato nella sua valle montana, presentando perdite ma anche rialimentazioni e raggiungendo dunque un certo equilibrio. Quando, all'altezza di Gorizia, inizia il suo corso di pianura nel letto costituito da alluvioni molto permeabili, il fiume subisce notevoli perdite (valutate in media sui 20 m^3/s, ma forse superiori a 30 m^3/s). Per un tratto l'Isonzo costeggia il Carso con la sua riva sinistra e presenta dei rapporti, probabilmente tributari, con la falda carsica, quindi, dopo esser stato alimentato dalle Risorgive, sfocia nel Mar Adriatico presso Monfalcone [*Mosetti*, 1983].

Giunto in pianura l'Isonzo subisce anche successive sottrazioni di acqua per derivazioni irrigue, tra cui le più importanti sono la più antica derivazione

prodotta dal canale de Dottori con le prese di Sagrado e la derivazione degli anni ’60 per il Consorzio Cormonese-Gradiscano [*Mosetti*, 1983].

È da segnalare la presenza in territorio sloveno di sbarramenti per la produzione di energia idroelettrica. Essi non producono modificazioni nei valori di portata media annua dell’Isonzo, poiché le acque ritornano in alveo dopo aver fornito l’energia di caduta, ma, essendo la produzione di energia modulata con ritmicità diurna, provocano una sensibile variazione giornaliera (e anche tra le diverse ore del giorno) delle portate disponibili [*Mosetti*, 1983].

Il Vipacco

Il Vipacco è il maggior affluente dell’Isonzo, ha origine in Slovenia da grandi risorgive carsiche, alimentate dal massiccio calcareo Selva di Piro – Monte Nanos. Scorre in senso circa EO per una trentina di km in linea d’aria e riceve gli apporti di diversi torrenti di origine carsica. Il Vipacco è un corso d’acqua praticamente privo di perdite di subalveo poiché scorre su un letto impermeabile costituito da alluvioni argillose o argilloso-sabbiose e, in parte, da flysch. È un corso d’acqua di medie dimensioni, la sua portata media è di circa 37 m^3/s (all’idrometro di Miren), non trascurabile quindi rispetto a quella dell’Isonzo a Gorizia. Il Vipacco presenta un regime abbastanza variabile, con minime di portata che si aggirano attorno ad appena $1m^3/s$, a causa delle forti oscillazioni delle sue sorgenti carsiche, e massime di portata che possono raggiungere anche 437 m^3/s (a Miren), come durante l’importante piena del 18 ottobre del 2010 [*Gratton*, 2000; *Mosetti*, 1983].

L’Idria

L’Idria è un altro affluente molto importante dell’Isonzo, che attualmente scorre per il suo intero corso in territorio sloveno e che un tempo forse costituiva l’Isonzo stesso. Le sue portate medie sono stimate in 30 m^3/s, minori rispetto a quelle del Vipacco [*Mosetti*, 1983].

Il Torre

Il bacino del Torre viene diviso in due parti sostanzialmente differenti: il bacino a monte della stretta di Zompitta, che si estende su 160 km^2, ed il bacino a valle di questa, in pianura, dove la presenza di depositi molto permeabili determina la totale infiltrazione delle acque per gran parte dell'anno. A monte si trovano le due aste fluviali principali, del Torre e del Cornappo, che ricevono vari tributari. Il Torre è alimentato dalla singola sorgente di Tanaviele, con oltre 500 l/s, e riceve lungo il suo corso discreti contributi dagli affluenti, mentre il Cornappo ha origine da numerose sorgenti relativamente modeste ed è successivamente alimentato da una rete capillare di affluenti. Il corso d'acqua nasce ai piedi dei Monti Musi, da sedimenti grossolani fluvio-glaciali di natura calcareo-dolomitica, molto permeabili. Nella parte alta il Torre scende verso sud attraverso una forra fortemente incisa nelle formazioni calcaree e calcareo-dolomitiche del Gran Monte. Più a valle il Torre scorre sul substrato marnoso-arenaceo fino allo sbocco a Tarcento, dove fluisce su un potente manto alluvionale. A valle di Tarcento il Torre attuale mostra un corso differente dal vecchio alveo preglaciale, che si dirigeva verso SO, poiché bloccato dalle morene del ghiaccio del Tagliamento, è stato spinto verso SE. A valle della piana di Nimis e prima di raggiungere la stretta di Zompitta, il Torre riceve le acque del Cornappo. A valle di Zompitta la pianura è solcata dall'alveo frequentemente secco del Torre. Nel suo tratto pianeggiante, il Torre riceve altri affluenti, tra cui il Malina, il Natisone e lo Judrio [*Gratton*, 2000; *Mosetti*, 1983; *Vatta*, 1992].

Il Natisone

Il fiume Natisone ha un bacino con una superficie di 322 km^2, molto più esteso di quello adiacente del Torre. Esso si divide in una porzione a monte di Cividale, che occupa una superficie di 286 km^2, ed una porzione a valle, fino a Trivignano. Le massime piene registrate si aggirano attorno ai 1600 m^3/s. Il Natisone nasce in territorio italiano dalle falde sud-orientali del Monte Maggiore e presenta inizialmente un carattere nettamente torrentizio, scorrendo in un terreno molto accidentato, tortuoso, in valli profondamente incise, in depositi

prevalentemente marnosi ma con la presenza sporadica di calcari. A qualche km dalla sorgente il Natisone passa in territorio sloveno e vi scorre fino alla Sella di Caporetto, dove, a causa di un fenomeno di cattura, devia verso sud, passando per la gola di Stupizza e ritornando in territorio italiano. Da qui il corso d'acqua scorre incassato tra i calcari del Monte Matajur a est e del Monte Mia a ovest, per poi attraversare la vasta zona arenacea di San Pietro al Natisone. Da questa zona riceve alcuni grossi affluenti, tra cui l'Alberone e l'Erbezzo. Giunto a Cividale il Natisone si affossa in una caratteristica forra di formazione relativamente recente e probilmente legata anche a cambiamenti del corso del fiume a valle. Nel pianoro di Cividale il fiume scorre su ghiaie di spessore ridotto, sotto le quali si trova una coltre di conglomerato spessa una decina di metri che poggia sul sottostante basamento arenaceo. Questa situazione è caratteristica della zona orientale del Friuli [*Gratton*, 2000; *Mosetti*, 1983; *Vatta*, 1992].

Il Malina e lo Judrio

I bacini dei torrenti Malina e Judrio raccolgono le acque di tutti i rii ed i torrenti che scendono dalla zona collinare arenacea del Friuli orientale, compresa tra il Torre e l'Isonzo. Il Malina presenta un bacino di circa 157 km^2, fino alla confluenza con il Torre a Pradamano, e si colloca tra Torre e Natisone. Nel suo bacino attorno ad Attimis si presenta una zona quasi pianeggiante con un manto alluvionale, ma più a valle il torrente Malina abbandona le alluvioni, scavandosi il letto nel flysch. Qundi, dopo un tratto di percorso su argille colluviali, il Malina entra nelle alluvioni ghiaiose e, all'altezza di Povoletto, si perde per assorbimento. Lo Judrio, tra Natisone ed Isonzo, ha un bacino lungo una trentina di km nei colli del flysch del Friuli orientale, che si sviluppa su una superificie di circa 106 km^2 fino allo sbocco di S. Andrat. Esso riceve, per un lungo tratto, solo piccoli rii dai versanti, ma verso la fine del suo corso vi confluisce il Cosbana, ampio torrente che, con alcuni rami affluenti, drena tutta la parte settentrionale e occidentale del Collio goriziano [*Gratton*, 2000; *Mosetti*, 1983; *Vatta*, 1992].

2 REGIME DEI CORSI D'ACQUA E DELLE FALDE

I corsi d'acqua della Regione presentano un regime tipicamente torrentizio, tranne quelli della Bassa Pianura alimentati da risorgive, nelle quali le fluttuazioni di portata sono abbastanza livellate [*Mosetti*, 1983].

Le fluttuazioni di portata dei corsi d'acqua, delle sorgenti e della falda sono essenzialmente dettate dal regime delle piogge. La precipitazione media annua può essere stimata in 1406 mm/anno sull'Alta Pianura e in 1109 mm/anno sulla Bassa Pianura [*Martelli and Granati*, 2007]. La piovosità presenta un andamento variabile, con fluttuazioni stagionali di periodi attorno a 6, 8.5 e 12 mesi. In media si riconoscono due massimi e due minimi annui, con posizione ed ampiezza variabile. Generalmente il primo massimo si riscontra nel periodo autunnale ottobre-novembre, mentre il secondo nel periodo primaverile aprile-giugno. Questa situazione, da un anno all'altro, può presentarsi modificata da episodi occasionali e locali. Fluttuazioni a più lungo periodo ed episodi eccezionali determinano occasionalmente apporti anomali che possono portare ad eventi di piena anche rilevanti nei corsi d'acqua superficiali e, a volte, fenomeni di emergenza della falda [*Mosetti*, 1983].

Osservando un diagramma illustrante il livello di un fiume nel corso dell'anno, si nota il tipico andamento generale con due massimi relativi autunnale e primaverile, ma anche la presenza di piene minori. Si nota inoltre che il ramo ascendente della curva di piena sale molto rapidamente, a causa dei brevissimi tempi di corrivazione, mentre si esaurisce più lentamente poiché lo scarico è più lento [*Mosetti*, 1983].

Un analogo comportamento si riscontra in genere nelle falde, con una livellazione più o meno marcata degli apporti. Nelle falde freatiche ad un aumento degli apporti corrisponde un innalzamento del livello, mentre ad una loro diminuzione corrisponde un abbassamento del livello. Nelle falde artesiane il livello non varia con l'alimentazione, cambia invece la pressione interna della

falda: a seconda delle differenti condizioni di alimentazione e della differente permeabilità, più falde artesiane sovrapposte possono presentare pressioni differenti. Nelle falde freatiche si riscontrano escursioni di diversa entità, che possono arrivare ad una decina di metri nella fascia più settentrionale e che decrescono verso la Linea delle Risorgive a 4-5 m. Il diagramma dei livelli di falda mostra un profilo più smussato rispetto a quello fluviale poiché le oscillazioni più rapide appaiono smorzate rispetto a quelle di più lungo periodo [*Mosetti*, 1983].

Le falde freatiche della pianura in Sinistra Tagliamento, e quindi anche la falda isontina, mostrano un tipico andamento del livello con due marcati massimi annuali, un po' sfalsati rispetto a quelli della piovosità e registrati nei fiumi: due massimi in aprile-maggio e ottobre-dicembre, alternati ai minimi in gennaio-febbraio e agosto-settembre [*Mosetti*, 1983]. Vi è infatti un'analogia strettissima tra il regime fluviale e il regime della falda: ad ogni fase di piena o di magra dei deflussi superficiali corrisponde una fase simile nell'acquifero sotterraneo, con uno sfalsamento dell'ordine del mese [*Zini et al.*, 2008]. I processi di alimentazione della falda freatica dipendono in maniera determinante dalle perdite per dispersione laterale in subalveo dei corsi d'acqua che attraversano l'Alta Pianura, mentre le precipitazioni efficaci rivestono un ruolo più modesto. Inoltre sono certamente importanti gli apporti provenienti dalle falde profonde individuate nei conglomerati al di sotto dell'Anfiteatro morenico [*Cucchi et al.*, 1999a; *Cucchi et al.*, 2008; *Martelli and Granati*, 2007; *Zini et al.*, 2008].

L'acquifero freatico alimenta a sua volta l'acquifero multifalda della Bassa Pianura, che per la sua struttura si presenta privo di vie di ricarica verticali. La portata totale in uscita dal sistema freatico dell'Alta Pianura tra i fiumi Tagliamento e Isonzo è stata quantificata in circa 106 m^3/s. Rapportando questo dato all'infiltrazione efficace, pari a 26.6 m^3/s, si può capire come l'alimentazione della falda freatica dell'Alta Pianura provenga solo per il 25% dalle precipitazioni e per il restante 75% dalle perdite di subalveo dei corsi d'acqua [*Martelli and Granati*, 2007].

Attualmente si riscontra una fase di generale abbassamento del livello di falda, con valori estremi nella fascia a ridosso dei rilievi (fino a 12 m), a causa della minor piovosità registrata nell'ultimo trentennio, del maggior sfruttamento della falda freatica per scopi domestici, agricoli ed industriali, dell'eccessivo sfruttamento delle falde artesiane a valle delle Risorgive e dell'intenso utilizzo per scopi irrigui ed idroelettrici delle acque montane [*Cucchi et al.*, 1999a; *Zini et al.*, 2008].

I livelli aquiferi infatti sono intensamente sfruttati per uso agricolo e, soprattutto nella Bassa Pianura, per uso civile ed ittiogenico. Tale sfruttamento ha provocato negli ultimi 45 anni un lento ma costante abbassamento dei livelli freatimetrici nell'Alta Pianura con velocità media calcolata di 10 cm/anno ed una perdita di pressione delle falde confinate più superficiali (sistemi "A" e "B") della Bassa Pianura [*Martelli and Granati*, 2006; 2007]. Il prelievo totale gravante sull'intero sistema acquifero è stato stimato in circa 901 Mm^3/anno [*Zini et al.*, 2011].

3 LA FALDA FREATICA DELLA PIANA ISONTINA

Lo studio si è incentrato principalmente sulla falda freatica nella Piana Isontina in territorio italiano e sloveno, al fine di ricostruirne l'andamento e la variazione nel tempo. Diversi studi si sono occupati precedentemente della caratterizzazione dell'acquifero freatico dell'Alta Pianura goriziana, ma mai facendo riferimento anche alla sua porzione oltre confine. Nel presente capitolo si fornisce una breve descrizione e un commento dei lavori più significativi.

Stefanini e Cucchi (1976) eseguono una ricostruzione delle isofreatiche in metri s.l.m.m. (Fig. 3.1) in base ai valori di livello freatico registrati in alcuni pozzi al momento delle perforazioni.

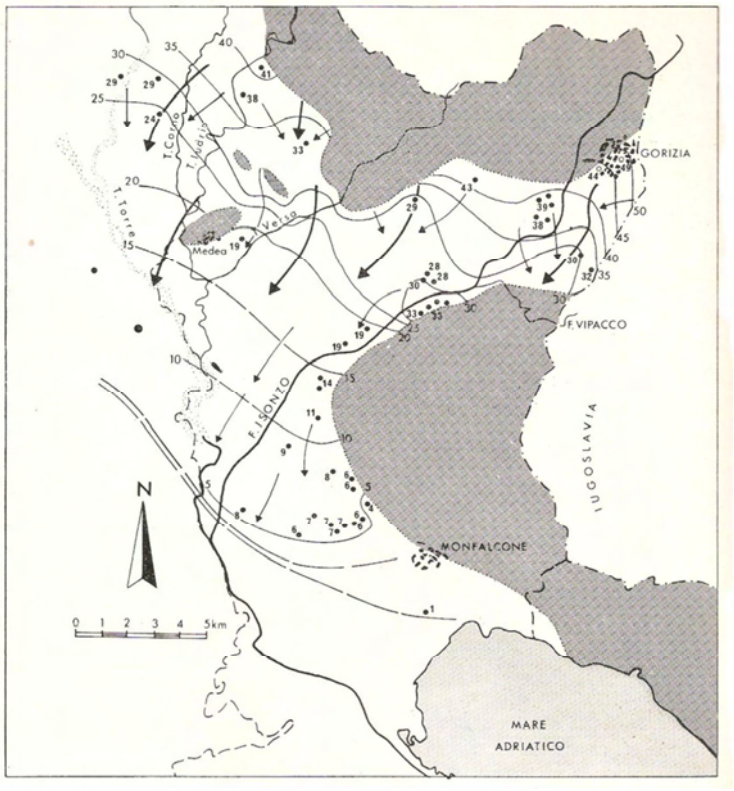


Figura 3.1: Carta delle isofreatiche in metri s.l.m.m. della provincia di Gorizia, ricavata dai dati di soggiacenza al momento della perforazione dei pozzi (indicati in figura con il pallino nero). I dati si riferiscono a perforazioni eseguite in anni diversi ed in periodi dell'anno differenti. Le isofreatiche sono tracciate ogni 5 m. (da Stefanini & Cucchi, 1976)

Questa ricostruzione è una forte approssimazione della situazione reale in quanto si correlano dati registrati in anni differenti ed in condizioni idrodinamiche disomogenee. La carta realizzata fornisce comunque una visione d'insieme dell'andamento delle isofreatiche, sufficiente per individuare le direzioni preferenziali di deflusso sotterraneo. Come si nota le isofreatiche presentano un andamento generale da NO a SE, ad indicare una circolazione delle acque sotterranee prevalentemente da NE verso SO. Nella zona attorno alle alture di Medea, la presenza nel sottosuolo di una soglia rocciosa ostacola il libero deflusso verso SE delle acque di infiltrazione del Torre, del Corno e dello Judrio, costringendole a defluire solo attraverso i suo varchi. Nella zona a SO di Gorizia l'andamento delle isofreatiche indica un deflusso generale verso SO, con acque provenienti direttamente dall'Isonzo e da Est, dalle alture vicine.

Dall'analisi di questa ricostruzione risulta quindi evidente che le acque della falda freatica della provincia di Gorizia provengono prevalentemente dalle perdite di subalveo e laterali dei torrenti Torre, Corno, Judrio, Versa e del Fiume Isonzo [*Stefanini*, 1978; *Stefanini and Cucchi*, 1976].

Una visione d'insieme dell'andamento della superficie freatica viene fornita anche da Mosetti [*Mosetti and Mosetti Albrecht*, 1985] in una carta delle isofreatiche (Figura 3.2), costruita sulla base dei valori medi annui del livello di falda. Anche in questo caso le isofreatiche presentano un'orientazione generale NO-SE, indicando una direzione principale di deflusso sotterraneo da NE verso SO. Inoltre, osservando la carta si individuano immediatamente le zone di drenaggio delle acque:

- Alla confluenza dell'Isonzo col Vipacco, a sud di Gorizia, le isolinee presentano un andamento concavo verso SO, indicando un deflusso delle acque di falda verso il Carso;
- Nella zona di Sagrado-Gradisca l'addensamento delle linee di flusso testimonia un'alimentazione da Sinistra Isonzo;
- Nei pressi di Aiello l'andamento delle isofreatiche indica un'importante drenaggio di acque sotterranee, indizio di una probabile influenza del Natisone;

- Nella zona di San Canzian d'Isonzo-Ronchi dei Legionari le linee di flusso convergono verso l'area di Monfalcone [*Mosetti and Mosetti Albrecht*, 1985].

Anche questa ricostruzione evidenzia l'importante alimentazione dell'acquifero freatico derivante dalle dispersioni dei corsi d'acqua che la attraversano, e mette in luce inoltre un significativo apporto derivante dalle zone collinari del Collio e di Montevecchio (Stara Gora), in Slovenia.

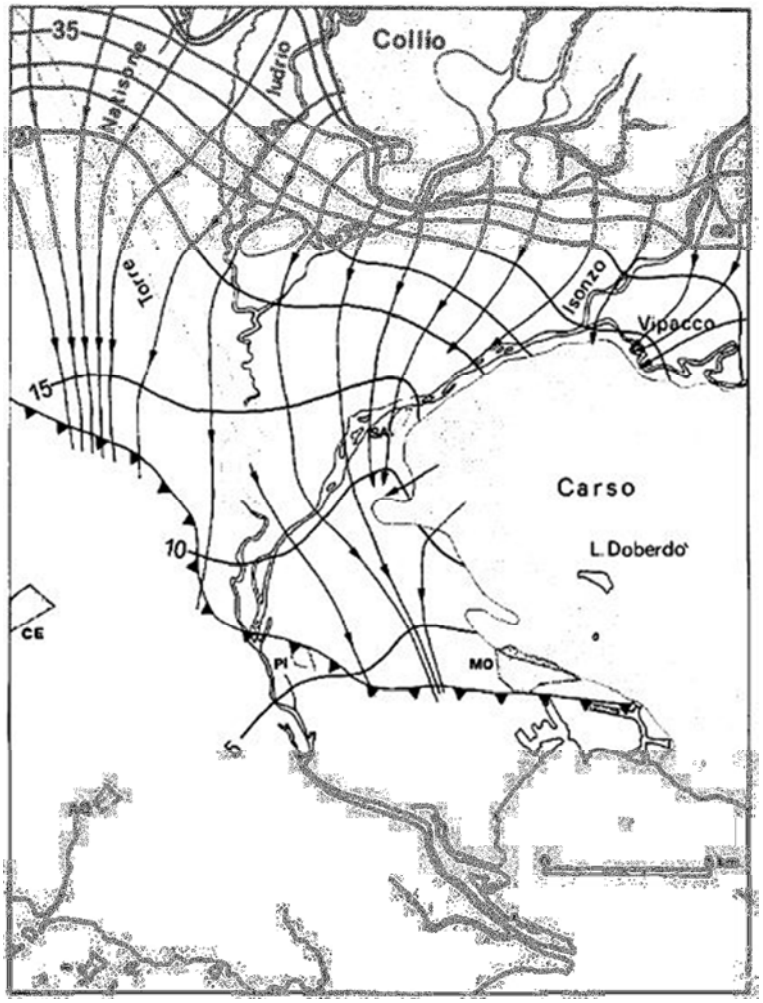


Figura 3.2: Carta delle isofreatiche in metri s.l.m.m. della regione isontina. Le isolinee sono tracciate ogni 5 m, sulla base dei valori medi annui di livello di falda. Sono indicate inoltre la linea media delle Risorgive (linea continua con i triangoli) e le linee di flusso, perpendicolari alle isofreatiche. (da Mosetti & Mosetti Albrecht, 1985)

In uno studio del 1992 [*Vatta*, 1992] è stato ricostruito l'andamento delle isofreatiche, a partire dai dati dei livelli di falda relativi al periodo 1985-1990, per 40 pozzi situati nella Piana Isontina. I dati utilizzati per il tracciamento delle

isofreatiche derivano da una media aritmetica complessiva, calcolata sui livelli medi annui (in metri s.l.m.m.) relativi ad ogni pozzo. Le isofreatiche sono state ottenute tramite interpolazione per triangolazione lineare (Figura 3.3).

Da questa ricostruzione si può notare come gli apporti principali che alimentano la Piana Isontina siano costituiti dalle perdite dell'Isonzo e del Natisone. L'andamento generale di deflusso sotterraneo è da NE verso SO, dalla Piana goriziana e dalle zone adiacenti l'acqua fluisce verso SO e Ovest. Nelle zone di Gorizia, Medea e San Pier d'Isonzo, le isofreatiche assumono una configurazione convessa, con linee di flusso convergenti, ad indicare fenomeni di drenaggio. A Sud di Gorizia l'andamento delle isofreatiche suggerisce una probabile cessione d'acqua da parte della falda ai calcari, in corrispondenza dell'estremità settentrionale del Carso Goriziano, nella zona di Rubbia e forse anche ad Est di Gradisca. Nella zona a SE di Gorizia, al confine con la Slovenia, le isofreatiche presentano dapprima un andamento est-ovest, quindi, a sud di Šempeter, ruotano leggermente, assumendo un'orientazione parallela al Torrente Vrtojbiča, indicando un deflusso delle acque verso l'area di Miren. Le isofreatiche presentano valori di livello maggiori nella zona di Gorizia, attorno ai 50 m s.l.m.m., per poi diminuire nei pressi di Gradisca a circa 25 m s.l.m.m. e raggiungere pochi metri a ridosso delle Risorgive [*Vatta*, 1992].

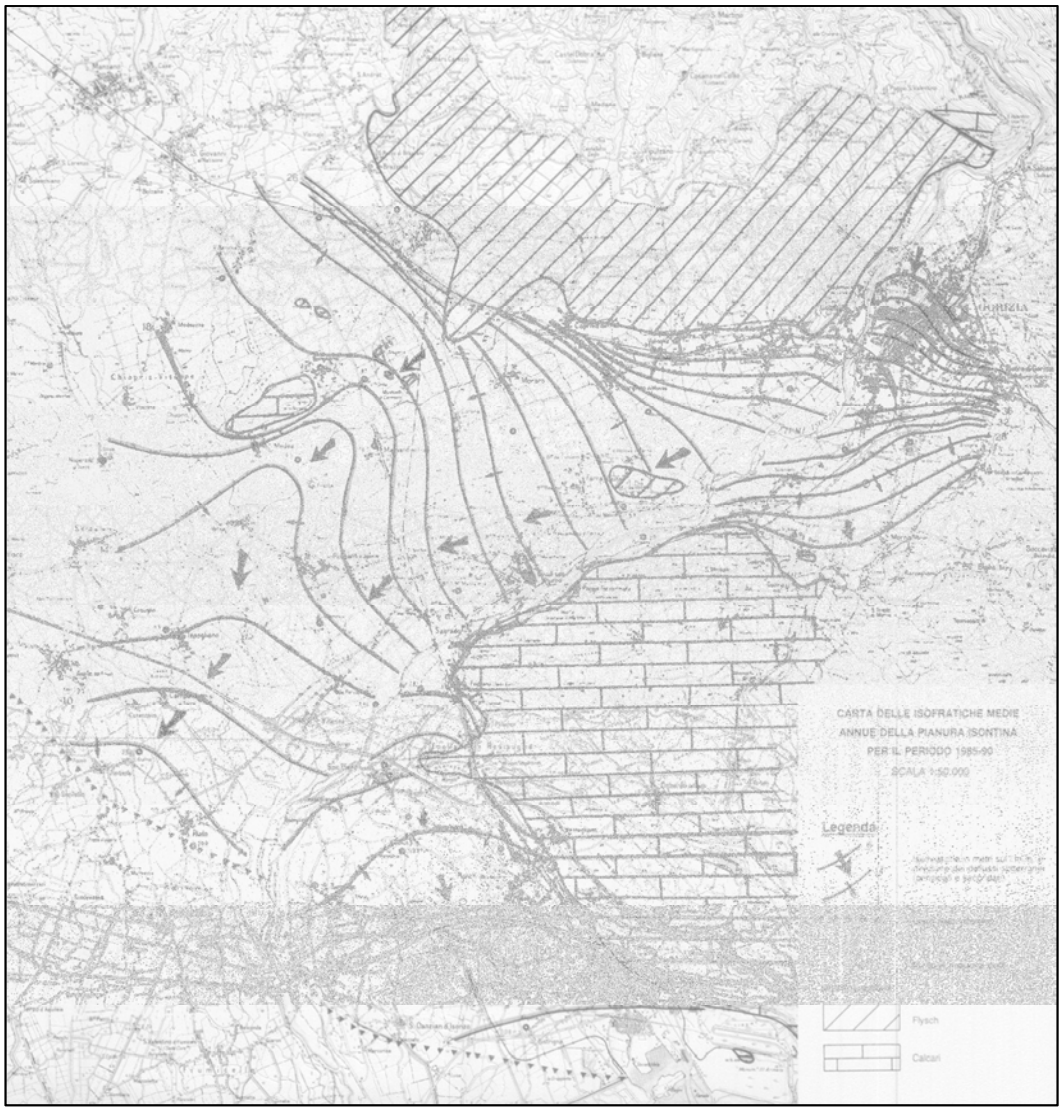


Figura 3.3: Carta delle isofreatiche medie annue (tracciate ogni 2 m) della Pianura Isontina per il periodo 1985-1990. (da Vatta, 1992). Qui si riporta solo uno stralcio della carta originale costruita in scala 1:50000.

Anche questa ricostruzione rappresenta una semplificazione della situazione reale, poiché costruita su valori medi annui su base quinquennale. Può costituire però un interessante mezzo di confronto per i risultati ottenuti in questo lavoro di tesi, poiché molti dei pozzi qui considerati sono gli stessi che sono stati monitorati in campagna.

È in genere più rappresentativo descrivere la falda freatica definendo le condizioni presenti al momento delle misure, potendo così riprodurre una condizione istantanea e valutare l'evoluzione della superficie freatica nel tempo,

individuando massimi e minimi. La falda infatti presenta un comportamento estremamente dinamico, con variazioni di livello importanti anche in brevi periodi.

Un esempio di "fotografia istantanea" della falda freatica della Piana Isontina è la ricostruzione delle isofreatiche a partire da dati di livello relativi ad un evento di massimo impinguamento della falda, verificatosi nell'ottobre 1998 [*Gratton*, 2000], in seguito ad un prolungato periodo di forti piogge (Figura 3.4).

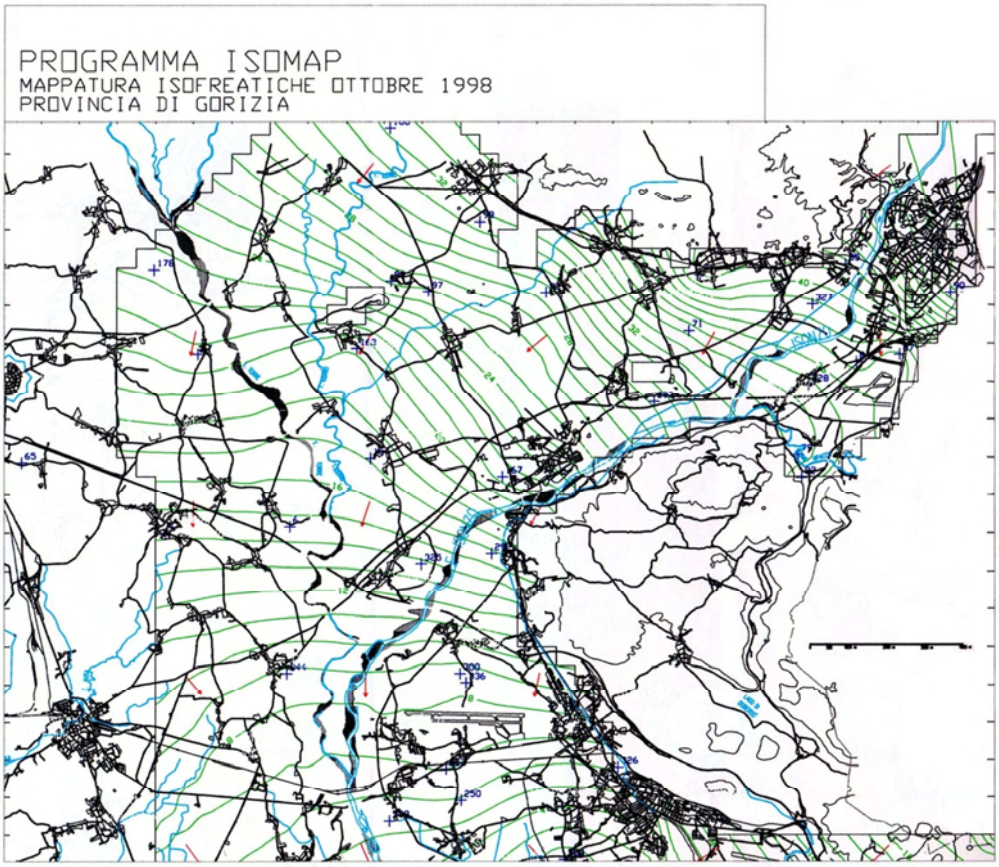


Figura 3.4: Carta delle isofreatiche (tracciate ogni metro) relative all'ottobre 1998, elaborata in ISOMAP con il metodo della Superficie Polinomiale Limite. (da Gratton, 2000)

Anche in questo caso si può notare una direzione di deflusso prevalente da NE verso SO nella zona nord-orientale, quindi, spostandosi verso Ovest, le isofreatiche cambiano gradualmente andamento, assumendo un'orientazione E-O e indicando un deflusso N-S. Nella zona a Sud di Gorizia le isofreatiche presentano un andamento leggermente convesso, il che potrebbe indicare una

probabile alimentazione del Carso da parte delle acque di falda. I valori massimi di livello si riscontrano nella zona di Gorizia (49 m s.l.m.m.), a NE, quelli minimi a ridosso delle Risorgive.

Nell'ambito del progetto CGT (Carta Geologico-Tecnica) [*REGIONE AUTONOMA FVG*, 2013] della Regione FVG è affrontata anche la tematica "idrogeologia" allo scopo di fornire gli elementi necessari alla definizione della vulnerabilità degli acquiferi, delle aree che dal punto di vista idrologico possono essere soggette ad allagamenti e di quelle nel cui sottosuolo la falda freatica può comportare problematiche applicative. La ricostruzione delle linee isofreatiche si è basata su dati bibliografici, reperiti presso gli archivi comunali. Si è fatto riferimento ai Piani Regolatori e a tutti gli allegati e le carte a disposizione dei singoli Comuni. Si tratta quindi di un elaborato costituito da elementi del tutto eterogenei, sia per fonte, sia per periodo di rilevamento, sia per metodologie utilizzate. Dall'analisi delle linee isofreatiche nell'area della Piana Isontina (Figura 3.5), si individuano alcune caratteristiche generali già evidenziate dai lavori citati precedentemente. In particolare si può notare che dalla Piana di Gorizia le acque sotterranee fluiscono verso ovest e SO, mentre più a occidente la direzione di deflusso sotterraneo è prevalentemente NS, a testimoniare un'influenza da parte del sistema Torre-Natisone. Nella zona a ridosso del Carso Goriziano, l'andamento delle linee isofreatiche suggerisce una probabile cessione d'acqua da parte della falda ai calcari, che a loro volta alimentano la falda nelle aree a nord di Monfalcone.

