

UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE



FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e dell'Architettura

**Studio idrogeologico per la determinazione dell'area di
ricarica di un acquifero in ambito urbano**

*Hydrogeological study for the determination of the recharge
area of an aquifer in an urban environment*

RELATORE:

Prof. Tazioli Alberto

TESI DI LAUREA DI:

Grassi Francesco

CORRELATORE:

Dott. Fronzi Davide

Anno Accademico 2023-2024

SOMMARIO

INTRODUZIONE	5
1.1 <i>Parte generale</i>	5
1.2 <i>Gestione delle risorse idriche sotterranee</i>	11
1.2.1 <i>Problema dell'approvvigionamento idrico</i>	18
1.2.2 <i>Fonti in aree urbane</i>	21
1.3 <i>Scopo della tesi</i>	25
1.4 <i>Sintesi dei metodi e dei risultati</i>	27
MATERIALI E METODI	30
2.1 <i>Inquadramento dell'area di studio</i>	30
2.1.1 <i>Geologia</i>	30
2.1.2 <i>Clima ed evapotraspirazione</i>	34
2.1.3 <i>Criticità: effetti dell'urbanizzazione</i>	36
2.2 <i>Strumentazione utilizzata nelle indagini</i>	37
2.2.1 <i>GPS AquaMeter</i>	37
2.2.2 <i>Pluviometri rete centro funzionale Regione Marche</i>	40
2.2.3 <i>QGIS e cartografia</i>	42
2.3 <i>Determinazione delle portate erogate dalla sorgente nel periodo</i>	46
2.3.1 <i>Analisi della conduttività, del pH e della temperatura</i>	57
2.4 <i>Metodo di determinazione dei volumi di infiltrazione efficace nel periodo</i>	59
2.4.1 <i>Precipitazioni e temperatura</i>	59
2.4.2 <i>Caratteri geologici del bacino</i>	62
2.4.3 <i>Evapotraspirazione potenziale</i>	65
2.4.4 <i>Uso del suolo e attribuzione dei CIP</i>	69
2.5 <i>Metodologia di calcolo</i>	74
RISULTATI	75
3.1 <i>Volumi erogati dalla sorgente nel periodo</i>	75
3.1.1 <i>Analisi del picco di portata dell'8 aprile 2024</i>	83
3.1.2 <i>Risultati sulla conduttività, sul pH e sulla temperatura</i>	86

3.2	<i>Volumi di infiltrazione efficace nel periodo</i>	87
3.3	<i>Determinazione finale superficie del bacino di alimentazione.....</i>	90
CONCLUSIONI		92
Bibliografia		95
Sitografia.....		99

INTRODUZIONE

1.1 Parte generale

La diminuzione delle risorse idriche rappresenta una delle sfide ambientali più urgenti ed importanti del nostro tempo. La disponibilità di acqua dolce è cruciale per il sostentamento degli ecosistemi, dell'agricoltura, per l'industria e per il consumo umano. Tra i fattori che più stanno contribuendo alla diminuzione delle riserve idriche globali si trovano il cambiamento climatico, l'incremento di domanda dovuto alla crescita demografica e lo sviluppo economico. Infatti, la gestione non sostenibile di queste risorse è tra le principali cause di questa crisi (Bettini et al, 2003)¹. Il cambiamento climatico modifica i naturali ritmi delle precipitazioni, aumenta la frequenza e l'intensità degli eventi di siccità, riducendo, conseguentemente, la ricarica delle falde acquifere e la disponibilità delle acque superficiali, in più, incide strettamente sulla temperatura, aumentandola, e accelerando l'evaporazione e intensificando ulteriormente lo stress idrico (Regab & Prudhomme, 2002)². Tra gli aumenti più significativi abbiamo quello relativo alla temperatura della superficie terrestre. Quest'ultima è strettamente connessa al cambiamento climatico ed è uno dei parametri che più influenza la ricarica degli acquiferi. Secondo uno studio effettuato dall'Unione Europea, i cambiamenti climatici modificheranno nei prossimi anni la disponibilità d'acqua in Europa, comportando una carenza delle risorse idriche dovuta alle sempre più imprevedibili precipitazioni e tempeste, specialmente nell'Europa Meridionale³.

