

Ricostruzione della dinamica idrogeologica dell'antica cassa di colmata Tanali (ANPIL Tanali, Comune di Bientina)

Michele Ambrosio¹, Maria-Teresa Fagioli*¹, Chiara Curcio¹, Roberta Chierici², Matteo Lupi³

Parole chiave: idrogeologia, aree umide, statistica

L'oasi del Tanali è quanto rimane di una cassa di colmata abbandonata e completamente rinaturalizzata, con aspetti floro-faunistici molto prossimi a quelli originali dell'ambiente umido perilacustre dell'antico lago di Bientina, sede di endemismi faunistici.

Negli ultimi due decenni è stata notata una marcata riduzione sia della superficie che dei tempi di permanenza dei corpi idrici superficiali che ne caratterizzavano le zone umide nei periodi piovosi.

Per quantificare il fenomeno, che minaccia la conservazione della biodiversità del biotopo, e progettare adeguate contromisure è stata avviata un'indagine dettagliata dell'idrogeologia dell'area in relazione al suo interno ed alle precipitazioni meteorologiche.

La ricostruzione della dinamica idrogeologica dell'oasi è stata ottenuta attraverso lo studio stratigrafico di dettaglio su una rete di sondaggi superficiali, appositamente realizzati, e l'analisi dei rapporti fra la variazione dei livelli della falda superficiale, in continuità con i corpi idrici liberi, e gli apporti meteorici.

L'analisi comparata di freatimetrie mensili e piovosità giornaliere ha identificato differenti zone i cui livelli freatici si correlano con le precipitazioni con ritardi compresi fra i tre ed i quattro mesi.

La zonazione idrogeologica concorda con l'eterogeneità areale dei terreni, già riscontrata dalle stratigrafie, e indica negli apporti sotterranei provenienti dal prospiciente fianco del Monte Pisano la principale fonte di ricarica idrogeologica.

Gli apporti superficiali che storicamente alimentavano la cassa di colmata risultano ad oggi avere effetti moderati ed effimeri.

Lo sviluppo successivo del lavoro con la quantificazione dei fenomeni osservati, attraverso modellazione numerica, consentirà il collaudo comparativo virtuale delle contromisure possibili per mitigare la crisi idrica dell'Oasi.

Introduzione

La tutela della biodiversità di aree di riconosciuto interesse naturalistico ha come presupposto imprescindibile, comprendere il mantenimento delle condizioni fisiche peculiari di ciascun habitat. Per le aree umide la stessa persistenza di superfici di acqua libera (chiari) può essere minacciata da un'ampia varietà di cause, sia naturali che di origine antropica.

L'ANPIL di Tanali è un'area le cui caratteristiche idrogeologiche derivano da azioni antropiche inizialmente mirate alla sua trasformazione da area umida ad area stabilmente emersa, da dedicarsi alle coltivazioni.

Il parziale fallimento del tentativo, ed il conseguente abbandono pluridecennale, hanno consentito una rinaturalizzazione che ha riprodotto un ambiente molto prossimo a quello dell'originaria fascia perilacustre.

Nell'ultimo decennio è stata osservata una progressiva riduzione dei tempi di permanenza e delle dimensioni dei chiari, con conseguente minaccia per la sopravvivenza di flora e fauna che li abitano.

Per studiare specifiche contromisure al fenomeno osservato, nell'ambito di una collaborazione fra AFgtc e Lega Ambiente Valdera (gestore dell'Oasi), è stato organizzato ed eseguito uno studio idrogeologico di dettaglio esteso nell'arco di un anno idrologico.

Risultati e valutazioni, hanno consentito di produrre un modello concettuale della circolazione idrica sotterranea e superficiale dell'area, che costituirà la base per una modellazione numerica quantitativa, indispensabile per progettare e quantificare le contromisure collaudandole preventivamente in modo «virtuale».

Inquadramento idrogeologico dell'area e cenni paleogeografici

La pianura Bientinese (figura 1) può considerarsi, in prima approssimazione, fin da epoca Pleistocenica, come l'ultimo tratto della valle del fiume Serchio, quando questo (fino ad epoca medievale) confluiva, almeno parzialmente ed occasionalmente, in Arno.

Come la maggior parte della pianura di Pisa, l'area è stata interessata dalle trasgressioni marine, che l'hanno a tratti trasformata in un vasto golfo di mare sottile (Sinus Pisanus) che ha occupato a più riprese, sin dal Pliocene Superiore, l'intera pianura pisana fin oltre l'attuale abitato di Pontedera.

Dal termine dell'ultima glaciazione, circa 14000 anni fa, fino all'età etrusca, il fiume Auser (il Serchio degli etruschi e dei romani), che non tagliava ancora verso il mare attraverso la soglia di Ripafratta, correva lungo la piana ad est del Monte Pisano, ma la sua confluenza in Arno veniva progressivamente ostacolata dal sovralluvionamento generato dall'Arno stesso. L'Arno, infatti, correva pensile, sbarrando sia il proprio affluente Auser, che tendeva quindi a tracimare da Ripafratta, sia l'ultimo tratto, pianeggiante, della sua valle, che si impaludava e rimaneva sommerso sempre più a lungo.

Il Lago di Bientina si è quindi originato come lago di sbarramento da sovralluvionamento, ad opera dell'Arno, occupando dall'epoca etrusca fino al diciottesimo secolo l'area morfologicamente depressa tra i rilievi del Monte Pisano ad ovest e delle Cerbaie ad est. Probabilmente sin da epoca romana, e sicuramente da epoca tardo medievale, vari raggruppamenti di

