



Monografia / 5

Gli acquiferi nel bacino del Lago Trasimeno: analisi delle caratteristiche idrogeologiche e idrogeochimiche per la valutazione dei rapporti con il corpo idrico lacustre e l'identificazione di criticità ambientali



Redazione

Dott. Luca Peruzzi

Contributi**Validazione**

Dott. Linda Cingolani

Verifica

Dott. Giancarlo Marchetti
Dott. Alberto Micheli
Dott. Adriano Zavatti

Versione:

Luglio 2005

1.	SINTESI.....	1
2.	PREMESSA.....	1
3.	CARATTERISTICHE GEOLOGICHE.....	1
3.1	"Insieme Varicolore" [Argille varicolori] (Eocene inf.- Cattiano inf.).....	2
3.2	Arenarie del Trasimeno (Oligocene sup. - Miocene inf.).....	4
3.3	Depositi fluvio-palustri "Villafranchiani" (Pleistocene inf.).....	5
3.3.1	Settore settentrionale.....	5
3.3.2	Settore occidentale.....	5
3.4	Alluvioni attuali e recenti (quaternario med.-sup.).....	5
4.	INQUADRAMENTO STRUTTURALE ED EVOLUTIVO.....	6
5.	CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE.....	7
5.1	Torbiditi.....	7
5.2	Depositi lacustri e alluvionali.....	9
5.2.1	Settore settentrionale.....	9
5.2.2	Settore occidentale.....	10
6.	VALUTAZIONE DEI RAPPORTI TRA ACQUIFERI E CORPO IDRICO LACUSTRE.....	11
7.	CARATTERISTICHE IDROGEOCHIMICHE DELLE ACQUE SOTTERRANEE.....	13
8.	CONCLUSIONI.....	15
9.	BIBLIOGRAFIA.....	17

ALLEGATO 1: CARATTERISTICHE IDROGEOCHIMICHE DEGLI ACQUIFERI NEL BACINO DEL LAGO TRASIMENO

1.	PREMESSA.....	1
2.	CAMPIONAMENTO E DETERMINAZIONI SUL CAMPO.....	1
2.1	Analisi di laboratorio.....	3
2.2	Metodi di elaborazione dei dati.....	3
3.	DISTRIBUZIONE PIEZOMETRICA.....	3
4.	CLASSIFICAZIONE CHIMICA DELLE ACQUE.....	5
5.	DIAGRAMMI Eh-Ph.....	6
5.1	Sistema n-o-h.....	7
5.2	Sistema fe-o-h.....	9
5.3	Sistema mn-c-s-o-h.....	10
6.	DISTRIBUZIONE ELEMENTI MOBILI (o conservativi).....	11
6.1	Diagramma Na vs Cl.....	12
6.2	Diagrammi Cl vs Li e Na vs Li.....	14
6.3	Diagrammi K vs Na e K vs Cl.....	15
6.4	Processi.....	15
7.	DISTRIBUZIONE GEOGRAFICA DELLE ANOMALIE DI NITRATI.....	17
8.	DISTRIBUZIONE FOSFATI E FLUORURI.....	18
9.	CONCLUSIONI E CRITICITÀ INDIVIDUATE.....	19
10.	BIBLIOGRAFIA.....	21

1. SINTESI

Il presente lavoro monografico analizza le principali criticità ambientali che coinvolgono gli acquiferi nel bacino del Lago Trasimeno da una prospettiva che considera sia la sostenibilità dello sfruttamento delle risorse idriche sotterranee, sia il loro contributo al corpo idrico lacustre, quale elemento significativo del bilancio idrico, soprattutto se considerato nella attuale fase di crisi. Vengono inoltre identificati i principali processi idrogeochimici attivi nei sistemi acquiferi, l'estensione e l'entità delle aree interessate da contaminazione di prodotti di origine agricola, per una verifica indiretta del carico inquinante che insiste sul bacino e incide sulla conservazione ecologica dell'habitat naturale del lago.

2. PREMESSA

La presente relazione monografica propone una disamina delle caratteristiche dei corpi idrici sotterranei nel bacino del Lago Trasimeno. L'analisi delle peculiarità geologiche del bacino è stata affrontata utilizzando un vasto pregresso di studi specifici realizzati da vari autori a partire dagli anni '60 mentre, per le caratteristiche idrogeologiche, sono stati utilizzati alcuni studi di dettaglio realizzati nell'ambito della ricerca di risorse idriche da destinare al consumo umano e sulla scorta delle stime del bilancio idrico del corpo lacustre.

Per quanto riguarda la conoscenza delle caratteristiche idrogeochimiche degli acquiferi, poiché il pregresso di studi risultava caratterizzato da dati frammentari nonché piuttosto datati, nell'ambito della convenzione per uno *studio finalizzato alla delimitazione delle zone critiche per il tenore in nitrati negli acquiferi alluvionali dell'Umbria e per la caratterizzazione idrogeochimica del bacino del Lago Trasimeno*, stipulata tra ARPA Umbria e Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Perugia, è stato effettuato, tra Ottobre e Dicembre 2003, uno studio idrogeochimico delle acque sotterranee nel bacino del lago Trasimeno.

La relazione presenta un'analisi delle caratteristiche della circolazione idrica sotterranea e il quadro generale del chimismo delle acque campionate e sui principali processi geochimici attivi nei sistemi idrogeologici del bacino. Vengono identificate le principali criticità qualitative e quantitative delle risorse idriche sotterranee che costituiscono gli aspetti fondamentali che dovranno essere considerati nello sviluppo dell'attività di monitoraggio.

3. CARATTERISTICHE GEOLOGICHE

Nel bacino del Trasimeno sono rappresentati in affioramento due principali gruppi di formazioni:

- nella zona occidentale affiorano i terreni neogenici di facies fluvio-lacustre,
- nella zona settentrionale, orientale e in parte di quella meridionale, affiorano i sedimenti emipelagici dell'Unità Falterona-Trasimeno, appartenenti alla falda Toscana ("falda del Trasimeno", cfr. Lavecchia et alii, 1987). Il bacino del Trasimeno si trova infatti nella zona di sovrapposizione della serie Toscana sulla serie Umbro-Marchigiana.

L'unità Falterona-Trasimeno è costituita da due formazioni:

- l' "Insieme Varicolore" (già note in letteratura come Argille Varicolori, Scisti policromi, Marne di Pieve Pelago, ecc.);
- le Arenarie del Trasimeno.

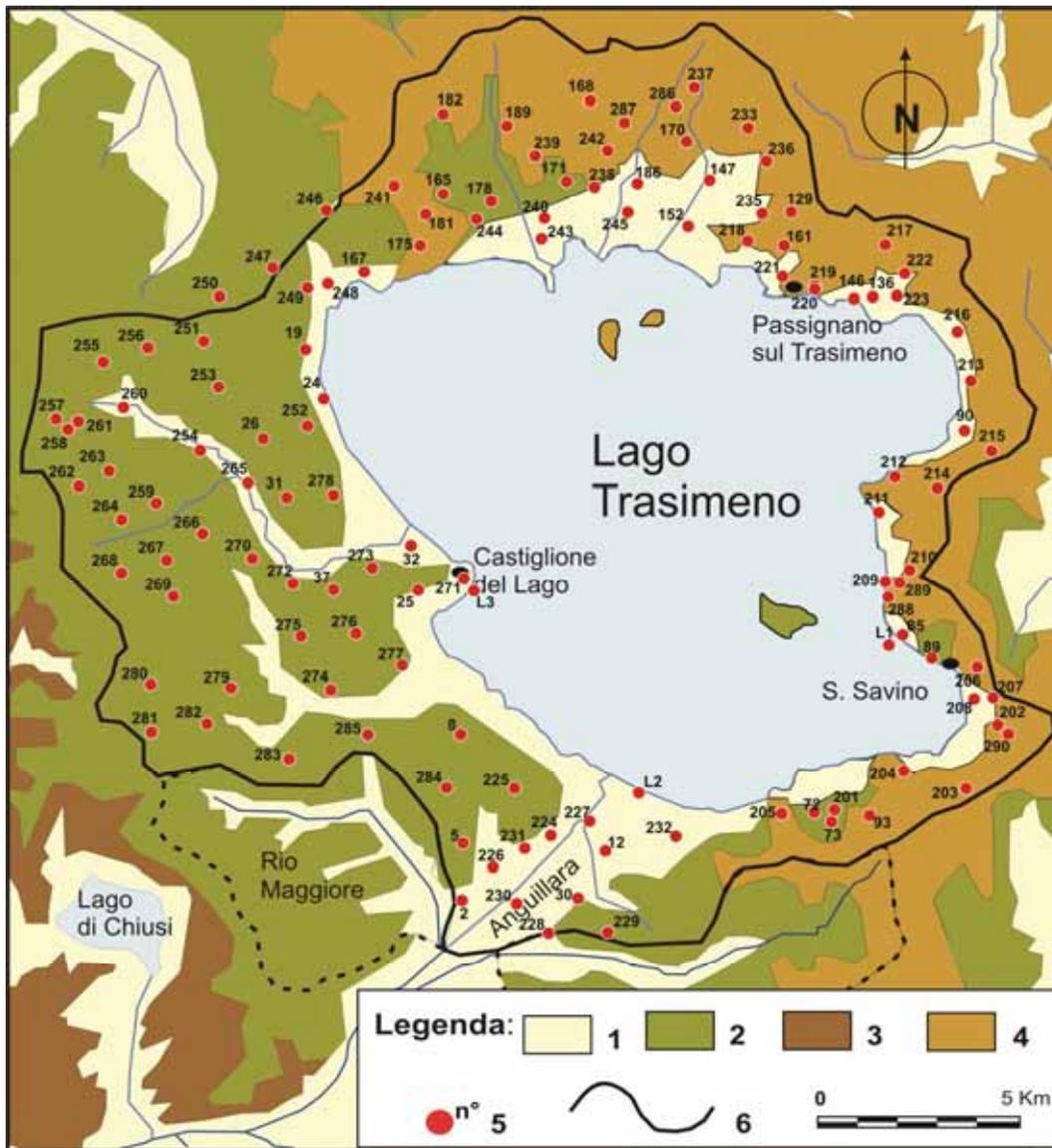


Fig.1: Carta di campionamento (modificata da Dragoni, 1982) e geolitologica. Legenda: 1 = depositi alluvionali fluvio-lacustri recenti e attuali; 2 = Depositi fluvio-lacustri del Pleistocene; 3 = depositi litorali del pliocene; 4 = Formazioni torbiditiche oligo-mioceniche; 5 = punti di campionamento; 6 = Limite del bacino imbrifero.

Il contatto tra le due formazioni, quando osservabile, risulta essere stratigrafico con rapide alternanze di arenarie con marne e argilliti (Cerrina Ferroni A. et alii, 1992). Per variazioni di spessore, di facies e di età si distinguono due successioni: una interna appartenente al dominio Toscano e una esterna di transizione tra dominio Toscano e dominio Umbro.

3.1 “Insieme Varicolare” [Argille varicolori] (Eocene inf.- Cattiano inf.)

I terreni più antichi affioranti nell'area in esame e, più in generale, in tutto il bacino idrografico del Trasimeno, sono rappresentati dall' “Insieme varicolare” (Eocene inf.- Cattiano inf.). Con tale termine si indica una continua e ben definita successione stratigrafica, costituita dalla sovrapposizione di tre unità litologicamente distinte (Damiani A.V. & Pannuzi L., 1985), già nota nella letteratura geologica con nomi diversi (Scisti o Argilloscisti varicolore; Nummulitico; Scaglia toscana; ecc.). La formazione delle Argille Varicolori, (Eocene inf.- Oligocene sup.), appartiene, secondo vari autori, alla successione Toscana periferica interna e costituisce la base delle unità silicoclastiche toscane sovrascorse sulla successione Umbra. L'età di questa formazione diminuisce progressivamente spostandoci da Ovest verso Est, questo indica probabilmente una migrazione verso E del depocentro del bacino di sedimentazione. La particolare geometria, unitamente all'estrema difficoltà di proporre datazioni relative accurate, ha determinato interpretazioni difformi (e tra loro contrastanti) circa il loro significato geologico. A tal riguardo si segnalano due modelli alternativi:

- l'elaborazione della Carta Geologica d'Italia (Jacobacci A. et alii, 1970), ha utilizzato un modello che ritiene che i "sedimenti policromi" costituiscano lenti di variabile potenza ed estensione, depositi episodicamente entro il "Macigno";
- il secondo modello prevede gli "Scisti varicolore" stratigraficamente alla base del "Macigno" e che l'attuale assetto strutturale sia imposto da una tettonica compressiva, responsabile di sovrascorrimenti e quindi di ripetizioni della successione stratigrafica (Pazzini P., 1959; Nocchi M., 1961).

Gli studi più recenti pubblicati hanno prodotto uno schema sufficientemente chiaro della stratigrafia e del significato tettonico di tali sedimenti, che ben si inquadra nell'ambito dell'orogenesi appenninica (Boscherini A. et alii, 1982; Damiani A.V. et alii, 1983, 1987, 1991; Damiani A.V. & Pannuzi L., 1985). L'insieme varicolore può essere ripartito in tre unità informali, distinguibili tra loro per le diverse caratteristiche litologiche legate alla batimetria del bacino di sedimentazione.

L' "Insieme varicolore" risulta costituito da tre unità sovrapposte, la più antica delle quali è l'**Unità di Seano** (Eocene inf.-Eocene med.). Si tratta di litologie prevalentemente calcaree, in strati dello spessore di 20-50 cm, costituite da calcari marnosi (calcilutiti) di color grigio o rosato, con subordinate intercalazioni marnose grigio-verdi fogliettate. Relativamente abbondante è la selce, in lenti e noduli di color grigio. Anche se la base dell'unità non affiora, gli spessori di questa unità dovrebbero di poco superare i 100 metri. L'analisi micropaleontologica (Damiani A.V. et alii, 1989), ha evidenziato che le associazioni faunistiche a Foraminiferi dominanti, presentano evidenti tracce di fenomeni di dissoluzione parziale o totale, ad indicare una sedimentazione avvenuta in un ambiente al di sopra della CCS ma con frequenti oscillazioni al di sotto del lisocline dei foraminiferi.

L'unità intermedia, denominata **Unità di Pierle** (Eocene med.), stratigraficamente sovrastante a quella di Seano è costituita da calcari marnosi grigi a fiamme rossastre, ben stratificati, con intercalazioni di marne argillose rosse in piccole scaglie dovute a fratturazione e strati di calcareniti grigie. Gli affioramenti, data l'elevata erodibilità delle litologie, sono scarsi e discontinui e la stima dello spessore dell'unità, valutabile in circa 60 m, risulta difficoltosa. La microfauna presente è contraddistinta da un rapporto plancton/benthos intorno a uno ed i gusci, mal conservati e parzialmente disciolti, fanno ritenere che la sedimentazione si sia verificata ad una profondità maggiore dell'unità calcarea, sotto il lisocline dei foraminiferi, ma ancora al di sopra della C.C.S..

L' "Insieme varicolore" termina superiormente con l'**Unità de l'Ansina** (Eocene sup.-Cattiano inf.), al di sopra della quale si ha passaggio stratigrafico per alternanza con le Arenarie del Trasimeno. Essa è costituita da argilliti fogliettate (argilloscisti) color tabacco, verde, o rossastro, con intercalazioni metriche e decimetriche di calcareniti e calcari marnosi grigi. Lo spessore dell'unità è di 50-80 metri. Il contenuto micropaleontologico è scarso e rappresentato quasi unicamente da foraminiferi agglutinanti, mentre le forme planctoniche a guscio calcareo sono molto rare. La sedimentazione dovrebbe quindi essersi verificata sotto la C.C.S., probabilmente ad una profondità¹ compresa tra i 3500 ed i 4000 m.

I rapporti stratigrafici tra le unità toscane dell' "Insieme varicolore" e le eteropie di facies che esso presenta con le coeve formazioni dell'Umbria, hanno consentito di ricostruire la paleogeografia del bacino relativa all'Eocene-Oligocene. Dall'Eocene inf. fino agli inizi di quello medio, mentre nel bacino dell' "Insieme varicolore" si sedimenta l'Unità di Seano, nelle successioni eugubine si assiste al passaggio Scaglia rossa-Scaglia variegata, formazioni caratterizzate da associazioni faunistiche a foraminiferi planctonici in ottimo stato di conservazione. A partire dall'Eocene med., da un lato si ha sedimentazione di marne argillose con intervalli calcarenitici e lenti di selce (Unità di Pierle), dall'altro si hanno calcari marnosi e marne senza selce, ricchi di foraminiferi planctonici (Scaglia variegata). Dall'Eocene sup. fino al Cattiano inf., le litologie dell' "Insieme varicolore" sono rappresentate da argilloscisti con basse percentuali di carbonato di calcio (Unità de l'Ansina); le coeve successioni dell'Umbria occidentale sono invece costituite, prima dalla Scaglia variegata, e poi da quella cinerea. Quest'ultime, pur mostrando un progressivo arricchimento in argilla, contengono sempre a differenza di quelle toscane, alti tenori carbonato di calcio. Tutte queste considerazioni crono-stratigrafiche, unitamente ai dati sulle velocità di sedimentazione e sulle direzioni di provenienza delle calcareniti, indicano che, dall'Eocene inf. all'Oligocene sup., il bacino un fenomeno di subsidenza con un conseguente aumento della profondità del fondale (Damiani et alii, 1987) e la migrazione del depocentro. Osservando infatti il bacino da W verso E, in un istante qualsiasi dell'intervallo di tempo considerato, si assiste al contempo ad una lenta risalita dei fondali, ad un incremento della velocità di

¹ La superficie CCS nel Nord Atlantico durante il Paleogene (Berger e Von Rad, 1972; Van Andel, 1974) si trovava al di sotto dei 3500 metri e in particolare tra l'Eocene medio e l'inizio dell'Oligocene superiore la CCS si è approfondita di 400 metri, passando dai 4000 m ai 4400 m. Se questo trend può essere esportato per il bacino dell'insieme varicolori, bisogna ipotizzare un abbassamento dei fondali al sotto della CCS.

sedimentazione, ad una diminuzione della frazione argillosa nei sedimenti, ad un ringiovanimento di tutte le unità litostratigrafiche.

3.2 Arenarie del Trasimeno (Oligocene sup. - Miocene inf.)

Tale formazione, nota nella letteratura con i nomi di "Macigno s.l.", "Arenarie del Cervarola-Falterona", ecc., è stratigraficamente sovrastante all' "Insieme varicolore" con il quale mostra passaggio per alternanze. Si tratta di depositi torbiditici silicoclastici, costituiti da potenti strati (spessi da 10-30 cm fino a più di 3 m) di arenaria da fine a grossolana, cui si alternano straterelli di argille e marne siltose. Il rapporto arenaria/marna, che in generale è maggiore di 1, in corrispondenza di strati amalgamati, dove le intercalazioni pelitiche sono rare o addirittura inesistenti, raggiunge spesso valori molto alti.

I caratteri litologici della formazione variano sensibilmente anche in funzione delle diverse aree di affioramento. Ad E dell'allineamento Volterrano-Pian di Marte, l'intera sequenza ha spessori di 300-500 m, con una frazione pelitica sempre piuttosto abbondante ("Successione intermedia" di Damiani A.V., 1991): ad W si può invece operare la seguente suddivisione in membri:

- membro inferiore, organizzato in megasequenze negative e costituito da grossi banchi arenaci, prevalentemente quarzoso-micacei, spesso amalgamati, di arenarie massicce in "facies A" con rare e sottili intercalazioni argillose. Lo spessore è di circa 600 m;
- membro intermedio, dato da successioni arenaceo-pelitiche, potenti circa 300 m;
- membro superiore, in prevalenza pelitico, spesso circa 600 m.

La porzione inferiore, sedimentatasi in un ambiente di conoide interna o di lobo, è caratterizzata da un rapporto A/M molto alto.

Quella intermedia, più ricca di partimenti marnosi e riferibile ad un ambiente di frangia, affiora nei settori occidentali dell'area, così come quella superiore, tipica invece di un ambiente di pianura sottomarina.

Il tipo litologico prevalente consiste in grovacke litiche a composizione quarzoso-feldspatica-micacea, caratterizzate da laminazioni poco evidenti e gradazione granulometrica ben rilevabile solo in alcuni banchi più potenti. Impronte di fondo (groove casts, flute casts, ecc.) ed altre tipiche strutture torbiditiche si rinvengono al contatto tra il letto di uno strato arenaceo ed il tetto di un livello pelitico. Macroscopicamente gli strati di arenaria appaiono ben compatti, di color grigio azzurro nelle parti non alterate, mentre nelle porzioni più soggette all'azione degli agenti esogeni e delle acque percolanti, la compattezza diminuisce ed il litotipo assume una colorazione giallo-ocra. All'interno degli strati, appaiono sporadicamente masse argillose pseudosferiche, aventi diametri di qualche centimetro.

Tutta la successione interna delle arenarie del Trasimeno è riferibile all'Oligocene superiore e al massimo arriva al Miocene inferiore (Aquitano basale - Damiani A.V. et alii, 1991). La deposizione delle Arenarie del Trasimeno è da inquadrarsi nel contesto della migrazione verso E dell'avanfossa oligo-miocenica appenninica. Al passaggio Oligocene-Miocene, mentre nel dominio toscano, probabilmente al di sotto della C.C.S., si depositavano le Arenarie del Trasimeno, più ad E stava per avere inizio la sedimentazione delle marne argilloso-arenacee della "successione intermedia" e, nella parte superiore dello slope, quella della Scaglia cinerea, comune a tutte le "successioni ombre s.l."