¹ Bettini, V. & Giacomelli, A. (2010). *Le risorse idriche: Problemi e prospettive*. Edizioni Ambiente.

² Ragab, R., & Prudhomme, C. (2002). *Climate change and water resources management in arid and semi-arid regions: Prospective and challenges for the 21st century*. Biosystems Engineering, 81(1), 3-34.

³ https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change_it

GLOBAL AVERAGE SURFACE TEMPERATURE

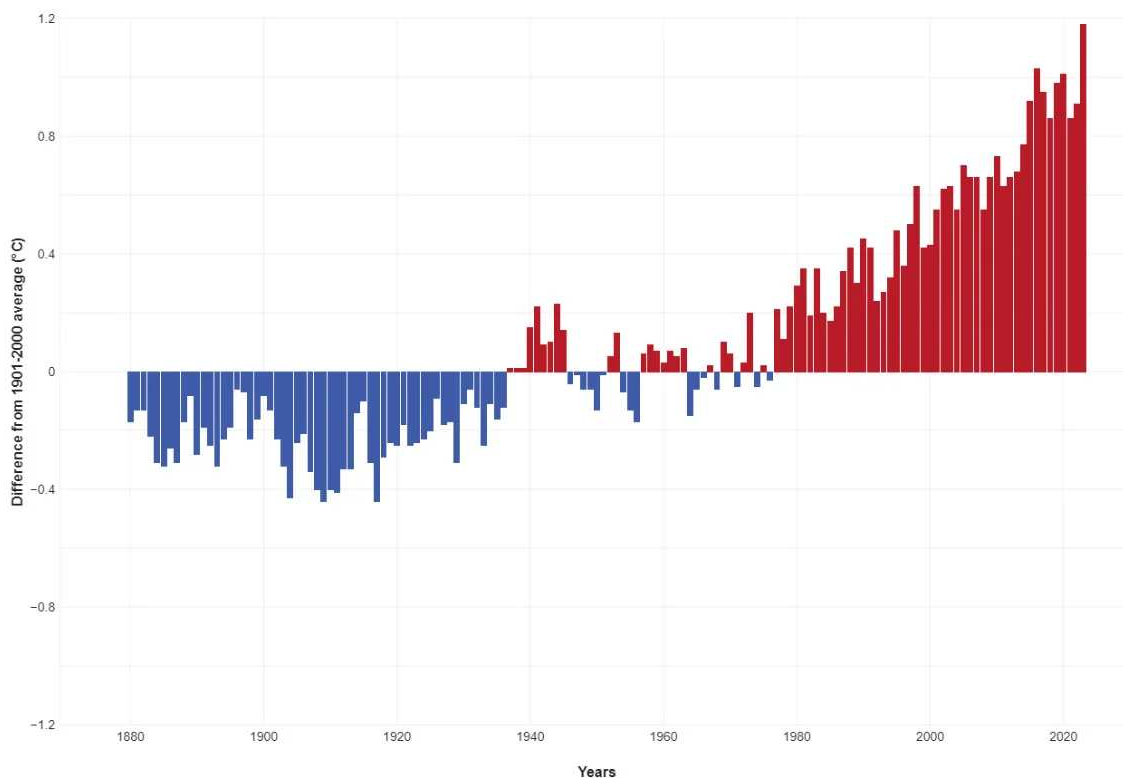


Fig. 1.1.1 – Temperatura media della superficie terrestre dal 1880 al 2020 (Climate.gov)⁴.