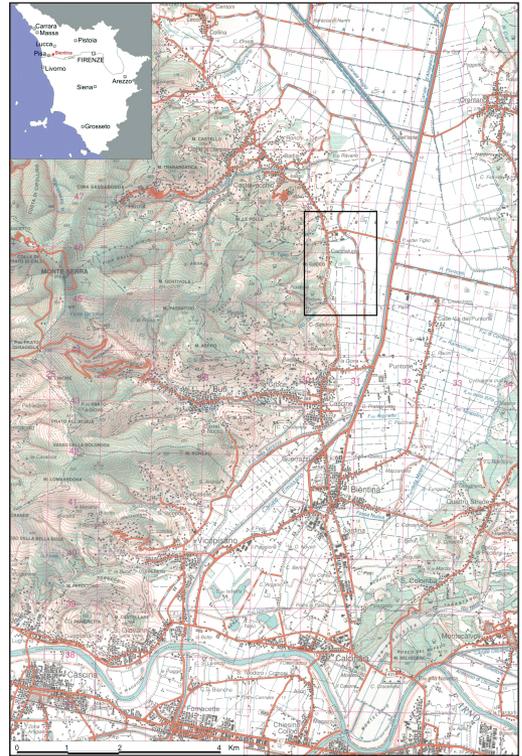


Figura 1: Ubicazione dell'area di studio.

umani hanno tentato, di volta in volta, di alzare o abbassare artificialmente il livello del lago, sia per fini agronomici che di navigabilità, che politici e militari (l'area era al punto triplo di confine tra territorio pisano, lucchese e fiorentino, e più volte lo stratega di turno ha cercato di usare il lago per affogare «il nemico» fosse esso assediato o assediante).

gli autori

¹ AF Geoscience and Technology Consulting s.r.l. Campo (PI) afconsulting@afgtc.com

² Libera professionista Volterra (PI) robertach@interfree.it

³ Borsista Heriot-Watt University (Edinburgh) matteo.lupi@email.it

* autore per corrispondenza

Alla metà del diciannovesimo secolo, immediatamente prima dell'unità d'Italia, con un grandioso e, per l'epoca, audacissimo progetto, il Granducato di Toscana faceva aprire un sottopasso idraulico (detto «La Botte») al di sotto del letto dell'Arno per consentire lo svuotamento del lago verso i bassopiani e le paludi di Coltano e di Calambrone che all'epoca circondavano a nord e ad est la città di Livorno.

L'opera, tuttora efficiente ed in esercizio, non ha però mai garantito il costante mantenimento all'asciutto dell'intera area dell'ex bacino lacustre, e solo negli ultimi sessanta o settant'anni, con l'impiego di impianti idrovori, il prosciugamento è stato completato, ferma restando la frequente sommersione invernale delle parti morfologicamente più depresse della conca dell'ex lago.

L'oasi di Tanali (cassa di colmata e problematiche)

L'attuale oasi naturalistica «Bosco di Tanali» (figura 2) è ubicata ai piedi del fianco orientale dei Monti Pisani al margine dell'antico lago di Bientina; essa comprende una cassa di colmata realizzata agli inizi del XX secolo con il doppio scopo di laminare i picchi di piena del rio Tanali e del rio della Valle degli Alberi (corsi d'acqua a regime torrentizio che drenano il fianco orientale del Monte Pisano) consentendone il deflusso regimato attraverso il canale Emissario e

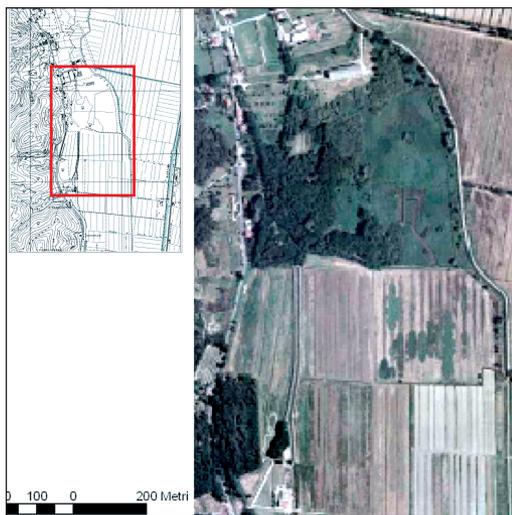


Figura 2: Ubicazione dell'Oasi di Tanali.

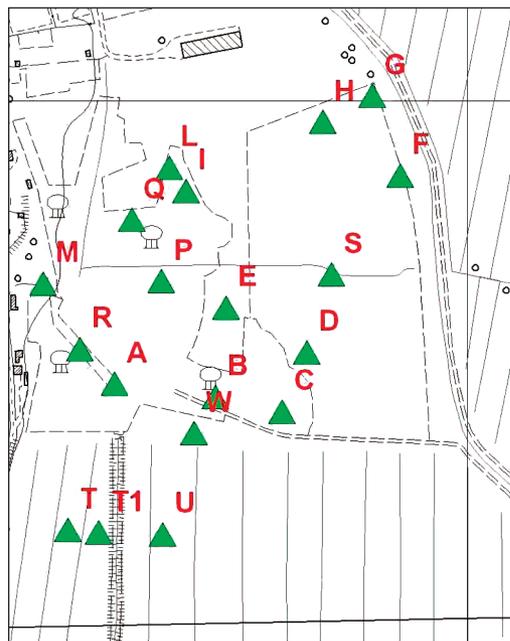


Figura 3: Ubicazione dei sondaggi stratigrafici e piezometri.

catturare i sedimenti, da detti torrenti trasportati, utilizzandoli per innalzare il livello del terreno e prevenirne la periodica sommersione in previsione della sua messa a coltura.

Il primo obiettivo è stato pienamente raggiunto, mentre il secondo, stante la modesta quantità del trasporto solido dei due rii affluenti è fallito poiché i tempi di ultimazione del colmamento sono risultati troppo lunghi per mantenere un significato economico.

Neppure i tentativi di frazionare il colmamento, di cui restano le vestigia degli arginelli interni alla cassa, hanno avuto successo.

Una concausa del fallimento della bonifica può essere individuata nella subsidenza generalizzata che ha interessato l'intera conca lacustre prosciugata a causa delle riduzioni delle pressioni neutre all'interno dei sedimenti lacustri ed alla loro conseguente compattazione per i fenomeni di sovraconsolidamento conseguenti l'emersione. Evidenza del fenomeno è emersa anche dallo studio delle sezioni stratigrafiche che mostrano un abbassamento di circa 1m delle porzioni di sedimenti di colmata che poggiano sul lacustre rispetto a quelle con al letto i depositi grossolani di conoide.

