

“FAVAZZINA”

Impianto di accumulo idroelettrico mediante pompaggio ad alta flessibilità

Comune di Scilla (RC)

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE

STRATEGIES FOR WATER



Progettisti: Ing. Luigi Lorenzo Papetti



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II
SCUOLA POLITECNICA E DELLE SCIENZE DI BASE



Approfondimento degli aspetti idrogeologici del Progetto di Pompaggio ad alta flessibilità di Favazzina

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
0	PRIMA EMISSIONE	20/05/2024	Gruppo di Lavoro UniNapoli-UniCatania Dott. Geol. Agostino Pasquali Coluzzi	E. Marchesi	L. Papetti

Codice commessa: 1422 Codifica documento: 1422-A-CN-R-02-0

Indice

1. Premessa	3
2. Fonti e dati utilizzati	4
3. Ricostruzione del modello idrogeologico e idrostrutturale	5
3.1 Inquadramento delle conoscenze idrogeologiche generali	5
3.1.1 I complessi idrogeologici igneo e metamorfico della Calabria	5
3.1.2 I complessi idrogeologici marini terrazzati	11
3.1.3 I complessi idrogeologici alluvionali e costieri	12
3.2 Schema idrostrutturale e di circolazione idrica sotterranea dell'area di Favazzina	12
4. Stima del bilancio idrologico	18
5. Valutazione dell'interferenza delle opere in sotterraneo del Progetto "Favazzina" con la circolazione idrica sotterranea	24
5.1 Interferenza con la circolazione idrica sotterranea nell'acquifero metamorfico	25
5.2 Interferenza con la circolazione idrica sotterranea nell'acquifero sabbioso	27
6. Valutazione dell'impatto sullo stato quantitativo e qualitativo delle risorse idriche sotterranee	27
7. Bibliografia	30

1. PREMESSA

FROSIO Next S.r.l. e il Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle Risorse dell'Università di Napoli Federico II (DiSTAR), nell'ambito della convenzione già attivata riguardante gli aspetti geologici e geologico-strutturali del Progetto "Favazzina" - Impianto di Accumulo Idroelettrico mediante pompaggio ad alta flessibilità", responsabile scientifico Prof. Luigi Ferranti, hanno concordato, in data 22 aprile 2024, l'estensione dell'accordo al fine di includere le risposte alle richieste di approfondimento del Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE) – Direzione valutazioni ambientali (Protocollo in uscita: m_amte.CTVA.REGISTRO UFFICIALE(U).0000171.08-01-2024; Protocollo in entrata: EDISON-PI-0000252-08.01.2024), con specifico riferimento agli aspetti idrogeologici, che di seguito si riportano integralmente (punti 9.1.1 e 9.1.2):

9.1.1. approfondimento del modello idrogeologico delle aree di progetto fornendo uno schema di circolazione idrica sotterranea, indicando le sorgenti, captate e non, fornendo i dati sullo stato quali-quantitativo allo stato disponibili. In tal senso dovrà essere redatta la carta idrogeologica corredata dalle opportune sezioni rappresentative, in idonea scala di rappresentazione, lungo le opere da realizzare con indicazione per tratti omogenei del tipo e del grado di criticità ipotizzabile (es. predizione dei punti e dell'ordine di grandezza delle venute d'acqua durante gli scavi). Si dovrà, altresì, procedere alla ricostruzione accurata dell'idrostruttura e alla definizione del bilancio idrogeologico;

9.1.2. Dovrà essere quantificato in modo approfondito, anche sulla base di indagini e rilievi in sito, l'impatto - associato alle fasi di cantiere ed esercizio e le relative misure di mitigazione e monitoraggio previste - derivante dalla realizzazione delle opere sullo stato chimico e sullo stato quantitativo delle risorse idriche sotterranee EDISON-PI-presenti e sulle opere e attività preesistenti (campi pozzi, sorgenti, acquedotti, depuratori, etc). Pertanto, andrà valutata l'estensione del cono di influenza della perturbazione indotta delle opere in progetto sulle sorgenti più prossime alla zona di intervento;

A tale scopo è stata richiesta la collaborazione del Prof. Pantaleone De Vita, Professore Ordinario di Geologia Applicata in servizio al DiSTAR, che ha redatto la presente relazione e la cartografia tematica connessa, consistente in cinque tavole fuori testo:

- 1) Tav. 1 - Carta idrogeologica su base CTR 1:5.000;
- 2) Tav. 2 - Sezione idrogeologica passante per il tracciato delle gallerie;
- 3) Tav. 3 - Carta del bacino sotterraneo dell'acquitaro metamorfico sotteso dalle opere del Progetto "Favazzina";
- 4) Tav. 4 - Carta delle sorgenti Pubblicazione 14 Servizio Idrografico (1941);
- 5) Tav. 5 - Stralcio carta geologica CASMEZ (1:25.000) 254 I - Messina-Reggio Calabria

2. FONTI E DATI UTILIZZATI

Lo studio idrogeologico dell'area di intervento del Progetto "Favazzina" è stato basato sull'analisi delle seguenti fonti e dati:

- 1) carta geologica prodotta dal gruppo di lavoro coordinato dal Prof. Luigi Ferranti nell'ambito della convenzione Frosio Next S.r.l. – DiSTAR;
- 2) studio dell'assetto geologico-strutturale, geomorfologico, e della fagliazione superficiale nell'area di Scilla-Bagnara Calabra-Melia redatto dal gruppo di lavoro coordinato dal Prof. Luigi Ferranti nell'ambito della convenzione Frosio Next S.r.l. – DiSTAR;
- 3) carta geologica della Calabria 1:25.000 (Foglio 254 Messina-Reggio Calabria - I NE S. Eufemia d'Aspromonte, I SE Delianuova, I SO Calanna, I NO Bagnara Calabria);
- 4) database delle sorgenti del Ministero dell'Ambiente;
- 5) database delle sorgenti della Regione Calabria;
- 6) database dei pozzi della Regione Calabria;
- 7) pubblicazione N. 14 del Servizio Idrografico "Le Sorgenti Italiane (Calabria e bacini lucani con foce nel Tirreno)" del 1941;
- 8) Le Sorgenti Italiane (Calabria e bacini lucani con foce nel Tirreno). Foglio N. 254 Messina (1941). Servizio Idrografico. Pubblicazione N. 14 (1941);
- 9) dati meteorologici della rete di monitoraggio del Centro Funzionale Multirischi della Regione Calabria;
- 10) elaborati progettuali del Progetto "Favazzina";
- 11) carta topografica Istituto Geografico Militare 1:25.000;
- 12) carta Tecnica Regionale (1:5.000);
- 13) dati meteorologici ed elaborati cartografici del Centro Funzionale Multirischi della Regione Calabria;
- 14) Pubblicazioni scientifiche:
 - Allocca V., Celico F., Celico P., De Vita P., Fabbrocino S., Mattia S., Monacelli G., Musilli I., Piscopo V., Scalise A.R., Summa G. & Tranfaglia G. (2007). Note illustrative della Carta idrogeologica dell'Italia meridionale - Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, ISBN 88-448-0215-5, p. 211, con carte allegate, ISBN 88-448-0223-6 (3 tavole fuori testo).
 - De Vita P., Allocca V., Celico F., Fabbrocino S., Mattia C., Monacelli G., Musilli I., Piscopo V., Scalise A.R., Summa G., Tranfaglia G., Celico P. (2018). Hydrogeology of continental southern Italy. *Journal of Maps*, 14:2, 230-241. doi:10.1080/17445647.2018.1454352.

3. RICOSTRUZIONE DEL MODELLO IDROGEOLOGICO E IDROSTRUTTURALE

Al fine di valutare gli approfondimenti di carattere idrogeologico richiesti dal MASE, con particolare riferimento alla ricostruzione del modello idrogeologico e idrostrutturale, si è ritenuto di preliminare rilevanza descrivere sinteticamente lo stato delle conoscenze idrogeologiche della Calabria meridionale con riferimento agli schemi di circolazione idrica sotterranea dei complessi idrogeologici ignei e metamorfici paleozoici, che costituiscono il basamento, e di quelli sedimentari marini del Quaternario, che invece ne formano le coperture, nonché di quelli del Quaternario e Olocene che costituiscono le piane alluvionali e costiere. Ciò soprattutto in considerazione del grado di conoscenza generalmente scarso delle caratteristiche idrogeologiche del territorio oggetto degli interventi del progetto "Favazzina".

Dopo detto inquadramento, in base ai dati analizzati, è stato ricostruito il modello idrogeologico e idrostrutturale dell'area di interesse che è da intendersi valido in termini concettuali ed oggetto di ulteriori affinamenti basati su specifiche indagini idrogeologiche.

3.1 Inquadramento delle conoscenze idrogeologiche generali

3.1.1 I complessi idrogeologici igneo e metamorfico della Calabria

I complessi idrogeologici igneo e metamorfico dell'Arco Calabro (De Vita et al., 2018) costituiscono la tipologia dominante di basamento della Calabria meridionale, a sud del lineamento tettonico Capo Vaticano-Valle del Mesima-Soverato (Bonardi et al., 1980; 2003). Le risorse idriche sotterranee circolanti in questi complessi idrogeologici, sebbene di minore rilevanza strategica ai fini dell'approvvigionamento idrico regionale, possono tuttavia essere ritenute significative per l'approvvigionamento locale.

La circolazione idrica sotterranea e la ricarica di questi complessi idrogeologici sono principalmente condizionate dal grado di alterazione dell'ammasso roccioso, che, com'è noto, varia in funzione della profondità e del grado di fratturazione dello stesso. Il profilo di alterazione comprende uno strato superficiale profondamente alterato, costituito da depositi residuali sabbioso-siltosi; verso il basso, il grado di alterazione diminuisce progressivamente, fino a giungere al substrato inalterato. Questo tipico profilo, riscontrato anche in altre regioni del mondo (Acworth, 1987), può essere schematizzato in termini idrogeologici mediante la sovrapposizione di un acquifero poroso superficiale su un acquifero fessurato che è limitato inferiormente dal substrato impermeabile.

Le rocce intrusive (graniti, granodioriti, quarzodioriti) costituiscono degli acquiferi poco permeabili, definibili acquitard (Freeze & Cherry, 1979), nei quali la circolazione delle acque sotterranee avviene nella parte relativamente superficiale, fino alla profondità media di circa 40 - 50 m dove le fratture risultano generalmente chiuse dalla pressione litostatica. Di queste, quelle maggiormente acquifere sono quelle a sviluppo sub-verticale.

Le caratteristiche idrogeologiche della parte superficiale, costituita da depositi residuali, dipendono dal grado di alterazione e dalla frazione granulometrica prevalente. Detta zona funge sia da

serbatoio temporaneo dell'acqua di infiltrazione, che successivamente percola nell'acquifero fessurato sottostante, e sia da acquifero superficiale indipendente. Laddove lo spessore dei depositi superficiali incoerenti è limitato a pochi metri, prevale la funzione di modulazione, che consente la filtrazione dell'acqua al sottostante substrato fessurato. Invece, dove prevalgono le rocce scistose, oppure il manto di terreni residuali raggiunge il massimo spessore (alcune decine di metri), a causa dell'eterogeneità dei depositi incoerenti, ed in particolare per la presenza di livelli argillosi, possono formarsi una serie di falde sospese nell'ambito dei terreni che ricoprono il substrato. Ciò è evidenziato in particolare dalla presenza di numerose sorgenti nella parte medio alta dei versanti, con portata non superiore a $0,001 \text{ m}^3/\text{s}$ (1 l/s), emergenti dalla stessa coltre di alterazione, e dalle perforazioni idrogeologiche che hanno evidenziato la presenza di falde sospese nell'ambito della coltre di alterazione.

Nella zona sottostante, caratterizzata da un ammasso roccioso fessurato, ha sede la principale circolazione idrica sotterranea, sia nel complesso idrogeologico igneo che in quello metamorfico; questo orizzonte di transizione è generalmente spesso alcune decine di metri.

In generale, nei complessi ignei, costituiti da rocce granitoidi, si riscontra un grado di fratturazione dell'ammasso roccioso più elevato di quello riscontrabile nelle rocce metamorfiche, ed in particolare di quelle scistose. Ciò in relazione al differente comportamento meccanico dei due tipi di ammassi rocciosi. In particolare, in corrispondenza delle faglie connesse con le fasi tettoniche più recenti, come quelle plio-pleistoceniche, l'ammasso roccioso mostra una fascia molto larga interessata da intensa fratturazione ed incremento di permeabilità.