Parallelamente al cambiamento climatico, l'espansione agricola e industriale sta portando a una domanda sempre maggiore di acqua e un conseguente consumo insostenibile delle risorse idriche accompagnato da pratiche di gestione inefficienti e dall'inquinamento delle fonti d'acqua e delle falde acquifere (Vagliasindi et al, 2003)⁵. Negli ultimi cinquant'anni, la temperatura è aumentata mediamente di circa 1°C e questo ha avuto impatti sulla fornitura di acqua dolce, maggiori gradi di evapotraspirazione e aumento delle precipitazioni intense (Bates et al, 2008)⁶. Le acque sotterranee, contenute all'interno degli acquiferi, sono una riserva di acqua essenziale per permettere alla società di far fronte alle carenze idriche e

⁴ <https://www.climate.gov>

⁵ Vagliasindi, F. G. A., & Spina, S. (2003). *Qualità delle acque e sistemi di depurazione: Innovazioni e adeguamenti*. FrancoAngeli.

⁶ Bates, B., Kundzewicz, Z., & Wu, S. (2008). *Climate change and water*. Intergovernmental Panel on Climate Change Secretariat.

soddisfare la sempre crescente domanda di acqua dolce delle popolazioni (Taylor et al, 2022)⁷. Esse costituiscono il 99% di tutte le acque dolci presenti sul pianeta e, nonostante la loro enorme importanza, in Italia dalle falde acquifere si è prelevato e utilizzato circa l'85% di queste risorse mentre, nel resto del mondo, si prelevano mediamente 1000 metri cubi d'acqua da queste fonti (Scocchera e Minutolo, 2021)⁸.

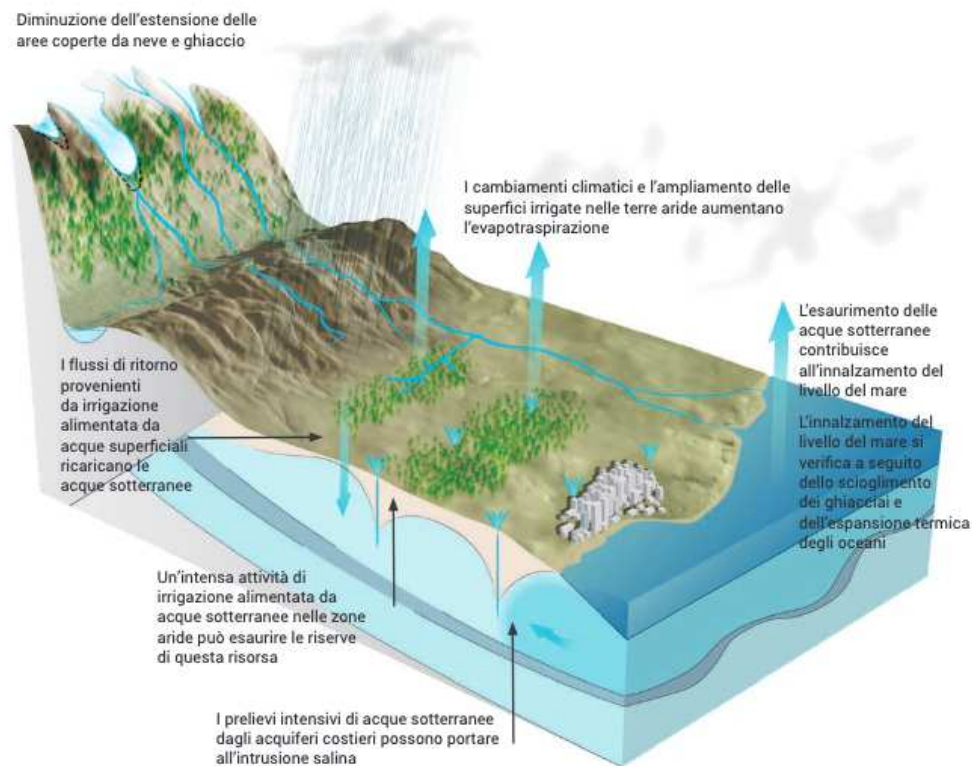


Fig. 1.1.2 – Gli effetti dei cambiamenti climatici sul ciclo idrologico e sulla ricarica dei sistemi acquiferi (Taylor et al, 2022).