Metodi sperimentali

L'area della cassa di colmata del Tanali, benché già oggetto di studi di tipo naturalistico su flora e fauna, non risultava essere mai stata indagata, specificamente, dal punto di vista idrogeologico.

La mancanza di dati bibliografici, ha imposto un'indagine di campagna, mirata anche alla ricostruzione stratigrafica di base, almeno dei depositi più superficiali che ospitano la falda i cui affioramenti costituiscono le aree umide d'interesse.

Di seguito sono riportate le fasi del lavoro di terreno:

- Rilievo planimetrico GPS degli elementi morfologici minori non presenti nella cartografia esistente (fossi, arginelli interni alla cassa).
- Esecuzione di n. 18 sondaggi superficiali (eseguiti con campionatore per suoli di tipo Edelman e carotatore continuo inguainante AF) con profondità da 2 a 9 m, ciascuno attrezzato con piezometri a tubo aperto. Lettura diretta sul campo dei campioni ed interpretazione stratigrafica. L'ubicazione dei sondaggi stratigrafici (figura 3)

è stata fortemente controllata dalle necessità logistiche di raggiungibilità e di minimizzazione dell'impatto sull'assetto vegetazionale esistente; queste esigenze hanno limitato la possibilità di distribuire a maglia regolare i punti di campionamento e misura ma tale disomogeneità non è stata ritenuta critica viste le ridotte dimensioni dell'area ed il relativamente alto numero di sondaggi.

- Rilievo altimetrico delle teste dei piezometri mediante livellazione tecnica dal mezzo.

- Campagne freatiche, con cadenza mensile, sui piezometri (misurazioni da giugno 2006 a maggio 2007).

I dati ottenuti in campagna sono stati sistematizzati su GIS. La successiva elaborazione ha comportato l'interpretazione e la correlazione delle stratigrafie, la costruzione delle carte isofreatiche mensili (integrate con il metodo Natural neighbor), lo studio statistico delle relazioni fra le serie temporali freatiche di ciascun piezometro e le pluviometrie giornaliere delle due stazioni meteorologiche più prossime di San Giovanni alla Vena e Monte Serra.

Stratigrafia

La porzione direttamente indagata di sottosuolo della colmata di Tanali risulta a microscaletta piuttosto complessa, mentre a mesoscaletta può essere ragionevolmente sintetizzata in 4 orizzonti; essi vengono descritti di seguito dal più superficiale al più profondo. La figura 4 riporta alcune stratigrafie significative eseguite nell'area di studio.

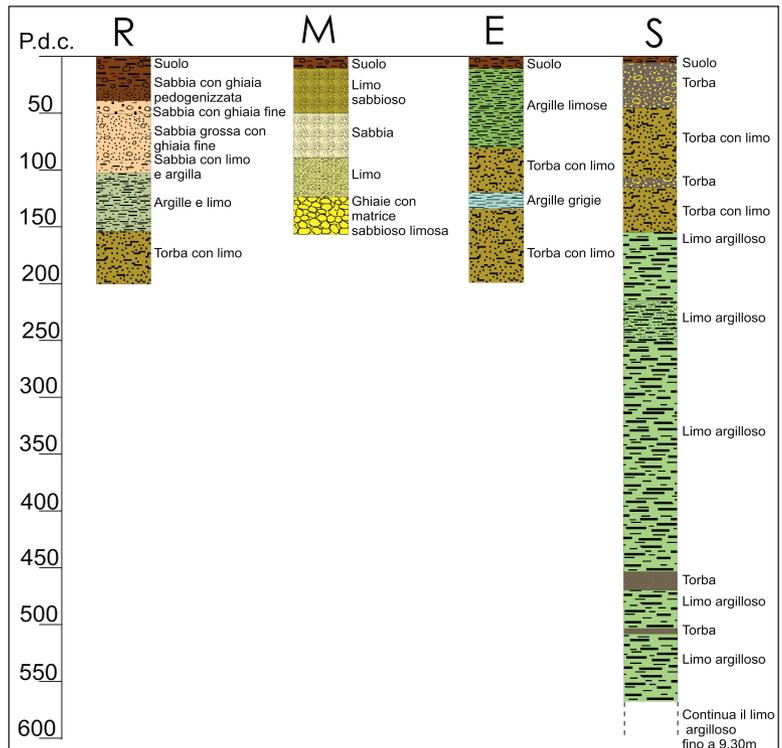


Figura 4: Sezioni stratigrafiche: Sez. R ed M rappresentative del pedemonte, Sez. E ed S rappresentative dell'area centrale della colmata.

- **Orizzonte superficiale ricco di materia organica:**

Orizzonte ad elevatissima componente organica e subordinata componente minerale a granulometria limosa. Questo orizzonte, fortemente pedogenizzato in superficie, risulta arealmente molto variabile sia in spessore (da 30 cm fino ad 1 m) che nella percentuale di componente organica. La conducibilità idraulica varia da media ad elevata in funzione della pressoché totale assenza di compattazione della sua componente organica costituita quasi esclusivamente da resti di vegetazione erbacea palustre. Si tratta di un deposito recentissimo, sin ma soprattutto post colmamento, in cui gli apporti di sedimento risultano estremamente subordinati rispetto all'accumulo di materia vegetale autoctona.

- **Orizzonte di colmata:**

Orizzonte a totale composizione minerale, con granulometria prevalentemente limo argillosa ma con locale occorrenza di livelletti ghiaiosi o sabbiosi subcentimetrici, più frequenti in prossimità del pedemonte. Gli spessori sono molto variabili da 0.2 m ad 1 m, fino a 0 in alcuni sondaggi. Si tratta di un deposito di colmata i cui spessori sono stati controllati dalle quote topografiche della superficie preesistente e le granulometrie dalla maggiore o minore prossimità con il punto d'immissione delle onde di piena.

La conducibilità idraulica è molto bassa ma risulta fortemente anisotropa, con valori pressoché nulli in verticale e medi in orizzontale.