Come in altre parti del mondo ([Le Grand, 1954](#); [Davis and De Wiest, 1996](#); [Summers, 1972](#)), le fessure tendono a chiudersi in profondità a causa dell'incremento di carico litostatico. Pertanto, la permeabilità dell'ammasso roccioso, già scarsa, subisce un generalmente ulteriore decremento con la profondità. Come risultato di ciò la fessurazione nell'ammasso roccioso sia igneo che metamorfico genera un acquifero/acquitaro di base da discontinuo a continuo, eterogeneo ed anisotropo, limitato inferiormente dalla sottostante parte di ammasso roccioso, relativamente impermeabile, con comportamento di acquiclude.

La trasmissività di questi acquiferi/acquitaro risulta essere variabile negli ordini di grandezza da $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ a $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Le falde che si riscontrano sono generalmente libere con gradienti piezometrici elevati (compresi tra 1% e 15%), le cui zone di recapito sono connesse, direttamente o indirettamente, con le condizioni topografiche. Infatti, i principali punti di recapito della circolazione idrica sotterranea sono rappresentati da sorgenti, raramente contraddistinte da portate superiori a $0,050 \text{ m}^3/\text{s}$ (50 l/s), laddove condizioni geomorfologiche favorevoli, spesso rappresentate dall'incremento di pendenza verso valle, fanno avvicinare la superficie piezometrica al piano di campagna; oppure da sorgenti lineari che si manifestano come incrementi di portata in alveo, fino a $0,500 \text{ m}^3/\text{s}$, (500 l/s) lungo i corsi d'acqua che attraversano le zone ad elevata fratturazione. Dove i rilievi costituiti dai complessi idrogeologici ignei e metamorfici sono bordati dai depositi alluvionali delle pianure alluvionali quaternarie, avviene il travaso del deflusso idrico sotterraneo dall'ammasso roccioso igneo verso gli acquiferi porosi.

Gli ammassi rocciosi ad alto metamorfismo (gneiss) hanno caratteristiche idrogeologiche simili a quelle degli acquiferi di tipo igneo (rocce granitoidi). Infatti, la porosità è bassa ed associata alla

fessurazione di origine tettonica, alla zona di decompressione superficiale ed ai piani di scistosità. Il grado di permeabilità complessivo è generalmente più basso di quello degli ammassi rocciosi ignei intrusivi, anche perché questi acquiferi presentano più ampie zone di argillificazione coincidenti, spesso, con intercalazioni filladiche.

Le sorgenti ascrivibili alla circolazione idrica sotterranea dei complessi igneo e metamorfico della Calabria sono in gran parte contraddistinte da una portata ridotta (inferiore a $0,001 \text{ m}^3/\text{s}$; 1 l/s). Solo 150 sorgenti, tra le 2.662 censite in Calabria, hanno una portata compresa tra $0,010 \text{ m}^3/\text{s}$ (10 l/s) e $0,050 \text{ m}^3/\text{s}$ (50 l/s) (Allocca et al., 2007). Queste sono tutte situate nei fondivalle o alla base dei rilievi. Anche il regime di queste ultime sorgenti, che mostra modeste variazioni di portata nell'arco dell'anno idrologico, è concorde con l'alimentazione proveniente dall'acquifero poco trasmissivo e con l'effetto di modulazione del deflusso sotterraneo indotto dai terreni di copertura porosi.

Come già evidenziato da Legrand (1954) riguardo ad altre aree del mondo, la produttività dei pozzi è condizionata dalla posizione topografica. In generale i pozzi più produttivi, fino ad un massimo di $0,010 \text{ m}^3/\text{s}$ (10 l/s), sono situati nelle parti topograficamente più depresse, spesso in corrispondenza delle faglie. Invece, per quei pozzi perforati nel substrato fessurato, sebbene localizzati lungo i versanti o nei pianori sommitali dei rilievi igneo-metamorfici sono state registrate portate di esercizio massimo di circa $0,001 \text{ m}^3/\text{s}$ - $0,002 \text{ m}^3/\text{s}$ ($1\text{-}2 \text{ l/s}$). Coerentemente con quanto indicato, i valori massimi della trasmissività dell'acquifero sono stati riscontrati nei fondivalle ed alla base dei rilievi (fino a $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$).

La potenzialità totale degli acquiferi ignei e metamorfici della Calabria è stimabile, sulla base di stime effettuate a larga scala, in circa $1,40 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$. Circa il 90% della circolazione idrica sotterranea alimenta i deflussi dei corsi d'acqua, mentre il rimanente 10% alimenta le sorgenti e gli acquiferi porosi che circondano i suddetti rilievi igneo-metamorfici (Bison et alii, 1995). Stime dettagliate del massiccio delle Serre, dove affiorano sia graniti che rocce scistose, mostrano una ricarica media che varia tra il 10% ed il 20% della precipitazione efficace (precipitazione al netto dell'evapotraspirazione). Questi ultimi valori potrebbero essere più elevati di quelli documentati nella letteratura riguardante altre regioni del mondo con litologie simili (Allen & Davidson, 1982; Athavale, 1985; Houston, 1988; Issar & Gilad, 1982; Muralidharan et alii, 1988; Sukhija & Rao, 1983; Thiery, 1988). La ragione di questa differenza è da ricercarsi nel fatto che la maggior parte dei dati disponibili riguarda regioni aride o semiaride, contraddistinte da elevati tassi di evapotraspirazione. Invece, in Calabria, in relazione alla latitudine ed alla particolare morfologia del territorio, si verificano condizioni favorevoli alla ricarica degli acquiferi. Fra questi fattori, inoltre, deve essere menzionato l'elevato valore delle precipitazioni (fino a 2.000 mm/anno sui rilievi), le basse temperature (con un valore medio variabile all'incirca tra 8°C e 15°C), la presenza di pianori sommitali e di un manto di depositi residuali al disopra del substrato fessurato (Ietto, 1975).

In definitiva, gli acquiferi ignei e metamorfici della Calabria si caratterizzano generalmente per uno scarso grado di permeabilità (Fig. 1) per porosità e fratturazione a cui corrisponde un coefficiente

di ricarica medio variabile dal 10% al 20% della precipitazione efficace e valori di conducibilità idraulica a grande scala variabili negli ordini di grandezza $> 10^{-6}$ m/s, per la coltre di alterazione, e compreso tra 10^{-6} a 10^{-9} m/s (Fig. 2) per la zona sottostante (Letto, 1975). La circolazione idrica sotterranea è attiva nelle fratture che sono beanti fino a profondità massime dell'ordine di qualche centinaio di metri nelle zone di faglia principale.

Da stime basate su bilanci idrologici, detti acquiferi hanno un deflusso sotterraneo specifico medio variabile da 0.004 a 0.010 $m^3/s/km^2$ (4 – 10 $l/s/km^2$) (Fig. 3). Sulla base di tali dati, che ne evidenziano la scarsa generale permeabilità, i complessi idrogeologici igneo e metamorfico calabresi possono essere definiti come **acquitard** (Fig. 4), sebbene a livello locale, in corrispondenza di principali lineamenti tettonici la conducibilità idraulica possa essere localmente più elevata.

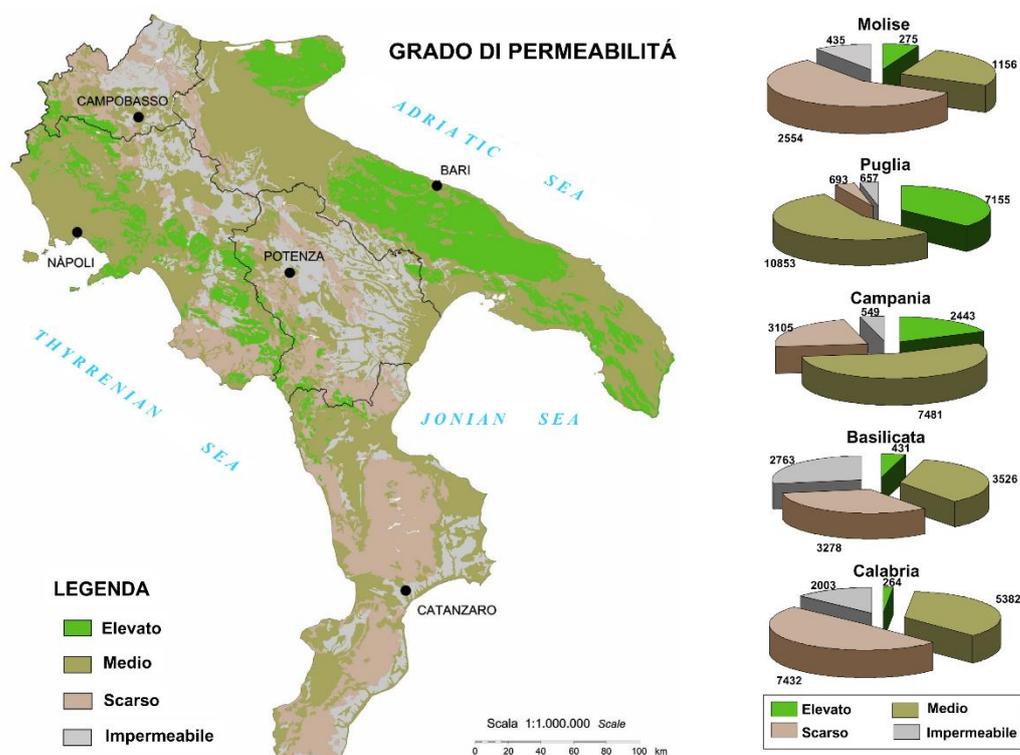


Fig. 1: Carta del grado di permeabilità dei complessi idrogeologici dell'Italia meridionale (De Vita et alii, 2018).

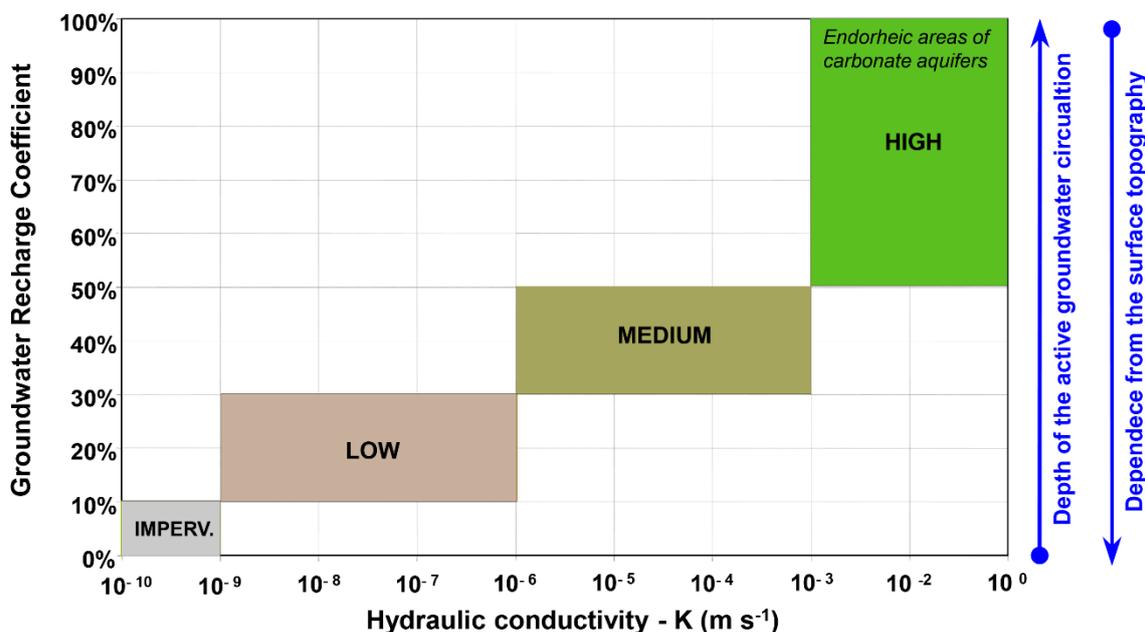


Fig. 2: Modello concettuale per la caratterizzazione di unità idrostratigrafiche (Civita, 1975; Bureau of Reclamation, 1985; Celico, 1988; Allocca *et alii*, 2014) sulla base delle relazioni tra il grado di permeabilità, la conducibilità idraulica e il coefficiente di ricarica delle acque sotterranee, determinato come rapporto tra la ricarica delle acque sotterranee e le precipitazioni efficaci ($P - Er$). Sul lato destro, sono mostrate anche le relazioni concettuali tra la profondità della circolazione delle acque sotterranee e la loro dipendenza dalla topografia superficiale (De Vita *et alii*, 2018).