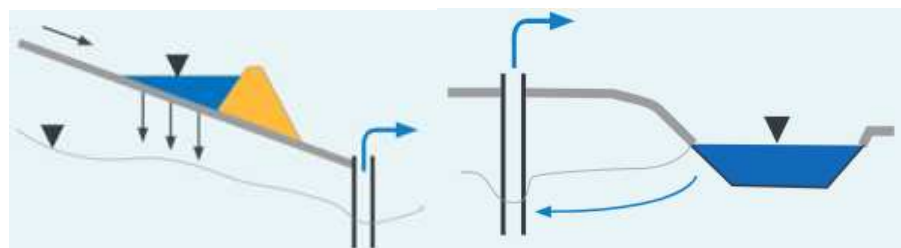
Come detto, i cambiamenti climatici vanno a modificare i ritmi e l'intensità delle precipitazioni (P) e così l'infiltrazione delle acque nel suolo e sottosuolo attraverso

⁷ Taylor, R., Aureli, A., Allen, D., Banks, D., Villholth, K. G., & Stigter, T. (2022). Acque sotterranee, acquiferi e cambiamenti climatici.

⁸ Cfr. Elisa Scocchera e Andrea Minutolo (2021). *Acque Sotterranee - il necessario è invisibile agli occhi*, Ufficio Scientifico Legambiente, pag. 9 e pag. 13

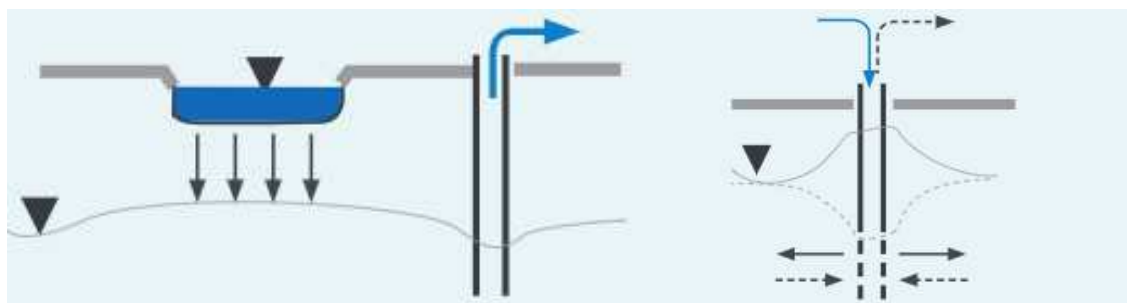
l'evapotraspirazione (ET). Attraverso uno studio, si è stimato che l'ET sia aumentata del 10% circa, tra il 2003 e il 2019 (Pascolini-Campbell et al, 2021)⁹.

Gli acquiferi sono costituiti generalmente da rocce più o meno permeabili che permettono l'infiltrazione dell'acqua nel sottosuolo, fino a giungere a uno strato di rocce impermeabili che costituisce il letto della falda. Questi ultimi, per essere riempiti d'acqua, mediante le precipitazioni, necessitano di un'area più o meno ampia che può essere definita come "la superficie che alimenta il corpo idrico sotterraneo, costituita dall'area entro la quale l'acqua piovana si infiltra direttamente nel sottosuolo oppure dall'area di contatto con i corpi idrici superficiali, quali ad esempio fiumi o laghi, da cui l'acquifero riceve alimentazione" (Cfr. Regione Piemonte al sito regione.piemonte.it)¹⁰.



(1) Il letto dei corsi d'acqua

(2) La filtrazione delle sponde



(3) La distribuzione delle acque

(4) I pozzi di ricarica

Fig.1.1.3 - Strategie di ricarica degli acquiferi (Taylor et al, 2022)

⁹ Cfr. Pascolini-Campbell, M., Reager, J. T., Chandanpurkar, H. A., & Rodell, M. (2021). RETRACTED ARTICLE: A 10 per cent increase in global land evapotranspiration from 2003 to 2019. *Nature*, 593(7860), 543-547.

