ALLEGATO XII

STUDIO IDROGEOLOGICO

INDICE DELL'ALLEGATO

1 STUDIO IDROGEOLOGICO DELL'AREA DEL LAGO DI CANDIA 5
1.1 Finalità 5
1.2 Fonti consultate 5
2 ASSETTO GEOMORFOLOGICO E GEOLOGICO DI DETTAGLIO 6
2.1 Assetto geomorfologico 6
2.1.1 L'Anfiteatro Morenico d'Ivrea (AMI) 6
2.1.2 Rilievo morenico 6
2.1.3 Settore esterno 8
2.1.4 Settore interno 8
2.2 Assetto geologico-stratigrafico 8
2.2.1 Depositi quaternari 10
2.2.2 Il lago di Candia 11
3 DATI METEOROLOGICI 13
4 ACQUE SUPERFICIALI 15
5 ASSETTO IDROGEOLOGICO 17
5.1 Complesso delle alternanze ghiaioso – argillose (C) 17
5.2 Complesso dei depositi di origine glaciale (G) 18
5.2.1 Sub-complesso del Sintema della Serra (Gs) 18
5.2.2 Sub-complesso del Sintema di Piverone (Gp) 18
5.3 Complesso dei depositi alluvionali recenti (A) 19
6 IDROGEOLOGIA DELL'AREA DI STUDIO 19
6.1 Rilevazioni del livello della falda 21
6.2 Caratteristiche idrogeochimiche della falda superficiale e dei corpi idrici superficiali 27
6.2.1 Studio idrogeologico del Lago di Candia (Vacca, 2016) 27
6.2.2 Monitoraggio della qualità delle acque del Lago di Candia 28
7 VALUTAZIONE DELLA RICARICA ATTIVA DELL'ACQUIFERO 29
7.1 Ricarica attiva media annua 30
7.1.1 Andamento della ricarica attiva annuale (periodo 2002-2018) 30
7.2 Stima delle variazioni indotte dai cambiamenti climatici 34
APPENDICE 1 36

1 Studio idrogeologico dell'area del Lago di Candia

1.1 Finalità

Lo studio idrogeologico dell'area è stato condotto al fine di approfondire il livello di conoscenza del modello idrogeologico del settore nel quale si localizza il Lago di Candia. In particolare, attraverso attività di rilevazione del livello della falda superficiale, del livello del lago e del livello di precipitazioni, lo studio è finalizzato a fornire un contributo dalla definizione delle relazioni esistenti tra le acque superficiali (lago e area umida) e le acque sotterranee.

1.2 Fonti consultate

L'area di studio, ma più in generale il settore dell'Anfiteatro Morenico di Ivrea, sono stati oggetto di numerose indagini che si sono succedute nel tempo, andando a definire con sempre maggiore precisione le unità stratigrafiche e la successione temporale dei processi di deposizione e modellamento dei materiali. Relativamente al Lago di Candia, diversi studi si sono focalizzati sul lago stesso e sulla circolazione idrica sotterranea.
Nell'elenco che segue sono indicate le fonti bibliografiche consultate per il presente studio:

- Forno M. G. and Lucchesi S. (2000) – Significato delle diverse facies glaciali nell'evoluzione geologica pleistocenica del settore settentrionale dell'anfiteatro morenico d'Ivrea (Piemonte). Il Quaternario Italian Journal of Quaternary Sciences, 13(1/2), pp. 47-56.
- Lami A. et al., (2000) – The last ca 2000 years palaeolimnology of Lake Candia (N. Italy): inorganic geochemistry, fossil pigments and temperature time-series analyses. J. Limnol., 59(1), p. 31-46.
- Gianotti F. (2007) – L'Anfiteatro Morenico di Ivrea. In: E. Bertolo & E. Martinetto, Passato e presente dell'ambiente in Canavese, Atti della giornata di Conferenze, 22 settembre 2007, Cuorgnè, p. 73-138. Sito on-line Nimbus http://www.nimbus.it/
- Bove A. et al. (2004) – Carta delle isopiezometriche della falda idrica a superficie libera. Regione Piemonte.
- Bove A. et al. (2004) – Studio idrogeologico finalizzato alla caratterizzazione dell'acquifero superficiale nel territorio di pianura della Provincia di Torino. Regione Piemonte.
- Ciampittiello M. et al. (2004) – Definizione degli ambiti idrografici e idrogeologici dei bacini oggetto dello studio: Lago di Candia. Report CNR-ISE, 01-04: 18 pp.
- Sambuelli L. et al. (2010) – A GPR survey on a morainic lake northerly Turin (Italy). 13th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)
- Morabito et al. (2010) – Studi limnologici sul bacino del Lago di Candia. Attività 2009. Report CNR-ISE, 03.10: 47 pp.
- Sambuelli L. et al. (2011) – Magnetic, electrical, and GPR waterborne surveys of moraine deposits beneath a lake: A case history from Turin, Italy. Geophysics 76(6): B213-B224
- Sambuelli L. and Bava S. (2012) – Case study: A GPR survey on a morainic lake in northern Italy for bathymetry, water volume and sediment characterization. Journal of Applied Geophysics, 81, pp. 48–56.

- Sambuelli L. et al. (2012) – Continuous vertical electrical soundings (CVES) for the geological investigation of underwater deposits beneath the lake of Candia (Turin, NW Italy). Atti del 31° Convegno Nazionale GNGTS, p. 67-73.
- Colombero C. et al. (2014) – Waterborne and on-land electrical surveys to suggest the geological evolution of a glacial lake in NW Italy. Journal of Applied Geophysics, 105, p. 191–202
- Gianotti, F. et al. (2015) – Stratigraphy of the Ivrea morainic amphitheatre (NW Italy). Alpine and Mediterranean Quaternary, 28 (1), p. 29–58.
- Vacca M. (2016) – Studio idrogeologico dell'area del Lago di Candia. Tesi di Laurea, Università degli Studi di Torino, Dip. Scienze della Terra, 213 pp.
- Gianotti F. and Forno M. G. (2017) – Il Quaternario della Conca di Aosta nell'ambito del modellamento glaciale del bacino della Dora Baltea. Geologia dell'Ambiente, Supplemento al n. 2, p. 12-17.

Oltre alle pubblicazioni scientifiche elencate sono stati consultati gli elaborati geologici a corredo dei Piani Regolatori Generali dei Comuni di Caluso, Candia, Mazzè, Strambino.

2 Assetto geomorfologico e geologico di dettaglio

I materiali presenti nell'area di studio sono costituiti da depositi quaternari e recenti la cui origine è connessa all'attività glaciale e fluvioglaciale, a cui è seguita, successivamente all'ultimo picco glaciale, l'attività fluviale, associata al reticolo idrografico, il cui elemento principale è costituito dal Fiume Dora Baltea.

2.1 Assetto geomorfologico

2.1.1 L'Anfiteatro Morenico d'Ivrea (AMI)

I depositi che costituiscono l'anfiteatro morenico sono riferibili all'attività glaciale, con la formazione di **un rilievo morenico** articolato in tre lobi, un **settore esterno**, caratterizzato dalla presenza di un *sandur* pro-glaciale e dal **settore interno** caratterizzato dalla presenza terrazzi fluviali che bordano l'attuale corso del Fiume Dora Riparia. I condizionamenti legati all'assetto strutturale del substrato hanno influenzato la direzione di movimento del ghiacciaio, determinando la formazione dei tre lobi principali (Viverone, Settimo Rottaro e Vische). Il lobo di Vische è articolato in tre lobi secondari. Il lago di Candia si colloca all'interno del lobo secondario di Candia (Figura 1). L'arco morenico è caratterizzato dalla presenza di numerosi avvallamenti trasversali, originati dall'azione erosiva delle acque di fusione e che costituiscono gli sfioratori da cui si dipartono le conoidi alluvionali coalescenti che formano il sandur pro-glaciale.

2.1.2 Rilievo morenico

L'anfiteatro morenico è costituito dalle morene frontali e laterali e dai terrazzi di *kame*. Questi terrazzi sono legati alle fasi di avanzamento e ritiro dei ghiacciai, in particolare alle fasi di stazionamento con tendenza al ritiro. In corrispondenza delle depressioni formate tra il fronte del ghiacciaio e la cresta morenica si formano laghi effimeri, progressivamente colmati da depositi del ghiaccio, da corsi d'acqua di acque di fusione o dal versante della morena. Il ritiro del ghiacciaio

lascia così una superficie piana delimitata da una scarpata interna di accumulo, che definisce un marker per la posizione raggiunta dal ghiacciaio (Figura 2).

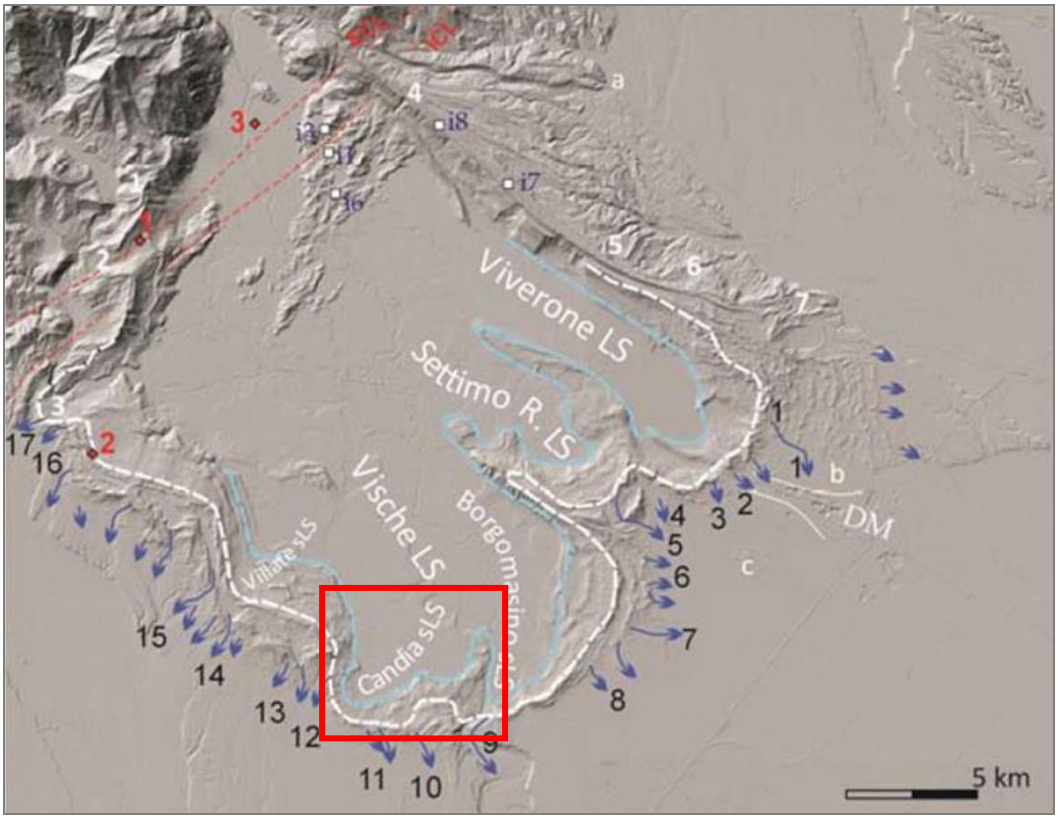


Figura 1 - Lobi glaciali principali e secondari dell'anfiteatro morenico di Ivrea (da Gianotti et al., 2015). In rosso è indicato il settore in cui ricade l'area di studio. I numeri indicano l'ubicazione degli sfioratori da cui si dipartono le conoidi che costituiscono il sandur pro-glaciale del settore esterno.

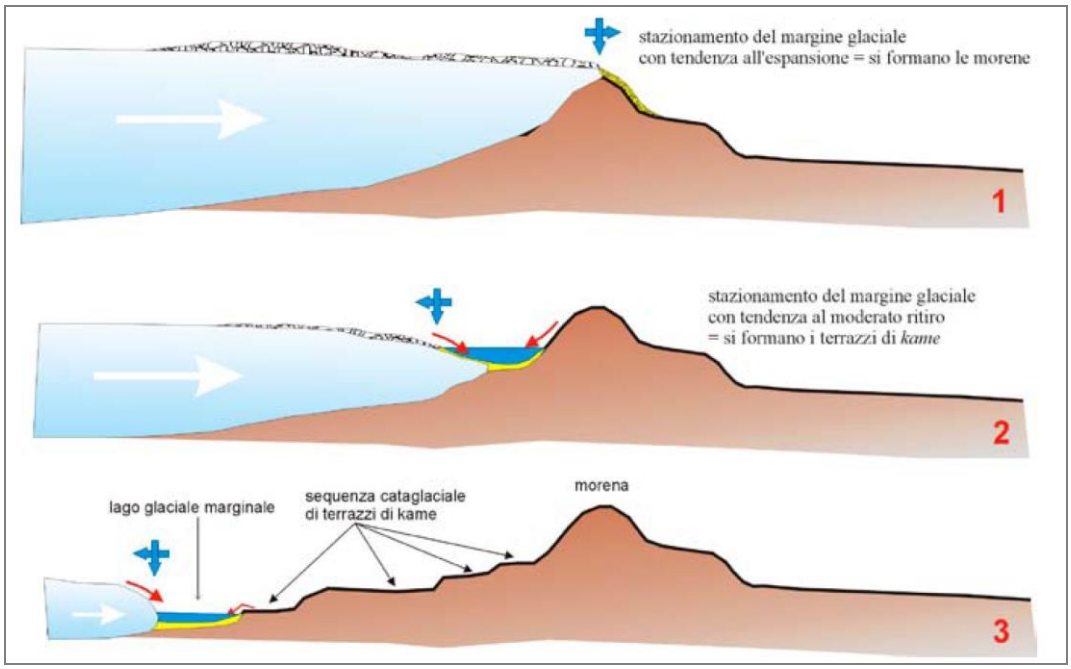


Figura 2 - Schema illustrativo sulla formazione dei terrazzi di kame (da Giandotti et al., 2007).

2.1.3 Settore esterno

Il settore esterno si caratterizza per la presenza di un sandur proglaciale terrazzato, generato dalla coalescenza di conoidi glaciofluviali, ognuno dei quali originato dall'attività delle acque che fluivano attraverso gli sfioratori. I terrazzi più antichi sono ricoperti da depositi eolici (loess) legati alle fasi glaciali, i cui processi di alterazione hanno dato origine a orizzonti di spessore metrico.

2.1.4 Settore interno

Il settore interno si presenta come una depressione occupata da depositi di origine glaciale e fluvioglaciale, successivamente incisi dai corsi d'acqua del reticolo idrografico attuale con la generazione di terrazzi fluviali. Nel settore interno sono presenti nella zona di Ivrea dei rilievi che rappresentano affioramenti del basamento alpino. Questi ultimi hanno condizionato l'avanzata dei ghiacciai, nel passato, e del Fiume Dora Baltea, in epoca recente. L'attuale morfologia dei rilievi è connessa ai processi di esarazione, dovuti al transito di una massa ghiacciata di spessore ettometrico.

2.2 Assetto geologico-stratigrafico

Il basamento su cui poggiano i depositi quaternari varia spostandosi dall'arco alpino verso i settori di pianura:

- Basamento metamorfico: nella zona NW dell'AMI il basamento è costituito da formazioni del dominio Austroalpino (eclogiti e micascisti), mentre nella zona SE sono presenti rocce del dominio Sudalpino (Zona del Canavese, scisti, meta-graniti e meta-dioriti, con una copertura mesozoica di brecce, depositi di origine vulcanica, quarziti e dolomie). Le due unità sono in contatto lungo la Linea del Canavese esterna. La linea del Canavese Interna separa invece le unità del dominio Sudalpino dalle rocce della Zona Ivrea-Verbano (gabbri metamorfosati in facies granulitica).
- Successione sedimentaria Pliocenica: si tratta di depositi marini e depositi di ambienti di transizione. I depositi marini sono rappresentati da sabbie localmente fossilifere, con subordinate lenti ghiaiose. Verso l'alto passano a depositi di transizione, distinti in due complessi: Complesso Villafranchiano Inferiore di ambiente marino marginale (sabbie e silt) e Complesso Villafranchiano Superiore di ambiente continentale (ghiaie sabbiose alterate).

I depositi che affiorano nell'area del Lago di Candia appartengono a due sintemi differenti:

- Sintema di Ivrea
- Sintema della Serra

In prossimità del Fiume Dora Baltea sono invece presenti materiali alluvionali connessi all'attività fluviale recente, mentre lungo i versanti è presente un deposito detritico-colluviale legato all'azione erosiva ad opera dei materiali morenici.
I depositi quaternari suddivisi nei vari sintemi riconosciuti dagli studi di terreno sono indicati nella figura seguente.