Nella zona studiata, il passaggio stratigrafico con l' "Insieme varicolore" si realizza con la sedimentazione di livelli siltitici e di sabbie fini in cui sono riconoscibili gli intervalli Tc-e di Bouma. Tale mutamento di litologie coincide anche con un'importante variazione dell'ambiente deposizionale: da una situazione di scarpata sottomarina, si passa a condizioni di conoide interna, che in seguito evolveranno a loro volta verso ambienti di frangia prima e di pianura sottomarina poi.

A differenza di quanto osservato nel settore interno, in quello esterno non è possibile riconoscere la tripartizione, in quanto le arenite massive sono presenti in episodi e in alcuni luoghi contengono selce nera, la componente pelitica è più abbondante e tutta la serie sembra essere più giovane, riferibile al Miocene.

Sul lato occidentale del bacino del Trasimeno, dai sedimenti neogenici affiorano due piccoli lembi di calcareniti e arenarie con interstrati marnosi e argillosi, di cui il più vistoso forma la rocca di Castiglione del Lago mentre l'altro affiora in località Pucciarelli. La posizione stratigrafica di questi non è chiara e vengono attribuiti ad un non meglio precisato Miocene medio. Secondo gli autori della carta geologica ufficiale questi sedimenti possono essere collegati alle Marne di Monte San Michele (marne di Vicchio) poste al tetto delle Arenarie di Monte Cervarola (Arenarie del Trasimeno). Secondo altri autori potrebbero rappresentare frammenti di unità subliguri arrivati fino nella Zona umbra (Deffenu L. e Dragoni W., 1977).

3.3 Depositi fluvio-palustri "Villafranchiani" (Pleistocene inf.)

Sono sedimenti continentali depositi, nel corso del Pleistocene inf., in una zona relativamente depressa ad elevata subsidenza (Bacino della Val di Chiana). Questo bacino ebbe origine in seguito alla tettonica distensiva appenninica che, a partire dal Tortoniano superiore, iniziò a propagarsi dalla Toscana occidentale verso E.

Litologicamente si tratta di sedimenti sciolti² caratterizzati, almeno in affioramento, dalla prevalenza della componente sabbioso-limosa cui si intercalano lenti argillose e ghiaiose.

3.3.1 Settore settentrionale

Nella parte settentrionale, tali depositi costituiscono un'ampia fascia di raccordo tra il sottostante substrato arenaceo e le sovrastanti alluvioni recenti delle zone circumlacuali. L'assenza nelle aree rilevate di sondaggi geognostici non consente la ricostruzione delle successioni e, conseguentemente, di operare correlazioni litostratigrafiche. I dati derivano dalle informazioni raccolte da imprese di perforazione e dagli stessi proprietari di pozzi, essi vanno quindi analizzati con le necessarie cautele e si riferiscono, in ogni caso, a profondità di pochi metri sotto il livello campagna (Biagini F., 1993). L'analisi dei dati consente di apprezzare una notevole eterogeneità dei depositi che riguarda sia la loro continuità laterale, sia il loro spessore. Nella zona di Baroncino (NW di Tuoro) si incontrano, dall'alto verso il basso, 2-5 m di ghiaia in matrice sabbiosa, 1-2 m di limi e sabbie fini in abbondante matrice argillosa seguite da alternanze di sabbie e limi con sottili livelli ghiaiosi (15-20 m). Nella zona di Riscopello, si ha uno spessore di circa 10 m di sabbie argillose, al di sotto del quale si rinvennero prima 1-2 m di sabbie e ghiaie, cui fanno seguito alternanze di sabbie e limi con episodi argillosi (20-25 m) (Biagini F., 1993). Lo spessore totale di tali sedimenti è incognito per quanto riguarda i suoi valori massimi, esso tende però progressivamente a ridursi, fino ad annullarsi, in prossimità degli affioramenti del flysch.

3.3.2 Settore occidentale

Nella parte occidentale del bacino, litologie sincrone a quelle sopra esaminate giacciono in discordanza angolare sopra depositi marini³ del Pliocene che affiorano esternamente al bacino imbrifero e sono delimitate al tetto da una superficie di erosione che le separa dalla successiva sedimentazione post-Villafranchiano.

Da W verso E, su base topografica, vengono distinti tre diversi ordini di sedimenti fluvio-lacustri di genesi progressivamente più recente i cui limiti, nella realtà molto sfumati, hanno genericamente direzione N-S (Venanti L.D., 1997) e individuano antiche linee di costa (parallele all'attuale) testimoni del basculamento subito dal bacino del Lago Trasimeno tra 5-1,7 Ma fa, per effetto della tettonica distensiva in direzione E-NE (Venanti L.D., 1997).

La variazione in direzione ENE della primitiva direzione di scorrimento (da N a S) del F.sso Paganico e del Rio Pescia costituisce la prova del basculamento⁴ dell'intera zona.

Nella Zona situata tra Panicarola, Gioiella, Pozzuolo e Petrignano affiorano i depositi di facies fluvio-lacustre costituiti, prevalentemente, da sabbie giallo-brune ricche in argilla e con clasti arenacei, in parte marnosi, poco elaborati, provenienti dalla disgregazione del basamento (Dragoni W., 1982). L'assetto di questi materiali è sempre caotico ma sono presenti frequentemente livelli continui di materiale omogeneo che danno origine a una pseudostratificazione. La giacitura del complesso è per lo più in assetto orizzontale. Inoltre, data la geometria lenticolare dei sedimenti presenti, sono possibili eteropie di facies intraformazionali sia in senso verticale che trasversale relative a fasi granulometriche variabili e sfumate le une nelle altre, passando da sabbie a sabbie in matrice limosa.

Questi sedimenti sono correlabili con quelli del bacino di Tavernelle, che si trova immediatamente a SE del Trasimeno, e possono essere riferiti al complesso Villafranchiano superiore (Cattuto C. et alii, 1983). Il Quaternario medio è rappresentato da sedimenti sabbioso-argillosi con intercalazioni di sottili letti ghiaiosi.

3.4 Alluvioni attuali e recenti (quaternario med.-sup.)

Costituiscono la quasi totalità della pianura circumlacuale, formando una fascia ampia 1-2 Km nel settore settentrionale e, in media, poco meno di un chilometro in corrispondenza del settore occidentale e meridionale. Questi sedimenti, come quelli sopra descritti, hanno struttura lenticolare e sono formati in

² La successione classica del Bacino della Val di Chiana (Pleistocene inf.-med.), è costituita dal basso verso l'alto da argille sabbiose, sabbie con intercalazioni argillose, sabbie argillose con letti di ghiaie.

³ depositi marini relativi alla trasgressione che nel Pliocene ha interessato la Toscana e parte dell'Umbria. La fauna a molluschi che caratterizza questi sedimenti indica un ambiente di deposizione litorale salmastro, riferibile a un delta fluviale.

⁴ L'antica direzione di deflusso doveva quindi essere diretta da N verso S [il Lago non era ancora un sistema chiuso] (Venanti L.D., 1997).

prevalenza da sabbie e limi in matrice argillosa, cui si alternano livelli argillosi e più raramente ciottolosi. La facies è per lo più torrentizia, ma è presente anche quella lacustre e palustre poiché, almeno in certe fasi del quaternario, l'antico Trasimeno occupava una superficie ben maggiore dell'attuale.

4. INQUADRAMENTO STRUTTURALE ED EVOLUTIVO

L'evoluzione dell'Appennino Tosco-Umbro-Marchigiano, a partire dall'Oligocene superiore fino al Pleistocene inferiore, si può sintetizzare in una progressiva migrazione da W verso E del sistema catena-avanfossa che può essere messo in relazione alla progressione verso E del rifting Tirrenico.

Nell'Oligocene superiore si genera una prima ruga costituita dalle unità sub-liguri, dall'unità di Massa e dalle unità Apuane. Ad oriente di questa si sviluppa una vasta area a sedimentazione torbidity articolata in fasce sub-parallele, con la formazione di bacini d'avanfossa e più internamente bacini "piggy back".

Nel Burdigaliano superiore il corrugamento va ad interessare le aree più interne del dominio Toscano con una conseguente migrazione dell'avanfossa verso E. In prossimità della nuova ruga s'instaura un bacino "piggy back" in cui si sedimentano torbiditi silicoclastiche fini di provenienza alpina con intercalazioni carbonatiche provenienti da E. È in questo ambiente che si sedimentano le Arenarie del Trasimeno. Quando nel Langhiano il corrugamento interessa le zone più esterne del dominio Toscano la sedimentazione assume caratteri emipelagici con la deposizione delle Mame di Vicchio che vanno a chiudere il bacino delle Arenarie del Cervarola Trasimeno. Più a E la sedimentazione della Marnoso-Arenacea si estende verso l'esterno.

Nel Tortoniano si verifica l'accavallamento della Falda Toscana su quella Umbra con il conseguente inizio del corrugamento della Marnoso-Arenacea.

Le prime manifestazioni di tettonica distensiva si verificano nella porzione più interna del bacino Toscano alla fine del Tortoniano con la creazione di una serie di depressioni a sedimentazione lacustre e fluvio-lacustre (Boccaletti M. et alii, 1986). Questo campo di sforzi, che si manterrà fino al Quaternario inoltrato, porta ad una parziale cancellazione della precedente struttura a pieghe e sovrascorrimenti e genera grandi strutture distensive, i bacini villafranchiani, come quello della Val di Chiana e dell'Alto Tevere, depressioni allungate per più di 200 Km e ribassate per centinaia di metri, ancora riconoscibili nell'attuale morfologia. Tra questi bacini, il graben del Paglia-Tevere-Chiana che si estende dal monte Amiata ai monti di Magione, è quello direttamente legato alla genesi del Trasimeno (Deffenu L. e Dragoni W., 1978).

Nel Pliocene inferiore si verifica una vasta trasgressione marina che interessa la Toscana meridionale e che porta il mare fino all'allineamento Monti del Chianti-Val Tiberina (Boccaletti M. et alii, 1986). Nella prima fase sedimentaria (Pliocene) si osserva una graduale subsidenza e così il graben è riempito da depositi argillosi, argillo-sabbiosi e ciottolosi tipicamente di ambiente marino. Alla fine del Pliocene inizia un generale sollevamento che provoca una regressione marina. Il sollevamento non avviene in modo uniforme su tutto il bacino, così le prime terre ad emergere sono le parti marginali del graben mentre nelle zone centrali continua la sedimentazione.

Nel Pleistocene la sedimentazione assume carattere continentale di facies salmastro-lacustre: in questa situazione si hanno dei bacini disarticolati tra loro in relativa subsidenza in una struttura che sta subendo un generale sollevamento. A questa fase tettonica è da attribuirsi il rapido prosciugamento dei grandi laghi villafranchiani, compreso quello della Val di Chiana dal quale deriva l'attuale Lago Trasimeno (Deffenu L. e Dragoni W., 1978).

Osservando la geometria della fossa Paglia-Tevere-Chiana, si osserva che il Trasimeno occupa una posizione asimmetrica, cioè rimane nettamente spostato nella parte orientale. Questo potrebbe indicare che il bacino del Trasimeno si è impostato lungo un fascio di strutture distensive poste in posizione intermedia tra il graben del Chiana-Tevere e quello dell'alta Val Tiberina, non sufficientemente importanti da consentire la formazione di un vero e proprio graben. Il Trasimeno potrebbe quindi rappresentare un link tra il graben di Arezzo, a N, e quello del medio bacino tiberino a S (Evangelisti C., 2003).

5. CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE

5.1 Torbiditi

Le formazioni terziarie, che costituiscono la porzione orientale e settentrionale del bacino, sono costituite da arenarie con abbondante contenuto in argille, alternate a livelli argillosi, marnosi; le fessure sono generalmente riempite da materiale fine. Quindi questi terreni risultano decisamente poco permeabili e permettono l'instaurarsi di modeste falde idriche superficiali, che per lo più si impostano nel materiale di disfacimento e generano sorgenti con portata irrilevante. Le caratteristiche di questi materiali spiegano lo sfasamento temporale tra i mesi di massima piovosità, settembre, ottobre, novembre e i massimi aumenti del livello idrometrico del lago, che si hanno nel mese di febbraio. La coltre di disfacimento e i suoli che ne derivano, impiegano infatti molto tempo a saturarsi e in questa fase trattengono acqua in notevole misura (Deffenu L. e Dragoni W., 1977).

Nel prg.3.1 si è visto che, con esclusione della porzione più occidentale dell'area (ricca di partimenti argillosi e marnosi), gli affioramenti di Arenarie del Trasimeno sono in prevalenza costituiti da litologie arenacee in strati spessi 30-80 cm, con rare e sottili intercalazioni pelitiche. Il comportamento di tali materiali sottoposti a stress tettonici è conseguentemente di tipo rigido, le deformazioni meccaniche si realizzano con fenomeni disgiuntivi e, solo in modo subordinato, plicativi. Questa formazione costituisce pertanto un acquifero a permeabilità mista (con un valore di K compreso tra 10^{-6} e 10^{-4} cm/s), molto poroso, entro il quale la circolazione idrica è concentrata in particolare all'interno della coltre di alterazione superficiale ed in corrispondenza delle porzioni più fratturate. Quest'ultime presentano superfici di fratturazione disposte di solito secondo piani subverticali, più pervasivi dove la stratificazione è sottile, più spaziosi nei banchi di maggior spessore.

L'elevato gradiente idraulico evidenziato dalla carta piezometrica (Fig.2) è compatibile con un sistema idrogeologico caratterizzato da modestissime restituzioni sorgive, organizzate in tre generali fasce

Fig.2: Carta Piezometrica.



altimetriche, a distinguere il versante basso-collinare (quota intorno a 300 m s.l.m.), quello medio-collinare (quota intorno a 400 m s.l.m.) e uno alto-collinare (rappresentato da un ristrettissimo numero di emergenze a quote intorno a 600 m s.l.m.). Tali aree sono state oggetto di un certo sviluppo residenziale che, in mancanza di una rete acquedottistica, ha inevitabilmente condotto ad un soddisfacimento dell'idroesigenza mediante l'escavazione di nuovi pozzi destinati agli usi domestici. L'analisi delle relazioni geologiche a corredo delle richieste di escavazione dei pozzi, consente di apprezzare l'esistenza di diversi livelli di circolazione la cui intercettazione risulta incoraggiata dalla presenza delle emergenze sopra menzionate. Tali dati non consentono tuttavia una più puntuale descrizione del sistema idrogeologico in quanto i dati stratigrafici e idrogeologici relativi alle captazioni completate non sono stati comunicati (ne peraltro sussiste l'obbligo di comunicazione) alla pubblica amministrazione.

Dai dati piezometrici raccolti e da quelli prodotti da uno studio specifico effettuato nel settore nord-occidentale del L. Trasimeno (Biagini F., 1993), in relazione alle caratteristiche idrogeologiche dei terreni, per le acque sotterranee può essere ipotizzato un modello idrogeologico che prevede l'esistenza di livelli di circolazione a quote diverse. La circolazione epidermica è rappresentata da un buon numero di restituzioni sorgive. Dalla misura delle portate delle sorgenti, il dato fondamentale che emerge è la modesta quantità dei volumi idrici coinvolti. Dai calcoli del bilancio idrogeologico (estremamente semplificato) effettuati nell'ambito del sopra citato studio su un'area di 42 Km², è stata infatti stimata (assumendo che la portata complessiva media sia uguale alla media aritmetica delle portate totali relative alle misurazioni) una portata totale media annua dell'ordine di 15 l/s (Biagini F., 1993) che, come già detto, evidenzia una circolazione molto modesta e fortemente condizionata dai regimi di magra e di morbida. I diversi livelli di circolazione, oltre che dalla profondità delle varie captazioni ad uso domestico, sono stati investigati mediante un'indagine specifica realizzata nel 1993 dal Comune di Tuoro (Biagini F., 1993) e attraverso prospezioni di tipo idrogeochimico. Nell'ambito dello studio finanziato dal Comune di Tuoro, attraverso l'esecuzione di sondaggi elettrici verticali, ha individuato due diversi orizzonti:

- un livello epidermico, ad una profondità di circa 20 m dal p.c., collegabile allo stesso tipo di falde che alimentano gran parte delle sorgenti della zona;
- un secondo livello, ad una profondità di oltre 180 m dal p.c., costituisce la parte basale di un resistivo contraddistinto da un consistente spessore (150 m) e da un'elevata resistività (300 ohmxm). Tali caratteristiche lasciano intuire caratteristiche idrogeologiche tali da consentire una produttività di alcuni l/s. Condizioni simili sono state effettivamente accertate da perforazioni eseguite in diversi punti della struttura, dove il "tetto di falda è quasi ovunque ad una profondità di 50-100 m dal p.c., lo spessore saturo attraversato in perforazione ha talvolta raggiunto i 50 m, e le portate di esercizio sono prossime a 1 l/s" (Biagini F., 1993). Il confronto tra i livelli statici, misurati nei pozzi in condizioni di morbida e di magra, evidenzia un'oscillazione media dell'ordine della decina di metri. Tale valore medio deriva tuttavia da condizioni disomogenee: in alcuni casi infatti l'entità delle variazioni è molto ampia, ad identificare l'intercettazione di falde effimere, a carattere stagionale, in altri casi le variazioni si sono dimostrate molto contenute che hanno evidenziato falde poco sfruttate e/o con buone potenzialità (Biagini F., 1993).

Lo studio effettuato dal Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Perugia e dall'ARPA Umbria, tra Ottobre e Dicembre 2003 (Allegato.1), effettuato attraverso un approccio essenzialmente idrogeochimico, ha evidenziato caratteristiche del sistema idrogeologico che grossolanamente individuano nell'ambito delle Formazioni torbiditiche diversi livelli di circolazione differenziabili in primo luogo sulla base del contenuto salino, funzione dei tempi di circolazione delle acque. Secondariamente, è possibile in alcuni casi operare delle differenziazioni sulla base delle condizioni redox, anche se la facies idrochimica con condizioni redox negative, rappresentativa di condizioni di isolamento da quelle di superficie, risulta "inquinata" dalla miscelazione di vari livelli produttivi captati dai pozzi. Tale facies (denominata Gruppo 4 nello studio idrogeochimico) è ben rappresentata da uno solo dei campioni raccolti anche se, parziali similitudini, vengono denotate dai dati relativi ad altri pozzi profondi. La profondità delle captazioni, o meglio la quota dei livelli di circolazione captati non sembra tuttavia possedere una forte correlazione con le caratteristiche denotate dal Gruppo 4, semmai riferibili ad una compartimentazione dovuta a condizioni stratigrafiche e tettoniche locali.

Qualche ulteriore considerazione può tuttavia essere fatta considerando che, dal Novembre 2002, l'ammissibilità delle richieste di escavazione di pozzi a profondità superiori a 30 metri dal piano campagna ha comportato da parte del soggetto richiedente la dichiarazione di utilizzo/possesso di fonti di approvvigionamento alternative e, qualora presenti, una valutazione da parte del tecnico progettista sulla possibilità di soddisfacimento della richiesta. Nella maggioranza dei casi è stato rilevato, soprattutto per i centri abitati più antichi (borghi e case sparse), che l'approvvigionamento idrico assicurato dalla captazione delle piccole sorgenti più in quota mediante acquedotti rurali non era in grado di soddisfare la richiesta durante il periodo estivo già dalla fine degli anni '80 e che, nel biennio u.s., le portate risultavano insufficienti anche nel resto dell'anno. Tali dati confermano, anche nella circostanza di un'immutata richiesta, una

progressiva perdita delle potenzialità dei livelli di circolazione nelle Formazioni torbiditiche, che trova conferma anche al di fuori dell'ambito del bacino del L. Trasimeno.

L'insieme di tali caratteristiche denota una crisi quantitativa che si accompagna alla scarsa potenzialità intrinseca del sistema idrogeologico, in ragione della bassa permeabilità⁵ (che limita la ricarica da parte delle acque meteoriche) e della continuità idraulica dei livelli di circolazione.

5.2 Depositi lacustri e alluvionali

5.2.1 Settore settentrionale

Una ricognizione iniziale sui possibili rapporti intercorrenti tra gli acquiferi ed il bacino lacustre è stata affrontata utilizzando i dati piezometrici acquisiti nel corso della campagna di studio, per ricostruire la generale distribuzione dei livelli piezometrici statici. I dati sono stati elaborati utilizzando l'algoritmo di calcolo **sgsim** (Simulazioni Sequenziali Gaussiane), parte integrante del software GSLIB (Deutsch C.V. and Journel A.G., 1998), descritto nello studio idrogeochimico allegato. La carta piezometrica (Fig.2), risultato di 100 simulazioni su una maglia quadrata con 200 m di lato, relativamente ai depositi pleistocenici ed olocenici, evidenzia un assetto della configurazione piezometrica più omogeneo, caratterizzato da una progressiva diminuzione dei gradienti idraulici procedendo dal piede dei rilievi verso il lago, a evidenziare una falda freatica la cui soggiacenza oscilla entro i -2 m dal piano campagna in morbida e -3/-6 m in condizioni di magra. Tale riduzione del gradiente nella fascia circumlacuale può essere attribuita alla combinazione di diversi fattori, quali una diminuzione della portata dovuta all'emergenza della falda lungo gli alvei dei torrenti, un aumento della permeabilità dei depositi recenti e attuali o un aumento dello spessore dell'acquifero in prossimità del lago (Evangelisti C., 2003). Data la scala dell'indagine, i gradienti più elevati, legati a condizioni dinamiche, non sono stati rilevati; ad W dell'abitato di Tuoro tuttavia, studi pregressi (Biagini F., 1993), segnalano una depressione piezometrica molto pronunciata ($I = 4-5\%$) in corrispondenza del campo pozzi che rifornisce l'acquedotto comunale. Gli assi del deflusso sotterraneo sono genericamente orientati N-S verso lo specchio lacustre, e si evidenzia un profilo iperbolico della superficie piezometrica che si mantiene costantemente ad una quota superiore a quella del lago (Deffenu L. e Dragoni W., 1978).