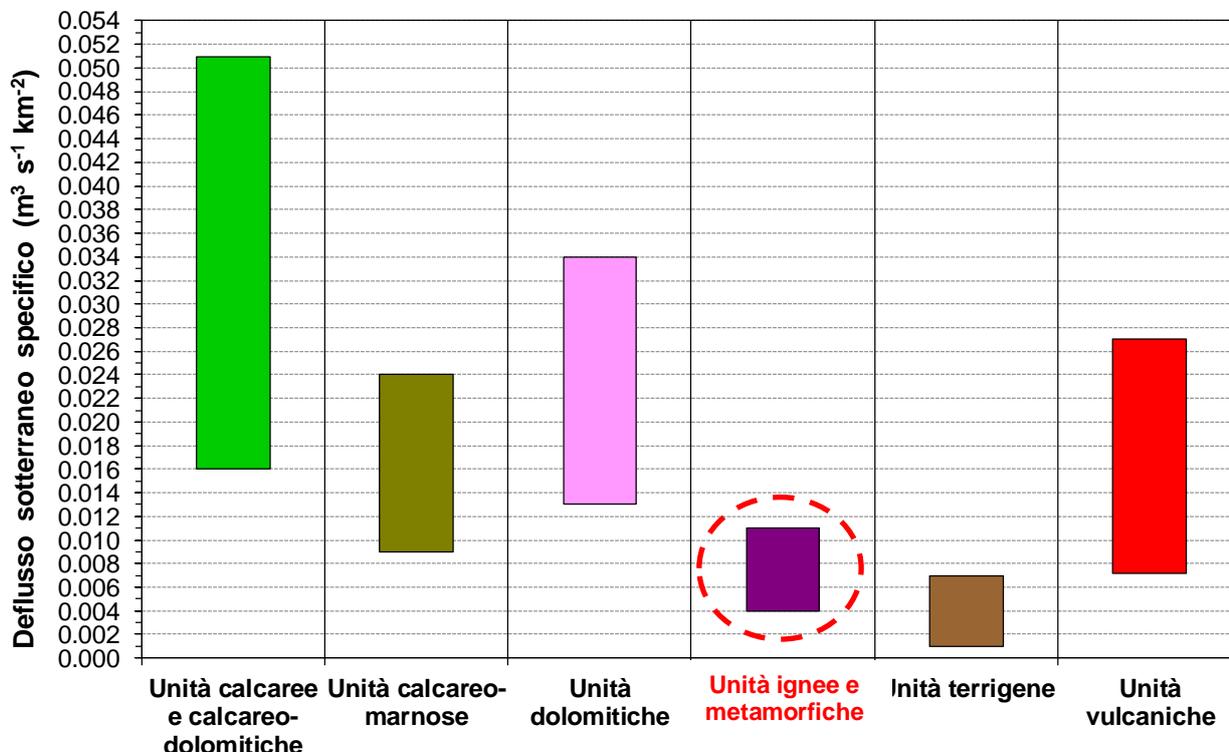


Fig. 3: intervalli di variazione del deflusso idrico sotterraneo specifico (m^3/s per km^2) stimato per le differenti tipologie di unità idrogeologiche dell'Appennino meridionale (De Vita *et alii*, 2018). È da notare che le unità cristalline si attestano sui valori variabili tra 0.004 e $0.010 m^3/s$ per km^2 , ovvero $4 - 10 l/s$ per km^2 .

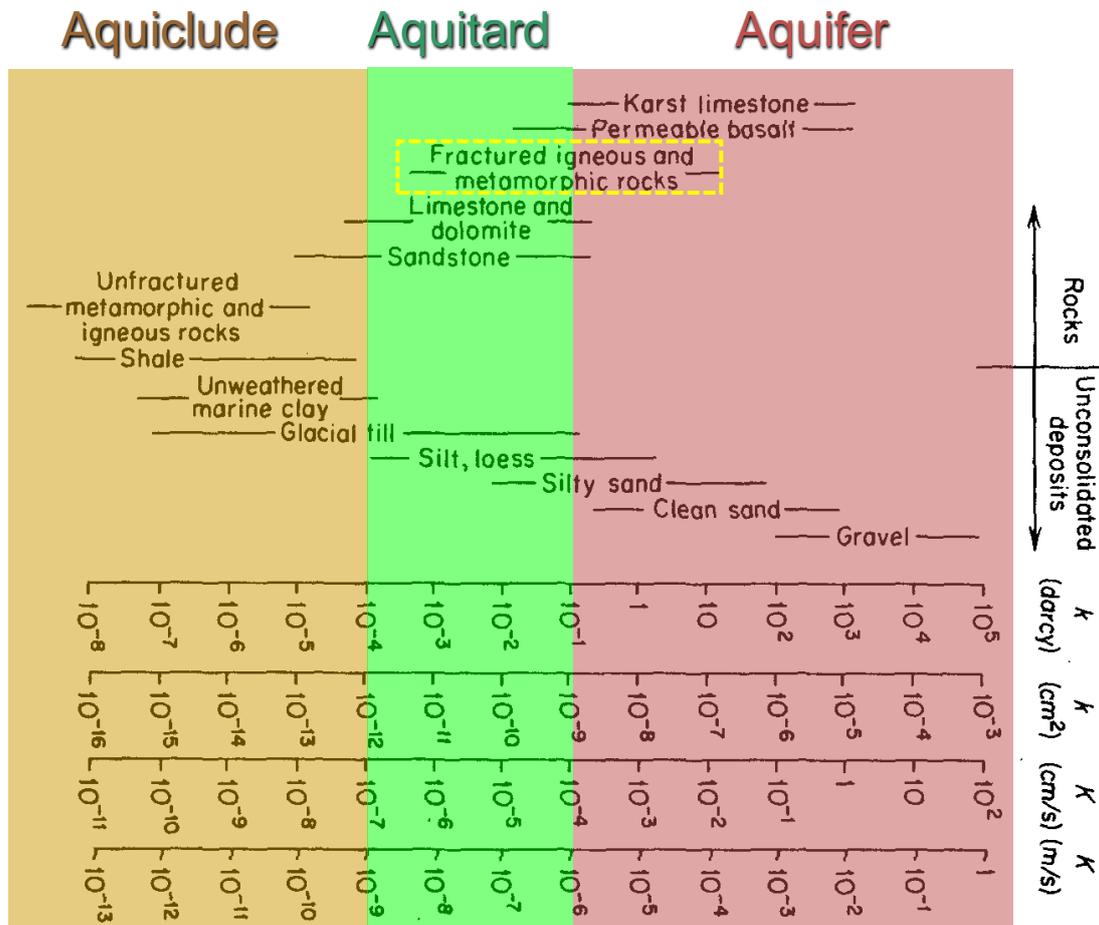


Fig. 4: intervalli di variazione della conducibilità idraulica per terre e ammassi rocciosi (Freeze & Cherry, 1979). Si noti l'intervallo di variazione per le rocce ignee e metamorfiche che fanno considerare i complessi idrogeologici da esse costituite come variabili da acquiferi ad acquitard. Nel caso in studio, per la minore permeabilità relativa dell'ammasso metamorfico si utilizza la dizione di acquitard.

In merito al generale schema di circolazione idrica sotterranea, la progressiva riduzione della conducibilità idraulica con la profondità, connessa alla diminuzione del grado di alterazione ed alla chiusura delle fratture, determina l'esistenza di una zona superficiale a maggiore permeabilità rispetto a quella più profonda. Da ciò deriva l'instaurarsi di una circolazione idrica sotterranea maggiormente attiva nella fascia superficiale il cui andamento spaziale è conforme a quello della topografia (Fig. 5). **Da ciò deriva che il "bacino" sotterraneo, ovvero l'entità geografica nella quale le acque sotterranee hanno un percorso unitario (altrimenti denominabile dominio idrogeologico), coincide approssimativamente con quello idrografico, ovvero gli spartiacque sotterranei coincidono con quelli morfologici.** A scala locale questo schema di circolazione idrica sotterranea può subire delle variazioni in relazione alla presenza di lineamenti tettonici principali, in corrispondenza dei quali la circolazione idrica sotterranea può avere un andamento diverso da quello del deflusso superficiale a causa dell'elevato stato di fratturazione.

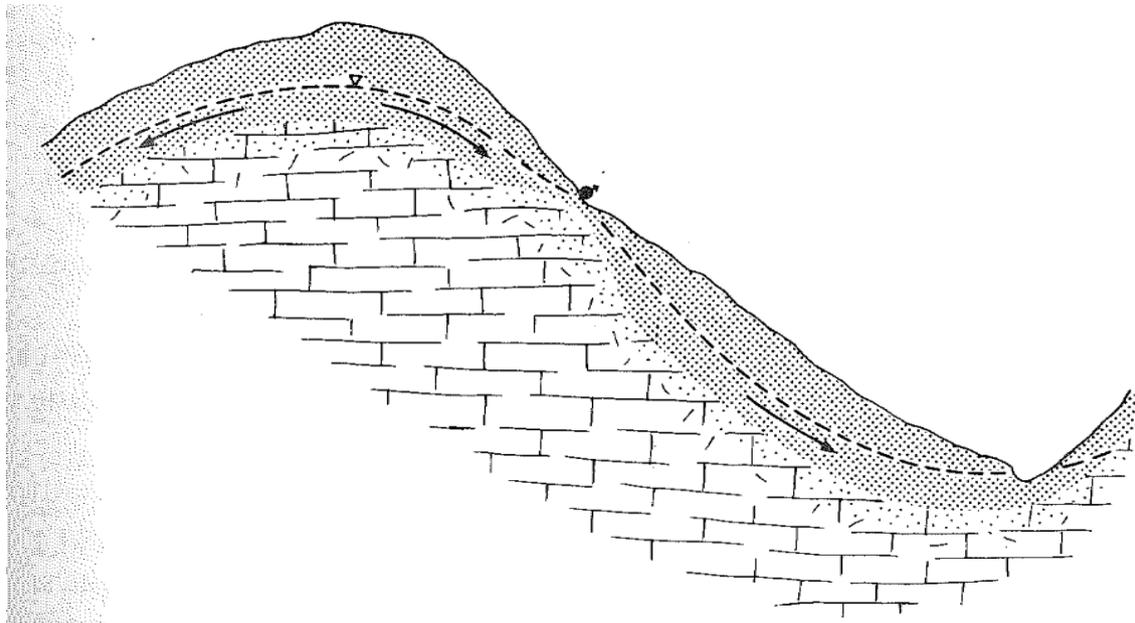


Fig. 5: schema di circolazione idrica sotterranea degli acquiferi cristallini e metamorfici (Celico, 1986). Si osservi l'andamento della circolazione idrica sotterranea conforme alla topografia, quindi la coincidenza di spartiacque superficiali e sotterranei.

3.1.2 I complessi idrogeologici marini terrazzati

I complessi idrogeologici marini del Pliocene-Quaternario che formano fino a dodici ordini di terrazzi, a quota variabile tra i 100 e 600 m s.l.m., sollevati dalle fasi tettoniche del Quaternario, sono costituiti da calcareniti fossilifere o sabbie e ghiaie litorali a matrice sabbiosa, più o meno cementate, poggiate direttamente sul basamento metamorfico paleozoico o più raramente sui vari termini della successione miocenico-quaternaria. I depositi marini passano verso l'alto a limi rossastro alluvionali e/o colluviali con livelli di sabbie e ghiaie, spessi fino a 20 m. I terrazzi al disopra dei 200-280 m sono generalmente rappresentati da piattaforme di abrasione del basamento metamorfico, senza depositi marini, e con una copertura di depositi continentali ricchi in matrice.

Nell'area di studio, i terrazzi si rinvengono tra 250 e 600 m s.l.m. solo a Ovest dell'altopiano dei Piani di Melia, sul lato calabrese dello stretto di Messina, e sono attribuiti al Pleistocene medio da Miyauchi et al. (1994).

Detti complessi idrogeologici formano acquiferi caratterizzati da un tipo di permeabilità per porosità, e subordinatamente per fessurazione, negli intervalli ove i depositi sono litificati, ed un grado di permeabilità generalmente variabile da medio ad elevato. In detti depositi la circolazione idrica sotterranea è sospesa sui limiti di permeabilità, da indefiniti a definiti, al contatto con i sottostanti complessi idrogeologici igneo e metamorfico, a minore permeabilità. La conducibilità idraulica dei depositi varia negli ordini di grandezza da 10^{-6} a 10^{-4} m/s.

La circolazione idrica sotterranea è di tipo sospeso, in relazione a quella più profonda esistente nell'acquifero igneo o metamorfico. Essa ha recapito prevalentemente in sorgenti localizzate in prossimità o al contatto del limite di permeabilità con i suddetti complessi a minore permeabilità.

L'entità delle portate sorgive è variabile da meno di 0.001 m³/s (1 l/s) fino a poco meno di 0.050 m³/s (50 l/s) ([Servizio Idrografico, 1941](#)). Ciò in relazione all'estensione del bacino sotterraneo che dipende dall'ampiezza dell'area di alimentazione e dall'eventuale frazionamento o unitarietà della circolazione idrica sotterranea, quest'ultima relazionabile alla omogeneità stratigrafica e idrogeologica del deposito. I punti di recapito possono essere condizionati, nel caso di limiti di permeabilità definiti, dalla quota del limite di permeabilità, essendo generalmente orientati verso le quote più basse del contatto.