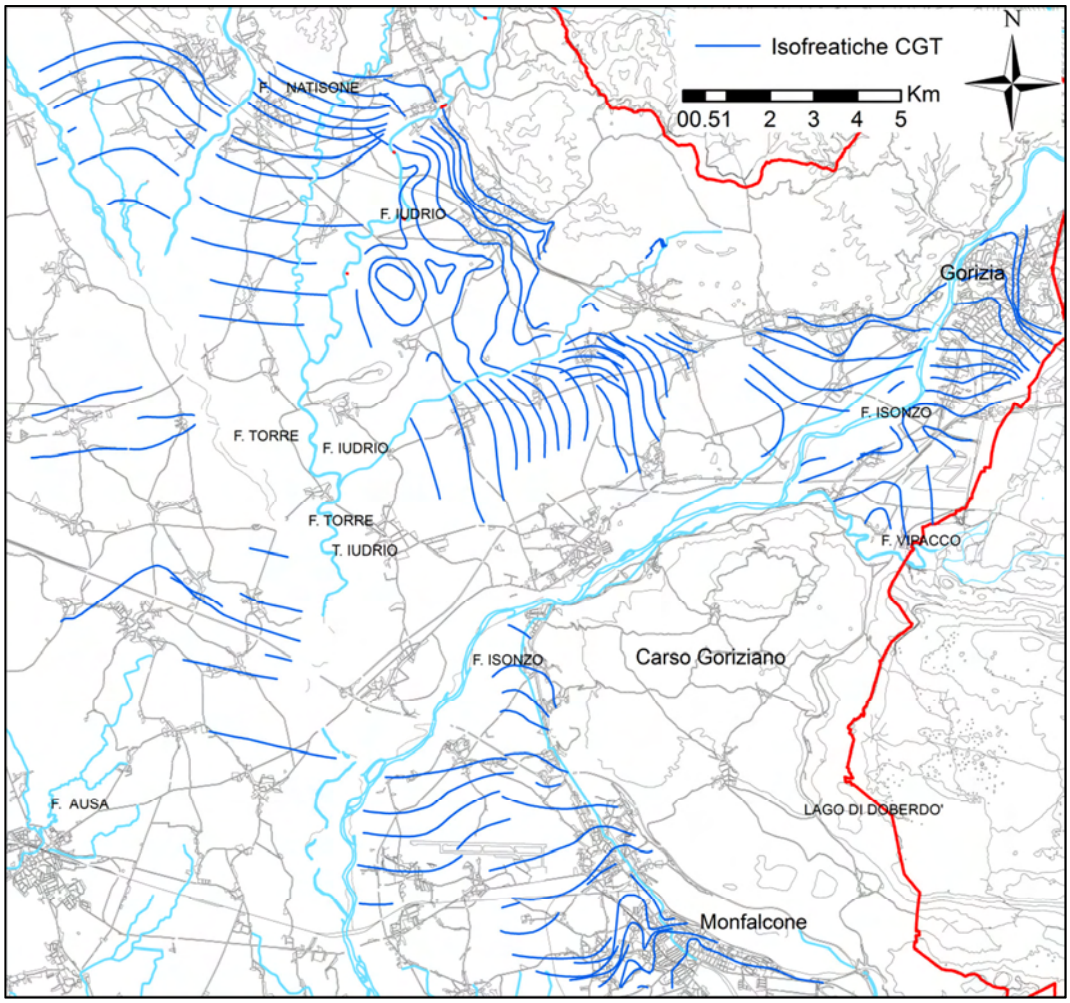


Figura 3.5: Ricostruzione delle linee isofreatiche per l'area della Pina Isontina, basata su dati bibliografici, reperiti presso gli archivi comunali, nell'ambito del progetto CGT. (da RAFVG-CGT, 2013)

3.1 Misure freatimetriche

Nell'ambito di questo lavoro di tesi si vogliono ricostruire le variazioni della superficie freatica nel tempo, individuando gli episodi di massima e minima alimentazione della falda, e definire le direzioni prevalenti dei deflussi sotterranei, ponendo particolare attenzione alla zona nord-orientale della piana e alla sua porzione che si estende in territorio sloveno, al fine anche di chiarire i rapporti tra la falda freatica goriziana ed i calcari del Carso.

Sono state effettuate 14 campagne di misure freatimetriche: le prime due nel mese di giugno 2012, le successive distribuite ad intervalli il più regolare possibili (ogni 15 giorni circa), in modo da avere un quadro sufficientemente completo

delle variazioni del livello della falda all'interno del periodo di monitoraggio, dal 3 dicembre 2012 all'8 agosto 2013. Risultano quindi scoperti i mesi estivi di luglio e agosto e quelli autunnali, da settembre a novembre, del 2012.

Sono stati monitorati 47 pozzi, di cui 36 distribuiti nella Piana Isontina in territorio italiano e 11 in territorio sloveno. In Figura 3.6 è riportata la loro ubicazione.

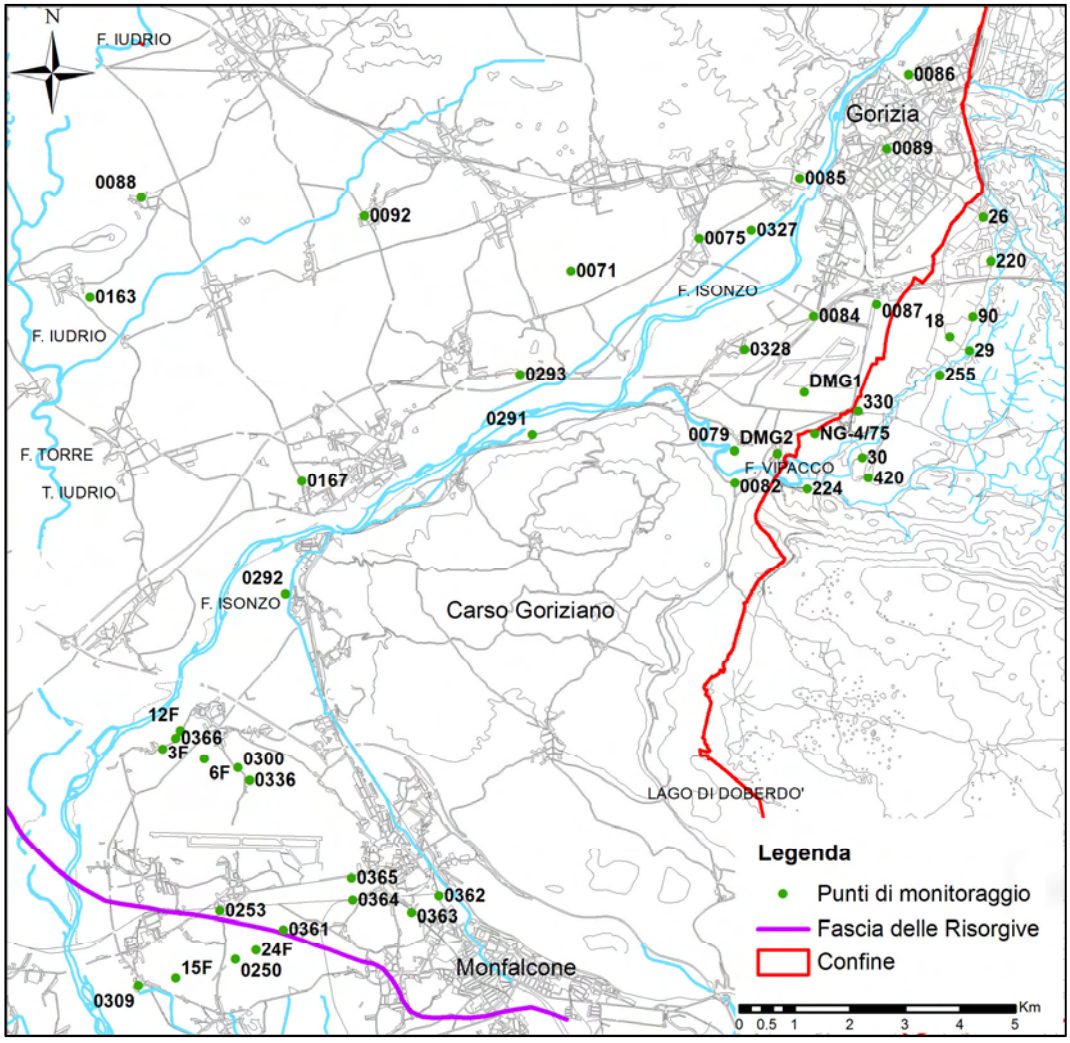


Figura 3.6: Carta con l'ubicazione dei 47 punti di monitoraggio.

Per ognuno di questi punti di misura è stata costruita una scheda (Appendice) riportante:

- Codice identificativo e nome assegnati al punto;
- Dati amministrativi: località, comune e via in cui si trova il punto;

- Dati geografici: ubicazione del punto in carte a scala 1:25000 e 1:5000, coordinate geografiche nei sistemi di riferimento WGS84 e Gauss-Boaga, quota estrapolata da DTM e numero dell'elemento della CTR in cui ricade il punto;
- Carratteristiche tecniche: profondità, diametro e tipologia costruttiva del pozzo, presenza di filtri e di pompa e di dati stratigrafici;
- Analisi chimiche effettuate in passato;
- Utilizzo;
- Valori di livello massimi, minimi e medi, temperatura e conducibilità elettrica registrati durante le campagne di misure freatimetriche e di campionamento;
- Log di conducibilità elettrica e temperatura effettuati mediante sonda CDT Diver.

L'assegnazione dei codici identificativi ai punti (ID) è avvenuta nel seguente modo:

- ai pozzi facenti parte della rete di monitoraggio regionale è stato assegnato il codice utilizzato da quest'ultima (es. 0071, 0365) [*REGIONE AUTONOMA FVG*, 1987];
- ai pozzi di competenza AcegasAps è stato assegnato il codice utilizzato da quest'ultima (es. 3F, 15F);
- nel caso di pozzi facenti parte della rete di monitoraggio regionale, ma di competenza AcegasAps, è stata data la precedenza al codice utilizzato dalla prima (es. 0361-16F);
- ai pozzi in territorio sloveno è stato assegnato un ID seguendo in genere il numero civico della via in cui è ubicato il punto (es. 18), tranne in alcuni casi, in cui è stato attribuito un codice arbitrario (220 e 330) o la sigla della perforazione (NG-4/75);
- ai pozzi in territorio italiano non appartenenti ad alcuna rete, è stato assegnato un codice arbitrario (DMG1 e DMG2).

Le diverse campagne di misura sono state effettuate, tranne in alcuni casi, in un'unica giornata, in modo da ottenere un quadro il più possibile rappresentativo di una situazione istantanea della falda. La serie è stata completata con i dati relativi ai pozzi di competenza di AcegasAps, i quali vengono monitorati regolarmente dagli operatori con cadenza settimanale. Inoltre sono stati inseriti i dati di 4 pozzi in territorio sloveno in cui sono stati monitorati in continuo soggiacenza, temperatura e conducibilità elettrica.

I valori del livello di falda espressi in metri s.l.m.m. sono stati calcolati come differenza tra la quota del boccapozzo e la soggiacenza misurata in campagna con il freatimetro. La quota del boccapozzo in metri s.l.m.m. è stata ottenuta sommando o sottraendo alla quota del piano campagna (estrapolata da DTM) l'altezza in metri del boccapozzo rispetto al piano campagna. La soggiacenza in questo caso rappresenta la profondità a cui si trova la falda rispetto al bocca pozzo.

Il DTM utilizzato per ricavare la quota del piano campagna è stato ottenuto unendo il DTM con pixel 10x10 m disponibile per l'area in territorio italiano, con il DTM disponibile per l'area slovena, avente pixel di 12.5x12.5 m, successivamente ricampionato a 10x10 m e ritagliato lungo il Confine di Stato. La quota del piano campagna in metri s.l.m.m. è stata approssimata alla seconda cifra decimale, avendo le misure freatimetriche precisione del centimetro.

Le quote ottenute dal DTM sono state confrontate con quelle ricavate da dati LIDAR. In alcune porzioni dell'area in esame sono state rilevate delle differenze di quota dell'ordine di qualche decimetro, mentre in altre le quote risultano pressoché coincidenti. Per il calcolo dei livelli di falda s.l.m.m. si è comunque preferito utilizzare le quote estrapolate da DTM.

Nelle Tabelle 3.1-3.7 sono riportati, per ogni punto di monitoraggio, le quote del boccapozzo, i dati freatimetrici raccolti durante le 14 campagne di misura, e quindi i livelli di falda calcolati in metri s.l.m.m.. I dati forniti da AcegasAps sono evidenziati in colore azzurro chiaro, quelli derivanti dagli strumenti in continuo dei pozzi in Slovenia in viola chiaro. I pozzi in secca, in cui non si è registrata la presenza d'acqua al momento della misura, sono

contrassegnati con “asciutto”, mentre le caselle vuote indicano una mancanza di dato. I pozzi sono qui indicati con il loro ID (codice identificativo), che in alcuni casi è doppio, poiché viene riportato anche quello utilizzato da AcegasAps.

		05/06/2012		19-20-21/06/2012	
ID	Quota bocca pozzo [m slmm]	Soggiacenza [m]	Livello [m slmm]	Soggiacenza [m]	Livello [m slmm]
18	61.95				
26	75.06				
29	60.95				
30	51.50				
90	65.26	18.90	46.36	16.79	48.47
220	69.98				
224	41.62				
255	59.46				
330	55.81				
420	50.58			21.52	29.06
0071	54.73	asciutto			
0075	47.73	10.49	37.24	10.49	37.24
0079	42.83	17.43	25.40		
0082	47.83	16.83	31.00	16.70	31.13
0084	63.63	33.50	30.13		
0085	46.38	4.12	42.26		
0086	87.07	35.10	51.97		
0087	67.06	38.64	28.42	38.40	28.66
0088	36.72	18.07	18.65	17.41	19.31
0089	79.22	34.99	44.23	34.94	44.28
0092	41.92			16.90	25.02
0163	25.88	11.76	14.12		
0167	28.50	10.37	18.13	9.93	18.57
0250-41	6.62			2.70	3.92
0253-40	8.23			2.77	5.46
0291	34.79	4.39	30.40		
0292	21.38	10.47	10.91	9.98	11.40
0293	31.32	3.55	27.77		
0300-11F	15.78			9.20	6.58
0309-82F	6.56			3.01	3.55
0327	42.05	5.55	36.50		
0328	54.07	asciutto			
0336-96F	15.48			9.68	5.80
0361-16F	6.68			3.74	2.94
0362-90F	9.42			5.42	4.00
0363-93F	8.18			5.20	2.98
0364-94F	8.94			4.28	4.66
0365-95F	9.49				
0366-97F	15.28			6.56	8.72
12F	15.68			6.00	9.68
15F	5.57			2.95	2.62
24F	5.56			2.70	2.86
3F	14.48			5.80	8.68
6F	14.65			7.96	6.69
DMG1	54.39				
DMG2	47.76				
NG-4/75	43.44				

Tabella 3.1: Quote del bocca pozzo in m s.l.m.m., misure freatimetriche (soggiacenza) in m e livelli di falda in m s.l.m.m., per i 47 punti di monitoraggio, per le campagne svolte nelle date 05/06/2012 e 19-20-21/06/2012.

		03/12/2012		31/01/2013	
ID	Quota bocca pozzo [m slmm]	Soggiacenza [m]	Livello [m slmm]	Soggiacenza [m]	Livello [m slmm]
18	61.95				
26	75.06				
29	60.95				
30	51.50				
90	65.26	15.46	49.80	14.25	51.01
220	69.98				
224	41.62				
255	59.46				
330	55.81	20.05	35.76	21.38	34.43
420	50.58	15.38	35.20	17.64	32.94
0071	54.73	22.36	32.37	23.35	31.38
0075	47.73	8.80	38.93	9.80	37.93
0079	42.83	9.60	33.23	11.08	31.75
0082	47.83	13.98	33.85	15.61	32.22
0084	63.63	27.70	35.93		
0085	46.38	8.08	38.30	3.64	42.74
0086	87.07	33.48	53.59	34.24	52.83
0087	67.06	32.43	34.63	34.58	32.48
0088	36.72	15.05	21.67	15.20	21.52
0089	79.22	34.07	45.15	34.42	44.80
0092	41.92			15.75	26.17
0163	25.88			10.04	15.84
0167	28.50	8.57	19.93	9.31	19.19
0250-41	6.62	2.16	4.46	2.42	4.20
0253-40	8.23	2.22	6.01	2.50	5.73
0291	34.79	3.18	31.61	3.93	30.86
0292	21.38	8.17	13.21	9.60	11.78
0293	31.32	2.69	28.63	3.34	27.98
0300-11F	15.78	8.38	7.40	8.86	6.92
0309-82F	6.56	2.59	3.97	2.83	3.73
0327	42.05	3.44	38.61	4.66	37.39
0328	54.07	19.93	34.14	21.97	32.10
0336-96F	15.48	8.69	6.79	9.18	6.30
0361-16F	6.68	3.19	3.49	3.47	3.21
0362-90F	9.42	4.74	4.68	5.01	4.41
0363-93F	8.18	4.52	3.66	4.80	3.38
0364-94F	8.94	3.42	5.52	3.86	5.08
0365-95F	9.49			4.63	4.86
0366-97F	15.28	6.10	9.18	6.60	8.68
12F	15.68	5.46	10.22	5.99	9.69
15F	5.57	2.87	2.70	2.86	2.71
24F	5.56	2.16	3.40	2.49	3.07
3F	14.48	5.25	9.23	5.75	8.73
6F	14.65	6.97	7.68	7.52	7.13
DMG1	54.39			23.25	31.14
DMG2	47.76			16.02	31.74
NG-4/75	43.44	9.09	34.35	11.47	31.97

Tabella 3.2: Quote del bocca pozzo in m s.l.m.m., misure freatimetriche (soggiacenza) in m e livelli di falda in m s.l.m.m., per i 47 punti di monitoraggio, per le campagne svolte nelle date 03/12/2012 e 31/01/2013.

		18-20/02/2013		11-13/03/2013	
ID	Quota bocca pozzo [m slmm]	Soggiacenza [m]	Livello [m slmm]	Soggiacenza [m]	Livello [m slmm]
18	61.95	20.85	40.21	21.88	40.07
26	75.06	6.30	68.76	5.85	69.21
29	60.95	3.73	57.22	3.02	57.93
30	51.50	18.86	32.64	19.28	32.22
90	65.26	13.95	51.31	13.01	52.25
220	69.98	20.04	49.94		
224	41.62	11.73	29.89	11.09	30.53
255	59.46	2.07	57.39	1.77	57.69
330	55.81	21.19	34.62	21.54	34.27
420	50.58	17.43	33.15	17.91	32.67
0071	54.73	23.30	31.43	23.63	31.10
0075	47.73	9.97	37.76	9.24	38.49
0079	42.83	11.40	31.43	10.24	32.59
0082	47.83	15.67	32.16	15.65	32.18
0084	63.63	31.89	31.74	32.01	31.62
0085	46.38	3.74	42.64	3.17	43.21
0086	87.07	33.65	53.42	34.29	52.78
0087	67.06	34.50	32.56	35.80	31.26
0088	36.72	14.42	22.30	14.64	22.08
0089	79.22	34.29	44.93	34.49	44.73
0092	41.92	15.29	26.63	15.63	26.29
0163	25.88	9.13	16.75	9.44	16.44
0167	28.50	9.24	19.26	8.83	19.67
0250-41	6.62	2.51	4.11	2.03	4.59
0253-40	8.23	2.55	5.68	2.02	6.21
0291	34.79	4.06	30.73	2.31	32.48
0292	21.38	9.80	11.58	8.48	12.90
0293	31.32	3.42	27.90	2.31	29.01
0300-11F	15.78	8.89	6.89	8.57	7.21
0309-82F	6.56	2.88	3.68	2.20	4.36
0327	42.05	4.89	37.16	3.87	38.18
0328	54.07	22.19	31.88	21.50	32.57
0336-96F	15.48	9.20	6.28		
0361-16F	6.68	3.48	3.20		
0362-90F	9.42	4.98	4.44	4.92	4.50
0363-93F	8.18	4.85	3.33		
0364-94F	8.94	3.97	4.97	3.76	5.18
0365-95F	9.49	4.75	4.74	4.57	4.92
0366-97F	15.28	6.53	8.75		
12F	15.68	6.05	9.63	5.19	10.49
15F	5.57	2.90	2.67	2.20	3.37
24F	5.56	2.52	3.04		
3F	14.48	5.82	8.66	4.98	9.50
6F	14.65	7.56	7.09	6.94	7.71
DMG1	54.39	20.32	34.07	22.94	31.45
DMG2	47.76	16.06	31.70	16.03	31.73
NG-4/75	43.44	11.49	31.95		

Tabella 3.3: Quote del bocca pozzo in m s.l.m.m., misure freatimetriche (soggiacenza) in m e livelli di falda in m s.l.m.m., per i 47 punti di monitoraggio, per le campagne svolte nelle date 18-20/02/2013 e 11-13/03/2013.

		26-27/03/2013		10/04/2013	
ID	**Quota bocca pozzo [m slmm]**	**Soggiacenza [m]**	**Livello [m slmm]**	**Soggiacenza [m]**	**Livello [m slmm]**
18	61.95				
26	75.06	6.00	69.06	6.15	68.91
29	60.95	3.51	57.44	3.59	57.36
30	51.50	17.11	34.39	16.33	35.17
90	65.26	13.61	51.65	13.90	51.36
220	69.98			19.13	50.85
224	41.62	8.38	33.24	7.43	34.19
255	59.46	2.01	57.45	2.02	57.44
330	55.81	19.97	35.84	19.37	36.44
420	50.58	15.74	34.84	14.89	35.69
0071	54.73	22.40	32.33	22.28	32.45
0075	47.73	9.43	38.30	9.45	38.28
0079	42.83	9.99	32.84	9.82	33.01
0082	47.83	14.27	33.56	14.22	33.61
0084	63.63	28.41	35.22	28.70	34.93
0085	46.38	3.46	42.92	3.46	42.92
0086	87.07	33.06	54.01	32.64	54.43
0087	67.06	32.37	34.69	31.72	35.34
0088	36.72	12.59	24.13	11.56	25.16
0089	79.22	34.02	45.20	33.86	45.36
0092	41.92	14.84	27.08	14.23	27.69
0163	25.88	8.52	17.36	8.16	17.72
0167	28.50	8.63	19.87	8.41	20.09
0250-41	6.62	2.08	4.54	2.02	4.60
0253-40	8.23	2.07	6.16	2.15	6.08
0291	34.79	4.87	29.92	3.72	31.07
0292	21.38	8.92	12.46	8.76	12.62
0293	31.32	3.06	28.26	2.96	28.36
0300-11F	15.78	8.35	7.43	8.27	7.51
0309-82F	6.56	2.47	4.09	2.46	4.10
0327	42.05	4.14	37.91	4.16	37.89
0328	54.07	20.60	33.47	20.31	33.76
0336-96F	15.48	8.76	6.72	8.70	6.78
0361-16F	6.68	3.01	3.67	3.06	3.62
0362-90F	9.42	4.62	4.80	4.58	4.84
0363-93F	8.18				
0364-94F	8.94	3.43	5.51	3.39	5.55
0365-95F	9.49	4.18	5.31	4.13	5.36
0366-97F	15.28	6.08	9.20	6.10	9.18
12F	15.68	5.44	10.24	5.48	10.20
15F	5.57	2.65	2.92	2.54	3.03
24F	5.56	2.08	3.48	2.18	3.38
3F	14.48	5.25	9.23	5.25	9.23
6F	14.65	7.00	7.65	7.03	7.62
DMG1	54.39	22.20	32.19	20.72	33.67
DMG2	47.76	14.74	33.02	14.36	33.40
NG-4/75	43.44				

Tabella 3.4: Quote del bocca pozzo in m s.l.m.m., misure freatimetriche (soggiacenza) in m e livelli di falda in m s.l.m.m., per i 47 punti di monitoraggio, per le campagne svolte nelle date 26-27/03/2013 e 10/04/2013.

		24-26/04/2013		15-16/05/2013	
ID	**Quota bocca pozzo [m slmm]**	**Soggiacenza [m]**	**Livello [m slmm]**	**Soggiacenza [m]**	**Livello [m slmm]**
18	61.95	21.87	40.08	21.89	40.06
26	75.06	7.27	67.79	6.83	68.23
29	60.95	4.38	56.57	3.85	57.10
30	51.50	12.34	39.16	19.00	32.50
90	65.26	15.05	50.21	15.22	50.04
220	69.98			20.86	49.12
224	41.62	9.32	32.30		
255	59.46	2.43	57.03	2.17	57.29
330	55.81	20.16	35.65	21.34	34.47
420	50.58	15.94	34.64	17.65	32.93
0071	54.73	23.03	31.70	23.34	31.39
0075	47.73	9.78	37.95	9.48	38.25
0079	42.83	10.68	32.15	10.61	32.22
0082	47.83	15.40	32.43	15.82	32.01
0084	63.63	30.78	32.85	31.75	31.88
0085	46.38	3.50	42.88	3.38	43.00
0086	87.07	33.48	53.59	34.42	52.65
0087	67.06	33.16	33.90	34.52	32.54
0088	36.72	12.34	24.38	13.11	23.61
0089	79.22	34.21	45.01	34.48	44.74
0092	41.92	14.50	27.42	15.24	26.68
0163	25.88	8.89	16.99	8.63	17.25
0167	28.50	8.69	19.81	8.58	19.92
0250-41	6.62	2.31	4.31	2.50	4.12
0253-40	8.23	2.31	5.92	2.25	5.98
0291	34.79	3.88	30.91	3.66	31.13
0292	21.38	9.29	12.09	8.93	12.45
0293	31.32	3.01	28.31		
0300-11F	15.78	8.72	7.06	8.56	7.22
0309-82F	6.56	2.60	3.96	2.55	4.01
0327	42.05	4.40	37.65		
0328	54.07	21.32	32.75	21.60	32.47
0336-96F	15.48	9.18	6.30	9.04	6.44
0361-16F	6.68	3.30	3.38	3.30	3.38
0362-90F	9.42	5.05	4.37	5.07	4.35
0363-93F	8.18				
0364-94F	8.94	3.85	5.09	3.72	5.22
0365-95F	9.49	4.65	4.84	4.50	4.99
0366-97F	15.28	6.38	8.90	6.13	9.15
12F	15.68	5.80	9.88	5.50	10.18
15F	5.57	2.65	2.92	2.58	2.99
24F	5.56	2.30	3.26	2.30	3.26
3F	14.48	5.60	8.88	5.91	8.57
6F	14.65	7.30	7.35	7.20	7.45
DMG1	54.39	22.25	32.14		
DMG2	47.76	15.38	32.38	16.01	31.75
NG-4/75	43.44				

Tabella 3.5: Quote del bocca pozzo in m s.l.m.m., misure freatimetriche (soggiacenza) in m e livelli di falda in m s.l.m.m., per i 47 punti di monitoraggio, per le campagne svolte nelle date 24-26/04/2013 e 15-16/05/2013.

		05-06/06/2013		19/06/2013	
ID	**Quota bocca pozzo [m slmm]**	**Soggiacenza [m]**	**Livello [m slmm]**	**Soggiacenza [m]**	**Livello [m slmm]**
18	61.95	21.85	40.10	21.85	40.10
26	75.06	5.67	69.39	6.50	68.56
29	60.95	3.20	57.75	3.92	57.03
30	51.50	18.55	32.95	18.42	33.08
90	65.26	14.68	50.58	15.69	49.57
220	69.98	19.15	50.83	20.30	49.68
224	41.62	10.58	31.04	11.76	29.86
255	59.46	1.97	57.49	2.20	57.26
330	55.81	21.01	34.80	20.85	34.96
420	50.58	17.26	33.32	17.10	33.48
0071	54.73	22.11	32.62	22.84	31.89
0075	47.73	9.13	38.60	9.89	37.84
0079	42.83	10.23	32.60	10.93	31.90
0082	47.83	15.13	32.70	15.61	32.22
0084	63.63	30.08	33.55	31.33	32.30
0085	46.38	3.35	43.03	3.57	42.81
0086	87.07	33.58	53.49	33.19	53.88
0087	67.06	33.57	33.49	33.89	33.17
0088	36.72	10.90	25.82	11.39	25.33
0089	79.22	34.15	45.07	34.11	45.11
0092	41.92	14.04	27.88	13.98	27.94
0163	25.88	7.34	18.54	8.48	17.40
0167	28.50	8.05	20.45	8.63	19.87
0250-41	6.62	1.87	4.75	2.29	4.33
0253-40	8.23	1.98	6.25	2.40	5.83
0291	34.79	3.40	31.39	4.09	30.70
0292	21.38	8.41	12.97	9.34	12.04
0293	31.32	2.68	28.64		
0300-11F	15.78	8.07	7.71	8.74	7.04
0309-82F	6.56	2.33	4.23	2.70	3.86
0327	42.05	3.78	38.27		
0328	54.07	20.98	33.09	21.70	32.37
0336-96F	15.48	8.52	6.96	9.19	6.29
0361-16F	6.68	2.99	3.69	3.35	3.33
0362-90F	9.42	4.55	4.87	4.98	4.44
0363-93F	8.18				
0364-94F	8.94	3.34	5.60	3.81	5.13
0365-95F	9.49	4.08	5.41	4.60	4.89
0366-97F	15.28	5.80	9.48	6.40	8.88
12F	15.68	5.50	10.18	5.77	9.91
15F	5.57	2.40	3.17	2.72	2.85
24F	5.56	2.10	3.46	2.36	3.20
3F	14.48	5.20	9.28	5.55	8.93
6F	14.65	6.80	7.85	7.36	7.29
DMG1	54.39	22.13	32.26	22.83	31.56
DMG2	47.76	15.52	32.24	15.82	31.94
NG-4/75	43.44				

Tabella 3.6: Quote del bocca pozzo in m s.l.m.m., misure freatimetriche (soggiacenza) in m e livelli di falda in m s.l.m.m., per i 47 punti di monitoraggio, per le campagne svolte nelle date 05-06/06/2013 e 19/06/2013.

		18/07/2013		08/08/2013	
ID	Quota bocca pozzo [m slmm]	Soggiacenza [m]	Livello [m slmm]	Soggiacenza [m]	Livello [m slmm]
18	61.95	21.90	40.05	21.93	40.02
26	75.06	8.62	66.44	9.29	65.77
29	60.95	5.03	55.92	5.39	55.56
30	51.50	20.47	31.03	21.78	29.72
90	65.26	16.98	48.28		
220	69.98	21.91	48.07	22.43	47.55
224	41.62	13.24	28.38	13.85	27.77
255	59.46	3.87	55.59	4.95	54.51
330	55.81				
420	50.58				
0071	54.73	24.25	30.48	24.88	29.85
0075	47.73	10.53	37.20	10.68	37.05
0079	42.83	15.43	27.40	17.13	25.70
0082	47.83	16.81	31.02	17.24	30.59
0084	63.63	asciutto		asciutto	
0085	46.38	3.86	42.52	3.94	42.44
0086	87.07	34.60	52.47	35.15	51.92
0087	67.06	36.46	30.60	37.73	29.33
0088	36.72	15.50	21.22	17.73	18.99
0089	79.22	34.70	44.52	35.00	44.22
0092	41.92	15.56	26.36	16.40	25.52
0163	25.88	10.60	15.28	11.81	14.07
0167	28.50	9.70	18.80	10.29	18.21
0250-41	6.62	2.83	3.79	3.20	3.42
0253-40	8.23	3.20	5.03	3.34	4.89
0291	34.79	4.59	30.20	4.66	30.13
0292	21.38	10.18	11.20	11.18	10.20
0293	31.32			3.77	27.55
0300-11F	15.78	9.65	6.13	10.33	5.45
0309-82F	6.56	3.19	3.37	3.45	3.11
0327	42.05			5.63	36.42
0328	54.07	23.40	30.67	asciutto	
0336-96F	15.48	10.05	5.43	10.68	4.80
0361-16F	6.68	3.85	2.83	4.18	2.50
0362-90F	9.42	5.50	3.92	5.79	3.63
0363-93F	8.18			5.55	2.63
0364-94F	8.94	4.36	4.58	4.69	4.25
0365-95F	9.49	5.20	4.29	5.57	3.92
0366-97F	15.28	7.28	8.00	8.50	6.78
12F	15.68	6.68	9.00	8.00	7.68
15F	5.57	3.12	2.45	3.34	2.23
24F	5.56	2.80	2.76	3.13	2.43
3F	14.48	6.44	8.04	7.69	6.79
6F	14.65	9.40	5.25	9.28	5.37
DMG1	54.39	25.21	29.18		
DMG2	47.76	16.99	30.77	17.52	30.24
NG-4/75	43.44				

Tabella 3.7: Quote del bocca pozzo in m s.l.m.m., misure freatimetriche (soggiacenza) in m e livelli di falda in m s.l.m.m., per i 47 punti di monitoraggio, per le campagne svolte nelle date 18/07/2013 e 08/08/2013.

Nelle Tabelle 3.8 e 3.9 sono evidenziati per ogni punto di monitoraggio i valori massimi (in verde) e minimi (in rosso) di livello registrati nel corso delle diverse campagne di misura.

ID	05/06/2012	19-20-21/06/2012	03/12/2012	31/01/2013	18-20/02/2013	11-13/03/2013	26-27/03/2013
18					40.21	40.07	
26					68.76	69.21	69.06
29					57.22	57.93	57.44
30					32.64	32.22	34.39
90	46.36	48.47	49.80	51.01	51.31	52.25	51.65
220					49.94		
224					29.89	30.53	33.24
255					57.39	57.69	57.45
330			35.76	34.43	34.62	34.27	35.84
420		29.06	35.20	32.94	33.15	32.67	34.84
0071	asciutto		32.37	31.38	31.43	31.10	32.33
0075	37.24	37.24	38.93	37.93	37.76	38.49	38.30
0079	25.40		33.23	31.75	31.43	32.59	32.84
0082	31.00	31.13	33.85	32.22	32.16	32.18	33.56
0084	30.13		35.93		31.74	31.62	35.22
0085	42.26		38.30	42.74	42.64	43.21	42.92
0086	51.97		53.59	52.83	53.42	52.78	54.01
0087	28.42	28.66	34.63	32.48	32.56	31.26	34.69
0088	18.65	19.31	21.67	21.52	22.30	22.08	24.13
0089	44.23	44.28	45.15	44.80	44.93	44.73	45.20
0092		25.02		26.17	26.63	26.29	27.08
0163	14.12			15.84	16.75	16.44	17.36
0167	18.13	18.57	19.93	19.19	19.26	19.67	19.87
0250-41		3.92	4.46	4.20	4.11	4.59	4.54
0253-40		5.46	6.01	5.73	5.68	6.21	6.16
0291	30.40		31.61	30.86	30.73	32.48	29.92
0292	10.91	11.40	13.21	11.78	11.58	12.90	12.46
0293	27.77		28.63	27.98	27.90	29.01	28.26
0300-11F		6.58	7.40	6.92	6.89	7.21	7.43
0309-82F		3.55	3.97	3.73	3.68	4.36	4.09
0327	36.50		38.61	37.39	37.16	38.18	37.91
0328	asciutto		34.14	32.10	31.88	32.57	33.47
0336-96F		5.80	6.79	6.30	6.28		6.72
0361-16F		2.94	3.49	3.21	3.20		3.67
0362-90F		4.00	4.68	4.41	4.44	4.50	4.80
0363-93F		2.98	3.66	3.38	3.33		
0364-94F		4.66	5.52	5.08	4.97	5.18	5.51
0365-95F				4.86	4.74	4.92	5.31
0366-97F		8.72	9.18	8.68	8.75		9.20
12F		9.68	10.22	9.69	9.63	10.49	10.24
15F		2.62	2.70	2.71	2.67	3.37	2.92
24F		2.86	3.40	3.07	3.04		3.48
3F		8.68	9.23	8.73	8.66	9.50	9.23
6F		6.69	7.68	7.13	7.09	7.71	7.65
DMG1				31.14	34.07	31.45	32.19
DMG2				31.74	31.70	31.73	33.02
NG-4/75			34.35	31.97	31.95		

Tabella 3.8: Massimi (in verde) e minimi (in rosso) valori di livello registrati per i 47 punti di monitoraggio.

