

LO STUDIO DEGLI “SPRING-SINKHOLE” DEL GRUPPO DEI LAGHI DEL VESCOVO (PIANURA PONTINA) ATTRAVERSO L’USO DEL “RADON BUDGET”

**CAPELLI GIUSEPPE*, DELITALA MARIA CRISTINA*,
PRIMAVERA PAOLO*, SALVATI ROBERTO*,
TADDEUCCI ADRIANO* & TUCCIMEI PAOLA***

*Dipartimento di Scienze Geologiche, Università “Roma Tre”, L.go San Leonardo Murialdo 1, 00146 Roma

INTRODUZIONE

I fenomeni di “sprofondamento catastrofico” (sinkhole), recentemente annoverati tra i cosiddetti geohazard, pongono seri problemi per lo sviluppo economico del territorio. La gestione del problema da parte dell’Amministrazione Pubblica presuppone che siano chiari i meccanismi e i processi coinvolti. In questo lavoro verrà esposto il caso degli spring-sinkhole del Gruppo dei Laghi del Vescovo (Pianura Pontina) ed in particolare l’attenzione sarà rivolta al ruolo dei fluidi profondi, emergenti lungo il margine della dorsale lepina, nello sviluppo dei cover collapse sinkhole in un’area, dove i terreni carbonatici sono ribassati al di sotto di una spessa coltre di sedimenti alluvionali. Scopo di questa nota è fornire elementi utili alla comprensione delle condizioni di sviluppo dei sinkhole nelle aree di risorgenza che bordano i rilievi cartonatici, che in Italia rappresentano i siti con più alta incidenza di questo tipo di fenomeni.

La Pianura Pontina (Fig.1) è interessata da fenomeni di sinkhole in una stretta fascia posta tra il margine occidentale della dorsale lepina e la statale Appia (SS7). La densità e la distribuzione dei sinkhole in questa area sono inferiori rispetto ad altre zone dell’Italia centrale (Nisio, 2003; SALVATI & SASOWSKY 2002), ma essi rappresentano un rischio potenziale per il territorio, come gli ultimi due eventi di collasso dimostrano (nel 1989 “sinkhole di Doganella” (Bono, 1995); nel 1995 “il sinkhole di Pettinicchio”).

Le carte topografiche degli anni venti del secolo scorso, riportano la presenza di depressioni circolari in tutta l’area, successivamente riempite e ricoperte per consentire l’utilizzo a fini agricoli del territorio e lo sviluppo urbano. La distribuzione dei sinkhole sembra essere influenzata dall’assetto tettonico-strutturale, essendo orientata

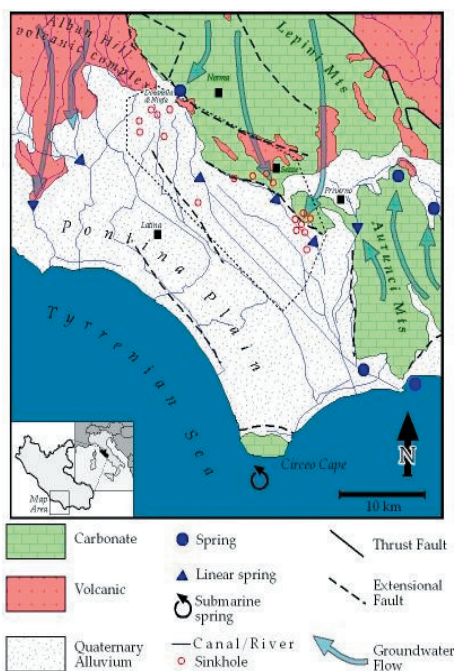


Fig.1 – Assetto geologico della Pianura Pontina, con indicazione delle principali sorgenti e delle direzioni principali di deflusso delle acque sotterranee

lungo direttrici simili a quella della dorsale lepina. CAPELLI et alii (2000) e SALVATI & SASOWSKY (2002) segnalano la presenza di sprofondamenti del tipo “cover collapse sinkholes”, e cioè di sprofondamenti catastrofici che interessano terreni di copertura, nelle zone di deflusso dell’acquifero carsico dei Lepini, e non nelle aree di ricarica come più spesso si verifica. La ricarica dell’acquifero avviene sui Monti Lepini, sia attraverso doline ed inghiottitoi, che attraverso infiltrazione diffusa (BONI, 1980, 1988; CELICO, 1983), e le principali sorgenti sono poste al margine tra la Pianura Pontina e il massiccio carbonatico, ovvero in un’area con una spessa coltre di terreni di copertura, dove risalgono fluidi profondi caldi, ricchi in CO₂ (BONI, 1980). In questo quadro geologico ed idrogeologico, SALVATI & SASOWSKY, 2002 considerano poco probabile che un semplice processo di “ravelling” (ricaduta dei terreni di copertura nelle cavità presenti nel basamento carbonatico sottostante) possa essere responsabile dello sviluppo degli sprofondamenti ed ipotizzano che la rimozione di massa dal sistema debba essere legata alla creazione di cavità in profondità, all’interfaccia basamento-copertura o nell’ambito dei terreni carbonatici presenti in quest’ultima. Ne discende che l’acqua che circola all’interno del bedrock sia sottosatura rispetto al carbonato di calcio per brevità del circuito carsico (in queste condizioni l’acqua non raggiunge mai la saturazione) o per un rinnovo dell’aggressività chimica, in caso di percorsi più lunghi. In quest’ultima situazione, l’acidificazione dell’acqua può essere dovuta a fluidi gassosi di origine profonda che, risalendo lungo i sistemi di faglie che bordano la dorsale lepina, si mescolano con le acque di tipo bicarbonato-calcico provenienti dall’acquifero carsico (CAPELLI, 2000; SALVATI R. & SASOWSKY, 2002).