¹⁰ <https://www.regione.piemonte.it/web/temi/ambiente-territorio/ambiente/acqua/aree-ricarica-degli-acquiferi-profondi>

Le falde sono masse d'acqua che vanno a riempire le porosità e i vuoti degli acquiferi¹¹, saturandoli. Ciò che genera e ricarica principalmente le falde idriche urbane sono le precipitazioni (P), e più in particolare la parte delle precipitazioni che non evapora e si infiltra all'interno del suolo e del sottosuolo, essa si ricava dalle precipitazioni efficaci (Pe). Quest'ultima porzione delle precipitazioni, appunto, si distingue ulteriormente in ruscellamento (R), ossia l'acqua che non si infiltra nel terreno e tende a scorrere sulle superfici, e infine l'infiltrazione (I), la porzione di precipitazioni efficaci che va a ricaricare le falde idriche. Da questo otteniamo l'equazione del bilancio idrogeologico: $Pe = I + R$. Dove $R = Ri + Rs$, Ruscellamento superficiale (Rs) e sotterraneo (Ri) (Formentin, 2013)¹².

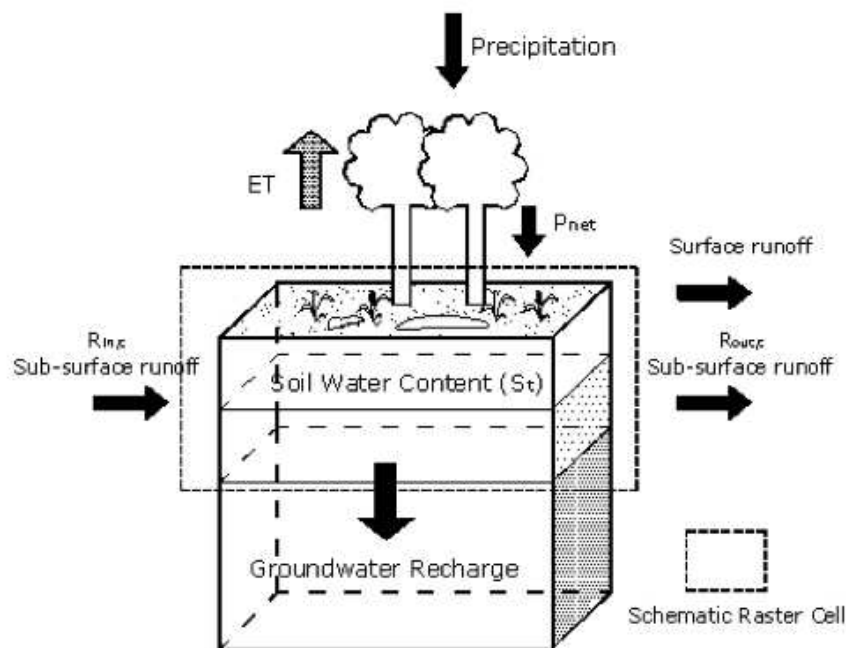


Fig. 1.1.4 – Bilancio idrogeologico. $P = Pe + ETR = R + I + ETR$. Dove ETR rappresenta l'evapotraspirazione, ossia la componente di acqua piovana che evapora per effetto del ciclo idrologico dell'acqua e la parte che traspira per effetto del nutrimento delle piante e della vegetazione¹³.