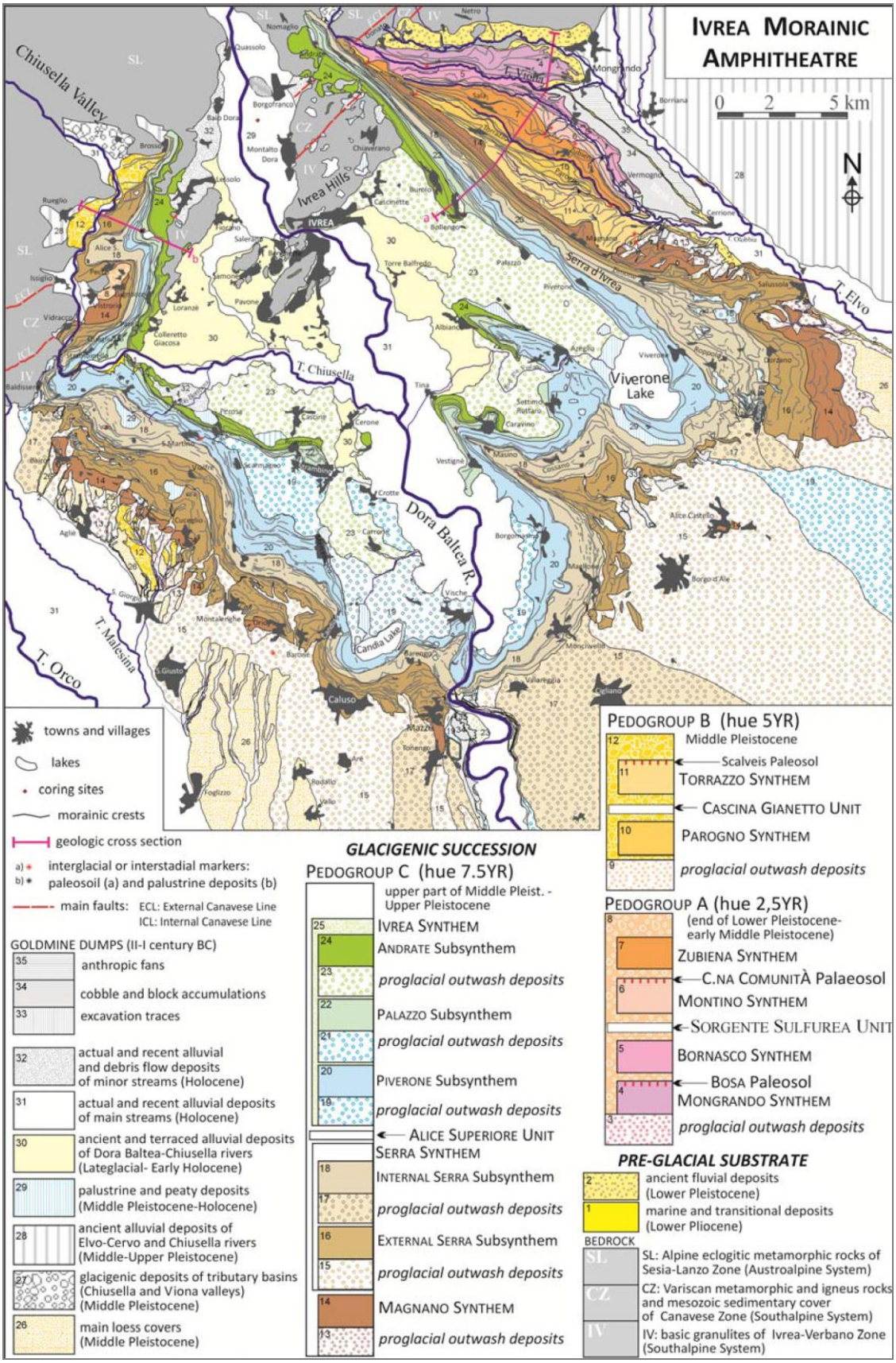


Figura 3 - Carta geologica dell'Anfiteatro Morenico d'Ivrea (da Giandotti et al., 2015).

2.2.1 Depositi quaternari

La distinzione dei depositi quaternari di origine glaciale è stata oggetto di numerose ricerche, succedutesi nel corso degli anni. Sulla base di recenti analisi basate su differenti metodologie (analisi pedologiche, isotopiche, palinologiche), l'assetto stratigrafico dell'AMI vede la presenza di differenti sintemi, articolati in subsintemi:

- Pleistocene inferiore-medio – Sintema di Mongrando, Sintema di Bornasco, Sintema di Montino, Sintema di Zubiena;
- Pleistocene medio – Sintema di Parogno, Sintema di Torrazzo;
- Pleistocene medio-superiore – Sintema di Magnano, Sintema della Serra e Sintema di Sintema di Ivrea.

Sulla base dell'indice di colore dell'orizzonte B dei loro prodotti colluviali, derivato delle Tavole di Munsell, i depositi possono essere suddivisi in tre pedogruppi:

- Pedogruppo A (da Sint. di Mongrando a Sint. di Zubiena) con indice di colore 2.5 YR;
- Pedogruppo B (Sint. di Parogno e Sint. di Torrazzo) con indice di colore 5 YR;
- Pedogruppo C (Sint. Af di Magnano a Sint. di Ivrea) con indice di colore 7.5 YR.

Sono descritti nel seguito i sintemi riferibili al settore del Lago di Candia: il Sintema di Ivrea e il Sinitema della Serra, che sono separati da un paleosuolo riferibile allo stadio MIS5.

2.2.1a Sintema di Ivrea

Il Sintema di Ivrea comprende materiali legati all'ultimo picco glaciale (LGM) e costituisce la sequenza legata alla fase di ritiro del ghiacciaio riferita al LGM (29-19 ka BP) e alla fase tardo glaciale (19-11,6 ka BP). Sulla base di evidenze morfostratigrafiche il sintema è suddiviso in subsintemi:

- Subsintema di Piverone (culmine del LGM): rappresenta l'unità più antica e include depositi riferiti alla massima espansione del Ghiacciaio della Dora Baltea ed è riferita allo stadio MIS2. Include morene discontinue e numerosi terrazzi di kame, costituiti da depositi glacio-lacustri e di conoide.
- Subsintema di Palazzo (LGM): forma un arco morenico interno discontinuo,su cui sorgono gli abitati di Palazzo, Strambino, Quagliuzzo e Loranzé Alto. Questi depositi bordano i laghi di Viverone e di Candia sul lato interno, mentre i depositi del Subsintema di Piverone ne definiscono il margine esterno.
- Subsintema di Andrate (LGM): si tratta di due morene laterali (la Piccola Serra di Ivrea, a NE, e la serra di Parella, a SW) e di una morena frontale (ubicata in corrispondenza di Strambino).

In relazione al Subsintema di Piverone, i risultati delle prove penetrometriche pesanti realizzate per l'installazione dei piezometri indicano per i luoghi di indagine dei sedimenti relativamente sciolti con bassa resistenza alla penetrazione (Appendice 1).

2.2.1b Sintema della Serra

I materiali del Sintema della Serra costituisce gran parte dell'arco dell'anfiteatro ed è riferibile allo stadio MIS6 sulla base di analisi isotopiche (^{10}Be) eseguite su massi erratici posti nei settori esterni della morena della Serra. Questa unità è suddivisa in due subsintemi:

- Subsintema esterno della Serra: i materiali di questo sintema formano le morene laterali dell'AMI e sulla base della datazione di alcuni massi erratici posti sul margine esterno, risultano riferibili alla fase pre-LGM.
- Subsintema interno: i materiali di questo subsintema sono presenti con continuità lungo tutto l'arco dell'AMI

2.2.2 Il lago di Candia

In riferimento al settore del Lago di Candia, recenti studi hanno consentito una ricostruzione delle condizioni di formazione del lago e dei processi sedimentari alla base dei depositi presenti nell'area.
Le indagini geofisiche condotte indicano la formazione iniziale di lago proglaciale di estensione maggiore di quella attuale, il cui margine settentrionale è stato progressivamente colmato con depositi fluvioglaciali associati alle acque di fusione del ghiacciaio in fase di ritiro. A questa fase deposizionale è seguita la sedimentazione di depositi lacustri nel bacino ancora presente, a cui si accompagnano apporti dai settori di versante. Sulla base delle rilevazioni geofisiche l'assetto stratigrafico per la zona del Lago di Candia è quella proposta nella figura seguente.

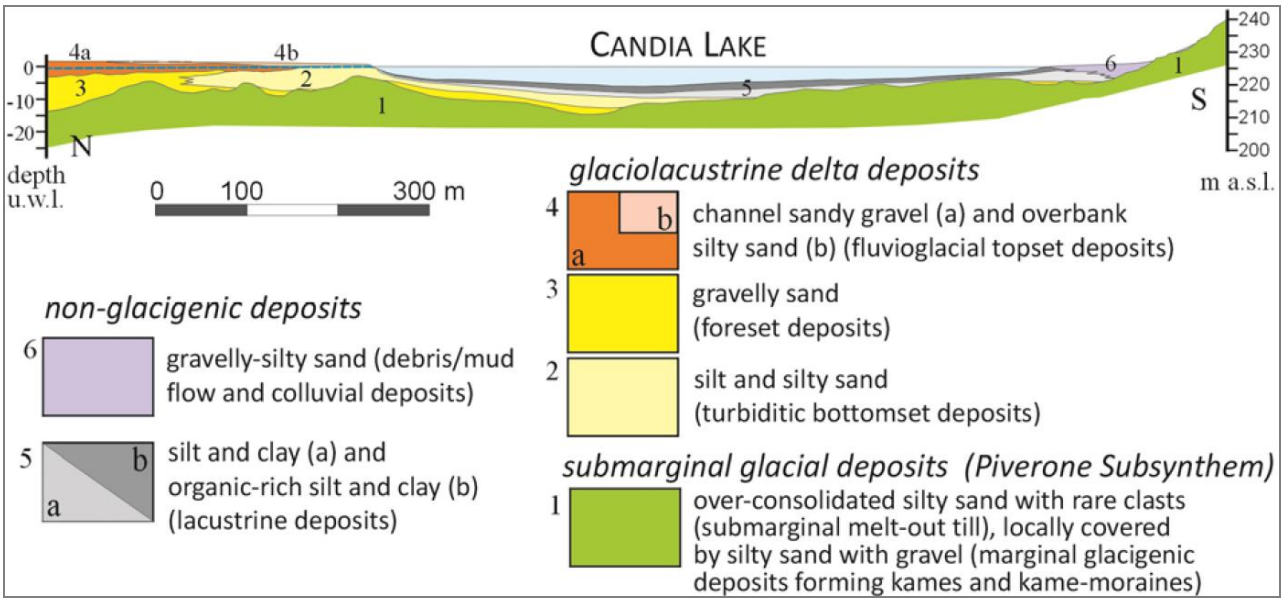


Figura 4 – Assetto stratigrafico per il settore del Lago di Candia (da Giandotti et al., 2015). Sulla base delle indagini geofisiche l'area si caratterizza per la presenza di un till submarginale legato a depositi morenici e kame. Al tetto sono presenti depositi glaciolacustri, che si estendono dal margine S e interessano tutta l'area ora occupata dai settori di palude. Il fondo del lago è caratterizzato dalla presenza di depositi siltosi ed argillosi, mentre i settori a nord si caratterizzano per la presenza materiali fluvioglaciali associati ai processi di riempimento, che si sono interrotti con il progressivo ritiro del ghiacciaio.

I dati delle indagini geoelettriche CVES (Continuous Vertical Electrical Soundings) realizzate in corrispondenza del Lago di Candia indicano la presenza sul fondo di un livello di materiale fine

(limo e argilla), il cui spessore appare ridursi in corrispondenza del margine meridionale, dove i valori di resistività indicano la presenza a pochi metri dal fondale di materiali più grossolani. Le misure del potenziale spontaneo (SP) evidenziano fenomeni di alimentazione del lago da parte della falda superficiale lungo il margine meridionale, mentre indicano un processo inverso per la porzione centrale e settentrionale del corpo idrico.

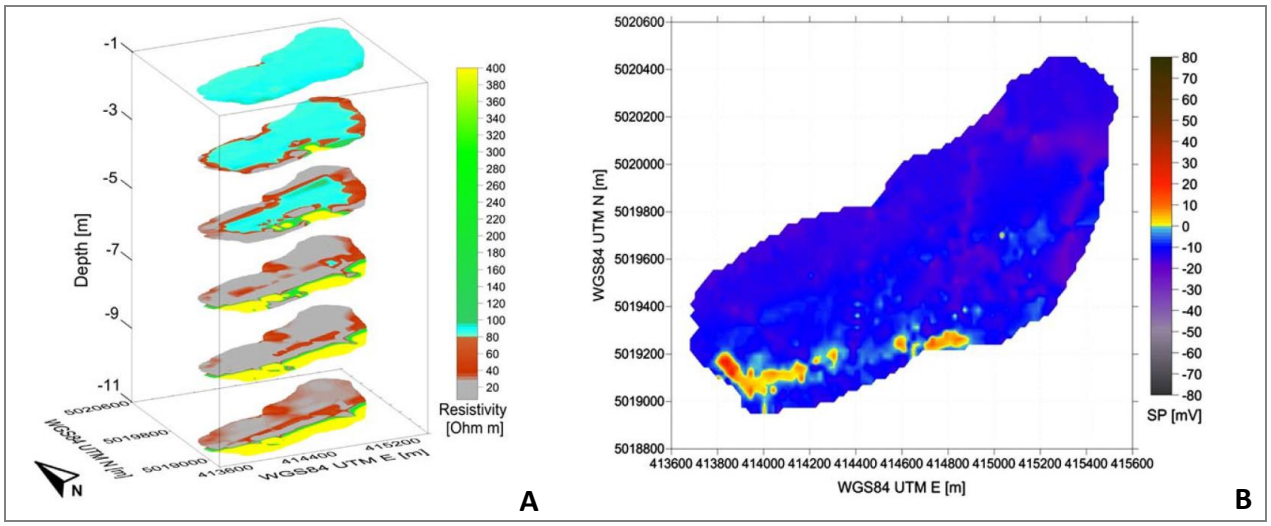


Figura 5 – Risultati delle indagini geoelettriche realizzate per il Lago di Candia (da Colombero et al., 2014). A: ricostruzione 3D della distribuzione dei valori di resistività dei materiali del fondo del lago per differenti profondità. Procedendo dalle porzioni prossime al fondale a quelle più profonde, i valori di resistività bassa (aree colorate in azzurro, marrone e grigio) indicano la presenza di un livello di materiale fine con minore spessore lungo il margine meridionale, dove invece sono presenti materiali con resistività maggiore (aree colorate in giallo e verde). Questi ultimi potrebbero essere materiali più grossolani. B: valori di potenziale spontaneo rilevati. I settori con valori positivi (settori meridionali) indicherebbero flussi in risalita, associati a fenomeni di alimentazione del lago da parte della falda superficiale, mentre i valori negativi (settori centrali, occidentali e settentrionali del lago) indicherebbero un fenomeno opposto.

Figura 6 - Flussi sotterranei tra la falda superficiale e il lago. Le frecce verdi indicano i fenomeni di alimentazione del lago da parte delle acque della falda superficiale. Le frecce arancioni indicano i flussi legati al processo opposto.

3 Dati meteorologici

I dati meteorologici disponibili per l'area di studio sono quelli relativi alla stazione della rete di monitoraggio della Regione Piemonte ubicata in prossimità del Lago di Candia, i cui dati anagrafici sono riportati nella tabella seguente.

Denominazione	**CANDIA LAGO**
Località	**LAGO DI CANDIA**
Comune	**CANDIA CANAVESE**
Provincia	**PROVINCIA DI TORINO**
Regione	**PIEMONTE**
Quota sito (m s.l.m.)	**226.00**
UTM X - WGS84 (m)	**413672**
UTM Y - WGS84 (m)	**5019220**
Lat. - WGS84 (G.sess)	**451916**
Long. - WGS84 (G.sess)	**075355**
Data attivazione	**2000-01-01**
Sensori presenti *	**HIPRTV ***
Bacino idrografico	**DORA BALTEA**

Tabella 1 – Dati anagrafici della stazione meteorologica ubicata in prossimità del Lago di Candia.

I valori di precipitazione media mensile per il periodo 2002-2018 sono riportati nella figura seguente.