Il modello concettuale elaborato da SALVATI & SASOWSKY (2002) per la formazione dei cover collapse sinkhole nella Pianura Pontina è stato sottoposto a verifica, utilizzando un’approccio di tipo geochimico che prevede, accanto alle determinazioni delle caratteristiche chimico-fisiche delle acque dei sinkhole e di altre emergenze sul margine lepino, anche l’applicazione di bilanci di massa basati sul radon budget a due spring-sinkhole del Gruppo dei Laghi del Vescovo, il Lago Verde e il Lago Nero (Fig. 2).



Fig.2 – Gruppo dei Laghi del Vescovo

Il radon, e più specificatamente l’isotopo ²²²Rn, può essere utilizzato come tracciante del flusso di acque sotterranee all’interno di acque superficiali (CORBETT et alii, 1997) perché: 1) è un elemento conservativo; 2) le sue concentrazioni nelle acque sotterra-

nee sono molto maggiori che nelle acque superficiali; 3) è radioattivo e il suo tempo di dimezzamento è breve rispetto ai suoi tempi di residenza nelle acque superficiali. L'applicazione del radon budget a bacini lacustri o altri specchi d'acqua superficiale permette il calcolo della portata delle emergenze sotterranee nel bacino e può essere applicato in sostituzione, oppure in associazione, con un bilancio idrologico standard. I bilanci basati su altri elementi conservativi (come il cloro, per esempio) debbono invece essere necessariamente implementati da dati idrologici per potere fornire stime di flusso.

1. INQUADRAMENTO GEOLOGICO ED IDROGEOLOGICO

La pianura Pontina occupa la porzione più meridionale di una area che si sviluppa tra la dorsale dei Lepini-Ausoni-Aurunci e l'attuale margine tirrenico (Fig. 1). A partire dal Pliocene inferiore, è stata interessata da processi tettonici che hanno ribassato verso sud-ovest i depositi carbonatici del Meso-Cenozoico. Tali terreni sono attualmente ricoperti da:

- depositi torbosi dell'Olocene nei bacini fluvio-lacustri
- argille marine e transizionali, sabbie e ghiaie del Pleistocene superiore.
- argille del Pliocene superiore, passanti a calcareniti nei settori più prossimi alla dorsale lepina
- depositi litorali e transizionali del Pleistocene medio con vaste porzioni di materiale piroclastico rimaneggiato
- argille del Pleistocene inferiore

La successione sedimentaria della Pianura Pontina si è sviluppata a partire da un ambiente deposizionale di tipo marino che si è prima trasformato in ambiente transizionale costiero e successivamente in un sistema continentale di tipo fluvio-lacustre. Questa evoluzione si ripercuote in una grande variabilità verticale e laterale dei depositi.

L'assetto idrogeologico dell'area pontina è fortemente controllato dalle direttrici geologico-strutturali. Tre principali unità idrogeologiche possono essere identificate:

- l'unità della dorsale carsica lepina
- una parte equivalente della stessa unità, ribassata verso sud-ovest e ricoperta dai depositi post-orogenici quaternari
- i depositi quaternari alluvionali e fluvio-costieri che costituiscono la Piana Pontina s.s.

L'assetto idrogeologico sotto la piana è complesso. Si riconoscono un acquifero non-confinato vicino alla superficie, acquiferi multipli confinati e semi-confinati di limitata estensione a profondità maggiori e l'acquifero carbonatico ribassato sotto la pianura pontina, ricaricato dalla circolazione proveniente dai Lepini. Accanto a questi circuiti idrogeologici, esiste anche un circuito idrotermale all'interno del basamento carbonatico sepolto, con una circolazione prevalente lungo i sistemi di faglia (BONI et alii, 1980). Il reticolo fluviale nella piana è alimentato principalmente dalle sorgenti poste lungo il margine occidentale dei Lepini, la cui portata totale si aggira attorno ai 15 m³/s. (BONI, 1988) Le sorgenti che drenano la dorsale lepina sono principalmente emergenze puntuali, ma si riconoscono anche sorgenti lineari lungo il corso del Fiume Uffente, nei tratti in cui esso scorre più vicino alla dorsale (Fig. 2).