ID	10/04/2013	24-26/04/2013	15-16/05/2013	05-06/06/2013	19/06/2013	18/07/2013	08/08/2013
18		40.08	40.06	40.10	40.10	40.05	40.02
26	68.91	67.79	68.23	69.39	68.56	66.44	65.77
29	57.36	56.57	57.10	57.75	57.03	55.92	55.56
30	35.17	39.16	32.50	32.95	33.08	31.03	29.72
90	51.36	50.21	50.04	50.58	49.57	48.28	
220	50.85		49.12	50.83	49.68	48.07	47.55
224	34.19	32.30		31.04	29.86	28.38	27.77
255	57.44	57.03	57.29	57.49	57.26	55.59	54.51
330	36.44	35.65	34.47	34.80	34.96		
420	35.69	34.64	32.93	33.32	33.48		
0071	32.45	31.70	31.39	32.62	31.89	30.48	29.85
0075	38.28	37.95	38.25	38.60	37.84	37.20	37.05
0079	33.01	32.15	32.22	32.60	31.90	27.40	25.70
0082	33.61	32.43	32.01	32.70	32.22	31.02	30.59
0084	34.93	32.85	31.88	33.55	32.30	asciutto	asciutto
0085	42.92	42.88	43.00	43.03	42.81	42.52	42.44
0086	54.43	53.59	52.65	53.49	53.88	52.47	51.92
0087	35.34	33.90	32.54	33.49	33.17	30.60	29.33
0088	25.16	24.38	23.61	25.82	25.33	21.22	18.99
0089	45.36	45.01	44.74	45.07	45.11	44.52	44.22
0092	27.69	27.42	26.68	27.88	27.94	26.36	25.52
0163	17.72	16.99	17.25	18.54	17.40	15.28	14.07
0167	20.09	19.81	19.92	20.45	19.87	18.80	18.21
0250-41	4.60	4.31	4.12	4.75	4.33	3.79	3.42
0253-40	6.08	5.92	5.98	6.25	5.83	5.03	4.89
0291	31.07	30.91	31.13	31.39	30.70	30.20	30.13
0292	12.62	12.09	12.45	12.97	12.04	11.20	10.20
0293	28.36	28.31		28.64			27.55
0300-11F	7.51	7.06	7.22	7.71	7.04	6.13	5.45
0309-82F	4.10	3.96	4.01	4.23	3.86	3.37	3.11
0327	37.89	37.65		38.27			36.42
0328	33.76	32.75	32.47	33.09	32.37	30.67	asciutto
0336-96F	6.78	6.30	6.44	6.96	6.29	5.43	4.80
0361-16F	3.62	3.38	3.38	3.69	3.33	2.83	2.50
0362-90F	4.84	4.37	4.35	4.87	4.44	3.92	3.63
0363-93F							2.63
0364-94F	5.55	5.09	5.22	5.60	5.13	4.58	4.25
0365-95F	5.36	4.84	4.99	5.41	4.89	4.29	3.92
0366-97F	9.18	8.90	9.15	9.48	8.88	8.00	6.78
12F	10.20	9.88	10.18	10.18	9.91	9.00	7.68
15F	3.03	2.92	2.99	3.17	2.85	2.45	2.23
24F	3.38	3.26	3.26	3.46	3.20	2.76	2.43
3F	9.23	8.88	8.57	9.28	8.93	8.04	6.79
6F	7.62	7.35	7.45	7.85	7.29	5.25	5.37
DMG1	33.67	32.14		32.26	31.56	29.18	
DMG2	33.40	32.38	31.75	32.24	31.94	30.77	30.24
NG-4/75							

Tabella 3.9: Massimi (in verde) e minimi (in rosso) valori di livello registrati per i 47 punti di monitoraggio.

Si può notare facilmente che per la maggior parte dei pozzi (34 su 47) i più bassi valori di livello sono stati registrati nella campagna di misura dell'8 agosto 2013. Essa rappresenta quindi una situazione di minimo per la falda freatica e con buona probabilità non si discosta molto dalla situazione di minimo annuale. Infatti durante tutto il mese di luglio 2013 le precipitazioni piovose sono state molto scarse (Figura 3.7), facendo registrare un valore cumulativo mensile di appena 28 mm alla stazione pluviometrica di Gradisca d'Isonzo (Figura 3.8). I minimi di livello per gli altri pozzi si riscontrano principalmente per la prima campagna, effettuata il 05/06/2012, in seguito ad un mese di maggio non particolarmente piovoso (valore cumulativo mensile di 88.3 mm) se relazionato a quello del 2013 (valore cumulativo mensile di 332.1 mm).

Per quanto riguarda, invece, i più alti valori di livello registrati, l'identificazione di una situazione di massimo non è così immediata. La campagna di misura per la quale si riscontra il maggior numero di pozzi presentanti i valori di livello più elevati è quella del 5-6 giugno 2013. Essa è rappresentativa di una situazione di massimo, in relazione anche alla freaquenza delle precipitazioni piovose nel periodo fine aprile-inizio giugno, che hanno rimpinguato la falda. Questa situazione non è rappresentativa del massimo annuale della falda, infatti, poiché per le precipitazioni il massimo annuale si è registrato alla fine di ottobre, è molto probabile che anche per la falda questo si sia verificato nei mesi autunnali, nei quali le campagne di misura sono state interrotte.

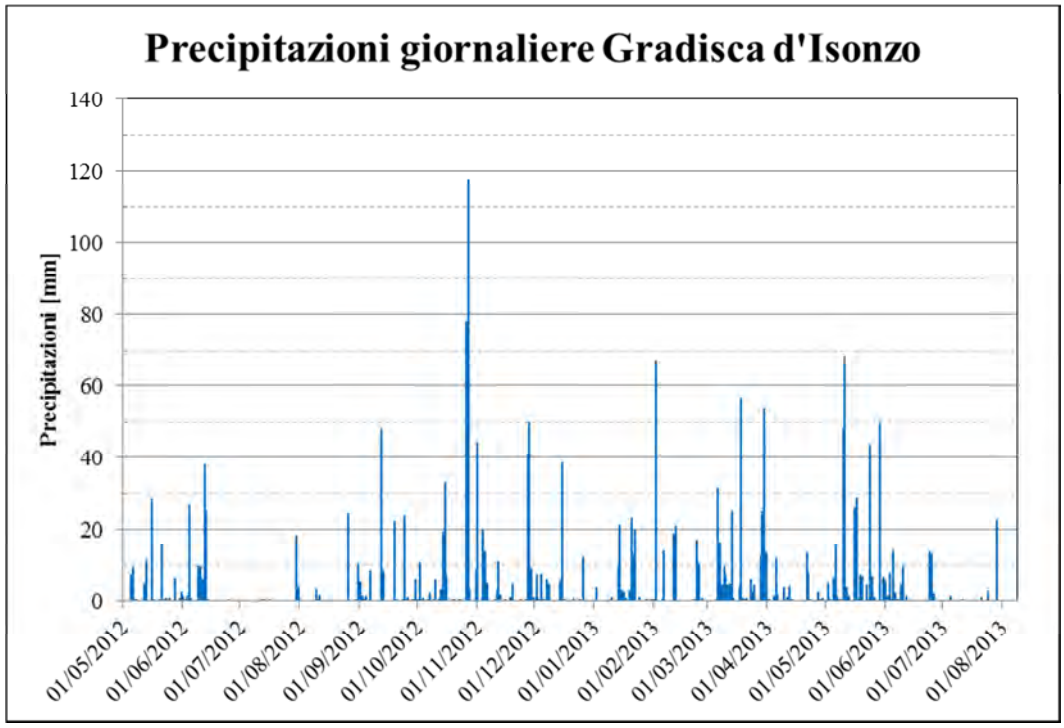


Figura 3.7: Precipitazioni giornaliere alla stazione pluviometrica di Gradisca d'Isonzo nel periodo di monitoraggio dei livelli freatimetrici e nel mese di maggio 2012, precedente alla prima campagna di misura. (dati da OSMER FVG)

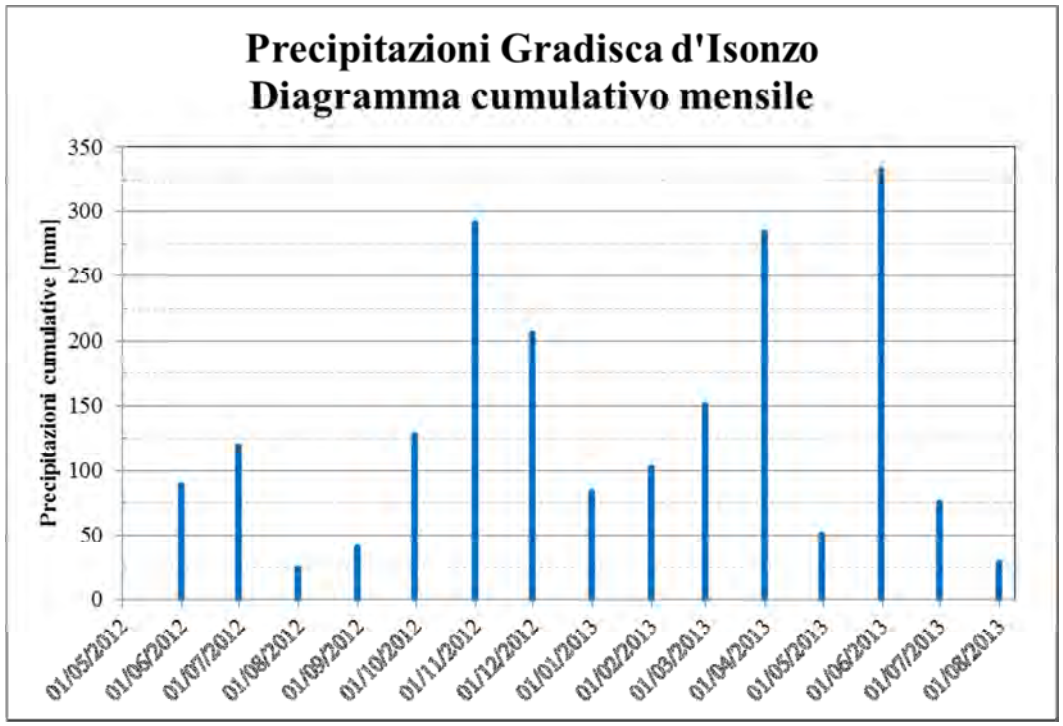


Figura 3.8: Diagramma cumulativo mensile delle precipitazioni alla stazione pluviometrica di Gradisca d'Isonzo nel periodo di monitoraggio dei livelli freatimetrici e nel mese di maggio 2012, precedente alla prima campagna di misura. (dati da OSMER FVG)

3.2 Ricostruzione delle isofreatiche

A partire dai dati di livello di falda sono state costruite 14 carte delle linee isofreatiche, una per ogni campagna di misure freatimetriche, al fine di poter definire l'andamento della superficie freatica nel periodo di monitoraggio ed individuare le direzioni preferenziali di deflusso.

Sono stati utilizzati i dati relativi a 44 punti di monitoraggio sui 47 totali, 3 di essi sono stati infatti scartati per i seguenti motivi:

- Il pozzo 0250 in località Crosere in realtà attinge da un livello acquifero confinato più profondo;
- Il pozzo 0085 in località Piedimonte è ostruito e perciò le sue variazioni di livello risultano molto modeste rispetto a quanto riscontrato nei limitrofi punti di monitoraggio;
- Il pozzo 18, ubicato a Vrtojba, in territorio sloveno, è caratterizzato da un livello di falda pressoché costante; non sono state registrate infatti variazioni significative, nemmeno quando in pozzi vicini si è riscontrata una cospicua diminuzione del livello. Esso non è quindi in comunicazione con la falda circostante ed il ricambio d'acqua al suo interno è molto scarso.

Interpolazione

Le linee isofreatiche sono state ricostruite in ArcGIS 10, utilizzando il tool di interpolazione *Natural Neighbor*, disponibile nella sezione *Spatial Analyst Tools-Interpolation* della ArcToolbox. Gli strumenti di interpolazione spaziale permettono di ricostruire l'andamento di una determinata variabile nello spazio (nel nostro caso il livello di falda) secondo una griglia regolare di nodi equamente spaziata (centri delle celle di un raster), a partire dai valori misurati in alcuni punti irregolarmente distribuiti (punti di osservazione) [*de Smith et al.*, 2007; *Piccinini*, 2012]. I dati di input devono quindi contenere i valori della variabile da interpolare (shape file con i valori di livello per ogni punto di misura). Il risultato dell'interpolazione spaziale in ArcGIS è un raster della superficie interpolata. Il metodo di interpolazione Natural Neighbor si basa sull'attribuzione di pesi, per

ciascun punto di osservazione, in base al concetto di "area di influenza" [*Sibson*, 1981]. L'algoritmo utilizza una suddivisione del piano basata su poligoni aventi la proprietà che tutti i punti al loro interno sono più vicini al punto osservato interno che a tutti gli altri punti di osservazione (poligoni di Thiessen o di Voronoi). L'interpolazione ha inizio con la creazione di una rete di triangoli di Delaunay a partire dai dati di input, successivamente viene generato un set di poligoni di Thiessen (poligoni in verde in Figura 3.9), ciascuno dei quali caratterizzato da una superficie A_j [*de Smith et al.*, 2007; *Piccinini*, 2012]. Per la stima del valore in un qualsiasi nodo della griglia di interpolazione esso viene inserito temporaneamente nel data-set dei valori di input. Tenendo conto del nuovo valore vengono ridefiniti sia la rete dei triangoli, che i poligoni di Thiessen. Quindi viene creato un nuovo poligono (in beige) relativo al nodo (stella rossa) e vengono ridefiniti quelli adiacenti. Il nuovo poligono ha una superficie A_p, in parte mutuata dai poligoni preesistenti [*de Smith et al.*, 2007; *Piccinini*, 2012].

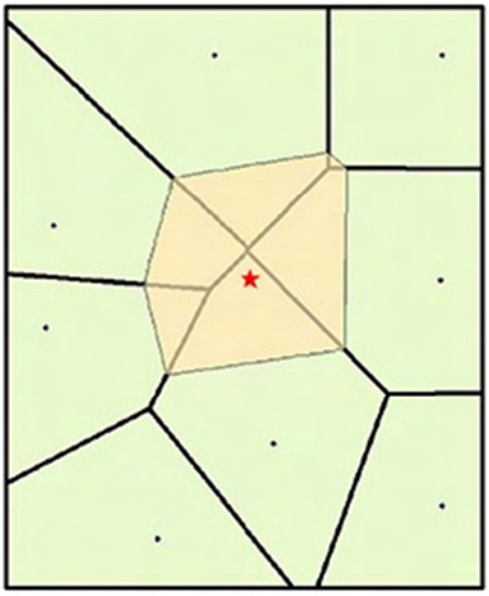


Figura 3.9: Esempio di poligoni di Thiessen (o Voronoi). In verde i poligoni iniziali con i punti di osservazione e in beige il poligono creato successivamente. La stella rossa rappresenta il punto di interpolazione (nodo della griglia).

Il valore z_p stimato al nodo è pari alla sommatoria dei valori z_i nei punti adiacenti, moltiplicati ciascuno per un peso λ, derivante dal rapporto tra l'area

mutuata al preesistente poligono A_{ip} e l'area del poligono relativo al nodo A_p [*de Smith et al.*, 2007; *Piccinini*, 2012]:

$$z_p = \Sigma_1^k \lambda_i z_i \qquad \lambda_i = \frac{A_{ip}}{A_p}$$

Il Natural Neighbor è un metodo di interpolazione esatto, è in grado cioè di stimare (onorare) il valore misurato quando nodo della griglia e punto di misura coincidono. La superficie che si ottiene passa quindi attraverso i punti di misura ed è ovunque smussata, tranne nella posizione in cui si trovano questi ultimi [*de Smith et al.*, 2007; *Piccinini*, 2012].

Nella casella *input point feature* nella finestra relativa al tool *Natural Neighbor* è stato immesso lo shape file dei punti di monitoraggio con i livelli di falda misurati nelle diverse campagne effettuate, suddivisi in campi differenti. Per ogni serie di misure è stato poi specificato come *Z value field* il campo con i valori di livello da utilizzare ed è stata indicata un'*Output cell size* di 50 m per il raster. Sono stati selezionati esclusivamente i punti per i quali vi era un corrispondente valore di livello misurato in campagna. I pozzi in secca o per i quali non è stato raccolto il dato durante le misure freatimetriche non sono stati utilizzati nell'interpolazione.

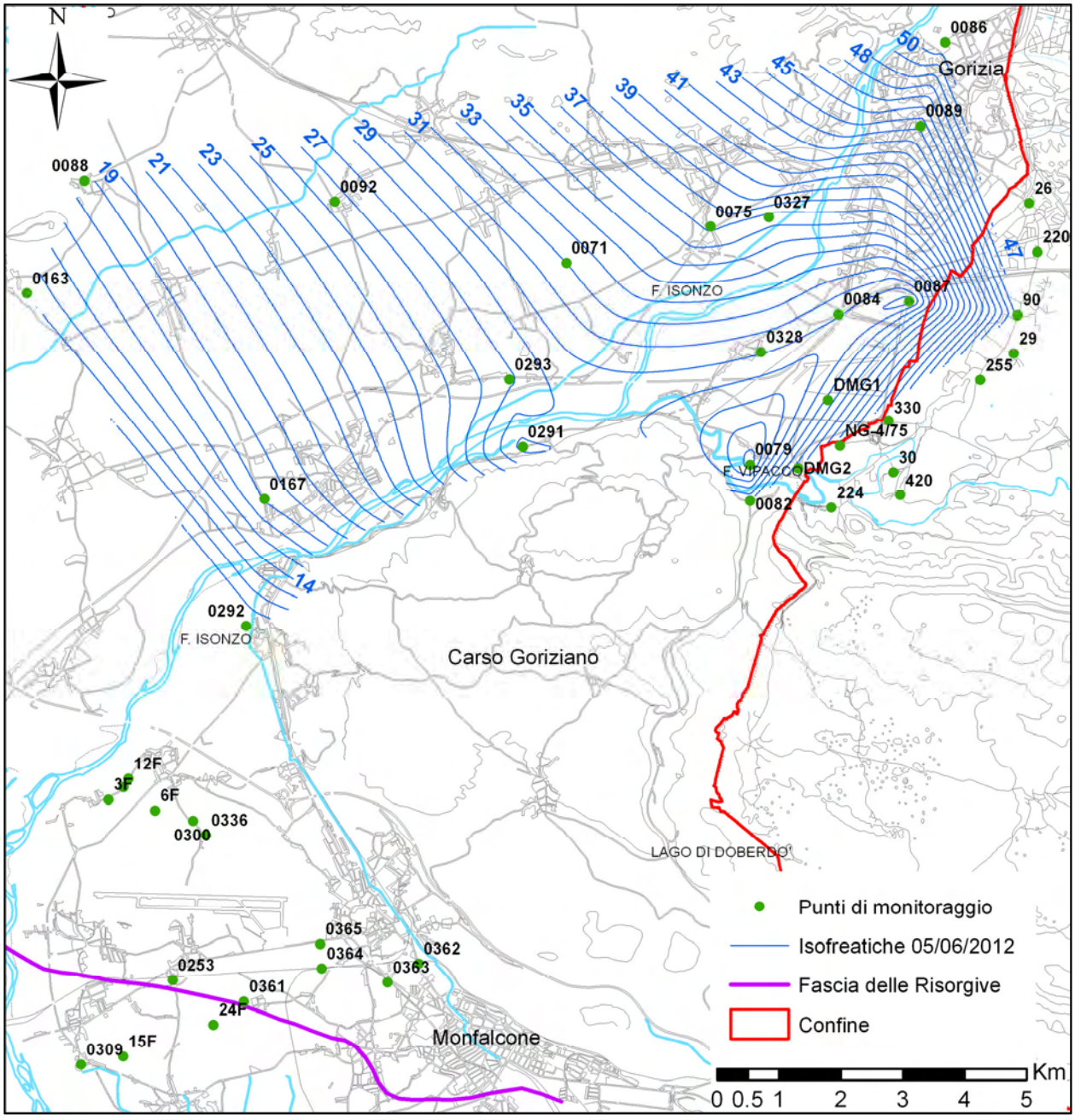
A partire dalla superficie così ottenuta, sono state ricostruite le linee isofreatiche attraverso il tool *Contour* nella sezione *Spatial Analyst Tools-Surface*. Come input è stato utilizzato il raster ottenuto precedentemente mediante interpolazione, dopo averlo "ritagliato" lungo il limite del Carso. È stato usato un *Contour interval* di 1 m. Le linee di contour collegano le celle del raster di input che hanno ugual valore di livello, delineando così l'andamento dei valori della grandezza lungo la superficie. Il risultato ottenuto con il contour è uno shape file delle linee isofreatiche tracciate ogni metro.

Di seguito vengono riportate le 14 carte delle linee isofreatiche ricostruite, come appena descritto, mediante interpolazione, a partire dai dati di livello di falda. Per le campagne di misura dell'8 agosto 2013 e del 5-6 giugno 2013, identificate rispettivamente come situazioni di minima e di massima

alimentazione della falda, sono state costruite delle carte in scala 1:25000, riportate in Allegato 1 e 2. Per una più facile lettura sono state differenziate le litologie affioranti mediante diversi colori, distinguendo tra depositi sciolti, calcari/dolomie e flysch, e segnalate le aree fortemente antropizzate (come quella del monfalconese) e/o non rilevabili (discariche e cave).