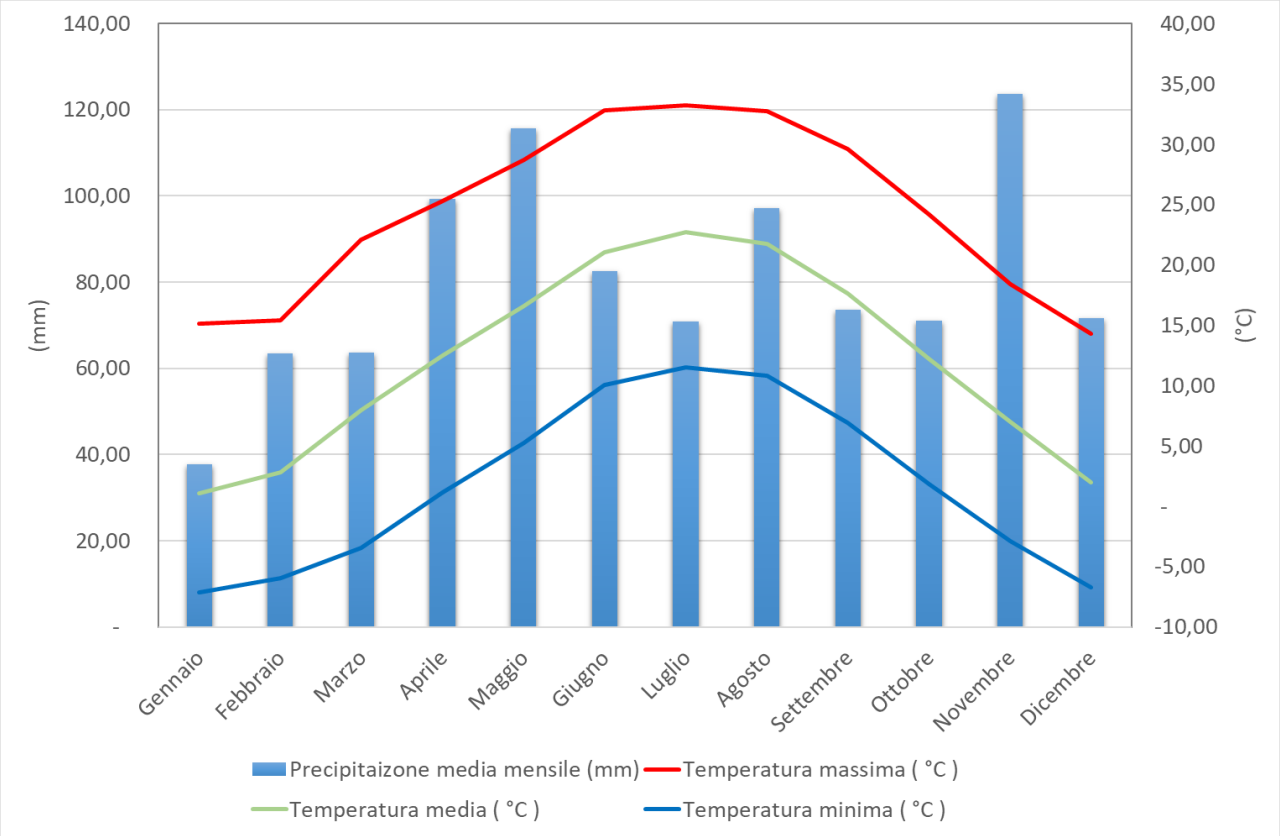


Figura 7 – Valori di precipitazione e temperatura (massima, media e minima) per l'area di studio. I valori rappresentano la media dei valori mensili per il periodo 2002-2018.

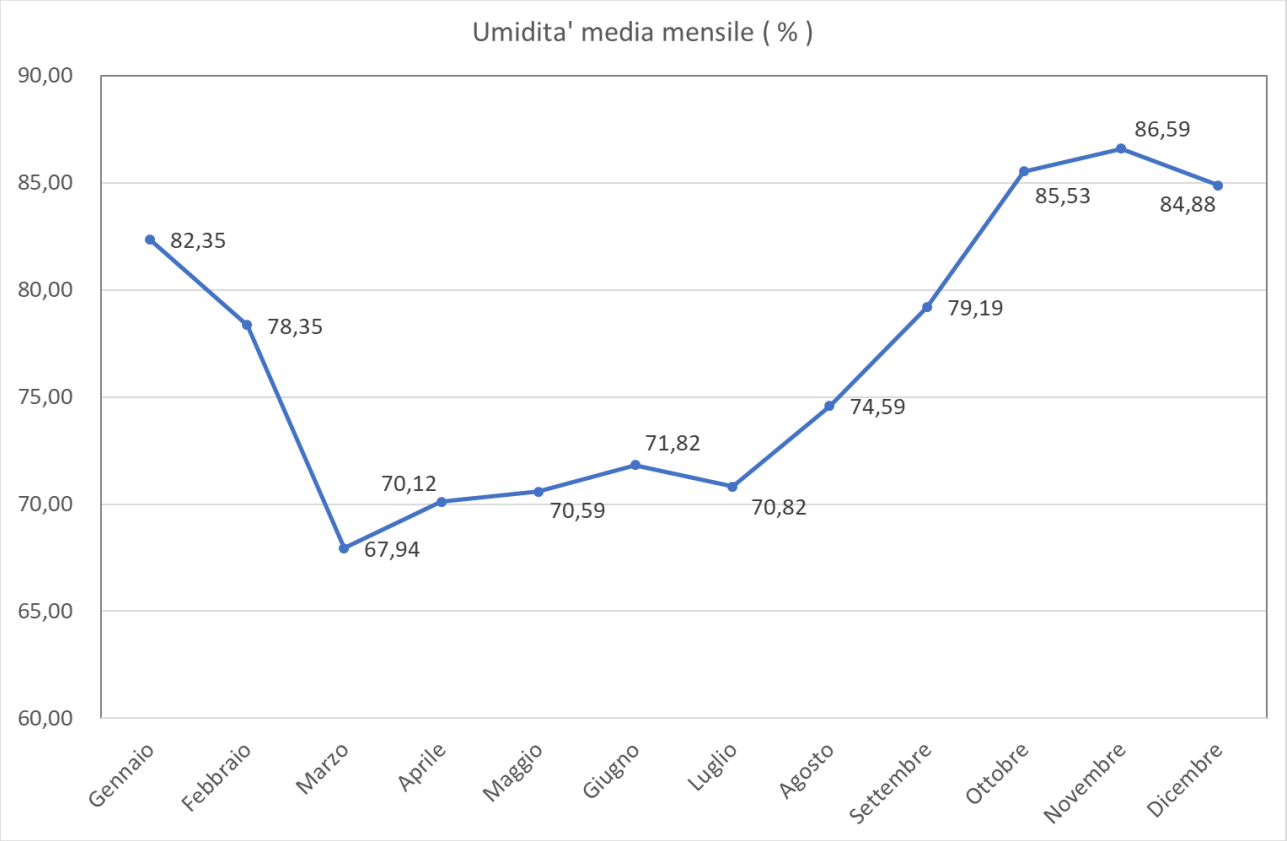


Figura 8 – Valori di umidità media mensile riferiti al periodo 2002-2018.

La distribuzione delle precipitazioni medie mensili mostra un massimo assoluto per il mese di novembre (123,71 mm) ed uno relativo per il mese di maggio (115,7 mm). Per il mese di agosto (97,26 mm) sono registrate precipitazioni confrontabili con quelle del mese di aprile (99,22 mm). Il valore minimo assoluto (37,66 mm) è registrato nel mese di gennaio. Le temperature mostrano un massimo assoluto per il mese di luglio (T max: 33,24 °C; T media: 22,72 °C; T min: 11,52 °C) ed un minimo assoluto per il mese di gennaio (T max: 15,14 °C; T media: 1,09 °C; T min: -7,18 °C). I valori di umidità media mensile sono riportati in Figura 8. La serie mostra un massimo assoluto per il mese di novembre (86,59%) ed un minimo assoluto per il mese di marzo (67,94%). I valori numerici sono riportati nella tabella seguente.

Parametro	Temperatura max (°C)	Temperatura med. (°C)	Temperatura min. (°C)	Precipitazione media (mm)	Umidità media mensile (%)
Gennaio	15,14	1,09	- 7,18	37,66	82,35
Febbraio	15,43	2,80	- 5,99	63,55	78,35
Marzo	22,12	7,94	- 3,44	63,56	67,94
Aprile	25,28	12,45	1,16	99,22	70,12
Maggio	28,68	16,56	5,26	115,78	70,59
Giugno	32,80	21,08	10,06	82,53	71,82
Luglio	33,24	22,72	11,52	70,93	70,82
Agosto	32,77	21,75	10,82	97,26	74,59
Settembre	29,61	17,66	6,91	73,54	79,19

Parametro	Temperatura max (°C)	Temperatura med. (°C)	Temperatura min. (°C)	Precipitazione media (mm)	Umidità media mensile (%)
Ottobre	24,15	12,24	1,81	71,06	85,53
Novembre	18,41	6,96	- 2,91	123,71	86,59
Dicembre	14,33	1,96	- 6,73	71,54	84,88

Tabella 2 – Valori medi mensili riferiti al periodo 2002-2018 per il Lago di Candia: T massima, media e minima, Precipitazione e Umidità.

L'andamento delle temperature medie annue indicato in Figura 9 evidenzia un incremento dei valori del periodo 2002-2018, con un innalzamento medio annuo pari a 0,12 °C.

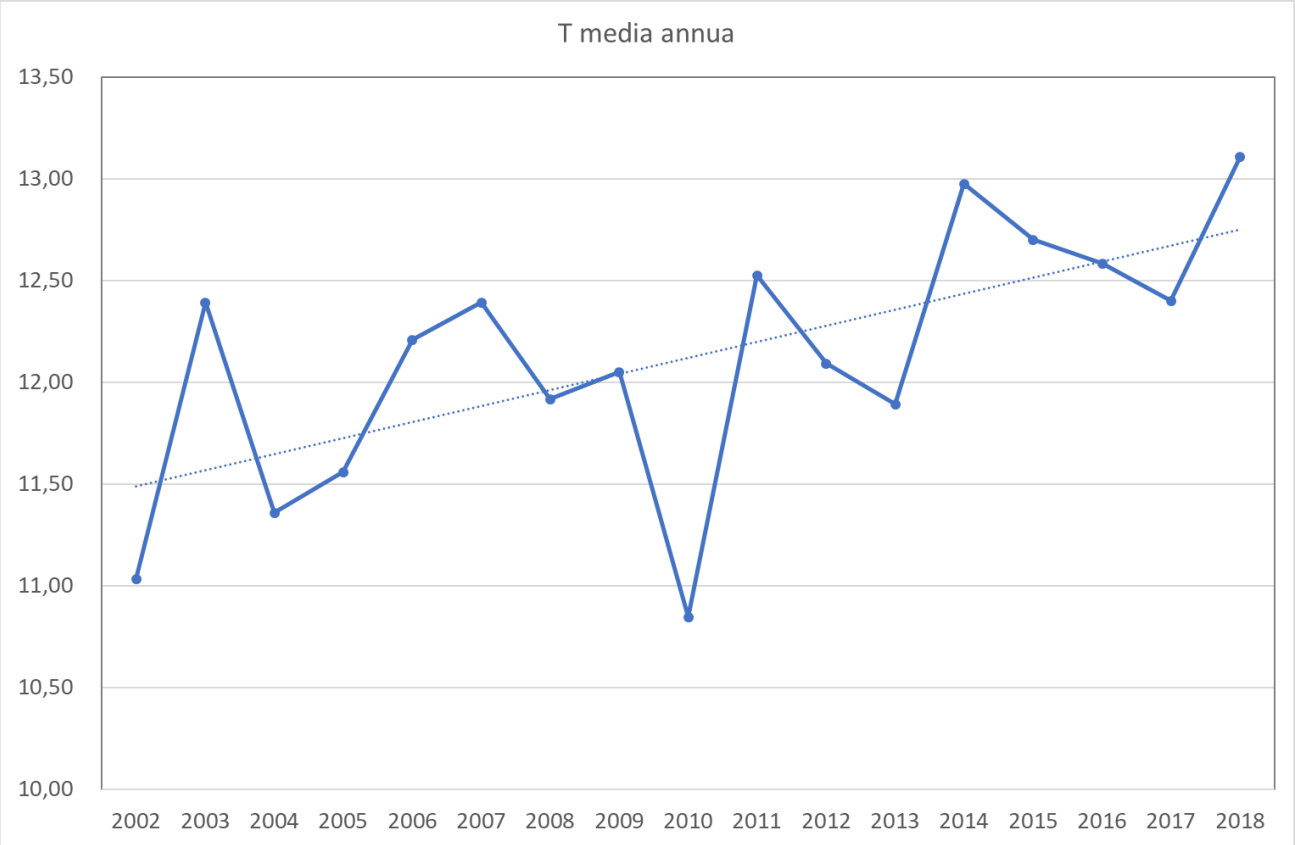


Figura 9 – Andamento delle temperature medie annue. La linea di tendenza tratteggiata evidenzia un incremento medio annuale pari a circa 0,12 °C per anno.

4 Acque superficiali

Il Lago di Candia si colloca all'interno di un bacino idrografico caratterizzato dalla presenza di corsi d'acqua minori e canali irrigui, le cui portate sono dirette verso l'asta principale, il Fiume Dora Baltea.

Il Lago di Candia non presenta immissari significativi, ad eccezione del Rio della Motta, un canale di raccolta delle acque piovane che alimenta il lago nel settore meridionale principalmente tra i mesi di maggio e settembre. Il principale emissario è il Rio Traversaro, le cui portate alimentano la zona umida posta a nord del lago.

Il confronto dei valori medi mensili di precipitazione, temperatura massima, radiazione solare e del livello del lago rilevato presso la stazione di monitoraggio idrometrico della Regione Piemonte

definiscono un contesto caratterizzato da una oscillazione del livello del lago fortemente connessa ai parametri meteorologici considerati. In particolare, per il periodo estivo è segnalata una riduzione del livello idrometrico del lago di circa 0,25 m rispetto al periodo primaverile (massimo assoluto). Questa situazione è indicativa di un sistema acque superficiali-sotterranee intimamente associato e condizionato dai fattori meteorologici, che evidentemente influenzano anche i processi di ricarica delle acque sotterranee il cui livello è legato alle infiltrazioni di acqua piovana dalla superficie. In questo quadro, il sistema idrico non risulta caratterizzato da sistemi di compensazione sufficienti a contrastare i deficit legati a riduzione degli apporti e incremento dei fenomeni di evaporazione. A ciò si deve aggiungere, seppur con un ruolo marginale, il prelievo di acqua di falda per uso irriguo nel periodo estivo.

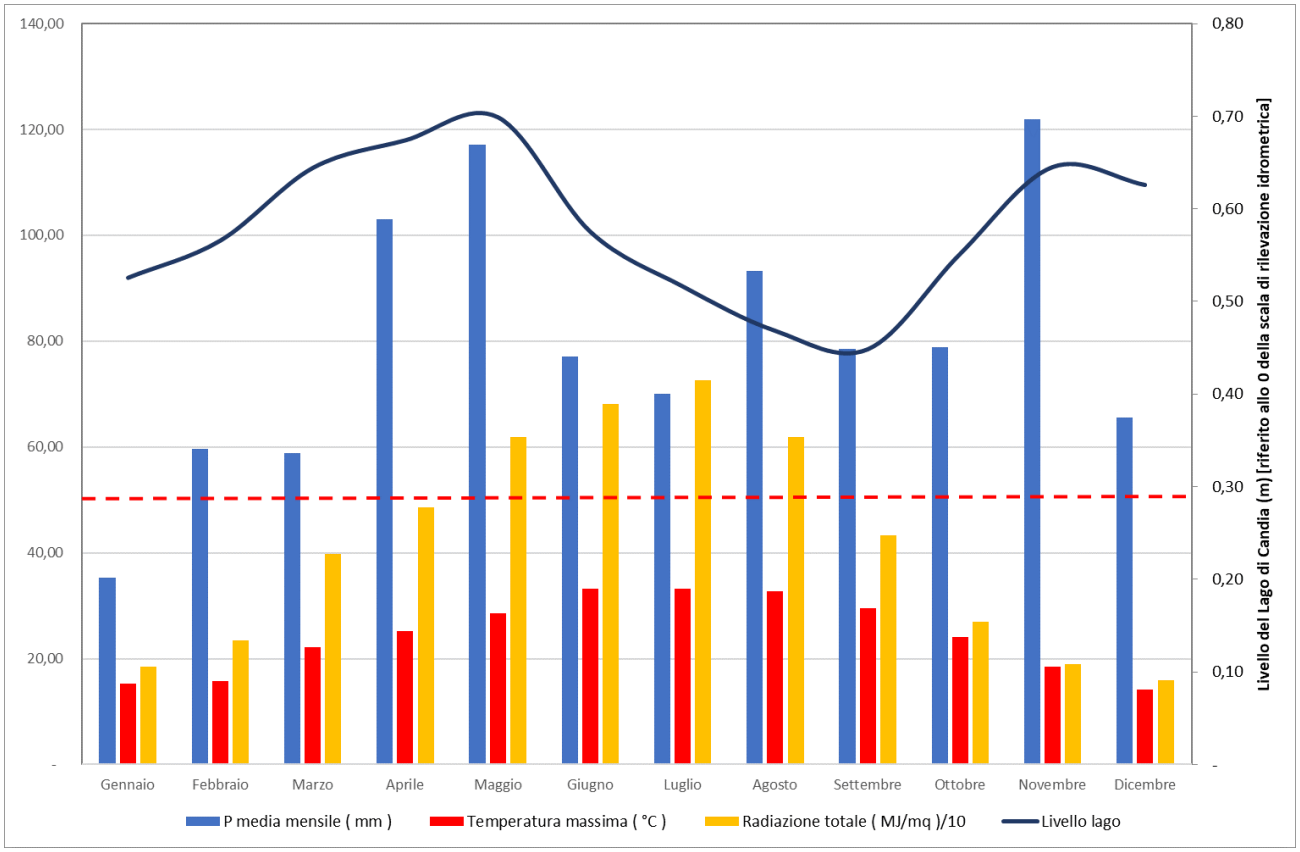


Figura 10 – Valori medi mensili di precipitazione, temperatura massima, radiazione totale e del livello del Lago di Candia per il periodo 2000-2018. La linea tratteggiata rossa corrisponde al valore di 500 MJ/mq della radiazione solare, che si configura come una possibile soglia a cui è associata la riduzione del livello del lago rilevata per il periodo estivo.