- **Orizzonti di limi e torbe:**

Orizzonte potente, con spessore variabile dai 2 ai 7 m, costituito mediamente dal 70% di sedimento limo-

so e per il restante 30% da frammenti di vegetazione prevalentemente erbacea palustre ma occasionalmente anche arborea, dispersi nella matrice limosa. L'orizzonte risulta sempre molle e poco consolidato. Si riconoscono almeno due livelli totalmente torbosi, probabilmente rappresentanti episodi di prolungata emersione, in una sequenza prevalentemente palustre. Non sono rari livelletti sabbiosi, di sabbia sciolta, di potenza subdecimetrica; unici livelli a permeabilità medio-alta all'interno di un orizzonte nell'insieme ben poco permeabile.

Ancora una volta la conducibilità idraulica è fortemente anisotropa, molto bassa in verticale, media in orizzontale.

Questo orizzonte, in prossimità del pedemonte, risulta eteropico e spesso intercalato con livelli di ghiaia e sabbia a matrice limosa privi di componente organica, con ogni probabilità derivanti da una maggior prossimità delle zone di provenienza del trasporto solido. L'intero orizzonte è ascrivibile ad un ciclo di sedimentazione, a carattere prevalentemente palustre precedente il colmamento.

- **Orizzonte di argilla limosa lacustre:**

Si ritrova solo in alcuni sondaggi a profondità superiori ai 2 m. È costituito in prevalenza da argille grigie, molli, microstratificate, con frequenti intercalazioni di limo e rare di torba. La permeabilità del deposito è molto bassa. Questo orizzonte è stato considerato, nel presente studio, come il basamento impermeabile della sequenza studiata, anche se a rigore, non si può escludere, nei tempi lunghi, una sua moderata capacità di scambio idrico.

Dall'esame delle correlazioni stratigrafiche (figura

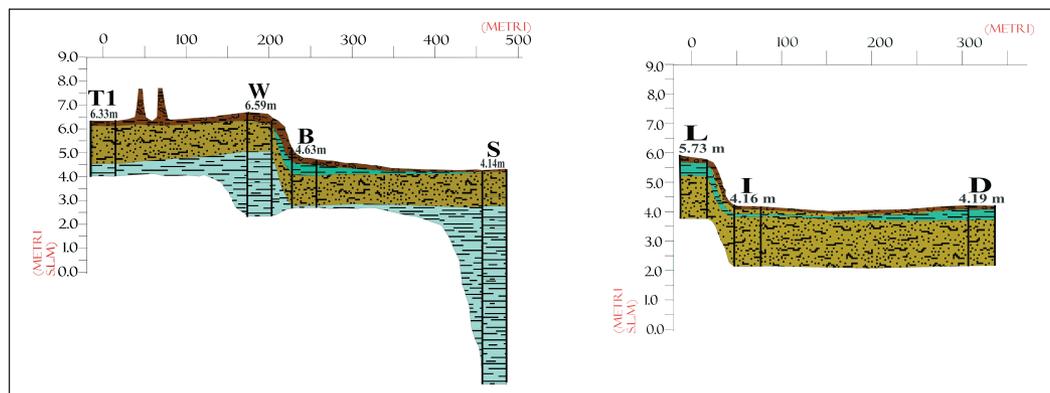


Figura 5: Sezioni stratigrafiche correlate.

5) si sono potuti osservare i rapporti stratigrafici fra interno ed esterno della cassa di colmata e fra lato pedemonte e zona più prossima alla conca lacustre. Le sezioni della figura 5 (realizzate con scala delle altezze esagerata 30:1 rispetto all'orizzontale) mostrano un relativamente brusco approfondimento dell'orizzonte di colmata. È ragionevole supporre che tale orizzonte si sia sedimentato in piano o su una superficie a debolissima pendenza. La relativamente brusca variazione di quota (circa 1m) può essere, in prima approssimazione, attribuita a compattazione differenziale dei sottostanti limi torbosi; compattazione differenziale indotta dalla progressiva riduzione delle pressioni neutre e dalla compattazione del sottostante orizzonte di torbe e limi, conseguenza di lungo termine del prosciugamento del lago e del crescente carico litostatico dei materiali di colmamento.

Freatimetrie

Le misure freatimetriche mensili sono riportate in tabella 3 mentre la figura 6 riporta una selezione delle carte freatimetriche più significative dell'andamento della falda superficiale.

Il deflusso sotterraneo risulta seguire, in linea di massima, un andamento da est ad ovest in accordo con i gradienti topografici dell'area e con la presenza, ad est del rilievo del Monte Serra (zona di ricarica) ed ad ovest del canale Emissario che agisce da drenaggio.

L'escursione totale della falda, nel corso dell'anno idrologico, risulta di poco superiore ad 1.6 m. In dettaglio si può notare il periodico formarsi (giugno 2006, febbraio 2007, maggio 2007) di un innalzamento dei livelli piezometrici nella zona centrale della

Tabella 1: Misure freatimetriche mensili.

Piezometro	Coordinate Gauss-Boaga	Quota piezometro (mm s.l.m.)	FREATIMETRIE (mm s.l.m.)										
			Giugno -06	Luglio -06	Agosto -06	Settembre -06	Ottobre -06	Dicembre -06	Gennaio -07	Febbraio -07	Marzo -07	Aprile -07	Maggio -07
A	1630524.03; 4845617.63	4162	4692	2882	2712	2482	2273	2822	3112	3812	3772	3552	3422
B	1630660.61; 4845600.40	4634	3854	3594	3304	3254	3274	4834	4264	4634	4394	4134	4114
C	1630750.68; 4845580.27	4270	3820	3520	3380	3510	3520	4570	4270	4540	4270	4150	4220
D	1630784.14; 4845660.76	4191	3671	3301	3111	3171	3231	4691	4111	4521	4191	4191	4191
F	1630909.86; 4845899.53	3660	3220	2780	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G	1630871.80; 4846007.16	3670	3230	2870	-	2450	2547	3920	3670	3970	3670	3500	3530
H	1630804.94; 4845971.89	3644	3324	2854	2594	2554	2614	3894	3694	3844	3644	3544	3524
I	1630620.44; 4845878.73	4168	3638	3398	3228	3318	3298	4148	3838	4138	3898	3798	3778
L	1630597.83; 4845910.39	5731	5331	4931	4661	4751	4731	5491	5561	5691	5651	5481	5491
M	1630427.16; 4845753.35	9907	8347	8347	8347	-	-	-	-	-	-	-	-
P	1630587.30; 4845756.41	5339	4229	4149	3969	3889	3839	4909	4989	5339	5489	4809	5289
Q	1630547.19; 4845839.76	6157	5407	5107	4727	4507	4517	5507	5567	5737	5627	-	-
R	1630477.21; 4845665.25	8262	6782	6432	6442	6382	6262	7022	7082	7722	7622	7342	7262
S	1630816.90; 4845765.65	4141	3791	3551	3331	3311	3351	4641	4141	4471	4141	4161	4141
T	1630460.70; 4845420.41	6330	-	-	4720	4870	-	-	-	-	-	-	-
U	1630589.07; 4845414.62	6599	-	-	5049	-	-	-	-	-	-	-	-
E	1630674.69; 4845721.15	4191	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T1	1630502.61; 4845416.10	6330	-	-	-	-	-	-	5740	5790	5680	-	-
W	1630630.36; 4845550.67	6599	-	-	-	-	-	-	-	6289	5809	5669	5789