2. CAMPIONAMENTO ED ANALISI

Il Gruppo dei Laghi del Vescovo è costituito da alcuni spring-sinkhole posti sul margine dei Monti Lepini (Fig. 2). I laghi sono circondati da terreni saturi d'acqua, coperti a luoghi da

una matta vegetale galleggiante e da piante acquatiche, che spesso rendono difficile l'accesso alla parte centrale dell'area. Il lago Verde e il Lago Nero sono posti sul margine orientale del comprensorio e possono essere raggiunti più facilmente. Il campionamento del Lago Verde e del Lago Nero è stato realizzato nel periodo giugno-luglio 2002. I campioni d'acqua sono stati prelevati in corrispondenza di profili verticali, distribuiti in maniera omogenea su tutta la superficie dei laghi, ad intervalli di circa 2 metri. Per il Lago Verde sono state utilizzate 5 stazioni verticali di campionamento, per un totale di 20 campioni, mentre nel lago Nero ne sono state usate 7, per un totale di 19 campioni. Oltre alle acque dei sinkhole sono state prelevate anche le acque di due sorgenti (Sg14 e Sg13) poste all'estremità nord-est del Lago Verde, lungo il margine lepino (Fig. 2). La temperatura, il pH e la conducibilità elettrica (CE) sono state misurate in situ con elettrodi specifici, l'alcalinità è stata determinata, sempre in situ, per titolazione con HCl 0,02 N. Le misure di pH sono riproducibili al livello di 0,1 unità pH, utilizzando una espansione di scala che consente letture fino a 0,01 unità pH. La precisione del conduttimetro utilizzato per le analisi è compresa tra lo 0,1 e l'1 % e la sua riproducibilità è di circa l'1%.

Le determinazioni degli ioni Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , F^- e SO_4^{2-} sono state invece effettuate in laboratorio su campioni filtrati. Il Ca^{2+} e il Mg^{2+} sono stati titolati con EDTA 0,01 N, il Na^+ e il K^+ sono stati analizzati per fotometria di fiamma ad emissione, il Cl^- e il F^- attraverso determinazioni potenziometriche e i solfati per spettrometria di assorbimento molecolare. La precisione delle analisi fotometriche, potenziometriche e spettrometriche è sempre migliore dello 0,5 %. La correttezza delle analisi è stata controllata attraverso il bilancio di carica. La differenza percentuale accettata per campioni contenenti tra 10 e 800 meq/L di specie anioniche è pari a ± 5 % (Standard Methods for the Examination of water and wastewater, 1995) e le percentuali calcolate per i campioni del Lago Verde e Lago Nero sono sempre comprese in un intervallo di ± 3 %. Un altro test per verificare l'accuratezza delle analisi consiste nel calcolare il rapporto tra il valore ricavato dei solidi totali disciolti (TDS) e quello di CE. Se il valore di tale rapporto è compreso tra 0.55 e 0.7 (Standard Methods for the Examination of water and wastewater, 1995) l'analisi può essere considerata accurata. I valori calcolati per tutti i campioni del Lago Verde e del Lago Nero ricadono sempre all'interno di questo intervallo.

L'indice di saturazione rispetto alla calcite (SI) dei campioni d'acqua prelevati dai due sinkhole sono stati determinati come differenza tra il pH misurato e il pH che questi campioni avrebbero se fossero in equilibrio con il CaCO_3 , alle concentrazioni esistenti degli ioni calcio e bicarbonato. I calcoli adottati stimano la forza ionica a partite dall'analisi chimica completa dei campioni d'acqua con una precisione di $\pm 0,2$.

I campioni per le analisi del radon sono stati raccolti in bottiglie da 250 o da 40 mL, immediatamente sigillate per prevenire una perdita del gas. Il radon è stato estratto dall'acqua e successivamente misurato con un radonometro (modello RAD 7) prodotto dalla DurrIDGE Company, dotato di un rivelatore planare allo stato solido, ad impiantazione ionica. Il radon in eccesso è stato determinato come differenza tra il radon totale al tempo del campionamento e il radon supportato, assunto pari all'attività del ^{226}Ra . Il valore del radon non supportato è stato corretto, tendendo conto del decadimento intercorso tra il campionamento e la misura. La precisione delle misure è compresa tra 0,5 e 4 %.

Misure di radon sono state effettuate anche in aria, immediatamente al di sopra della superficie del lago per calcolare la perdita di gas all'interfaccia acqua-aria. E' stato infine prelevato un campione del sedimento posto sul fondo del Lago Verde per potere calcolare il flusso diffusivo di radon all'interfaccia sedimento-acqua.

3. CHE COS'È IL RADON BUDGET

Come anticipato nell'introduzione, il contributo di acqua sotterranea all'interno del Lago Verde e del Lago Nero è stato stimato attraverso l'applicazione del radon budget, nell'ottica di meglio definire le caratteristiche idrologiche e geochemiche dei fluidi di origine profonda risalenti lungo i sistemi di faglie che bordano la dorsale lepina. I calcoli del radon budget tengono conto di tutti i flussi d'ingresso (input) e di uscita (output) dal sistema (rappresentato dal Lago Verde e dal Lago Nero), comprendendo anche il flusso attraverso l'interfaccia sedimento-acqua che è stato determinato attraverso l'applicazione di un modello di avvezione-diffusione.

I flussi di radon considerati nell'equazione di bilancio sono i seguenti:

- 1) flusso di diffusione del radon dal sedimento verso l'acqua sovrastante ($J_{diffusion}$)
- 2) flusso di acque sotterranee ricche in radon ($J_{advective}$)
- 3) produzione di radon nella colonna d'acqua per decadimento del ^{226}Ra ($J_{production}$)
- 4) perdita di radon all'interfaccia acqua-aria (J_{atm})
- 5) decadimento del radon presente nella colonna d'acqua (J_{decay})

L'equazione di bilancio può essere scritta come:

$$J_{diffusion} + J_{advective} + J_{production} - J_{atm} - J_{decay} = 0 \quad (1)$$

e poi risolta rispetto a $J_{advective}$:

$$J_{advective} = J_{atm} + J_{decay} - J_{diffusion} - J_{production} \quad (2)$$

Le equazioni utilizzate per calcolare i flussi di radon necessari alla determinazione di $J_{advective}$ sono riportate in CORBETT et alii (1997).