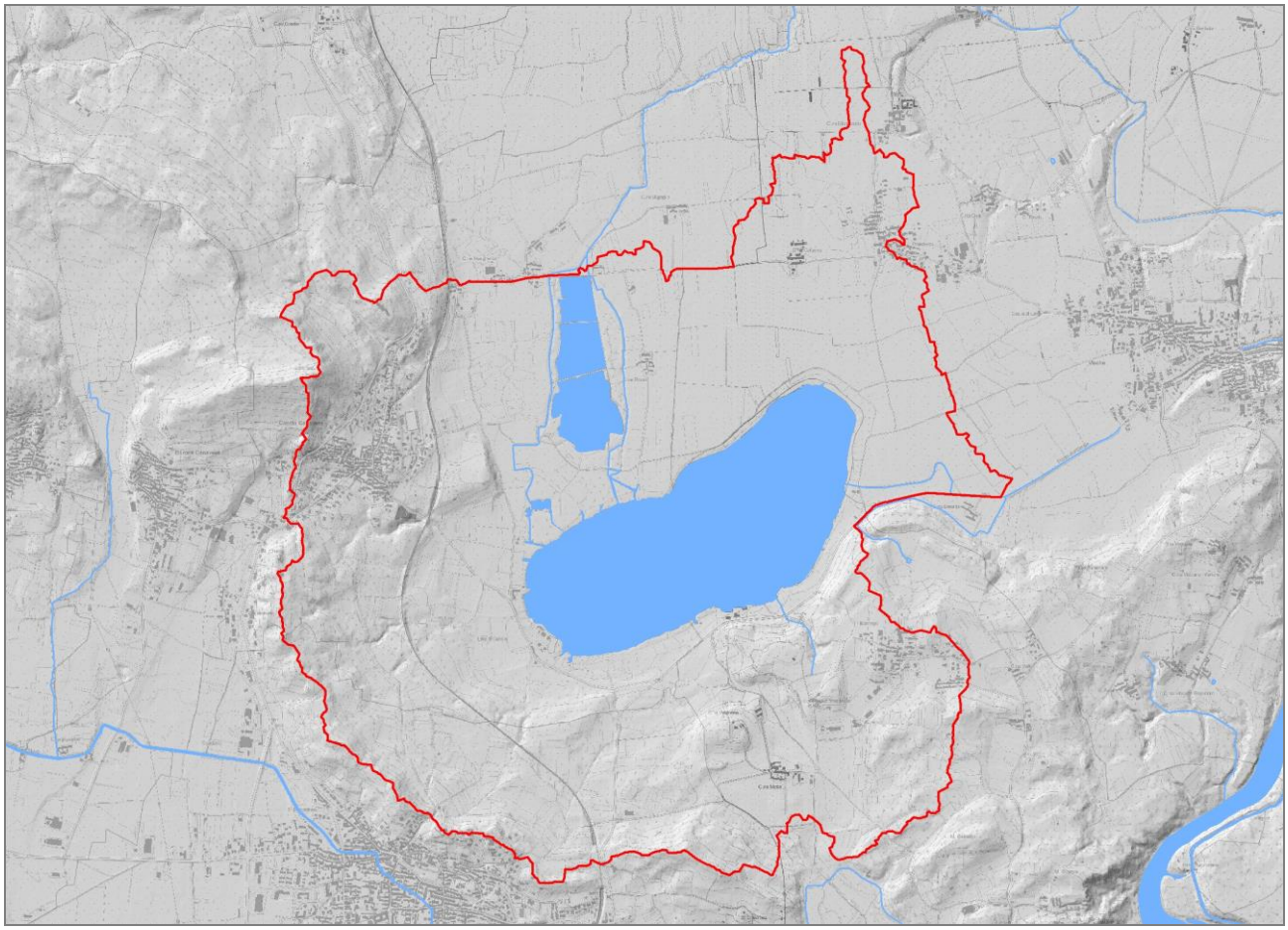


Figura 11 – Limiti del bacino idrografico definito per il settore del Lago di Candia sulla base di elaborazioni in ambiente GIS a partire dal DTM della Regione Piemonte (risoluzione 5m x 5m).

5 Assetto idrogeologico

Relativamente all'assetto idrogeologico gli studi condotti nell'area indicano una situazione caratterizzata dalla presenza di tre complessi idrogeologici principali:

- Complesso delle alternanze ghiaioso – argillose (C)
- Complesso dei depositi di origine glaciale (G)
- Complesso dei depositi alluvionali recenti (A)

5.1 Complesso delle alternanze ghiaioso – argillose (C)

Questo complesso è presente in tutto il settore considerato, sebbene il suo limite superiore si collochi a profondità molto elevate (>200 m). Si tratta di materiali della successione Villafranchiana rappresentati da un'alternanze di ghiaie, ghiaie grossolane, ghiaietto, ghiaie sabbiose, ghiaie argillose, sabbie, sabbie ghiaiose e sabbie argillose, intercalate da livelli argillosi o argilloso-limosi. I livelli fini mostrano uno spessore compreso tra pochi metri e 50 metri circa, apparendo abbastanza frequenti e con una buona continuità laterale. La parte più superficiale è caratterizzata da un aumento della componente grossolana, pur sempre intercalata a livelli fini, formata in questo caso principalmente da ghiaie e ghiaie grossolane con matrice argillosa. Sulla base della distribuzione della frazione fine è possibile affermare che la porzione più grossolana

corrisponde al Complesso Superiore del Villafranchiano, mentre la porzione inferiore, con maggiore contenuto in materiale fine, corrisponde al Complesso Villafranchiano Inferiore.
La permeabilità primaria per porosità varia in funzione della granulometria, attestandosi su valori di 10^{-9} m/s in corrispondenza dei livelli più fini, per arrivare a 10^{-2}-10^{-4} m/s in corrispondenza dei livelli più grossolani. Il Complesso C può essere considerato un acquitardo, i cui materiali ospitano un acquifero multifalda, confinato o semiconfinato, in relazione alla presenza di livelli fini impermeabili.

5.2 Complesso dei depositi di origine glaciale (G)

Il Complesso dei depositi di origine glaciale G è rappresentato dai materiali che costituiscono l'arco morenico e i depositi della piana interna. Presenta una potenza compresa tra 20 m e 140 e al suo interno sono presenti materiali di origine glaciale di ablazione (trovanti, ciottoli, ghiaie da grossolane a fini, sabbie e locali livelli fini di origine glaciolacustre) e depositi fluvioglaciali (ghiaie, ghiaie sabbiose e ghiaie argillose). Il complesso definisce un unico acquifero con una falda a superficie libera, la cui eterogeneità granulometrica determina localmente comportamenti differenti, con la locale formazione di acquiferi multifalda che ospitano falde sospese limitate da livelli da semipermeabili a impermeabili.
In questo complesso sono distinguibili due sub-complessi, definiti in base alle ricostruzioni stratigrafiche:

- Subcomplesso del Sintema della Serra (Gs)
- Subcomplesso del Subsintema di Piverone (Gp)

5.2.1 Sub-complesso del Sintema della Serra (Gs)

Questo sub-complesso racchiude i Subsintemi della Serra Interno ed Esterno, includendo pertanto tutti i materiali che costituiscono i rilievi morenici e i depositi fluvioglaciali delle porzioni esterne. I livelli più grossolani sono caratterizzati da una permeabilità primaria per porosità pari 10^{-5} m/s. Localmente sono presenti livelli metrici di materiali fini (argille e limi di origine glaciolacustre), con una permeabilità più bassa (10^{-7} m/s), che danno origine a falde sospese. Si tratta nell'insieme di un acquifero che ospita una falda a superficie libera, limitata alla base da un livello a maggiore componente fine, che funge da acquitardo e che separa il Subcomplesso Gs dal sottostante Complesso C.

5.2.2 Sub-complesso del Sintema di Piverone (Gp)

SI tratta dei depositi glaciali e fluvioglaciali del Subsintema di Piverone. I depositi glaciali presentano un'abbondate frazione sabbioso-limosa, con frequenti livelli limoso-argillosi di origine glaciolacustre. I depositi fluvioglaciali sono caratterizzati dalla presenza di livelli limosi intercalati a livelli sabbiosi e ghiaiosi. I depositi glaciali caratterizzano le porzioni interne dei rilievi morenici ed il settore del Lago di Candia, mentre quelli fluvioglaciali occupano la porzione interna della piana intramorenica. I depositi fluvioglaciali presentano una permeabilità variabile in funzione della granulometria (10^{-3}-10^{-7} m/s) e costituiscono nell'insieme un acquifero che ospita una falda a superficie libera.

5.3 Complesso dei depositi alluvionali recenti (A)

Il Complesso dei depositi alluvionali recenti è limitato all'attuale corso del Fiume Dora Baltea e a piccoli apparati di conoide lungo i versanti; è rappresentato da ciottoli, ghiaie con livelli fini di limi-sabbiosi e limi. Ha uno spessore compreso tra 10 m e 20 m. Presenta una permeabilità primaria per porosità medio-alta (10^{-2}-10^{-5} m/s) e ospita una falda a superficie libera in equilibrio con il reticolo idrografico superficiale.

6 Idrogeologia dell'area di studio

Sulla base dai dati stratigrafici e idrogeologici disponibili per l'area di studio è possibile definire un modello idrogeologico di riferimento sulla base del quale sono stati individuati dei punti di misura del livello della falda, in corrispondenza dei quali sono state condotte campagne di rilevazione tra i mesi di marzo e ottobre 2019.

I dati relativi alla superficie piezometrica delle fonti consultate indicano un moto che dai rilievi converge verso l'asta del Fiume Dora Riparia. Nelle figure seguenti sono riportate le ricostruzioni proposte dai vari studi condotti nell'area.

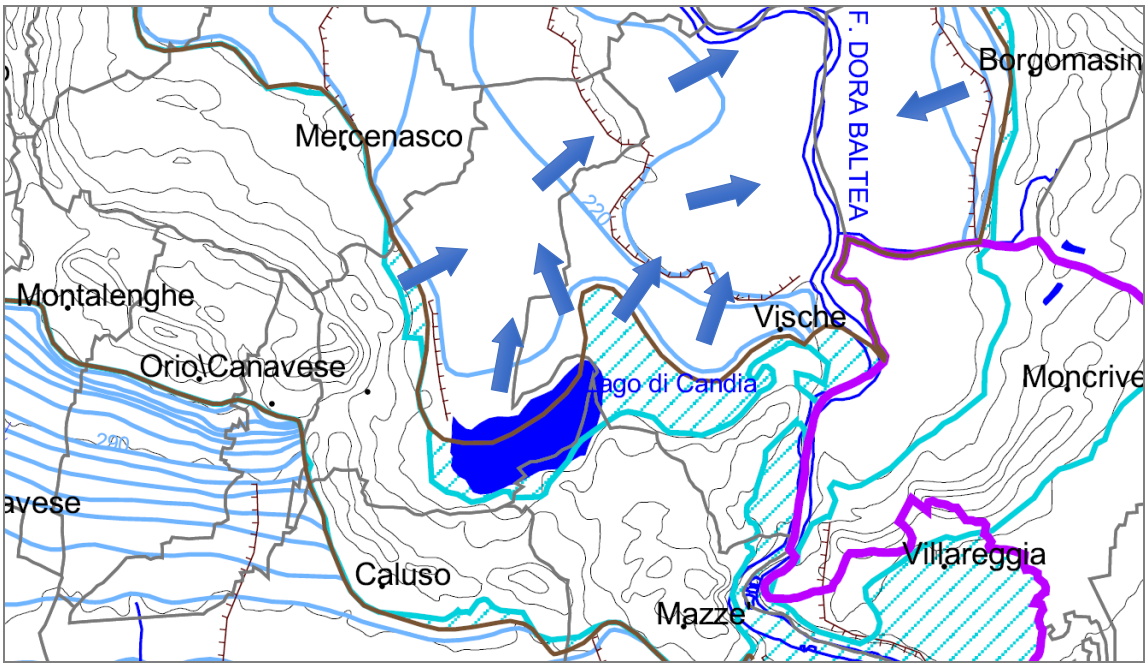


Figura 12 - Stralcio della carta delle isopiezometriche della falda idrica a superficie libera (da Bove et al., 2004, modificato). Le frecce azzurre indicano la direzione del moto della falda superficiale.

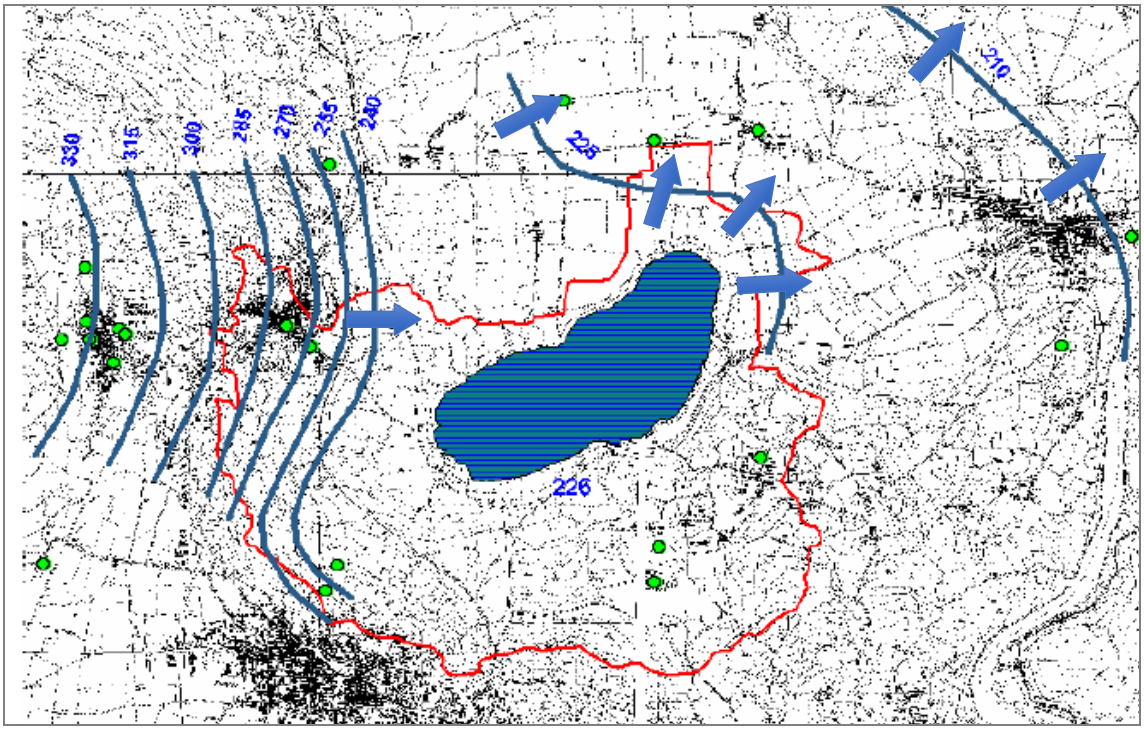


Figura 13 – Carta delle isopeizometriche definite nell'ambito del Progetto MI.CA.RI. (da Ciampitiello et al., 2004, modificato). Le frecce azzurre indicano la direzione del moto della falda superficiale. I circoli verdi indicano i punti di rilevazione del livello della falda. Il perimetro rosso indica il limite del bacino idrografico del Lago di Candia.