Il coefficiente di ricarica varia nell'intervallo da 30% al 50% della precipitazione efficace ([De Vita et al., 2018](#)).

3.1.3 I complessi idrogeologici alluvionali e costieri

I complessi idrogeologici alluvionali e costieri formano acquiferi costituiti da depositi quaternari prevalentemente ghiaioso-sabbiosi, con l'interposizione di orizzonti limoso-argillosi. La preponderante presenza dei termini ghiaioso-sabbiosi si traduce in valori di trasmissività piuttosto elevati, oscillanti tra 3.0×10^{-3} m²/s a 3.0×10^{-2} m²/s ([Allocca et al., 2007](#)).

Per quanto concerne gli schemi idrodinamici, si riconosce una morfologia piezometrica piuttosto articolata, caratterizzata da una serie di assi di drenaggio preferenziali e di spartiacque sotterranei. La falda defluisce con un gradiente idraulico oscillante tra lo 0.2% e l'1%.

I rapporti tra la falda ed i corsi d'acqua appaiono alquanto diversificati. Si riscontrano per lo più fenomeni di alimentazione dal corpo idrico sotterraneo verso quelli superficiali.

3.2 Schema idrostrutturale e di circolazione idrica sotterranea dell'area di Favazzina

Sulla base delle analisi dello studio geologico redatto dal gruppo di lavoro coordinato dal Prof. Luigi Ferranti, della cartografia geologica 1:25.000 (CASMEZ), nonché della consultazione delle altre fonti di dati già citate, inerenti alle sorgenti e pozzi presenti nell'area di studio, è stato elaborato lo schema idrostrutturale e di circolazione idrica sotterranea dell'area di intervento del progetto "Favazzina".

La metodologia di analisi è stata basata su:

- a) riconoscimento delle caratteristiche idrogeologiche generali (par. 3.1), con riferimento ai complessi idrogeologici affioranti ed alle loro specificità;
- b) analisi della distribuzione spaziale delle sorgenti ed interpretazione del modello di circolazione idrica sotterranea e idrostrutturale.

Le suddette analisi sono rappresentate graficamente nei seguenti elaborati cartografici (Tavole fuori testo):

- 1) Tav. 1 - Carta idrogeologica su base CTR 1:5.000;
- 2) Tav. 2 - Sezione idrogeologica passante per il tracciato delle gallerie;
- 3) Tav. 3 - Carta del bacino sotterraneo dell'acquitaro metamorfico sotteso dalle opere del Progetto "Favazzina";
- 4) Tav. 4 - Carta delle sorgenti Pubblicazione 14 Servizio Idrografico (1941);
- 5) Tav. 5 - Stralcio carta geologica CASMEZ (1:25.000) 254 I - Messina-Reggio Calabria

Le analisi hanno condotto all'individuazione dei seguenti complessi idrogeologici (cfr. Tav. 1 Carta idrogeologica su base CTR 1:5.000), procedendo dall'alto verso il basso stratigrafico:

- 1) Complesso dei depositi antropici (h). Depositi clastici eterometrici con granulometria variabile dalle ghiaie ai limi. Costituiscono un complesso idrogeologico permeabile per porosità e caratterizzato da un grado di permeabilità da medio a scarso in relazione alla presenza variabile di matrice da sabbioso-limosa a limoso-sabbiosa.
- 2) Complesso dei depositi detritici di versante (dv). Depositi clastici derivanti dal trasporto gravitativo e/o idraulico di breve percorso: depositi detritico-colluviali e di conoide torrentizia. Costituiscono un complesso idrogeologico permeabile per porosità e caratterizzato da un grado di permeabilità medio per la presenza di matrice sabbioso-limosa.
- 3) Complesso dei depositi di frana (fr). Depositi clastici eterometrici derivanti dal trasporto gravitativo di massa per meccanismo di frana. Costituiscono un complesso idrogeologico permeabile per porosità con grado scarso per la presenza di matrice limoso-sabbiosa.
- 4) Complesso dei depositi di spiaggia (ds). Depositi clastici grossolani caratterizzati da sabbie e ghiaie ben selezionate. Costituiscono un complesso idrogeologico permeabile per porosità e caratterizzato da un grado di permeabilità elevato per l'assenza di matrice limoso-argillosa.
- 5) Complesso dei depositi alluvionali e colluviali terrazzati (Dat). Depositi clastici eterometrici con granulometria variabile dalle ghiaie alle argille. Costituiscono un complesso idrogeologico permeabile per porosità e caratterizzato da un grado di permeabilità variabile da scarso ad elevato in relazione alla variabilità spaziale delle frazioni granulometriche.
- 6) Complesso sabbioso (Spl). Depositi sabbiosi e arenacei. Costituiscono un complesso idrogeologico permeabile per porosità, e subordinatamente per fratturazione, caratterizzato da un grado di permeabilità variabile da medio a localmente elevato. Nell'area in studio, tali depositi sono riscontrabili in prevalenza nell'altopiano dei Piano di Melia.
- 7) Complesso metamorfico (Go, Sb, Gr). Complesso costituito da rocce di vario grado metamorfico, costituito da gneiss e paragneiss, afferenti alle Unità di Castagna e di Polia-Copanello. Forma acquitaro e occasionalmente acquiferi fessurati da discontinui a localmente continui, in relazione alla presenza ed interconnessione di fratture acquifere beanti ed al grado di fratturazione. Laddove la fratturazione è pervasiva il comportamento idrogeologico è di un poroso equivalente. Tipo di permeabilità per fessurazione e grado variabile da scarso a localmente medio.

I complessi idrogeologici di maggiore rilevanza per estensione areale, e che pertanto determinano una circolazione idrica sotterranea relativamente più significativa, sono: il complesso dei depositi alluvionali e colluviali terrazzati (Dat), il complesso sabbioso (Spl) e il complesso metamorfico (Go, Sb, Gr). I primi due, per caratteristiche idrogeologiche e giustapposizione, possono essere accorpati.

Da ciò consegue che la circolazione idrica sotterranea nell'area di intervento del Progetto "Favazzina" può essere suddivisa in due ambiti principali:

- A. **Circolazione idrica sotterranea sospesa, o di alta quota, nell'ambito del complesso dei depositi alluvionali e colluviali terrazzati (Dat) e del complesso sabbioso (Spl)**, che, in base alla prevalenza dei depositi è possibile denominare da ora in avanti **acquifero sabbioso**. Detti depositi formano acquiferi con grado di permeabilità da media ad elevato caratterizzati da un tipo di permeabilità per porosità, e subordinatamente per fessurazione negli intervalli ove i depositi sono litificati. In detti depositi la circolazione idrica sotterranea è sospesa al disopra dei limiti di permeabilità, da definiti a localmente indefiniti, al contatto con i sottostanti complessi idrogeologici ignei e metamorfici, a minore permeabilità. Lo spessore massimo dell'acquifero (inclusa la zona non satura) è di circa 60 m. La conducibilità idraulica dei depositi varia negli ordini di grandezza da 10^{-6} a 10^{-4} m/s.
- B. **Circolazione idrica sotterranea profonda, sottoposta a quella dell'acquifero sabbioso, nell'ambito del complesso metamorfico (Go, Sb, Gr)**, d'ora in avanti denominato **acquifero metamorfico**, caratterizzato da un generale scarso grado di permeabilità per porosità, nella coltre di alterazione, e per fessurazione nel substrato. Il grado di permeabilità può arrivare fino a medio, in relazione alla presenza di principali lineamenti tettonici. La conducibilità idraulica è maggiore nella coltre di alterazione con valori variabili negli ordini di grandezza $> 10^{-6}$ m/s e compresi tra 10^{-6} a 10^{-9} m/s per la zona sottostante.

Al fine di ricostruire lo schema di circolazione idrica sotterranea, le suddette caratteristiche idrogeologiche sono state analizzate congiuntamente alla distribuzione spaziale delle sorgenti e della loro portata, essendo questi dati di fondamentale importanza per dedurre le modalità di circolazione idrica sotterranea, in assenza di altri dati di sottosuolo.

In merito alle sorgenti, rappresentate nella carta idrogeologica, le fonti di dati consultate sono state:

- 1) database delle sorgenti del Ministero dell'Ambiente;
- 2) database delle sorgenti della Regione Calabria;
- 3) database dei pozzi della Regione Calabria;
- 4) Servizio Idrografico (1941). Le Sorgenti Italiane (Calabria e bacini lucani con foce nel Tirreno)" Pubblicazione N. 14;
- 5) carta delle sorgenti. Servizio Idrografico (1941). Le Sorgenti Italiane (Calabria e bacini lucani con foce nel Tirreno)" Pubblicazione N. 14. Foglio N. 254 Messina del 1941.

- 6) carta topografica Istituto Geografico Militare 1:25.000;
- 7) carta Tecnica Regionale (1:5.000).

L'incrocio delle suddette fonti informative ha consentito di ricostruire la distribuzione delle sorgenti e delle relative portate evidenziando anche la validità del censimento effettuato dal Servizio Idrografico tra gli anni '20 e '30 del secolo scorso (Pubblicazione 14), già analizzata e validata in una recente pubblicazione scientifica (Cusano et al., 2022). Vista la coincidenza dei dati, a tale fonte si sono verosimilmente riferite le successive fonti, compreso il database delle sorgenti del Ministero dell'Ambiente.

Nello specifico, l'areale di ricerca delle sorgenti è stato delimitato al dominio idrogeologico sotteso dalle opere in sotterraneo del Progetto "Favazzina". In base al modello concettuale di riferimento per la circolazione idrica sotterranea nei complessi idrogeologici igneo e metamorfico, l'andamento della circolazione idrica sotterranea coincide con il gradiente topografico, ovvero la circolazione idrica sotterranea ha un andamento conforme a quella superficiale, comportando una coincidenza tra spartiacque sotterranei (limiti di un bacino sotterraneo) e superficiali (Fig. 5).

Da ciò consegue che il dominio di interesse idrogeologico delle opere del Progetto "Favazzina" coincide con il bacino superficiale sotteso, rappresentato nelle tavole fuori testo (Tav. 3) con un'estensione di circa 30 km².

I limiti di detto bacino sono stati considerati validi anche per la delimitazione del dominio della circolazione idrica sotterranea sospesa del complesso sabbioso. Ciò per le specifiche caratteristiche geomorfologiche dell'area e per la geometria del contatto con il sottostante complesso idrogeologico metamorfico, desunta dallo studio geologico dell'area.

Nell'ambito del dominio idrogeologico sotteso dalle opere in sotterraneo del Progetto "Favazzina" sono state riconosciute 7 sorgenti censite dal Servizio Idrografico (Servizio Idrografico, 1941) (Tab. 1).

386 Zona Sesta							387 Bacini tra Turbolo e Petrace							
N. d'ordine	Bacino principale o secondario	Corso d'acqua	Denominazione della sorgente	Provincia	Comune	Località	Coordinate geografiche		Quota sul mare m	Portata misurata		Temperatura gradi	Qualità dell'acqua	Utilizzazione
							Longitudine	Latitudine		Data	l/sec			
2781	id.	V. Scirò	Acqua do Cuta	id.	Scilla	Scirò	3° 16' 50"	38° 15' 01"	40	7 - v - 1935	1,00	15	---	Uso potabile
2781	id.	V. Scirò	Acqua do Cuta	id.	Scilla	Scirò	3° 16' 50"	38° 15' 01"	40	7 - v - 1935	1,00	15	---	Uso potabile
2782	Favazzina	S. Antonio	Acqua Bianca III	id.	id.	Acqua Bianca	3° 21' 17"	38° 13' 18"	940	15 - v - 1935	1,00	14	---	Nessuna
2783	id.	id.	Acqua Bianca II	id.	id.	id.	3° 21' 16"	38° 13' 22"	980	15 - v - 1935	1,00	14	---	id.
2784	id.	id.	Acqua Bianca I	id.	id.	id.	3° 21' 15"	38° 13' 27"	980	15 - v - 1935	1,00	15	---	id.
2785	id.	id.	Acqua Gramati	id.	id.	Gramati	3° 20' 45"	38° 13' 15"	700	13 - v - 1935	1,00	13	---	id.
2786	Favazzina	Favazzina	Gr. Tremusa	Reggio C.	Scilla	Tremusa	3° 19' 06"	38° 14' 02"	460	18 - v - 1935	30,50	13	---	Nessuna

Tab. 1: estratto dalla Pubblicazione 14 del Servizio Idrografico "Le Sorgenti Italiane (Calabria e bacini lucani con foce nel Tirreno)" (1941).