La permeabilità di tali terreni è in genere caratterizzata da una notevole eterogeneità anche se i valori medio bassi sono nettamente più rappresentati: secondo alcune stime approssimative la permeabilità orizzontale media è compresa tra 10^{-3} e 10^{-2} cm/s (Angelini P., 1989; Ambrosetti P. et alii, 1991). Localmente tuttavia, possono essere osservati valori consistenti.

Nelle zone circumlacuali infatti, la circolazione idrica sotterranea non è limitata ai livelli epidermici del sottosuolo dove si rinviene la falda freatica, ma coinvolge anche profondità superiori ai 30-40 m dal p.c.. Le captazioni che raggiungono tali livelli sono purtroppo poco rappresentate e in genere captano tutti i livelli produttivi incontrati in perforazione. La caratterizzazione di tali livelli di circolazione ne risulta pertanto impraticabile. I dati relativi a perforazioni (una delle quali ha raggiunto una profondità di circa 100 m dal p.c.) eseguite in località Punta Navaccia, permettono tuttavia di produrre alcune considerazioni di tipo idrogeologico ed idrochimico (Biagini F., 1993). La perforazione più profonda (Fig.3) ha infatti attraversato almeno 3 falde distinte: quella freatica, tra -5 e -20 m dal p.c.; una prima falda in pressione, tra -25 e -35 m dal p.c., caratterizzata da altissima salinità e caratteristiche qualitative scadenti (naturalmente); una seconda falda in pressione, captata al di sotto dei -75 m con un potenziale piezometrico di +7 m (falda artesianica), con un contenuto salino molto inferiore e una qualità complessiva decisamente migliore di quella soprastante.

⁵ i bilanci idrogeologici relativi a bacini con caratteristiche simili a quello in esame, possiamo ragionevolmente ipotizzare che I_p sia compresa tra il 5-10% di p , ovvero $I_p=43-86$ mm/a (Biagini F., 1993).

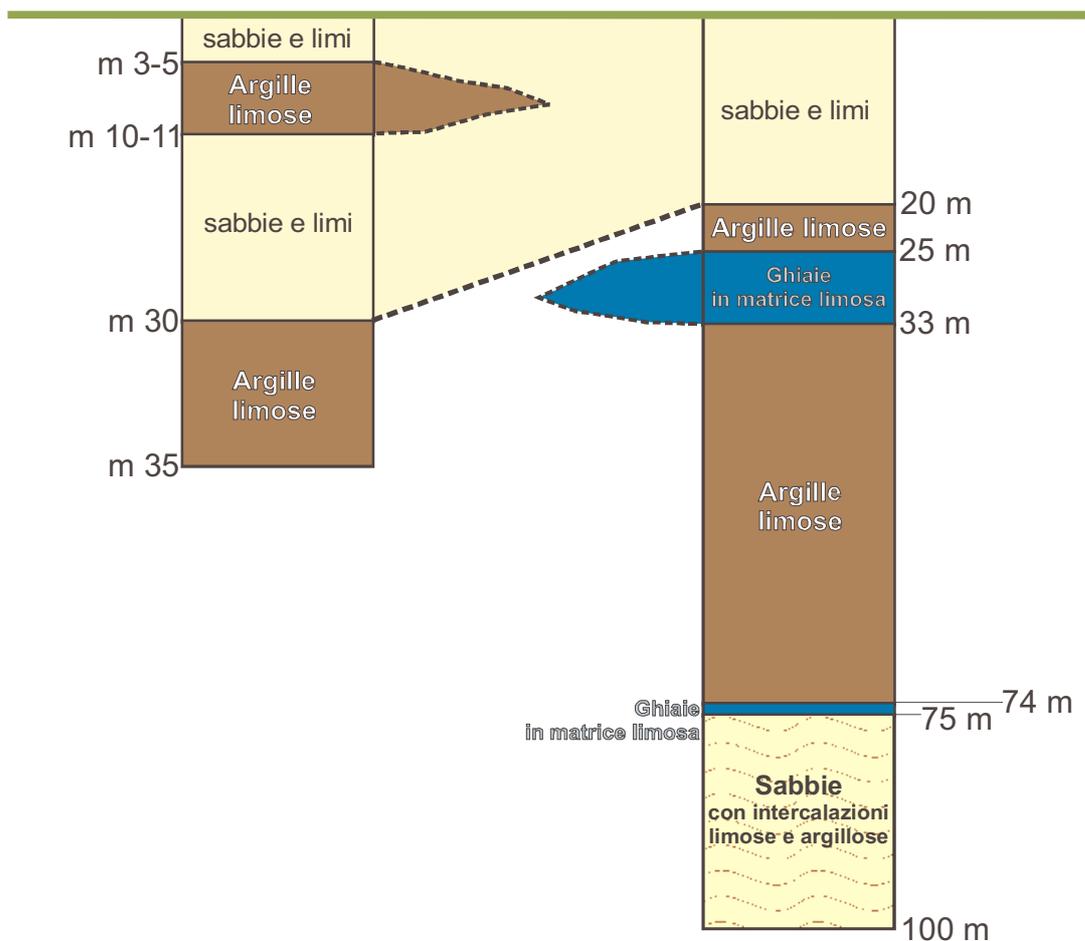


Fig.3: Stratigrafie relative a due perforazioni eseguite in *Loc.Punta Navaccia*, Comune di Tuoro (modificata da Biagini F., 1993)

Un'ultima considerazione sull'alimentazione degli acquiferi della pianura deriva dalle osservazioni dirette sul regime dei corsi d'acqua e sulla densità di drenaggio: la fascia di detrito di falda e di depositi di conoide, che raccorda il passaggio tra "Arenarie del Trasimeno" e sedimenti continentali fluvio-lacustri, costituisce una zona ad elevata permeabilità che favorisce il drenaggio nel sottosuolo delle acque superficiali. Un esempio in questo senso è dato dal torrente Rio che, in corrispondenza di una fascia di detriti grossolani posta a N di Vernazzano Basso, subisce una drastica diminuzione della portata (Biagini F., 1993). Tali considerazioni evidenziano il limitato contributo al bilancio del corpo idrico lacustre da parte del deflusso superficiale dalla dorsale montuosa.

5.2.2 Settore occidentale

La carta piezometrica (Fig.2) evidenzia un assetto della configurazione piezometrica molto omogeneo, caratterizzato da una progressiva diminuzione dei gradienti idraulici procedendo dal piede dei rilievi verso il lago, a evidenziare la presenza di una falda freatica la cui soggiacenza diminuisce progressivamente da E verso il bacino lacustre. Tale caratteristica, unitamente alla parallela diminuzione del gradiente idraulico, lascia presagire la possibilità di una certa continuità idraulica tra i vari complessi alluvionali e, in particolare, tra la fascia circumlacuale, caratterizzata dai depositi recenti ed attuali, e il corpo idrico lacustre. I dati piezometrici raccolti risultano del tutto coerenti con indagini pregresse effettuate dai gestori acquedottistici⁶ nel 1996, le quali rilevavano quote piezometriche, direttamente collegabili alle escursioni meteoriche stagionali, sempre superiori a quella del corpo idrico lacustre, tali da determinare insieme un drenaggio radiale della falda verso il Lago Trasimeno (Venanti L.D., 1997).

Le suddette indagini, effettuate con l'intento di individuare risorse idriche da destinare al consumo umano, per la ricostruzione del modello stratigrafico di dettaglio, si sono avvalse di un'indagine geofisica che, nell'intorno considerato (*Madonna del Soccorso, Pod.Belvedere, I Pieracci, Piana, Pod.Marchetti*), permettesse di valutare gli spessori delle successioni sedimentarie. L'effettuazione di n.8 sondaggi elettrici verticali, distribuiti uniformemente nell'area di indagine, con uno stendimento AB=1000 m non ha rilevato la

⁶ "Acquedotti del Lago SCpA"

presenza di sedimenti con valori della resistività caratterizzanti diversità complesse, data l'elevata conducibilità dei materiali presenti, ha consentito di evidenziare la presenza di un substrato di base distinto, che è risultato invece sfumato in profondità. I dati recuperati non hanno permesso infatti la differenziazione di livelli particolarmente resistivi, evidenziando semmai un contesto molto omogeneo, caratterizzato da valori (ad eccezione di modesti livelli a resistività maggiore) intorno a 10-20 Ohm/m, riferibili ad una successione di tipo sabbioso e sabbio-limoso (Venanti L.D., 1997). La buona conducibilità dei sedimenti impedisce una risoluzione dettagliata delle indagini, mascherando l'eventuale presenza di litotipi granulometricamente più grossolani, che sono pertanto da attendersi come modesti episodi intraformazionali o caratterizzati da una matrice sottile (Venanti L.D., 1997).

La misurazione dei livelli statici ha invece permesso l'individuazione di anomalie piezometriche in corrispondenza di alcuni pozzi profondi. Tali anomalie testimoniano la presenza, peraltro confermata dai dati idrochimici, dell'esistenza di due generici livelli di circolazione idrica sotterranea (Fig.4).

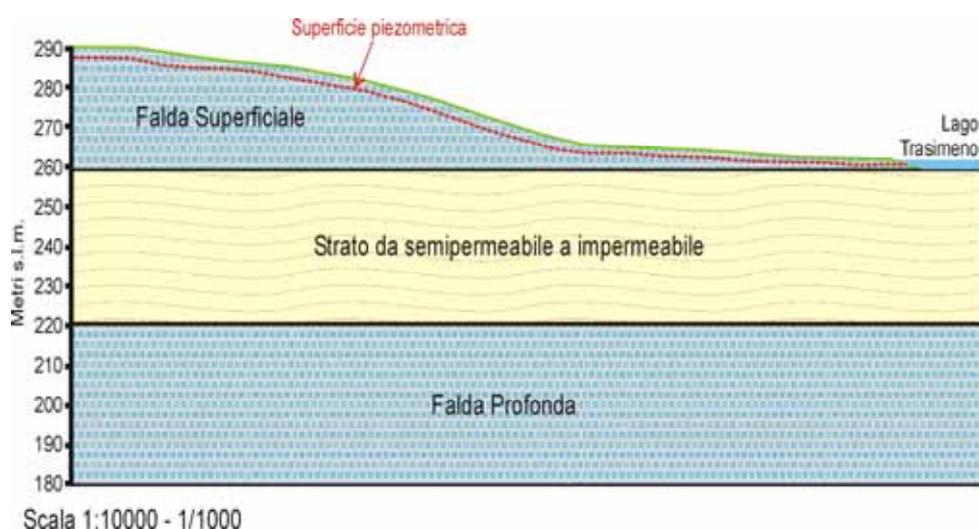


Fig.4: Modello idrogeologico schematico (modificato da Venanti L.D., 1997)

Il livello più epidermico, contenuto entro la quota di 260 m s.l.m., risulta separato da quello più profondo da un aquitardo il cui spessore massimo è approssimativamente stimato in circa 40 m, che diviene più assottigliato e più sfumato nella fascia a limitrofa al corpo lacustre, tanto da lasciare presagire l'esistenza di rapporti idraulici tra i due livelli di circolazione (Venanti L.D., 1997).

L'esistenza di un tale schema idrogeologico è particolarmente evidente esclusivamente nelle rare captazioni che intercettano selettivamente l'uno o l'altro livello di circolazione. Un maggior dettaglio e caratterizzazione dello schema idrogeologico non è purtroppo proponibile in quanto la maggior parte dei pozzi profondi captano tutti i livelli produttivi incontrati e propongono pertanto ambigue caratteristiche piezometriche e idrochimiche (Venanti L.D., 1997). Non è possibile di conseguenza escludere che non siano in atto fenomeni di leakage verticale, in particolare dovute ad uno sfruttamento prolungato. Entrambi gli acquiferi risulterebbero dotati, per effetto della composizione granulometrica dei sedimenti presenti, di una medio-bassa permeabilità unitaria, anche se non mancano testimonianze di perforazioni capaci di portate intorno ai 10 l/s (Venanti L.D., 1997).

6. VALUTAZIONE DEI RAPPORTI TRA ACQUIFERI E CORPO IDRICO LACUSTRE

Le considerazioni specifiche prodotte in questa sede costituiscono, per le acque sotterranee, la base razionale dell'analisi effettuata da tutti i soggetti che si sono occupati della stima delle singole componenti del bilancio idrologico del Lago Trasimeno, con lo scopo di interpretare il cronico e ricorrente problema del suo budget. Gli studi più recenti (Dragoni W. e Evangelisti C., 1999) convergono nell'attribuire al drenaggio delle acque sotterranee nel corpo idrico lacustre un contributo (espresso in termini di lama d'acqua sul lago) compreso tra 2 e 3 cm/anno. In termini di volume, considerando una superficie media dello specchio lacustre di 121,5 Km², tale variazione del livello costituisce un apporto di acque sotterranee al lago compresa tra 2,43

e 3,64 Mm³, cui corrisponde una portata annua costante compresa tra 77 e 116 l/s. I valori della portata sono evidentemente da considerarsi molto modesti in senso assoluto e, di conseguenza, producono anche un contributo che potrebbe essere ritenuto “trascurabile” relativamente alle altre voci di bilancio (apporti). Nella realtà invece, se si analizzano nel dettaglio le singole componenti del bilancio, si può apprezzare che l'equilibrio idrologico del lago, nei periodi di magra pluriennale, è strettamente dipendente anche dalla sottrazione di aliquote annuali modeste.

La Tab.1 propone le caratteristiche peculiari del corpo idrico lacustre e le componenti del bilancio note secondo una analisi aggiornata effettuata dal Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Perugia (Dragoni W. e Evangelisti C., 1999 – Dragoni W., 2004).

Periodo di riferimento 1963-1997	
Area totale (lago incluso) del bacino [Km ²]	383,4
Area media dello specchio lacustre [Km ²]	121,5
Area media del bacino (specchio escluso) [Km ²]	261,9
Temperatura media annua (C.del lago) [°C]	13,9
Temperatura media annua sul bacino [°C]	~13
Pioggia media annua caduta sullo specchio [mm]	723
Pioggia media annua caduta sul bacino idrografico [mm]	749
Evapotraspirazione (Turc) media annua dal bacino [mm]	538
Livello medio [m s.l.m.]	257,1
Area minima del lago [Km ²]	118
Area massima del lago [Km ²]	124,2
Volume medio immagazzinato dal lago [Mm ³]	490
Profondità massima al livello medio [m]	5,5
Periodo di riferimento 1963-2001	
P _s = Pioggia media caduta sullo specchio [mm/anno]	723
A _s = Area media dello specchio [Km ²]	121,5
V _s = Volume d'acqua caduto sullo specchio [Mm ³ /anno]	88
P _b = Pioggia media caduta sul bacino imbrifero [mm/anno]	749
A _b = Area media del bacino imbrifero [Km ²]	261,9
V _b = Volume d'acqua caduto sul bacino [Mm ³ /anno] = P _b · A _b	196
ETR = Pioggia evapotraspirata dal bacino (Turc) [mm/anno]	538
V _{ETR} = Volume che evapotraspira dal bacino [Mm ³ /anno] = ETR · A _b	141
P _e = Pioggia effettiva disponibile per il lago [mm/anno] = P _b - ETR	211
V _{eb} = Volume teoricamente fornito al lago dal bacino [Mm ³ /anno] = V _b - V _{ETR}	55
V _t = Volume d'acqua teorico arrivato al lago [Mm ³ /anno] = V _s - V _{eb}	143

Tab.1: Caratteristiche peculiari del corpo idrico lacustre e componenti note del bilancio (da Dragoni, 2004).

I dati proposti in tabella evidenziano in primo luogo che il Lago Trasimeno è un corpo idrico “chiuso” e “laminare”, caratterizzato da una estensione rilevante e da una profondità media estremamente esigua attestata, nel 2004, intorno ai 4 metri. Da tale caratteristica, unitamente a quella di avere un bacino imbrifero poco esteso, ne consegue che il bilancio annuale, date le caratteristiche climatiche caratterizzate da cicli di magra, è profondamente influenzato dagli apporti meteorici diretti e dall'evapotraspirazione. Ciò implica, inevitabilmente, una notevole oscillazione del livello a scala annuale e pluriennale, accentuata purtroppo anche dalla necessità di regolare le piene tramite un emissario artificiale. Un'ulteriore caratteristica sfavorevole è costituita dall'utilizzo delle acque del lago per lo sfruttamento agricolo dei terreni circostanti e per l'approvvigionamento idropotabile del Comune di Castiglione del Lago. La quantificazione dei prelievi è ormai da molti anni motivo di accesi e periodici dibattiti in quanto la stima dei prelievi per uso agricolo non è sufficientemente quantificabile per varie ragioni, non ultima quella relativa all'esistenza di attingimenti abusivi. Calcoli indiretti di tale aliquota convergono attualmente nell'attribuzione di una sottrazione annuale di acqua che determina una variazione del livello contenuta entro i 10 cm (Dragoni W., 2004). Tali stime si avvicinano a quelle effettuate dalla Provincia di Perugia e dalla Regione dell'Umbria per il 1998 e il 1999 che indicano una perdita per prelievi di 7 cm/anno.

Le perdite annuali dovute agli attingimenti, nonostante 6-10 cm all'anno costituiscano una variazione modesta rispetto alle perdite per evaporazione diretta dal lago e per evapotraspirazione del bacino, costituiscono un elemento decisivo del bilancio se si valuta che, in coincidenza di periodi pluriennali di non funzionamento dell'emissario, la variazione complessiva del livello è data dalla somma dei singoli deficit annuali (Dragoni W., 2004). In tale ottica, occorre perciò considerare che anche il modesto apporto costituito dalle acque sotterranee può divenire decisivo nella mitigazione degli effetti nei periodi siccitosi. A tal riguardo occorre considerare che per l'U.G. n.18 (Trasimeno), le stime dei prelievi di acque sotterranee per uso domestico (comprese tra 1.11-1.85 Mm³/anno), per uso irriguo (1.00 Mm³/anno – Fonte: Piano Regionale per l'irrigazione nella Regione Umbria, 1999) e per uso idropotabile pubblico (0.47 Mm³/anno), evidenziano una tendenza che, almeno nei periodi siccitosi, sottrae una parte consistente dell'aliquota potenzialmente

apportata al corpo idrico lacustre. In tal senso, le limitazioni alla costruzione di pozzi nelle zone circumlacuali, adottate nelle Norme Tecniche di Attuazione relative al Piano di Bacino del F.Tevere, II° Stralcio funzionale - P.S.2, per il Lago Trasimeno, costituiscono una traccia apprezzabile nello sviluppo di politiche di salvaguardia del Lago Trasimeno, anche se non esauriscono la razionalizzazione delle necessità attuali.

In virtù di tali necessità e nell'impossibilità, almeno per ora, di effettuare stime di bilancio del lago più attendibili, basate su più precise valutazioni degli apporti meteorici e delle perdite per evapotraspirazione (l'imprecisione delle misurazioni può essere dello stesso ordine dei prelievi – Dragoni W., 2004), nonché dei volumi dei prelievi, le ipotesi di azione per il contenimento delle crisi idriche spaziano in un'ampia gamma che parte dalla necessaria previsione di misure per il contenimento dei prelievi alla più suggestiva e risolutiva importazione di acqua dalle zone extra-bacinali (Dragoni W., 2004).

7. CARATTERISTICHE IDROGEOCHIMICHE DELLE ACQUE SOTTERRANEE

I campioni relativi alle acque sotterranee nel bacino del Lago Trasimeno propongono una composizione variabile da bicarbonato alcalino-terrosa a clorurato-solfato alcalina (esistono anche termini tendenti verso una composizione bicarbonato alcalina o solfato alcalino-terrosa). I diagrammi classificativi evidenziano una nube continua di punti sulla quale risulta particolarmente difficoltoso operare nette distinzioni dei campioni in gruppi, sulla base dei semplici rapporti tra specie chimiche principali.

Se si considerano tuttavia anche le condizioni redox degli acquiferi, la distribuzione degli elementi mobili e dei metalli Fe e Mn, risulta comunque possibile distinguere quattro gruppi principali di campioni, corrispondenti ad altrettanti idrotipi:

- **GRUPPO 1** - comprendente gran parte dei campioni delle serie 1 (acquiferi alluvionali) con le seguenti caratteristiche:
 1. composizione variabile da bicarbonato alcalino-terrosa a clorurato-solfato alcalina;
 2. salinità media;
 3. condizioni redox riducenti-basiche o neutre.

- **GRUPPO 2** – pur manifestando un carattere idrochimico generale simile al gruppo 1, manifesta caratteristiche che lo rendono distinguibile:
 1. salinità più elevate;
 2. condizioni più riducenti;
 3. maggior contenuto in Fe e Mn e uno leggero shift verso una composizione a NaCl (il gruppo è costituito in massima parte da campioni della serie 2).

Nonostante entrambi i gruppi 1 e 2 manifestino condizioni Eh-pH per le quali dovrebbe risultare predominante il complesso NH_4^+ metastabile, i risultati analitici evidenziano che il campo di esistenza del nitrato metastabile si estende ben oltre quello calcolato per soluzioni in equilibrio con i gas atmosferici. Tale effetto, unicamente imputabile ad una velocità di ingresso di nitrati nel sistema sotterraneo superiore alla cinetica di denitrificazione, caratterizza larga parte dei depositi fluvio-lacustri pleistocenici, e individua due aree di anomalia principali a sud-ovest e nord-ovest di Castiglione del Lago (Fig.5).