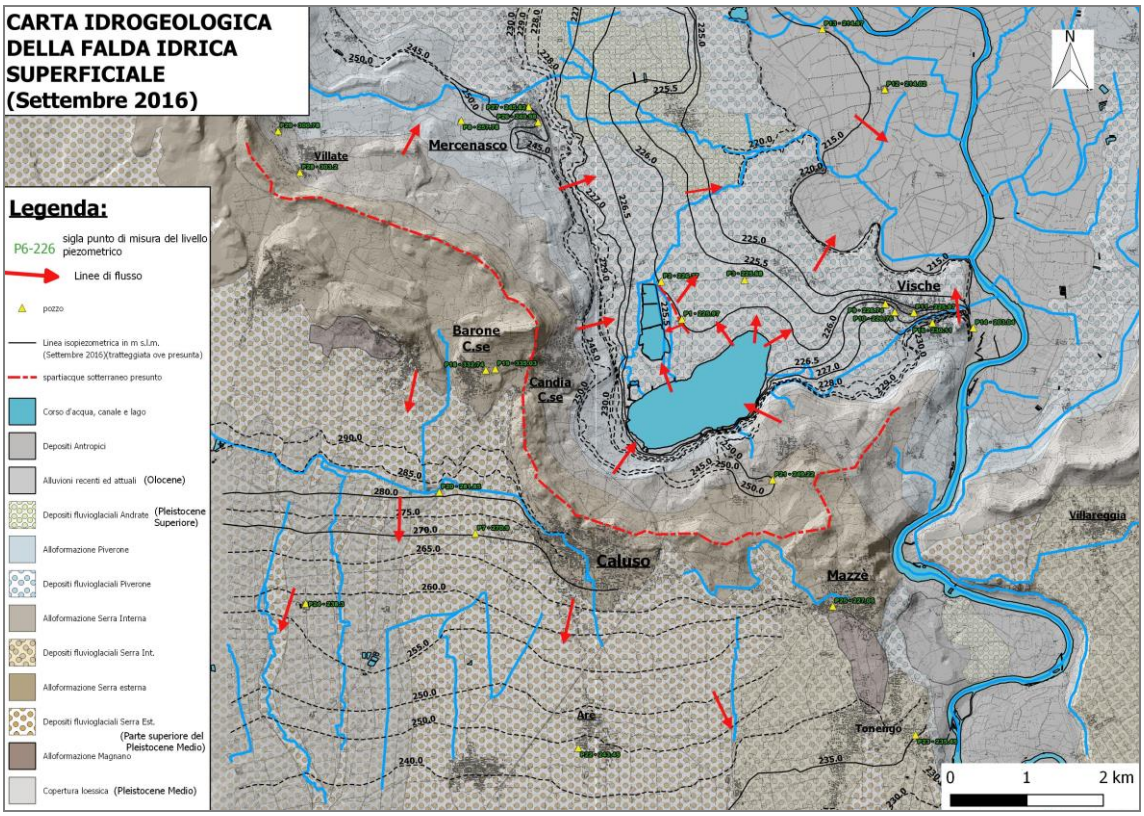


Figura 14 . Carta delle isopeizometriche definite nell'ambito dello Studio idrogeologico dell'area del Lago di Candia (da Vacca, 2016). Le frecce rosse indicano la direzione del moto della falda superficiale.

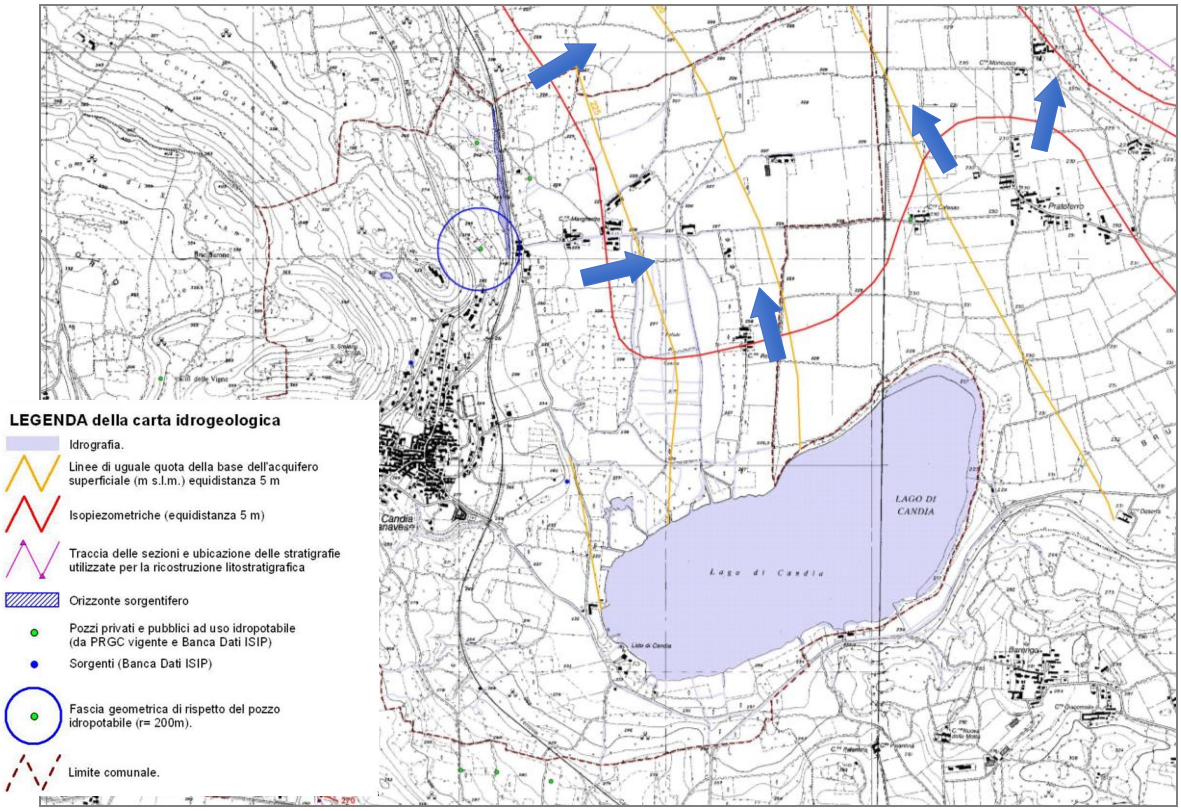


Figura 15 – Estratto della Carta Idrogeologica del PRGC del Comune di Candia. Le frecce azzurre indicano la direzione del moto della falda superficiale.

6.1 Rilevazioni del livello della falda

Al fine di approfondire le conoscenze circa le dinamiche connesse alla falda superficiale è stata definita una rete di monitoraggio costituita da alcuni dei pozzi considerati nello studio idrogeologico del Lago di Candia (Vacca, 2016). Tali punti sono stati integrati da piezometri realizzati specificamente per il presente studio. I piezometri sono stati installati in fori realizzati con penetrometro pesante, per raggiungere una profondità di 6 m dal piano campagna. Solo in un caso, per il piezometro installato nella palude[1], è stata raggiunta una profondità di 10 m dal piano campagna. In fase di esecuzione delle indagini è stata registrata la resistenza dei terreni alla penetrazione al fine di ottenere delle informazioni circa la natura dei terreni (Appendice 1). Al fine di analizzare le relazioni tra le acque sotterranee e le acque del lago, nella rete di monitoraggio è stato incluso l'idrometro presente in corrispondenza dello stramazzo realizzato all'origine del Rio Traversaro.

Le campagne di misura sono state condotte nei mesi di maggio 2019, luglio 2019 e ottobre 2019. Le misurazioni sono state eseguite con sondino elettrico.

I dati dei punti di rilevazione sono riportati nella tabella seguente.

[1] Il piezometro è stato installato nel mese di settembre 2019. I dati relativi ai mesi precedenti riferiti all'area della palude derivano pertanto da interpolazione statistica dei valori rilevati presso gli altri piezometri della rete di monitoraggio.

Codice	Tipo	Comune	X	Y	Quota
P1	Pozzo	Candia C.se	414.338	5.020.627	227,5
P2	Pozzo	Candia C.se	414.112	5.021.120	227,3
P3	Pozzo	Vische	415.200	5.021.137	230
P4	Pozzo	Vische	415.108	5.021.191	230
P5	Pozzo	Vische	416.122	5.021.174	230
P6	Pozzo	Vische	416.887	5.020.848	231
P9	Pozzo	Vische	417.048	5.020.930	231
P10	Pozzo	Vische	417.170	5.020.725	231
P11	Pozzo	Vische	417.419	5.020.718	231
P15	Pozzo	Vische	417.217	5.020.458	230
P16	Pozzo	Vische	417.663	5.020.581	233
P20	Pozzo	Barone C.se	411.204	5.018.369	286
P21	Pozzo	Mazze'	415.569	5.018.531	276,5
PZ 01	Piezometro	Candia C.se	413.662	5.019.034	229
PZ 02	Piezometro	Candia C.se	416.176	5.020.085	230
PZ 03	Piezometro	Candia C.se	416.678	5.020.537	229
PZ 04	Piezometro	Candia C.se	415.717	5.020.497	229
PZ 05	Piezometro	Candia C.se	415.650	5.021.056	230
PZ06	Piezometro	Candia	413.878	5.020.502	225
PZ07	Piezometro	Candia	414.338	5.020.253	227
SI 01	Scala idrometrica	Candia C.se	414.141	5.019.993	226

Tabella 3 – Dati dei punti di rilevazione

Nella figura seguente sono riportati i punti della rete di monitoraggio.

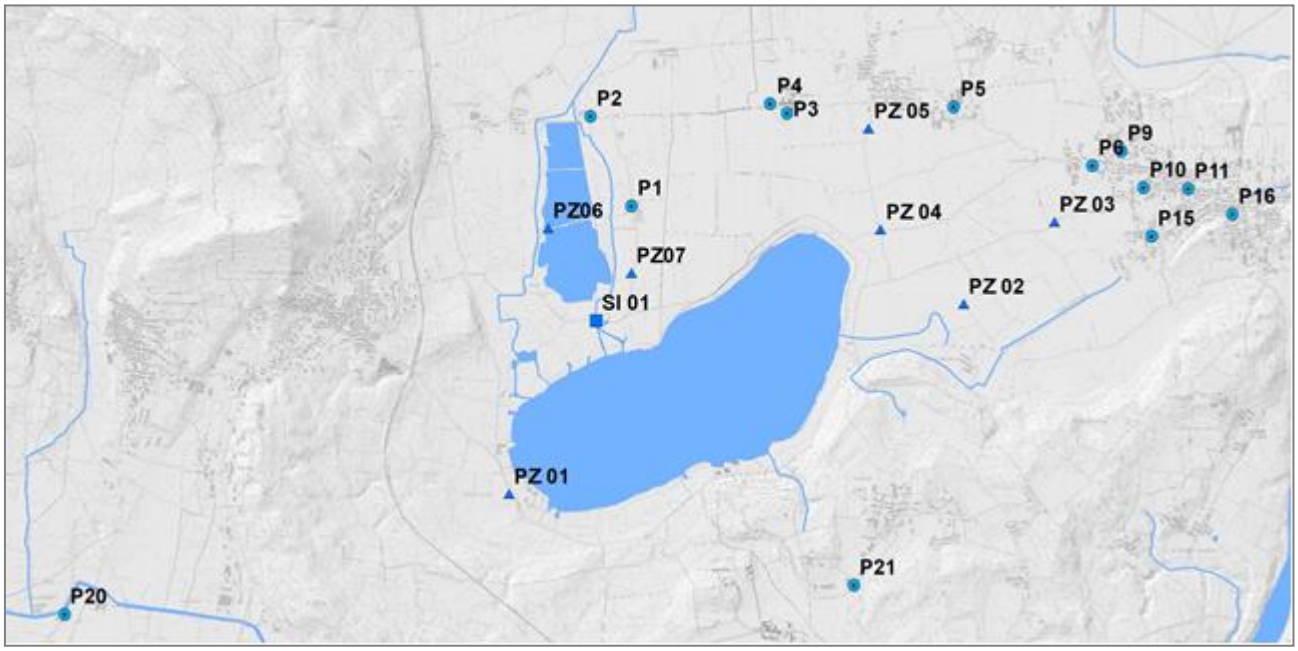


Figura 16 – Ubicazione dei punti per la rilevazione del livello della falda.

I valori di soggiacenza (m dal piano campagna) e la quota assoluta della falda (m s.l.m.) sono riportati nella tabella seguente.

Codice	Maggio 2019		Luglio 2019		Ottobre 2019	
	Sogg. (m dal p.c)	Quota (m s.l.m.)	Sogg. (m dal p.c)	Quota (m s.l.m.)	Sogg. (m dal p.c)	Quota (m s.l.m.)
P1	1,85	225,65	1,93	225,57	-	-
P2	1,8	225,50	1,8	225,5	-	-
P3	4,48	225,52	-	-	-	-
P4	-	-	-	-	-	-
P5	4,7	225,30	4,75	225,25	-	-
P6	3	228,00	2,9	228,1	3,15	227,85
P9	4,15	226,85	4,05	226,95	-	-
P10	3,45	227,55			-	-
P11	-	-	-	-	-	-
P15	3,82	226,18	4,65	225,35	5,56	224,44
P16	3	230,00	3,02	229,98	2,76	230,24
P20	5,9	280,10	5,1	280,9	6,45	279,55
P21	27,15	249,35	27,47	249,03	27,40	249,1
PZ 01	1,96	227,00	-	-	-	-
PZ 02	2,3	227,39	-	-	-	-
PZ 03	1,65	227,83	1,9	227,58	-	-
PZ 04	2,85	226,19	2,86	226,18	2,22	226,82
PZ 05	4,25	225,75	4,36	225,64	-	-
PZ 06	-	-	-	-	0,82	224,56
PZ07	-	-	-	-	1,18	225,95
SI 01	0,62	226,62	0,43	226,43	0,29	226,29

Tabella 4 – Valori di soggiacenza e quota assoluta della falda

Nelle figure seguenti è proposta una ricostruzione del livello della falda sulla base delle rilevazioni effettuate.

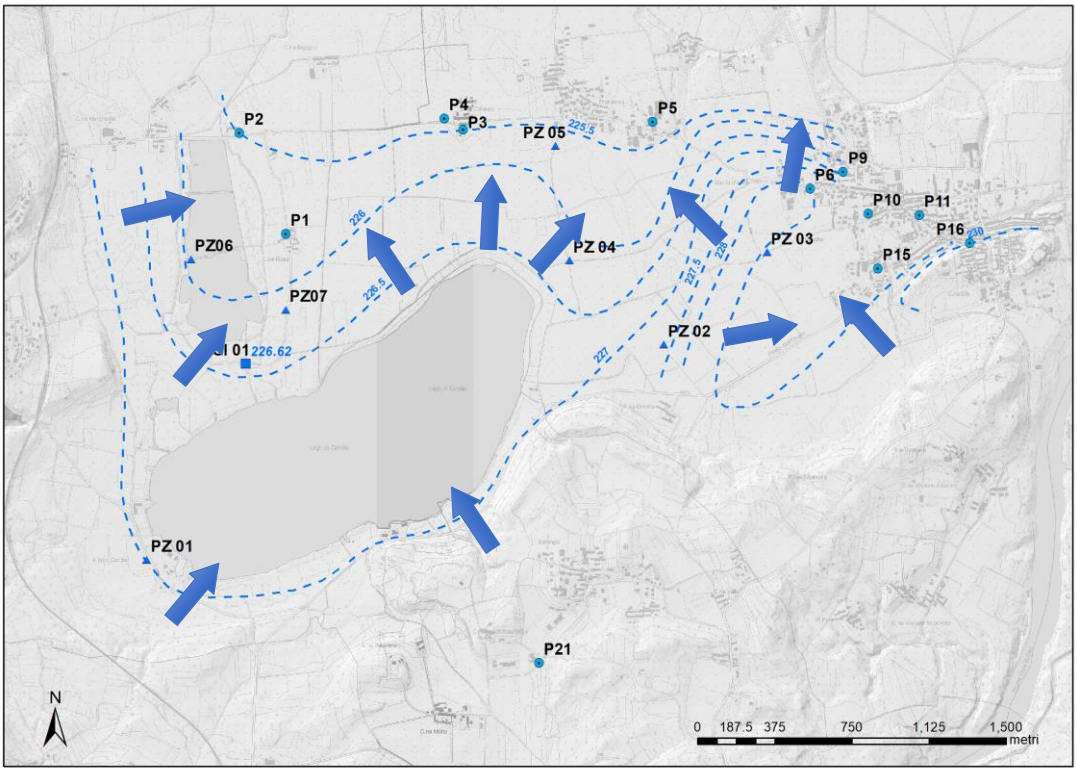


Figura 17 – Carta idrogeologica relativa al mese di maggio 2019. Accanto al punto S01 (misura del livello del lago) è indicato il livello in m s.l.m. Le frecce blu indicano la direzione del moto della falda.