Dalla consultazione della cartografia IGM 1:25.000 sono state altresì riconosciute altre due sorgenti minori.

In relazione alle aree di affioramento dei complessi idrogeologici, l'ubicazione delle 9 sorgenti evidenzia come 8 di esse siano ascrivibili alla circolazione idrica sotterranea dell'acquifero sabbioso mentre solo una alla circolazione idrica sotterranea nell'acquiferato metamorfico (N. 2734), ubicata nel

punto più elevato del bacino sotterraneo e distante dalle opere in progettazione (Tavv. 3, 4 e 5).
In particolare, si evidenzia come delle 9 sorgenti, 8 hanno portate minori di 1 l/s mentre solo una (Grotte Tremusa) (N. 2786), ubicata a circa 500 m s.l.m., ha una portata rilevante, misurata pari a 30.50 l/s il 18 maggio 1935 (lo stesso dato viene riportato anche nel database delle sorgenti del Ministero dell'Ambiente) che alimenta un acquedotto locale a servizio degli abitati della zona costiera, riportato sia sulla cartografia IGM 1:25.000 che sul CTR 1:5.000 (Fig. 6).

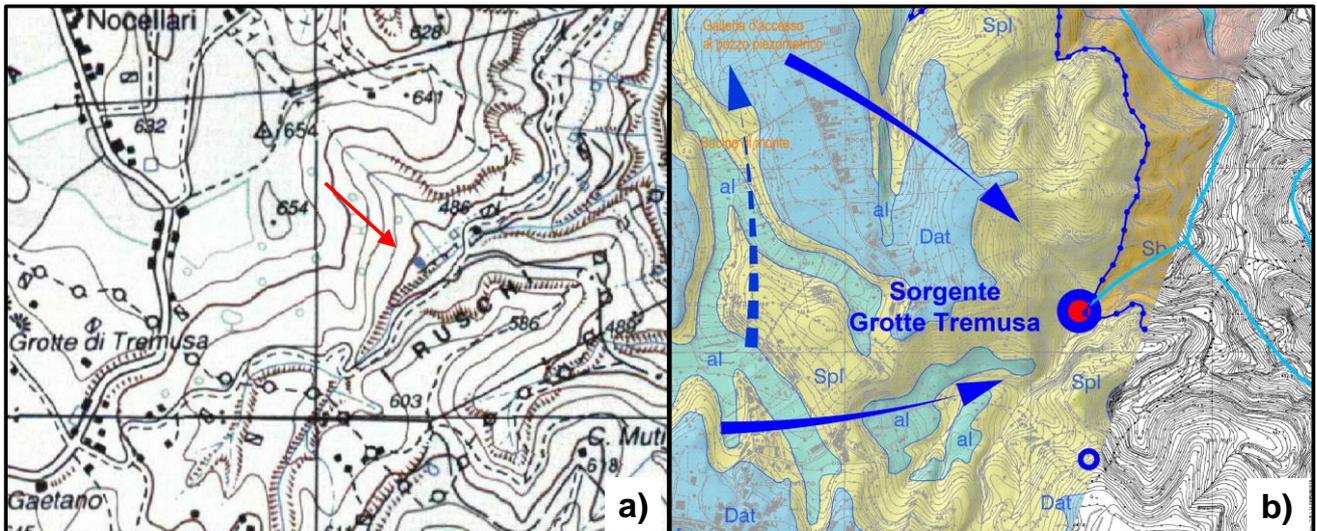


Fig. 6: a) stralcio dalla carta topografica IGM 1:25.000 con indicazione della sorgente Grotte Tremusa; b) stralcio della carta idrogeologica (Tav. 1) per lo stesso settore con indicazione della sorgente Grotte di Tremusa.

La maggiore presenza di sorgenti ascrivibili alla circolazione idrica sotterranea del complesso sabbioso evidenzia i seguenti aspetti che sono in linea con le caratteristiche idrogeologiche generali (cfr. par. 3.1) (Tav. 1):

- a) scarsa permeabilità del complesso metamorfico con prevalenza dei deflussi superficiali su quelli sotterranei (limitata infiltrazione efficace);
- b) maggiore permeabilità del complesso sabbioso;
- c) circolazione idrica sotterranea sospesa del complesso sabbioso indotta dalla minore permeabilità del sottostante complesso metamorfico;
- d) circolazione idrica sotterranea del complesso sabbioso, compartimentata su più livelli, nel caso di limiti di permeabilità indefiniti, e basale (al contatto con il sottostante acquitard metamorfico), nel caso di limiti di permeabilità definiti; quest'ultima tipologia di circolazione idrica sotterranea caratterizza la sorgente Grotte di Tremusa che, per la sua portata significativa, indica la sussistenza di una circolazione idrica sotterranea unitaria sviluppantesi in un bacino sotterraneo sospeso approssimativamente coincidente con l'areale di affioramento del complesso sabbioso, ovvero con l'ampio terrazzo marino di Piani di Melia (circa 600 m s.l.m.).

Il suddetto schema idrogeologico è stato rappresentato graficamente (Tavv. 1 e 3) nella quale sono riportati: le sorgenti, le direttrici del deflusso idrico sotterraneo dell'acquifero sabbioso e di quello metamorfico, il limite di permeabilità tra l'acquifero sabbioso e quello metamorfico (Fig. 7).

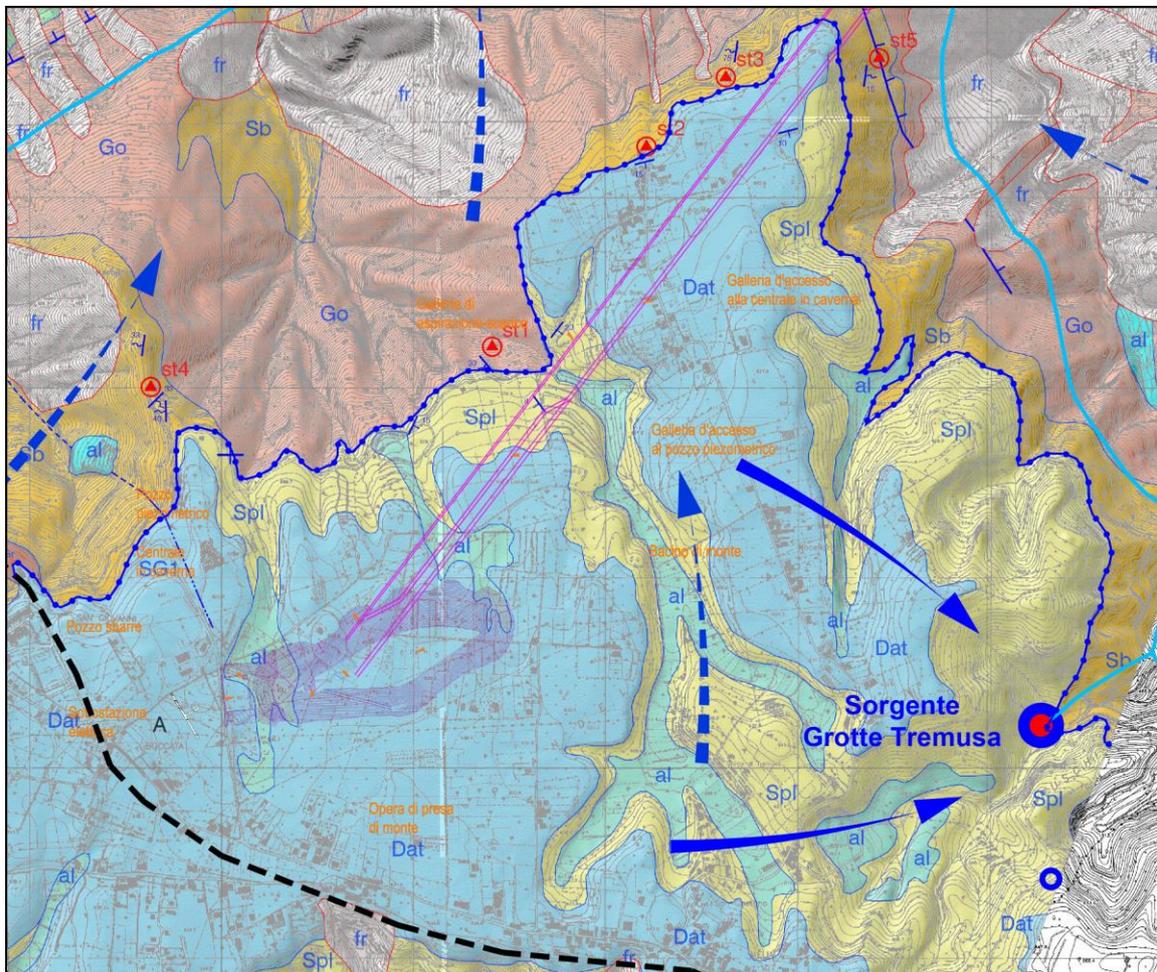


Fig. 7: stralcio della carta idrogeologica (Tav. 1) con riferimento alla principale area di affioramento dell'acquifero sabbioso avente come principale recapito la sorgente Grotte di Tremusa (per la simbologia idrogeologica, consultare la Tav. 1).

La circolazione idrica sotterranea è rappresentata come differenziata tra i due complessi idrogeologici. Per l'acquifero sospeso sabbioso, la circolazione idrica sotterranea appare convergere, in direzione SE, verso la sorgente Grotte di Tremusa che rappresenta il punto a quota più bassa del limite di permeabilità definito, quindi il recapito della circolazione idrica sotterranea di una porzione piuttosto ampia dell'area di affioramento del complesso sabbioso. Diversamente, il deflusso sotterraneo dell'acquifero metamorfico, a maggiore profondità, è concorde con il gradiente topografico. Detto schema idrogeologico è stato rappresentato anche mediante una sezione idrogeologica sviluppata lungo il tracciato delle opere in sotterraneo (Tav. 2). Nella sezione idrogeologica sono state evidenziate le due diverse tipologie di circolazione idrica sotterranea, quella sospesa del complesso idrogeologico sabbioso e quella profonda del complesso idrogeologico metamorfico. Considerando l'orientazione relativa della sezione rispetto alla direzione del deflusso sotterraneo, il deflusso dell'acquifero sabbioso avviene approssimativamente in direzione normale a quella della

sezione e pertanto il profilo piezometro è rappresentato come orizzontale (Tav. 1), mentre per il deflusso dell'aquitard metamorfico avviene obliquamente rispetto alla direzione della sezione, e quindi rappresentato con un profilo piezometrico inclinato verso valle, sebbene meno del valore reale.

In assenza di dati piezometrici, il profilo piezometrico dell'aquitard metamorfico è stato ipotizzato considerando due ipotesi:

- falda basale delimitata in profondità da una riduzione della permeabilità per chiusura delle fratture dell'ammasso metamorfico dovuta al carico litostatico;
- falda basale, non delimitata in profondità dalla riduzione di permeabilità e con gradiente piezometrico del 10% (valore noto dalla letteratura per complessi idrogeologici a scarso grado di permeabilità).

La prima ipotesi è maggiormente congruente con gli schemi di circolazione idrica sotterranea dei complessi idrogeologici metamorfici (cfr. par. 3.1).

4. STIMA DEL BILANCIO IDROLOGICO

I risultati delle analisi idrogeologiche dell'area di intervento del Progetto "Favazzina" hanno consentito di identificare i complessi idrogeologici e il dominio di circolazione idrica sotterranea, coincidente con i settori del bacino idrografico del torrente Favazzina e di altri corsi d'acqua minori sottesi dal tracciato delle opere in sotterraneo. La superficie dell'intero bacino sotteso è pari a 30.07 km². In tale dominio idrogeologico sono state distinte le seguenti aree di affioramento di corpi idrici sotterranei:

- 1) parte di acquifero sabbioso ricadente nell'area del Piano di Melia (4.70 km²);
- 2) restante parte dell'acquifero sabbioso affiorante nelle altre aree del bacino sotterraneo (bacino idrografico), identificata dall'analisi della carta geologica CASMEZ in scala 1:25.000 (Tav. 5) (8.94 km²);
- 3) acquitard metamorfico (16.43 km²).

Ai fini della stima del bilancio idrologico, considerata la lacunosità temporale delle registrazioni pluviometriche e termometriche, gestite dal già Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale e successivamente dal Centro Funzionale Multirischi, ricadenti nel suddetto bacino e nel suo immediato intorno (stazioni di Scilla, Scilla Villaggio, Scilla Piano, Scilla Tagli, Scilla Solano, Scilla Monte Scrisi, Bagnara Calabria), in alternativa, sono stati considerati gli elaborati cartografici a scala regionale delle precipitazioni (Fig. 6) e della temperatura dell'aria medio annue (Fig. 7), riferite al periodo 1921-2000. Tale fonte di dati è statisticamente molto più significativa rispetto alle registrazioni delle stazioni summenzionate, per molte delle quali le registrazioni sono iniziate solo a partire dai primi anni '2000.