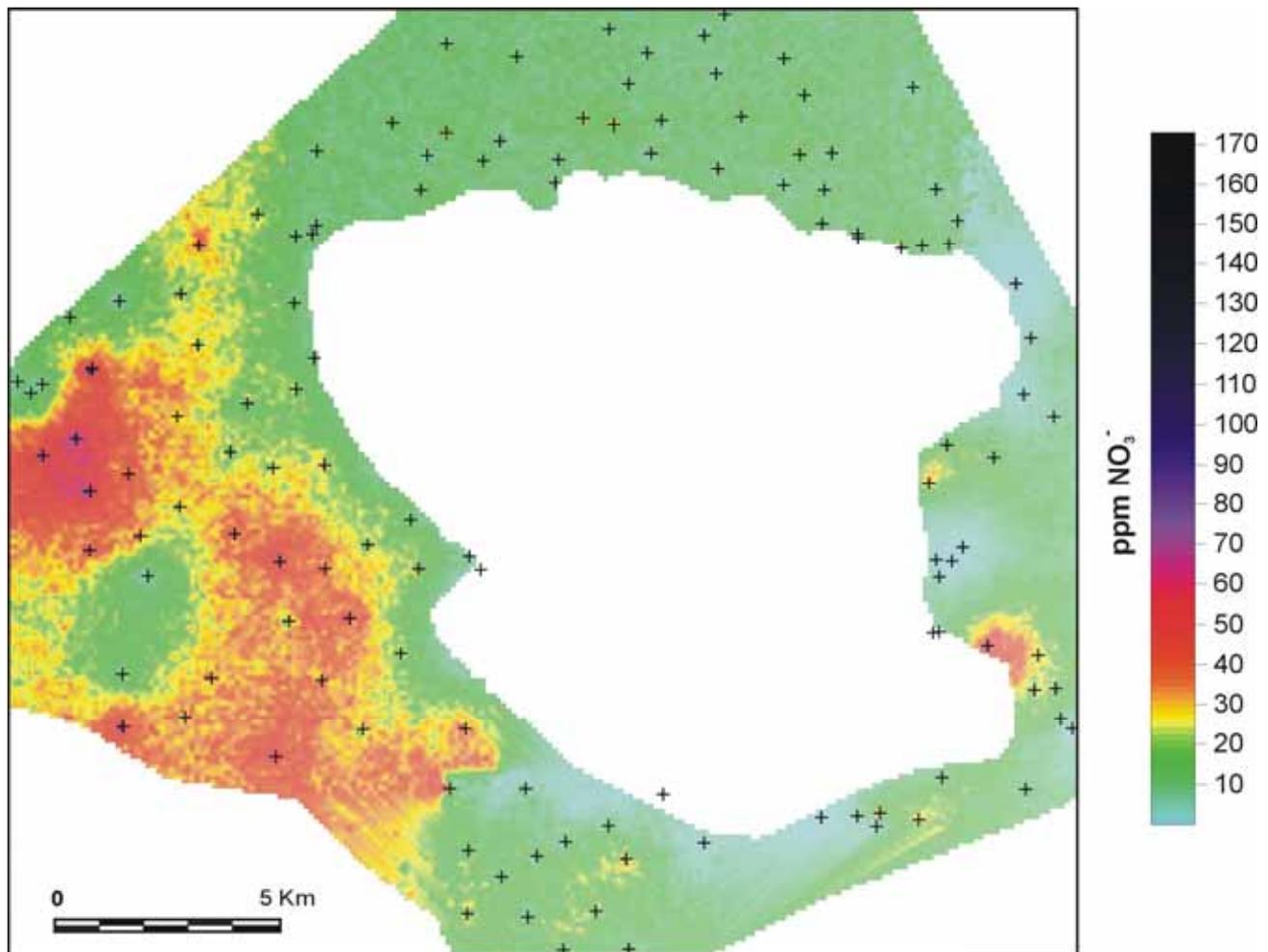


Fig.5 - Distribuzione areale nitrati.

- **GRUPPO 3** - costituito dai campioni della serie 3 (**acquiferi delle torbiditi Mioceniche**), con le seguenti caratteristiche:
 1. composizione bicarbonato alcalino-terrosa;
 2. salinità relativamente basse;
 3. rapporti Li/Na e Li/Cl più elevati rispetto ai gruppi precedenti;
 4. bassi tenori in Fe e Mn;
 5. bassi tenori in nitrati;
 6. rapporto Na/Cl circa 2:1.

Per tale gruppo, e in particolare per i livelli di circolazione più epidermici, si sottolinea un progressivo impoverimento delle risorse permanenti, evidenziato dal progressivo abbassamento dei livelli piezometrici (riferita dai proprietari dei pozzi) e dall'impossibilità di effettuare il campionamento delle sorgenti più in quota durante gran parte della stagione secca.

- **GRUPPO 4** - costituito da un solo campione (n.237), probabilmente rappresentativo delle condizioni di circolazione più profonda nelle torbiditi Mioceniche. Le caratteristiche chimiche del campione sono le seguenti:
 1. composizione bicarbonato-clorurato alcalino-terroso alcalina (il campione cade praticamente al centro del diagramma L.L.);
 2. salinità medio-elevate;
 3. condizioni marcatamente riducenti che consentono la comparsa delle forme ridotte;
 4. valori elevati di Mn, Fe e Li;
 5. esiste probabilmente un trend evolutivo tra le acque del gruppo 3 e del gruppo 4, anche se sarebbe necessario campionare un maggior numero di pozzi profondi nelle arenarie per poterlo definire compiutamente. I livelli di circolazione profondi nelle torbiditi si caratterizzano per uno scarso tasso di rinnovamento che determina caratteristiche qualitative naturalmente scadenti.

8. CONCLUSIONI

Nel paragrafo precedente larga parte della problematica trattata ha riguardato i problemi quantitativi degli acquiferi, soprattutto in riferimento alla crisi idrica del Lago Trasimeno. Gli aspetti trattati non esauriscono tuttavia tutti i quesiti relativi allo stato ambientale delle acque sotterranee e del corpo idrico lacustre. L'analisi effettuata ha infatti posto in rilievo un generalizzato problema quantitativo dei corpi idrici sotterranei in tutto il bacino del Trasimeno e, attraverso la campagna di studio idrochimico specifico, ha anche evidenziato specifiche aree nelle quali la qualità delle acque sotterranee è soggetta, o è prossima a divenirlo, ad una evidente compromissione causata dall'apporto di inquinanti di origine agricola.

Ai fini della prosecuzione delle attività di monitoraggio si segnalano pertanto le seguenti criticità specifiche:

- Le aree settentrionali e orientali del bacino non manifestano particolari e generalizzati problemi della qualità delle acque sotterranee dovuti ad inquinamento diffuso. Si segnala tuttavia un trend di degrado quantitativo dei livelli di circolazione epidermica (soprattutto nelle torbidità) che ha origini ormai ultradecennali. A tal riguardo si rileva che gli acquiferi in questione, pur non rivestendo una rilevanza a livello regionale, costituiscono allo stato attuale l'unica fonte di approvvigionamento di una parte percentualmente rilevante di popolazione non servita da pubblico acquedotto. A titolo di esempio si cita il caso del Comune di Tuoro dove (dati P.R.R.A., 2004) oltre il 27% della popolazione residente risulta approvvigionata da fonti extra-acquedottistiche (considerando anche la popolazione non residente, la percentuale è destinata ad aumentare). Tale tendenza costringe, in aree non servite da acquedotto, ad una proliferazione di captazioni profonde, probabilmente inadeguate dal punto di vista dei criteri costruttivi a presidio dell'integrità dei diversi livelli di circolazione, che sfruttano serbatoi la cui potenzialità risulta comunque modesta e incapace nel medio e nel lungo termine di sostenere la crescente idroesigenza. Il rischio di mettere in crisi l'intero sistema rappresenta un pericolo reale, soprattutto se si confermeranno nel prossimo futuro fasi pluriennali di trend negativo degli apporti meteorici. Tali considerazioni convergono pertanto anche verso la necessità di predisporre una rete di monitoraggio quantitativo delle acque sotterranee, individuando punti di controllo sia nella zona circumlacuale, sia nelle fasce collinari individuate.
- Per quanto riguarda le zone circumlacuali, così come individuate e regolamentate dal Piano di Bacino del F.Tevere, II° Stralcio funzionale - P.S.2, per il Lago Trasimeno, si segnala che il solo divieto di costruzione di nuovi pozzi può solo parzialmente mitigare la tendenza allo sfruttamento delle acque sotterranee. Un vero e proprio cambiamento di rotta è comunque più garantito dal controllo dei prelievi e, ancor di più, dalla conversione verso colture a bassa idroesigenza.
- Nel settore settentrionale, la fascia di detrito di falda e di depositi di conoide che raccorda il passaggio tra "Arenarie del Trasimeno" e sedimenti continentali fluvio-lacustri, descritta al prg.4.2.1, rappresenta una zona di alimentazione dei corpi idrici sotterranei. In tali aree, a causa dell'elevata permeabilità superficiale che consente il drenaggio di una consistente aliquota del deflusso superficiale, il recapito alle falde di sostanze disperse sulla superficie ha una dinamica molto veloce. L'effetto drenante descritto, è tuttavia rilevato sulla base della semplice osservazione della diminuzione della portata del deflusso superficiale. L'importanza di tali aspetti ai fini della stima del bilancio idrogeologico consigliano il monitoraggio della portata dei principali corsi d'acqua.
- Gli schemi della circolazione idrica sotterranea nei terreni lacustri e alluvionali evidenziano l'esistenza di livelli di circolazione differenziati (falde freatiche e falde in pressione), captati non selettivamente dalla maggior parte delle perforazioni più profonde. Tale pratica, non essendo espressamente vietato lo sfruttamento selettivo degli orizzonti produttivi, determina inevitabilmente la miscelazione di livelli di circolazione chimicamente e qualitativamente differenziati e, soprattutto nelle aree dove la falda più epidermica risulta contaminata, costituisce un rapido veicolo di propagazione degli inquinanti in profondità.
- Nel settore meridionale e, più specificatamente, in quello occidentale del bacino, la presenza di una vasta area interessata da contaminazione di inquinanti di origine agricola impone, oltre che un adeguato monitoraggio quantitativo, un dettagliato controllo con campagne periodiche su alcuni punti che descrivano sia lo sviluppo areale della contaminazione, sia la sua entità. Tali controlli possono infatti costituire una verifica indiretta del carico inquinante che viene recapitato al corpo idrico lacustre, veicolato dal deflusso delle acque superficiali.

- Sia i vari studi effettuati, sia quelli in progresso, pongono in evidenza la necessità di quantificare con il maggiore dettaglio possibile le singole aliquote che contribuiscono al budget del corpo idrico lacustre. Tra queste, il contributo delle acque sotterranee costituisce senza dubbio la voce meno nota. La ragione di tale carenza di informazioni deve essere ricercata nel fatto che, tra i vari tipi di contributo, quello delle acque sotterranee è il meno rilevante quantitativamente anche se non per questo, e per i motivi descritti al prg.5, tale da essere a priori considerato trascurabile. Tali motivi, in attesa di interventi che incidano in maniera decisiva sul bilancio del Lago (p.e. l'importazione di acqua da zone extra-bacinali), richiamano l'attenzione sulla necessità studiare le caratteristiche dei corpi idrici sotterranei, per una migliore comprensione e stima dell'interazione tra questi e il corpo lacustre. A tal riguardo, per dimostrare la tangibilità degli apporti di acque sotterranee, vengono proposti i risultati parziali di un'indagine preliminare, effettuata nel Gennaio 2005 da ARPA Umbria e NOE Carabinieri di Perugia, con il supporto tecnico-scientifico del Prof.G.Chiodini (O.V.-INGV), per valutare la possibile applicazione di immagini TIR (Infra Rosso Termico) nel campo del controllo ambientale. Il presupposto applicativo è quello che eventuali immissioni di fluidi di varia origine in corpi idrici naturali possono provocare anomalie termiche rilevabili con immagini IR ad alta sensibilità. L'indagine è stata effettuata mediante il supporto di un elicottero messo a disposizione dall'ARMA dei Carabinieri, da cui sono state riprese le immagini. Non disponendo dei dati di emissività della superficie indagata, le temperature riportate devono essere considerate come temperature relative (ovvero i valori assoluti possono differire dalla temperatura reale) che consegnano significative differenze di temperatura della superficie lacustre. Durante il sorvolo a quote basse sono state riprese 25 immagini IR, lungo la costa ad E dell'abitato di Passignano sul Trasimeno. Le immagini di dettaglio pur confermando l'assenza di importanti anomalie termiche, hanno comunque consentito l'individuazione di un certo numero di deboli anomalie, due delle quali vengono esemplificate in Fig.6 nella foto visibile (Fig.6a) e nell'immagine IR (Fig.6b).

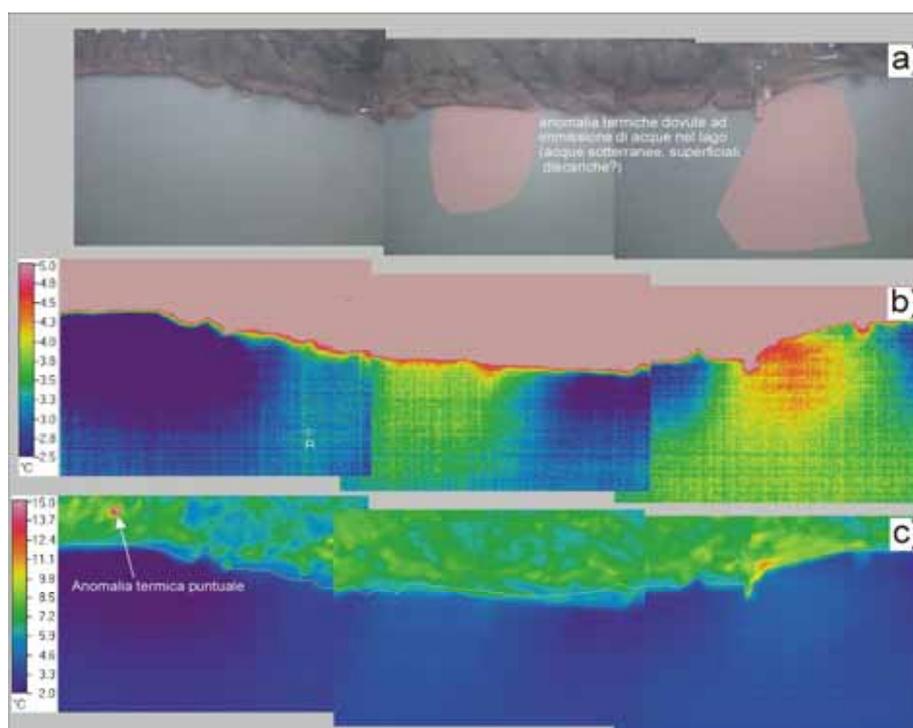


Fig.6- Foto ed immagini IR riprese ad est di Passignano sul Trasimeno. a) immagine visibile; b) immagine IR con fondo scala 2,5 - 5 °C; c) immagine IR con fondo scala 2 - 15 °C;

In Fig.6c è riportata la stessa immagine IR con scala di temperatura più espansa (2-15°C invece di 2-5°C di Fig.6b). Si può notare come le due anomalie termiche che interessano il lago “scompaiono” e come invece appaiono alcuni particolari termici nella terra ferma, come una forte anomalia puntuale nel settore in alto a sinistra dell'immagine. Le deboli anomalie evidenziate in Fig.6b sono caratterizzate da un andamento simile: sono relativamente forti presso la costa e si allargano, diminuendo d'intensità, allontanandosene. Tali andamenti derivano da immissione nel lago di acque a più alta temperatura, compatibili sia con acque immesse da attività antropica, sia con superficiali drenate nel corpo lacustre e, più probabilmente, con il drenaggio di acque sotterranee.

9. BIBLIOGRAFIA

- Ambrosetti P., Angelini P. e Dragoni W., 1991.** *Note illustrative della carta della vegetazione del comprensorio del Trasimeno – Caratteristiche geologiche e idrogeologiche.* In: *Carta della vegetazione del comprensorio del Trasimeno.* Associazione Comuni del Trasimeno, Dip. di Botanica ed Ecologia dell'Università di Camerino (Editors).
- Angelini P., 1989.** *"Indagini idrogeologiche sul Lago Trasimeno"*. Laurea Thesis, Università degli Studi di Perugia.
- ARPA Umbria (2004).** *"Proposta di Piano Regolatore Regionale Acquedotti"* (PRRA).
- Berger W.H. & Von Rad U., 1972.** *"Cretaceous and Cenozoic sediments from the Atlantic Ocean"*. In Hays, D.E., Pimm, A.C., et al., *Init Repts. DSDP, 14: Washington (U.S. Govt. Printing Office), 787–954.*
- Biagini F., 1993.** *"Studi idrochimici delle acque sotterranee nel settore nord-occidentale del Lago Trasimeno"*. Laurea Thesis, Università degli Studi di Perugia.
- Biagini F., 1993.** *"Indagini idrochimiche delle acque di falda nel settore nord-occidentale del Lago Trasimeno"*. Dip. di Scienze della Terra, Univ. di Perugia – Comune di Tuoro s.T., 1993.
- Boccaletti M., Calamita F., Centamore E., Chiocchini U., Deiana G., Miccarelli A., Moratti G. e Poletti M., 1986.** *Evoluzione dell'Appennino tosco-umbro-marchigiano durante il Neogene.* *Giornale di Ecologia*, 48(1): pp.409-438.
- Boscherini A., Nocchi Lucarelli M. e Piali G., 1982.** *"Geologia della riva etrusca del Tevere tra le confluenze del T.Niccone e T.Nese"*. *Rend. Acc. Sc. Fis. e Nat., Soc.Naz. di Sc. e Lett., Napoli*, 48, pp.409-438.
- Cattuto C., Gregori L. e Parisi G., 1983.** *Indizi geomorfologici di tettonica pleistocenica nel bacino del torrente Tresa (Lago Trasimeno).* *Geogr.Fis.Dinam.Quat.*, vol.5, pp.16-20.
- Cattuto C., Cencetti C. & Gregori L., 1992.** *"Il plio-pleistocene nell' area meridionale del bacino del F.Tevere: possibile modello morfotettonico"*. *Studi geol. Camerti*, vol.spec.(1992/1), pp.103-108.
- Cerrina Ferroni A., Plesi G. e Priami F., 1992.** *"Il sovrascorrimento dell'Unità Trasimeno sulla successione Umbra della zona di Umbertide: dati stratigrafici e strutturali"*. *Studi Geologici Camerti*, XII (1992): 147-161.
- Damiani A.V., Minelli G. e Piali G., 1991.** *"L'unità Falterona-Trasimeno nell'area compresa tra la Val di Chiana e la Val Tiberina: sezione Terontola-Abbazia di Cassiano"*. *Studi Geologici Camerti, Volume Speciale CROP 03 1991/1:235-241.*
- Damiani A.V., 1991.** *"Osservazioni stratigrafico-strutturali sull'area fra le valli dei fiumi Paglia e Tevere, a Sud del Lago Trasimeno"*. *Studi Geologici Camerti, Volume Speciale CROP 031991/1: 243-250.*
- Damiani A.V. e Tuscano F., 1991.** *"Panoramica sulla sedimentazione silico-clastica in facies umbra e sui rapporti con le unità ad affinità toscana"*. *Studi Geologici Camerti, Volume Speciale CROP 03 1991/1.*
- Damiani A. V., Faramondi S., Nocchi Lucarelli M. e Pannuzi,L., 1987.** *"Bio-crono stratigrafia delle unità litologiche costituenti l' "insieme varicolore" affiorante fra la Val di Chiana ed il fiume Tevere (Italia centrale)"*. *Boll.Serv.Geol.d'It.*, 110: pp.109-160.
- Damiani A.V. e Pannuzi L., 1983.** *"Unità litologiche nell'ambito degli "argilloscisti varicolore" fra il Cortonese e l'Eugubino e preliminari considerazioni paleogeografiche e stratigrafiche"*. *Boll.Serv.Geol.d'It.*, 103: pp.241- 276.
- Deffenu L., Dragoni W., 1977.** *"Idrogeologia del lago Trasimeno"*. *Geol. Appl. e Idrog. Bari*. XIII: pp.11-67.
- Deffenu L. e Dragoni W., 1978.** *"Caratteristiche idrogeologiche del Lago Trasimeno"*. *Mem.Soc.Geol.It.*, 19: pp.295-302.
- Deutsch C.V. & Journel A.G., 1988.** *"GSLIB: Geostatistical Software Library and Users Guide"*, 369 pp., Oxford Univ. Press, New York.
- Dragoni W., Basile G. e Gregori L., 1985.** *"Bacino del Lago di Chiusi: lineamenti geologici, erosione, sedimentazione"*. *Geol. Appl. e Idrog.*, vol.XX, parte 2.
- Dragoni W., 1982.** *"Idrogeologia del Lago Trasimeno: sintesi, problemi aggiornamenti"*. *Geogr.Fis.Dinam.Quat.*, 5 (1982).
- Dragoni W., Evangelisti C., 1999.** *"Il problema del Lago Trasimeno"*. *Spazio Ambiente*, 3, Perugia, pp.14-17.