4. DISCUSSIONE

4.1. Idrogeochimica

I risultati delle analisi chimico-fisiche effettuate sui campioni d'acqua provenienti dai sinkhole e dalle sorgenti sono riportate in Tab. 1a e b. Le acque del Lago Verde e del Lago Nero possono essere classificate come cloruro-sodiche, perché sodio e cloruro sono gli ioni dominanti. Le concentrazioni di sodio nel Lago Verde variano tra 405 e 737 mg/L e i cloruri tra 691 e 1488 mg/L, mentre le concentrazioni dei due ioni sono inferiori nel Lago Nero: il sodio è compreso tra 342 e 413 mg/L e i cloruri tra 518 e 718 mg/L. La composizione chimica dei due laghi, anomala per una area carsica, riflette evidentemente il contributo di una componente profonda ricca in sodio e cloro che si mescola con le acque bicarbonato-calciche proveniente dall'acquifero carsico dei Lepini.

I valori di conducibilità confermano la maggiore concentrazione di specie ioniche nel Lago Verde (3.2 - 5.2 mS cm⁻¹) rispetto al Lago Nero (2.7 - 3.0 mS cm⁻¹). La distribuzione dei valori di conducibilità suggerisce che il Lago Verde fosse stratificato nel giugno 2002, con un evidente ingresso di acque più fredde e meno saline sul margine NE del lago, nei pressi dell'emergenza delle sorgenti Sg13 e Sg14. Confrontando la composizione chimica delle acque del Lago Verde con quella delle sorgenti sopramenzionate, si evince che le acque della sorgente Sg14 sono riconducibili a quelle Lago Verde, mentre quelle della sorgente Sg13 possono essere classificate come acque bicarbonato-calciche. In termini di concentrazioni ioniche risulta invece probabile che i due laghi ricevano il contributo di altre sorgenti con una mineralizzazione più accentuata di Sg13 e

Sg14, visto che i valori di conducibilità di entrambi i laghi sono molto maggiori di quelli delle due sorgenti. Va anche segnalato che le acque del Lago Nero risultano relativamente impoverite in solfati rispetto alla sorgente Sg14, raggiungendo invece concentrazioni vicine a quelle misurate per Sg13. Questo dimostra che il Lago Nero riceve probabilmente un maggiore contributo di acque di tipo bicarbonato-calciche rispetto al Lago Verde.

L'ingresso di acque sotterranee all'estremità NE del Lago Verde è anche dimostrata dalla bassa temperatura (circa 11°C) registrata in quell'area del sinkhole, rispetto ai valori di 21 – 22°C delle acque superficiali nel mese di giugno 2002.

La distribuzione delle temperature nel Lago Nero indica che quest'ultimo fosse termicamente stratificato nel luglio 2002, non mostrando però un'apprezzabile stratificazione salina. Era riconoscibile un livello superficiale di acqua, spesso 4 metri e caratterizzato da temperature di 27-29°C, e uno strato sottostante con acque molto più fredde (9 - 10°C) che rappresentano, verosimilmente, un'emergenza sub-lacuale di acque di tipo bicarbonato-calcico, con un'area di ricarica posta sulla sommità dei Monti Lepini (1400-1500 metri di altezza). Per potere mantenere valori di temperature tanto bassi, è necessario ipotizzare che la circolazione di queste acque avvenga molto rapidamente attraverso una serie di condotti ipogei di natura carsica.

Le acque del Lago Verde sono risultate leggermente acide (pH tra 6,3 e 6,7), con i valori più bassi misurati in corrispondenza del margine NE del lago dove assumono gli stessi valori della sorgente Sg14. Questi valori di pH potrebbero essere spiegati dal mescolamento di fluidi profondi, ricchi in CO₂, risalenti lungo i sistemi di faglie che bordano i Lepini con le acque di tipo bicarbonato-calcico dell'acquifero carsico. SALVATI & SASOWSKY (2002) riportano per le acque dei Laghi del Vescovo valori di PCO₂ fino a 0,40 atm. Anche gli indici di saturazione rispetto alla calcite mostrano la presenza di acque sottosature nella stessa area del lago (SI = -0,16), simili a quelli calcolati per le acque delle sorgenti Sg13 e Sg14. Gli indici risultano invece leggermente positivi (0.1 - 0.2) in corrispondenza del margine NW del lago, dove le radici delle piante acquatiche che circondano le sponde del lago sono ricoperte da travertino in formazione.

I valori di pH del Lago Nero sono sempre maggiori di 7 e compresi nell'intervallo 7,1-7,7. Gli indici di saturazione sono sempre positivi, con valori di 0,7-0,9 in superficie e 0,2-0,3 in profondità. Il Lago Nero è infatti circondato da banchi di travertino spessi alcuni metri.

I valori dei fluoruri misurati nelle acque di entrambi i laghi sono compresi tra 0,3 e 0,8 mg/L e dimostrano che le acque di tipo bicarbonato-calcico proveniente dai Lepini, caratterizzati da contenuti in fluoruri di 0.045 mg/L (BONI et alii, 1980), si mescolano con fluidi profondi arricchiti nello stesso ione che CAMPONESCHI & NOLASCO (1983) identificano con il circuito idrotermale presente nel basamento carbonatico sepolto.