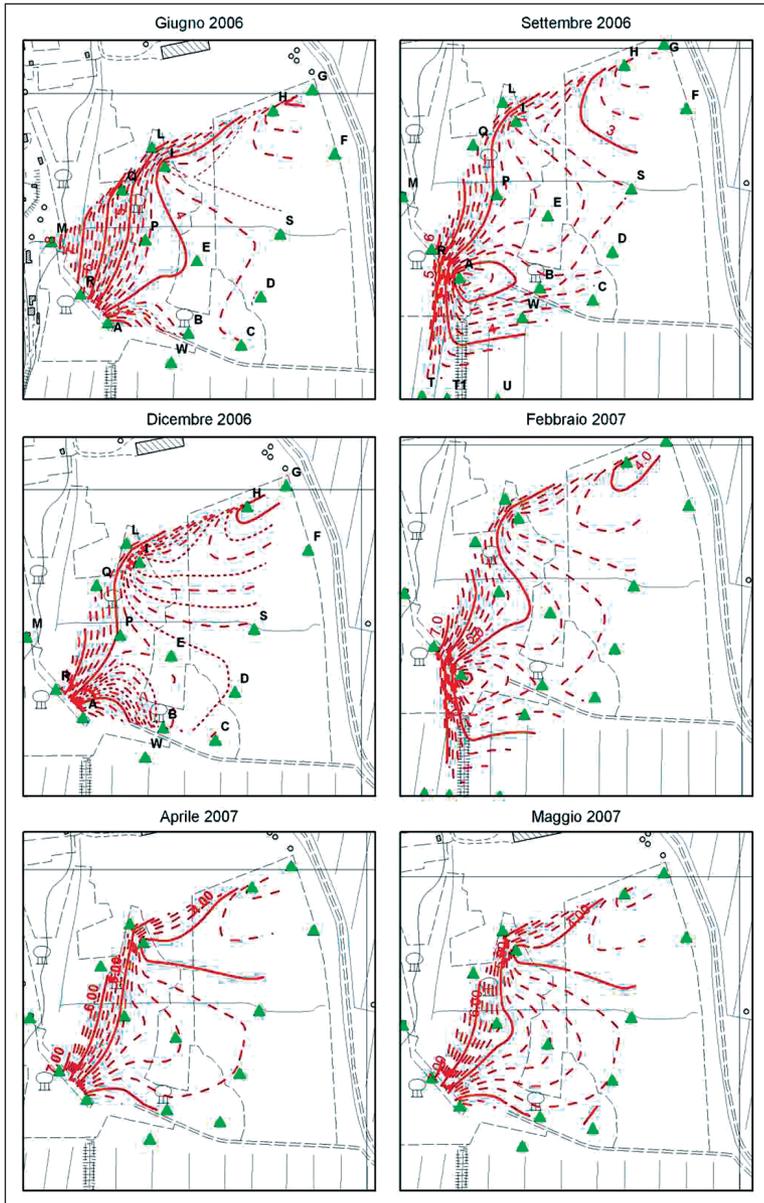


Figura 6: Carte delle freatimetrie.

cassa di colmata, mentre pressoché sistematicamente i suoi fianchi nord e sud (nord in particolare) non mostrano variazioni di rilievo. Nelle carte piezometriche di Fig 6 ciò è evidenziato dal periodico avvanza-

re e ritrarsi di una protuberanza delle curve isofreatiche; tale avanzamento risulta marcatamente diacrono rispetto ai periodi di massima precipitazione (figura 7) e non può quindi essere direttamente riferito all'afflusso superficiale dei rii Valle degli Alberi e Tanali.

Dall'andamento regolare dei livelli freatici nei piezometri si differenzia nettamente il piezometro A.

Questo comportamento può essere spiegato con la sua posizione in un punto idraulicamente complesso; esso infatti è molto prossimo all'ingresso del tratto artificiale del rio Tanali nella cassa di colmata. L'ingresso è marcato dalla presenza di un ponte in muratura le cui fondazioni agiscono di fatto da sfioratore e, subito prima del ponte, l'alveo artificiale del Tanali è sottopassato da una chiavica che collega direttamente il microbacino in sinistra del rio con il drenaggio esterno alla cassa che raggiunge direttamente il canale Emissario. L'andamento freaticometrico del piezometro A (intorno alla cassa) suggerisce una marcata influenza locale di detto nodo idraulico; influenza che esula dal suo funzionamento di progetto disturbando al contempo il normale andamento della falda all'interno dell'Oasi.

Relazione falda piovosità

In prima approssimazione, i fattori principali che controllano l'andamento della falda superficiale nell'Oasi sono: gli apporti diretti sia per precipitazioni meteoriche sulla zona che per gli afflussi dei due rii che vi sfociano, la ricarica laterale sotterranea e l'andamento generale della falda dell'intero alveo dell'ex lago di Bientina.

Per una prima valutazione degli effetti di ricarica diretta e ricarica sotterranea si è proceduto ad un'analisi statistica delle relazioni fra freatimetria e piovosità derivanti dalle due stazioni pluviografiche più prossime (Monte Serra e San Giovanni alla Vena).