¹¹ <https://www.cafcspa.com/educational/acqua/falde-acquifere/falde-acquifere.html>

¹² Giovanni Formentin, (2013). *Modalità di stima della ricarica della falda in seguito all'infiltrazione delle acque di pioggia*, pag. 2

¹³ https://docs.dicatechpoliba.it/filemanager/303/RISORSE%20IDRICHE%202012-2013/3.Bilancio_idrologico-Indici%20vegetazione.pdf

Fattore fondamentale per completare un bilancio idrogeologico è la quantificazione dell'evapotraspirazione, diversi studiosi hanno sviluppato modelli matematici per calcolarla, in particolare si parla di evapotraspirazione potenziale, ossia la quantità d'acqua piovana che non si infiltra all'interno del terreno alle condizioni climatiche di riferimento. Si illustreranno i metodi più nel dettaglio nel paragrafo 2.4.3 di questo elaborato. Per quanto riguarda il moto dell'acqua all'interno dei terreni, il francese Henry Darcy, nel 1856, condusse un esperimento fondamentale per comprendere il flusso dei fluidi attraverso i mezzi porosi. La legge che ottenne è fondamentale in idrogeologia per conoscere il flusso dell'acqua attraverso gli acquiferi, quest'ultima è nota come legge di Darcy. Per formularla, Darcy condusse un esperimento con l'obiettivo di studiare come l'acqua si muove all'interno di un cilindro riempito di sabbia. Utilizzò un tubo verticale riempito di sabbia, che costituiva appunto il mezzo poroso e dell'acqua che fluiva dall'alto verso il basso. Misurò infine il flusso d'acqua in uscita dalla colonna e le differenze di carico piezometrico tra i due punti estremi del cilindro. Dai risultati condotti Darcy formulò la seguente espressione:

$$Q = -K A \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

Dalla formula si ha che Q è la portata del fluido all'interno della colonna, K è la permeabilità idraulica del mezzo poroso, una proprietà del materiale che dipende dalle caratteristiche del terreno considerato, A è l'area della sezione trasversale del cilindro, Δh è la differenza di carico idraulico tra il punto d'ingresso e di uscita e Δl è la distanza tra gli stessi punti (Formentin, 2013)¹⁴. Dalla legge di Darcy si ricava la formula della velocità dei fluidi

¹⁴ Giovanni Formentin, (2013) *Modalità di stima della ricarica della falda in seguito all'infiltrazione delle acque di pioggia*, pag. 7

all'interno dei mezzi porosi, applicabile alle falde idriche, questa si ottiene moltiplicando entrambi i membri dell'equazione per l'area della sezione trasversale:

$$v = k i$$

Nella formula "v" è la velocità di filtrazione, "k" rappresenta il coefficiente di permeabilità del terreno preso in esame ed "i" rappresenta il gradiente idraulico, ossia la differenza di carico piezometrico tra due punti nel terreno (Napoleoni et al, s.d.)¹⁵.

Uno dei temi di questo elaborato, è la sensibilizzazione sulla corretta gestione degli acquiferi urbani e la corretta gestione delle risorse idriche sotterranee. Nelle città il sempre crescente sviluppo urbano continua ad influenzare l'equilibrio delle acque sotterranee. L'aumento di pavimentazioni impermeabili come strade, edifici e marciapiedi limita le infiltrazioni di acqua piovana e aumenta il ruscellamento. Inoltre, le acque piovane che non si infiltrano, lungo il percorso assorbono grandi quantità di inquinanti e prodotti chimici solubili che vanno a compromettere le qualità delle falde acquifere¹⁶.

1.2 Gestione delle risorse idriche sotterranee

Le acque contenute nelle falde idriche sotterranee rappresentano una risorsa di cruciale importanza per molteplici ragioni, che riguardano sia la sostenibilità ambientale che la sicurezza dei sistemi idrici a lungo termine. In periodi di siccità, quando le riserve d'acqua superficiali possono essere insufficienti, le riserve d'acqua possono costituire una fonte di riserva d'acqua fondamentale. Un importante fattore che descrive lo stato delle risorse idriche sotterranee è lo stato quantitativo delle acque sotterranee (SQUAS). È un indicatore

¹⁵ Napoleoni, Q., Garbin, F., Scarapazzi M., & Tramonti, L. (2017). *Prove di permeabilità sui giunti di palancole*.