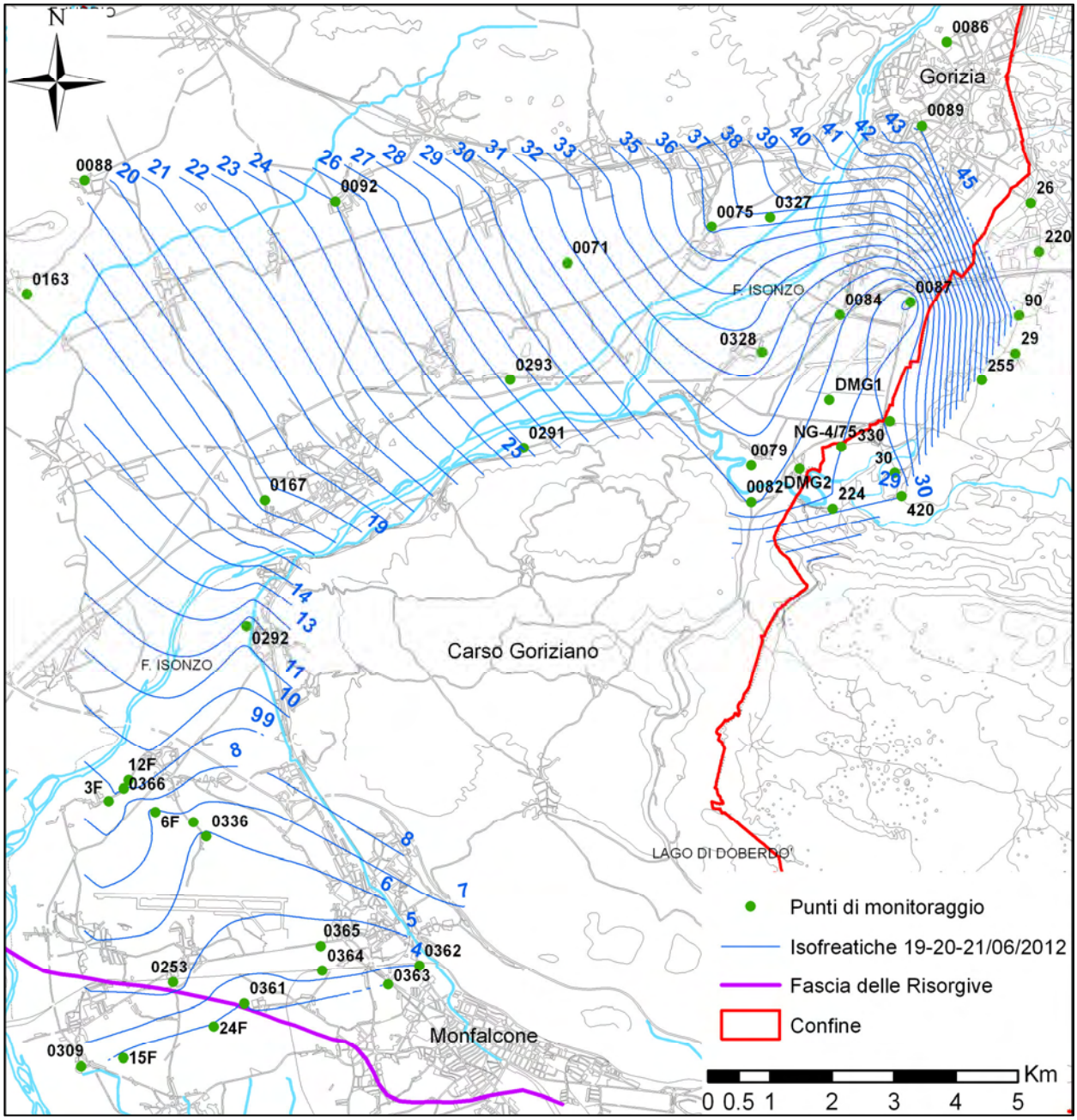
CARTA DELLE ISOFREATICHE

05/06/2012



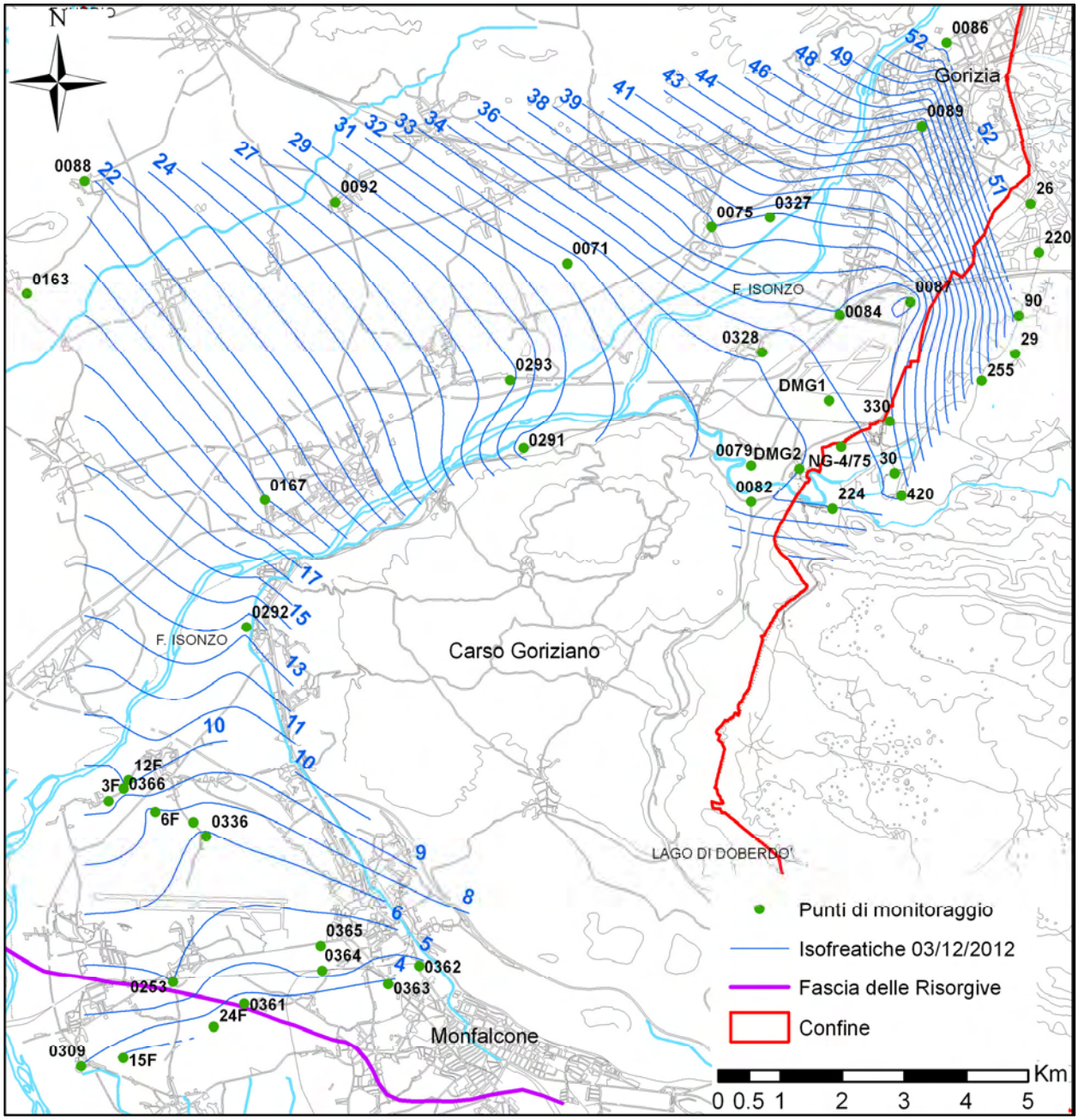
CARTA DELLE ISOFREATICHE

19-20-21/06/2012



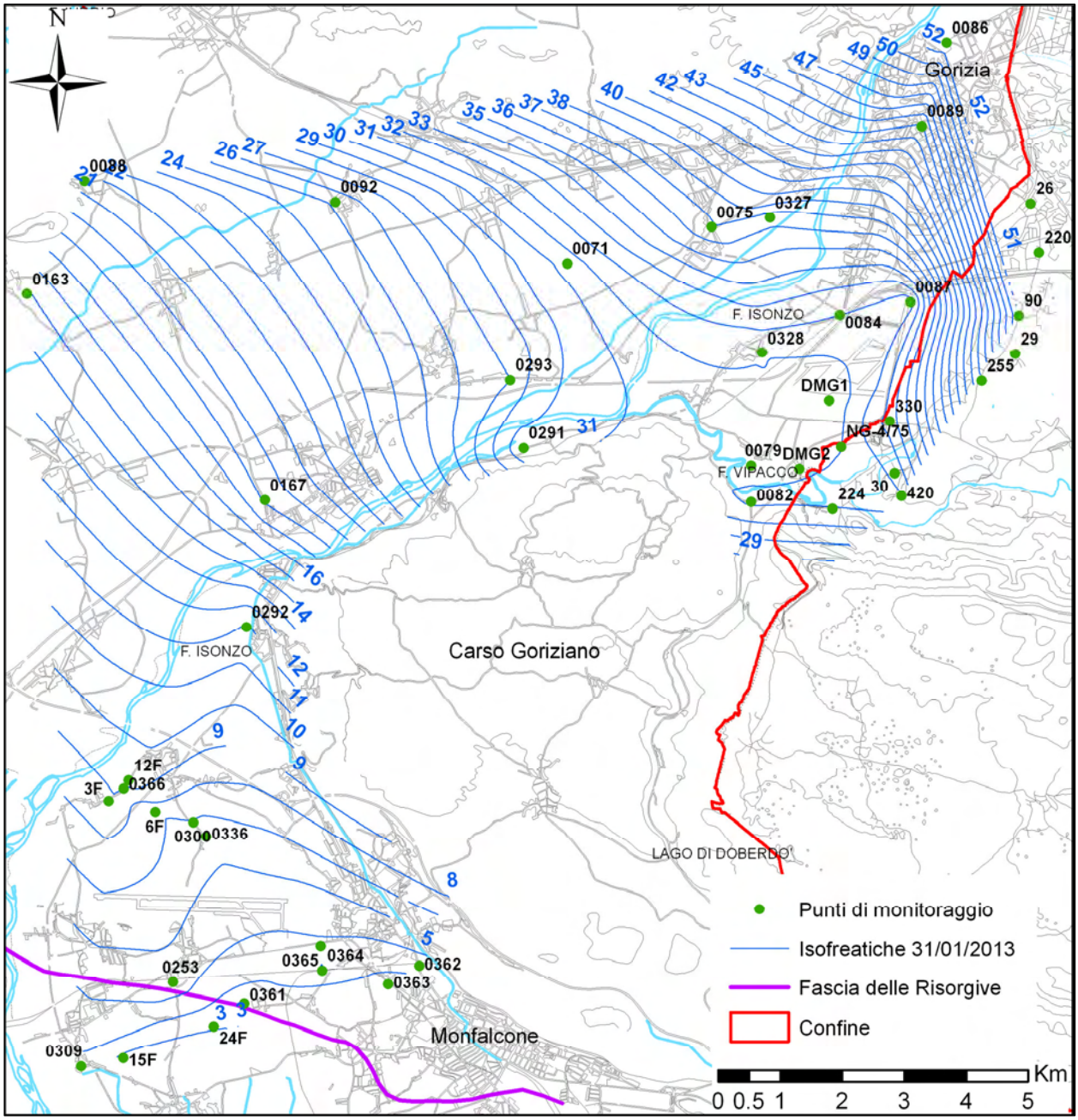
CARTA DELLE ISOFREATICHE

03/12/2012



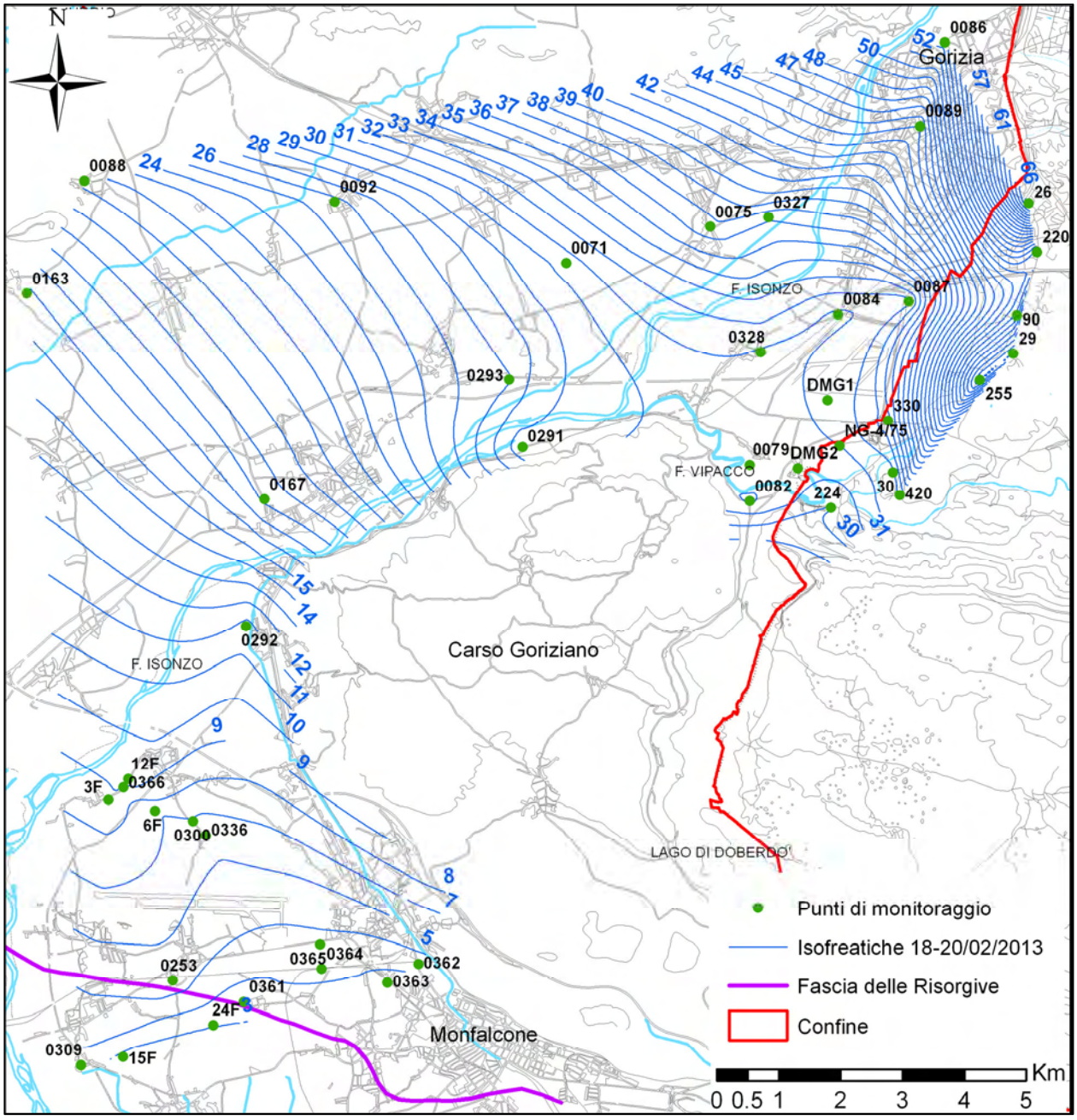
CARTA DELLE ISOFREATICHE

31/01/2013



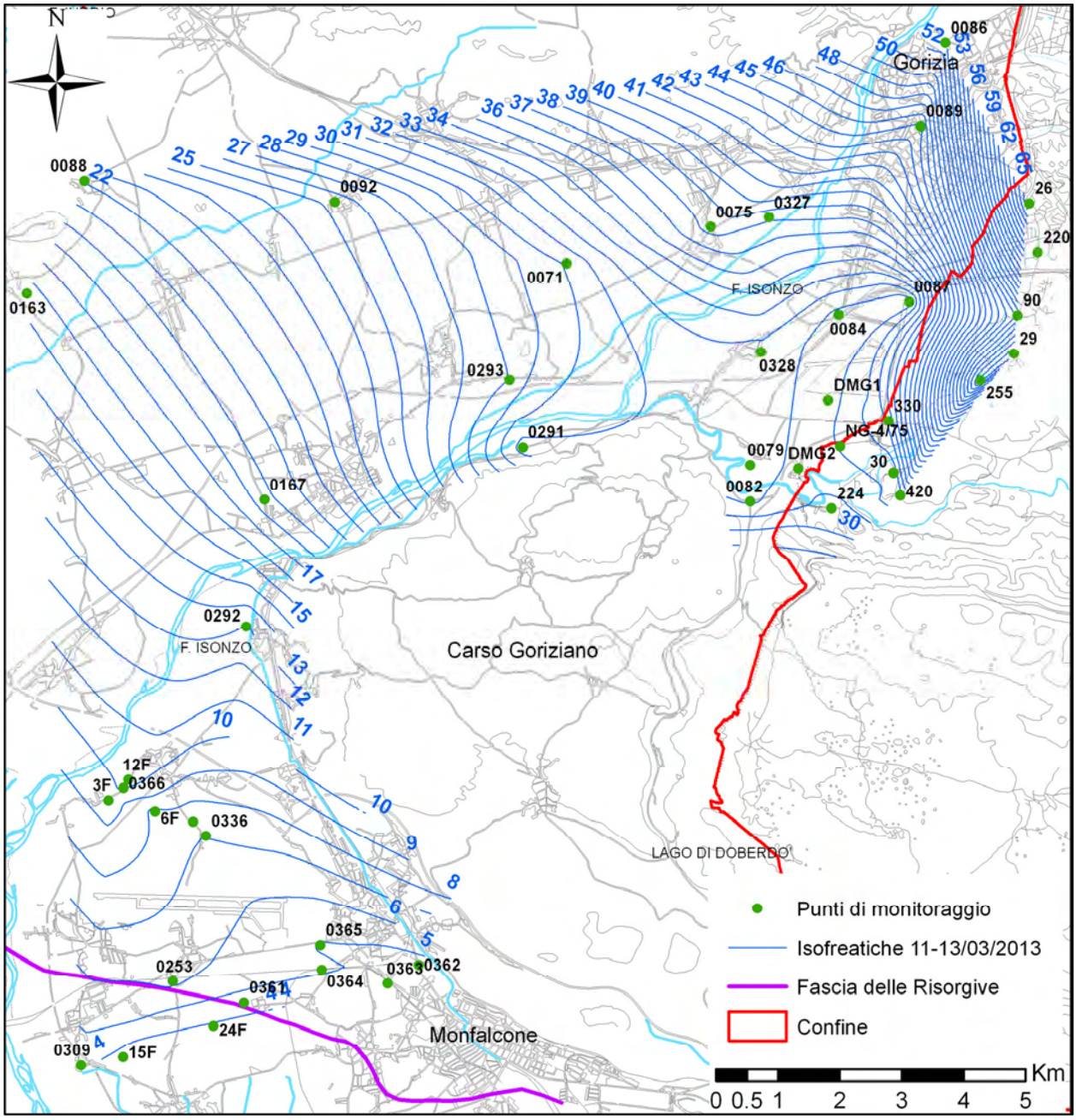
CARTA DELLE ISOFREATICHE

18-20/02/2013



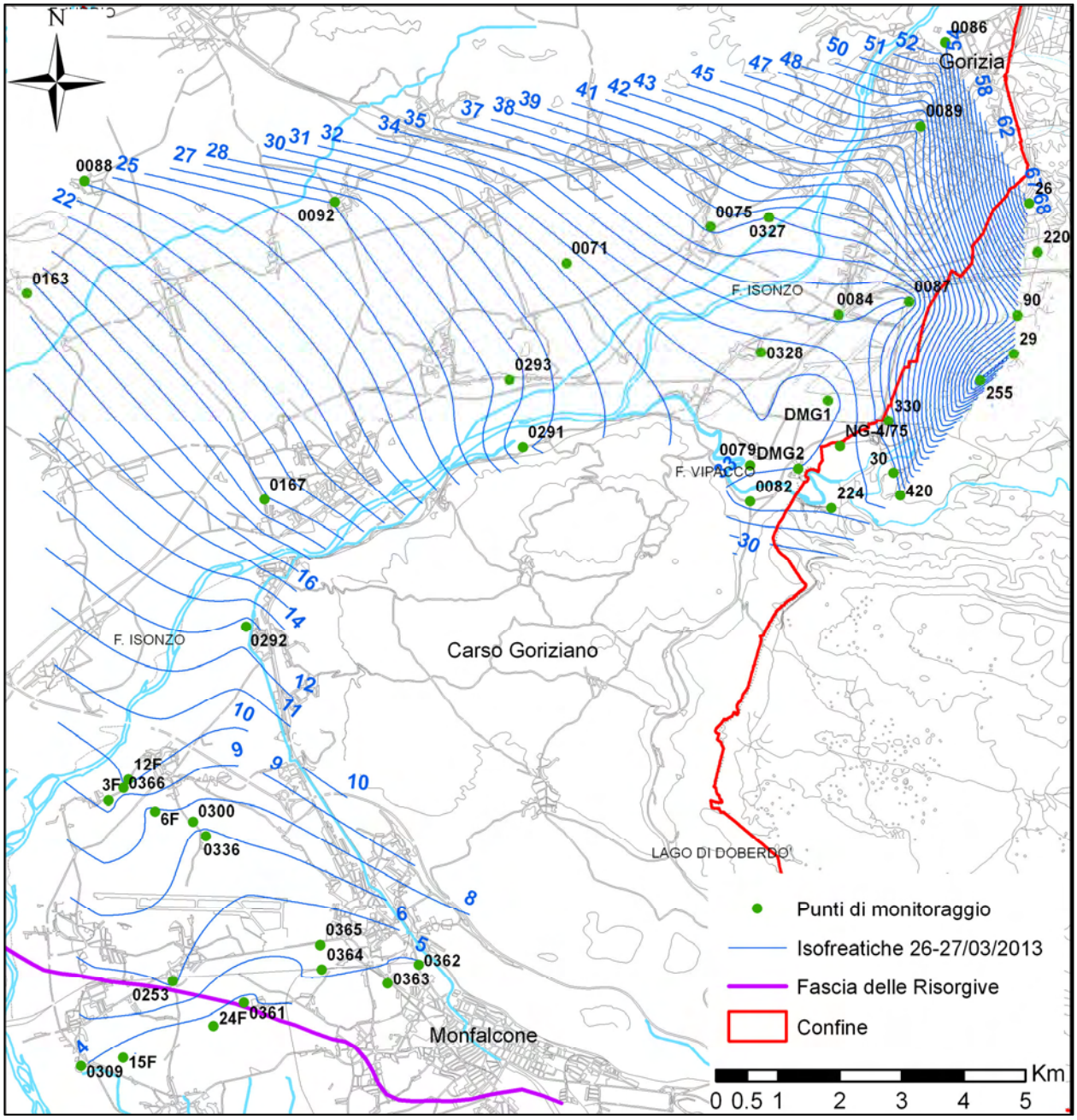
CARTA DELLE ISOFREATICHE

11-13/03/2013



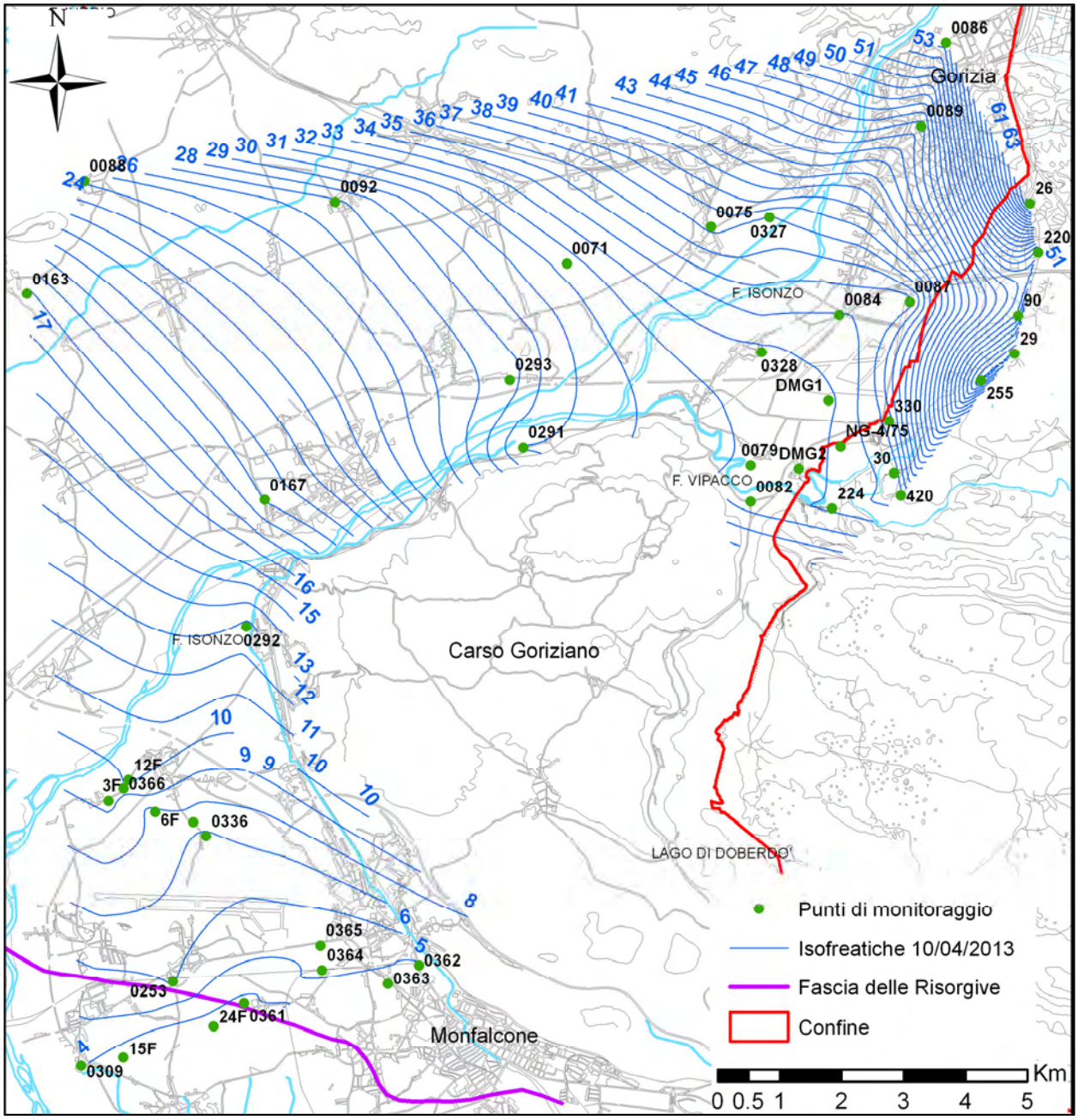
CARTA DELLE ISOFREATICHE

26-27/03/2013



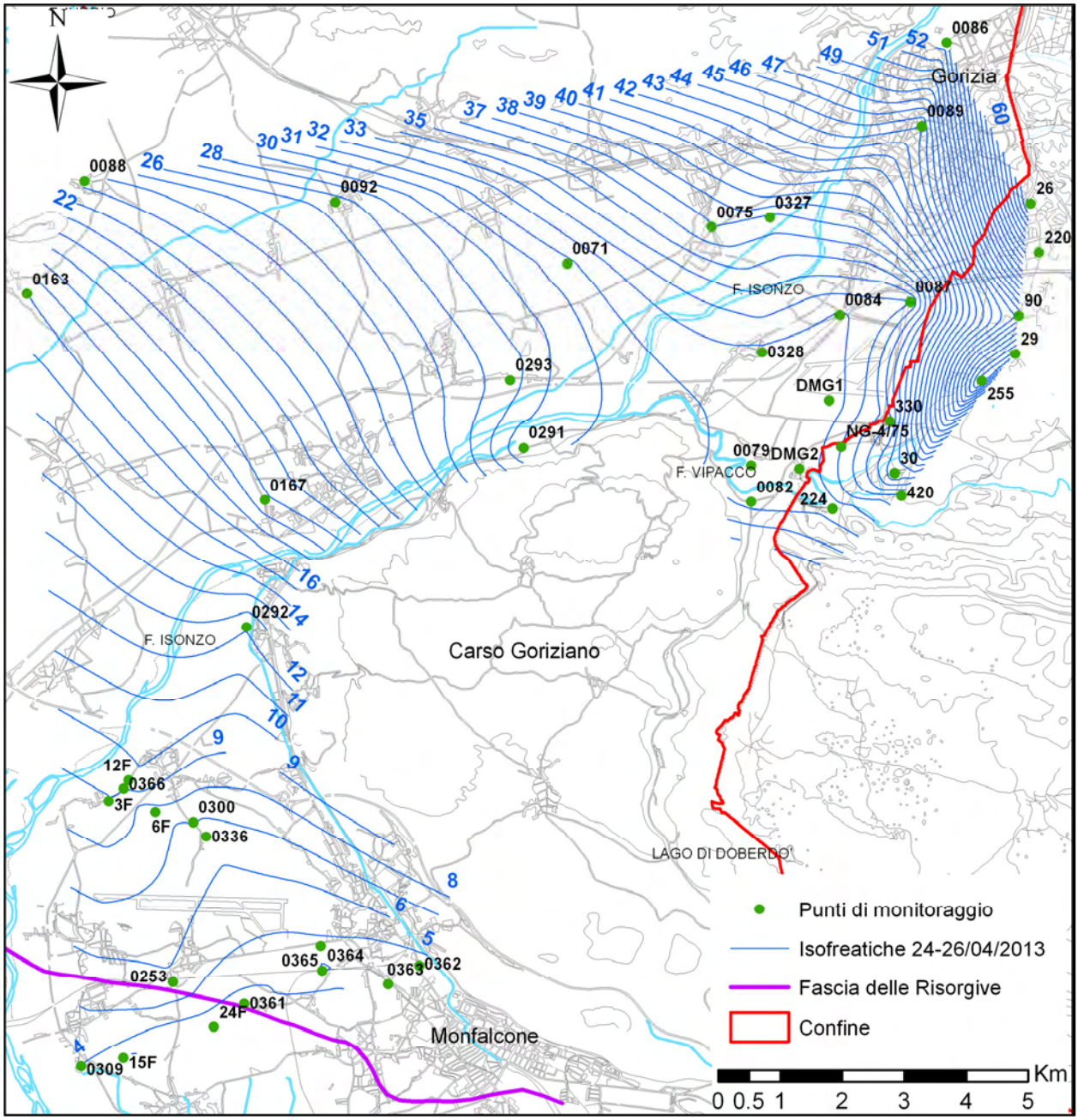
CARTA DELLE ISOFREATICHE

10/04/2013



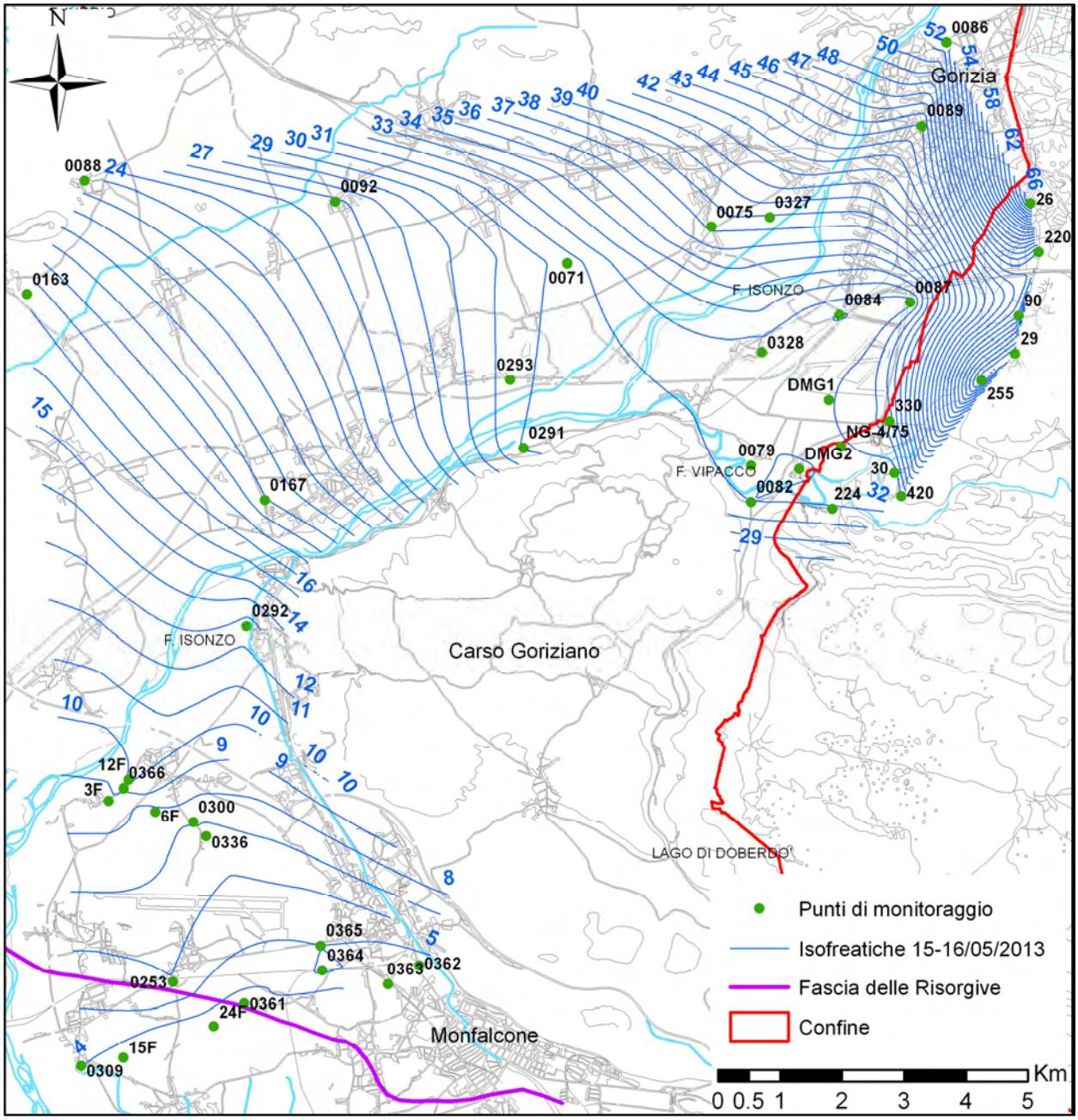
CARTA DELLE ISOFREATICHE

24-26/04/2013



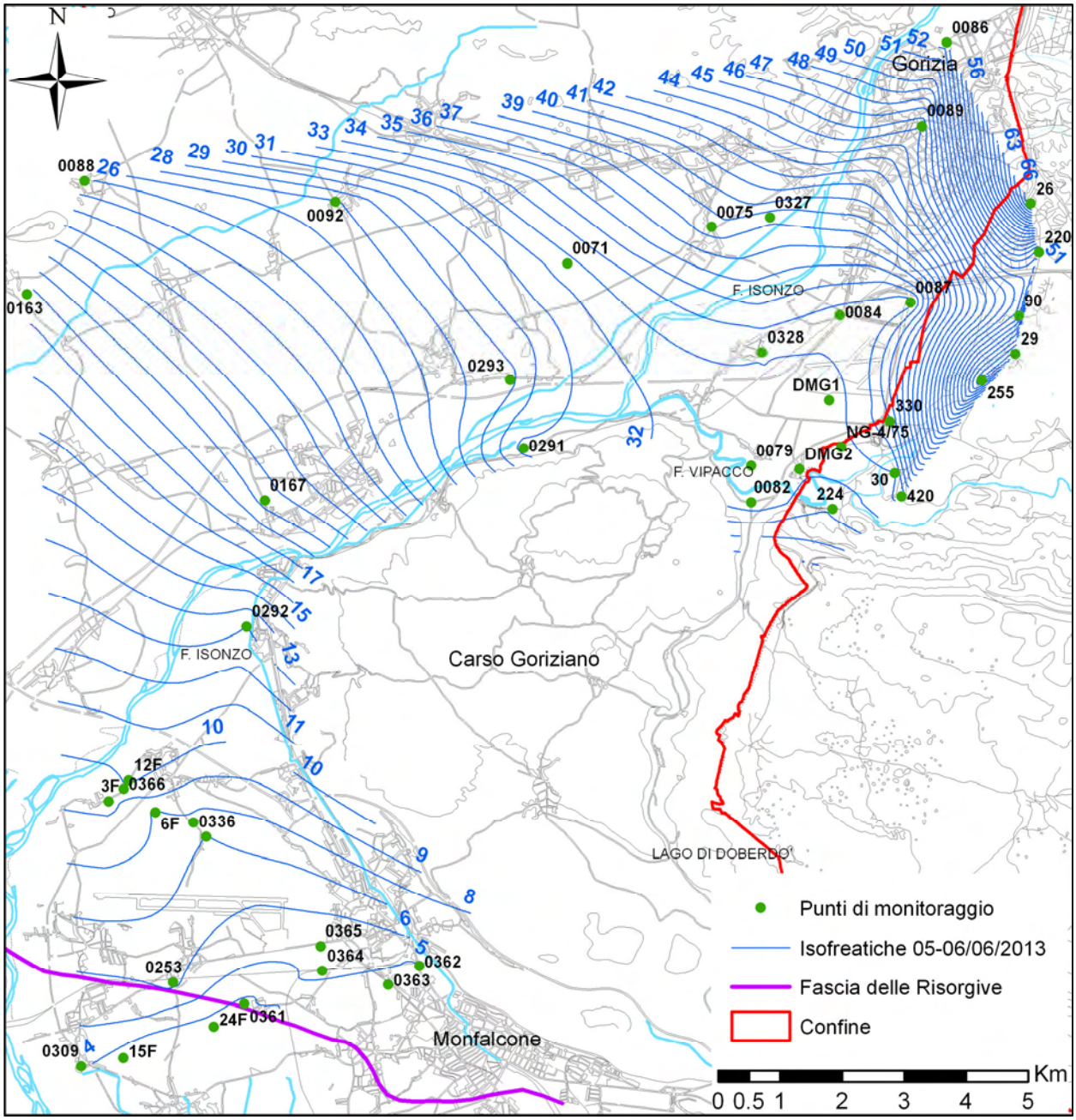
CARTA DELLE ISOFREATICHE

15-16/05/2013



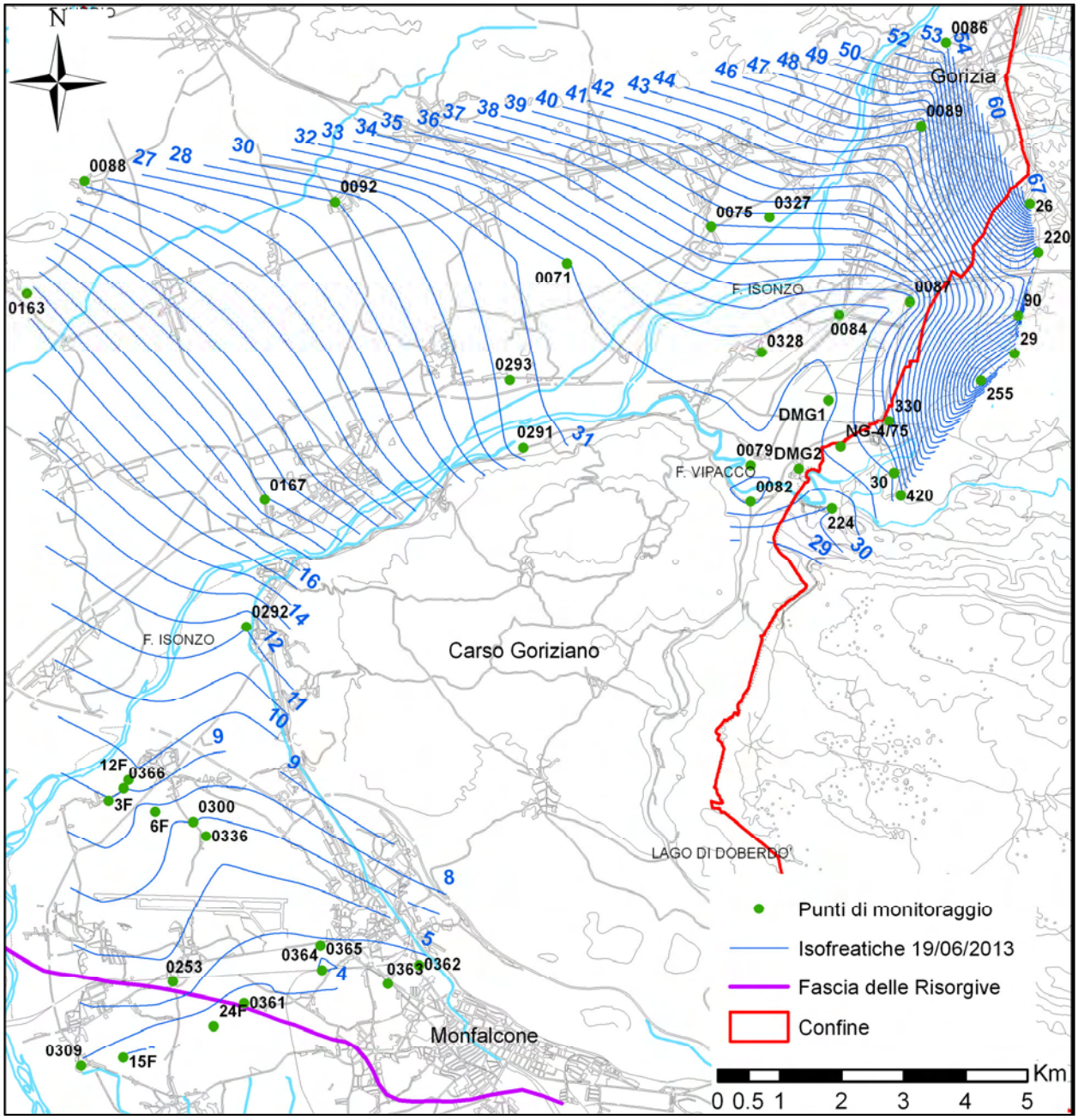
CARTA DELLE ISOFREATICHE

05-06/06/2013



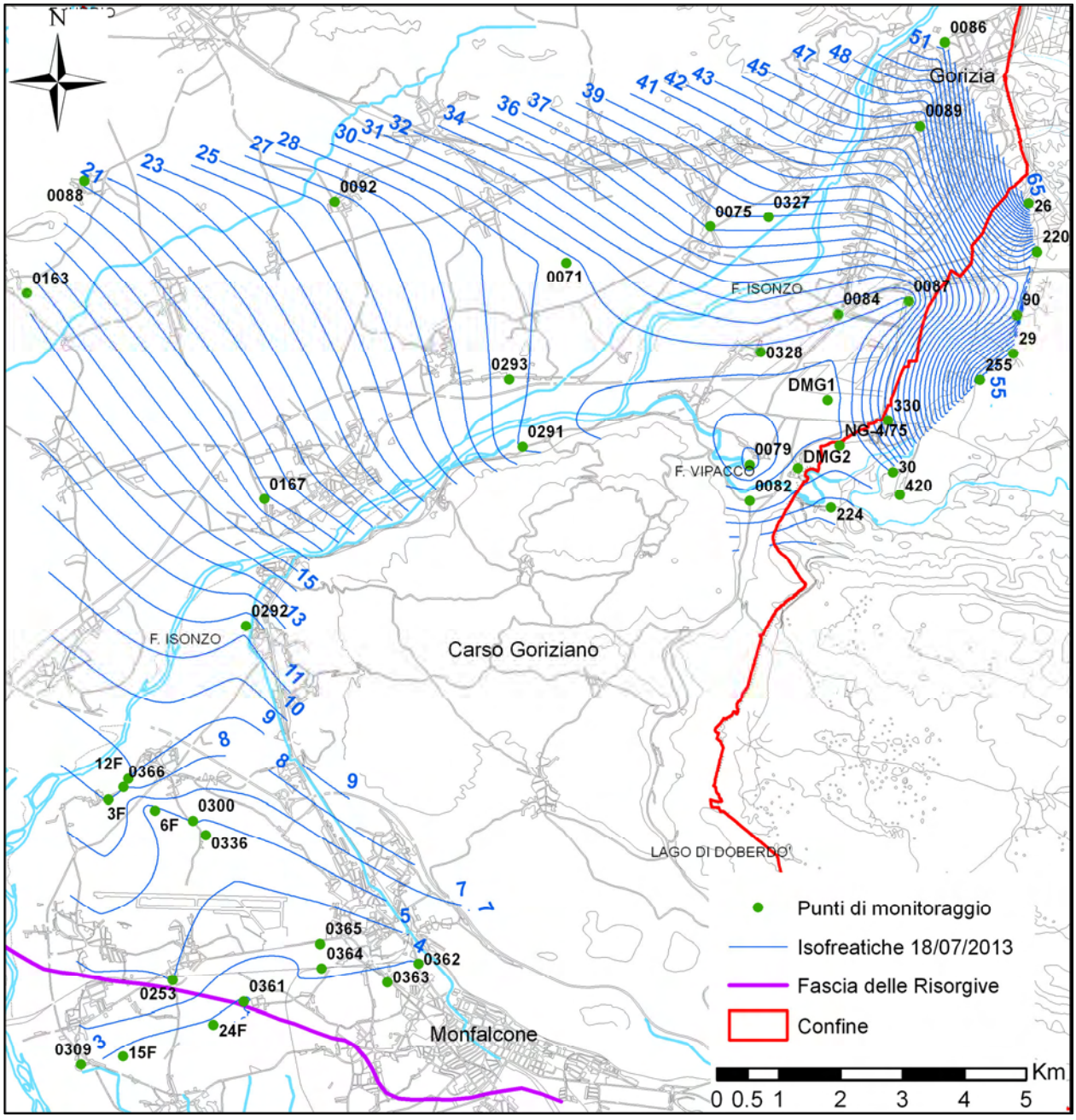
CARTA DELLE ISOFREATICHE

19/06/2013



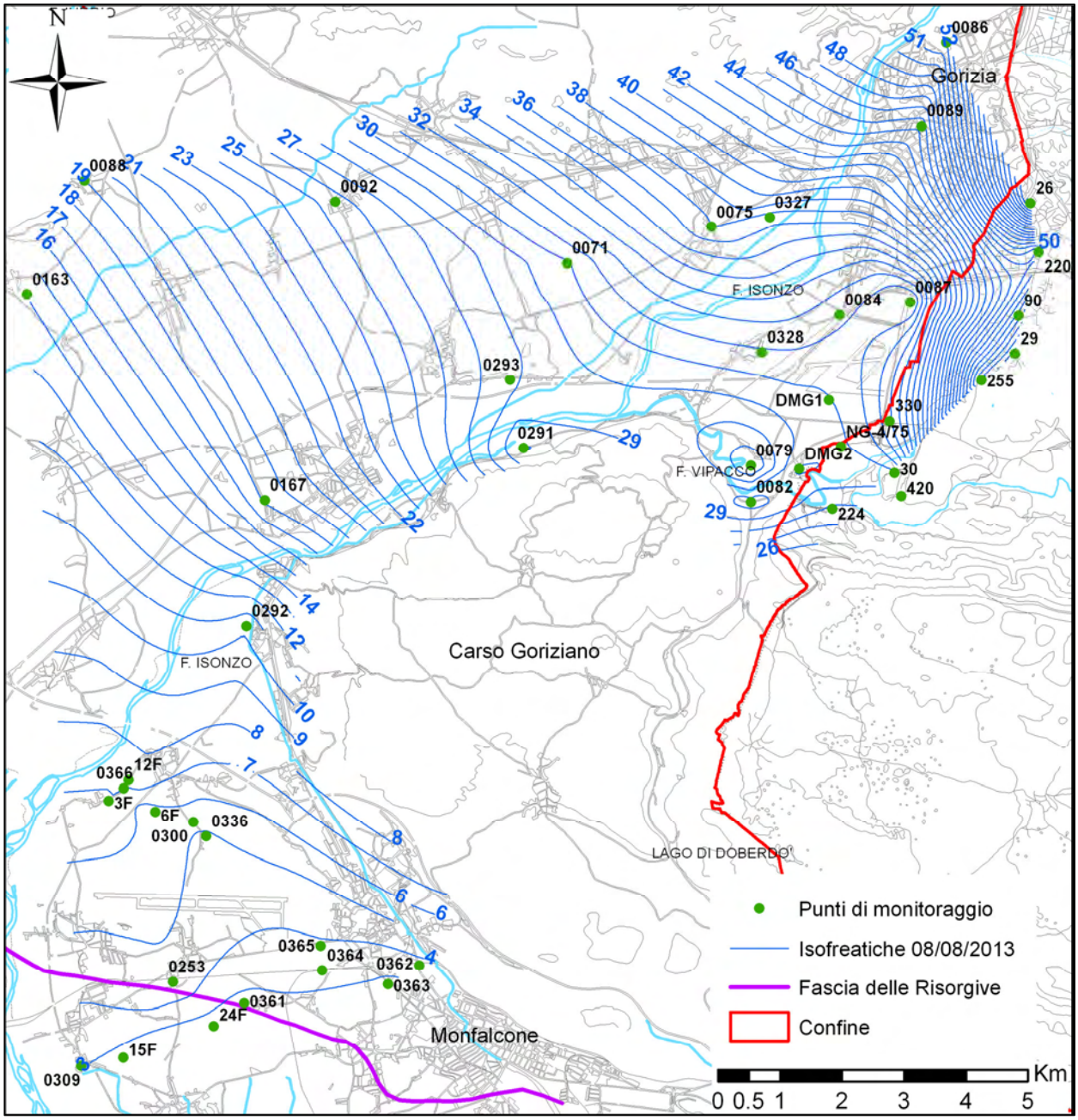
CARTA DELLE ISOFREATICHE

18/07/2013



CARTA DELLE ISOFREATICHE

08/08/2013



Tutte le carte con la ricostruzione della superficie freatica sono caratterizzate da una geometria della falda molto simile. Dalla loro analisi risulta evidente che l'alimentazione della falda freatica della Piana Isontina avviene principalmente a carico delle perdite di subalveo dell'Isonzo, indicate da chiare inflessioni delle isolinee lungo tutto il suo corso, da Gorizia, fino alla zona a sud di Gradisca d'Isonzo.