L'analisi degli effetti del terzo componente (strettamente correlato al deflusso) sarà possibile solo dallo studio dei risultati della modellazione numerica attualmente in corso. Al momento si considereranno quindi, solo gli effetti della ricarica.

Gli effetti della ricarica diretta e sotterranea sono stati indagati calcolando la correlazione delle serie cronologiche freatimetriche di ciascun piezometro con l'andamento delle precipitazioni medie giornaliere (Stazioni Monte Serra e San Giovanni alla Vena) per intervalli di tempo crescenti precedenti ciascuna misura (giorni 5, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165, 180).

La figura 8 mostra per le stazioni Monte Serra e San Giovanni alla Vena i diagrammi dei coefficienti di correlazione contro l'ampiezza dell'intervallo di tem-

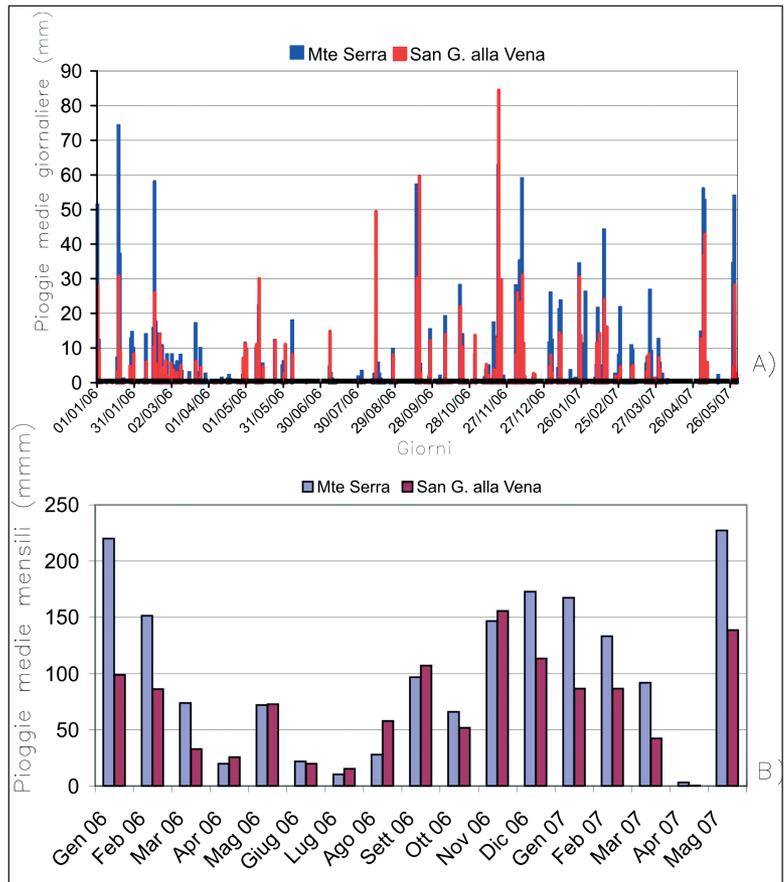


Figura 7: Istogramma piogge medie A) giornaliere e B) mensili per le stazioni di Monte Serra e San Giovanni alla Vena.

po su cui sono state mediate le precipitazioni medie pregresse.

Dall'analisi multivariata delle correlazioni esistenti fra piezometrie, piovosità del Monte Serra e piovosità di San Giovanni alla Vena è risultato che la serie temporale meglio correlata con le piezometrie è quella del Monte Serra per cui di seguito si descriverà in dettaglio solo quest'ultima.

I periodi di significativa correlazione fra serie temporali freatimetriche e pluviometrie medie pregresse sono risultati 105 e 135 giorni; a 5 giorni si riscontra un picco secondario, non uniforme per tutti i piezometri e chiaramente riconducibile agli apporti diretti. I picchi significativi a 105 e 135 giorni permettono di distinguere due famiglie di piezometri che peraltro

riflettono una zonazione areale di punti di misura (figura 9); con comportamento intermedio fra i due gruppi si osserva solo il piezometro G, all'estremo nord-est dell'area, con picco a 120 giorni.

La correlazione ottimale per i piezometri più prossimi al monte (R, P, Q, L) si ha con le precipitazioni medie giornaliere pregresse di 135 giorni mentre per i piezometri (B, C, D, S H, I) ubicati sul lato della cassa verso la conca lacustre, si hanno per precipitazioni medie giornaliere pregresse di 105 giorni.

Questo comportamento può essere spiegato con un'influenza prevalente di ricarica laterale (tempi maggiori) proveniente dal Monte Serra per il gruppo di piezometri del pedemonte e con una ricarica sempre prevalentemente laterale ma con significativa componente legata ad apporti superficiali ed infiltrazione diretta per i piezometri ubicati verso il bacino lacustre.

Viste le ottime correlazioni rilevate si è ritenuto opportuno per il piezometro più significativo di ogni gruppo (piezometro C per il gruppo verso la conca

lacustre e piezometro R per il gruppo al pedemonte) calcolare le rette di regressione lineare delle precipitazioni medie pregresse (ai rispettivi tempi significativi) contro la serie temporale piezometrica.

Le equazioni delle rette di regressione, rappresentate in figura 10 ed i rispettivi parametri statistici sono:

$$\text{Seriemp.C} = 3222.09 + 252.956 \cdot \text{MS105}$$

Coefficiente di Correlazione = 0.960455

$R^2 = 92.2473 \%$

Errore Standard della Stima. = 129.475

Errore assoluto medio = 99.3847

P Durbin-Watson = 2.21163 (P=0.5183) No autocorrelazione

$$\text{Seriemp.R} = 5911.05 + 337.12 \cdot \text{MS135}$$

Coefficiente di Correlazione = 0.960173

$R^2 = 92.1933 \%$

Errore Standard della Stima. = 152.209

Mean absolute error = 108.875

Errore assoluto medio = 1.74059 (P=0.2137) No autocorrelazione

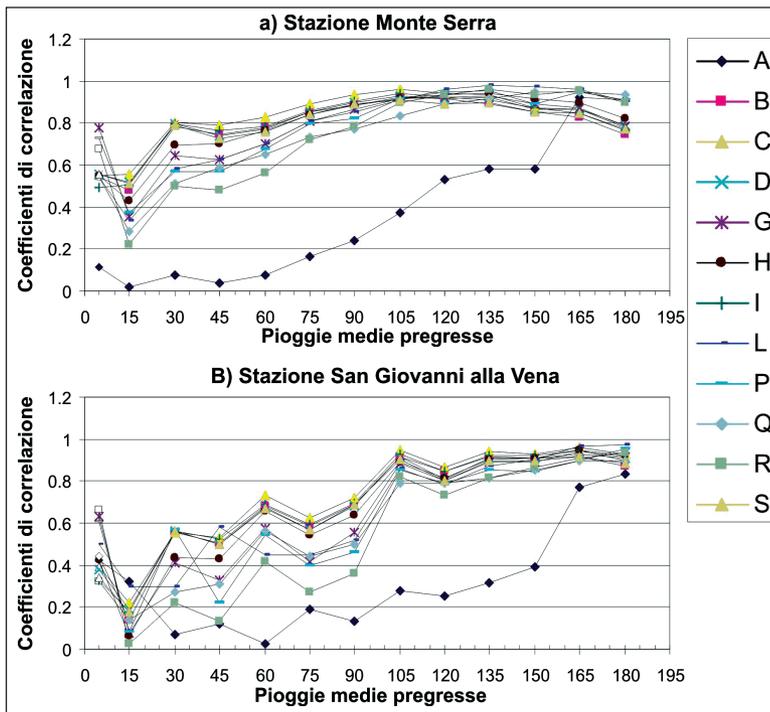


Figura 8: Diagrammi dei coefficienti di correlazione freatimetria contro l'intervallo temporale di precipitazione media pregressa per le stazioni di a) Monte Serra e b) San Giovanni alla Vena.

I dati statistici per le due regressioni indicano che c'è una significativa correlazione fra serietemp.C ed MS105 e fra serietemp.R ed MS135 al 95.0% di confidenza.

I valori di R^2 sempre maggiori del 92% indicano un buon fitting mentre il coefficiente di correlazione > di 0.96% indica forte relazione fra le variabili.

Le equazioni sono quindi direttamente impiegabili per prevedere, sulla base delle piogge pregresse, i livelli piezometrici attesi per aree significative all'interno dell'Oasi.

Nella successiva fase di modellazione questo risultato intermedio potrà venir tradotto in simulazioni previsionali dell'anda-

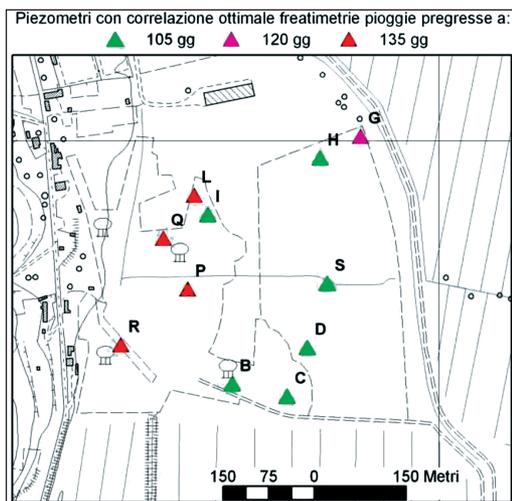


Figura 9: Raggruppamento areale di piezometri a comportamento simile. In rosso freatimetrie a correlazione ottimale a 105 gg, in verde freatimetrie a correlazione ottimale a 135 gg in blu piezometro G a correlazione ottimale a 120 gg.

mento dei chiari in funzione del regime pluviometrico con elevata attendibilità statistica.

Conclusioni

Il sottosuolo della cassa di colmata di Tanali è costituito da un «basamento» di argille lacustri sormontato da depositi palustri eteropici, lato monte, con detriti e sedimenti più grossolani; al tetto la serie di colmata ed i depositi palustri recenti affioranti.

Sia i depositi palustri che quelli di colmata mostrano chiare evidenze di subsidenza ascrivibili ad effetto del sovraccarico da colmamento ed a riduzione delle pressioni neutre dovute a drenaggio (bonifica) dei sedimenti palustri.

La falda superficiale, affiorante nei chiari, risulta, almeno parzialmente, sospesa sui livelli lacustri e mostra un andamento stagionale pulsante con ricarica prevalentemente sotterranea dal fianco del Monte Pisano. Le variazioni del livello di falda risultano statisticamente ben correlate con le piogge medie pregresse di un periodo variabile fra i 105 ed i 135 giorni, mentre la ricarica meteorica diretta e gli apporti superficiali dei rii mostrano avere influenza solo subordinata ed effimera.

Il regime idraulico originario del progetto della cassa di colmata risulta ad oggi totalmente superato dall'evoluzione idrogeologica e dalle variazioni delle condizioni al contorno, dettate dal progredire delle attività di bonifica e bonifica meccanica dall'epoca di realizzazione della colmata. L'andamento dei chiari, grazie alle relazioni di regressione calcolate, può essere previsto con un errore residuale inferiore al 5%, sulla base degli andamenti pluviometrici medi.

La successiva fase di modellazione idrogeologica numerica, attualmente in corso, mirerà alla definizione quantitativa dei fabbisogni idrici minimi necessari al mantenimento di chiari perenni, in funzione delle variazioni pluviometriche e delle condizioni di drenaggio-deflusso all'esterno della cassa.