¹⁶ <https://fc79.gw-project.org/italiano/capitolo-9/#9.1>

dello stato di equilibrio del corpo idrico in termini di bilancio tra estrazione e ricarica naturale della risorsa. Un corpo idrico sotterraneo si definisce in stato quantitativo buono se i prelievi dovuti alle attività antropiche a lungo termine non esauriscono la risorsa d'acqua¹⁷. Questo dato dà un'indicazione sullo stato di sfruttamento delle risorse idriche sotterranee, nonché sulla loro disponibilità.

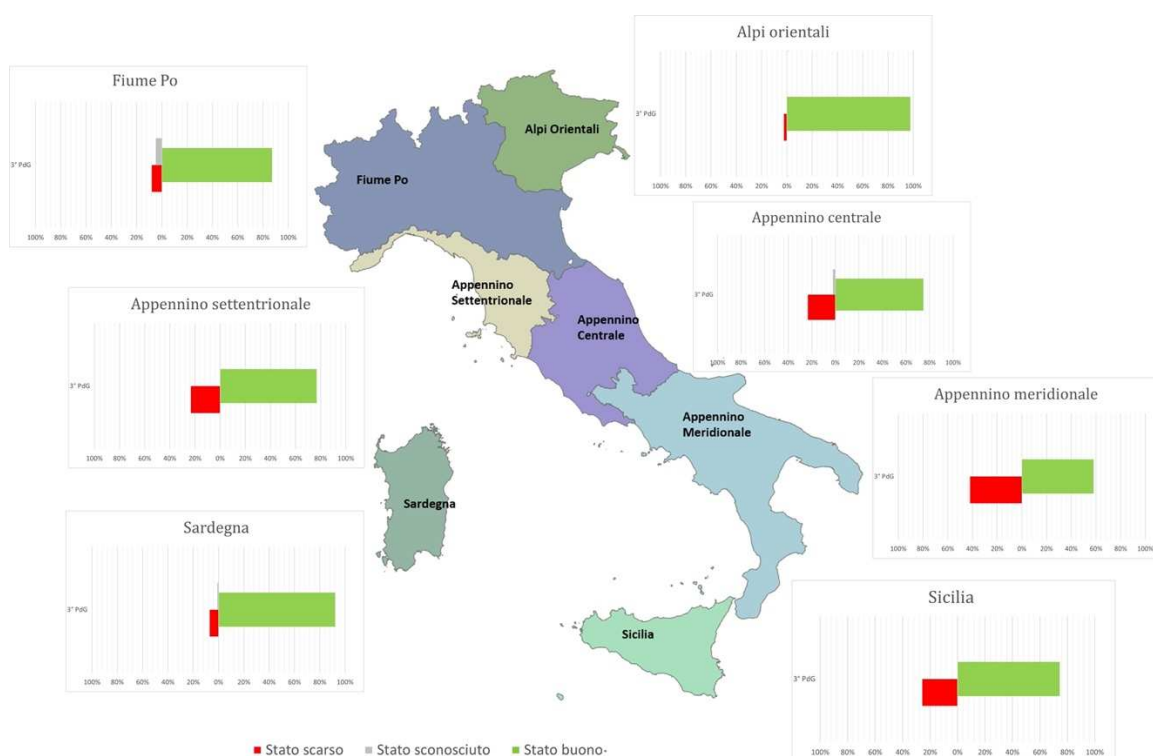


Fig. 1.2.1 – Stato quantitativo delle acque sotterranee nel sessennio 2016-2021 (ISPRA, 2022).

Lo studio dell'ISPRA ha definito che tra il 2016 e il 2021, in Italia, i corpi idrici classificati come stato quantitativo buono sono il 79% del totale mentre quelli in stato scarso sono il 19%. Il restante 2% individua gli acquiferi non classificati (ISPRA, 2022)¹⁷. L'ISPRA sta effettuando tuttora un secondo ciclo di studi per quanto riguarda lo stato quantitativo di

¹⁷ Elaborazione ISPRA su dati reporting WISE - monitoraggio 2015-2021 (aggiornamento ottobre 2022)

queste risorse, facendo riferimento al sessennio 2021-2027. I due cicli sono stati paragonati nel 2023, seppur ad oggi l'indicatore non permetta di valutarne delle tendenze definitive.