All'estremo orientale dell'area in esame la falda è alimentata dagli acquiferi competenti ai rilievi collinari in flysch, le linee isofreatiche risultano qui estremamente ravvicinate, ad indicare gradienti della superficie freatica molto elevati, attorno a 0.014-0.017. I gradienti così elevati sono la conseguenza del brusco approfondimento del substrato, che sostiene la falda, al di sotto della coltre alluvionale. In quest'area si riscontrano i valori di livello maggiori, con punte che toccano quasi i 55 m s.l.m.m. nella zona settentrionale di Gorizia e superano i 69 m s.l.m.m. in territorio sloveno. Le isolinee indicano una direzione di deflusso sotterraneo da NE verso SO nella zona di Gorizia e da est verso ovest nell'area slovena. Spostandosi leggermente verso ovest, nell'area a sud di Gorizia, le isofreatiche presentano delle prominenti inflessioni che denotano direzioni di deflusso convergenti verso una fascia di drenaggio, che si estende fino alla zona di Savogna d'Isonzo, lungo il cosiddetto Vallone di Gorizia. In quest'area di forte depressione della superficie freatica, l'andamento delle isolinee evidenzia un chiaro deflusso delle acque di falda verso il Carso Goriziano. Non essendoci fattori morfologici evidenti in superficie e non avendo riscontrato l'esistenza di altri agenti in grado di determinare il drenaggio delle acque di falda verso questa zona, si può ipotizzare che esso sia guidato dal substrato. In particolare il convoglio delle acque e il rapporto tributario della falda nei confronti del Carso potrebbero essere determinati dall'eventuale esistenza di una paleoincisione fluviale.

Nella porzione centro-occidentale dell'area di studio le isofreatiche assumono un andamento più regolare, indicando una direzione di deflusso prevalente da NE verso SO. Qui i gradienti sono decisamente minori, attorno a 0.002, ed i livelli di falda presentano valori via via decrescenti, da circa 40 m

s.l.m.m., a NE nella zona di Lucinico, a circa 15 m s.l.m.m. a SO lungo la fascia Medea-Gradisca d'Isonzo (questi valori variano leggermente a seconda della carta presa in esame).

Nella porzione di pianura sud-occidentale le isofreatiche ruotano gradualmente, passando dall'andamento NO-SE della zona appena descritta, ad un netto andamento ovest-est all'altezza di Villesse. Ciò sta ad indicare che in questa zona la falda comincia a ricevere apporti d'acqua anche da parte del sistema Torre-Natisone, ed il deflusso sotterraneo assume quindi una direzione prevalente nord-sud. Il livello di falda decresce spostandosi dalla fascia Medea-Gradisca d'Isonzo (15 m s.l.m.m. circa), fino alle Risorgive, dove assume valori attorno a 3 m s.l.m.m..

Studiando più nel dettaglio le singole carte e soprattutto quelle costruite per le situazioni di massimo e di minimo della falda, si può notare che le variazioni più significative nelle isofreatiche si hanno proprio nella zona di drenaggio a sud di Gorizia. Nella situazione di minimo dell'8 agosto 2013 la depressione della tavola d'acqua in questa zona risulta molto più accentuata, specialmente a ridosso del Carso, nella zona dell'abitato di Peci, dove le isofreatiche si chiudono a cerchio attorno al pozzo 0079 (situazione che si nota bene anche nelle carte del 5 giugno 2012 e del 18 luglio 2013), e nella zona del cimitero di Gorizia. È da evidenziare inoltre che è proprio in quest'area che si trovano i pozzi che durante quest'ultima campagna di misura sono risultati in secca (pozzi 0084 nella zona industriale di Gorizia e 0328 nell'abitato di Scariano). Osservando la carta delle isofreatiche del 5-6 giugno 2013 (situazione di massimo impinguamento), si nota che nella zona in questione le isolinee assumono un andamento meno arcuato e la depressione della superficie freatica nell'intorno dell'abitato di Peci appare decisamente meno marcata. I pozzi 0079, 0082, DMG2, NG-4/75 e DMG1, collocati nell'area compresa tra Savogna d'Isonzo e Miren, più vicina al Carso, presentano livelli prossimi a 32 m s.l.m.m., ad indicare una probabile alimentazione della falda da parte del Vipacco, che in questa zona è a quote comprese tra 33 e 34 m s.l.m.m..

3.3 Monitoraggio in continuo

In territorio sloveno è presente una rete di monitoraggio per la misura in continuo del livello freatico e dei parametri di conducibilità elettrica e temperatura dell'acqua di falda. I pozzi utilizzati per il monitoraggio sono attrezzati con data logger GSR 120NTG che misurano, ad intervalli regolari di 1 ora, il livello di falda, con una precisione di 1 cm ed un errore <0.2%, la conducibilità elettrica in un range da 10 a 2000 μS/cm, con precisione di 1 μS/cm ed un errore <0.2%, e la temperatura dell'acqua tra 0 e 70°C, con precisione di 0.1°C. Questa rete di monitoraggio comprende i pozzi:

- 90 ubicato a Vrtojba (periodo di monitoraggio: 22/09/2011 - 07/08/2013);
- 330 ubicato a Miren (periodo di monitoraggio: 04/09/2012 - 03/07/2013);
- 420 ubicato a Orehovlje (periodo di monitoraggio: 23/08/2012 - 03/07/2013);
- NG-4/75 ubicato a Miren (periodo di monitoraggio: 23/08/2012 - 04/02/2013).

Purtroppo i dati di conducibilità elettrica e temperatura non sono al momento in nostro possesso.

Al fine di ricostruire e valutare al meglio le variazioni della superficie freatica nel tempo questa rete di monitoraggio è stata integrata in territorio italiano, attrezzando dei pozzi con sonde multiparametriche immergibili CTD Diver. Queste sonde sono prodotte dalla Eijkelkamp Agrisearch Equipment® e distribuite in Italia dalla Ecosearch®. Esse sono in grado di misurare in continuo le variazioni di conducibilità elettrica con precisione di 1 μS/cm, temperatura con precisione di 0.01°C e pressione idrostatica esercitata dalla colonna d'acqua soprastante con precisione di 0.1 mbar. L'accuratezza nelle misure di conducibilità elettrica dipende dal tipo di calibrazione che è stata utilizzata per lo strumento. Maggiore è la differenza tra la conducibilità elettrica dell'acqua monitorata e quella della soluzione di calibrazione, maggiore è l'errore. Mentre, per quanto riguarda la pressione, l'errore è tanto più elevato quanto maggiore è l'intervallo di misura per cui è stato costruito lo strumento; in genere si aggira

attorno allo 0.1%. Le sonde CTD Diver sono costituite da un sensore di pressione, da un sensore termico, da quattro elettrodi per la misura della conducibilità elettrica, da una unità di memoria per il salvataggio dei dati e da una batteria. Il livello di falda è determinato per via indiretta come differenza tra la pressione idrostatica misurata dallo strumento immerso e la pressione atmosferica. Assumendo che alla pressione di 1 bar corrisponde una colonna d'acqua dell'altezza di 10 m, il risultato di questa operazione in mbar dà l'altezza della colonna d'acqua soprastante lo strumento in cm. Per la misura della pressione atmosferica viene utilizzato un Baro Diver (barometro), posizionato fuori dall'acqua.

I pozzi monitorati in territorio italiano sono:

- 0167 ubicato a Gradisca d'Isonzo, in località Borgo Basiol, attrezzato con sonda CTD 88257, in grado di misurare la pressione [mbar] esercitata da una colonna d'acqua da 0 a 30 m d'altezza, la conducibilità elettrica in un range da 0.0 a 80.0 mS/cm e la temperatura dell'acqua [°C]. Durante il periodo di monitoraggio lo strumento ha eseguito misure ad intervalli regolari di 30 minuti dal 10/04/2013 al 05/06/2013, e ogni 5 minuti dal 05/06/2013 all' 08/08/2013.
- 0292 ubicato a Fogliano Redipuglia, in località Le Giarine, attrezzato con sonda CTD L2384, in grado di misurare la pressione [mbar] esercitata da una colonna d'acqua da 0 a 20 m d'altezza e la temperatura dell'acqua [°C]. Durante il periodo di monitoraggio, dal 05/06/2013 all'08/08/2013, lo strumento ha effettuato le misure ad intervali regolari di 5 minuti.
- 0328 ubicato a Savogna d'Isonzo, in località Scariano, attrezzato con sonda CTD 10928, poi sostituita con M4986. Entrambi gli strumenti sono in grado di misurare la pressione [mbar] esercitata da una colonna d'acqua da 0 a 10 m, la conducibilità elettrica in un range da 0.0 a 20.0 mS/cm e la temperatura dell'acqua [°C]. La sonda 10928 ha eseguito misure ad intervalli regolari di 30 minuti dal 10/04/2013 al 16/05/2013 ed è stata poi sostituita con la sonda M4986 che ha effettuato misure ogni 30 minuti dal 16/05/2013 al 05/06/2013 e ogni 5 minuti dal 05/06/2013 all'08/08/2013.

Poiché tra i tre punti di misura non vi è un gradiente topografico importante, è stato utilizzato un unico Baro Diver (H3433), posizionato a Gradisca d'Isonzo, ed i valori misurati di pressione atmosferica sono stati utilizzati per calcolare le altezze della colonna d'acqua anche nei pozzi di Fogliano e Savogna d'Isonzo.

In Figura 3.10 sono messe a confronto le variazioni relative di livello [m] registrate ogni mezz'ora ai pozzi di Gradisca d'Isonzo, Scariano e Fogliano Redipuglia durante il periodo di monitoraggio, con i valori delle precipitazioni piovose [mm] registrati ogni 30 minuti alla stazione pluviometrica di Gorizia Aeroporto, forniti dalla Protezione Civile FVG. I cerchi rossi sulle curve di livello dei pozzi di Scariano e Fogliano indicano dei bruschi salti di livello legati alle operazioni di scarico e salvataggio dei dati, per le quali è necessario estrarre momentaneamente la sonda dal pozzo e collegarla al computer.

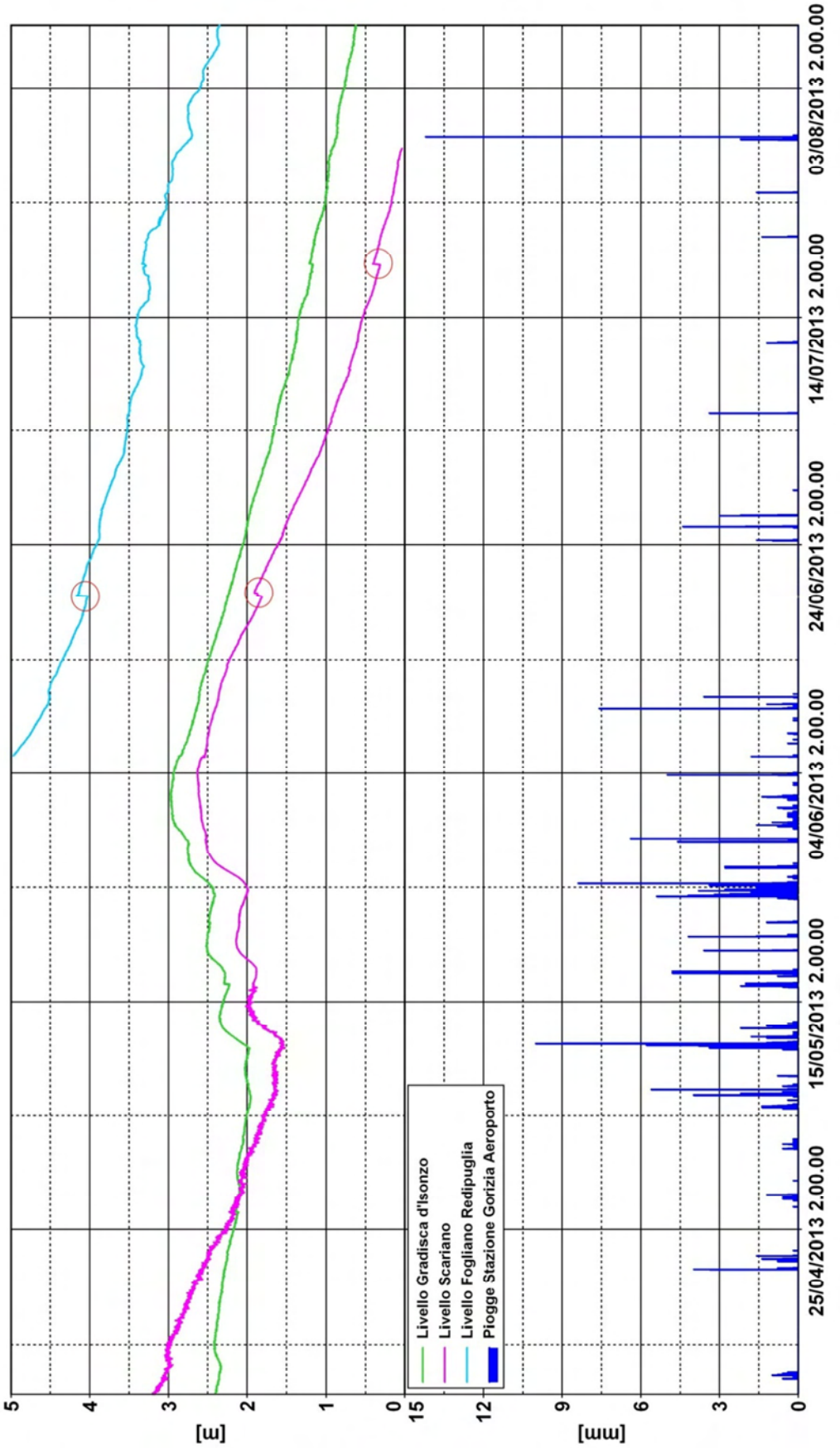


Figura 3.10: Variazioni relative di livello [m] registrate ogni 30 minuti nei pozzi di Gradisca d'Isonzo, Scariano e Fogliano Redipuglia, a confronto con le precipitazioni registrate ogni 30 minuti alla stazione pluviometrica di Gorizia Aeroporto.

Si può immediatamnete notare che l'andamento del livello di falda per i pozzi di Gradisca d'Isonzo e Scariano è molto simile. Inizialmente, durante il primo mese di monitoraggio, si riscontra per entrambi i pozzi una dimunuzione progressiva del livello, determinata dagli scarsi apporti d'acqua alla falda nel periodo dal 10/04/2013 al 05/05/2013, in cui le precipitazioni risultano piuttosto modeste. L'abbassamento del livello di falda è più marcato per il pozzo di Scariano, dove si registra una variazione di 1.64 m, mentre per quello di Gradisca d'Isonzo il livello si abbassa di circa 40 cm. In seguito alle piogge verificatesi nei giorni 5-8 maggio, i livelli di falda riprendono a salire, a partire dal 10 maggio, con un tempo di risposta quindi di circa 5 giorni. Il profilo degli idrogrammi appare molto smussato, con un aumento graduale del livello per entrambi i pozzi. Il valore di picco viene raggiunto in 2 giorni per il pozzo di Gradisca d'Isonzo ed in più di 3 per l'altro. Anche in questo caso si registra una variazione maggiore per il pozzo di Scariano (37 cm), che per quello di Gradisca d'Isonzo (28 cm). In seguito alle forti piogge che caratterizzano tutto il mese di maggio 2013 i livelli di falda continuano ad aumentare fino all'inizio di giugno. Si possono riconoscere almeno tre diverse curve di piena, caratterizzate grosso modo dallo stesso profilo smussato e dai medesimi tempi di risposta della falda ed aumenti di livello visti in precedenza. Per il pozzo di Gradisca d'Isonzo il livello sale fino al primo giugno, quando raggiunge un massimo che rappresenta anche il massimo valore di livello registrato durante l'intero periodo di monitoraggio, in buon accordo con quanto visto per le misure freatimetriche. Per quanto riguarda il pozzo di Scariano, invece, l'aumento di livello si arresta il 3 giugno, raggiungendo un valore inferiore a quello iniziale del 10 aprile. Le misure freatimetriche testimoniano infatti che tra fine marzo e metà aprile si sono registrati valori di livello superiori a quelli di giugno. Da inizio giugno, essendo anche le piogge decisamente più scarse, si assiste ad un abbassamento generale dei livelli di falda nei pozzi di Gradisca e di Scariano, ma anche nel pozzo di Fogliano, in cui lo strumento è stato installato il 5 giugno. I tre pozzi presentano un andamento analogo, ma mentre per i pozzi di Scariano e Gradisca d'Isonzo il livello decresce in modo quasi lineare, per il pozzo di Fogliano si registrano anche degli aumenti di livello

di piccola entità in seguito ad eventi piovosi. Si può notare che anche per questo pozzo la falda presenta un tempo di risposta di circa 5 giorni. È evidente che il livello di falda scende più rapidamente nel pozzo di Scariano, lasciandolo in secca il 28 luglio. Il livello scende più lentamente nel pozzo di Fogliano, dove si abbassa di circa 2.6 m nel periodo dal 5 giugno all'8 agosto, e in quello di Gradisca d'Isonzo, dove si registra una variazione di 2.35 m nel periodo dal primo giugno all'8 agosto.

Le Figure 3.11-3.13 riportano per ogni pozzo le variazioni relative di livello [m], le variazioni di conducibilità elettrica [μS/cm] e di temperatura [°C], registrate ogni 30 min, e le precipitazioni alla stazione pluviometrica di Gorizia Aeroporto ogni mezz'ora, durante il periodo di monitoraggio.

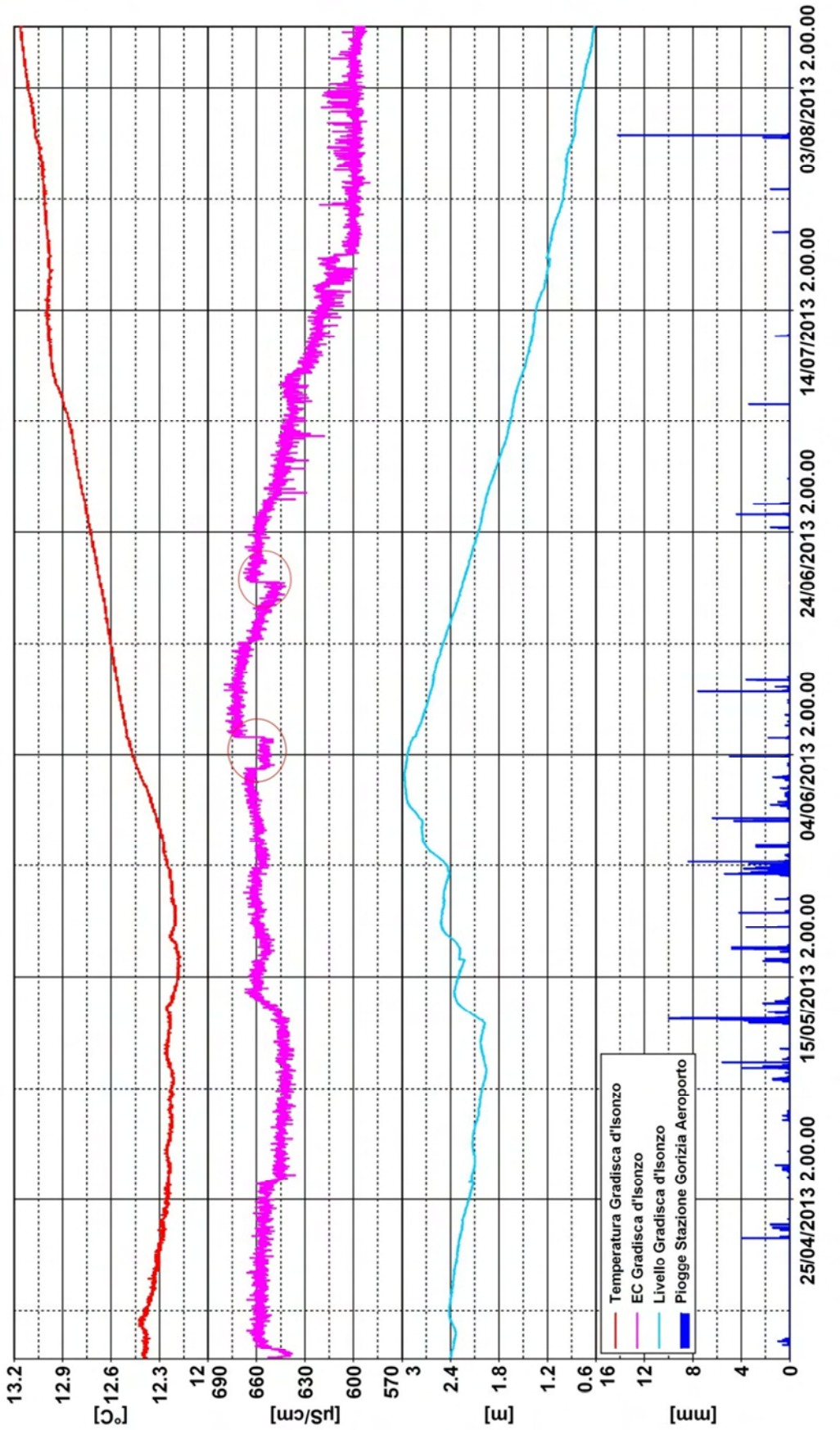


Figura 3.11: Variazioni di livello relative [m], di conducibilità elettrica [µS/cm] e di temperatura [°C] registrate ogni 30 minuti al pozzo di Gradisca d'Isonzo, in relazione alle piogge registrate alla stazione pluviometrica di Gorizia Aeroporto ogni mezz'ora. In rosso sono cerchiati dei bruschi salti nei valori di EC, legati alle operazioni di scarico e salvataggio dei dati.

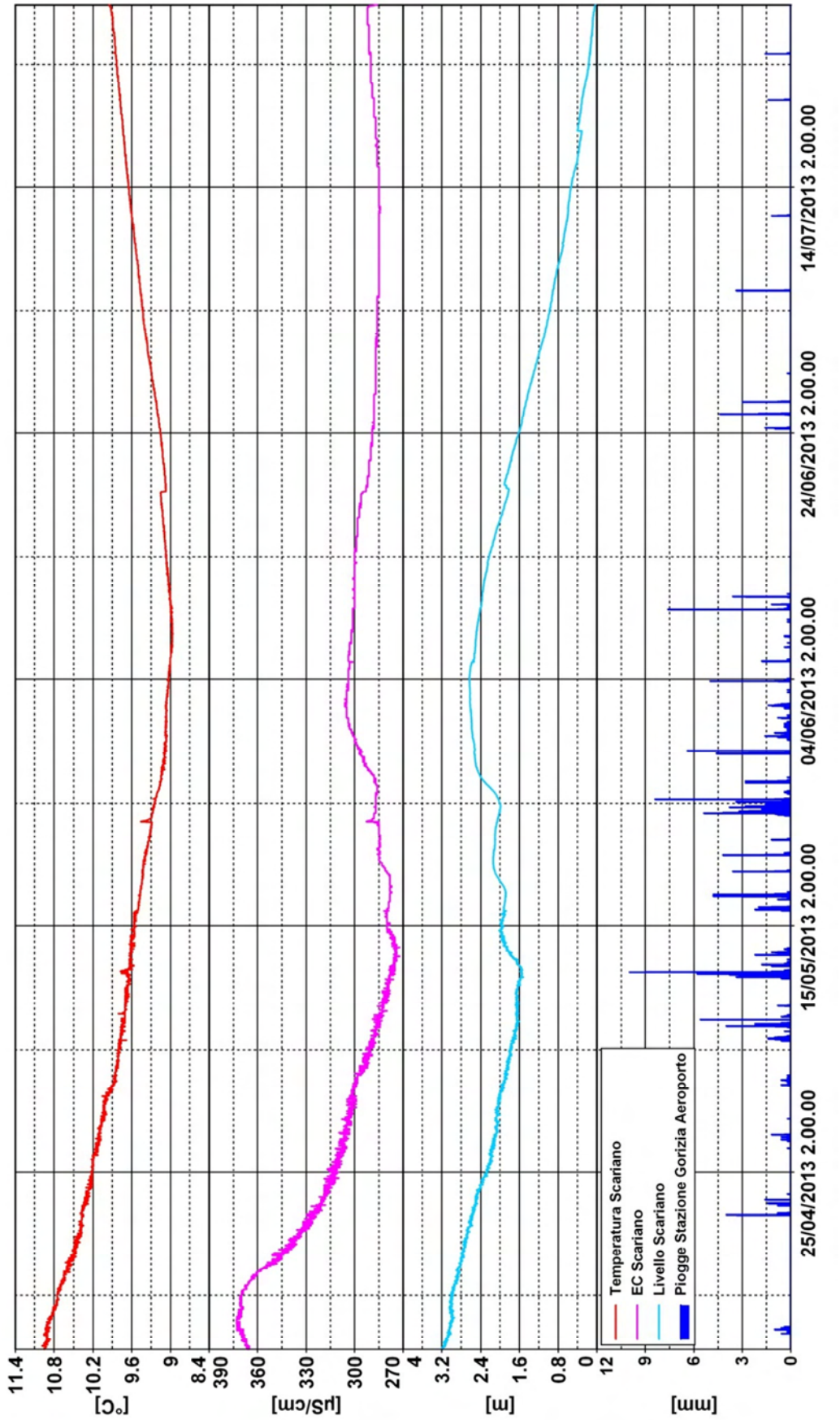


Figura 3.12: Variazioni di livello relative [m], di conducibilità elettrica [µS/cm] e di temperatura [°C] registrate ogni 30 minuti al pozzo di Scariano, in relazione alle piogge registrate alla stazione pluviometrica di Gorizia Aeroporto ogni mezz'ora.

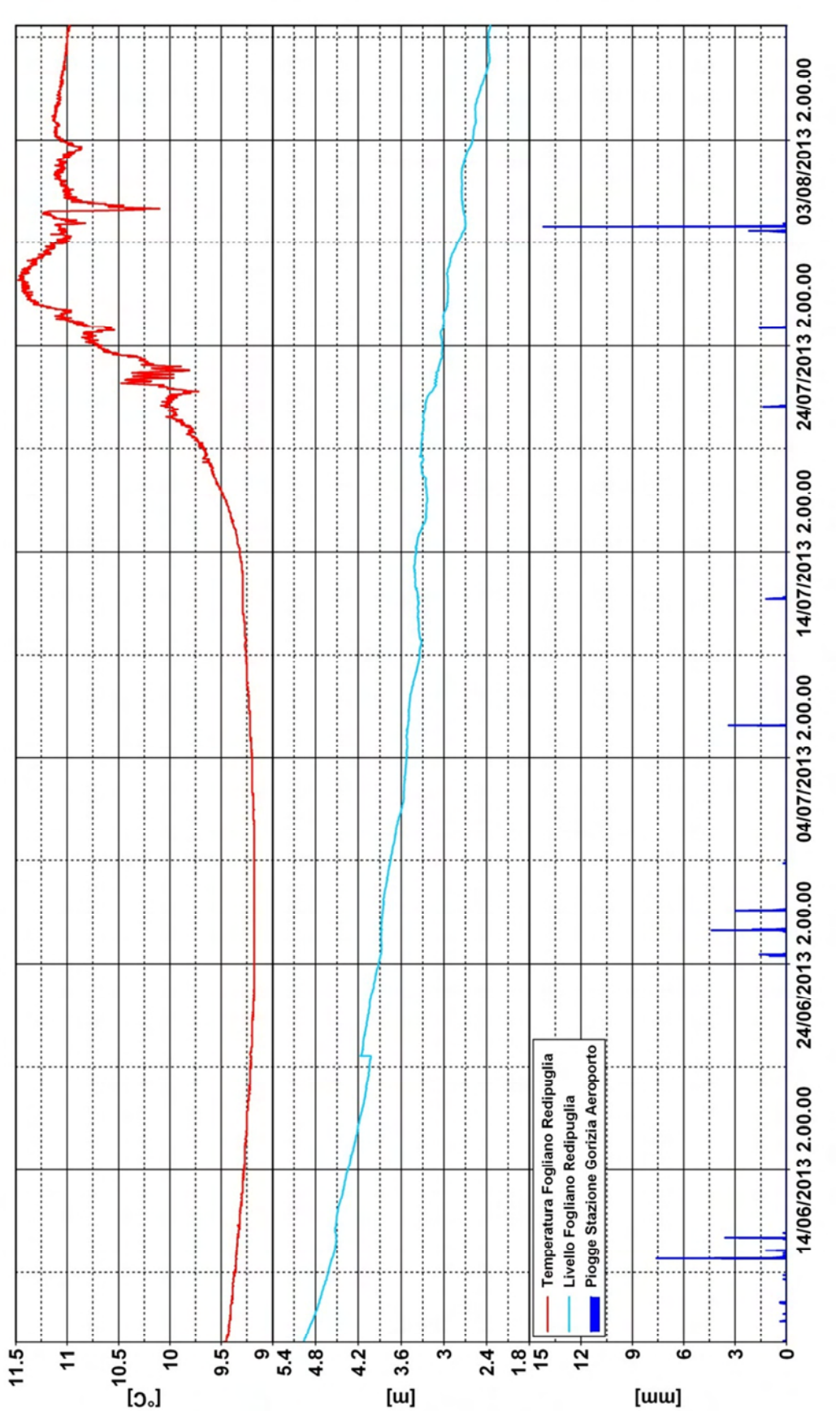


Figura 3.13: Variazioni di livello relative [m] e di temperatura [°C] registrate ogni 30 minuti al pozzo di Fogliano Redipuglia, in relazione alle piogge registrate alla stazione pluviometrica di Gorizia Aeroporto ogni mezz'ora.

Per quanto riguarda il pozzo di Gradisca d'Isonzo l'interpretazione delle variazioni della conducibilità elettrica (EC) risulta complessa per la presenza di errori strumentali, lagati alle operazioni di scarico dati. Dopo un'attenta osservazione del diagramma si può riconoscere un andamento generale che segue le variazioni di livello. Infatti durante il primo mese di monitoraggio, contemporaneamente all'abbassamento del livello di falda, si assiste ad una leggera diminuzione dei valori di EC, che risalgono poi con l'arrivo della prima piena. Il picco di conducibilità risulta comunque leggermente sfalsato rispetto a quello di livello. La conducibilità elettrica continua ad aumentare parallelamente al livello fino a circa il 5 giugno (poco dopo il massimo di livello), dove raggiunge i 675 μS/cm. Quindi segue la discesa di livello, giungendo ad un valore di circa 600 μS/cm l'8 agosto. La temperatura varia in modo abbastanza graduale e mostra un andamento discendente fino al 14/05/2013, partendo da 12.39°C e toccando un minimo di circa 12.2°C, quindi prende a risalire fino all'8 agosto, dove raggiunge i 13.15°C. Questo andamento è principalmente legato alla stagionalità, che con l'arrivo dei mesi più caldi porta ad un aumento nella temperatura delle acque che alimentano la falda.

Anche per il pozzo di Scariano la conducibilità elettrica presenta un andamento analogo al livello di falda. In questo caso però la diminuzione iniziale di EC è più marcata, passando da un massimo di 373 μS/cm il 12 aprile, ad un minimo di 272 μS/cm il 12 maggio. La conducibilità inizia ad aumentare con la prima piena e continua a seguire l'andamento del livello, fino a raggiungere un valore di circa 305 μS/cm in corrispondenza del massimo di livello dopo le precipitazioni. Quindi, come già visto per il livello, anche per la conducibilità elettrica i massimi valori si registrano nel mese di aprile, all'inizio del periodo di monitoraggio. Quando il livello di falda riprende ad abbassarsi, viene inizialmente seguito dalla conducibilità, che diminuisce fino a circa l'8 luglio, toccando valori attorno a 285 μS/cm, mentre nell'ultimo periodo di monitoraggio mostra un lieve aumento dei valori, fino ai 292 μS/cm del 28 luglio. La temperatura varia in modo abbastanza graduale e mostra un andamento discendente fino al 06/06/2013, parallelamente alle diminuzioni di livello e conducibilità, partendo da 10.96°C e

toccando un minimo di 8.98°C. Quindi prende a risalire fino al 28 luglio, raggiungendo un valore di 9.95 °C. Anche per la temperatura, dunque, i massimi valori si registrano nel mese di aprile, all'inizio del periodo di monitoraggio. Le variazioni di temperatura sono dovute principalmente all'effetto stagionalità, che determina un cambiamento nella temperatura delle acque di alimentazione. La tempertura dell'acqua di falda in questo caso potrebbe anche essere in parte influenzata dalla temperatura dell'aria, trattandosi di un pozzo a grande diametro, non isolato dall'esterno.