- Dragoni W., 2004.** *"Il Lago Trasimeno e le variazioni climatiche"*. Progetto informativo dell'Assessorato all'Ambiente della Provincia di Perugia, Servizio Gestione e Difesa Idraulica, 1a Ed. 20 Luglio 2004.
- Evangelisti C., 2003.** *"Il Lago Trasimeno: stato delle conoscenze e nuova modellizzazione idrogeologica"*. dottorato Thesis, Università degli Studi di Perugia.
- Gambini E., 1995.** *"Le oscillazioni del Lago Trasimeno"*. Grafiche Piemme, Perugia.
- Jacobacci A. et alii , 1970.** *"Note illustrative della Carta Geologica d'Italia: Foglio 122 "Perugia"*.
- Lavecchia G., Minelli G. e Piali G., 1987.** *"Contractional and extensional tectonics along the Trasimeno Lake-Pesaro transect"*. In: A.N.d. Roma (Editor), *The Litosphere in Italy. Advances in earth science research*, pp. 143-165.
- Ministero dell' Agricoltura e delle Foreste, 1977.** *"Studio per la tutela e la valorizzazione del patrimonio naturalistico del bacino del Trasimeno"*. Vol.2 (Aspetti fisici e ambientali).
- Nocchi M. e Catinelli A., 1961.** *Cenni sulla stratigrafia della "serie toscana" e della "serie umbra" nell'alta Val Tiberina*. Boll.Soc.Geol.Ita, 83(4): pp.533-541.
- Pazzini P., 1959.** *"Brevi cenni sui terreni sovrascorsi sulla serie dell'Umbria nord-occidentale"*. Boll. Soc.Geol.Ita, 80(2): pp.232-242.
- Regione dell'Umbria, 1999.** *"Piano Regionale per l'Irrigazione"*. Convenzione Regione dell'Umbria, Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale – Univ. di Perugia, Dip. di Scienze Economiche ed Estimative – Univ. di Perugia.
- Van Andel, T.H., 1975.** *"Mesozoic/Cenozoic calcite compensation depth and the global distribution of calcareous sediments"*. Earth Planet. Sci. Lett., 26:187–194
- Venanti L.D., 1997.** *"Ricerca idrogeologica per l'approvvigionamento idrico ad uso potabile nel territorio comunale di Castiglione del Lago"*. Committente: ACQUEDOTTI del LAGO S.C.p.A..



Monografia / 5: Allegato 1

Caratteristiche idrogeochimiche degli acquiferi nel bacino del Lago Trasimeno.



Redazione

Dott. Luca Peruzzi

Contributi

Validazione

Verifica

Dott. Giancarlo Marchetti

Versione:

Rev. 0 - Luglio 2005

1. PREMESSA

Nell'ambito della convenzione per uno studio finalizzato alla delimitazione delle zone critiche per il tenore in nitrati negli acquiferi alluvionali dell'Umbria e per la caratterizzazione idrogeochimica del bacino del Lago Trasimeno, stipulata tra ARPA Umbria e Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Perugia, è stato effettuato, tra Ottobre e Dicembre 2003, uno studio idrogeochimico preliminare delle acque sotterranee nel bacino del lago Trasimeno.

La presente relazione produce i risultati del suddetto studio, presentando un quadro generale del chimismo delle acque campionate e dei principali processi geochimici attivi nei sistemi idrogeologici studiati, l'analisi della distribuzione areale dei tenori in nitrati, effettuata facendo ricorso a mappe di distribuzione elaborate con la tecnica geostatistica delle simulazioni sequenziali gaussiane.

Sulla base dei risultati acquisiti vengono successivamente identificate le principali criticità per le acque sotterranee e fissati gli aspetti che dovranno essere considerati nello sviluppo dell'attività di monitoraggio.

2. CAMPIONAMENTO E DETERMINAZIONI SUL CAMPO

Nell'area di studio è stata effettuata, nel periodo compreso tra Ottobre e Dicembre 2003, una campagna di campionamento delle acque sotterranee nel corso della quale sono stati prelevati n.127 campioni: n.124 relativi a pozzi adibiti ad uso domestico e n.3 relativi alle acque del lago (Fig.1).

Nella fase di campionamento, per la scelta della localizzazione del sistema di monitoraggio, è stato adottato un criterio geometrico, cercando di distribuire i campioni, su tutto il bacino, in modo da ottenere una maglia con una densità di circa 1 punto ogni Km² nelle aree pianeggianti e di 1 punto ogni 2 Km², nelle zone collinare. Si è anche cercato di seguire un criterio legato alle caratteristiche costruttive dei pozzi, con particolare riguardo ai pozzi di recente costruzione, con diametro minore di 400 mm e rivestimento in PVC. Quando possibile, si è inoltre cercato di tenere conto, nelle zone collinari, della profondità delle opere di captazione e, di conseguenza, dei livelli di circolazione captati.

Dove non è stato possibile seguire entrambe le indicazioni sopra citate è stata data la priorità alla distribuzione dei campioni, utilizzando pertanto anche pozzi a largo diametro in cemento e in muratura, in modo tale da coprire tutta l'area e ottenere un'immagine rappresentativa di tutto il bacino.

I campioni relativi alle acque del Lago sono stati prelevati in corrispondenza dei livelli più superficiali, ad una profondità media di circa 20 cm e in prossimità di piccoli moli e ad una distanza di circa 10-20 m dalle sponde.

In ciascuno dei punti di prelievo sono state rilevate le coordinate (in formato Gauss-Boaga metriche) e la quota, utilizzando un GPS dotato di altimetro. Nei punti di campionamento dei pozzi è stato misurato il livello statico della superficie piezometrica mediante frantometro. Sono state infine compilate schede monografiche delle opere di captazione contenenti informazioni sulle caratteristiche costruttive (profondità, rivestimento, posizione dei filtri, ecc..).

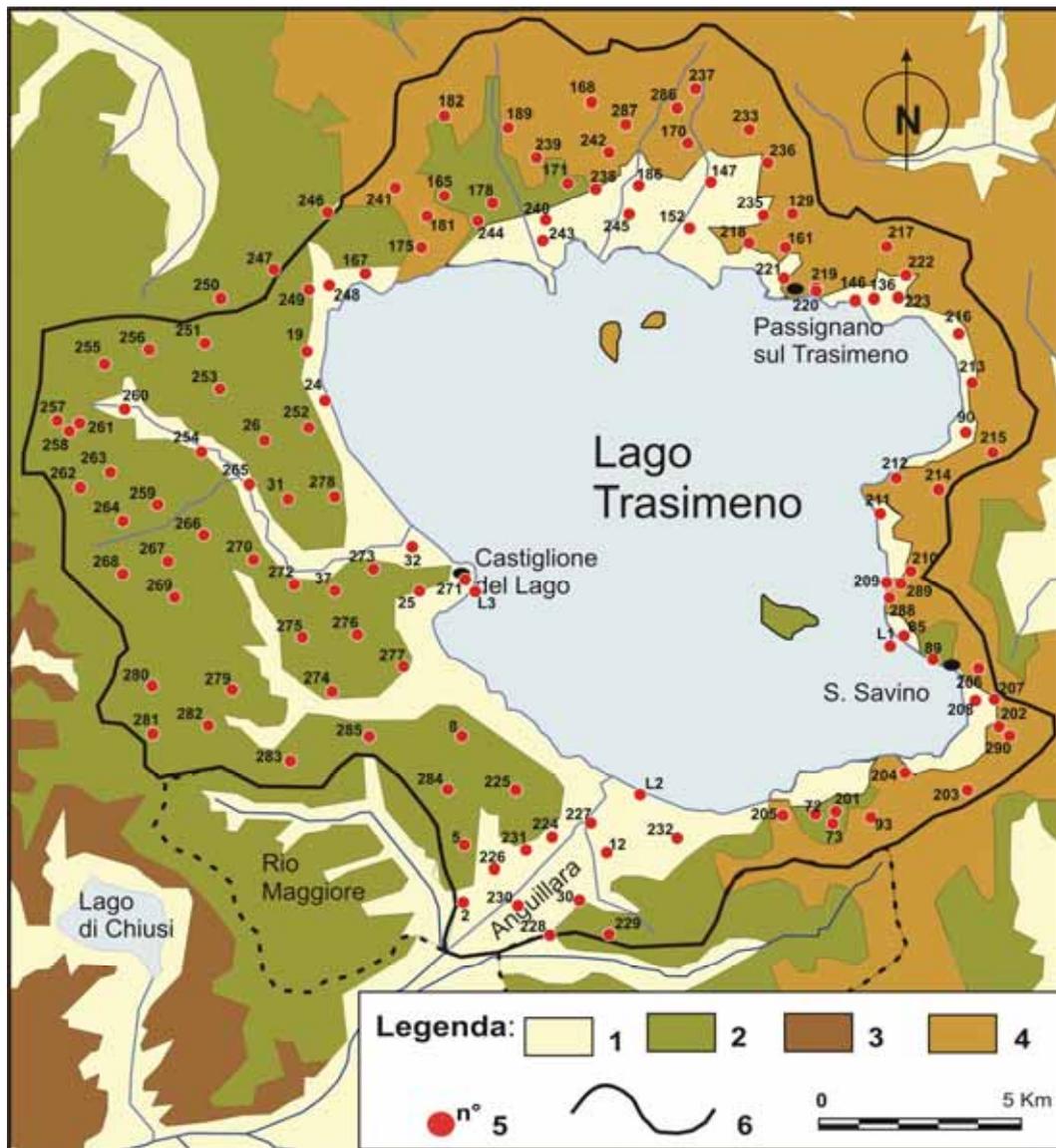


Fig.1-Carta di campionamento (modificata da Dragoni, 1982) e geolitologica. Legenda: 1=depositi alluvionali fluvio-lacustri recenti e attuali; 2=Depositi fluvio-lacustri del Pleistocene; 3=depositi litorali del pliocene; 4=Formazioni torbiditiche oligo-mioceniche; 5=punti di campionamento; 6=Limite del bacino imbrifero.

I parametri chimico-fisici delle acque sono stati determinati in parte in campagna e in parte in laboratorio. Sul campo sono state effettuate le seguenti determinazioni:

- temperatura dell' acqua;
- temperatura dell'aria;
- pH;
- Conducibilità elettrica;
- Potenziale di ossido riduzione Eh;
- Alcalinità totale della soluzione (mediante una titolazione acido-base con HCl 0,01 N, utilizzando una soluzione di metilarancio come indicatore su un campione di 500 µl);
- Determinazione delle concentrazioni di ammoniaca, manganese e ferro totale, utilizzando metodi colorimetrici.

Sono stati poi prelevati per le analisi di laboratorio due aliquote di campione:

- 1 campione da 50 ml, filtrato per eliminare la sospensione solida e impedire la formazione di alghe, acidificato con 2 cc di HCl 1:1 per impedire la precipitazione dei carbonati;
- 1 campione da 100 ml.

Il campione acidificato è stato utilizzato per la determinazione delle concentrazioni di Ca^{++} e Mg^{++} , mentre il campione al naturale è stato utilizzato per tutte le altre determinazioni di laboratorio.

2.1 Analisi di laboratorio

In laboratorio sono state determinate le concentrazioni degli ioni Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , F^- , PO_4^{3-} utilizzando il cromatografo ionico Dionex DX120. Per poter determinare le concentrazioni degli ioni F^- e PO_4^{3-} si è dovuta utilizzare una colonna più lunga di quella utilizzata per la determinazione degli altri anioni, al fine di ottenere una maggiore separazione delle componenti ricercate.

Le concentrazioni dei cationi nelle soluzioni campionate e in particolare Ca^{2+} , Mg^{2+} ; Na^+ , K^+ , Li^+ sono state determinate tramite spettrofotometria di fiamma utilizzando la strumentazione IL 956. I cationi Na^+ e K^+ sono stati determinati in emissione di fiamma, mentre i cationi Mg^{2+} e Ca^{2+} in assorbimento.

La qualità complessiva delle analisi effettuate sui campioni è stata verificata considerando la relazione basata sul rispetto dell'elettroneutralità delle soluzioni: $\Sigma \text{Anioni (eq/l)} = \Sigma \text{Cationi (eq/l)}$.

In ogni campione è stata verificata la chiusura delle analisi, calcolando l'errore analitico attraverso la relazione:

$$\text{chiusura \%} = 100 \times (\Sigma \text{Anioni} - \Sigma \text{Cationi}) / (\Sigma \text{Anioni} + \Sigma \text{Cationi}) / 2.$$

La qualità delle analisi nel complesso è risultata buona con un errore medio del 3,59%, la maggior parte dei campioni presenta chiusure accettabili mostrando un errore generalmente al di sotto del valore indicativo del 10%, considerato normalmente come limite per analisi di questo tipo.

2.2 Metodi di elaborazione dei dati

Le carte della distribuzione di nitrati sono state realizzate utilizzando l'algoritmo di calcolo sgsim (Simulazioni Sequenziali Gaussiane) contenuto nel software GSLIB (Deutsch and Journel, 1998). L'idea di base delle "simulazioni" è quella di generare un set di rappresentazioni (carte) equiprobabili e alternative della distribuzione di un attributo, tutte riprodotte i parametri statistici (media e deviazione standard) e l'andamento spaziale (variogramma) dei dati sperimentali. L'insieme di tutte le rappresentazioni e le loro differenze costituiscono in se una rappresentazione dell'incertezza associata alla mappatura del parametro (Rautman and Istock, 1996). La differenza tra le diverse rappresentazione di uno stesso parametro ci fornisce una misura dell'incertezza, e quindi dell'attendibilità, della trazione geostatistica dei dati. Tanto più i dati sono rappresentativi della situazione reale e il modello spaziale è accurato, minore sarà la differenza tra le diverse realizzazioni. I valori della concentrazione in nitrati delle acque sotterranee nelle aree indagate è stato calcolato utilizzando un grid a maglie quadrate aventi un'area unitaria di 10000 m² (sulla base dei dati sperimentali è stato quindi calcolato un valore simulato del tenore in nitrati nelle acque ogni 100 m). La distribuzione areale dei livelli piezometrici è il risultato di 100 simulazioni su un grid a maglie quadrate aventi ciascuna 200 m di lato.

La simulazione procede per step:

- Normalizzazione della variabile;
- Definizione del modello della variabilità spaziale: calcolo del variogramma;
- Calcolo dei valori contenuti in nitrati nei nodi della griglia di calcolo dove non sono presenti dati sperimentali. Ogni qualvolta un valore viene calcolato viene integrato nel dataset ed utilizzato nel calcolo.

Ripetendo la simulazione seguendo dei percorsi di calcolo diversi (calcolando con ordine diverso i diversi punti dello spazio) si ottengono diverse rappresentazioni equiprobabili e alternative.

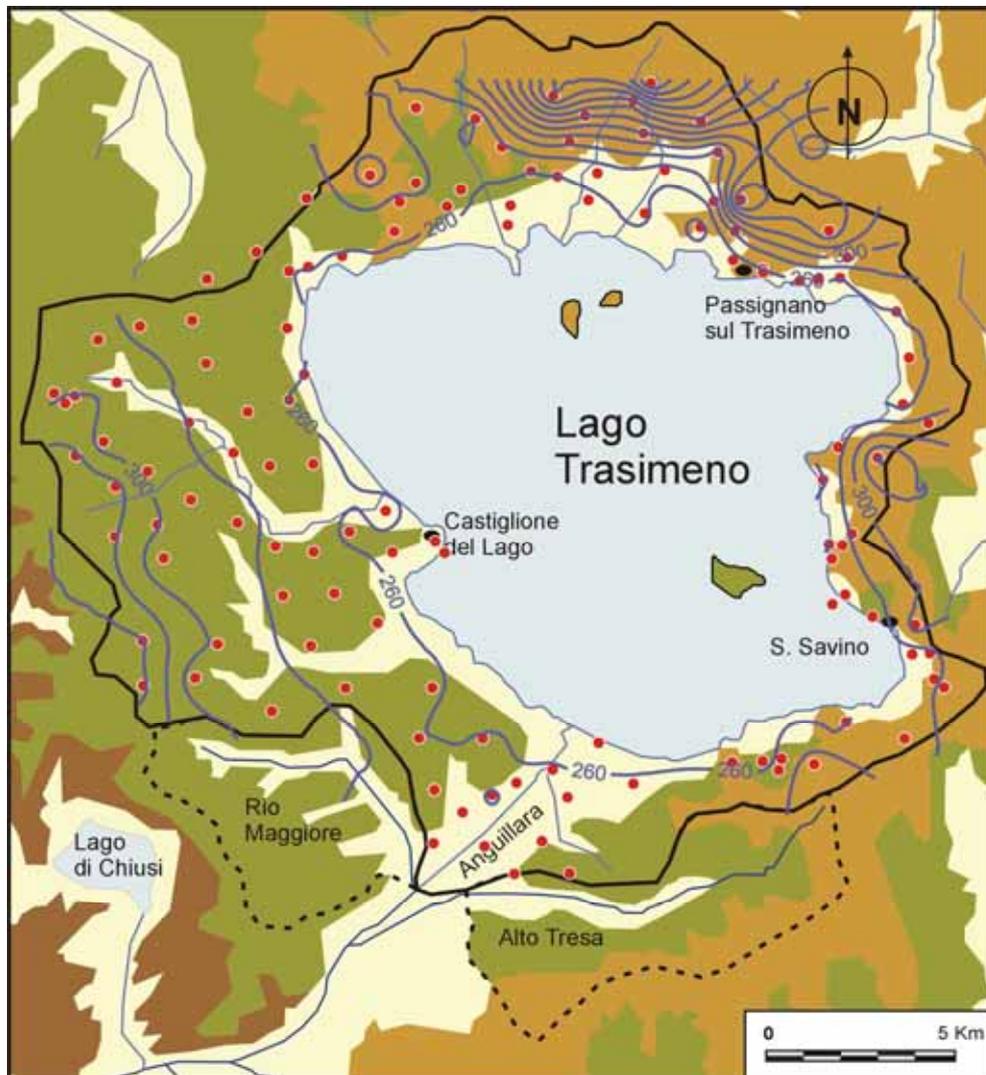
Nel caso specifico delle carte del contenuto medio di nitrati, queste sono state ottenute mediando punto per punto 100 differenti rappresentazioni. Le simulazioni così ottenute sono state post-processate per ottenere le carte finali.

3. DISTRIBUZIONE PIEZOMETRICA

La carta piezometrica è stata realizzata utilizzando l'algoritmo di calcolo sgsim (Simulazioni Sequenziali Gaussiane) contenuto nel software GSLIB (Deutsch and Journel, 1998) e già descritto nella precedente sezione. La carta, risultato di 100 simulazioni su una maglia quadrata con 200 m di lato, è riportata in Fig.2.

Dall'esame della carta si osserva come l'area studiata sia caratterizzata da un flusso radiale verso il lago che si trova spostato leggermente a nord-est rispetto al centro del bacino idrogeologico. I gradienti della falda sono dell'ordine dei 4-6 m/km nella zona occidentale e sud-occidentale del bacino (dove prevalgono i sedimenti Plio-Pleistocenici e Quaternari), mentre nella porzione nord-orientale (dove gran parte dei pozzi misurati attraversa le torbiditi Mioceniche) il gradiente è molto più elevato (15-35 m/km).

Fig.2 - Carta Piezometrica.



4. CLASSIFICAZIONE CHIMICA DELLE ACQUE

Una prima distinzione fra i punti d'acqua analizzati è stata effettuata sulla base delle litologie presenti nella zona di campionamento. Sono state distinte quattro serie di punti:

- acque campionate nelle aree di affioramento dei depositi alluvionali attuali e recenti;
- acque campionate nelle aree di affioramento dei depositi Plio-Pleistocenici;
- acque campionate in corrispondenza di affioramenti di torbiditi Mioceniche;
- acque del Lago Trasimeno.

Per la classificazione chimica delle acque sono stati realizzati diagrammi classificativi di "Langelier-Ludwig", diagrammi Eh-pH e diagrammi binari.

Il diagramma Langelier-Ludwig (Fig.3) distingue quattro campi che definiscono altrettanti idrotipi:

- Acque bicarbonato alcalino terrose;
- Acque bicarbonato alcaline;
- Acque solfato-clorurato alcaline;
- Acque solfato-clorurato alcalino-terrose.

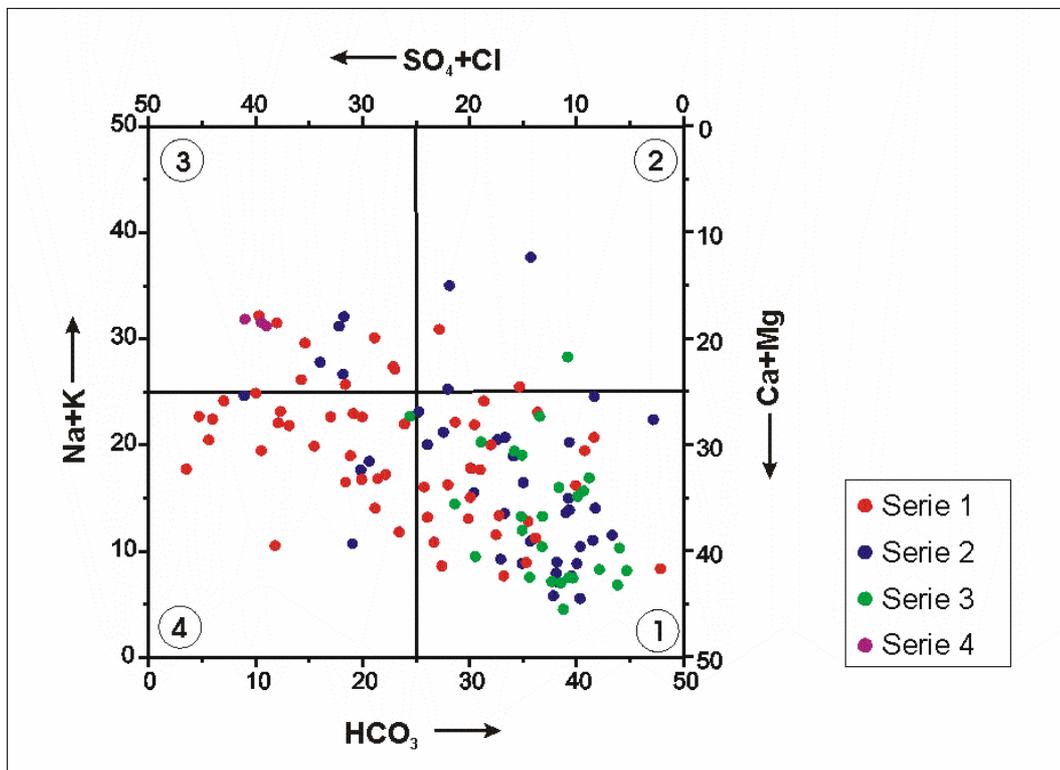


Fig.3- Diagramma Langelier-Ludwig. Legenda: Serie 1 = pozzi posti su depositi recenti e attuali; Serie 2 = pozzi posti su depositi villafranchiani; Serie 3 = pozzi posti su torbiditi mioceniche; Serie 4 = campioni prelevati direttamente dalle acque del lago.