Ringraziamenti

Si ringrazia la Lega Ambiente Valdera per il supporto fornito con l'opera dei volontari ed un particolare rin-

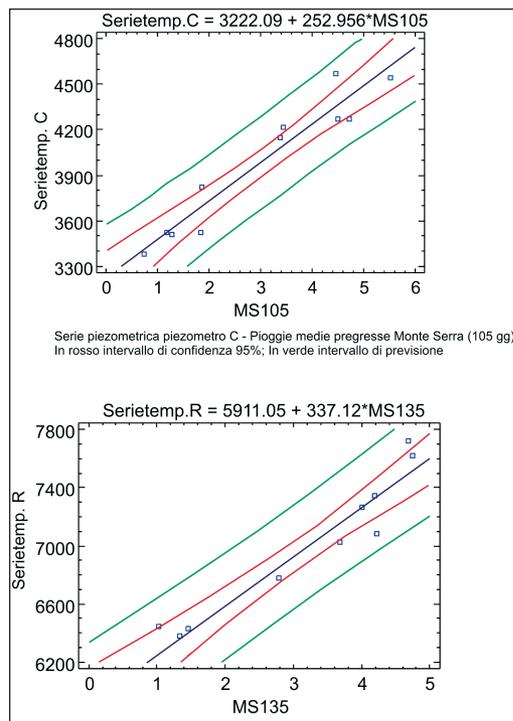


Figura 10: Diagrammi di regressione altezze freatimetriche - precipitazioni medie pregresse (105 gg per piezometro C e 135 gg per piezometro P).

graziamiento al dott. Luciano Carlotti per aver fattivamente contribuito all'impostazione generale ed alla logistica del lavoro.

Si ringraziano inoltre l'Ufficio idrografico di Pisa che ha messo gratuitamente a disposizione le pluviometrie giornaliere recenti, il Prof. Giacomo D'Amato Avanzi ed il Dott. Geol. Roberto Giannecchini che hanno deciso di dedicare all'argomento una tesi di laurea di I livello in Scienze Geologiche

Bibliografia

- [1] M. Ambrosio, L. Carlotti, M.T. Fagioli, G. Dellomonaco, Progettazione di un chiaro perenne per la sosta dell'avifauna migratoria mediante tecniche integrate di idrochimica e modellazione idrogeologica numerica nel SIR ex Lago di Bientina (PI), Codice Armonico - Primo congresso di scienze naturali della Regione Toscana Febbraio 2006 - Atti del Convegno, 2003.
- [2] Autorità di bacino del fiume Arno Piano di bacino del fiume Arno, vol. V. Firenze 1996.
- [3] C. Arias, G. Bigazzi, F.P. Bonadonna, Studio cronologico e paleontologico di alcune serie sedimentarie dell'Italia Appenninica. C.N.R., Progr. Fin. Geodinamica, Pubbl. 1981, 356: 1441-1448.
- [4] D. Barsanti, L. Rombai, La guerra delle acque in Toscana. Edizioni Medicea, Firenze 1986.
- [5] D. Barsocchini, Sull'antico corso del Serchio. Atti della R. Accademia Lucchese. Tomo XIV. Lucca 1853.
- [6] C. Bartolini, G. Pranzino, Evoluzione dell'idrografia nella Toscana centrosettentrionale. Boll. Mus. St. Nat. Lunigiana, 6-7 (1986-1987), Aulla 1988, 79-83.
- [7] M. Boccaletti, M. Coli, La tettonica della Toscana: assetto ed evoluzione. Mem. Soc. Geol. It. 1985, 25 (1983): 51-62.
- [8] G. Caciagli, Il Lago di Bientina: vicende storiche ed idrogeologiche. Bandecchi e Vivaldi Editori, Pontedera 1984.
- [9] C. Cresti, La Toscana dei Lorena. Politica del territorio e architettura. Banca Toscana, Firenze 1987.
- [10] L. Dallan, Ritrovamento di *Alephis Lyrix* nelle argille della serie lacustre di Montecarlo (Lucca) e considerazioni stratigrafiche sui depositi continentali dell'Area tra il Monte Albano e il Monte Pisano. Atti Soc. Tosc. Sc. Nat. Nem. Ser. A 1988, 95: 1-17.
- [11] P.R. Federici, Il territorio di Bientina: dalla geologia alla storia. In «Il Padule di Bientina: aspetti naturalistici ed agronomici». Pacini Editore, Pisa 1987.
- [12] P.R. Federici, R. Mazzanti, Paleogeographic features of the drainage pattern in the Lower Arno Valley and the Serchio Valley in the Tuscany (Italy). J. Meeting on Geom. Hazard, I.G.U. (Versione italiana: L'evoluzione della paleogeografia e della rete idrografica del Valdarno inferiore). Boll. Soc. Geogr. It. 1988, ser. XI, 5: 573-615.
- [13] M. Marroni, R. Mazzanti, C. Nencini, Geologia e morfologia delle colline Pisane. Suppl. n. 1 ai Quad. Mus. Stor. Nat. di Livorno 1990, 11: 1-40.
- [14] R. Masini, L'idrografia del Serchio in epoca preistorica e storica. Atti Soc. Tosc. Sc. Nat., Mem., Lucca 1956, pp. 18-25.
- [15] R. Mazzanti, La pianura di Pisa e i rilievi contermini, la nature e la storia. Edizioni del Cerro, Società Geografica Italiana, Roma 1994.
- [16] R. Nardi, Geologia della zona tra la Pania della Croce, Galliciano e Castelnuovo Garfagnana (Alpi Apuane). Boll. Soc. Geol. It. 1961.
- [17] C. Nencini, Il passaggio Plio-Pleistocene e i sedimenti plio-pleistocenici delle colline di Monte Castello (Pisa). Boll. Soc. Geol. It. 1983, 102: 391-398.
- [18] G. Nolledi, F. Mezzetti, Indagini idrogeologiche finalizzate alla ricostruzione ed al controllo dello stato della falda sotterranea del Padule di Bientina utilizzata per scopi potabili. Relazione tecnica per il Comune di Bientina 2003.
- [19] G. Nolledi, Valutazioni idrogeologiche sulla pianura di Lucca. Lavoro inedito, 2004.
- [20] P.E. Tomei, Il padule di Bientina e la sua flora. In «Il padule di Bientina, aspetti naturalistici ed agronomici». Pisa 1987.
- [21] P.E. Tomei, E. Guazzi, P.C. Kugler, Le zone umide della Toscana: indagine sulle componenti floristiche e vegetazionali. Regione Toscana, Firenze 2001.
- [22] L. Trevisan, G.P. Brandi, L. Dallan, R. Nardi, G. Raggi, A. Rau, P. Squarci, L. Taffi, M. Tongiorgi, Note illustrative della carta geologica d'Italia alla scala 1:100000. Foglio 105 Lucca. 1-51. Min. Ind. Comm. Art., Serv. Geol. d'It. 1971, 51 pp.