I valori medi areali di entrambe le variabili idrologiche sono stati calcolati mediante media ponderata delle aree sottese tra due isolinee consecutive (Tabb. 2 e 3).

In base a questi dati, è stata calcolata l'evapotraspirazione reale (E_r), mediante la formula empirica di Turc (1954), sperimentata su 254 bacini idrografici di tutto il mondo e finalizzata a stimare l'evapotraspirazione reale annuale dalle precipitazioni (P) e dal deflusso (Q) su scala annuale. Pertanto, il metodo incorpora empiricamente il ruolo idrologico dell'accoppiamento suolo e vegetazione sul regime di evapotraspirazione. In generale, il metodo Turc può essere considerato valido per la stima dell'evapotraspirazione reale in condizioni climatiche temperate e di copertura vegetale uniforme. Tale metodo è stato dimostrato essere validamente applicabile nella regione mediterranea mediante il confronto con i metodi di Coutagne, Thornthwaite-Matther e MODIS (Ruggeri et al., 2021).

$$E_r (\text{mm/a}) = \frac{P}{\sqrt{0,9 + (P^2/L^2)}}$$

dove L rappresenta il *potere evaporante dell'atmosfera*:

$$L = 300 + 25 \cdot T_p + 0,05 \cdot T_p^3,$$

e T_p è la *temperatura corretta*:
$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^{12} T_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^{12} P_i}$$

con: T_i = temperatura media del mese i -esimo; P_i = precipitazione del mese i -esimo

Inf. (mm)	Sup. (mm)	Area (km ²)	Precipitazione media (mm)
900	1200	15.95	1230
1200	1500	9.80	
1500	1750	4.32	
Totale		30.07	
Totale vero		30.07	

Tab. 2: stima del valore di precipitazione medio areale per l'intero "bacino" sotterraneo, ricavata dalla carta delle precipitazioni medie (1921-2000) (Fig. 6) mediante media ponderata delle aree racchiuse tra le isoiete consecutive (Inf. e Sup.) e dei rispettivi valori.

Inf. (°C)	Sup. (°C)	Area (km ²)	Temperatura media dell'aria (°C)
15	17	17.46	14.3
14	12	8.32	
11	9	4.29	
Tp (°C)			11.7
Totale		30.07	
Totale vero		30.07	

Tab. 3: stima del valore di temperatura media dell'aria, ottenuta dalla carta della temperatura media dell'aria (1921-2000) (Fig. 7), come valore medio areale dell'intero "bacino" sotterraneo, mediante media ponderata delle aree racchiuse tra le isoterme consecutive (Inf. e Sup.) e dei rispettivi valori.

Sulla base dei suddetti dati e della formula di Turc sono state calcolate le perdite verso l'atmosfera per evapotraspirazione (Er) e quindi la precipitazione efficace, ovvero la differenza tra precipitazioni ed evapotraspirazione annua (P-Er), che rappresenta la risorsa idrica teoricamente esistente sul territorio (Tab. 4), ripartita in ruscellamento superficiale ed infiltrazione efficace. Pertanto, la precipitazione efficace (P-Er) è stata considerata il parametro di riferimento per le analisi della stima della potenzialità idrica sotterranea.

Parametro idrologico	Valore medio per il bacino Favazzina
Precipitazione media (mm)	1230
Temperatura dell'aria (°C)	14.3
Temperatura dell'aria corretta – Tp (°C)	11.7
Evapotraspirazione (Turc) – Er (mm)	597.1
Precipitazione efficace P - ER	633.3

Tab. 4: stima del valore medio dei parametri idrologici per il bacino sotterraneo sotteso dall'intervento del progetto "Favazzina".

Per la stima della ricarica medio annua dei corpi idrici sotterranei identificati e delle porzioni degli stessi, è stata effettuata una stima basata sull'utilizzazione di un coefficiente empirico, denominato AGRC, utilizzato per la trasformazione della precipitazione efficace (P-Er) in infiltrazione efficace (Ie), ovvero deflusso sotterraneo (Allocca et al., 2014). I valori di AGRC utilizzati per l'acquifero sabbioso e per l'acquifero metamorfico sono stati identificati in maniera ragionata tenendo conto del modello rappresentato in Fig. 2, come rispettivamente pari a 15% e 40% (Tab. 5).

Utilizzando tali valori è stato ricavato un valore di deflusso sotterraneo nella porzione di acquifero sabbioso affiorante sul Piano di Melia ed alimentante la sorgente Grotte di Tremusa che è compatibile con il dato di portata nota per detta sorgente, come anche compatibili con i valori di rendimento specifico noti in letteratura (Fig. 3).

Complesso idrogeologico (Bacino idrografico torrente Favazzina)	Area	AGRC	P-Er	le	Rendimento specifico	Rendimento specifico	Note
	(km ²)	(%)	(mm)	(l/s)	(m ³ /s/km ²)	(l/s/km ²)	
Acquifero sabbioso Piano di Melia (sorgente Grotte Tremusa)	4.70	40%	633	37.8	0.008	8.0	Circolazione idrica sotterranea sospesa e basale, al contatto con il limite di permeabilità con il complesso metamorfico e con recapito principale verso la sorgente Grotte di Tremusa
Acquifero sabbioso in altre aree del bacino	8.94	40%	633	71.8	0.008	8.0	
Acquitarid metamorfico	16.43	15%	633	49.5	0.003	3.0	Circolazione idrica sotterranea profonda, limitata verso il basso da un limite di permeabilità indefinito con la zona a minore fratturazione e con recapito verso la linea di costa
Totale	30.07			159.1			

Tab. 5: bilancio idrologico e stima dei valori di ricarica e deflusso idrico sotterraneo nei diversi corpi idrici affioranti nell'area del bacino idrografico del torrente Favazzina.

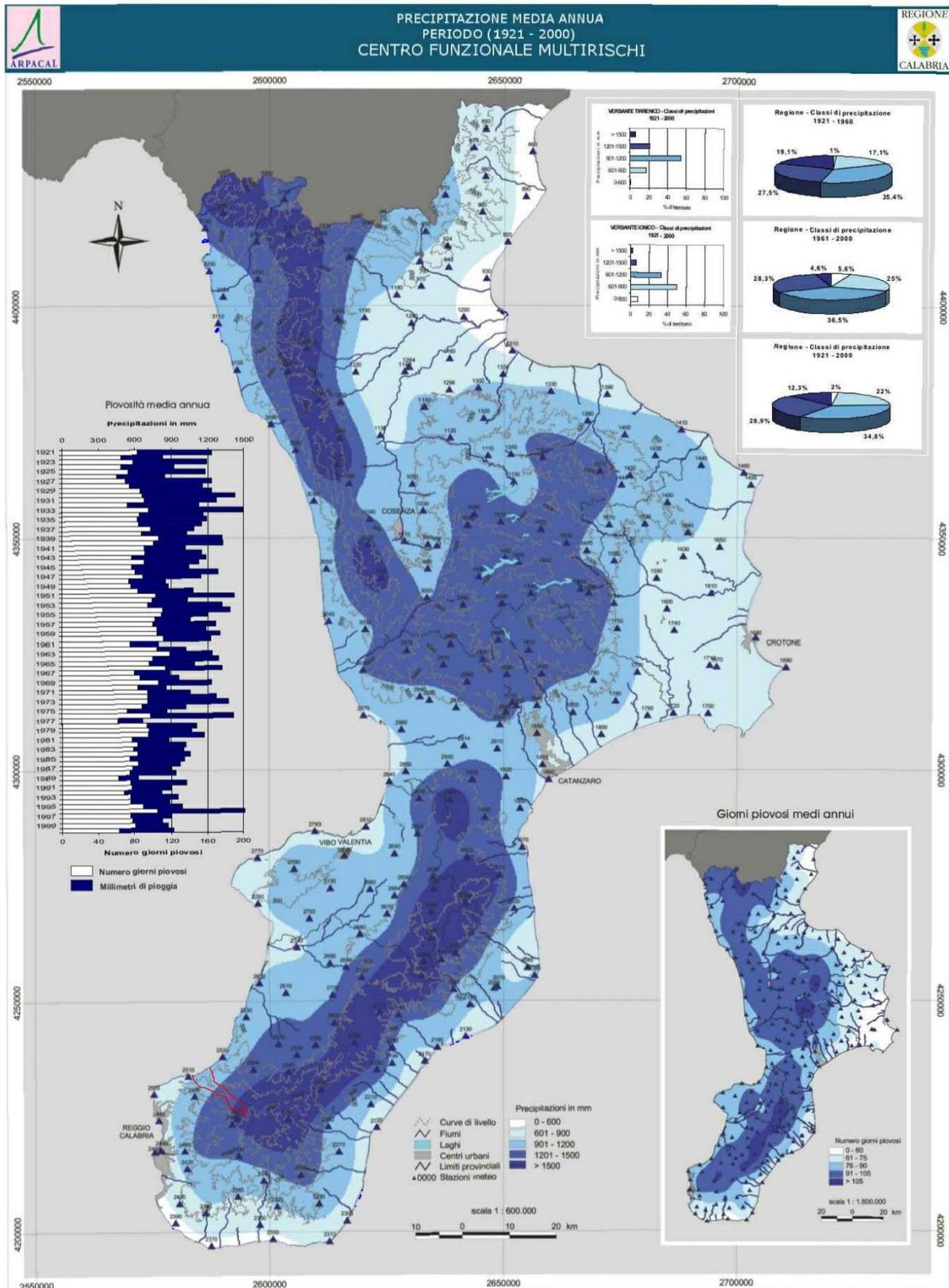


Fig. 6: carta delle precipitazioni medio annue (1921-2000) della Calabria ricostruita dal Centro Funzionale Multirischi della Regione Calabria (https://www.cfd.calabria.it/Atlante/03_Precipitazione/03_13%20Precipitazione%20ANNUA.jpg). Si osservi il perimetro del bacino idrografico sotteso dalle opere del progetto, rispetto al quale è stato stimato il valore medio

areale.

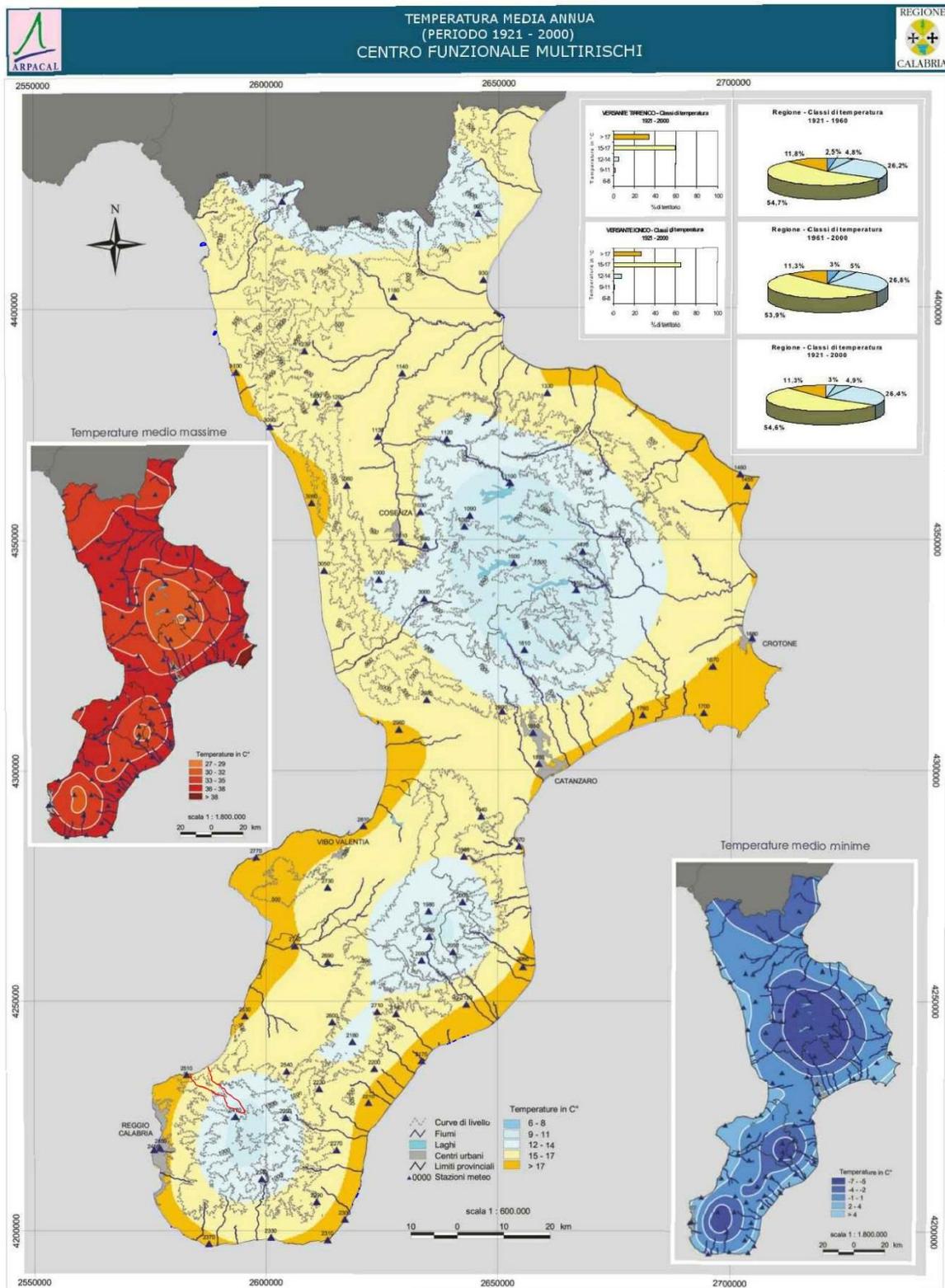


Fig. 7: carta della temperatura media dell'aria (1921-2000) della Calabria ricostruita dal Centro Funzionale Multirischi della Regione Calabria (https://www.cfd.calabria.it/Atlante/04_Temperatura/04_13%20Temperatura%20ANNUA.jpg). Si osservi il perimetro del bacino idrografico sotteso dalle opere del progetto, rispetto al quale è stato stimato il valore medio areale.