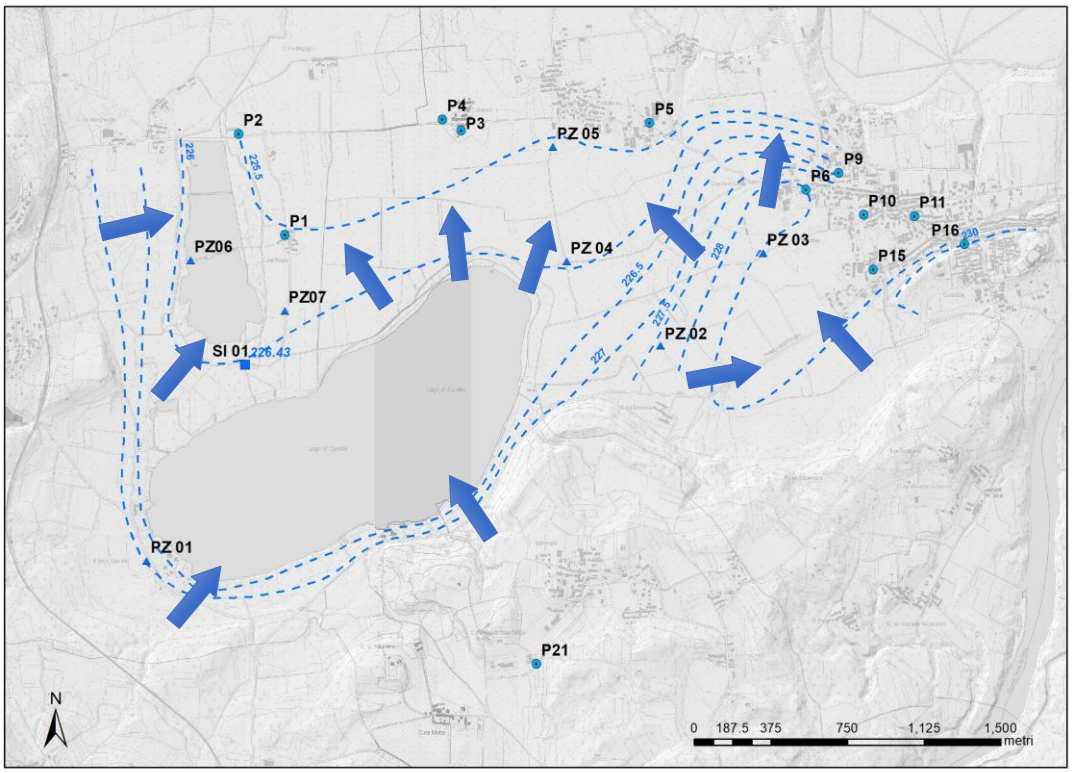


Figura 18 – Carta idrogeologica relativa al mese di luglio 2019. Accanto al punto S01 (misura del livello del lago) è indicato il livello in m s.l.m. Le frecce blu indicano la direzione del moto della falda.

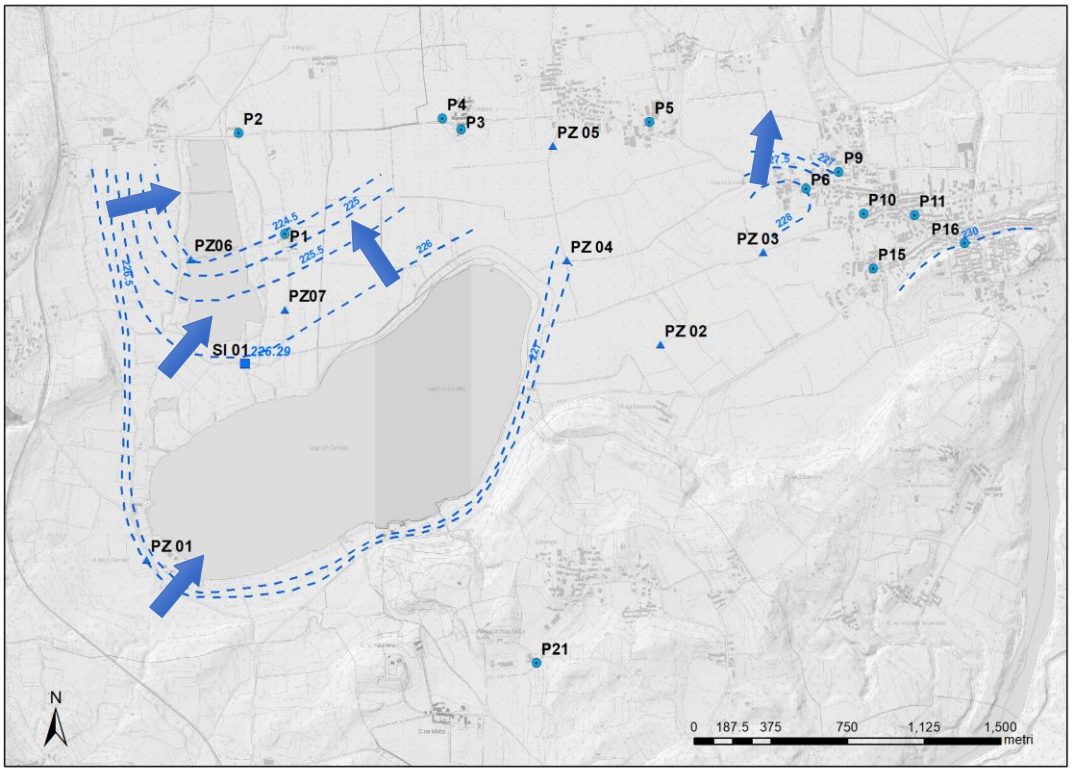


Figura 19 – Carta idrogeologica relativa al mese di ottobre 2019. Accanto al punto S01 (misura del livello del lago) è indicato il livello in m s.l.m. Le frecce blu indicano la direzione del moto della falda.

Le rilevazioni condotte evidenziano un moto della falda coerente con quello indicato dagli studi precedenti. In particolare, nel settore a est del Lago di Candia, sembra trovarsi una zona di alimentazione della falda che determina direzioni di flusso divergenti, una rivolta verso la zona del lago e una rivolta verso l'alveo del Fiume Dora Baltea. Tale condizione è stata rilevata per i mesi di maggio e luglio, sulla base delle misure presso i punti PZ02, PZ03, P6, P10 e P15. La ridotta disponibilità di rilevazioni per il mese di ottobre[2] non conferma questo assetto, anche se in corrispondenza del pozzo P6 è comunque rilevato un livello della falda coerente con la distribuzione delle misure dei mesi precedenti. In relazione alla palude a nord del lago, le misurazioni confermano la diretta connessione al sistema acque superficiali (lago, palude, canali irrigui) - acque sotterranee. In considerazione della soggiacenza della falda, che risulta più bassa del fondo della palude, gli apporti dal Lago di Candia sono fondamentali per garantire la presenza di acqua. In assenza di questi apporti la tendenza sarebbe quella di un trasferimento per infiltrazione in falda delle acque della palude, che unitamente ai processi di evaporazione porterebbero al progressivo prosciugamento di questo settore.
In termini quantitativi si osserva una riduzione del livello della falda tra i mesi di maggio e luglio 2019. Tale trend è parzialmente riferibile anche al mese di ottobre 2019, limitatamente ai settori per i quali i dati hanno consentito la ricostruzione del livello piezometrico. Tale condizione appare connessa al regime pluviometrico, alla base dei processi di ricarica degli acquiferi dell'area di

[2] Nel corso delle rilevazioni condotte per questo mese l'accesso ad alcuni pozzi non è stato possibile in quanto i proprietari non erano disponibili nel periodo delle rilevazioni.

studio e che influenza il livello idrometrico del Lago di Candia. Infatti, sulla base dei dati meteo disponibili (limitati al 30/06/2019 al momento della redazione del presente elaborato), coerentemente con i dati meteorologici e idrometrici relativi al periodo 2000-2018 (si veda il par. 3), tra il periodo primaverile e quello dell'inizio del periodo estivo è registrata una riduzione delle precipitazioni giornaliere, che spiegherebbe la riduzione del livello della falda e del lago.
Le rilevazioni condotte indicherebbero una stretta connessione tra le acque sotterranee e le acque del lago, quindi anche quelle della palude (alimentata dalle portate del Rio Traversaro), che andrebbero a definire un sistema unico, condizionato dagli apporti delle precipitazioni e delle perdite connesse in prevalenza a fenomeni di evaporazione e prelievi per uso irriguo.

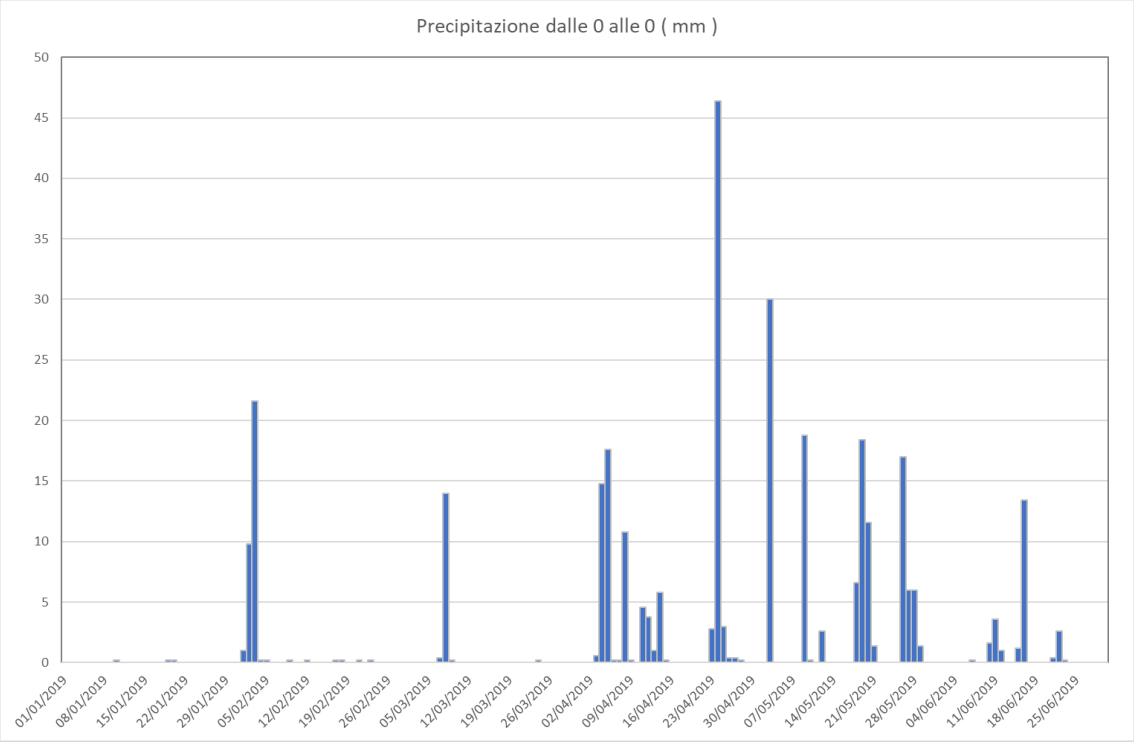


Figura 20 – Livello di precipitazione giornaliera registrato dalla stazione meteo presente in prossimità del Lago di Candia, per il periodo gennaio-giugno 2019. Tra il mese di aprile e il mese di giugno è rilevata una riduzione significativa delle precipitazioni.

L'osservazione parziale sui dati del 2019, in particolare circa la correlazione tra il livello del lago e quello delle precipitazioni è confermata dalle serie giornaliere dei due parametri per il periodo 2000-2018.

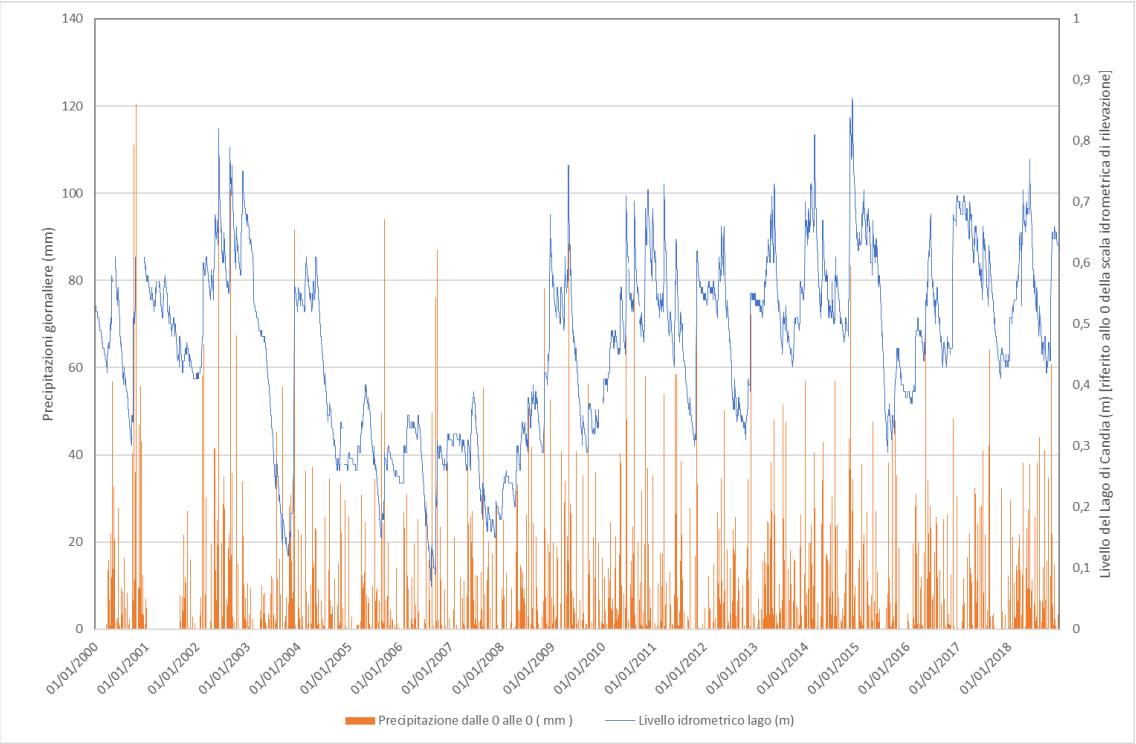


Figura 21 – Precipitazioni giornaliere e livello idrometrico del lago per il periodo 2000-2018.

6.2 Caratteristiche idrogeochimiche della falda superficiale e dei corpi idrici superficiali

Lo studio condotto non ha incluso analisi chimico-fisiche delle acque. Al fine di fornire un quadro esaustivo delle componenti ambientali considerate, vengono di seguito riportati i risultati dello studio idrogeologico del Lago di Candia condotto nel 2016 (Vacca, 2016) e i dati relativi al monitoraggio della qualità delle acque del lago condotto da ARPA Piemonte.

6.2.1 Studio idrogeologico del Lago di Candia (Vacca, 2016)

Le analisi effettuate nello studio citato hanno riguardato i seguenti parametri:

- Conducibilità elettrolitica;
- pH;
- alcalinità;
- titolazione di ioni Calcio e Magnesio;
- analisi al cromatografo ionico con soppressione chimica;
- analisi allo spettrofotometro per emissione atomica.
-

I risultati per i deversi parametri analizzati sono i seguenti:
Conducibilità: lo studio evidenzia valori più elevati per le acque prelevate dai pozzi (tra 400 µS/cm e 600 µS/cm), mentre indica valori inferiori per le acque di sorgente (zone di versante della collina morenica), delle acque superficiali e del Lago di Candia. Per quest'ultimo la minore mineralizzazione è associata a fenomeni di diluizione ad opera delle acque piovane.
pH: i valori del pH delle acque campionate sono compresi tra 7,5 e 8,2.

Ione Calcio: la concentrazione dello ione calcio della falda acquifera superficiale è compresa tra 7 e 127 mg/l, con valori generalmente minori di 60 mg/l. Si registrano i valori più elevati nella zona compresa tra l'abitato di Vische e il Lago di Candia.
Magnesio: le concentrazioni rilevate presentano valori contenuti, inferiori a 39 mg/l. I valori più elevati sono stati rilevati per le acque dei pozzi ubicati nei centri abitati di Vische e Mercenasco.
Alcalinità: l'alcalinità della falda superficiale dell'area di studio è legata alla presenza dello ione HCO_3^-, il quale deriva dalla CO_2 atmosferica o dalla dissoluzione dei carbonati. I valori più elevati sono stati rilevati per le acque dei pozzi ubicati nei centri abitati di Vische e nel pozzo P1 a nord del Lago di Candia.
Cloruri: nell'area di studio la concentrazione dei cloruri risulta generalmente inferiore a 30 mg/l ed è associata a input di tipo meteorico. Per l'abitato di Vische sono stati registrati valori superiori (75 mg/l) associabili a molteplici fattori antropici (fertilizzazione e irrigazione, scarichi fognari, contaminazioni industriali e scarichi industriali).
Solfati: le concentrazioni rilevate presentano valori inferiori a 119 mg/l. I livelli più alti sono registrati in prossimità dei settori più antropizzati. L'origine dei solfati può essere sia naturale che antropica. Nell'area di studio i valori più elevati possono essere dovuti sia ad una circolazione idrica in acquiferi con un certo contenuto argilloso, sia ad un'immissione antropica dovuta all'utilizzo di fertilizzanti e a scarichi inquinanti.
Nitrati: la concentrazione dei nitrati risulta essere bassa nelle acque del lago e nei settori prossimi ad esso (< 10 mg/l), mentre aumenta nelle zone a nord del bacino ed in corrispondenza delle sorgenti censite a est di C.ne Margherita, probabilmente per fenomeni di lisciviazione in falda connessa ad attività agricole lungo il versante della collina morenica.
Sodio: la concentrazione risulta generalmente inferiore a 16 mg/l, con un valore massimo di 32 mg/l. I valori più elevati sono registrati per punti di misura in zone a maggiore antropizzazione.
Potassio: le concentrazioni presentano valori compresi tra 1,5 mg/l e 3,0 mg/l, con un valore massimo di circa 9 mg/l (1 punto di misura). I valori maggiori possono essere connessi all'impiego di fertilizzanti seguito da lisciviazione in falda.
Facies idrogeochimiche: le concentrazioni degli ioni disciolti indicano per tutte le acque analizzate (superficiali e sotterranee) un'unica facies idrogeochimica bicarbonato calcico/magnesiaca. In questa facies è possibile identificare due sottogruppi: uno che include acque meno evolute (minore mineralizzazione) appartenenti al reticolo idrografico superficiale e uno che include le acque di falda, più evolute (maggior grado di mineralizzazione).