4.2. Distribuzione del ²²²Rn

I valori delle attività del ²²²Rn misurate nelle acque del Lago Verde e del Lago Nero sono riportate in Tab. 1a e b. Tutti i campioni presentano dei forti eccessi di ²²²Rn, non supportato dal ²²⁶Ra. Il profilo verticale della distribuzione del radon nei pressi del margine NE del Lago Verde, mostra molto chiaramente l'ingresso di acque sotterranee arricchite in radon ad una profondità di circa 6 metri, dove erano stati registrati anche bassi valori di temperatura. Alti valori di radon (1020 pCi L⁻¹) sono stati misurati anche nelle acque superficiali dell'area NW del lago, dove si registravano i valori più positivi dell'indice di saturazione. Questi dati possono essere spiegati dalla presenza, a poche decine di metri dal margine NW del lago, di un'altra sorgente ("Acqua Amara", spring n.267 in CAMPONESCHI & NOLASCO, 1983) che alimenta un piccolo corso d'acqua che si immette nel Lago Nero. Il punto di confluenza, oggi mascherato dalla vegetazione acquatica, ma chia-

ramente cartografato da CAMPONESCHI & NOLASCO (1983), è molto vicino alla sorgente e questo giustifica il fatto che l'eccesso di radon non sia decaduto, né si sia liberato in atmosfera. CAMPONESCHI & NOLASCO (1983) riportano alcuni dati sulla composizione chimica dell'Acqua Amara, da cui risulta che il residuo fisso a 180°C era pari a 2,8 g/L, la temperatura di 22-23 °C, con un contenuto significativo di HCO_3^- (1.1 g/L), CO_2 libera (345 mg/L) e H_2S (34 mg/L). La forte mineralizzazione di quest'acqua spiega gli alti valori di conducibilità misurati al Lago Verde ed i contenuti rilevanti di H_2S confermano che questa sorgente rappresenti l'emergenza di una circolazione idrica profonda.

I valori del radon in eccesso misurato nei campioni del Lago Nero sono inferiori rispetto a quelli del Lago Verde e raggiungono lo zero nell'area dove le due depressioni che costituiscono il Lago Nero (il Lago Nero Nord e il Lago Nero Sud) s'incontrano e la profondità dell'acqua è pari a soli 2 metri. In corrispondenza della zona più profonda dei due bacini lacustri si segnala l'afflusso di acque sotterranee arricchite in radon.

4.3. Applicazione del Rn budget e stime delle portate delle emergenze sub-lacuali

Attraverso l'applicazione del Rn budget presentato nel paragrafo 4, sono stati calcolati i flussi di input e output dal Lago Verde e dal Lago Nero (Tab.2). La precisione di questi calcoli è principalmente legata a quella delle misure del radon e si aggira sul 4-5 %. I flussi di output, J_{atm} e J_{decay} , calcolati per il Lago Verde sono rispettivamente pari a 282.9 and 338.4 pCi $\text{m}^{-2} \text{min}^{-1}$. Per bilanciarli, considerando che la somma dei valori di $J_{\text{diffusion}}$ e $J_{\text{production}}$ è pari a 0,9 pCi $\text{m}^{-2} \text{min}^{-1}$, è necessario che il valore del $J_{\text{advective}}$ ricavato dall'equazione (2) sia pari a 620.4 pCi $\text{m}^{-2} \text{min}^{-1}$. Questo dimostra che il trasporto avvevivo del radon associato al flusso di acque sotterranee rappresenta il 99% dell'input totale di radon nel Lago Verde.

Per quanto riguarda il Lago Nero, sono stati condotti due calcoli di bilancio distinti, uno per il Lago Nero Nord e l'altro per il Lago Nero Sud. Nel Lago Nero Nord, i flussi di output, J_{atm} and J_{decay} , sono rispettivamente pari a 61.7 pCi $\text{m}^{-2} \text{min}^{-1}$ e 86.1 pCi $\text{m}^{-2} \text{min}^{-1}$. Il valore risultante di $J_{\text{advective}}$ è pari a 146.6 pCi $\text{m}^{-2} \text{min}^{-1}$, che rappresenta anche in questo caso il 99 % dell'input totale di radon nel Lago Nero Nord.

Nel Lago Nero Sud invece J_{atm} e J_{decay} sono risultati rispettivamente pari a 4.2 pCi $\text{m}^{-2} \text{min}^{-1}$ and 10 pCi $\text{m}^{-2} \text{min}^{-1}$, con un valore del $J_{\text{advective}}$ pari a 13.3 pCi $\text{m}^{-2} \text{min}^{-1}$, e cioè il 92 % dell'input totale di radon nel Lago Nero Sud.

Conoscendo i valori del flusso avvevivo di radon nei sinkhole, è possibile stimare la portata del flusso delle acque sotterranee nel Lago Verde, nel Lago Nero Nord e Sud, assegnando un valore di concentrazione di radon ai flussi avvevivi. Utilizzando le attività di radon (1184 pCi L^{-1}), misurate per le sorgenti Sg14 e Sg13 (poste sul margine NE del lago, dove l'ingresso di acque ricche in radon era stato evidenziato), è possibile calcolare la velocità e la portata delle sorgenti sotterranee (Tab.2). La velocità del flusso nel Lago Verde è pari a 75.4 cm/giorno e la sua portata è di 84.4 L s^{-1} , mentre per il Lago Nero Nord è stata calcolata una velocità di flusso di 17.9 cm/giorno e una portata di 10 L s^{-1} . Per il Lago Nero Sud i valori calcolati sono stati di 1.6 cm/giorno e 0.4 L s^{-1} .