5. VALUTAZIONE DELL'INTERFERENZA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO DEL PROGETTO "FAVAZZINA" CON LA CIRCOLAZIONE IDRICA SOTTERRANEA

Con la finalità di rispondere alle ulteriori richieste del MASE (Protocollo in uscita: m_ante.CTVA.REGISTRO UFFICIALE(U).0000171.08-01-2024; Protocollo in entrata: EDISON-PI-0000252-08.01.2024) formulate al punto 9.1.1., dopo la ricostruzione del modello idrogeologico e idrostrutturale descritto nel precedente paragrafo, di seguito si procede alla valutazione dell'interferenza delle opere del Progetto "Favazzina" con la circolazione idrica sotterranea, considerando i diversi manufatti di cui esso si compone (per i dettagli tecnici, cfr. l'elaborato tecnico del progetto 1422-A-FN-R-01-0 – Relazione tecnica particolareggiata):

- 1) pozzo paratoie, consistente in un pozzo profondo 17 m e con larghezza di 7 m, localizzato 150 m a monte dell'opera di presa di valle, da utilizzare per la manovra delle paratoie;
- 2) vie d'acqua corrispondenti a pozzi (a sviluppo verticale) e gallerie (a sviluppo orizzontale) con lunghezza complessiva di circa 5 km:
 - a. pozzo verticale lungo circa 670 m, con la funzione di condotta forzata connessa alla galleria a sviluppo orizzontale;
 - b. galleria lunga circa 160 m in cui la condotta principale subisce due serie di biforcazioni (necessarie per la connessione con le quattro macchine idrauliche previste in centrale: n. 2 turbine e n. 2 pompe), e due serie di raccordi. I diametri previsti sono da DN 3700 mm a DN 1900 mm per le connessioni alle turbine; a valle delle macchine idrauliche sono state previste gallerie, che dopo due serie di raccordi si ricongiungono in un'unica galleria avente diametro DN 4200 mm;
 - c. galleria obliqua lunga circa 3900 m con pendenza pari all'1.3% circa, a sezione circolare (avente diametro interno di 4.2 m);
 - d. galleria di accesso alla centrale in caverna con diametro 4.2 m e lunghezza circa 4000 m e della biforcazione in un'altra galleria, per l'accesso al pozzo piezometrico, con diametro di 4.2 m e lunghezza circa 750 m;
 - e. galleria orizzontale lunga circa 200 m, a sezione circolare (avente diametro interno di 4.2 m), lungo il quale è presente il pozzo paratoie che termina con l'opera di presa a mare;
- 3) centrale in caverna la cui funzione è di alloggio delle macchine idrauliche; il piano principale di lavoro è a quota -61,00 m s.l.m., ad una profondità di circa 700 m dal piano campagna; il corpo della caverna ha un'altezza di circa 30 m, ed ha una pianta di 118 x 22,5 m;
- 4) pozzo piezometrico, di altezza 70 m, da realizzarsi circa 120 m a valle della centrale in caverna e approssimativamente sulla verticale del bacino artificiale, posizionato a circa 620 m s.l.m., sebbene in condizioni di elevata copertura (circa 600 m) ed approssimativamente tra le quote -50 e + 50 m s.l.m.;
- 5) pozzo e cunicolo sbarre; le sbarre in media tensione che collegano i motori-generatori della centrale in caverna ed i trasformatori della sottostazione elettrica, partendo dalla centrale in caverna, sono alloggiate all'interno di un apposito cunicolo, che diparte dal lato corto della centrale lungo circa 200 m e con pendenza del 10% circa; al termine del cunicolo, le sbarre curvano verso l'alto e sono installate all'interno di un pozzo verticale avente

diametro interno di 7.0 m, profondo circa 650 m; la sommità di tale pozzo termina all'interno dell'area dedicata alla sottostazione elettrica.

- 6) bacino artificiale di monte, ricavato tramite scavo e creazione di un rilevato costituito in parte da materiale derivante dagli scavi delle opere sotterranee ed in parte da materiale di scavo del bacino di monte; l'ubicazione del bacino è posta in corrispondenza di un altopiano, a quota di circa 630 m s.l.m., in località Piano della Melia ad una distanza di circa 2 km dalla costa ed a 3 km a SE dal centro abitato di Scilla.

Dal suddetto elenco si esclude l'opera di presa di valle poiché essa non interferisce con la circolazione idrica sotterranea, essendo realizzata in corrispondenza della linea di costa.

Le opere sotterranee del Progetto "Favazzina", consistenti in pozzi, gallerie e caverne hanno un'interazione con la circolazione idrica sotterranea che può essere valutata in riferimento a due aspetti distinti:

- a) venute d'acqua durante le operazioni di scavo;
- b) impatto sulla circolazione idrica sotterranea (effetto barriera idraulica).

Questi aspetti sono valutati in relazione alle diverse tipologie di circolazione idrica sotterranea:

- profonda, nell'acquitaro metamorfico;
- sospesa, nell'acquifero sabbioso.

5.1 Interferenza con la circolazione idrica sotterranea nell'acquitaro metamorfico

I pozzi, a sviluppo verticale, in accordo al modello idrogeologico di decrescita della permeabilità verso il basso, partendo dall'alto, attraverserebbero prima la fascia di alterazione, successivamente la parte di ammasso fratturato e decompresso e, infine, in profondità, la parte di ammasso roccioso a con permeabilità ridotta per la chiusura delle fessure connessa all'elevato carico litostatico.

Pertanto, le eventuali venute d'acqua durante la realizzazione degli scavi, il cui rinvenimento non è certo a causa della discontinuità spaziale del reticolo di fratture, possono verificarsi con maggiore probabilità nei tratti superficiali. Tuttavia, considerato il tipo e lo scarso grado di permeabilità dell'ammasso roccioso metamorfico, tali venute idriche possono essere considerate da moderate a trascurabili e diffuse anziché concentrate, ciò anche per la fratturazione pervasiva dell'ammasso metamorfico; pertanto, ben contenibili e gestibili con adeguate tecniche di scavo meccanizzato.

L'effetto di barriera idraulica generato dai pozzi sulla circolazione idrica sotterranea è trascurabile in considerazione della limitata sezione esposta al deflusso idrico sotterraneo, allo sviluppo verticale delle opere e all'approfondimento degli stessi nella zona a minore permeabilità, nonché alla generale bassa conducibilità idraulica dell'ammasso metamorfico (10^{-6} - 10^{-9} m/s).

Dallo studio geologico-strutturale, non sono state riconosciute faglie principali in corrispondenza

delle posizioni dove sono stati progettati i pozzi. Pertanto, è poco probabile che durante lo scavo delle opere in sotterraneo si possano attraversare zone ad elevata conducibilità idraulica connesse a tali discontinuità tettoniche, che, in linea teorica, potrebbero originare fasce a maggiore permeabilità anche ad elevata profondità.

Fa eccezione a questo schema il pozzo paratoie che, essendo di profondità limitata, potrebbe intercettare, in fase di scavo, i deflussi sotterranei circolanti nella coltre di alterazione e nella porzione di ammasso più superficiale, a maggiore permeabilità relativa. In questo caso, per la modesta profondità del pozzo le venute d'acqua potrebbero essere facilmente contenute con ordinarie tecniche di scavo.

Le gallerie e la caverna sono realizzate in condizioni di elevata copertura (fino a 600 m). In particolare, la via d'acqua principale e la galleria di accesso alla caverna sono realizzate per larga parte al disotto del livello del mare (fino a - 50 m s.l.m.). A causa dell'elevata profondità è possibile ritenere che dette opere vadano ad interessare verosimilmente la parte a minore permeabilità dell'ammasso roccioso. Inoltre, per l'assenza di lineamenti tettonici principali, se non limitatamente alla faglia diretta ubicata in prossimità della linea di costa, non sono prevedibili zone a maggiore fratturazione e permeabilità a tali profondità.

Ai fini della valutazione di possibili scenari, in assenza di dati piezometrici e di caratterizzazione idraulica delle zone più profonde dell'ammasso metamorfico, possono essere effettuate due ipotesi riguardanti la profondità della superficie piezometrica, entrambe rappresentate nella sezione idrogeologica passante per il tracciato delle vie d'acqua (tavola fuori testo).

La prima, supportata dal modello della riduzione della conducibilità idraulica dell'ammasso roccioso metamorfico con la profondità, prevede che la superficie piezometrica si collochi ad una quota variabile tra i 350 e 300 m s.l.m., sostenuta dalla zona profonda a minore permeabilità, e pertanto considerabile come acquiclude, ovvero un mezzo quasi impermeabile.

La seconda, prevede che l'ammasso metamorfico, sebbene contraddistinto da valori della conducibilità idraulica bassi (10^{-6} – 10^{-9} m/s) che lo fanno classificare come acquitard, non sia caratterizzato da una ulteriore riduzione della permeabilità verso il basso e che esista una falda basale con gradiente piezometrico pari al 10% (valore tipico delle falde circolanti in terreni a scarsa permeabilità). Secondo detta ipotesi la falda si collocherebbe a quote inferiori a 100 m s.l.m.

In entrambe le ipotesi la falda avrebbe recapito verso il mare con raccordo della superficie piezometrica alla linea di costa.

In merito agli scenari di venute d'acqua durante lo scavo in galleria, considerata la quota di realizzazione delle gallerie da 0 m s.l.m. a -50 m s.l.m., secondo la prima ipotesi, sussisterebbe un carico idraulico teorico fino a oltre 350 m (35 atm) che, tuttavia, dovrebbe essere considerato solo virtuale in considerazione della bassa permeabilità della zona più profonda, e delle forti perdite di carico idraulico connesse, che determinerebbero venute d'acqua trascurabili durante le operazioni di scavo. Invece, tenendo conto della seconda ipotesi, il carico idraulico arriverebbe ad un valore massimo di 150 m (15 atm). Anche in questo caso, tuttavia, le venute idriche durante lo scavo sarebbero verosimilmente contenute in considerazione della generale scarsa permeabilità dell'ammasso roccioso. Le considerazioni effettuate sono avvalorate anche dall'evidente assenza di lineamenti tettonici principali che potrebbero determinare zone ad elevata fratturazione e

permeabilità anche a grande profondità. In base alle due ipotesi, le venute d'acqua durante lo scavo sono da considerabili da trascurabili a contenute e diffuse, anziché concentrate, quindi gestibili con le usuali tecniche di scavo meccanizzato.

Per la bassa permeabilità dell'ammasso metamorfico, l'impatto di queste opere sotterranee sulla circolazione idrica sotterranea è trascurabile; l'effetto di barriera impermeabile da esse generato determinerebbe verosimilmente un trascurabile innalzamento della superficie piezometrica che avrebbe effetti non percepibili, data l'elevata profondità della superficie piezometrica.

Nonostante l'elevata profondità e lo sviluppo di un ampio settore delle gallerie ad una quota inferiore a quella del mare (fino a – 50 m s.l.m.), le gallerie non attraverseranno l'interfaccia acqua dolce / acqua marina che, per la legge di Ghyben-Herzberg si colloca ad una profondità di circa 33 volte la quota piezometrica, in relazione alla differente densità tra l'acqua dolce di falda e quella di mare.