Inserendo nel diagramma Langelier-Ludwig i punti relativi ai campioni analizzati, questi si dispongono a formare una nube molto dispersa che occupa gran parte del grafico.

Dal diagramma si può notare che:

- i campioni relativi agli acquiferi impostati sui depositi fluvio-lacustri, campioni appartenenti alla prima e alla seconda serie, hanno caratteristiche chimiche molto variabili da acque bicarbonato alcalino-terrose a acque solfato-clorurato alcaline e alcalino-terrose;
- i campioni appartenenti alla terza serie un carattere chimico nel complesso omogeneo, ricadendo, per la gran parte, nel campo delle acque bicarbonato alcalino-terrose;
- i campioni appartenenti alla quarta serie, prelevati direttamente dalle acque del lago, possono essere classificati come acque clorurato-solfato alcalini.

Per definire meglio il contenuto anionico delle acque i campioni sono stati riportati anche su due diagrammi L.L. modificati (Fig.4 a, b) isolando lo ione cloruro e lo ione solfato sulle ascisse.

Osservando i diagrammi di Fig.4 si nota che la gran parte dei campioni in studio sono acque bicarbonato-clorurato alcalino-terrose, con una componente solfatica nettamente subordinata rispetto a quella bicarbonata e clorurata (Fig.4b). Il grafico (Fig.4b) consente inoltre di notare che i campioni riferibili ad acquiferi miocenici (terza serie) hanno mediamente concentrazioni di cloro più basse rispetto a tutti gli altri. In questi campioni lo ione solfato e lo ione cloruro hanno circa lo stesso peso rispetto al totale degli anioni.

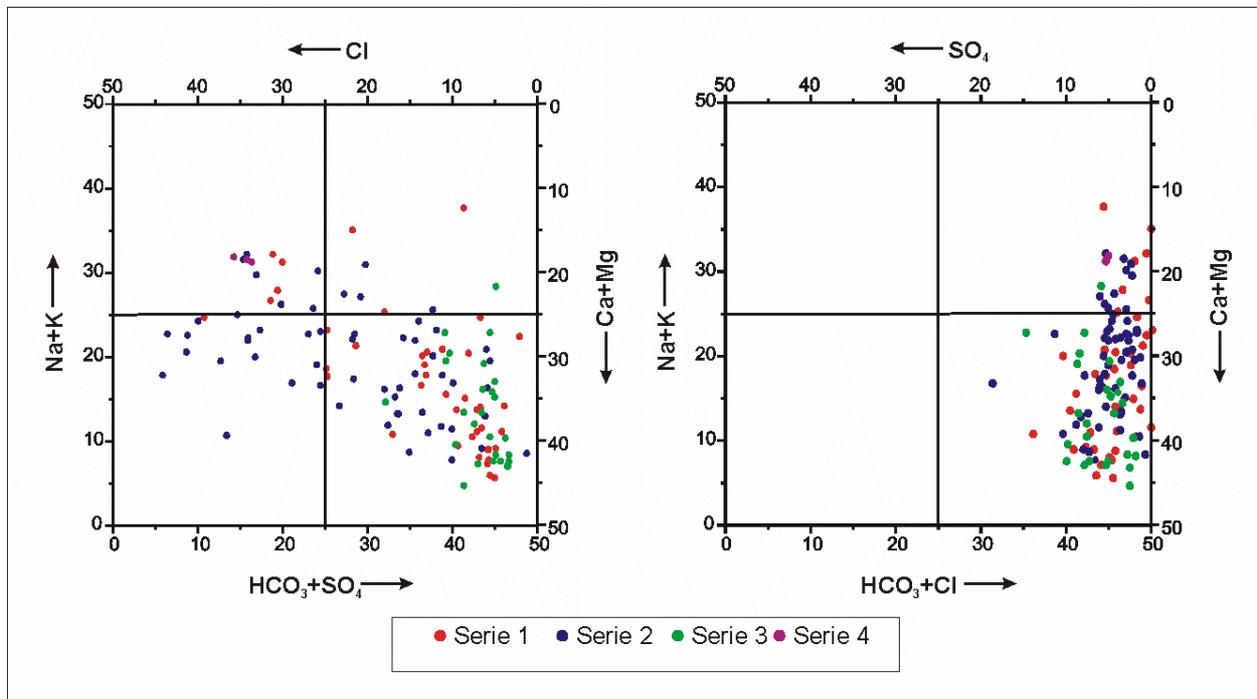
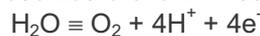


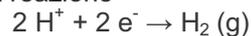
Fig.4 - Diagrammi Langelier-Ludwig modificati raggruppando HCO₃ con SO₄ nel grafico 4.a e con Cl nel grafico 4.b. Legenda: Serie 1 = pozzi posti su depositi recenti e attuali; Serie 2 = pozzi posti su depositi villafranchiani; Serie 3 = pozzi posti su torbiditi mioceniche; Serie 4 = campioni prelevati direttamente dalle acque del lago.

5. DIAGRAMMI Eh-Ph

La stabilità delle soluzioni acquose è limitata dalle condizioni di pH e Eh. Il limite di massima ossidazione è legato alla fugacità di ossigeno dell'atmosfera in equilibrio con la soluzione; la molecola dell'acqua si dissocia sviluppando ossigeno gassoso libero e ioni H⁺ secondo l'equilibrio:



Il limite di massima riduzione per la stabilità termodinamica dell'acqua è segnato dalla riduzione dell'idrogeno ionico in gas H₂ con la reazione



In base alle condizioni ossidoriduttive e del pH si può dividere il campo di stabilità in 4 parti:

- Soluzioni ossidanti acide;
- Soluzioni ossidanti basiche;
- Soluzioni riducenti basiche;
- Soluzioni riducenti acide.

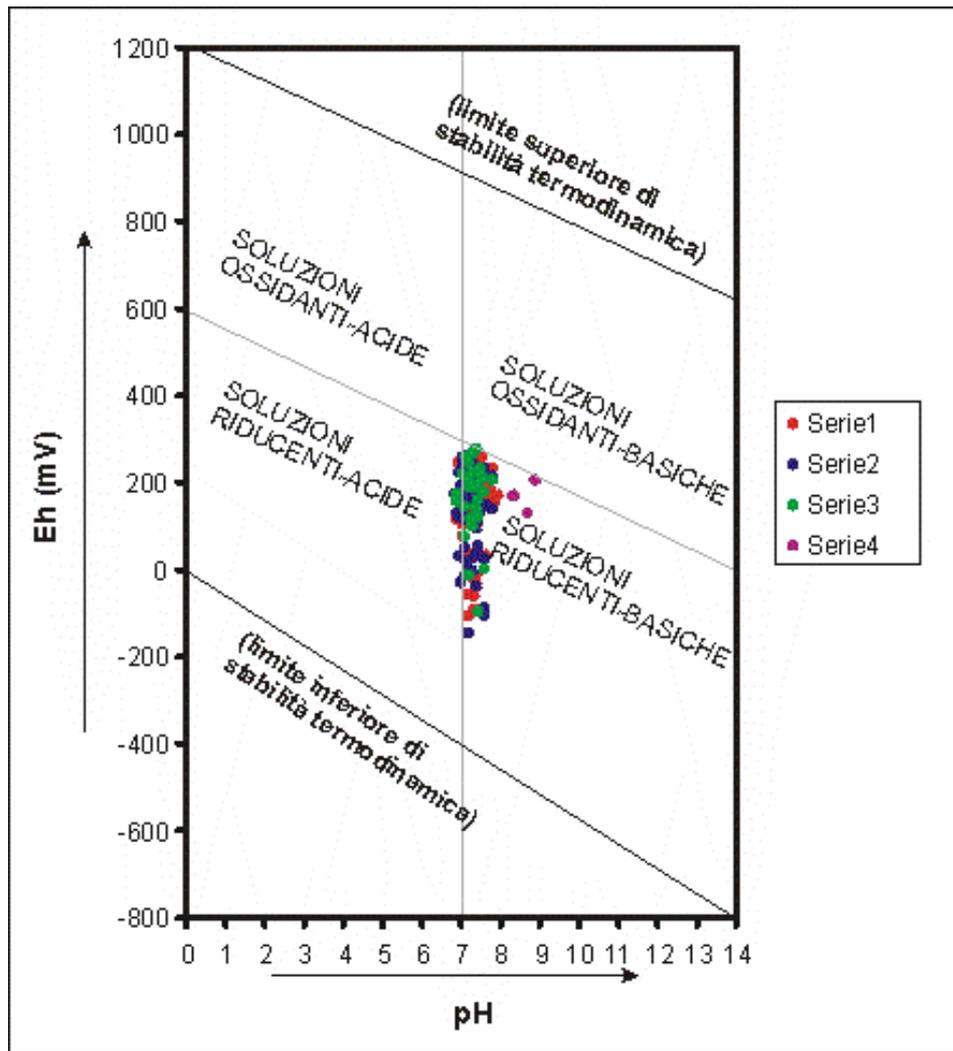


Fig.5 -Campo di stabilità per le soluzioni acquose a $T = 25\text{ °C}$, $P_{\text{tot}} = 1\text{ bar}$.(modificato da Ottonello, 1991). Legenda: Serie 1 = pozzi posti su depositi recenti e attuali; Serie 2 = pozzi posti su depositi villafranchiani; Serie 3 = pozzi posti su torbiditi mioceniche; Serie 4 = campioni prelevati direttamente dalle acque del lago.

Inserendo i dati relativi ai campioni analizzati (Fig.5) si può osservare che gran parte dei punti cadono nel campo delle soluzioni riducenti basiche, anche se tutti sono vicini alle condizioni di neutralità per ciò che concerne il comportamento acido-base.

Si possono distinguere due diversi gruppi di punti:

- il primo gruppo costituito dai campioni appartenenti alle acque sotterranee, caratterizzato da un piccolo range entro il quale variano i valori del pH e da un range di variabilità dei valori di Eh più ampio;
- un secondo gruppo riconoscibile è costituito dai campioni appartenenti alle acque del lago, queste sono caratterizzate da un pH più alto rispetto a tutti gli altri campioni, compreso tra 8,89 e 8,69, e valori del potenziale di ossidoriduzione che varia tra 129 e 206.

5.1 Sistema n-o-h

Nel sistema N-O-H, l'azoto può essere presente nei due stati di valenza +5 e -3, combinato con ossigeno e idrogeno a formare rispettivamente gli ioni NO_3^- e NH_4^+ , oppure in forma molecolare $\text{N}_2(\text{g})$. A causa delle "difficoltà cinetiche" connesse alla stabilità di legame della molecola $\text{N}_2(\text{g})$ (Stumm e Morgan, 1981) nel suo campo di esistenza possono coesistere in forma metastabile i complessi NH_4^+ e NO_3^- . Può inoltre esistere la specie nitrito, NO_2^- , che è sempre metastabile (cfr. Ottonello, 1991). Nel diagramma di Fig.7, la posizione dei

campioni sul campo Eh-pH è confrontata con i campi di stabilità delle specie dell'azoto calcolati per un valore di $fN_2=0.8$ bar, cioè alle condizioni di equilibrio con i gas atmosferici.

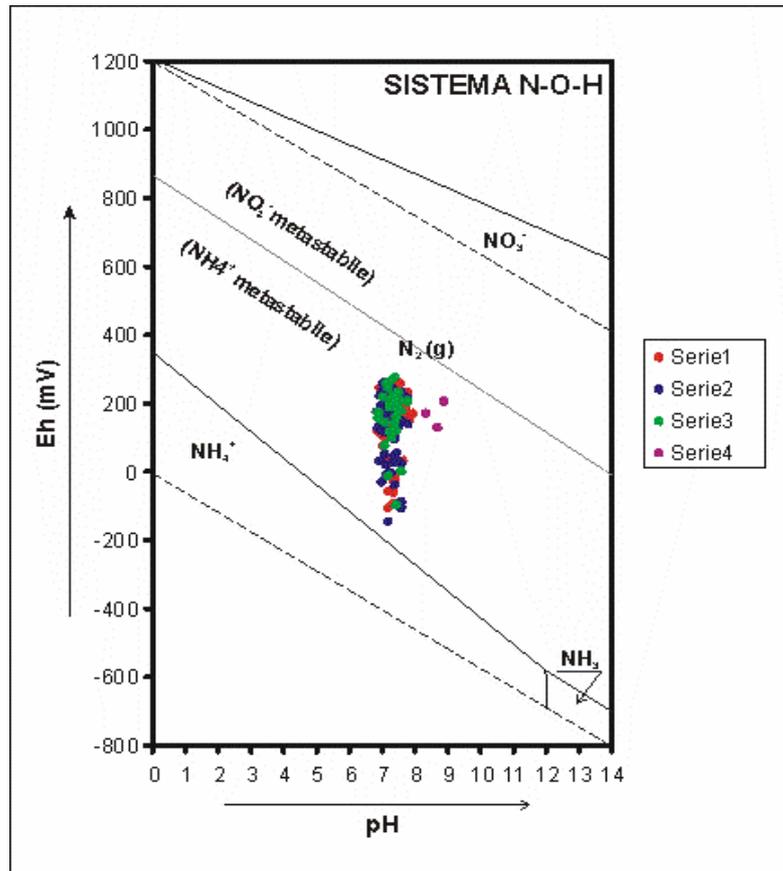


Fig.6 - Diagramma Eh vs pH per il sistema N-O-H a $T = 25^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{tot}} = 1$ bar e $fN_2 = 0,8$ bar (modificato da Ottonello, 1991). Legenda: Serie 1 = pozzi posti su depositi recenti e attuali; Serie 2 = pozzi posti su depositi villafranchiani; Serie 3 = pozzi posti su torbiditi mioceniche; Serie 4 = campioni prelevati direttamente dalle acque del lago.

In tali condizioni, nel campo pertinente alla molecola N_2 (g), si possono distinguere due campi di cui uno caratterizzato dalla predominanza dei nitrati (NO_3^-) in forma metastabile, l'altro caratterizzato dalla predominanza dello ione ammonio (NH_4^+) sempre in forma metastabile. Tutti i campioni analizzati cadono nel campo in cui è predominante il complesso NH_4^+ metastabile anche se poi i risultati analitici indicano che in quasi la totalità dei campioni sono presenti concentrazioni di NO_3^- rilevabili e spesso si verifica la coesistenza di NO_3^- e NH_4^+ . Queste osservazioni indicano che i sistemi studiati non sono in equilibrio con i gas atmosferici e che, alle condizioni dell'acquifero, il campo di esistenza del nitrato metastabile si estende ben oltre quello calcolato per soluzioni in equilibrio con i gas atmosferici.

Il grafico binario NH_4^+ (eq/l) vs NO_3^- (eq/l) evidenzia che i punti si distribuiscono principalmente in due gruppi (Fig.6):

- il primo, con concentrazioni di NH_4^+ molto basse, e tenori in nitrati in un range compreso tra zero e 2.79×10^{-3} (eq/l);
- un secondo gruppo caratterizzato da basse concentrazioni di NO_3^- e valori dello ione ammonio che variano in un range compreso tra zero e 2.22×10^{-5} (eq/l).

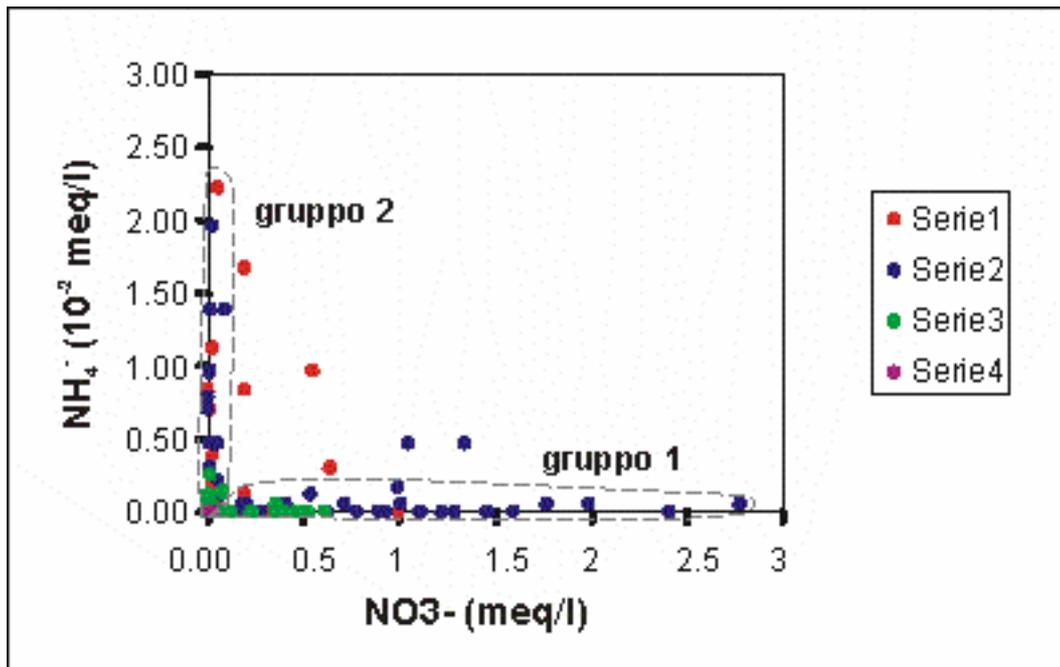


Fig.7 - Diagramma binario NO_3^- vs NH_4^+ . Legenda: Serie 1 = pozzi posti su depositi recenti e attuali; Serie 2 = pozzi posti su depositi villafranchiani; Serie 3 = pozzi posti su torbiditi mioceniche; Serie 4 = campioni prelevati direttamente dalle acque del lago.

5.2 Sistema fe-o-h

Nel campo di stabilità dell'acqua il ferro assume due stati di valenza, +2 e +3. Per la costruzione del diagramma di Fig.8 il sistema è stato semplificato assumendo come uniche fasi esistenti⁷ gli ioni Fe^{+3} e Fe^{+2} e le fasi condensate ematite Fe_2O_3 e Magnetite Fe_3O_4 .

⁷ In realtà le fasi che si possono formare nel sistema sono molte di più come per esempio l'idrossido ferrico $\text{Fe}(\text{OH})_3$ metastabile, e l'idrossido ferroso $\text{Fe}(\text{OH})_2$ anch'esso metastabile.

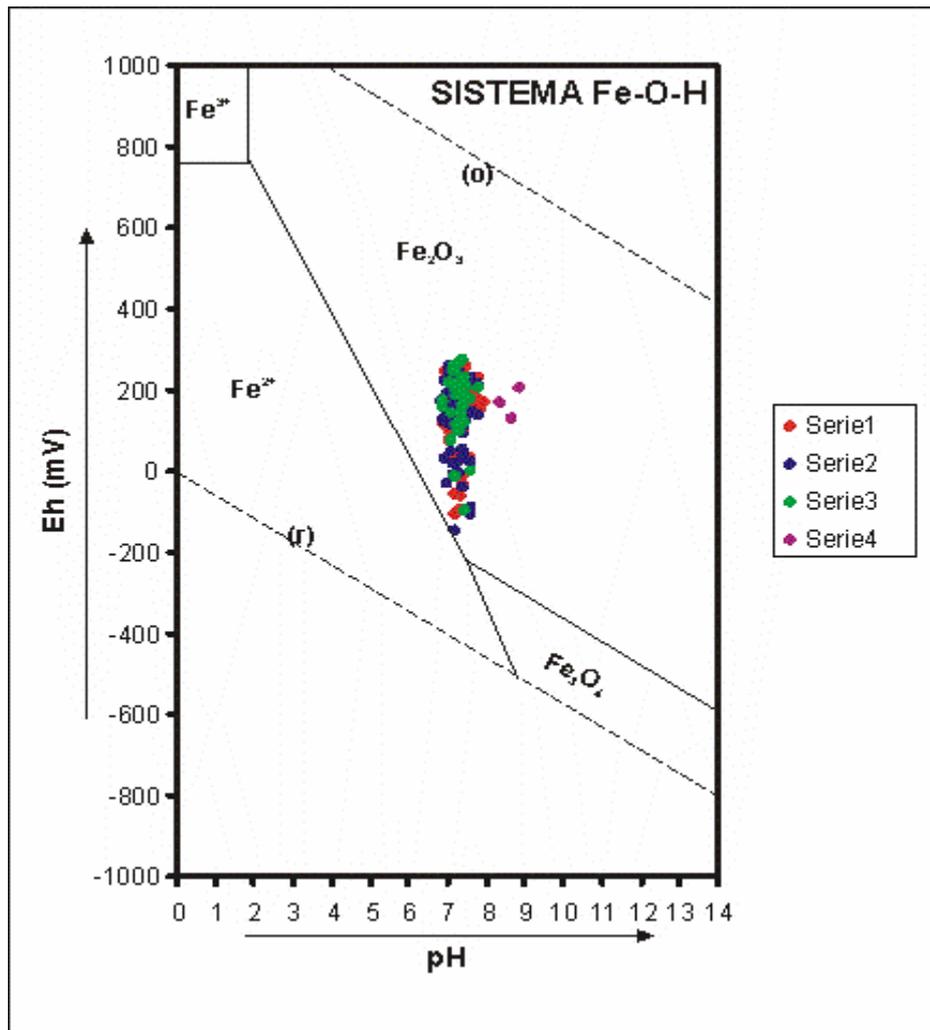


Fig.8 - Diagramma Eh vs pH per il sistema Fe-O-H a T = 25°C, Ptot = 1 bar(modificato da Ottonello, 1991).
 Legenda: Serie 1 = pozzi posti su depositi recenti e attuali; Serie 2 = pozzi posti su depositi villafranchiani;
 Serie 3 = pozzi posti su torbiditi mioceniche; Serie 4 = campioni prelevati direttamente dalle acque del lago.