4.4. Confronto con le determinazioni idrologiche

Il contributo di acque sotterranee nel Lago Verde (84.4 L s^{-1}) calcolato attraverso il radon budget è in buon accordo con misure idrologiche convenzionali effettuate in passato nell'area. CAMPONESCHI & NOLASCO (1983) riportano i valori di portata delle sorgenti che alimentano il Lago Verde, incluse le sorgenti Sg13, Sg14 e la sorgente dell'Acqua Amara, posta sul margine NW del Lago Verde (Fig.2). Sommando le portate delle tre sorgenti (misurate nel mese di giugno 1983) si ottiene un valore totale di portata di 94 L s^{-1} , perfettamente comparabile con il dato determinato in questo studio.

La somma della portate delle sorgenti sub-lacuali presentate in questa nota per il Lago Verde (84.4 L s^{-1}), il Lago Nero Nord (10.0 L s^{-1}) e il Lago Nero Sud (0.4 L s^{-1}), pari a 94.8 L s^{-1} , è coerente con la portata totale del Gruppo dei Laghi del Vescovo riportata da altri autori. Si ricorda che il Gruppo dei Laghi del Vescovo è costituito dal Lago Verde, dal Lago Nero, dal Lago Bianco ed altri laghi minori e che quindi le misure idrologiche di riferimento tengono conto anche dell'apporto di altre sorgenti minori, non considerate nei nostri calcoli. BONI (1988) riporta una portata complessiva media dell'intero gruppo di 185 L s^{-1} , mentre PETITTA (1994) parla di una portata totale media di 245 L s^{-1} , con un valore minimo di 105 L s^{-1} , assai prossimo alle nostre determinazioni.

5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Le analisi idrogeochimiche e le misure delle attività del radon effettuate sulle acque del Lago Verde e del Lago Nero mostrano che i due laghi non sono semplicemente sinkhole riempiti d'acqua, ma delle vere e proprie sorgenti e cioè degli spring-sinkhole. La portata delle emergenze che alimentano i due laghi è stata stimata attraverso l'applicazione del radon budget, tenendo conto di tutti i termini di flusso in entrata e in uscita dai sistemi considerati. Le variazioni delle attività del radon con la profondità hanno anche permesso l'individuazione fisica delle aree in cui avviene l'ingresso delle acque sotterranee nei laghi: sul margine NE e NW del Lago Verde e in corrispondenza dei punti più profondi del Lago Nero Nord e del Lago Nero Sud. Le acque sotterranee nei mesi di giugno e luglio 2002 erano più acide e più fredde di quelle superficiali. Le basse temperature ($9-11^\circ\text{C}$) di queste emergenze suggeriscono una ricarica dalle regioni più rilevate della dorsale lepina ed una circolazione rapida lungo il reticolo carsico. È ipotizzabile che, in corrispondenza dei sistemi di faglia che bordano i Lepini e che hanno ribassato i terreni carbonatici meso-cenozoici al di sotto della piana Pontina, le acque bicarbonato-calciche provenienti dai Lepini si mescolino con fluidi gassosi di origine profonda arricchiti in CO_2 , fluoruri e radon. La rinnovata aggressività delle acque porterebbe alla creazione di cavità all'interfaccia basamento carbonatico-copertura o nell'ambito dei terreni carbonatici presenti in quest'ultima, innescando in tal modo i processi di "ravelling-like" e di sprofondamento dei terreni di copertura responsabili della formazione dei cover collapse sinkhole in area di deflusso (SALVATI & SASOWSKY 2002).

Il modello concettuale di circolazione delle acque che scaturisce dai nostri studi è mostrato in Fig. 3 (da Salvati & Sasowsky, 2002, modificato).

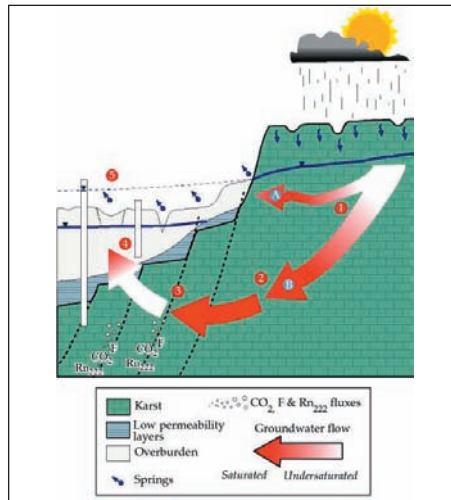


Fig.3 – Circolazione delle acque sotterranee nell'acquifero dei Monti Lepini secondo due diversi circuiti carsici. Il circuito A corrisponde al circuito attuale e quello B si riferisce invece ad un reticolo paleocarsico. I numeri da 1 a 3 indicano la progressiva saturazione delle acque rispetto alla calcite, mentre i numeri 4 e 5 segnalano la rinnovata aggressività delle acque a seguito del mescolamento con fluidi di origine profonda, ricchi in CO_2 , F and Rn, risalenti lungo le faglie che bordano la dorsale lepina e che la ribassano al di sotto della Pianura Pontina.