Per quanto riguarda il pozzo di Fogliano Redipuglia si possono analizzare solamente le variazioni di temperatura in relazione al livello e alle precipitazioni. Inizialmente la temperatura mostra una lieve diminuzione, parallelamente all'abbassamento di livello, ma presto si arresta, assestandosi su un valore di 9.18°C il 22 giugno e mantenendosi costante fino al 3 luglio. Quindi inizia ad aumentare, prima in modo graduale, poi più rapidamente, fino a raggiungere circa 10°C il 20/07/2013. Da qui prosegue ad aumentare rapidamente, ma in seguito agli eventi piovosi del 21 e 24 luglio si registrano anche delle momentanee diminuzioni dell'ordine di qualche decimo di °C. Queste variazioni di temperatura si registrano a distanza di qualche ora dalle precipitazioni. Raggiunto il massimo valore, pari a 11.48°C il 27/07/2013, la temperatura comincia a diminuire mostrando dei bruschi salti in seguito alle precipitazioni del 29 luglio. Alla fine la temperatura si assesta su un valore di 11°C.

Nella Figura 3.14 viene riportato l'andamento del livello di falda [m slmm] registrato per i pozzi ubicati in territorio sloveno, durante il periodo di monitoraggio.

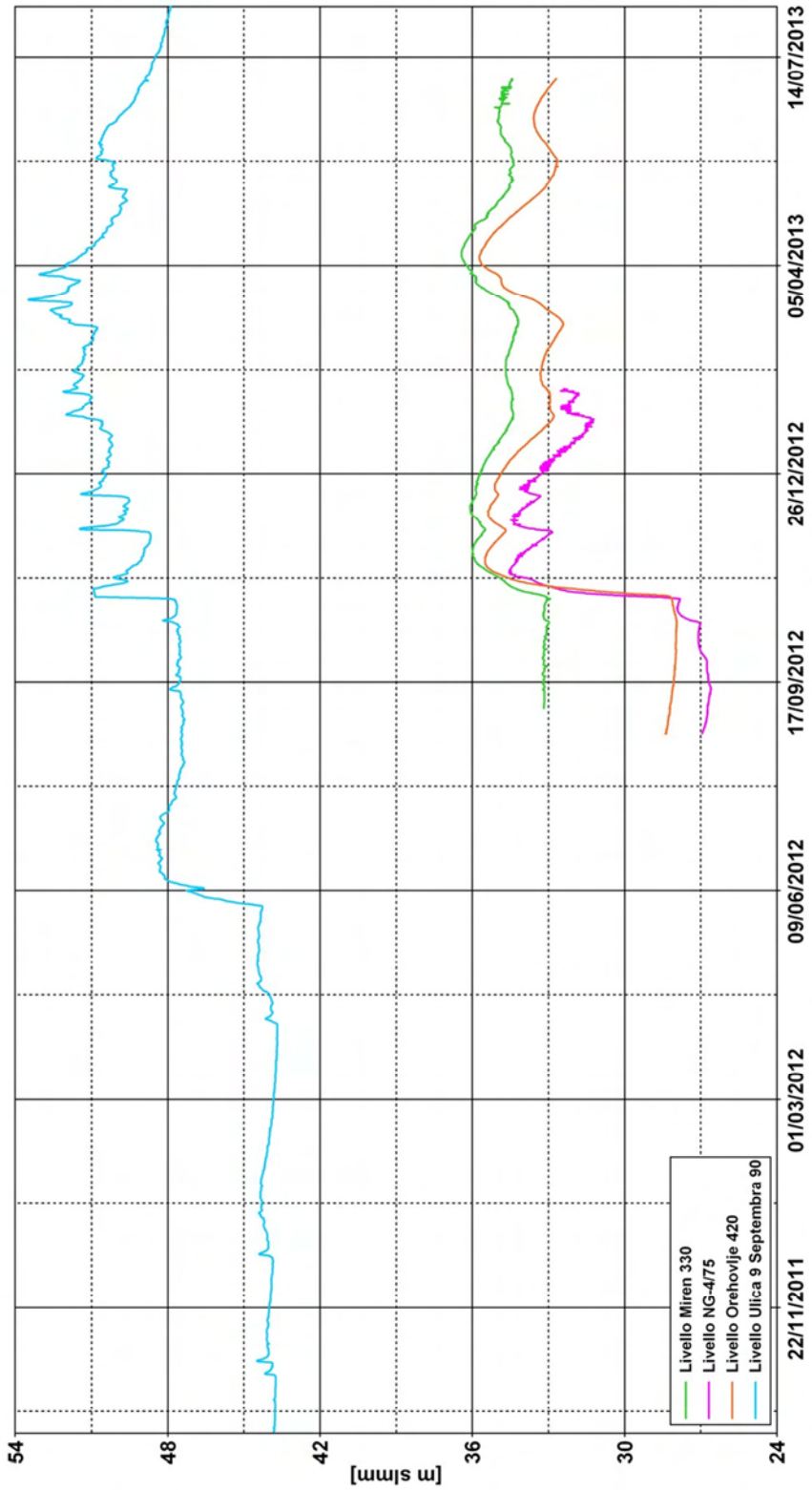


Figura 3.14: Variazioni del livello di falda [m slmm], registrate ogni ora, nei pozzi 330, NG-4/75, 420 e 90, ubicati in territorio sloveno.

I pozzi 330, NG-4/75 e 420, piuttosto vicini tra loro, presentano un andamento del livello di falda estremamente simile. Per i pozzi 330 e 420 il livello si mantiene pressoché costante fino al 24 ottobre 2012, mentre per il pozzo NG-4/75 il livello è in leggera risalita e, a partire dall''11/10/2012, si registra una curva di di piena, a seguito probabilmente di un evento piovoso, che provoca una variazione di livello di 60 cm circa. Quindi in tutti e tre i pozzi si verifica un rapido e consistente innalzamento di livello. Il pozzo NG-4/75 mostra le variazioni più rapide e marcate, passando da un valore di 27.91 m slmm il 24 ottobre ad un valore di 34.37 m slmm l'11 novembre. L'idrogramma del pozzo 420 mostra un profilo leggermente più smussato, partendo da un valore di circa 28 m slmm il 24 ottobre e raggiungendo un valore di picco di 35.54 m slmm al 12 novembre 2012. Per il pozzo 330 le variazioni di livello sono decisamente più contenute e la curva presenta un profilo più dolce: il livello passa da un valore di 33.13 m slmm il 24/10/2012 ad uno di 35.90 m slmm registrato il 15 novembre. In seguito a questa prima piena se ne registrano altre due, di minore entità, anche se il livello tende complessivamente a diminuire in tutti e tre i pozzi. Le variazioni appaiono sempre più rapide e marcate per il pozzo NG-4/75, un po' meno per il pozzo 420 e decisamnete più modeste e smussate per il pozzo 330. Al termine della terza piena il livello scende in tutti e tre i pozzi fino al 17/01/2013, quando per il pozzo NG-4/75 si registra una curva di piena che porta ad un innalzamento di livello di circa 40 cm, mentre per gli altri pozzi risulta appena accennata. Al termine di questo evento, a partire dal 3 febbraio, si verifica un ulteriore innalzamento di livello, piuttosto deciso per il pozzo NG-4/75, meno evidente per gli altri 2. Con il 4 febbraio termina il periodo di monitoraggio del pozzo NG-4/75. Esaurita l'ultima piena, a partire dal 5 marzo, nei due pozzi rimanenti si assiste a due successivi fenomeni di innalzamento del livello di falda, il primo dei quali fa registrare nelle date del 5 e 6 giugno i massimi valori di livello raggiunti all'interno dell'intero periodo di monitoraggio (35.60 m slmm per il pozzo 420, 36.33 m slmm per il pozzo 330).

I dati di livello del pozzo 90 si riferiscono ad un periodo di monitoraggio più lungo. Dal 22/09/2011 al 29/05/2012 il livello si mantiene su valori pressoché

costanti, mostrando talvolta piccole e rapide variazioni. In seguito si registra un consistente incremento di livello, che si protrae fino al 18 giugno, raggiungendo un valore massimo di circa 48.30 m slmm. Da qui il livello si abbassa lievemente, per poi assestarsi su un valore attorno a 47.50 m slmm fino al 21/10/2012 e mostrando solamente piccole e rapide variazioni. Giunti quindi nel periodo di monitoraggio che si sovrappone con gli altri pozzi, si può notare che anche per il pozzo 90 si registrano degli importanti innalzamenti di livello a partire dal 23 ottobre, ma i profili delle curve di piena si differenziano notevolmente da quelli degli altri tre pozzi, di forma tipcamente a campana. Nel caso del pozzo 90 la falda risponde in modo estremamente rapido, presentando un ramo ascendente dell'idrogramma quasi verticale, quindi, raggiunto il valore di picco, il livello scende rapidamente.

Mettendo a confronto le variazioni di livello registrate nei pozzi situati in Slovenia con quelle registrate per i pozzi di Gradisca, Scariano e Fogliano, nel periodo di monitoraggio comune (Figura 3.15), si può notare che l'drogramma del pozzo 90 è più simile a quelli tracciati per pozzi in territorio italiano. I livelli infatti mostrano lo stesso andamento, con curve di piena praticamente contemporanee, anche se dal profilo molto meno smussato nel caso del pozzo 90. Le curve relative ai pozzi 330 e 420, come già descritto, presentano invece un andamento decisamente diverso, con massimi di parecchio sfalsati rispetto agli altri pozzi. Queste differenze fanno pensare che per i pozzi italiani sia prevalente l'influsso da parte dell'Isonzo, mentre per i pozzi 330 e 420 risulti dominante quello del Vipacco, essendo situati in prossimità del suo corso. Per quanto riguarda il pozzo 90, considerata la sua ubicazione, più distante dal corso dell'Isonzo, è da chiarire se le variazioni di livello siano influenzate dal regime fluviale, o se seguano piuttosto gli impulsi delle precipitazioni.

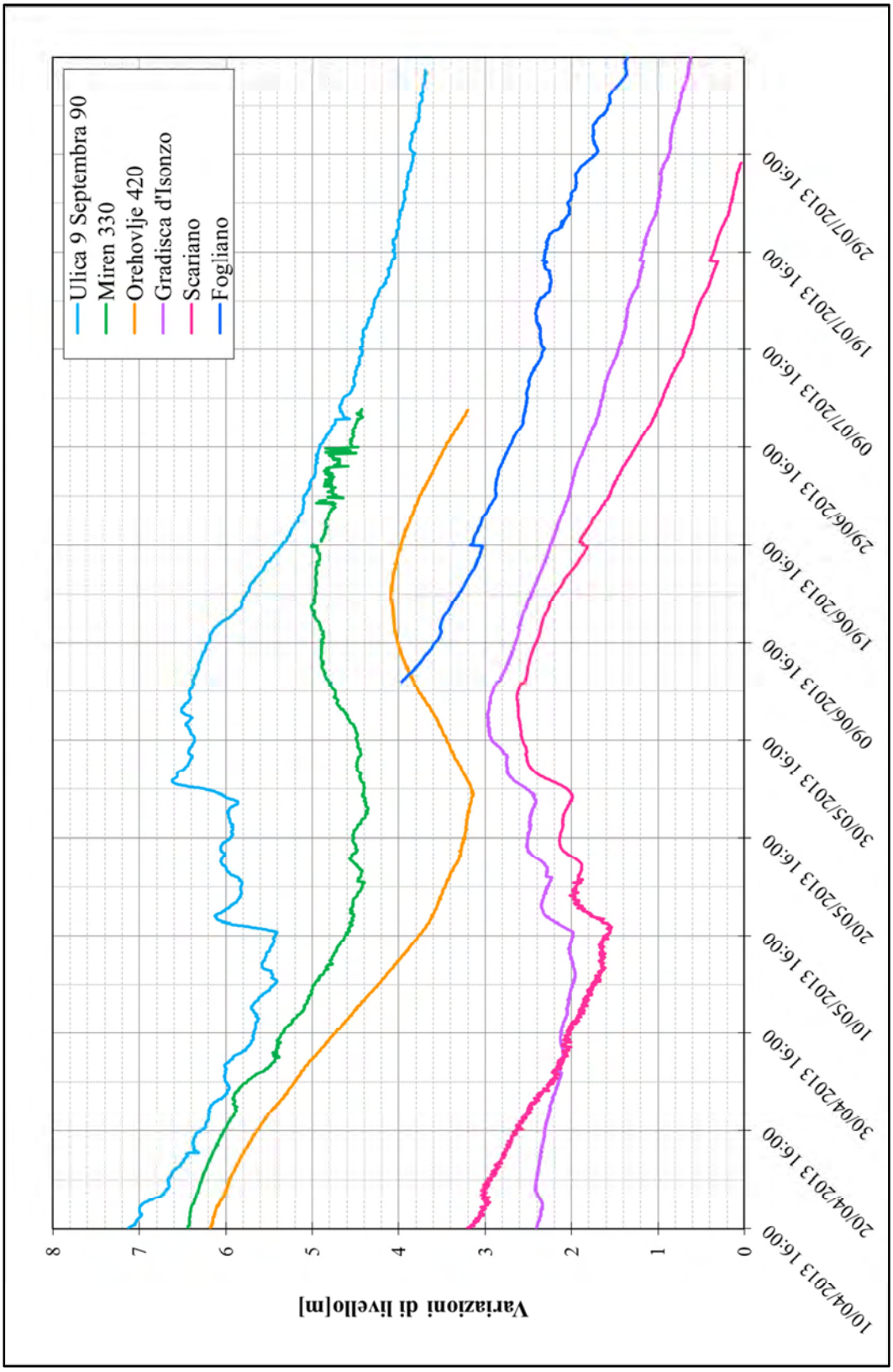


Figura 3.15: Variazioni relative di livello [m] registrate ogni ora nei pozzi in territorio italiano (0167, 0292 e 0328) a confronto con quelle registrate nei pozzi ubicati in territorio sloveno (90, 330 e 420).

3.4 Analisi di serie storiche dei livelli di falda

Al fine di valutare le massime escursioni di livello, identificare eventuali trend e collocare il lavoro eseguito nella seguente tesi in un contesto temporale più ampio, sono state esaminate delle serie storiche di dati di livello relativi ad 8 pozzi, distribuiti tra Alta e Bassa Pianura Isontina (Figura 3.16). Tutti i pozzi considerati fanno parte della rete di monitoraggio regionale e sono stati utilizzati nel corso delle misure freatimetriche eseguite nell'ambito di questo lavoro. I dati presi in esame, forniti dal Servizio Idrografico FVG, coprono il periodo dal 1970 al 2012 per i pozzi 0075, 0079, 0087 e 0089, dal 1978 al 2012 per il pozzo 0092, dal 1979 al 2012 per il pozzo 0167 e dal 1985 al 2012 per i pozzi 0253 e 0300. Alcuni intervalli risultano scoperti a causa dell'interruzione del monitoraggio. In Figura 3.17 sono riportati gli andamenti dei livelli registrati per i diversi pozzi. Risulta da subito evidente come i massimi e minimi di livello si presentino in modo simultaneo nelle diverse serie, con picchi praticamente sovrapponibili. L'andamento appare piuttosto diversificato per i diversi anni, ma si può notare che i massimi valori di livello delle serie si concentrano principalmente nel periodo ottobre-dicembre.

A due a due i pozzi presentano delle serie con variazioni di livello di entità comparabile. I pozzi 0079 e 0087 mostrano escursioni di livello decisamente più marcate rispetto agli altri. Essi sono ubicati nell'area che si estende a sud di Gorizia, fino a Savogna d'Isonzo, precedentemente identificata come una zona di drenaggio delle acque. Per i pozzi 0075 e 0089, che presentano i livelli più elevati, le escursioni appaiono invece più contenute. Per i pozzi 0092 e 0167, situati nella porzione più occidentale dell'Alta Pianura, si osservano delle variazioni di entità intermedia tra i precedenti. Le serie relative ai pozzi 0253 e 0300, ubicati nella parte di Bassa Pianura in Sinistra Isonzo, presentano andamenti praticamente sovrapponibili con valori di livello confrontabili e variazioni di media entità.

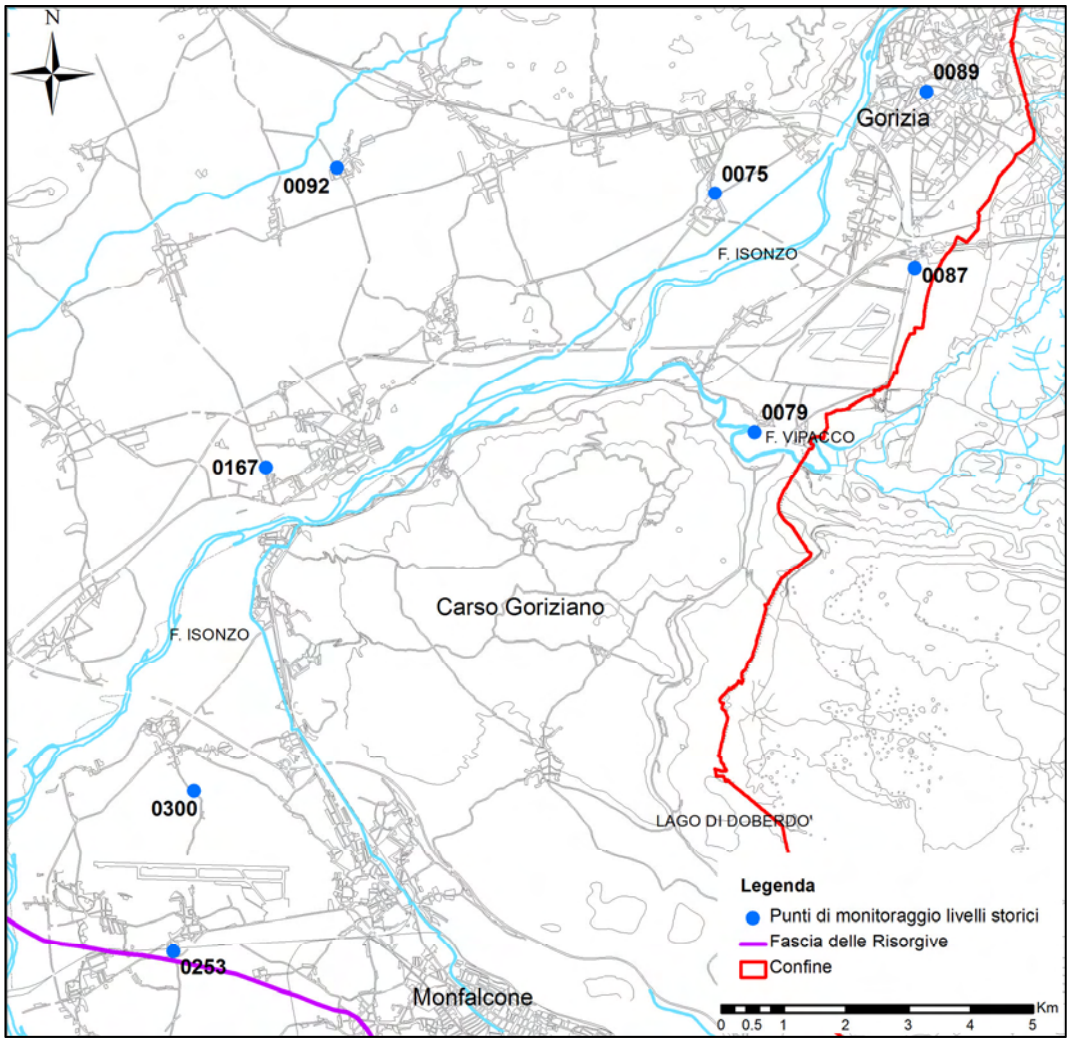


Figura 3.16: Ubicazione dei pozzi utilizzati per l'analisi delle serie storiche dei livelli di falda.

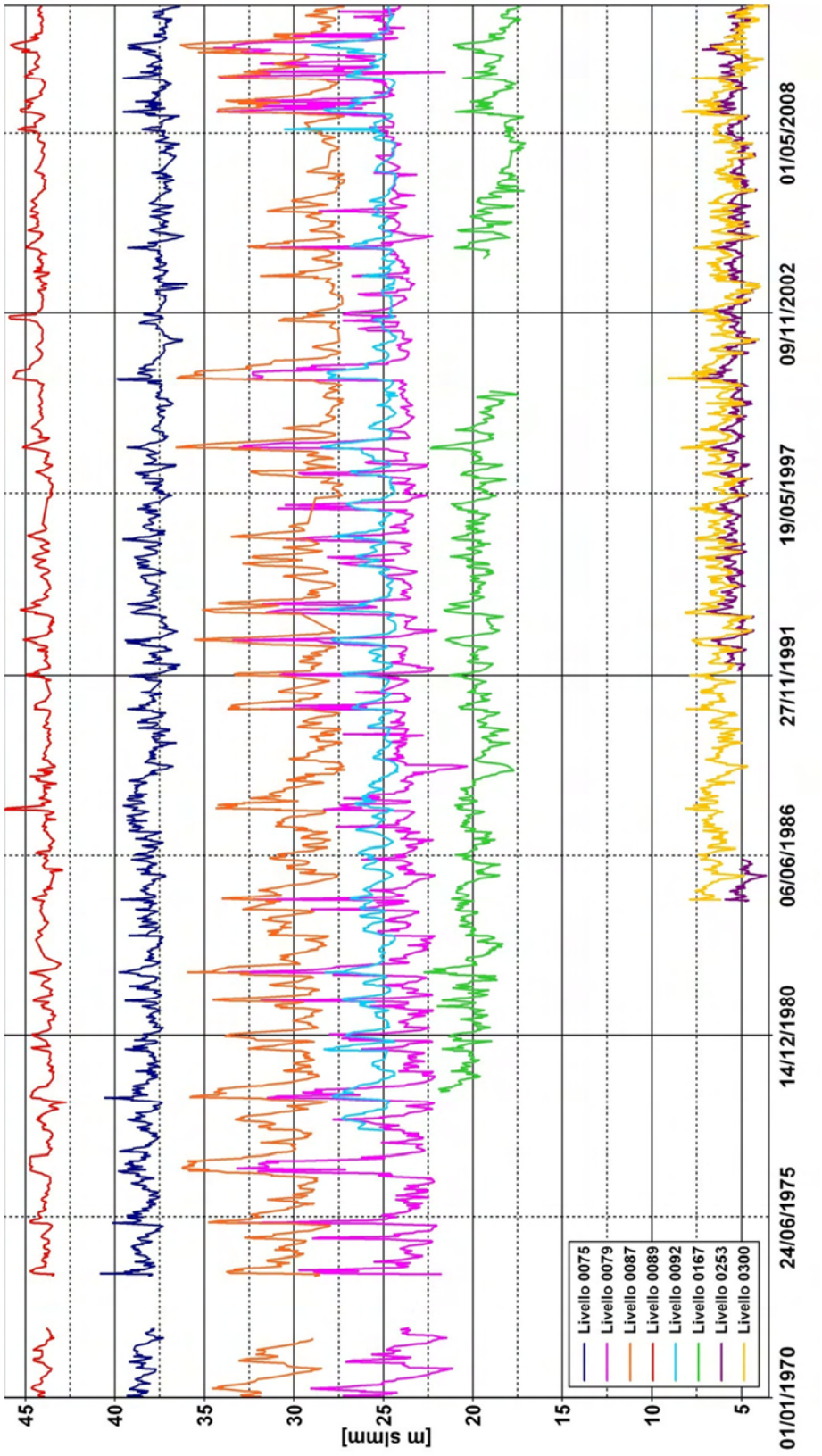


Figura 3.17: Serie storiche dei livelli di falda [m slmm] per i pozzi 0075, 0079, 0087, 0089, 0092, 0167, 0253 e 0300.

Nei grafici in Figura 3.18-3.25 sono riportati i valori di livello registrati per ogni pozzo dal 1970 al 2012, con evidenziato il relativo trend lineare.

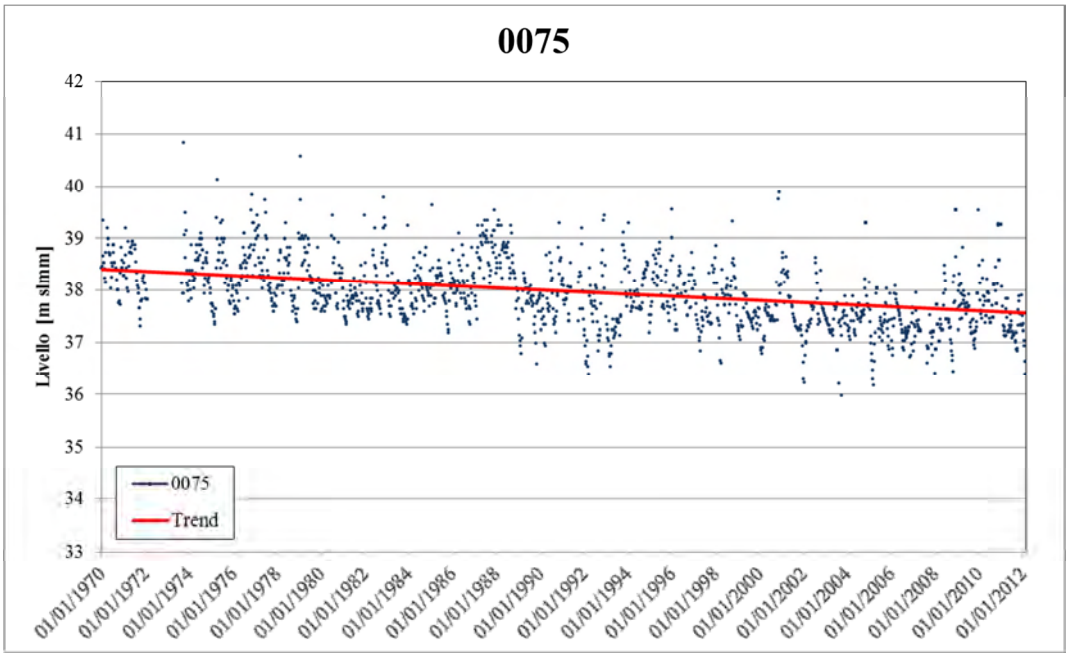


Figura 3.18: Valori di livello [m slmm] registrati per il pozzo 0075 e relativo trend.

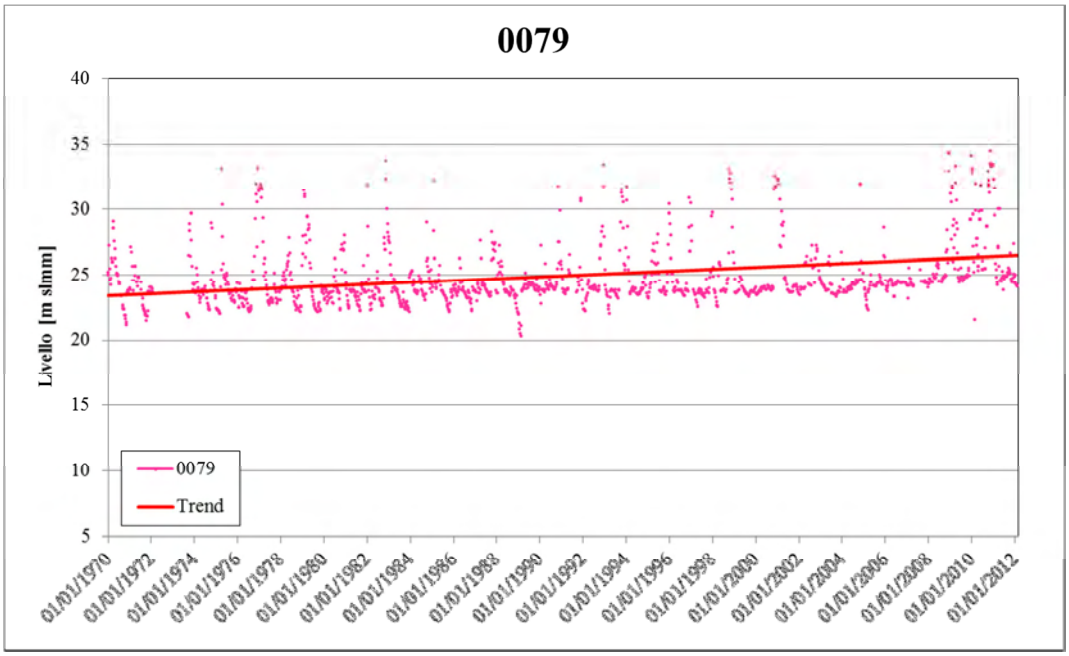


Figura 3.19: Valori di livello [m slmm] registrati per il pozzo 0079 e relativo trend.

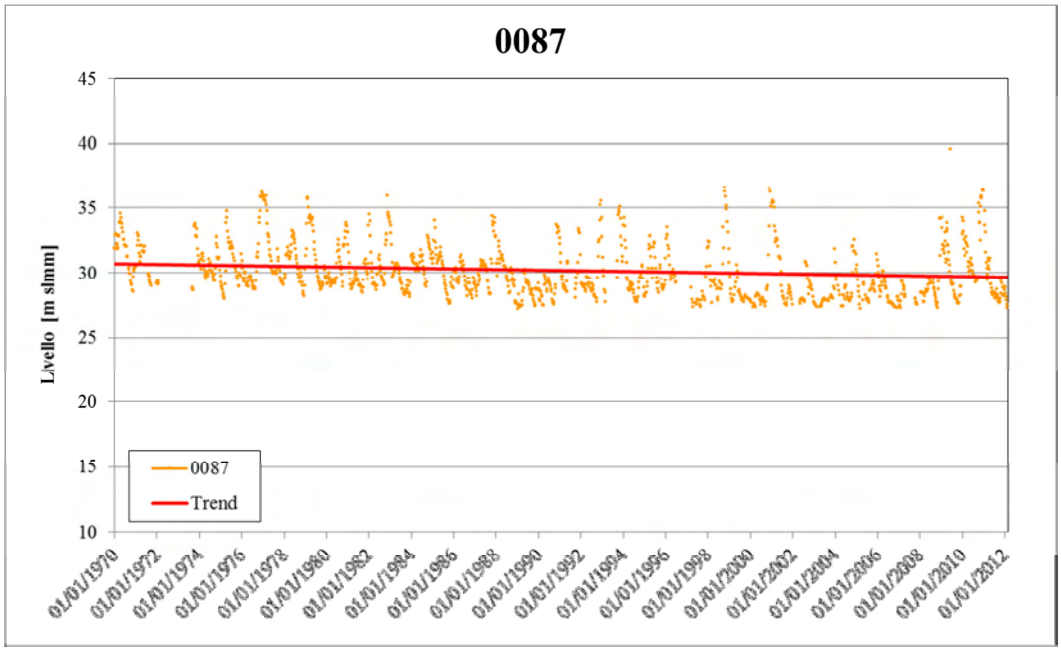


Figura 3.20: Valori di livello [m slmm] registrati per il pozzo 0087 e relativo trend.

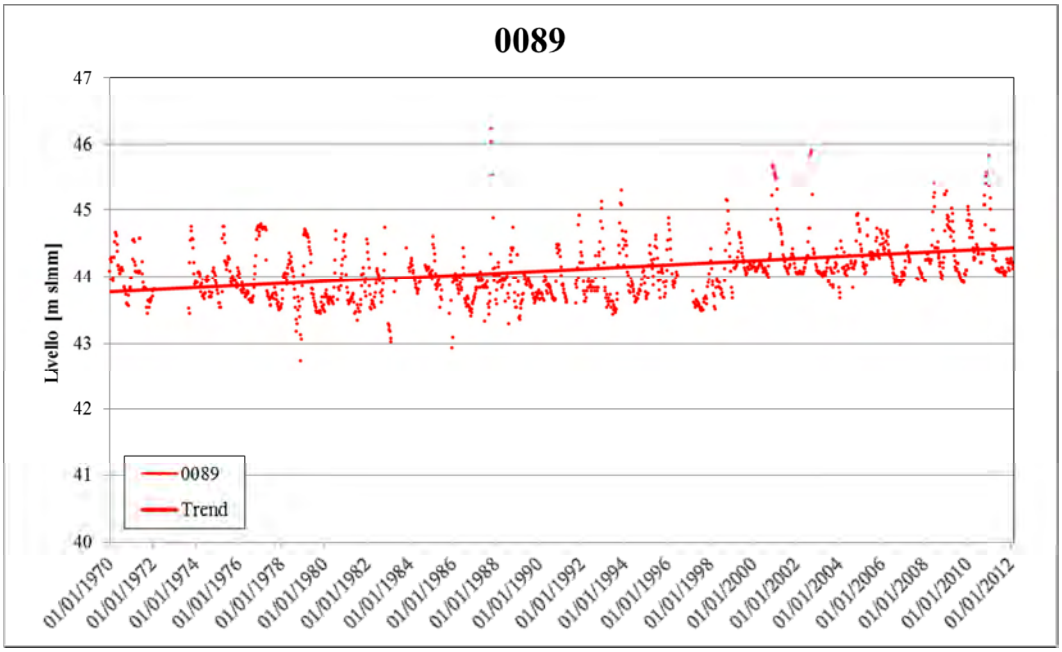


Figura 3.21: Valori di livello [m slmm] registrati per il pozzo 0089 e relativo trend.