Tutti i campioni analizzati sono caratterizzati da condizioni di pH e di Eh tali per cui cadono nel campo di stabilità dell'ematite. I valori più elevati delle concentrazioni di ferro totale competono ai campioni della serie 1 e della serie 2 (fino a 3.5 mg/l) mentre i campioni delle torbiditi (serie 3) sono caratterizzati da valori relativamente bassi compresi fra 0 e 0.25 mg/l eccetto il campione 237 (zona Vernazzano) che presenta un valore molto elevato del ferro totale (3 mg/l). Questo è anche l'unico campione della serie 3 ad avere valori negativi dell'Eh e dovrebbe essere rappresentativo di un livello di circolazione più profonda e prolungata nelle arenarie del Trasimeno.

5.3 Sistema mn-c-s-o-h

Il diagramma Eh vs pH di Fig.9 rappresenta il sistema Mn-C-S-O-H, è stato costruito considerando l'attività dei soluti C e S pari a 10^{-3} mol/l, valori compatibili con le reali condizioni del sistema studiato. Il manganese all'interno del campo di stabilità dell'acqua assume gli stati di valenza +2, +3, +4; nel diagramma sono riportate alcune delle fasi che possono rappresentare i diversi stati di valenza del manganese in questo sistema.

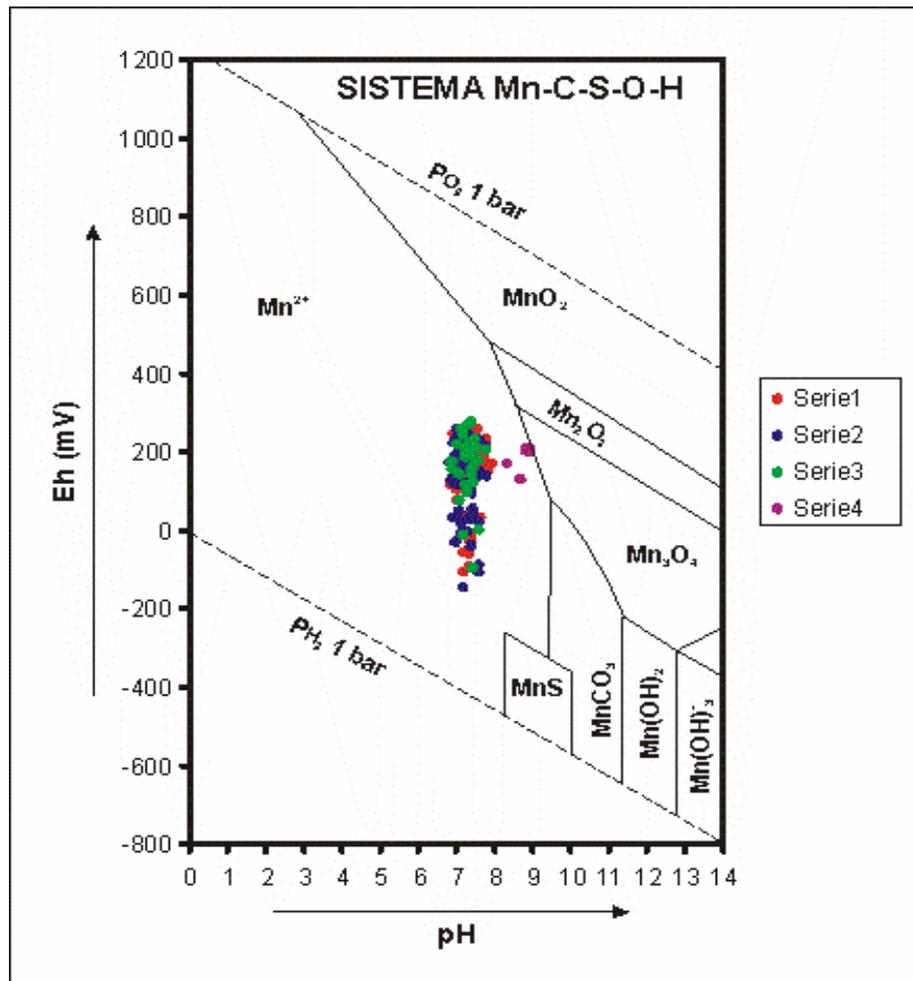


Fig.9 - Diagramma Eh vs pH per il sistema Mn-C-S-O-H a T = 25°C, Ptot = 1 bar (modificato da Ottonello, 1991). Legenda: Serie 1 = pozzi posti su depositi recenti e attuali; Serie 2 = pozzi posti su depositi villafranchiani; Serie 3 = pozzi posti su torbiditi mioceniche; Serie 4 = campioni prelevati direttamente dalle acque del lago.

Si può osservare che tutti i punti rappresentanti i campioni di acque sotterranee cadono nel campo di stabilità dello ione Mn^{2+} , che occupa gran parte dell'area del diagramma. Solo i campioni del Lago Trasimeno si avvicinano alle condizioni di precipitazione degli ossidi di Manganese. In questo sistema la precipitazione di fasi solide avviene per valori di pH molto elevati e l'aumentare del potenziale di ossidoriduzione espande il campo di stabilità dei solidi favorendone la precipitazione (cfr. Ottonello, 1991).

Analogamente a quanto osservato per il ferro, anche per il manganese i campioni che presentano le concentrazioni più alte sono quelli delle serie 1 e 2 (massimo 3 mg/l).

I campioni della serie 3 sono invece caratterizzati da valori bassi (<0.02 mg/l) con l'eccezione del campione 237 (zona Vernazzano) che mostra valori relativamente elevati (0.25 mg/l).

6. DISTRIBUZIONE ELEMENTI MOBILI (o conservativi)

Alle condizioni vigenti nei sistemi studiati gli elementi Cl, Na, K e Li sono conservativi, cioè la loro presenza in soluzione e la loro mobilità geochimica non è controllata da alcun equilibrio chimico. Le specie ioniche Cl^- , Na^+ , K^+ e Li^+ risultano perciò particolarmente utili per differenziare gruppi di acque con origini diverse e per studiare possibili processi di miscela.

6.1 Diagramma Na vs Cl

Dal diagramma Cl^- vs Na^+ (Fig.10) si osserva che i campioni analizzati si dispongono nel grafico assumendo un andamento iperbolico. Il primo tratto è caratterizzato da un rapporto sodio/cloro vicino a 1:1 mentre il secondo tratto è caratterizzato da una diminuzione dello stesso rapporto.

Se ingrandiamo l'area del grafico relativa al primo tratto dell'iperbole (Fig.11), si può osservare che i campioni si dispongono in tre gruppi caratterizzati da andamenti del rapporto sodio/cloro diversi:

- il primo gruppo di campioni è caratterizzato da un rapporto Na/Cl circa 2:1;
- il secondo gruppo si caratterizza per un rapporto circa 1:1;
- il terzo ha un rapporto Na/Cl circa di 1:2.

Il primo gruppo è costituito quasi esclusivamente da campioni appartenenti agli acquiferi impostati sulle torbiditi mioceniche.

I campioni che presentano un basso rapporto Na/Cl, si dispongono nella porzione di bacino posta a Sud-Est del Lago Trasimeno, i campioni con i più alti rapporti Na/Cl sono prevalenti nelle aree di affioramento delle formazioni torbiditiche, mentre i campioni con rapporto Na/Cl intermedio (1:1) sono presenti in tutti i versanti del bacino.

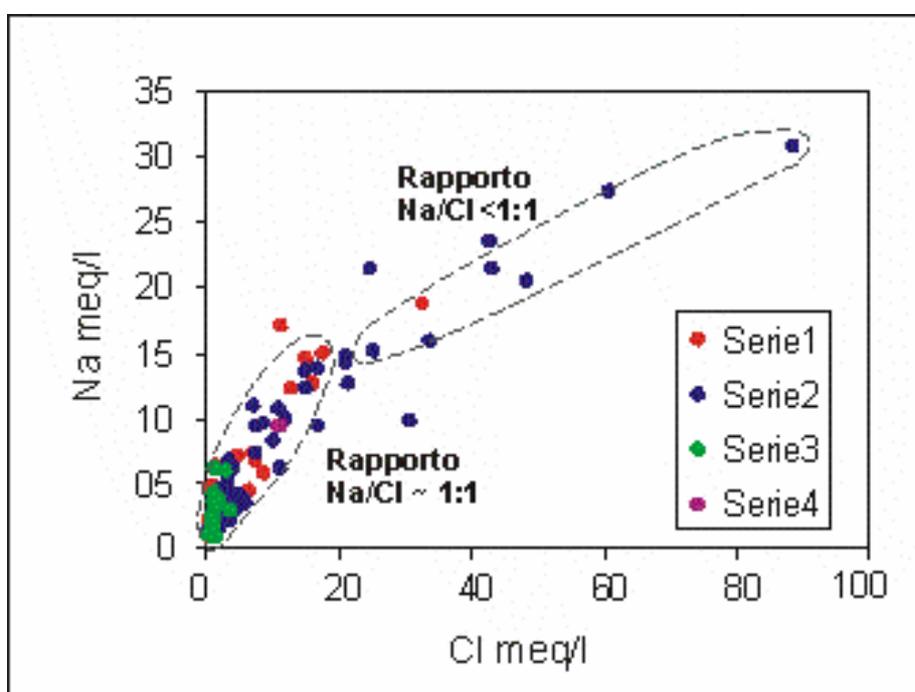


Fig.10 -Diagramma binario Cl^- vs Na^+ . Legenda: Serie 1 = pozzi posti su depositi recenti e attuali; Serie 2 = pozzi posti su depositi villafranchiani; Serie 3 = pozzi posti su torbiditi mioceniche; Serie 4 = campioni prelevati direttamente dalle acque del lago.

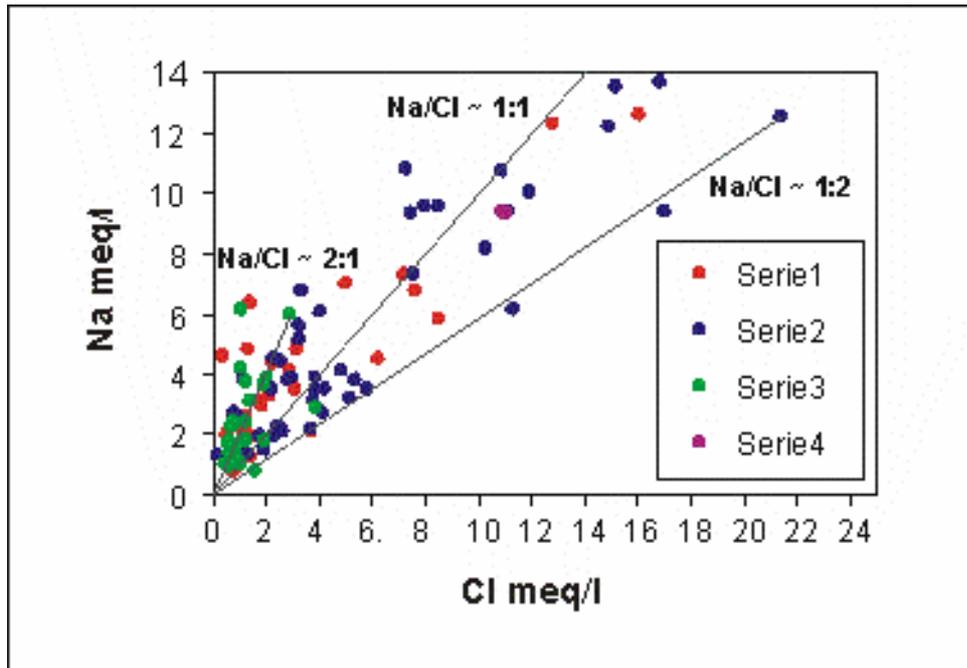


Fig.11 - Diagramma binario Cl⁻ vs Na⁺. Per i campioni con [Na]⁺<14 meq/l. Legenda: Serie 1 = pozzi posti su depositi recenti e attuali; Serie 2 = pozzi posti su depositi villafranchiani; Serie 3 = pozzi posti su torbiditi mioceniche; Serie 4 = campioni prelevati direttamente dalle acque del lago.

Se si costruisce un diagramma binario mettendo il valore della conducibilità contro il rapporto Na/Cl (Fig.12), si nota che i campioni si dispongono secondo due trend ben distinti:

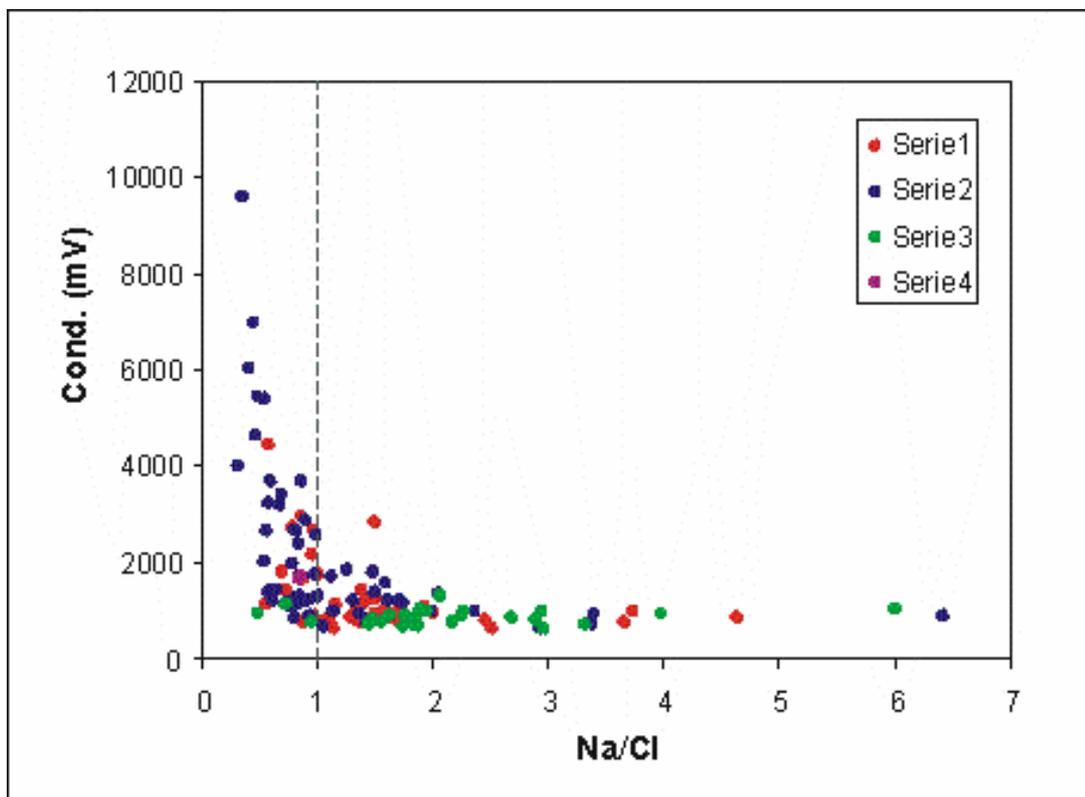


Fig.12 -Diagramma binario [Na]/[Cl] vs conducibilità in mV. Legenda: Serie 1 = pozzi posti su depositi recenti e attuali; Serie 2 = pozzi posti su depositi villafranchiani; Serie 3 = pozzi posti su torbiditi mioceniche; Serie 4 = campioni prelevati direttamente dalle acque del lago.

- quasi tutti i campioni delle serie 1 e 2 fanno parte di un trend caratterizzato da un aumento di salinità con rapporto Na/Cl costante e circa uguale ad 1. Questo trend può essere spiegato con la dissoluzione di cloruri o con la miscelazione delle acque più superficiali con acque saline più profonde;
- i campioni della serie 3 presentano invece un ampio range di variazione del rapporto Na/Cl con valori di salinità relativamente bassi e quasi costanti. Questo andamento è probabilmente legato all'interazione delle acque con le torbiditi mioceniche e l'elevato rapporto Na/Cl di queste acque può essere spiegato, almeno in parte, con la dissoluzione incongruente di allumosilicati.

I pochi campioni con rapporto Na/Cl circa pari a 0.5, individuati nel diagramma di Fig.11, e più in generale i campioni con rapporto Na/Cl sensibilmente inferiore a 1, non identificano invece alcun gruppo separato nel diagramma di Fig.12 (e nei successivi diagrammi – v.prg. successivo) e potrebbero essere spiegati con processi secondari di adsorbimento del sodio e/o scambio ionico con la matrice solida a partire da acque con rapporto Na/Cl = 1.

6.2 Diagrammi Cl vs Li e Na vs Li

Anche nei diagrammi sodio-litio e cloro-litio le acque della terza serie si distinguono dal resto dei campioni studiati presentando un arricchimento relativo in litio. Nel diagramma Cl vs Li (Fig.13) i campioni appartenenti alla terza serie sono infatti caratterizzati da una concentrazione di litio variabile tra 0 e 6.53×10^{-3} meq/l cui corrisponde una bassa e quasi costante concentrazione di cloro.

Nel diagramma Na vs Li (Fig.14) si notano sempre due diversi andamenti, uno caratteristico degli acquiferi impostati sulle torbiditi con arricchimento in litio e l'altro costituito da tutti gli altri campioni in cui il rapporto Li/Na è minore.

In questo diagramma i risultati appaiono più dispersi rispetto alla netta separazione dei due gruppi che caratterizza il diagramma Cl vs Li.

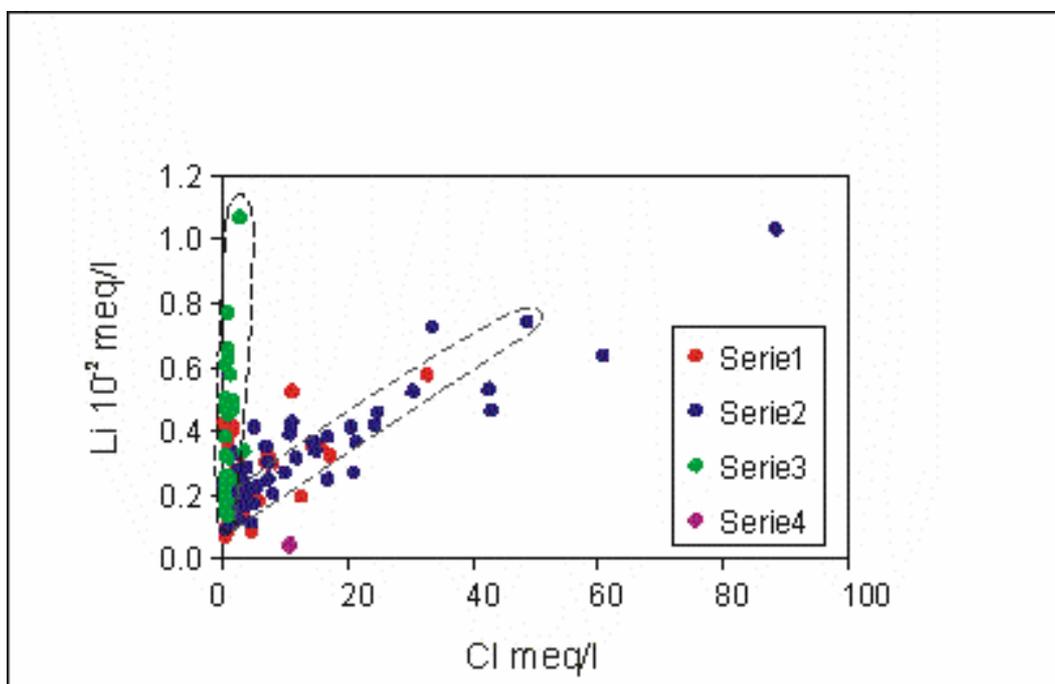


Fig.13 -Diagramma binario Cl vs Li. Legenda: Serie 1 = pozzi posti su depositi recenti e attuali; Serie 2 = pozzi posti su depositi villafranchiani; Serie 3 = pozzi posti su torbiditi mioceniche; Serie 4 = campioni prelevati direttamente dalle acque del lago.

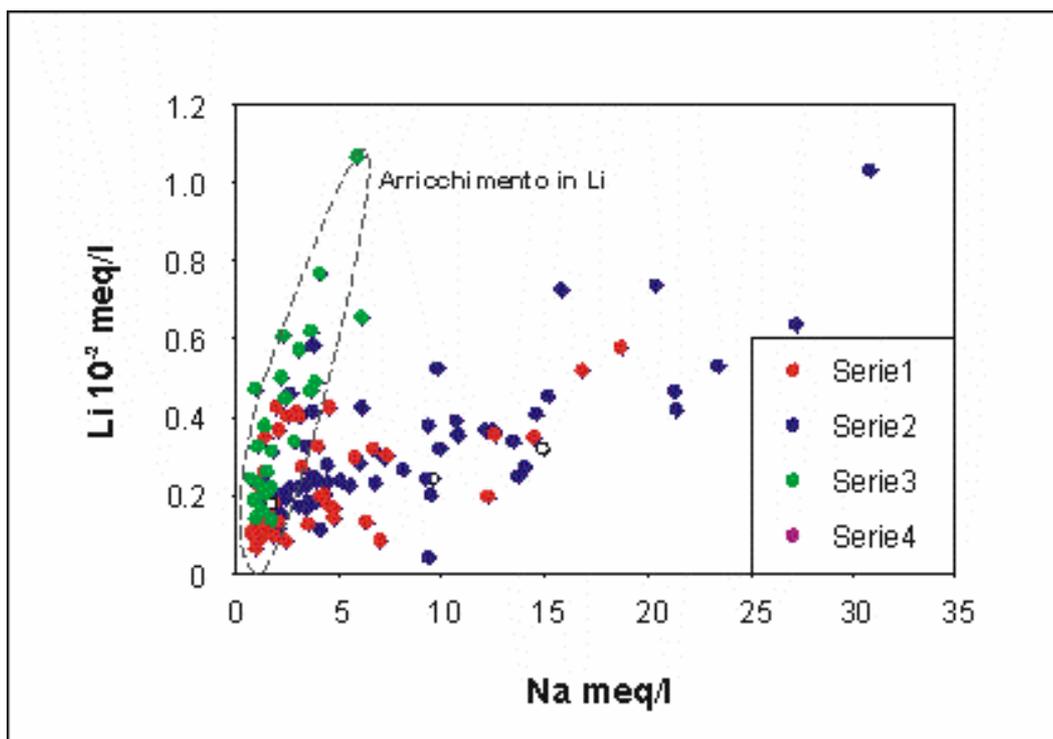


Fig.14 -Diagramma binario Na vs Li. Legenda: Serie 1 = pozzi posti su depositi recenti e attuali; Serie 2 = pozzi posti su depositi villafranchiani; Serie 3 = pozzi posti su torbiditi mioceniche; Serie 4 = campioni prelevati direttamente dalle acque del lago.