Lo studio riporta anche i risultati delle analisi di parametri chimico-fisici rilevati nel Lago di Candia lungo diverse verticali (Conducibilità elettrica, pH, Eh, ossigeno disciolto), che indicano una massa d'acqua omogenea che non subisce frequenti ricambi, ad eccezione dei contributi legati ai processi di ricarica da parte delle acque sotterranee lungo il margine meridionale del lago.

6.2.2 Monitoraggio della qualità delle acque del Lago di Candia

I risultati delle attività di monitoraggio delle acque del lago, riferiti al periodo 2009-2018 sono sintetizzati nella tabella seguente.

Parametro	min	max	media	dev.st
Conducibilità (µS/cm a 20°C)	340,50	115,30	**155,75**	48,07
pH (Unità di pH)	9,51	6,48	**8,03**	0,70
Alcalinità (mg/L $Ca(HCO_3)_2$)	160,00	62,00	**91,80**	18,30
Azoto ammoniacale (mg/L N)	4,20	0,02	**0,69**	0,90
Azoto nitrico (mg/L N)	0,30	0,10	**0,20**	0,10
Azoto nitroso (mg/L N)	0,01	-	**-**	-
Azoto totale (mg/L N)	5,40	0,60	**1,85**	1,04
Cloruri (mg/L)	10,10	4,40	**5,09**	0,88
Fosforo totale (µg/L P)	150,00	11,00	**30,04**	27,99
Ortofosfati (µg/L P)	50,00	4,00	**18,00**	19,89
Ossigeno disciolto (% di saturazione)	147,30	0,40	**75,88**	45,96
Solfati (mg/L)	7,10	1,20	**3,09**	1,17

Tabella 5 – Risultati del monitoraggio della qualità delle acque (2009-2018)

7 Valutazione della ricarica attiva dell'acquifero

Sulla base dei dati di precipitazione e di temperatura rilevati dalla stazione meteorologica presente presso il Lago di Candia viene proposta l'applicazione di un modello basato sulla tecnica del bilancio idrogeologico inverso, per la valutazione della ricarica attiva dell'acquifero esaminato.
Con riferimento alle condizioni sito specifiche, il calcolo è articolato nelle seguenti fasi:

1) Calcolo della temperatura media annua, Tm, e della Precipitazione media annua, Pm.
2) Calcolo della temperatura media interannuale corretta, Tmc, in funzione della piovosità.
3) Calcolo dell'evapotraspirazione reale Er secondo la relazione proposta da Turc (1954).
4) Calcolo della piovosità efficace Pe.
5) Individuazione del coefficiente di infiltrazione efficace ⍰s in base al metodo SCS del Curve Number (CN).
6) Calcolo dell'infiltrazione efficace, Im.
7) Calcolo della ricarica attiva dell'acquifero in funzione della superficie, A, del bacino di alimentazione.

La temperatura media interannuale corretta è calcolata secondo la seguente relazione:

$$Tmc = (\sum Pi \times Ti) / \sum Pi \qquad [°C]$$

Dove Pi è la precipitazione media mensile e Ti è la temperatura media mensile.

L'evapotraspirazione reale Er è calcolata secondo la seguente relazione:

$$Er = Pm / (\sqrt{(0,9 + (Pm^2 / L^2))}) \qquad [mm/anno]$$

In cui:

$$L \text{ (potere evaporante dell'atmosfera)} = 300 + 25 \times Tmc + 0,05\ Tmc^3$$

Nota Er, la precipitazione efficace, Pe, è data dalla seguente relazione:

$Pe = Pm – Er$ [mm/anno]

Individuato il coefficiente di infiltrazione χ_s secondo il metodo SCS, basato sul valore del Curve Number (CN)., si calcola l'infiltrazione media interannuale:

$Im = Pe \times \chi_s$ [mm/anno]

Il valore di infiltrazione riportato alla superficie del bacino di alimentazione definisce il valore della ricarica attiva dell'acquifero, R.A.

7.1 Ricarica attiva media annua

I dati di temperatura e precipitazione media mensile per il periodo 2002-2018 sono quelli riportati in Tabella 2. I valori dei parametri utili al calcolo della ricarica attiva (R.A.) media annua dell'acquifero sono riportati nella tabella seguente.

Parametro	Valore	U.M:
L	729,64	-
Er	**593,99**	mm/anno
Pe	**376,33**	mm/anno
χ_s	0,74	-
Is	**277,41**	mm/anno
A	12.007.793	m^2
R.A.	3.331	Mm^3/anno

Tabella 6 – Valori dei parametri del calcolo della ricarica attiva dell'acquifero.

Sulla base dei valori di Tabella 6, la ricarica attiva media annua dell'acquifero è pari a 3.331 milioni di m^3/anno.

7.1.1 Andamento della ricarica attiva annuale (periodo 2002-2018)

In funzione dei valori di temperatura e precipitazione media mensile registrate per il periodo 2002-2018 sono stati calcolati i valori di ricarica attiva annua dell'acquifero. I risultati del calcolo sono riportati nella tabella seguente.

Anno	L	Er (mm/anno)	Pe (mm/anno)	Is (mm/anno)	R.A. (Mm^3)
2002	746,53	**665,70**	**729,70**	**537,89**	6.458,83
2003	564,74	**464,43**	**309,97**	**228,49**	2.743,67
2004	688,07	**481,79**	**158,41**	**116,77**	1.402,13
2005	854,01	**519,00**	**101,00**	**74,45**	893,95
2006	748,03	**516,74**	**161,26**	**118,87**	1.427,36
2007	880,18	**553,93**	**122,27**	**90,13**	1.082,28
2008	650,05	**574,19**	**587,81**	**433,29**	5.202,86

Anno	L	Er (mm/anno)	Pe (mm/anno)	Is (mm/anno)	R.A. (Mm³)
2009	681,85	**581,31**	**473,89**	**349,32**	4.194,51
2010	706,59	**625,95**	**654,05**	**482,12**	5.789,22
2011	719,49	**586,79**	**375,21**	**276,58**	3.321,11
2012	768,71	**587,20**	**276,00**	**203,44**	2.442,92
2013	703,55	**597,50**	**476,10**	**350,95**	4.214,12
2014	694,32	**623,75**	**723,45**	**533,27**	6.403,44
2015	717,04	**542,60**	**244,80**	**180,45**	2.166,82
2016	758,77	**646,31**	**524,09**	**386,32**	4.638,85
2017	934,70	**565,93**	**108,67**	**80,10**	961,85
2018	850,79	**727,01**	**600,79**	**442,86**	5.317,76

Tabella 7 – Valori della ricarica attiva dell'acquifero superficiale per gli anni relativi al periodo 2002-2018.

Prendendo in considerazione il livello medio annuo del Lago di Candia, calcolato sulla base dei valori misurati presso la stazione di rilevazione presente nell'area di studio, si osserva come esso sia strettamente correlato ai valori di ricarica attiva dell'acquifero (Figura 22 e Figura 23).

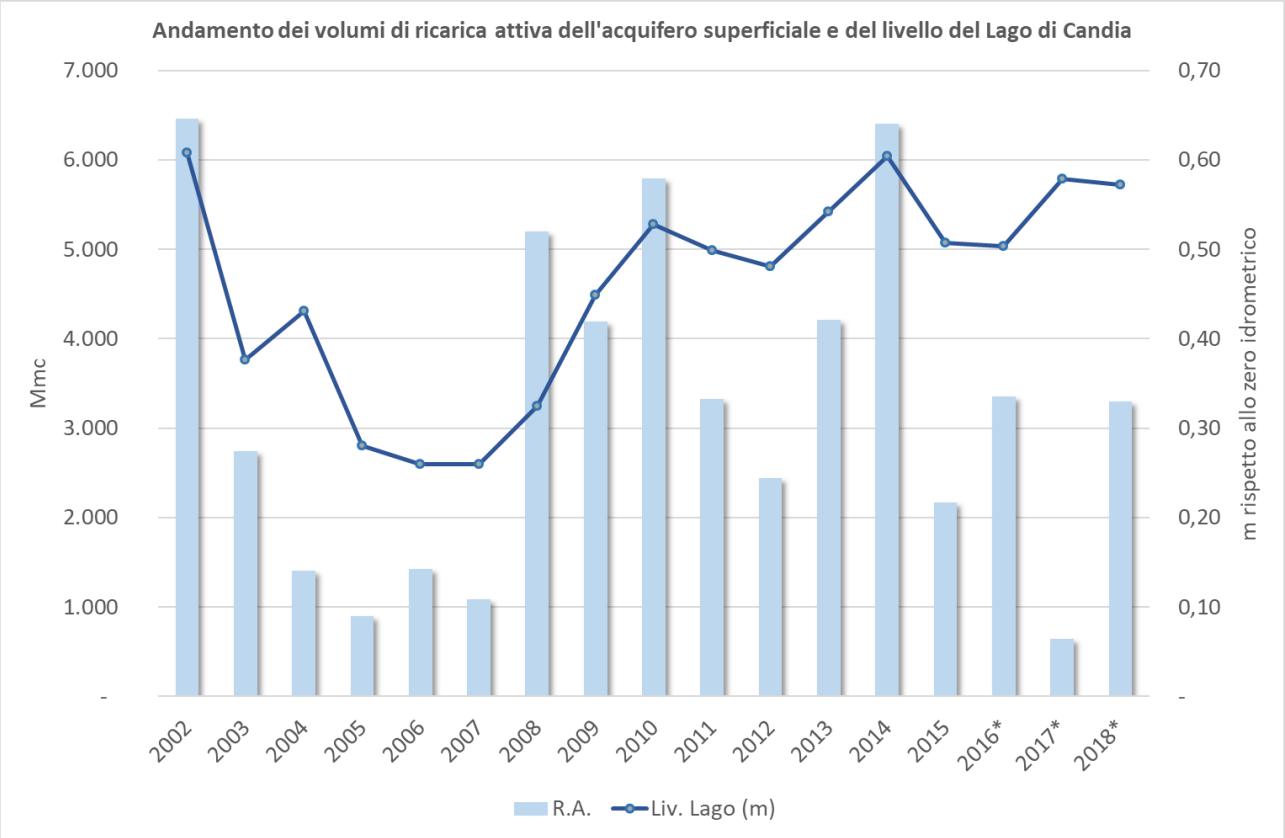


*Figura 22 – Valori di ricarica attiva annua dell'acquifero (asse di destra) e valori del livello del Lago di Candia (asse di sinistra). * per gli anni 2016, 2017 e 2018 sono stati considerati i dati della stazione meteorologica sita nel comune di Caluso, in quanto i dati della stazione di Candia risultavano incompleti e non applicabili per il calcolo dei valori annui.*

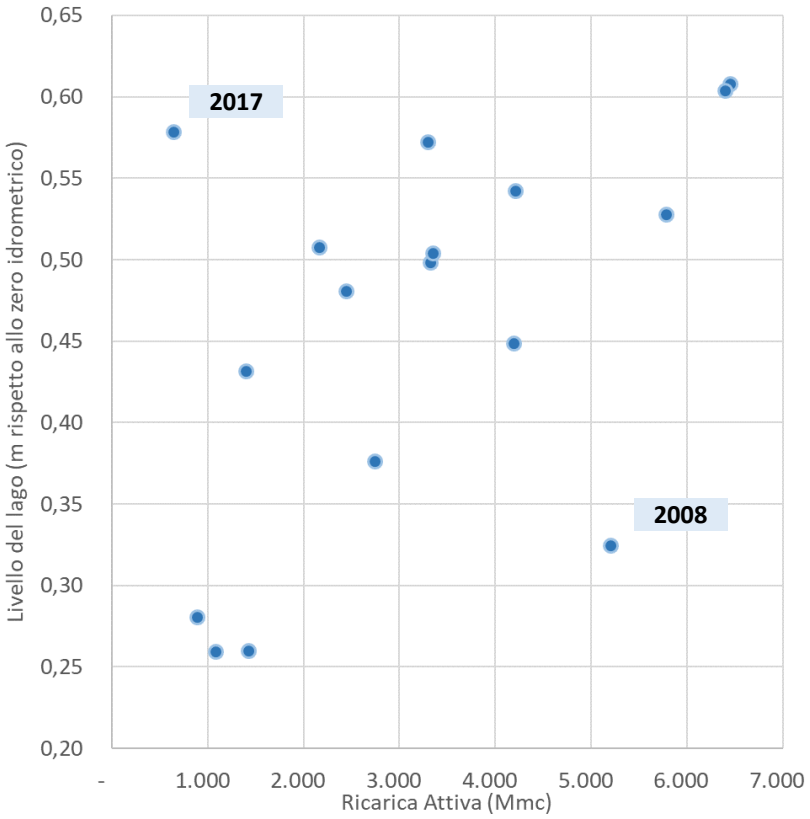


Figura 23 – Diagramma di dispersione dei valori della ricarica attiva dell'acquifero superficiale e del livello del Lago di Candia rispetto allo zero idrometrico della scala idrometrica di rilevazione. Sono indicati gli anni relativi alle coppie di valori che determinano la presenza dei due potenziali outlier.

L'esame dei grafici mostra la correlazione esistente tra i due parametri. In particolare, si rileva una generale coincidenza tra le variazioni (in aumento o diminuzione) del livello del lago rispetto al volume di ricarica ad indicare una stretta connessione tra il corpo idrico superficiale e le acque di falda.

Il diagramma di dispersione di Figura 23 evidenzia la presenza di due potenziali *outlier* relativi agli anni 2008 e 2017. Nel primo caso si rileva un livello medio annuo del lago di 0,32 m, a fronte di una ricarica attiva consistente (5.032 Mm^3), mentre nel secondo caso si registra il fenomeno opposto, con un livello medio annuo di 0,58 m a fronte di una ricarica media annua modesta (644 Mm^3).

Le condizioni rilevate all'anno 2008 sono riferibili al ridotto volume di ricarica registrato l'anno precedente (2017: 1.082 Mm^3), per il quale si osserva una costante diminuzione del livello del lago (Figura 24). In questo contesto, la ricarica dell'anno 2008 e le temperature medie mensili, sempre inferiori a 25 °C, definiscono condizioni di bilancio positivo, che compensano il trend negativo del 2007, determinando una crescita costante del livello medio mensile del lago che passa da 0,22 m (gennaio) a 0,55 m (dicembre). Il bilancio positivo si mantiene con la ricarica dell'acquifero registrata per i primi sei mesi del 2009 e temperature medie mensili sempre inferiori a 25 °C (anche per il periodo estivo): la concomitanza di queste condizioni determina per questo anno un livello medio del lago superiore a quello del 2008, anche a fronte di un volume di ricarica attiva inferiore (4.195 Mm^3).

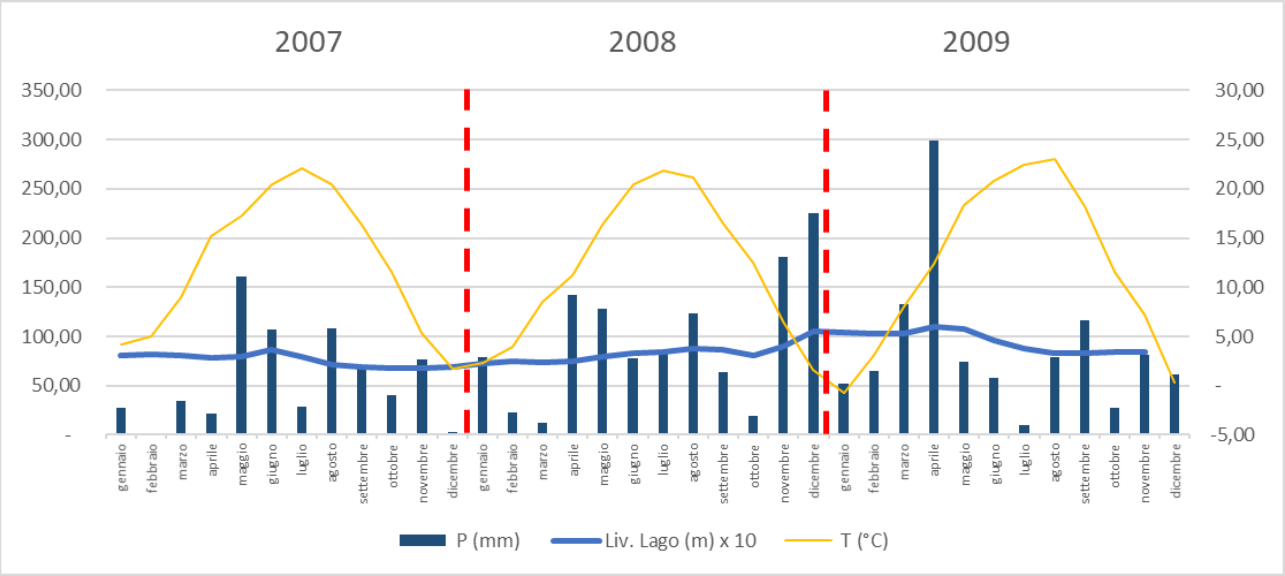


Figura 24 – Valori di precipitazione media mensile (scala graduata a sinistra), del livello medio mensile del Lago di Candia (scala graduata a destra) e di temperatura media mensile (scala graduata a destra) per gli anni 2007, 2008 e 2009.