5.2 Interferenza con la circolazione idrica sotterranea nell'acquifero sabbioso

L'acquifero sabbioso è interessato solo dalle opere sotterranee a sviluppo verticale (condotta forzata e pozzo sbarre), che lo attraversano solo per una parte della loro altezza, in quanto le gallerie hanno un percorso esclusivamente nell'ammasso metamorfico.

In considerazione dello spessore dell'acquifero sabbioso, che appare raggiungere valori massimi di circa 50 m, i pozzi attraverserebbero la zona satura di questo acquifero per uno spessore di poche decine di metri, in relazione alla profondità della superficie piezometrica. In tale contesto, le venute d'acqua, di tipo diffuso e non concentrato, potrebbero essere contenute con adeguate tecniche di scavo.

L'effetto barriera idraulica indotto dalle opere può essere considerato modesto per la limitata ampiezza della sezione impermeabile esposta al deflusso sotterraneo, che comporterebbe una debole deviazione delle linee di flusso ed una modesta risalita della superficie piezometrica sul lato monte, ciò anche per la estesa larghezza della sezione drenante dell'acquifero.

6. VALUTAZIONE DELL'IMPATTO SULLO STATO QUANTITATIVO E QUALITATIVO DELLE RISORSE IDRICHE SOTTERANEE

Al fine di dare risposta alle ulteriori richieste del MASE (Protocollo in uscita: m_ante.CTVA.REGISTRO UFFICIALE(U).0000171.08-01-2024; Protocollo in entrata: EDISON-PI-0000252-08.01.2024) formulate al punto 9.1.2., riguardanti i possibili impatti delle opere del Progetto "Favazzina" sullo stato quantitativo e qualitativo delle risorse idriche sotterranee, è da evidenziare come questi aspetti siano connessi, oltre che a problematiche di carattere ambientale, come la possibile contaminazione o il sovrasfruttamento delle risorse idriche sotterranee, anche

alla rilevanza della circolazione idrica sotterranea ed alla sua utilizzazione.

In merito a questi ultimi aspetti è da evidenziare come, nell'ambito del bacino sotterraneo sotteso dalle opere (Tav. 3), l'acquitaro metamorfico sia caratterizzato da una scarsa circolazione idrica sotterranea, localizzata a profondità elevate, che non determina emergenze sorgentizie. Tali fattori appaiono determinanti nell'impedire l'utilizzazione delle risorse idriche sotterranee sia mediante captazione di sorgenti, data l'assenza delle stesse, che mediante pozzi, così come è evidenziato dall'assenza degli stessi nel database della Regione Calabria.

Invece, l'acquifero sabbioso, per la maggiore permeabilità, è caratterizzato da una più attiva circolazione idrica sotterranea che, dato il limite di permeabilità con il sottostante acquitaro metamorfico, si manifesta mediante l'emergenza di 8 sorgenti (cfr. par. 3.2) di cui 7 sono caratterizzate da portate inferiori ad 1 l/s e non captate, mentre una (sorgente di Grotte Tremusa) è contraddistinta da una portata significativa (30.5 l/s) ed è captata da un acquedotto locale che alimenta gli abitati della zona costiera. Si ricorda qui che la portata relativamente elevata della sorgente Grotte Tremusa è giustificabile in base ad uno schema di circolazione idrica sotterranea dell'acquifero sabbioso che prevede una convergenza dei deflussi sotterranei in direzione SE, verso la stessa. Tale schema di circolazione è condizionato dalla quota più bassa del limite di permeabilità definito riscontrabile in corrispondenza della suddetta emergenza sorgentizia.

Considerato ciò, è da precisare che le opere del Progetto "Favazzina", per la loro natura, non alterano lo stato quantitativo delle risorse idriche sotterranee poiché non emungono acque dal sottosuolo, ma trasferiscono volumi d'acqua marina fino al bacino artificiale e viceversa. Pertanto, assumendo il corretto funzionamento, quindi l'assenza di perdite, le opere non determinerebbero variazioni quantitative sul bilancio idrologico sotterraneo.

L'unico effetto sugli aspetti quantitativi è rappresentato dalla riduzione della superficie utile per la ricarica dell'acquifero sabbioso rappresentata dal bacino artificiale, che si estenderebbe per 174.000 m². Tale superficie dovrebbe essere sottratta a quella totale dell'intera area di affioramento dell'acquifero sabbioso, pari a 4.650.000 m², comportando una riduzione del 3.7%. Data la piccola entità della riduzione, l'effetto sugli aspetti quantitativi è da considerarsi trascurabile.

In merito ai potenziali impatti sugli aspetti qualitativi sulle risorse idriche sotterranee, è da distinguere che essi sono distinguibili come connessi alle fasi di costruzione e di esercizio delle opere.

In merito alle fasi di costruzione, gli impatti potenziali sono associabili all'utilizzo di fluidi connessi alle tecniche di scavo delle opere sotterranee a sviluppo verticale (pozzi) e orizzontale (gallerie). Tale aspetto può essere considerato trascurabile nell'acquitaro metamorfico, in relazione alla bassa conducibilità dello stesso e quindi alla scarsa mobilità dei fluidi iniettati, nonché all'elevata capacità di filtrazione dell'ammasso, anch'essa relazionabile alla scarsa conducibilità idraulica. Appare altresì trascurabile per l'acquifero sabbioso, nei tratti verticali attraversati dai pozzi (condotta forzata e pozzo sbarre); ciò per la capacità di filtrazione dell'acquifero sabbioso, nonché per l'elevata distanza dalla sorgente Grotte Tremusa (circa 2 km).

Infine, sembrano di potenziale maggiore rilevanza gli impatti connessi ad eventuali perdite del sistema idraulico che potrebbero comportare la contaminazione delle acque di falda con acqua

marina. Tale evenienza, sebbene improbabile per la corretta costruzione delle opere che ne garantirebbe la perfetta tenuta idraulica, sarebbe di minore rilevanza per la circolazione idrica sotterranea dell'acquitaro metamorfico poiché le acque sotterranee in esso circolanti non sono utilizzate mediante captazione di sorgenti e/o pozzi ed hanno recapito verso il mare.

Diversamente, le eventuali perdite idrauliche dal pozzo utilizzato come condotta forzata, limitatamente all'attraversamento dell'acquifero sabbioso, e dal bacino di artificiale potrebbero contaminare la circolazione idrica sotterranea alterando le caratteristiche chimiche delle acque sotterranee, quindi determinando un decadimento qualitativo delle acque della sorgente Grotte Tremusa, captate da un acquedotto locale. Tale evenienza, che è ragionevole segnalare, appare a probabilità pressoché nulla per le caratteristiche costruttive del pozzo utilizzato come condotta forzata, che sarà realizzato mediante virole metalliche in acciaio Super Duplex (Alloy 32750) nonché per il bacino artificiale la cui impermeabilità è garantita da due geomembrane, a differente grado di impermeabilità, e rispettivi sistemi di raccolta, convogliamento e controllo delle eventuali perdite idriche.

7. BIBLIOGRAFIA

- ACWORTH R. I. (1987). The development of crystalline basement aquifers in a tropical environment. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 20, pp. 265-272.
- ALLEN A. D. & W. A. DAVIDSON (1982). Review of groundwater resources in fractured rocks in Western Australia. Proc. of the conference "Groundwater in fractured rock", Canberra, Aug. 31-Sep. 3. AWRC Conf. Ser. No 5: pp. 1-12.
- ALLOCCA V., MANNA F., DE VITA P. (2014). Estimating annual groundwater recharge coefficient for karst aquifers of the southern Apennines (Italy). *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 803–817, doi:10.5194/hess-18-803-2014.
- ATHAVALE, R. N. (1985). Nuclear tracer techniques for measurement of natural recharge in hard rock terrains. In: Proc. International workshop on rural hydrogeology & hydraulics in fissured basement zones. Dept. Earth Sciences, Univ. of Roorkee, Roorkee, India: 71-80.
- BISON P., FABBRI P., PIERONI M. & SPERANZINI R. (1995). Gli acquiferi di un settore dell'Italia meridionale (regioni Puglia, Basilicata e Calabria), prospettive di sfruttamento ed individuazione delle aree da sottoporre ad indagini ed interventi. *Quaderni di Geologia Applicata* 1, suppl. 1: pp. 1.123-1.131.
- BONARDI G., DE CAPOA P., DI STASO A., ESTEVEZ A., MARTIN-MARTIN M., MARTIN ROJAS I., PERRONE V. & TENT-MANCLUS J.E. (2003). Oligocene-to-Early Miocene depositional and structural evolution of the Calabria-Peloritani Arc sothern terrane (Italy) and geodynamic correlations with Spain Betic and Morocco Rif. *Geodinamica Acta*, 16, 149-169.
- BONARDI G., GIUNTA C., PERRONE V., RUSSO M., ZUPPETTA A. & CIAMPO G. (1980). Osservazioni sull'evoluzione dell'arco calabro-peloritano nel Miocene inferiore: la Formazione di Stilo-Capo D'Orlando. *Boll. Soc. Geol.*, 99, 365-393.
- BUREAU OF RECLAMATION, U.S. DEPARTMENT OF INTERIOR (1985). *Ground Water Manual*. U.S. Government Printing Office, Denver, p. 480.
- Celico P. (1986). *Prospezioni idrogeologiche*, vol. 1. Liguori Editore, Napoli, 735 p.
- CIVITA M. (1975). *Idrogeologia*. In: *Geologia Tecnica*, ISEDI, pp. 179-231.
- CUSANO D., ALLOCCA V., CODA S., LEPORE D., VASSALLO M., DE VITA P. (2022). The survey of Italian springs by the National Hydrographic Service, a forgotten database. Structuring and analysis of a dataset of Campania springs (southern Italy). *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater*, 11(2), xx – xx <https://doi.org/10.7343/as-2022-571>.
- DAVIS S. N. & DE WIEST R. J. M. (1966). *Hydrogeology*. John Wiley & Sons, New York, 463 p.
- DE VITA P., ALLOCCA V., CELICO F., FABBROCINO S., MATTIA C., MONACELLI G., MUSILLI I., PISCOPO V., SCALISE A.R., SUMMA G., TRANFAGLIA G., CELICO P. (2018). Hydrogeology of continental southern Italy. *Journal of Maps*, 14:2, 230-241. doi:10.1080/17445647.2018.1454352.
- FREEZE R.A., CHERRY J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall. 604 p.

- HOUSTON J. (1988). Rainfall-runoff-recharge relationships in the basement rocks of Zimbabwe. In: *Groundwater Recharge*, I.A.H. 8/1990: pp. 271-283.
- ISSAR A. & GILAD D. (1982). Groundwater flow systems in the arid crystalline province of southern Sinai. *Hydrological Sciences Journal*, 27, pp. 309-325.
- LEGRAND H. E. (1954). Geology and ground water in the Statesville area, North Carolina. North Carolina Dept. Conservation Development, Div. Mineral Resources Bull. 68.
- MIYAUCHI, T. (1994). Geochronology of Pleistocene marine terraces and regional tectonics in the Tyrrhenian coast of South Calabria. *Il Quaternario*, 7, 17-34.
- MURALIDHARAN D., ATHAVALE R.N. & MURTI C. S. (1988). Comparison of recharge estimates from injected tritium technique and regional hydrological modelling in the case of a granitic basin in semi-arid India. In: *Estimation of Natural Groundwater Recharge (NATO Advance Science Institute Series, C: Mathematics and Physical science, 222)* I. Simmers (ed.): pp. 195-220.
- RUGGIERI, G., ALLOCCA, V., BORFECCHIA, F., CUSANO, D., MARSIGLIA, P., DE VITA, P. (2021). Testing Evapotranspiration Estimates Based on MODIS Satellite Data in the Assessment of the Groundwater Recharge of Karst Aquifers in Southern Italy. *Water*, 13, 118. doi:10.3390/w13020118.
- SERVIZIO IDROGRAFICO (1941). *Le Sorgenti Italiane (Calabria e bacini lucani con foce nel Tirreno)*. Pubblicazione N. 14, p. 606.
- SUKHIJA B. S. & A. A. RAO (1983). Environmental tritium and radiocarbon studies in the Vedavati River basin, Karnataka and Andhra Pradesh, India. *Journal of Hydrology*, 60, pp. 185-196.
- SUMMERS W. K. (1972). Specific capacities of wells in crystalline rocks. *Groundwater*, 6, pp. 37-47.
- THIERY D. (1988). Analysis of long duration piezometric records from Burkina Faso used to determine aquifer recharge. In: *Estimation of Natural Groundwater Recharge (NATO Advance Science Institute Series, C: Mathematics and Physical science, 222)* I. Simmers (ed.): pp. 477-489.