Campione	Profondità (m)	T °C	pH	Conducibilità mS cm ⁻¹	TDS g L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	²²² Rn in eccesso pCi L ⁻¹	err	F mg L ⁻¹	S ²⁻	SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	S ²⁻ /SO ₄ ²⁻	Cl ⁻ mg L ⁻¹	Ca ²⁺ mg L ⁻¹	Mg ²⁺ mg L ⁻¹	Na ⁺ mg L ⁻¹	K ⁺ mg L ⁻¹	S.I.
Sg13	-	15.9	6.88	0.916	0.46	376	1184	110	0.21		50		148	111	31	109	4	-0.14
Sg14	-	16.6	6.45	2.29	1.19	553	1183	53	0.25		118		515	180	49	323	10	-0.28
PSPP06 1A	-2	21.7	6.63	3.2	1.54	621	222		0.46		104		691	204	67	405	15	0.05
PSPP06 1B	-3	20.9	6.49	4.81	2.41	881	258		0.76		227		1328	311	106	718	34	0.15
PSPP06 1C	-6	20.5	6.29	3.85	1.9	920	428		0.78		272		1412	316	113	718	34	-0.03
PSPP06 1D	-7	11.4	6.3	5.11	2.54	913	100		0.78		173		1421	314	111	718	25	-0.16
PSPP06 2A	-2	21.6	6.48	3.13	1.56	730	166		0.41		139		697	213	63	415	15	-0.02
PSPP06 2B	-4	20.9	6.36	5.02	2.5	1025	109		0.67		188		1302	329	102	709	25	0.11
PSPP06 2C	-6	20.6	6.31	5.21	2.61	1057	18		0.7		180		1372	335	100	737	25	0.08
PSPP06 2D	-9	18.3	6.35	5.12	2.57	1041	0		0.68		189		1452	332	108	737	29	0.07
PSPP06 3A	-2	21.5	6.69	2.15	1.07	582	559		0.3		105		406	162	50	258	15	0.02
PSPP06 3B	-4	20.9	6.59	4.99	2.48	1030	135		0.63		193		1148	329	93	681	34	0.03
PSPP06 3C	-6	20.6	6.59	5.15	2.56	1059	77		0.63		146		1339	332	99	737	29	0.04
PSPP06 3D	-9	18.4	6.38	5.19	2.58	1041	6		0.63		185		1378	333	100	755	34	0.1
PSPP06 4A	-2	21.5	6.54	3.43	1.69	777	608		0.43		135		680	229	73	424	25	0.09
PSPP06 4B	-4	20.9	6.44	4.98	2.48	1014	347		0.6		178		1116	309	110	681	25	0.17
PSPP06 4C	-6	20.6	6.42	5.22	2.59	1065	269		0.64		151		1167	329	102	718	34	0.19
PSPP06 4D	-9	18.4	6.42	5.23	2.59	1065	55		0.41		159		1260	332	102	737	34	0.16
PSPP06 5A	-2	20.3	6.54	3.67	1.83	819	1020		0.5		123		904	250	80	516	15	0.12
PSPP06 5B	-4	20.9	6.44	4.86	2.44	1017	709		0.63		180		1329	333	86	700	25	0.2
PSPP06 5C	-6	20.7	6.41	5.11	2.56	1062	424		0.7		153		1350	325	109	737	25	0.17
PSPP06 5D	-9	18.4	6.42	5.16	2.57	1030	76		0.75		-		1488	325	109	737	34	-

Tab. 1a – Dati idrogeochimici delle sorgenti Sg13 e Sg14 e del Lago Verde. La sigla PSPP06 si riferisce al Gruppo dei Laghi del vescovo, i numeri 1,2, 3, 4 e 5 sono le stazioni di campionamento al Lago Verde e le lettere A, B,C e D rappresentano i campioni d'acqua prelevati a profondità crescenti.