Per l'anno 2017 (Figura 25), la consistente ricarica relativa al 2016 (3.354 Mm^3), unita a quella dei primi sei mesi dell'anno e ad un regime delle temperature medie mensili sempre inferiori a 25°C, determinano un bilancio prevalentemente positivo per il bacino lacustre, con un livello medio annuo pari a 0,58 m, superiore a quello del 2016 (0,50 m).

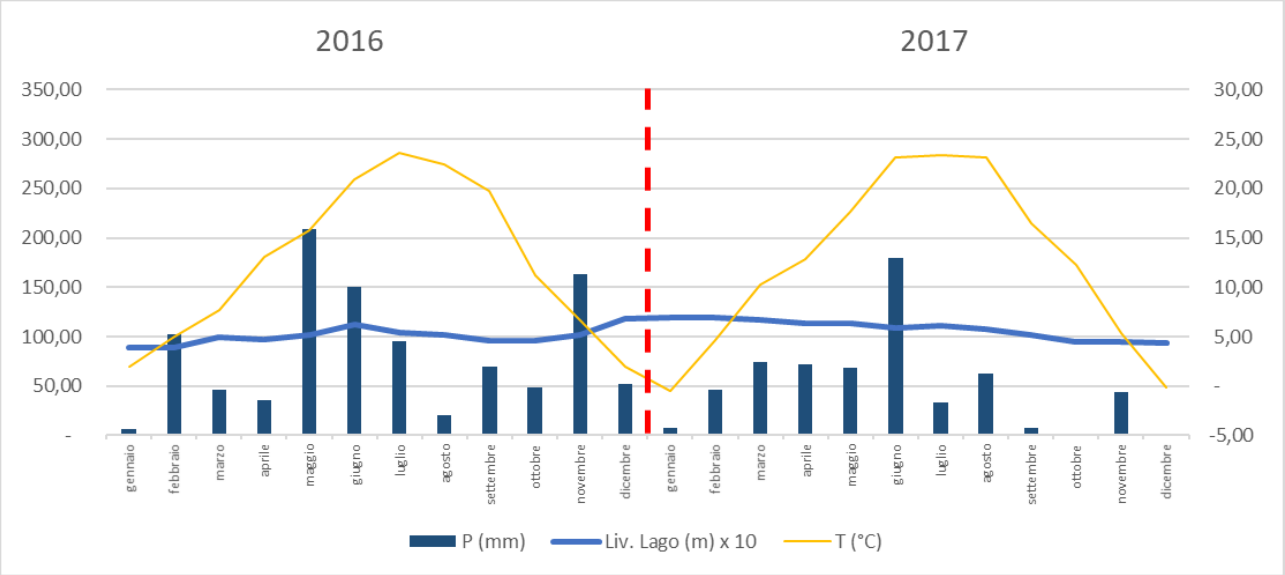


Figura 25 – Valori di precipitazione media mensile (scala graduata a sinistra), del livello medio mensile del Lago di Candia (scala graduata a destra) e di temperatura media mensile (scala graduata a destra) per gli anni 2016 e 2017.

In base alle considerazioni esposte circa le ragioni che possono spiegare i due *outlier*, escludendo dalle serie le coppie di dati relativi agli anni 2008 e 2017, la correlazione tra **precipitazioni-ricarica acquifero** e **livello del lago** risulta evidente (Figura 26).

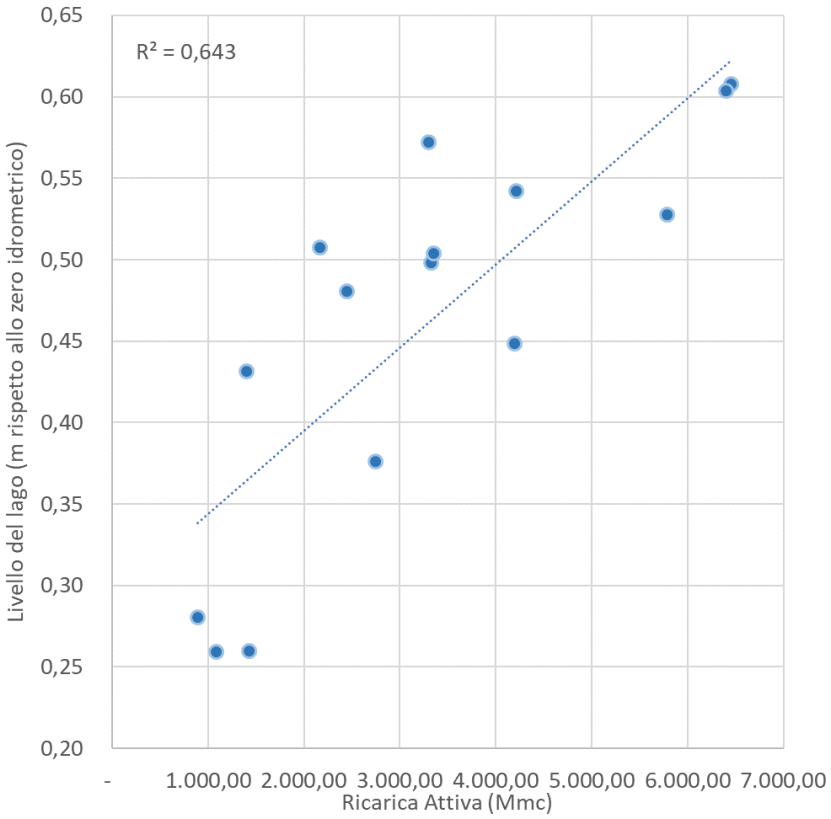


Figura 26 – Diagramma di dispersione dei valori della ricarica attiva dell'acquifero superficiale e del livello del Lago di Candia rispetto allo zero idrometrico della scala idrometrica di rilevazione, nel quale sono stati esclusi i potenziali outlier relativi agli anni 2008 e 2017.

7.2 Stima delle variazioni indotte dai cambiamenti climatici

In questo paragrafo viene proposta una stima degli effetti indotti dai cambiamenti climatici sui processi di ricarica dell'acquifero. Si precisa che i valori proposti hanno il solo scopo di fornire un'indicazione dei trend attesi, in quanto valutazioni specifiche delle variazioni dei flussi richiedono dati e modelli di proiezione che esulano dalle finalità delle attività svolte.

La valutazione è condotta sulla base della proiezione della temperatura media annua riferita all'anno 2030, sulla base della retta di regressione ricavata dalla serie dei valori delle temperature medie annue di Figura 8.
La retta derivata dalla serie dei dati è la seguente:

$$y = 0{,}0787x + 11{,}411$$

Dove y indica il valore di temperatura media annua (°C) per l'anno x, con x che varia da 1 (anno 2002) a n. Nel caso in esame x è posto pari a 29 (anno 2030).
Sulla base dell'equazione della retta di regressione il valore atteso di temperatura media annua per l'anno 2030 risulterebbe pari a 13,69°C.

In relazione alle precipitazioni medie annue, gli studi sugli effetti dei cambiamenti climatici per l'Europa[3] condotti dall'Agenzia Ambientale Europea, indicano per il settore nordovest della Pianura Padana variazioni contenute (±5%) (proiezione per il periodo 2071-2100 rispetto al periodo 1971-2000 nello scenario RPC 8.5), accompagnate da una riduzione significativa delle precipitazioni estive ed un incremento di quelle invernali.

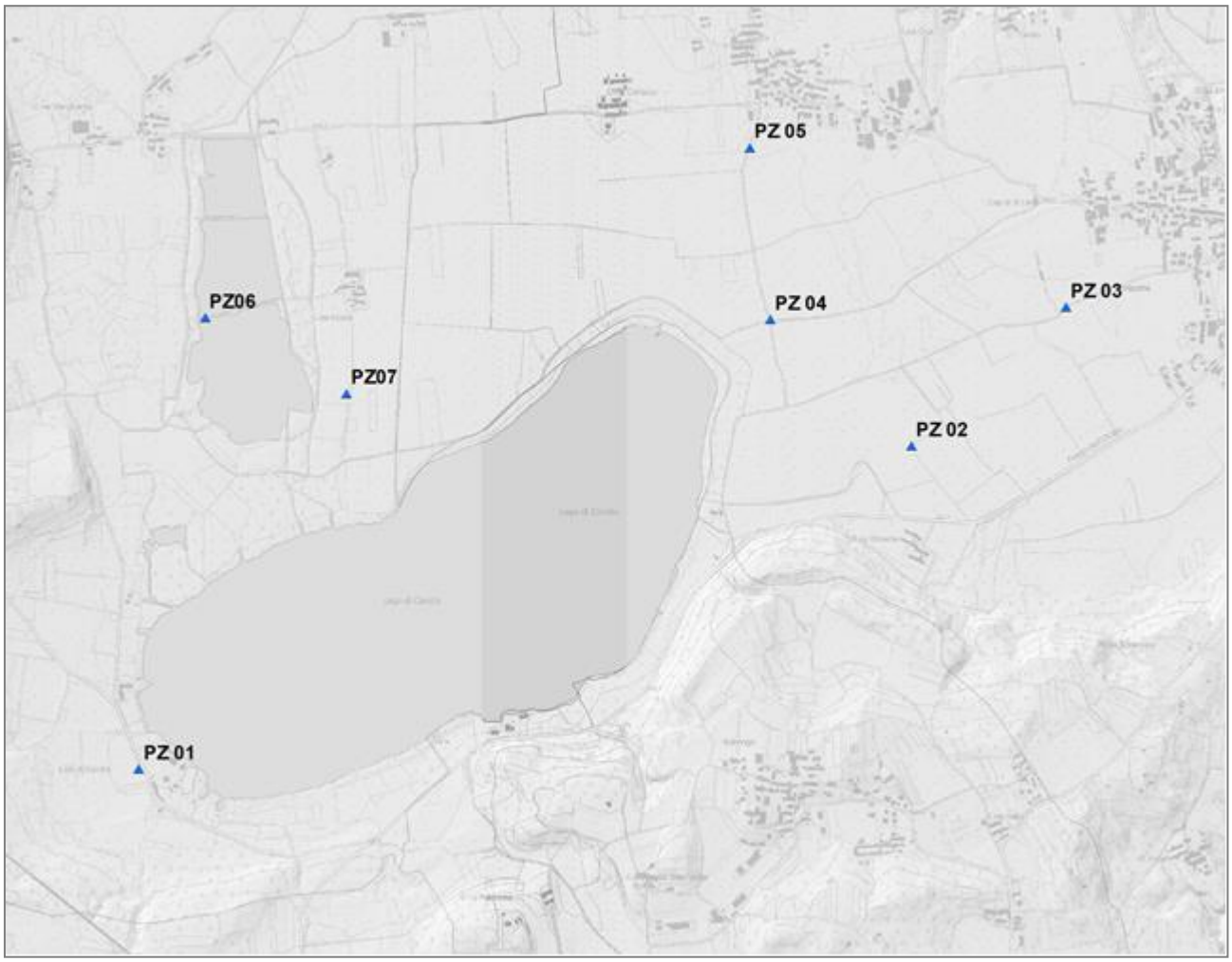
Alla luce di questo quadro, per i calcoli viene considerato il valore di precipitazione media annua riferito al periodo 2002-2018. Tale scelta è corroborata anche dall'assenza di un chiaro trend nella serie delle precipitazioni medie annue rilevato per l'area di studio.
Anche in termini di uso del suolo e di tipo di copertura vegetale, per la simulazione proposta viene assunto il valore di infiltrazione determinato per lo scenario attuale.

I valori ottenuti per la simulazione condotta forniscono un volume di ricarica attiva annua pari a 3.140,42 Mm^3/anno, equivalente ad una riduzione del 5,7% rispetto al valore riferito al periodo 2002-2018.

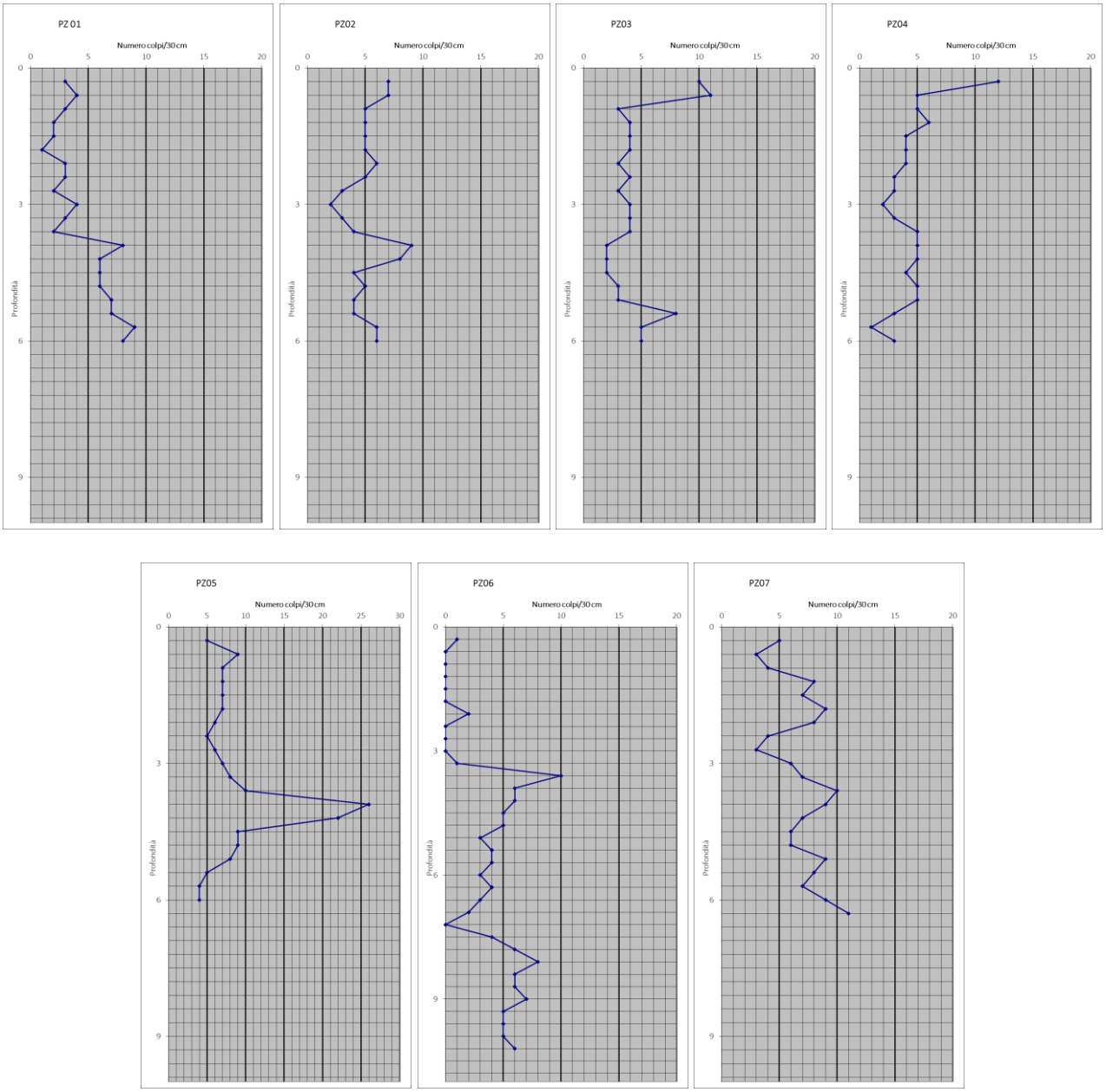
[3] EEA (2017) - Climate change adaptation and disaster risk reduction in Europe. Climate change adaptation and disaster risk reduction in Europe, Luxembourg, 172 pp.

Appendice 1

In appendice è riportata l'ubicazione dei piezometri realizzati per lo studio e i grafici delle prove DPSH condotte per la loro installazione.



Ubicazione dei piezometri realizzati per il presente studio.



Risultati delle prove DPSH.