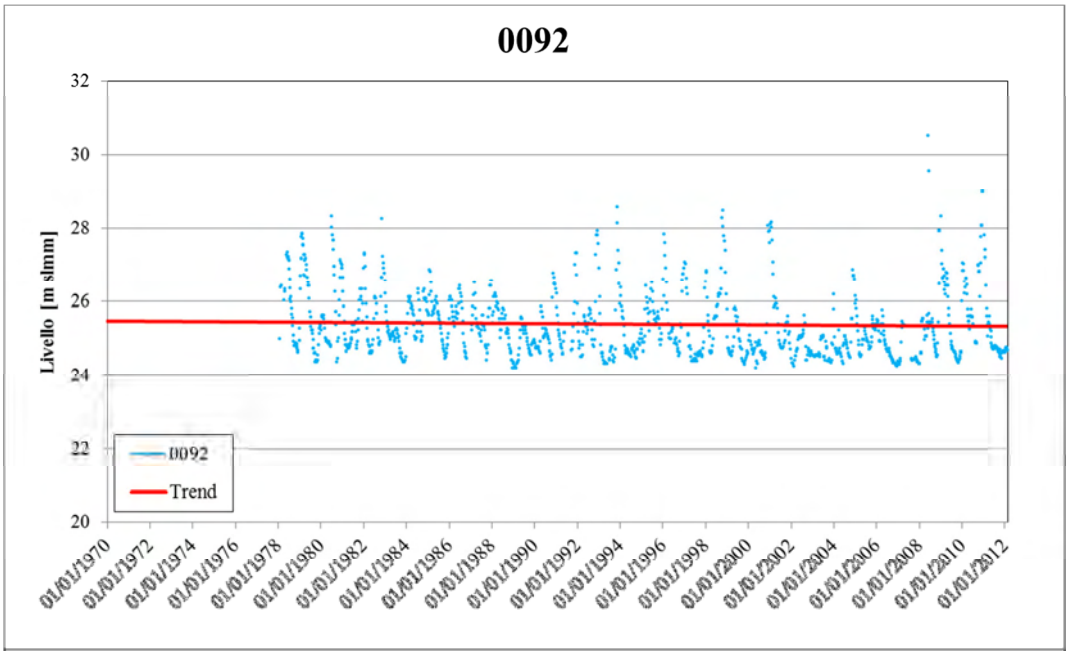


Figura 3.22: Valori di livello [m slmm] registrati per il pozzo 0092 e relativo trend.

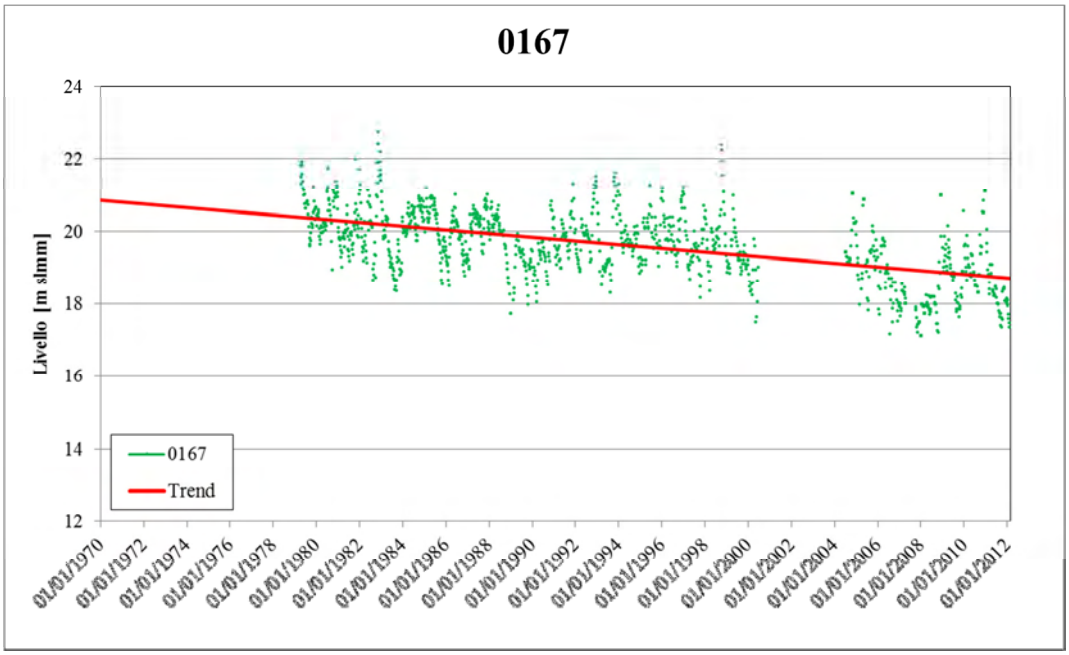


Figura 3.23: Valori di livello [m slmm] registrati per il pozzo 0167 e relativo trend.

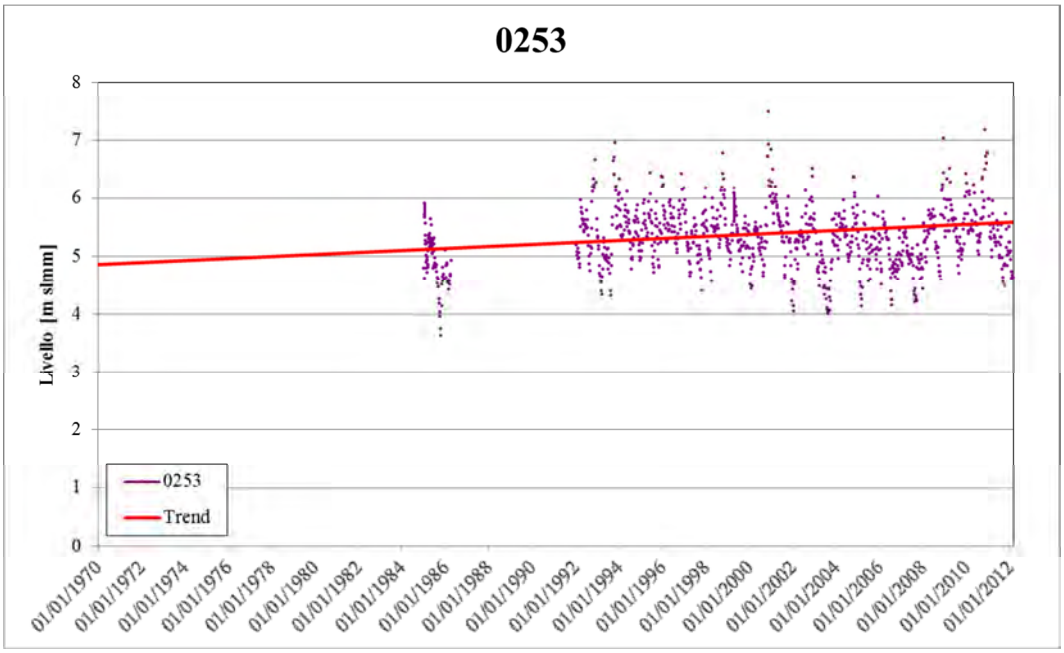


Figura 3.24: Valori di livello [m slmm] registrati per il pozzo 0253 e relativo trend.

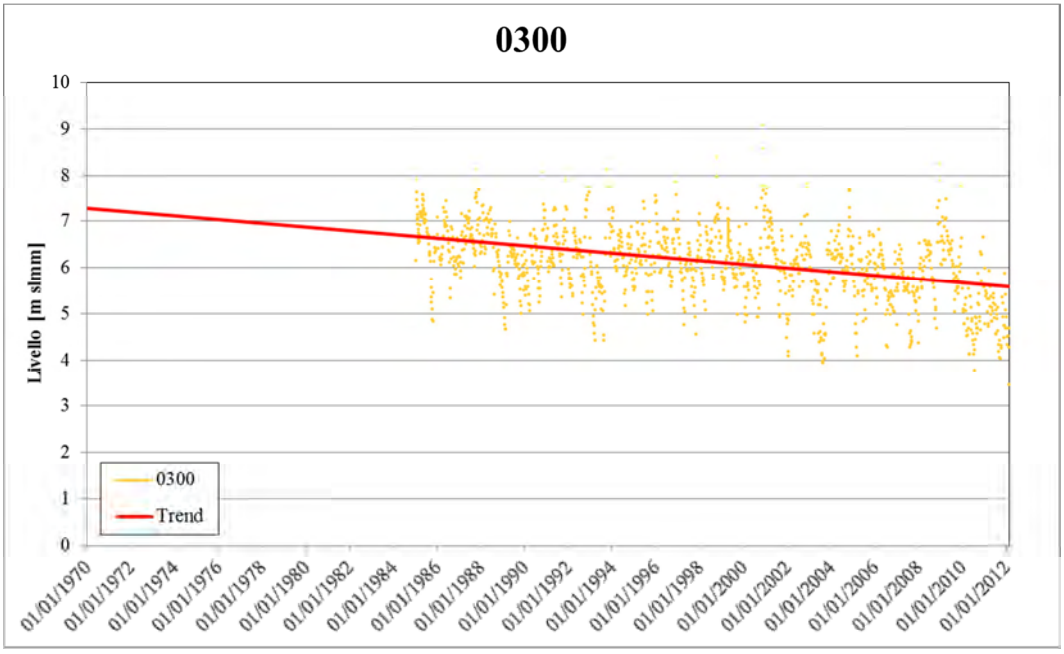


Figura 3.25: Valori di livello [m slmm] registrati per il pozzo 0253 e relativo trend.

I pozzi 0075, 0087, 0167 e 0300 mostrano un trend discendente, mentre i pozzi 0079, 0089 e 0253 presentano un trend ascendente. Solamente per il pozzo 0092 l'andamento generale si mantiene attorno a valori circa costanti.

Nella Tabella 3.10 sono riportati i valori di livello massimi e minimi assoluti registrati all'interno delle diverse serie storiche a confronto con quelli relativi alle misure freatimetriche effettuate nell'ambito di questo lavoro. È da tener presente che il periodo di monitoraggio dei livelli freatimetrici è stato inferiore all'anno.

	Max serie		Max attuale	
ID	**Livello [m slmm]**	**Data**	**Livello [m slmm]**	**Data**
0075	**40.83**	02/10/1973	**38.93**	03/12/2012
0079	**34.49**	24/11/2010	**33.23**	03/12/2012
0087	**39.59**	15/06/2009	**35.34**	26/04/2013
0089	**46.22**	20/10/1987	**45.36**	10/04/2013
0092	**30.52**	03/06/2008	**27.94**	19/06/2013
0167	**22.74**	17/11/1982	**20.45**	05/06/2013
0253	**7.50**	22/11/2000	**6.25**	06/06/2013
0300	**9.08**	22/11/2000	**7.71**	05/06/2013
	Min serie		**Min attuale**	
ID	**Livello [m slmm]**	**Data**	**Livello [m slmm]**	**Data**
0075	**35.98**	23/09/2003	**37.05**	08/08/2013
0079	**20.33**	17/02/1989	**25.40**	05/06/2012
0087	**27.16**	07/03/2005	**28.42**	05/06/2012
0089	**42.73**	05/12/1978	**44.22**	08/08/2013
0092	**24.22**	23/12/1988	**25.02**	19/06/2012
0167	**17.10**	10/01/2008	**18.13**	05/06/2012
0253	**3.62**	28/10/1985	**4.89**	08/08/2013
0300	**3.46**	23/02/2012	**5.45**	08/08/2013

Tabella 3.10: Valori di livello [m slmm] massimi e minimi assoluti per le diverse serie storiche a confronto con quelli relativi alle misure freatimetriche effettuate nell'ambito di questo lavoro (indicati con max e min attuale). Per ogni valore di livello è riportata la data di registrazione.

Da questo confronto emerge che nessuno dei valori di minima e di massima registrati durante le campagne effettuate si avvicina significativamente ai massimi e minimi assoluti degli ultimi 40 anni.

Facendo un confronto anche sui valori medi di livello, si può notare che i valori calcolati per le diverse serie sono simili alle medie relative alle misure freatimetriche effettuate nell'ambito di questo lavoro (Tabella 3.11), con

differenze inferiori al metro per i pozzi 0075, 0089, 0167, 0253 e 0300. Fanno eccezione i pozzi 0079, 0087 e 0092, che presentano differenze di 5.61 m, 2.19 m e 1.34 m rispettivamente.

	Media serie	Media attuale
ID	Livello [m slmm]	Livello [m slmm]
0075	37.87	37.93
0079	25.33	30.94
0087	30.03	32.22
0089	44.20	44.81
0092	25.38	26.72
0167	19.37	19.41
0253	5.42	5.79
0300	6.05	6.97

Tabella 3.11: valori medi di livello [m slmm] calcolati per le diverse serie storiche, a confronto con le medie relative alle misure freatimetriche effettuate nell'ambito di questo lavoro.

4 GEOCHIMICA DELLE ACQUE DELLA PIANA ISONTINA

4.1 Caratteristiche generali delle acque della Pianura Friulana

Lo studio della composizione chimica delle acque è di grande importanza per identificare e separare i vari corpi idrici presenti in un'area ed i relativi mescolamenti. Alcune delle caratteristiche chimiche delle acque sono proprietà piuttosto conservative, ma possono comunque verificarsi delle variazioni rispetto alle condizioni naturali, in seguito al mescolamento artificiale causato da opere idrauliche o ad inquinamento [*Mosetti*, 1983].

Analisi di carattere geochimico, svolte da ARPA FVG su acque di pozzi e pluviometri, hanno permesso una caratterizzazione delle acque di falda, freatiche ed artesiane, della Pianura Friulana. In tutti i campioni delle acque di falda analizzate HCO_3^- è lo ione dominante e si identificano 5 facies idrochimiche:

- Facies 1: Ca^{2+}-HCO_3^-;
- Facies 2: Ca^{2+}-Mg^{2+}-HCO_3^-;
- Facies 3: Ca^{2+}-Mg^{2+}-HCO_3^--SO_4^{2-};
- Facies 4: Ca^{2+}-Mg^{2+}-SO_4^{2-}-HCO_3^-;
- Facies 5: Na^+-Ca^{2+}-Mg^{2+}-HCO_3^-.

Le facies 1-4 sono caratteristiche delle acque della falda freatica e degli acquiferi confinati più superficiali, mentre la facies 5 si riscontra solamente nei campioni di acquiferi confinati profondi e riflette le reazioni di scambio risultanti dall'interazione acqua-argilla/limo [*Cucchi et al.*, 2007; *Cucchi et al.*, 2008].

Le acque della falda freatica hanno un valore medio di conducibilità elettrica di 438 μS/cm. In genere nelle acque degli acquiferi artesiani del FVG si registra un decremento della conducibilità elettrica e della mineralizzazione con l'incremento della profondità, passando da valori medi pari a 440 μS/cm per i sistemi A e B, a 420 μS/cm per il sistema C, a 400 μS/cm per il D e a 382 μS/cm

per il sistema E. Queste variazioni con la profondità sono in parte attribuibili alle diminuzioni nelle concentrazioni degli ioni calcio e bicarbonato [*Zini et al.*, 2008].

La temperatura media delle acque nei pozzi aumenta con la profondità e con la distanza dai corsi d'acqua principali e dalla Fascia delle Risorgive. Essa influisce direttamente sulla solubilità dei sali, sulla dissoluzione della CO_2 e dei carbonati, e di conseguenza sul grado di mineralizzazione [*Zini et al.*, 2008].

Nella falda freatica i valori di pH variano tra 6.9 e 8.0, nei sistemi confinati più superficiali tra 7.3 e 8.1 e in quelli confinati profondi tra 7.5 e 8.0 [*Cucchi et al.*, 2007; *Cucchi et al.*, 2008].

La concentrazione media di HCO_3^- è in genere simile nell'acquifero freatico e in quelli confinati. Il valore medio nella falda freatica è 228 mg/l, mentre nelle falde artesiane si registra un leggero decremento con l'aumentare della profondità, imputabile alla minor disponibilità di CO_2 che causa lo spostamento dell'equilibrio che regola la dissoluzione dei carbonati [*Cucchi et al.*, 2007; *Cucchi et al.*, 2008; *Zini et al.*, 2008].

Lo ione calcio mostra una concentrazione media di 71 mg/l nella falda freatica. I valori decrescono con la profondità, passando da 64 mg/l per i sistemi confinati A e B, a 57 mg/l per il sistema C, a 52 mg/l per il sistema D, fino a 42 mg/l per il sistema E. Questa diminuzione è dovuta alla minor disponibilità di CO_2 in profondità e agli scambi ionici con Na^+, la cui concentrazione aumenta con la profondità [*Zini et al.*, 2008].

Il valore medio della concentrazione di Mg^{2+} è di circa 19 mg/l nelle acque della falda freatica. Negli acquiferi confinati i valori variano di poco con la profondità e si aggirano attorno a 23 mg/l [*Zini et al.*, 2008].

La concentrazione dei solfati è molto variabile, da 25 mg/l per la falda freatica, a 42 mg/l per i sistemi A e B, a 14 mg/l per il C, a 44 mg/l per il sistema D e quasi 46 mg/l per quello E. La concentrazione aumenta quindi con la profondità e mostra inoltre una diminuzione con l'aumentare della distanza dal Tagliamento. I solfati costituiscono quindi un valido strumento per individuare i contributi del Tagliamento, dato che le sue acque sono quelle più ricche in SO_4^{2-} [*Cucchi et al.*, 2007; *Cucchi et al.*, 2008; *Zini et al.*, 2008].

La presenza di cloruri nelle acque sotterranee della Regione è legata a contaminazioni antropiche o a mescolamento con acque marine o fossili. Le concentrazioni nelle acque della falda freatica e dei sistemi acquiferi A e B sono dell'ordine di 5 mg/l. Negli acquiferi sottostanti i valori decrescono da 4.5mg/l nel sistema C, fino a 1.3 mg/l nel sistema E. Nella zona orientale della Pianura Friulana si registrano concentrazioni superiori a 6 mg/l sia per l'acquifero freatico, sia per quelli profondi [*Zini et al.*, 2008].

La concentrazione dei nitrati varia tra 0.2 e 50.7 mg/l nelle acque freatiche, tra 0.2 e 30.4 negli acquiferi confinati più superficiali e tra 0.1 e 23.6 mg/l negli acquiferi profondi [*Cucchi et al.*, 2007; *Cucchi et al.*, 2008]. Valori rilevanti di nitrati sono indice di contaminazione antropica, i composti organici ed inorganici dell'azoto vengono infatti estesamente utilizzati in agricoltura come fertilizzanti: la parte non assorbita viene dilavata e percola nelle falde [*Zini et al.*, 2008].

Al fine di caratterizzare le acque dei corpi idrici sotterranei in base alle differenti alimentazioni e verificarne l'effettivo grado di isolamento, sono stati analizzati dati relativi al contenuto di ^{18}O [*Zini et al.*, 2008]. L'^{18}O è un isotopo stabile dell'^{16}O, presente nell'acqua pesante, frazionabile durante i processi di evaporazione e condensazione. In generale l'abbondanza relativa degli isotopi viene espressa in termini di δ‰, definito come:

$$\delta‰ = \frac{R_{(campione)} - R_{(standard)}}{R_{(standard)}} \cdot 1000$$

dove R è il rapporto tra l'isotopo più pesante (generalemente meno abbondante) e quello più leggero. Il δ‰ quindi sta ad indicare di quante parti per mille il rapporto isotopico del campione considerato si discosta dallo stessso rapporto in un materiale standard a composizione isotopica nota. Lo standard è rappresentato dal contenuto isotopico medio delle acque oceaniche, SMOW (Standard Mean Ocean Water) [*Craig*, 1961].

Il $\delta^{18}O$ è sempre negativo (uguale a zero solo per la SMOW) ed assume valori tanto più negativi quanto più il campione è povero di ^{18}O. Poiché la

temperatura è il fattore determinate nei processi di condensazione e formazione delle piogge, ne consegue che il contenuto di ^{18}O nelle precipitazioni è funzione della latitudine, dell'altitudine e della stagionalità. Perciò, in un'area circoscritta, il contenuto di ^{18}O, pur con variazioni stagionali (minimi in inverno e massimi in estate), è funzione solo della quota d'infiltrazione delle precipitazioni. Infiltratasi nel sottosuolo l'acqua non subisce più modificazioni nel contenuto di ^{18}O, che rimane stabile nel tempo, a meno che non si verifichino processi di miscelazione con altre acque [*ACEGAS*, 1985].

Le analisi effettuate dal Dipartimento di Matematica e Geoscienze per conto di ARPA FVG evidenziano valori medi ponderati del $\delta^{18}O$ di -7.6‰ per le precipitazioni in pianura, di -9.45‰ per il fiume Livenza, -8.85‰ per il Tagliamento, -8.2‰ per il Natisone e di -8.1‰ per l'Isonzo. Le acque delle falda freatica hanno valore medio di $\delta^{18}O$ di -7.7‰, quelle artesiane presentano valori decrescenti all'aumentare della profondità. Le acque del sistemi acquiferi A e B hanno valori isotopici medi di -8.0‰, quelle del sistema C hanno un valore medio di -8.3‰, mentre quelle dei sistemi confinati D ed E presentano valori medi decisamente inferiori, pari al -9.0‰ e al -9.3‰ rispettivamente. Le acque dei sistemi più profondi F e G hanno valori medi attorno a -9.9‰ [*Zini et al.*, 2008].

Le acque della falda freatica presentano quindi valori isotopici compatibili con quelli derivabili da un mescolamento delle acque piovane locali con quelle dei corsi d'acqua che scorrono nell'Alta Pianura. Le acque delle falde artesiane superficiali (sistemi acquiferi A e B) non mostrano al loro interno differenziazioni geochimiche significative e hanno valore medio di -8‰, molto simile a quello delle acque della falda freatica (-7.7‰). Ciò può indicare un'alimentazione diretta di questi sistemi da parte della falda freatica e, quindi, un apporto indiretto delle piogge che cadono nell'Alta Pianura e nella fascia pedemontana e dai corsi d'acqua a monte delle Risorgive. Con l'aumentare della profondità le acque assumono valori nettamente più negativi che possono indicare circuiti profondi alimentati direttamente dalla zona montana e/o la presenza di acque fossili nella

porzione profonda delle falde [*Cucchi et al.*, 2007; *Cucchi et al.*, 2008; *Zini et al.*, 2008].

Analisi svolte utilizzando il metodo del geocronometro del ^{14}C, tramite cui è possibile valutare la velocità di ricarica, indicano che l'attività del ^{14}C tende a diminuire progressivamente con la profondità, fino a raggiungere valori di 0.9 e 0.8 pmc nelle acque degli acquiferi confinati più profondi. A questi valori molto bassi corrispondono delle età corrette di 27.663 e 23.542 anni. Le acque profonde sono quindi caratterizzate da una ricarica estremamente lenta e ciò porta ad ipotizzare la presenza di orizzonti a permeabilità molto bassa che impediscono gli scambi idrici con gli acquiferi soprastanti [*Zini et al.*, 2008].

Per quanto riguarda le acque freatiche e quelle artesiane superficiali, sulla base delle evidenze riguardanti gli ioni maggiori, le caratteristiche fisiche e gli isotopi stabili, è possibile distinguere quattro diverse province idrogeologiche per la Pianura Friulana: la pianura pordenonese, la pianura del Tagliamento, la Pianura Friulana orientale e la pianura dell'Isonzo [*Cucchi et al.*, 2007; *Cucchi et al.*, 2008; *Zini et al.*, 2008].

4.2 Le acque della Piana Isontina

La pianura dell'Isonzo è caratterizzata dal deflusso sotterraneo delle acque provenienti dal sistema Torre-Isonzo, che si distinguono per il basso contenuto di solfati e nitrati e per l'elevato rapporto Ca/Mg. La maggior concentrazione di calcio, in proporzione al magnesio, nelle acque di falda indica la loro provenienza da bacini montani (del Malina, Natisone, Judrio e Versa) ricchi in calcari ed arenarie calcaree e poveri in dolomite. Il rapporto Ca/Mg non si mantiene costante nel tempo, la concentrazione del calcio infatti aumenta durante le piene, mentre durante le magre diminuisce. Il valore di $\delta^{18}O$ delle acque di falda è simile a quello delle piogge locali, e testimonia quindi una ricarica delle acque sotterranee più superficiali principalmente ad opera dalle precipitazioni locali. Le acque dei sistemi acquiferi più profondi presentano caratteristiche simili a quelle superficiali, ma hanno una concentrazione di magnesio più elevata [*Cucchi et al.*,

1999b; *Cucchi et al.*, 2007; *Cucchi et al.*, 2008; *Cucchi et al.*, 1998; *Zini et al.*, 2008].

Le informazioni più dettagliate sulla geochimica delle acque della Piana Isontina sono fornite da uno studio idrologico di dettaglio condotto negli anni '70-'80 da ACEGA (ora AcegasAps) su un gran quantitativo di acque superficiali e sotterranee della Bassa Pianura, con particolare riferimento agli acquiferi in Sinistra Isonzo. Le indagini effettuate da ACEGA erano volte a verificare la potenzialità, l'alimentazione e la possibilità di sfruttamento delle falde profonde in pressione per il loro impiego a scopo idropotabile, nel nuovo Acquedotto dell'Isonzo, mediante la realizzazione di un campo pozzi che sostituisse le prese del Timavo [*ACEGAS*, 1985]. Di seguito ne vengono riportati i principali risultati.

4.2.1 Acque superficiali

I corsi d'acqua minori, di carattere torrentizio, come Vipacco, Malina, Judrio e Versa, che scorrono su terreni di natura marnoso-arenacea, presentano elevati rapporti Ca/Mg e SO_4/Dt[1] ed elevate quantità di silice. Il rapporto SO_4/Dt è utilizzato per differenziare al meglio le acque, infatti, poiché in genere con l'aumentare della mineralizzazione aumenta anche il contenuto di solfati, è più opportuno esprimere la concentrazione dello ione SO_4^{2-} in relazione a calcio e magnesio. Gli ioni solfato presenti nelle acque derivano dalla dissoluzione di formazioni rocciose come il flysch. Anche la silice deriva dal disfacimento dei minerali silicei, principali costituenti delle rocce marnoso-arenacee. Le acque di Isonzo, Torre e Natisone presentano caratteristiche idrochimiche simili, il rapporto Ca/Mg è però nettamente più elevato per le acque del Natisone, ma questo è un parametro poco adatto per caratterizzarne le acque sotterranee data la sua variabilità tra i periodi di magra e di piena. Il parametro più caratteristico delle acque del Natisone è il basso valore del rapporto SO_4/Dt (pari a 0.48 a Cividale). L'analisi isotopica dell'^{18}O consente una netta differenziazione delle acque dell'Isonzo da quelle di Torre, Natisone, Judrio e Versa. Le acque dell'Isonzo

[1] Con Dt si indica la durezza totale, ovvero una misura della quantità di sali di calcio e magnesio presenti, espressa in gradi francesi (°F).

presentano infatti un contenuto di ^{18}O molto basso ($\delta^{18}O$ = -9.5‰ a Gorizia, $\delta^{18}O$ = -9.4‰ a Sagrado), indicativo di un bacino di alimentazione con altezza media di almeno 1000 m, molto diverso da quello che contraddistingue le acque del Torre e del Natisone. Le acque del torrente Versa hanno invece valori molto elevati di ^{18}O ($\delta^{18}O$ = -6.5‰ a Capriva) e presentano una marcata variazione stagionale, ad indicare un'alimentazione prevalentemente ad opera delle precipitazioni stagionali. Analisi effettuate su campioni prelevati lungo il corso dell'Isonzo, a Sagrado, Turriaco e Pieris, durante una magra estiva, evidenziano una maggiore mineralizzazione dell'acqua raccolta a Pieris, chiaro indizio di un'alimentazione da parte della falda freatica [*ACEGAS*, 1985].

4.2.2 Acque sotterranee

Sulla base di dati di durezza totale relativi ad acque prelevate da pozzi situati a modeste profondità (10-20 m sotto il piano campagna) AcegasAps ha costruito una mappa delle isolaline (in questo caso linee di egual durezza totale) per la falda freatica in Sinistra e Destra Isonzo. In base all'andamento delle isoaline la zona in Destra Isonzo viene divisa in tre fasce caratterizzate da diversa alimentazione:

- Fascia B: ha origine all'altezza di Medea ed è alimentata dallo Judrio e dai suoi affluenti provenienti dal Collio. È caratterizzata da acque molto mineralizzate, con durezza tra 29 e 34 °F. Gli spandimenti di acque isontine verso la falda freatica in riva destra sono ritenuti poco probabili e comunque di entità trascurabile, considerato il suo andamento parallelo al corso dell'Isonzo. Ciò è confermato anche dalle misure freatimetriche che indicano un'altezza maggiore della superficie piezometrica in Destra Isonzo rispetto che in Sinistra, dovuta alla minor permeabilità del materasso alluvionale.
- Fascia A: è situata ad ovest della precedente e si sviluppa in direzione nord-sud lungo una fascia piuttosto stretta. È caratterizzata da acque mediamente mineralizzate (Dt tra 18 e 21 °F) ed è alimentata dal Natisone.

- Fascia C: si trova più ad occidente ed è caratterizzata da acque molto mineralizzate, con Dt superiori a 26 °F.

In Destra Isonzo, nell'area settentrionale compresa tra Romans e Gorizia, l'andamento delle isoaline denota perdite dell'Isonzo sulla sua Destra ed una miscelazione di acque isontine con acque più mineralizzate, provenienti dai colli marnoso-arenacei della zona di Cormons.

In Sinistra Isonzo la situazione evidenziata dalle isoaline è la seguente:

- Lungo la direttrice S. Pier d'Isonzo-Begliano, si identifica uno scorrimento preferenziale di acque alimentate dall'Isonzo e caratterizzate da durezze piuttosto basse, attorno a 16 °F. Ai limiti di questa fascia le durezze aumentano progressivamente, fino a raggiungere un valore di 19 °F.
- A valle del Colle di S. Elia, presso Redipuglia, la falda è scarsamente alimentata e le acque presentano durezze relativamente elevate.
- Tra Redipuglia e Ronchi dei Legionari si trova una falda con possibili alimentazioni carsiche.
- Nei pressi di Staranzano si trova una seconda zona a scarsa alimentazione.
- A SO di San Canzian d'Isonzo è ubicata una fascia caratterizzata da maggiore mineralizzazione e possibili influenze da parte di acque provenienti da Destra Isonzo [*ACEGAS*, 1985].

Analizziamo ora più nel dettaglio la situazione in Sinistra Isonzo e a nord del corso del fiume, nell'area di maggior interesse per questo studio:

Falda freatica a nord dell'Isonzo

Lungo la linea Romans-Villesse e Romans-Sagrado si nota una progressiva evoluzione della composizione chimica: si passa da acque con elevati livelli di durezza, di nitrati e di silice e rapporti Ca/Mg relativamente bassi, ad acque poco mineralizzate, con rapporti Ca/Mg più elevati, molto simili alle acque dell'Isonzo. Il contenuto isotopico si evolve nello stesso modo, con una diminuzione dell'^{18}O e

del tritio[2]. Essendo il valore di $\delta^{18}O$ = -7.7‰ dell'acqua di Romans troppo basso per testimoniare un'alimentazione della falda da parte di precipitazioni locali o da acque che interessano le colline del Collio, si ritiene che in questa zona ci sia un apporto di acque isontine ($\delta^{18}O$ = -9.0‰) mescolate ad acque provenienti dai colli marnoso-arenacei con valori di $\delta^{18}O$ intorno a -7.2‰. Lungo gli allineamenti Moraro-Sagrado e Mossa-Farra d'Isonzo si assiste ad un'analoga evoluzione della composizione chimica delle acque. In questo caso le acque della falda più settentrionale risultano altamente mineralizzate, con elevatissimi contenuti di nitrati e con valori di ^{18}O indicanti un bacino di alimentazione situato a quote intorno ai 200 m. L'elevato tenore di nitrati nelle acque potrebbe essere dovuto a concimazioni molto intense nella zona di alimentazione della falda, indentificabile con la zona del Collio [*ACEGAS*, 1985].

Falda lungo l'alveo del Torre

Sono state esaminate da AcegasAps le acque di 5 pozzi situati lungo il letto del Torre, dalla località di Salt fino a quasi la confluenza con l'Isonzo, al fine di seguire l'evoluzione della composizione della falda in funzione del contributo degli altri corsi d'acqua in Sinistra del Torre. Nell'acqua prelevata in località Salt sono riconoscibili, nonostante un leggero aumento della concentrazione ionica, le caratteristiche dell'acqua del Torre all'altezza di Zompitta. A Cerneglons la composizione dell'acqua risulta variabile, probabilmente in relazione agli apporti del torrente Malina che qui confluisce nel Torre. La mineralizzazione è nettamente più elevata e la concentrazione dei nitrati è estremamente variabile, con punte di 21 mg/l. Il contenuto di ^{18}O e l'elevato tenore salino rilevati evidenziano il contributo di acque locali, drenanti il terreno agricolo. Anche il contenuto in tritio è superiore rispetto a quello dell'acqua prelevata a Salt, e ciò indica un certo rallentamento nel deflusso delle acque sotterranee. A Nogaredo al Torre la mineralizzazione, il contenuto di ^{18}O e tritio sono nuovamente bassi. Si

[2] Il tritio è un isotopo instabile dell'idrogeno (tempo di dimezzamento 12.35 anni), prodotto naturalmente in piccole quantità per interazioni dei raggi cosmici con le molecole d'azoto. La sua quantità nelle acque sotterranee viene espressa in unità di tritio (U.T.) e permette di valutare il tempo di ricambio ed eventuali mescolamenti con altre acque.

riconosce facilmente l'alimentazione da parte del Natisone. A Versa, in prossimità della confluenza dello Judrio con il Torre, la composizione delle acque di falda ritorna ad essere variabile, conseguentemente al diverso regime idrico dei corsi d'acqua che le alimentano (Natisone e Judrio). All'altezza del ponte di Villesse l'acqua di falda presenta caratteristiche molto simili a quelle dello Judrio, come se le acque del Natisone venissero deviate più a monte verso occidente [*ACEGAS*, 1985].

Falda freatica nella Piana di Gorizia

La falda freatica a sud di Gorizia è nettamente distinta in due fasce:

- Una fascia che corre lungo la riva sinistra dell'Isonzo, comprende l'abitato di Savogna e si prolunga fino a Peteano, in cui le acque presentano le stesse caratteristiche di quelle dell'Isonzo;
- Una fascia ad est della precedente, caratterizzata da acque fortemente mineralizzate e con livelli di nitrati che superano in certe località i 50 mg/l. Si tratta di una falda molto povera d'acqua, alimentata dalle acque provenienti dai colli marnosi-arenacei orientali e puntualmente dalle perdite di subalveo del Vipacco.

Si ritiene che al contatto della coltre alluvionale con i calcari del Carso, all'altezza del Vallone nella piana di Gorizia, questi ultimi drenino parte delle acque isontine da un lato verso l'area compresa tra Redipuglia e Monfalcone e dall'altro verso i laghi carsici di Doberdò, Pietrarossa e Sablici [*ACEGAS*, 1985].