Campione	Profondità (m)	T °C	pH	Conducibilità mS cm ⁻¹	TDS g L ⁻¹	HCO ₃ mg L ⁻¹	²²² Rn in eccesso pCi L ⁻¹	err	F mg L ⁻¹	S ²⁻	SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	S ²⁻ /SO ₄ ²⁻	Cl mg L ⁻¹	Ca ²⁺ mg L ⁻¹	Mg ²⁺ mg L ⁻¹	Na ⁺ mg L ⁻¹	K ⁺ mg L ⁻¹	S.I.
PSPP06 A1	-2	28,6	7,74	2,79	1,36	359	270		0,58		79		671	129	68	395	13	0,84
PSPP06 A2	-4	27,3	7,44	2,78	1,36	368	78		0,50		123		605	130	59	359	13	0,55
PSPP06 A3	-7	9,3	7,17	2,88	1,41	520	27		0,54		120		636	157	59	359	13	0,24
PSPP06 A4	-9	8,6	7,19	2,88	1,41	539	22				99		518	147	49	288	11	0,25
PSPP06 B1	-2	28,5	7,57	2,72	1,36	360	21		0,54		108		641	135	67	413	14	0,69
PSPP06 B2	-4	27,1	7,49	2,71	1,36	365	21		0,52		150		647	135	65	413	14	0,58
PSPP06 B3	-7	9,8	7,25	2,81	1,4	522	0		0,59		106		612	158	62	377	13	0,33
PSPP06 B4	-9	8,7	7,17	2,86	1,42	533	24		0,52		84		602	163	64	377	15	0,25
PSPP06 C1	-2	28,5	7,61	2,76	1,37	359	86		0,61		83		649	136	68	395	14	0,74
PSPP06 C2	-4	25	7,39	2,72	1,35	367	258		0,62		111		625	138	67	413	14	0,48
PSPP06 C3	-7	9	7,24	2,83	1,4	522	0		0,53		78		592	151	55	341	13	0,3
PSPP06 C4	-9	8,5	7,26	2,88	1,42	532	2		0,65		90		631	152	63	359	13	0,31
PSPP06 D1	-2	28,6	7,81	2,76	1,37	361	5		0,66		166		631	137	62	413	13	0,94
PSPP06 E1	-4	25,6	7,6	2,76	1,37	361	5		0,64		103		655	139	69	413	14	0,69
PSPP06 E2	-7	9,9	7,23	2,97	1,48	614	0		0,65		58		652	170	64	395	14	0,41
PSPP06 F1	-4	26,2	7,53	2,74	1,37	371	12		0,65		114		674	140	67	413	14	0,64
PSPP06 F2	-7	11,8	7,1	2,97	1,48	593	5		0,65		43		718	180	69	413	15	0,3
PSPP06 G1	-4	23,2	7,55	2,77	1,38	366	22		0,62		111		649	136	65	395	13	0,61
PSPP06 G2	-7	10	7,08	2,93	1,47	598	67		0,62		39		689	180	65	413	15	0,27

Tab. 1b – Dati idrogeochimici del Lago Nero. La sigla PSPP06 si riferisce al Gruppo dei Laghi del vescovo, le lettere A, B, C, D, E, F and G sono le stazioni di campionamento al Lago Nero e i numeri 1, 2, 3 and 4 rappresentano i campioni d'acqua prelevati a profondità crescenti.

Flussi di ^{222}Rn ($\text{pCi m}^{-2} \text{ min}^{-1}$)	Lago Verde	Lago Nero Nord	Lago Nero Sud
J_{atm}	282.9	61.7	4.2
J_{decay}	338.4	86.1	10.0
$J_{\text{diffusion}}$	0.2	0.5	0.5
$J_{\text{production}}$	0.7	0.7	0.7
$J_{\text{advective}}$	620.4	146.6	13.0
Velocità delle acque sotterranee (cm/giorno)	75,4	17.9	1.6
Portata delle acque sotterranee (L s ⁻¹)	84,4	10.0	0.4

Tab. 2 – Flussi di input e output di ^{222}Rn stimati per il Lago Verde ed il Lago Nero, velocità e portata delle emergenze di acque sotterranee che alimentano i due laghi.

Sono ipotizzati due circuiti carsici diversi: uno più superficiale (circuitto A in Fig.3), più rapido e rappresentato da acque meno mineralizzate che alimenta le sorgenti basali poste al margine della dorsale e uno più profondo e salino (circuitto B in Fig.3), in cui il movimento avviene più lentamente. Quest'ultimo si sarebbe formato quando il livello di base locale era più basso di quello attuale (PETITTA, 1994) e alimenterebbe le sorgenti termominerali ed alcune sorgenti che alimentano i sinkhole.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano Marco Conforti e Marco Garello per la loro assistenza nel lavoro di campagna e di laboratorio. Siamo grati a Marco Garello anche per il campionamento dei sedimenti lacustri. Questo progetto è stato finanziato dalla Regione Lazio nell'ambito del "Progetto Sinkhole".

BIBLIOGRAFIA

- BONI C., BONO P., CALDERONI G., LOMBARDI & S., TURI B. (1980) - Hydrogeological and geochemical analyses on the relationships between karst circulation and hydrothermal circuit in the Pontina Plain (Southern Latium). *Geologia Applicata e Idrogeologia* **15**, 203-245.
- BONI C., BONO P. & CAPELLI G. (1988) - Carta idrogeologica del territorio della regione Lazio. Regione Lazio, Università "La Sapienza", Roma, Italy.
- BONO P. (1995) - The sinkhole of Doganella (Pontina Plain, Central Italy). *Environmental Geology* **26**(1), 48-52.
- CAMPONESCHI B. & NOLASCO, F. (1983) - Le risorse naturali della Regione Lazio: Monti Lepini e Pianura Pontina. Regione Lazio, 8.
- CAPELLI G., PETITTA M. & SALVATI R. (2000) - Strategic groundwater resources in Northern Latium volcanic complexes. Identification criteria and purposeful management. IAHS Publ. No. **272**.
- CORBETT D.R., BURNETT W.C., CABLE P.H. & CLARK S.B. (1997) - Radon tracing of groundwater input into Par Pond, Savannah River Site. *Journal of Hydrology* **203**, 209-227.
- NISIO S. (2003) - I fenomeni di sprofondamento: stato delle conoscenze ed alcuni esempi in Italia centrale. *Il Quaternario*, **16**, 121-131.
- PETITTA M. (1992) - Modelli matematici di simulazione dell'acquifero carsico dei Monti Lepini (Lazio Meridionale). PhD thesis, Università "La Sapienza", Rome, Italy.
- SALVATI R. & SASOWSKY I.D. (2002) - Development of collapse sinkholes in areas of groundwater discharge. *Journal of Hydrology* **264**, 1-11.