6.3 Diagrammi K vs Na e K vs Cl

Dal diagramma binario potassio vs sodio (Fig.15) si nota che i punti appartenenti alla terza serie sono raggruppati in una ristretta area del diagramma e sono caratterizzati da valori di sodio e potassio relativamente bassi. I campioni appartenenti alla serie 1 e alla serie 2 sono invece dispersi ed hanno un'ampia variabilità dei valori di concentrazione sia dello ione sodio sia dello ione potassio. Anche nel diagramma potassio vs cloro (Fig.16) si nota che i punti appartenenti alla terza serie si differenziano da tutti gli altri, disponendosi parallelamente all'asse delle ascisse (ad indicare un arricchimento relativo in potassio), mentre i campioni appartenenti alla prima e alla seconda serie appaiono molto dispersi.

6.4 Processi

In conclusione sulla base dei rapporti tra specie conservative è possibile distinguere tre diversi processi:

1. Dissoluzione incongruente dei silicati attraverso reazioni del tipo:

- a. $3\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + \text{Mg}^{+2} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Na}_{0.5}\text{Al}_{1.5}\text{Mg}_{0.5}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 2\text{Na}^+ + \text{SiO}_2$
- b. $2\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 2\text{Na}^+ + 4\text{SiO}_2$
- c. $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + \text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{SiO}_2$

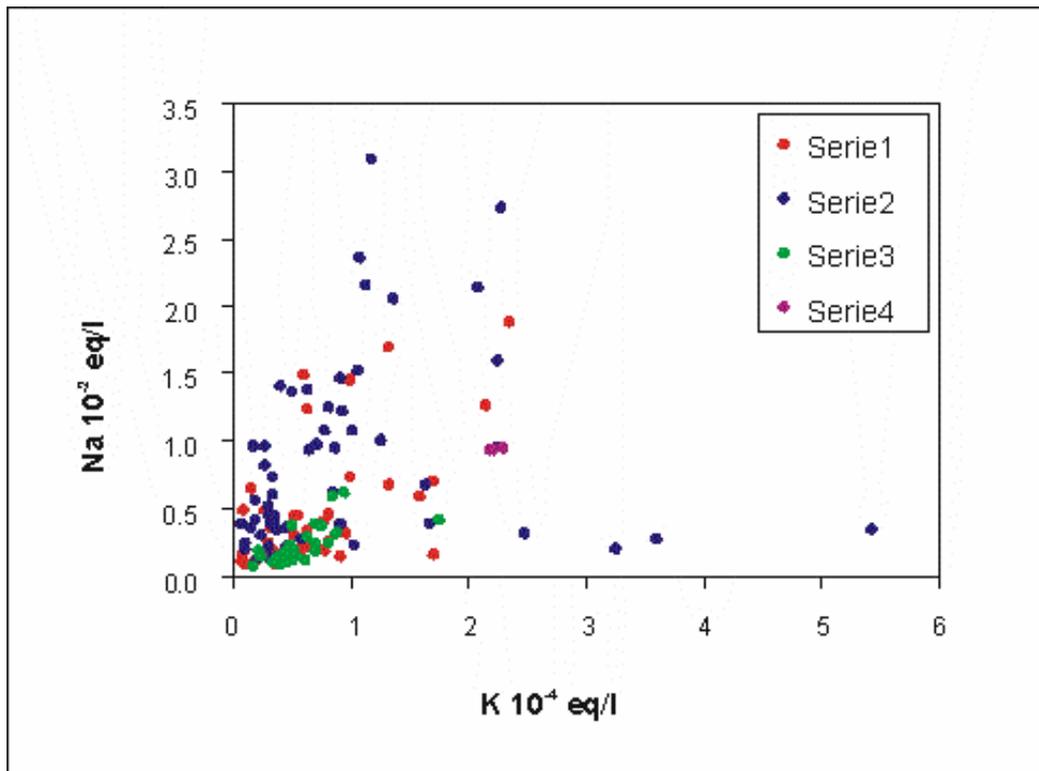


Fig.15 -Diagramma binario K vs Na. Legenda: Serie 1 = pozzi posti su depositi recenti e attuali; Serie 2 = pozzi posti su depositi villafranchiani; Serie 3 = pozzi posti su torbiditi mioceniche; Serie 4 = campioni prelevati direttamente dalle acque del lago.

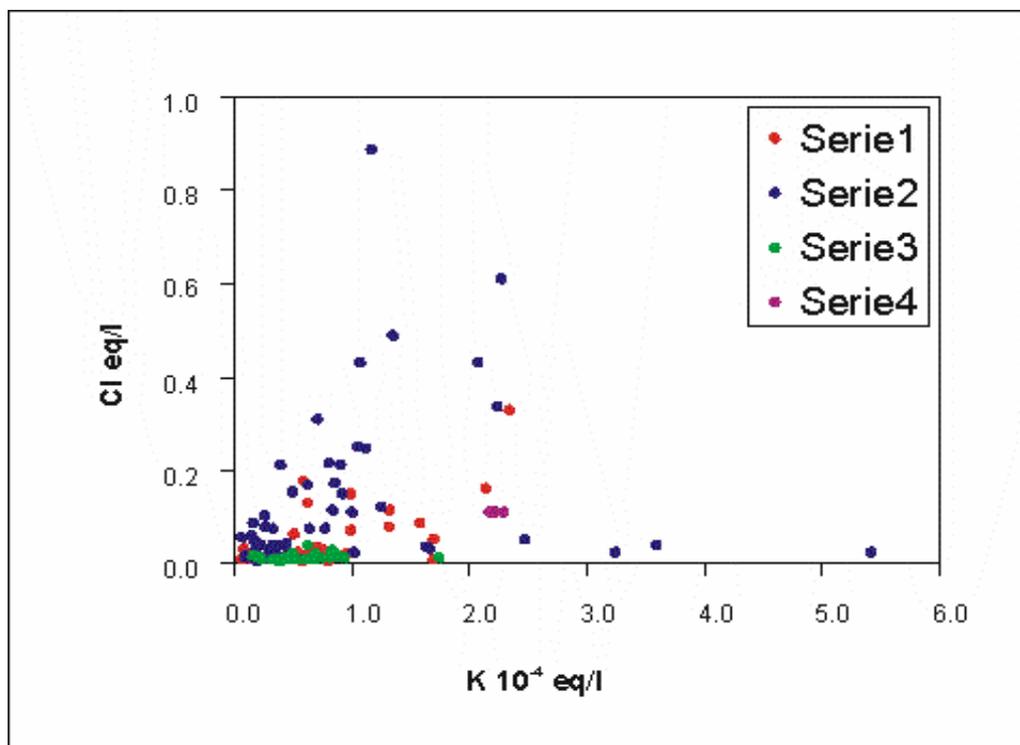


Fig.16 -Diagramma binario K vs Cl. Legenda: Serie 1 = pozzi posti su depositi recenti e attuali; Serie 2 = pozzi posti su depositi villafranchiani; Serie 3 = pozzi posti su torbiditi mioceniche; Serie 4 = campioni prelevati direttamente dalle acque del lago.

L'alterazione dei plagioclasti presenti nei sedimenti torbiditici produce un aumento della concentrazione dei metalli alcalini e della silice nella soluzione acquosa e la precipitazione di fasi solide come minerali argillosi (tipo montmorillonite o tipo caolinite) e idrossidi (gibbsite).

Quando l'albite si altera in montmorillonite la silice viene in gran parte, circa l'89%, conservata nelle fasi solide, mentre nel processo di alterazione in caolinite le fasi solide conservano il 33% della silice, quantità che diventa 0 nella gibbsite.

Pertanto la sequenza montmorillonite, caolinite, gibbsite corrisponde ad una interazione con le rocce progressivamente più spinta, che determina una rimozione crescente di cationi e di silice.

Considerazioni analoghe possono essere fatte anche a partire dal feldspato potassico. Tale processo riguarda principalmente le acque della terza serie caratterizzate da un rapporto $Na/Cl > 1$. In queste acque infatti, solo parte del sodio in soluzione può essere associato al cloro e l'alterazione chimica di feldspati, plagioclasti ed altri allumosilicati presenti nelle rocce costituenti l'acquifero, può costituire una importante sorgente di Na ed altri metalli alcalini.

2. Miscelazione delle acque più superficiali con acque profonde saline (forse con residui di acque fossili) e/o dissoluzione di NaCl presente nei sedimenti.

Questo processo riguarda tutte le acque caratterizzate da un rapporto Na/Cl circa pari a 1 e circolanti sia nei sedimenti Plio-Pleistocenici che negli acquiferi ospitati da terreni alluvionali quaternari.

3. Adsorbimento dello ione Na^+ da parte di minerali argillosi e adsorbenti organici, scambio cationico con minerali argillosi.

Questi processi potrebbero spiegare la diminuzione del rapporto Na/Cl nei campioni circolanti nei sedimenti del Plio-Pleistocene che presentano elevate concentrazioni di Na.

7. DISTRIBUZIONE GEOGRAFICA DELLE ANOMALIE DI NITRATI

La carta della distribuzione di nitrati è stata realizzata utilizzando l'algoritmo di calcolo *sgsim* descritto precedentemente. La carta, risultato di 100 simulazioni su una maglia quadrata con 100 m di lato, è riportata in Fig.17.

Dalla carta si osserva una ampia zona con valori dello ione nitrato superiori a 50 mg/l a Sud e ad Ovest di Castiglione del Lago. Un'altra zona di forte anomalia positiva in nitrati è individuabile a Nord-Ovest di Castiglione del Lago. In quest'ultima zona si rilevano i valori di NO_3^- più elevati, con massimi di concentrazione che raggiungono i 170 mg/l.

Si osservano inoltre due anomalie di modesta estensione nelle zone di San Savino e Monte del Lago. La restante parte del bacino è invece caratterizzata da concentrazioni di NO_3^- relativamente basse e comunque inferiori a 25 mg/l).

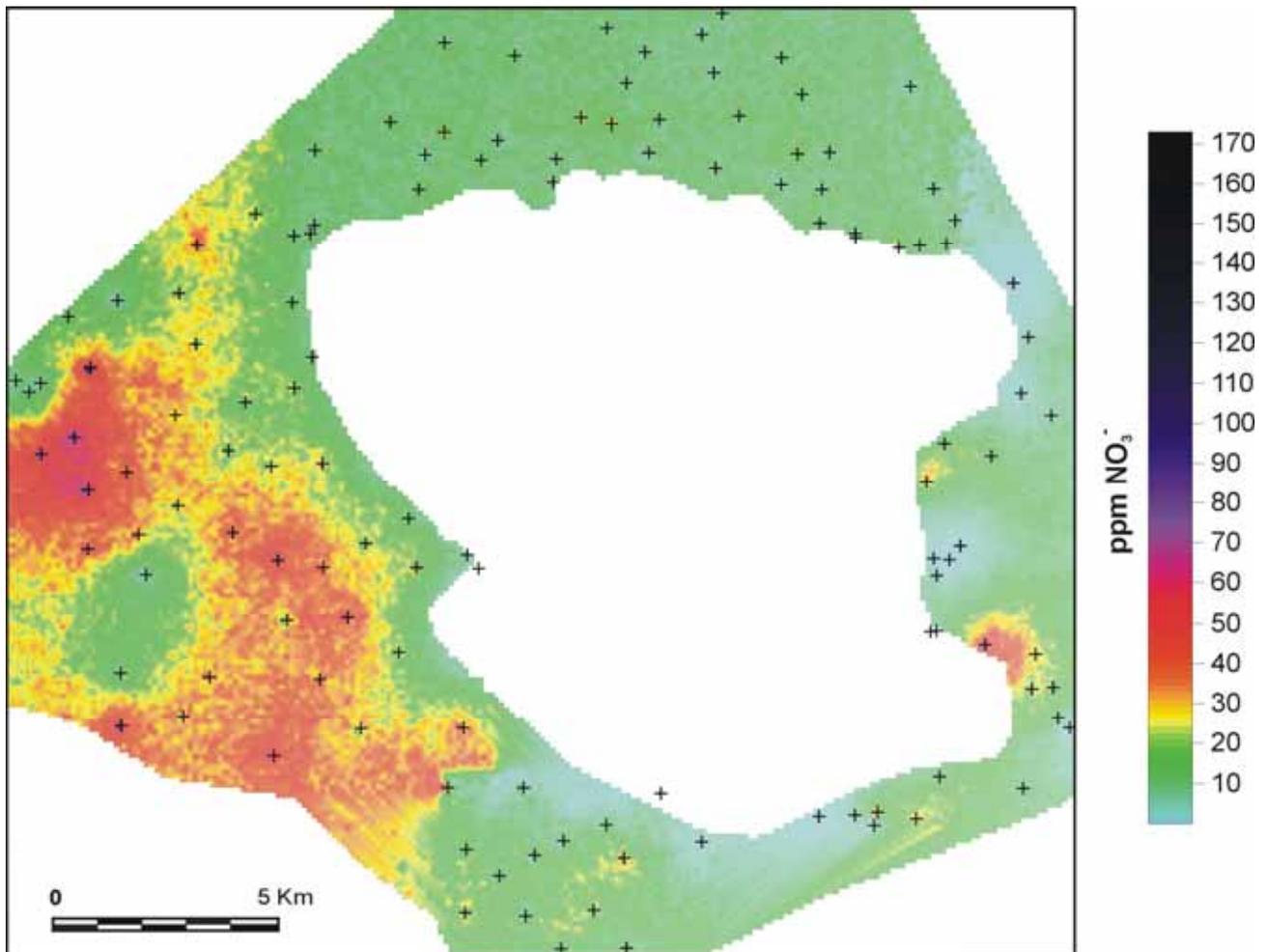


Fig.17 - Distribuzione areale nitrati.

8. DISTRIBUZIONE FOSFATI E FLUORURI

Vengono di seguito riportate le distribuzioni statistiche di base degli ioni fluoruro e fosfato:

FOSFATI				
Mean	SD	Maximum	Minimum	Size
0.28163	0.3249	1.0065	0.0036	9
FLUORURI				
Mean	SD	Maximum	Minimum	Size
0.51392	0.38	2.0399	0.0471	127

Per quanto riguarda lo ione PO_4^- , questo è presente in quantitativi misurabili solo in 9 campioni con concentrazioni comprese tra 0.2 e 1 mg/l. Lo ione F^- è invece rilevabile in tutti i 127 campioni e mostra (Fig.18) una distribuzione statistica bimodale. Si può individuare una prima famiglia con valori compresi tra 0 e 0.45 mg/l ed una seconda famiglia, con un minor numero di campioni, con valori di concentrazione compresi tra 0.45 e 2.04 mg/l. Appartengono alla prima famiglia tutti i campioni della terza serie (e parte dei campioni della seconda e prima serie); appartengono alla seconda famiglia solo campioni della prima e seconda serie.

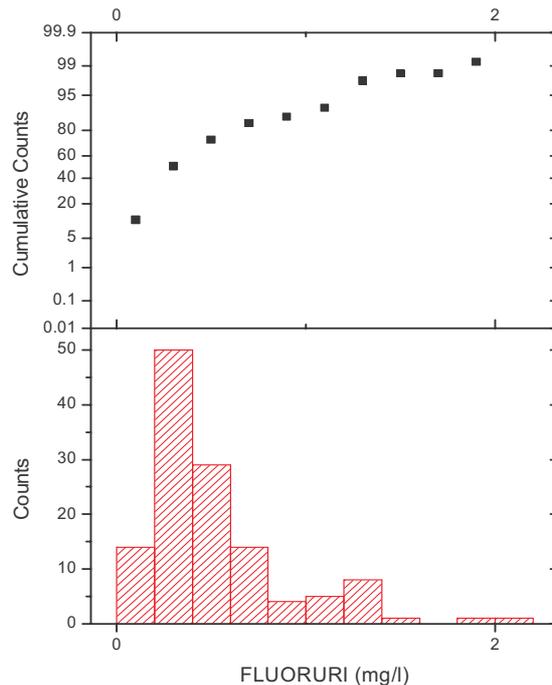


Fig.18 - Curva cumulativa e istogramma per lo ione F⁻.

9. CONCLUSIONI E CRITICITÀ INDIVIDUATE

I campioni relativi alle acque sotterranee nel bacino del Lago Trasimeno propongono una composizione variabile da bicarbonato alcalino-terrosa a clorurato-solfato alcalina (esistono anche termini tendenti verso una composizione bicarbonato alcalina o solfato alcalino-terrosa). I diagrammi classificativi evidenziano una nube continua di punti sulla quale risulta particolarmente difficoltoso operare nette distinzioni dei campioni in gruppi, sulla base dei semplici rapporti tra specie chimiche principali.

Se si considerano tuttavia anche le condizioni redox degli acquiferi, la distribuzione degli elementi mobili e dei metalli Fe e Mn, risulta comunque possibile distinguere quattro gruppi principali di campioni, corrispondenti ad altrettanti idrotipi:

- **GRUPPO 1** - comprendente gran parte dei campioni delle serie 1 (acquiferi alluvionali) con le seguenti caratteristiche:
 1. composizione variabile da bicarbonato alcalino-terrosa a clorurato-solfato alcalina;
 2. salinità media;
 3. condizioni redox riducenti-basiche o neutre.

- **GRUPPO 2** – le caratteristiche sono genericamente simili al gruppo precedente (al quale si sovrappone in parte sul diagramma L.L.) ma con caratteristiche che lo rendono distinguibile:
 4. salinità più elevate;
 5. condizioni più riducenti;
 6. maggior contenuto in Fe e Mn e uno leggero shift verso una composizione a NaCl (il gruppo è costituito in massima parte da campioni della serie 2).

Nonostante entrambi i gruppi 1 e 2 manifestino condizioni Eh-pH per le quali dovrebbe risultare predominante il complesso NH₄⁺ metastabile, i risultati analitici evidenziano che il campo di esistenza del nitrato metastabile si estende ben oltre quello calcolato per soluzioni in equilibrio con i gas atmosferici. Tale effetto, unicamente imputabile ad una velocità di ingresso di nitrati nel sistema sotterraneo superiore alla cinetica di denitrificazione, caratterizza larga parte dei Depositi fluvio-lacustri del Pleistocene, e individua due aree di anomalia principali a sud-ovest e nord-ovest di Castiglione del Lago.

- **GRUPPO 3** - costituito dai campioni della serie 3 (**acquiferi delle torbiditi Mioceniche**), con le seguenti caratteristiche:
 7. composizione bicarbonato alcalino-terrosa;
 8. salinità relativamente basse;
 9. rapporti Li/Na e Li/Cl più elevati rispetto ai gruppi precedenti;
 10. bassi tenori in Fe e Mn;
 11. bassi tenori in nitrati;
 12. rapporto Na/Cl circa 2:1.

Per tale gruppo, e in particolare per i livelli di circolazione più epidermici, si sottolinea un progressivo impoverimento delle risorse permanenti, evidenziato dal progressivo abbassamento dei livelli piezometrici (riferita dai proprietari dei pozzi) e dall'impossibilità di effettuare il campionamento delle sorgenti più in quota durante gran parte della stagione secca.

- **GRUPPO 4** - costituito da un solo campione (n.237), probabilmente rappresentativo delle condizioni di circolazione più profonda nelle torbiditi Mioceniche. Le caratteristiche chimiche del campione sono le seguenti:
 13. composizione bicarbonato-clorurato alcalino-terroso alcalina (il campione cade praticamente al centro del diagramma L.L.);
 14. salinità medio-elevate;
 15. condizioni marcatamente riducenti che consentono la comparsa delle forme ridotte;
 16. valori elevati di Mn, Fe e Li;
 17. esiste probabilmente un trend evolutivo tra le acque del gruppo 3 e del gruppo 4, anche se sarebbe necessario campionare un maggior numero di pozzi profondi nelle arenarie per poterlo definire compiutamente. I livelli di circolazione profondi nelle torbiditi si caratterizzano per uno scarso tasso di rinnovamento che determina caratteristiche qualitative naturalmente scadenti.

10. BIBLIOGRAFIA

Deutsch C. V. & Journel A.G., 1988. "GSLIB: Geostatistical Software Library and Users Guide", 369 pp., Oxford Univ. Press, New York.

Dragoni W., 1982. "Idrogeologia del Lago Trasimeno: sintesi, problemi aggiornamenti". Geogr.Fis.Dinam.Quat., 5 (1982).

Ottonello G., 1991. "Principi di Geochimica". Zanichelli Ed., 708 p..

Rautmann C.A. & Istok J.D., 1996. "Probabilistic assessment of groundwater contamination: 1. Geostatistical framework". Ground Water, 34, 899 -909.

Stumm W. & Morgan J.J., 1981. "Aquatic Chemistry: an introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters". New York: Wiley Interscience, 1970. 583 p.. [Harvard University, Cambridge, MA and California Institute of Technology, Pasadena CA.]