Falda freatica in Sinistra Isonzo

La falda freatica in Sinistra Isonzo presenta una fascia di scorrimento preferenziale da S. Pier d'Isonzo a Begliano, lungo la quale le acque hanno una composizione chimica praticamente uguale a quella dell'Isonzo. Il rapporto SO_4/Dt varia tra 0.6 e 0.7, molto più elevato di quello che caratterizza le acque del Natisone. Il $\delta^{18}O$ presenta valori tra -9.1‰ e -9.2‰ nei pozzi più vicini all'Isonzo, e intorno a -8.8‰ in quelli più lontani. Il livello di tritio si mantiene tra 22 e 24 U.T. e quindi i tempi di residenza nel sottosuolo sono inferiori all'anno.

Attraverso delle prove effettuate dall'OGS in corrispondenza del pozzo 11 è stato possibile stabilire una direzione SE di scorrimento delle acque, con una velocità apparente di 2 m/h circa. A sud della Fascia delle Risorgive la velocità delle acque diminuisce bruscamente e la loro mineralizzazione si accentua a causa dell'apporto di acque d'infiltrazione superficiale [*ACEGAS*, 1985].

Falde in pressione in Sinistra Isonzo

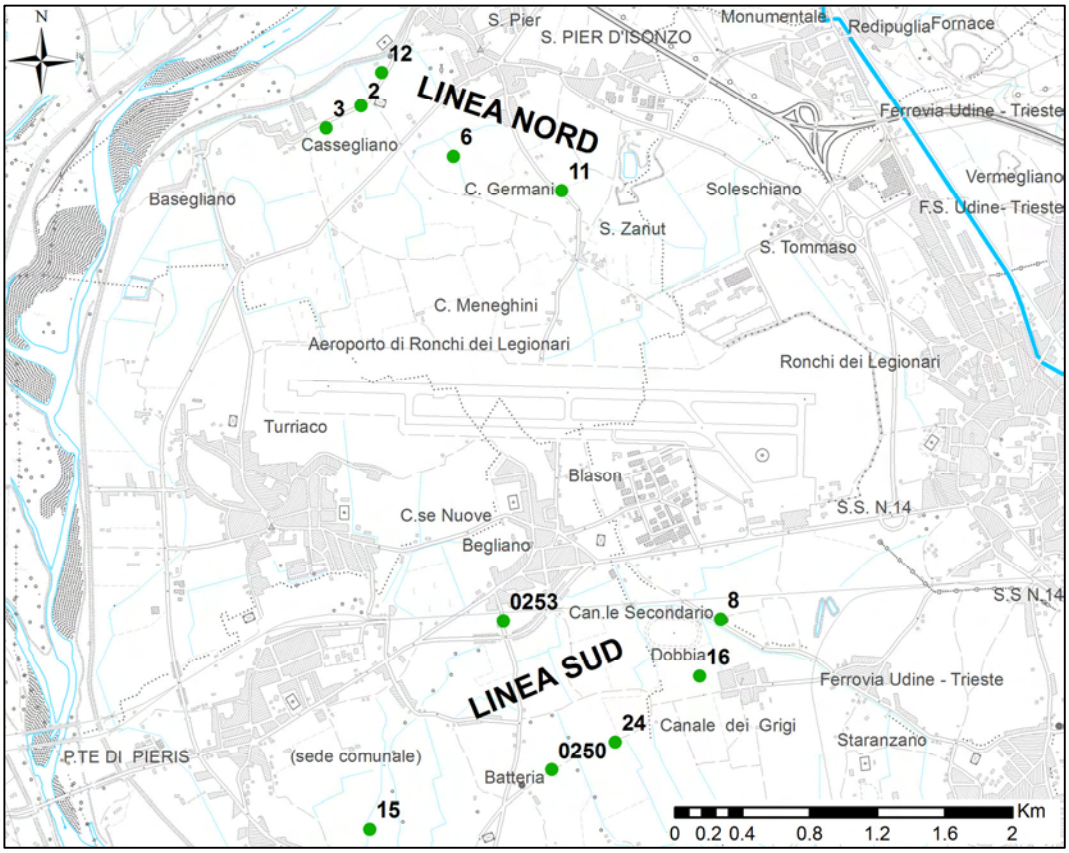


Figura 4.1: Ubicazione dei principali pozzi appartenenti alla Linea Nord e alla Linea Sud dell'acquedotto dell'Isonzo.

Le falde in pressione in Sinistra Isonzo possono essere divise in 5 gruppi, in base alla composizione delle loro acque:

1. ***Falde in pressione alimentate dall'Isonzo***

   Acque prelevate a profondità comprese tra 40 e 70 m dal piano campagna in corrispondenza della Linea Nord dei pozzi AcegasAps dell'acquedotto di Trieste, tra 30 e 50 m in corrispondenza della Linea Sud e tra 25 e 30 m in località San Canzian, appartengono alla prima falda in pressione ("A") e

mostrano una composizione chimico-isotopica molto simile a quella che caratterizza le acque della falda freatica che scorrono lungo la fascia S. Pier d'Isonzo-Begliano. Rispetto a questa fascia la falda in pressione presenta una maggiore estensione sia verso sud, fino a San Canzian, sia verso est, dove va ad interessare la zona di Dobbia. Nonostante i tempi di permanenza nel sottosuolo per queste acque siano dell'ordine di 5 anni, la loro temperatura è di poco superiore a quella della falda freatica (appena di 0.2°C). Il maggior contenuto di tritio riscontrato nelle acque in pressione, rispetto a quelle freatiche, nei pozzi di Begliano, testimonia un maggior tempo di permanenza nel sottosuolo per le acque della falda confinata. Per quanto riguarda la seconda falda in pressione ("B") si fa riferimento ai dati relativi ai soli pozzi 6 e 11 dell'AcegasAps e al pozzo Dobbia 8 dell'acquedotto di Grado, che arrivano a profondità di 80-90 m dal piano campagna. La temperatura in questa falda è un po' più elevata (mediamente 11.3°C), ma risulta comunque molto inferiore a quella delle corrispondenti falde in Destra Isonzo [*ACEGAS*, 1985].

2. ***Falda in pressione del tipo "Cassegliano profonda"***

   La falda profonda del pozzo di Cassegliano, situata ad una profondità di 175-190 m dal piano campagna, presenta caratteristiche chimico-fisiche del tutto diverse dalle altre esaminate in Sinistra e Destra Isonzo. In particolare si evidenzia una concentrazione piuttosto elevata di cloruri ed altri ioni presenti nell'acqua di mare (Na^+, K^+, Mg^{2+}, SO_4^{2-}, Sr^{2+} e Br^-) e, di conseguenza, un'elevata conducibilità elettrica e Dt. Il contenuto di nitrati non è particolarmente alto, ma nettamente maggiore rispetto a quello delle acque isontine a più rapido scorrimento. Il valore del $\delta^{18}O$ = -7.4‰ denota un bacino di alimentazione con quote tra 300 e 400 m, mentre l'elevato tenore di tritio sta ad indicare tempi di permanenza nel sottosuolo relativamente lunghi, attorno ai 13 anni. La temperatura di queste acque è maggiore di quella che presenterebbero le acque dell'Isonzo a queste profondità. Infatti le acque isontine mantengono una temperatura costante, attorno agli 11°C, fino a 100 m di profondità, per poi riscaldarsi con un

gradiente termico di circa 1°C ogni 70 m, mentre le acque profonde con elevato tenore di cloruri, pur denotando un gradiente termico abbastanza simile, presentano alla profondità di 70 m una temperatura prossima a 13°C, nettamente più elevata. Questo comportamento termometrico diverso indica che la falda profonda del pozzo di Cassegliano deriva da acque originariamente più calde rispetto a quelle dell'Isonzo, perché provenienti da un bacino situato a quote inferiori. Con buona probabilità i cloruri presenti nelle acque del pozzo di Cassegliano derivano dal loro deflusso, a monte del corso dell'Isonzo, su rocce marnoso-arenacee che cedono i sali inglobati durante la sedimentazione in ambiente marino. Il valore della concentrazione dei nitrati, pari a 9 mg/l, può indicare un'alimentazione ad opera del Natisone, ma anche a carico delle prime perdite in pianura dello Judrio e da acque di infiltrazione nella zona collinare a nord di Cividale. Una maggiore discriminazione è fornita dall'analisi dell'^{18}O, che esclude l'alimentazione da parte del Natisone. Inoltre, grazie ai valori di velocità media apparenti ricavati a partire dal contenuto medio di tritio (50 U.T.) e dalle quote delle due possibili zone di alimentazione delle falde profonde, è stato possibile escludere anche l'ipotesi di un'alimentazione dalla zona del Cividalese [*ACEGAS*, 1985].

3. ***Falda in pressione del tipo "Crosere profonda"***

Nel pozzo di Crosere dell'AcegasAps si riscontra la presenza di tre falde. La prima falda è situata tra 46 e 51 m di profondità dal piano campagna, ed è caratterizzata da un'alimentazione molto simile a quella del vicino pozzo di Begliano, anch'esso dell'AcegasAps. La seconda falda è collocata tra 54 e 58 m di profondità dal piano campagna e presenta una composizione dell'acqua nettamente differente da quella delle acque isontine. La terza falda si trova tra 68 e 76 m di profondità ed è caratterizzata da un'elevata mineralizzazione (alto contenuto di magnesio, solfati e nitrati). Esaminando i dati relativi ad analisi effettuate sull'acqua estratta dal pozzo a falde congiunte, si può notare che la composizione varia in funzione dell'apporto delle diverse falde e che generalmente prevale il contributo di quella

inferiore. L'acqua del livello acquifero più profondo ha una temperatura di circa 12.9°C e non appartiene quindi alle acque isontine, ha una mineralizzazione piuttosto elevata e soprattutto una marcata concentrazione dei nitrati, che ammonta mediamente a 18 mg/l. L'analisi isotopica mostra un valore del $\delta^{18}O$ pari a -7.6‰, corrispondente ad un bacino di alimentazione con quote non superiori a 400 m. L'elevato contenuto di tritio indica tempi di permanenza nel sottosuolo intorno ai 12 anni [*ACEGAS*, 1985].

4. ***Falde in pressione con alimentazione mista del tipo "Isonzo-Cassegliano profonda"***

   La maggior parte di queste acque appartengono alle falde in pressione più profonde (tra 140 e 190 m) dei pozzi 2, 6 e 11 della Linea Nord dell'acquedotto di Trieste e sono caratterizzate dalla presenza di ioni cloruro in concentrazioni superiori a 10 mg/l. Altre acque con elevate concentrazioni di cloruri si trovano nell'area più orientale nelle falde in pressione lungo la Linea Sud ed in alcuni pozzi in prossimità del mare. In quasi tutte le acque i parametri fisici (temperatura), chimici e isotopici (^{18}O) variano in funzione del contenuto in ioni cloruro. Queste acque derivano infatti dalla miscelazione di due tipi di acque: l'acqua delle'Isonzo e un'acqua con cloruri del tipo "Cassegliano profonda". La miscelazione può avvenire in modo diretto, come nel caso delle falde più profonde, oppure indirettamente, tramite un'acqua già miscelata più a monte, per le falde meno profonde. Un caso particolare di miscelazione si verifica quando le falde si trovano in comunicazione tra loro in un pozzo con più fenestrature, non in esercizio. In questo caso si ha una miscelazione diretta tra falde con temperature molto diverse, con l'acqua della falda più profonda che va ad alimentare tutte le altre falde ed in particolare quelle a minor risalienza. Pertanto la temperatura delle falde più superficiali varia con il contenuto di cloruri [*ACEGAS*, 1985].

5. ***Falde in pressione con alimentazione mista del tipo "Isonzo-Crosere profonda"***

   Si tratta di acque presenti nelle falde in pressione (tra 30 e 85 m) a sud della linea Pieris-San Canzian, risultato delle diluizione delle acque dell'Isonzo con acque maggiormente mineralizzate e con contenuti di ^{18}O e tritio più elevati. Molto probabilmente sono in relazione con la falda profonda del pozzo di Crosere [*ACEGAS*, 1985].

4.3 Campionamenti

Al fine di caratterizzare le acque della Piana Isontina da un punto di vista geochimico-isotopico sono stati raccolti numerosi campioni di acque sotterranee appartenenti alla falda freatica ed a livelli acquiferi più profondi, ed alcuni campioni di acque superficiali, su cui effettuare delle analisi volte a determinare il contenuto di isotopi dell'ossigeno e dell'idrogeno.

Sono state effettuate 3 campagne di campionamento principali nell'area d'interesse:

- La prima, effettuata nei giorni 16 e 18 aprile 2013, in collaborazione con il Servizio Geologico Sloveno e l'Università di Nova Gorica, ha interessato 10 degli 11 pozzi monitorati durante le campagne freatimetriche in territorio sloveno e le acque superficiali di Isonzo, Vipacco, Vrtojbiča e Vogršcek. Sono stati raccolti in tutto 26 campioni;
- La seconda, effettuata nei giorni 11 e 13 giugno 2013, in collaborazione con ARPA FVG, ha interessato 12 pozzi distribuiti tra Alta e Bassa pianura in territorio italiano. Sono stati raccolti 17 campioni relativi sia ad acque della falda freatica, sia ad acque di livelli acquiferi più profondi;
- La terza, effettuata nei giorni dal 2 al 5 luglio e 8-9 luglio 2013, in collaborazione con il Servizio Geologico Sloveno, l'Università di Nova Gorica e, in parte, con ARPA FVG, ha interessato gli 11 pozzi monitorati durante le campagne freatimetriche in territorio sloveno, 21 pozzi monitorati durante le campagne freatimetriche in territorio italiano, 6 pozzi attingenti da livelli acquiferi profondi e le acque superficiali di Isonzo, Vipacco,

Vrtojbiča, Vogršcek e del Lago di Doberdò. Sono stati raccolti in tutto 62 campioni.

Inoltre sono state effettuate altre 2 campagne di campionamento minori:

- Nella prima, effettuata il 23 maggio 2013, sono stati raccolti 6 campioni da 4 pozzi in territorio italiano, monitorati durante le misure freatimetriche;
- Nella seconda, effettuata il 18 luglio 2013, sono stati raccolti 7 campioni dai pozzi non ancora campionati in territorio italiano e 2 campioni da acque superficiali di Isonzo e Vipacco;

In Allegato 3 è riportata la carta con l'ubicazione dei campioni prelevati ed il relativo codice identificativo.

Per tutti i pozzi che lo consentivano sono stati prelevati due campioni in condizioni differenti della colonna d'acqua:

- Un primo campione d'acqua è stato prelevato in condizioni statiche, tramite l'immersione di un campionatore ad una profondità definita e campionando quindi l'acqua presente nel pozzo in quel momento.
- Un secondo campione d'acqua è stato prelevato in condizioni dinamiche, dopo lo spurgo del pozzo, tramite l'utilizzo di una pompa sommersa.

Tramite il confronto dei risultati ottenuti dalle analisi isotopiche dei due diversi campioni, prelevati per ogni pozzo, si vuole quindi verificare se vi siano differenze tra i due metodi utilizzati e se lo spurgo del pozzo permetta effettivamente il prelievo di un campione più rappresentativo dell'acqua di falda.

Lo spurgo viene effettuato allo scopo di eliminare il volume d'acqua che staziona all'interno del pozzo, poiché sottoposto ad equilibri chimici e fisici differenti da quelli presenti nell'acqua di falda. Infatti l'interazione con i materiali di rivestimento del pozzo e con l'aria atmosferica, in genere, rende l'acqua accumulata nel pozzo non rappresentativa delle condizioni chimico-fisiche della falda [*Di Molfetta and Sethi*, 2002].

Campionamento in condizioni statiche

Il prelievo dei campioni in condizioni statiche è stato effettuato mediante l'immersione di un bailer ad una profondità stabilita, compresa tra il livello di falda ed il fondo del pozzo. Il bailer è un campionatore costituito da un recipiente cilindrico in PVC di lunghezza circa 1 m, legato ad un cavo che consente di immergerlo nel pozzo e risollevarlo in superficie. Il campionatore va immerso e sollevato con estrema cautela, in modo da evitare urti con le pareti dei pozzi e oscillazioni, che possono creare rimescolamenti all'interno della colonna d'acqua [*Di Molfetta and Sethi*, 2002]. Una volta recuperato in superficie il campionatore, l'acqua prelevata è stata raccolta all'interno di boccette di plastica da 50 ml con doppio tappo, preventivamente risciacquate per 3 volte con la stessa acqua. Le boccette sono state riempite fino al limite mantenendo un menisco positivo e facendo attenzione a minimizzare lo spazio di testa o la presenza di bolle d'aria all'interno del contenitore. L'operazione di riempimento della boccetta va effettuata il più velocemente possibile per evitare il fenomeno dell'evaporazione [*Di Molfetta and Sethi*, 2002; *Zuecco*, 2012]. Sulle boccette sono stati riportati su apposite etichette il codice identificativo del pozzo, le condizioni di prelievo e la data. In attesa delle analisi isotopiche i campioni sono stati conservati in frigorifero.

In alcuni casi non è stato possibile il prelievo del campione in condizioni statiche poiché, non presentando il pozzo un'apertura in superficie, non vi era modo di immergere il bailer nell'acqua di falda. Tali pozzi hanno installata una pompa, che ha consentito comunque il prelievo di un campione della prima acqua sgorgante, direttamente dalla tubatura d'uscita o da rubinetto esterno (Figura 4.2). I campioni raccolti con questa modalità sono stati contrassegnati come campioni prelevati in condizioni statiche, ma non è detto che ne siano realmente rappresentativi. L'acqua campionata è stata raccolta in boccette di plastica con doppio tappo, seguendo la medesima procedura descritta precedentemente.

Figura 4.2: Pozzi con pompa installata al loro interno e rubinetti esterni per il prelievo dell'acqua. 1. Pozzo 11-Caserma Finanza; 2. Pozzo 05-Fossalon vasca antincendio; 3. Pozzo 06-Fossalon Officina; 4. Pozzo 03-Villesse casello autostrada. (foto Zavagno E.)

Campionamento in condizioni dinamiche

Il prelievo dei campioni in condizioni dinamiche è stato effettuato tramite l'utilizzo di una pompa centrifuga sommersa. Le pompe centrifughe vengono immerse ad una profondità intermedia tra il livello di falda e il fondo del pozzo, agiscono con una pressione positiva sulla tubazione di mandata e trasferiscono il fluido mediante l'azione dinamica di una palettatura rotante. Sono realizzate solitamente in materiali ad elevata inerzia, come acciai inox, e molte di esse consentono la regolazione della portata. Richiedono una sorgente esterna di energia, come una batteria o un motore [*Di Molfetta and Sethi*, 2002].

Nelle campagne di campionamento effettuate sono stati utilizzati diversi tipi di pompe centrifughe e differenti criteri di campionamento.

Nelle campagne effettuate nei giorni 16 e 18 aprile 2013, 11 e 13 giugno 2013, 2-5 e 8-9 luglio 2013 è stato impiegato il criterio di campionamento legato alla stabilizzazione dei parametri chimico-fisici. Questo approccio consiste nello spurgo del pozzo monitorando nel contempo parametri quali conducibilità elettrica, pH, temperatura ed Eh fino alla loro stabilizzazione. Una volta raggiunta la stabilizzazione dei parametri indicatori, la portata di spurgo della pompa viene ridotta e viene effettuato il campionamento. Per il monitoraggio dei parametri vengono utilizzate delle sonde multiparametriche immerse in un recipiente che raccoglie l'acqua in uscita dalla tubazione della pompa (Figura 4.3). È importante che vi sia un ricambio d'acqua sufficiente all'interno del contenitore [*Di Molfetta and Sethi*, 2002].

Figura 4.3: Monitoraggio dei parametri chimico-fisici (EC, pH, Eh, ossigeno disciolto e temperatura) con sonde multiparametriche durante lo spurgo. (foto di Zavagno E.)

In queste campagne sono stati utilizzati due tipi di pompe centrifughe:

- La pompa del Servizio Geologico Sloveno, modello Grundfos MP 1, realizzata in acciaio inox ed alimentata con motore a benzina (Figura 4.4).

Questa pompa può effettuare lo spurgo fino ad una profondità di 80 m e consente la regolazione della portata. La portata d'esercizio dipende dalla profondità di pompaggio e varia in genere tra 0.11 e 0.15 l/s.

- Le pompe di ARPA FVG, realizzate in plastica ed alimentate con batterie (Figura 4.5). Esse hanno portate d'esercizio limitate, attorno a 0.10 l/s.

Figura 4.4: Pompa centrifuga ad immersione del Servizio Geologico Sloveno. (foto di Zavagno E.)

Figura 4.5: Pompe centrifughe dell'ARPA FVG, con alimentazione a batteria. (foto di Zavagno E.)

Nelle campagna effettuata il 23 maggio 2013 è stato impiegato il criterio di campionamento basato sul volume del pozzo. Questo criterio suggerisce di estrarre una quantità di liquido compresa tra 3 e 5 volumi d'acqua presenti in condizioni statiche all'interno del pozzo, per garantire la rappresentatività del campione [*Di Molfetta and Sethi*, 2002]. Al termine dello spurgo si può procedere con il campionamento. In questa campagna è stata utilizzata la pompa centrifuga dell'Università degli Studi di Trieste. La pompa è alimentata da un motore a benzina, ha portate d'esercizio più elevate, attorno ai 2.0-2.5 l/s, e sistema di

tubazione rigido, con più segmenti collegati tra loro tramite avvitamento (Fig 4.6). La portata può essere regolata attraverso un rubinetto.

Figura 4.6: Spurgo mediante pompa centrifuga del Dipartimento di Ingegneria e Architettura dell'Università degli Studi di Trieste, con sistema di tubaggio rigido. (foto di Zavagno E.)

In tutte le campagne effettuate, al termine dello spurgo, la portata della pompa è stata ridotta, in modo da garantire la rappresentatività del campione e ridurre la presenza di bolle d'aria. Sono state quindi utilizzate delle boccette in plastica da 50 ml con doppio tappo, risciacquate per 3 volte con l'acqua pompata e riempite fino all'orlo (Figura 4.7). Sono state seguite le medesime procedure per l'etichettatura e la conservazione descritte per il campionamento in condizioni statiche.

Figura 4.7: Risciacquo e riempimento delle boccette al termine dello spurgo e boccette etichettate. 1-2. Pozzo 90-Ulica 9 Septembra 90; 3. Pozzo 0250-Crosere; 4. Pozzo 0328-Scariano. (foto di Zavagno E.)

Nei casi in cui nel pozzo era già presente una pompa installata al suo interno lo spurgo è stato effettuato con questa (Figura 4.8). In questo caso è stato impiegato il criterio di campionamento legato alla stabilizzazione dei parametri chimico-fisici. Terminato lo spurgo è stato effettuato il campionamento prelevando l'acqua direttamente dalla tubatura d'uscita o da rubinetto esterno, seguendo la stessa procedura descritta precedentemente.

Figura 4.8: Spurghi eseguiti mediante le pompe installate all'interno dei pozzi, con monitoraggio dei parametri chimico-fisici. 1. Pozzo 30-Orehovlje 30; 2. Pozzo 16-Dobbia; 3. Pozzo 224-Miren 224; 4. Pozzo 330-Miren 5/b; 5. Pozzo 0293-Farra pozzo acquedotto. (foto di Zavagno E.)

Per un unico pozzo (15 di AcegasAps) non è stato necessario l'utilizzo di pompa per lo spurgo. Si tratta infatti di un pozzo artesiano, in cui l'acqua in pressione, proveniente da orizzonti acquiferi profondi, risale fino a 1.70 m sopra il piano campagna (al momento del campionamento). Dopo aver collegato al pozzo una manica, è stata lasciata fluire l'acqua in modo da effettuare lo spurgo. Anche in questo caso è stato impiegato il criterio di campionamento legato alla stabilizzazione dei parametri chimico-fisici (Figura 4.9).

Figura 4.9: Pozzo artesiano 15 di AcegasAps. Lo spurgo è stato effettuato collegando al pozzo una manica e lasciando fluire l'acqua. Durante lo spurgo sono stati monitorati i parametri chimico-fisici fino alla loro stabilizzazione. (foto di Zavagno E.)

Nelle Tabelle 4.1-4.5 sono riportatati, per ogni campione raccolto, codice identificativo (ID), nome, data, metodo di prelievo e, per i campioni raccolti con bailer, la profondità di prelievo. Nell'ID è indicato il codice del pozzo accompagnato dalle lettere "S" o "D", ad indicare le condizioni di prelievo statiche o dinamiche. Nei metodi di prelievo sono comprese le 6 possibili tipologie precedentemente descritte:

1. Con bailer;
2. Con pompa del Servizio Geologico Sloveno (S.G.S.);
3. Con pompa dell'ARPA;
4. Con pompa dell'UniTs;
5. Con pompa del pozzo;
6. Pozzo artesiano.

ID	Nome	Data	Metodo di prelievo	Profondità di prelievo
26 S	Cesta Prekomorskih Brigad 26	16/04/2013	con bailer	10 m
26 D	Cesta Prekomorskih Brigad 26	16/04/2013	con pompa del S.G.S.	
29 S	Ulica Zapučke 29	18/04/2013	con bailer	5 m
29 D	Ulica Zapučke 29	18/04/2013	con pompa del S.G.S.	
30 S	Orehovlje 30	18/04/2013	con bailer	20 m
30 D	Orehovlje 30	18/04/2013	con pompa del pozzo	
90 S	Ulica 9 Septembra 90	18/04/2013	con bailer	20 m
90 D	Ulica 9 Septembra 90	18/04/2013	con pompa del S.G.S.	
220 S	Šempeter 220	18/04/2013	con bailer	23 m
220 D	Šempeter 220	18/04/2013	con pompa del S.G.S.	
224 S	Miren 224	18/04/2013	con bailer	10 m
224 D	Miren 224	18/04/2013	con pompa del pozzo	
255 S	Ulica 9 Septembra 255	16/04/2013	con bailer	10 m
255 D	Ulica 9 Septembra 255	16/04/2013	con pompa del S.G.S.	
330 S	Miren 5/b	18/04/2013	con bailer	25 m
330 D	Miren 5/b	18/04/2013	con pompa del pozzo	
420 S	Orehovlje 420	18/04/2013	con bailer	20 m
420 D	Orehovlje 420	18/04/2013	con pompa del S.G.S.	
NG-4/75 S	NG-4/75	16/04/2013	con bailer	20 m
NG-4/75 D	NG-4/75	16/04/2013	con pompa del S.G.S.	

Tabella 4.1: ID, nome, data e metodo di prelievo per i campioni raccolti durante la campagna svolta nei giorni 16 e 18 aprile 2013. Per i campioni raccolti con bailer è riportata anche la profondità di prelievo. Le lettere "S" e "D" che accompagnano il codice identificativo del pozzo indicano le condizioni statiche o dinamiche di prelievo del campione.

ID	Nome	Data	Metodo di prelievo	Profondità di prelievo
0075 S	Mochetta	23/05/2013	con bailer	11 m
0075 D	Mochetta	23/05/2013	con pompa dell'UniTs	
0086 S	San Luigi Salesiani	23/05/2013	con bailer	35 m
0089 S	Sede Iris	23/05/2013	con bailer	35 m
0328 S	Scariano	23/05/2013	con bailer	22 m
0328 D	Scariano	23/05/2013	con pompa dell'UniTs	

Tabella 4.2: ID, nome, data e metodo di prelievo per i campioni raccolti durante la campagna svolta il 23 maggio 2013. Per i campioni raccolti con bailer è riportata anche la profondità di prelievo. Le lettere "S" e "D" che accompagnano il codice identificativo del pozzo indicano le condizioni statiche o dinamiche di prelievo del campione.

ID	Nome	Data	Metodo di prelievo
0293 D	Farra - pozzo acquedotto	11/06/2013	con pompa del pozzo
02 S	Villesse officine Goriziane	11/06/2013	con pompa del pozzo
02 D	Villesse officine Goriziane	11/06/2013	con pompa del pozzo
03 S	Villesse casello autostrada	11/06/2013	con pompa del pozzo
03 D	Villesse casello autostrada	11/06/2013	con pompa del pozzo
04 D	Moraro impianto compostaggio	11/06/2013	con pompa del pozzo
05 S	Fossalon vasca antincendio	11/06/2013	con pompa del pozzo
05 D	Fossalon vasca antincendio	11/06/2013	con pompa del pozzo
06 S	Fossalon officina	11/06/2013	con pompa del pozzo
06 D	Fossalon officina	11/06/2013	con pompa del pozzo
07 D	Fossalon spaccio	11/06/2013	con pompa del pozzo
08 D	La Giulia	13/06/2013	con pompa del pozzo
09 D	Savogna Pollaio	13/06/2013	con pompa del pozzo
10 D	Codognotto	13/06/2013	con pompa del pozzo
11 S	Caserma finanza	13/06/2013	con pompa del pozzo
11 D	Caserma finanza	13/06/2013	con pompa del pozzo
DMG1 D	Stalla Grudina	13/06/2013	con pompa del pozzo

Tabella 4.3: ID, nome, data e metodo di prelievo per i campioni raccolti durante la campagna svolta nei giorni 11 e 13 giugno 2013. Le lettere "S" e "D" che accompagnano il codice identificativo del pozzo indicano le condizioni statiche o dinamiche di prelievo del campione.

ID	Nome	Data	Metodo di prelievo	Profondità di prelievo
18 S	Krožna Cesta 18	02/07/2013	con bailer	24 m
18 D	Krožna Cesta 18	02/07/2013	con pompa del S.G.S.	
26 D	Cesta Prekomorskih Brigad 26	02/07/2013	con pompa del S.G.S.	
29 D	Ulica Zapučke 29	03/07/2013	con pompa del S.G.S.	
30 D	Orehovlje 30	03/07/2013	con pompa del pozzo	
90 D	Ulica 9 Septembra 90	02/07/2013	con pompa del S.G.S.	
220 D	Šempeter 220	02/07/2013	con pompa del S.G.S.	
224 D	Miren 224	03/07/2013	con pompa del pozzo	
255 D	Ulica 9 Septembra 255	03/07/2013	con pompa del S.G.S.	
330 D	Miren 5/b	03/07/2013	con pompa del pozzo	
420 D	Orehovlje 420	03/07/2013	con pompa del S.G.S.	
NG-4/75	NG-4/75	02/07/2013	con pompa del S.G.S.	
0071 S	Case Medeot	04/07/2013	con bailer	25 m
0071 D	Case Medeot	04/07/2013	con pompa del S.G.S.	
0075 S	Mochetta	09/07/2013	con bailer	12 m
0075 D	Mochetta	09/07/2013	con pompa del S.G.S.	
0082 S	Gabria	09/07/2013	con bailer	17 m
0082 D	Gabria	09/07/2013	con pompa del S.G.S.	
0084 S	Ferrovia Via del San Michele	05/07/2013	con bailer	33 m
0084 D	Ferrovia Via del San Michele	05/07/2013	con pompa del S.G.S.	
0086 S	San Luigi Salesiani	04/07/2013	con bailer	35 m
0086 D	San Luigi Salesiani	04/07/2013	con pompa del S.G.S.	
0087 S	Cimitero Gorizia	05/07/2013	con bailer	36 m
0087 D	Cimitero Gorizia	05/07/2013	con pompa del S.G.S.	

0088 S	Borgnano	09/07/2013	con bailer	16 m
0088 D	Borgnano	09/07/2013	con pompa del S.G.S.	
0089 S	Sede Iris Gorizia	04/07/2013	con bailer	35.5 m
0089 D	Sede Iris Gorizia	04/07/2013	con pompa del S.G.S.	
0092 S	Moraro	04/07/2013	con bailer	16 m
0092 D	Moraro	04/07/2013	con pompa del S.G.S.	
0250 S	Crosere	08/07/2013	con bailer	55 m
0250 D	Crosere	08/07/2013	con pompa del S.G.S.	
0253 S	Begliano	08/07/2013	con bailer	15 m
0253 D	Begliano	08/07/2013	con pompa del S.G.S.	
0292 S	Fogliano Le Giarine	09/07/2013	con bailer	15 m
0292 D	Fogliano Le Giarine	09/07/2013	con pompa del S.G.S.	
0293 S	Farra - pozzo freatimetrie	04/07/2013	con bailer	10 m
0293 D	Farra - pozzo acquedotto	04/07/2013	con pompa del pozzo	
0309 D	Pieris - Via Brunner	03/07/2013	con pompa dell'ARPA	
0327 S	Mainizza - piezometro	04/07/2013	con bailer	10 m
0327 D	Mainizza - pozzo	04/07/2013	con pompa del pozzo	
0328 S	Scariano	09/07/2013	con bailer	23.5 m
0328 D	Scariano	09/07/2013	con pompa del S.G.S.	
0365 S	Ronchi rotonda aeroporto	08/07/2013	con bailer	8 m
0365 D	Ronchi rotonda aeroporto	08/07/2013	con pompa del S.G.S.	
0366 S	Cassegliano cimitero	08/07/2013	con bailer	12 m
0366 D	Cassegliano cimitero	08/07/2013	con pompa del S.G.S.	
2 D	Cassegliano	08/07/2013	con pompa del pozzo	
12 D	Cassegliano, via Matteotti	03/07/2013	con pompa del pozzo	
12F S	Cassegliano, via Matteotti	08/07/2013	con bailer	10 m
12F D	Cassegliano, via Matteotti	08/07/2013	con pompa del S.G.S.	
15 D	Pieris, via Primo Maggio	03/07/2013	pozzo artesiano	
15F D	Pieris, via Primo Maggio	03/07/2013	con pompa dell'ARPA	
16 D	Dobbia, Acquedotto Iris	08/07/2013	con pompa del pozzo	
DMG1 D	Stalla Grudina	05/07/2013	con pompa del pozzo	

Tabella 4.4: ID, nome, data e metodo di prelievo per i campioni raccolti durante la campagna svolta nei giorni 2-5, 8 e 9 luglio 2013. Per i campioni raccolti con bailer è riportata anche la profondità di prelievo. Le lettere "S" e "D" che accompagnano il codice identificativo del pozzo indicano le condizioni statiche o dinamiche di prelievo del campione.

ID	Nome	Data	Metodo di prelievo	Profondità di prelievo
0079 S	Peci	18/07/2013	con bailer	16.5 m
0167 S	Borgo Basiol	18/07/2013	con bailer	11 m
0336 S	San Zanut	18/07/2013	con bailer	11 m
0362 S	San Polo	18/07/2013	con bailer	6.5 m
0364 S	San Vito	18/07/2013	con bailer	5 m
24F S	Vicino Crosere	18/07/2013	con bailer	5 m
DMG2 S	Rupa	18/07/2013	con bailer	17 m

Tabella 4.5: ID, nome, data, metodo e profondità di prelievo per i campioni raccolti durante la campagna svolta il giorno 18 luglio 2013. La lettera "S" che accompagna il codice identificativo del pozzo indica le condizioni statiche di prelievo del campione.