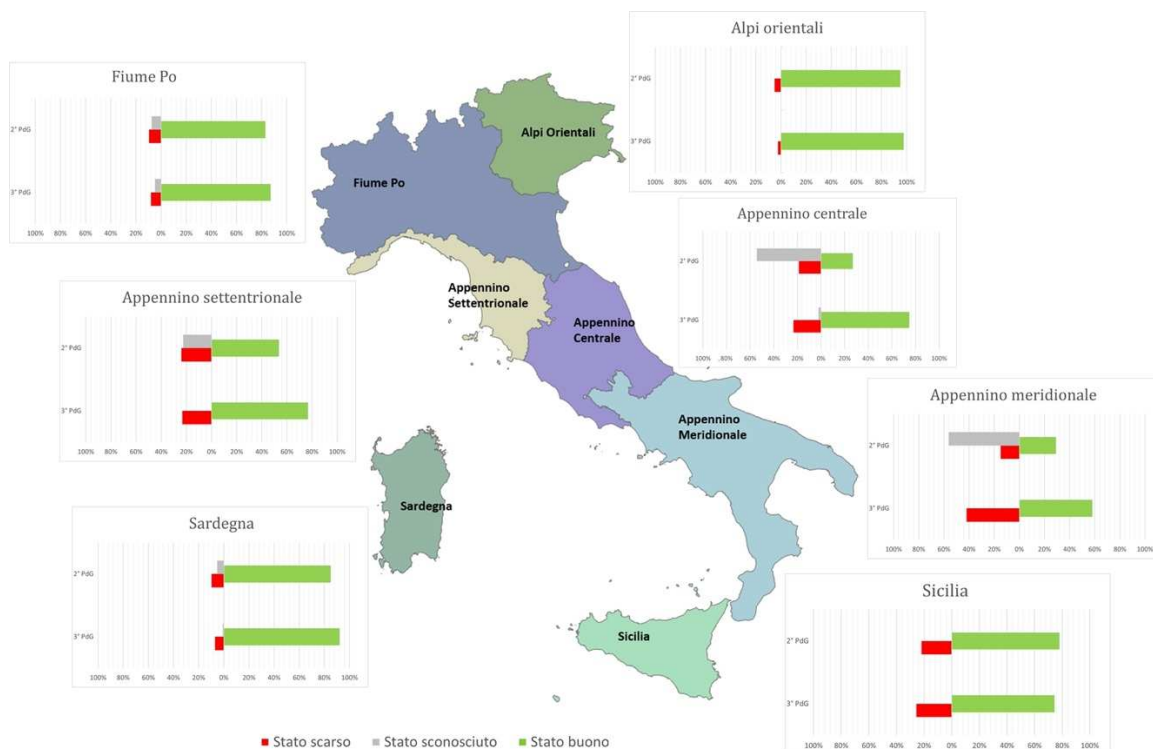


Fig. 1.2.2 – Confronto tra i dati relativi agli anni 2016-2021 e 2021-2027 (ISPRA, 2022).

Nelle Marche l'ARPAM effettua il monitoraggio delle risorse idriche sotterranee dal 2009 e uno degli indicatori che fornisce è quello che riguarda lo stato chimico delle acque sotterranee (SCAS), sulla base della presenza all'interno delle falde acquifere di sostanze chimiche contaminanti (ARPAM)¹⁸. L'analisi viene effettuata su base triennale e i dati raccolti finora permettono un primo confronto tra il triennio 2015-2017 e 2018-2020.

¹⁸ <https://www.arpa.marche.it/acque-sotterranee-nuovo>

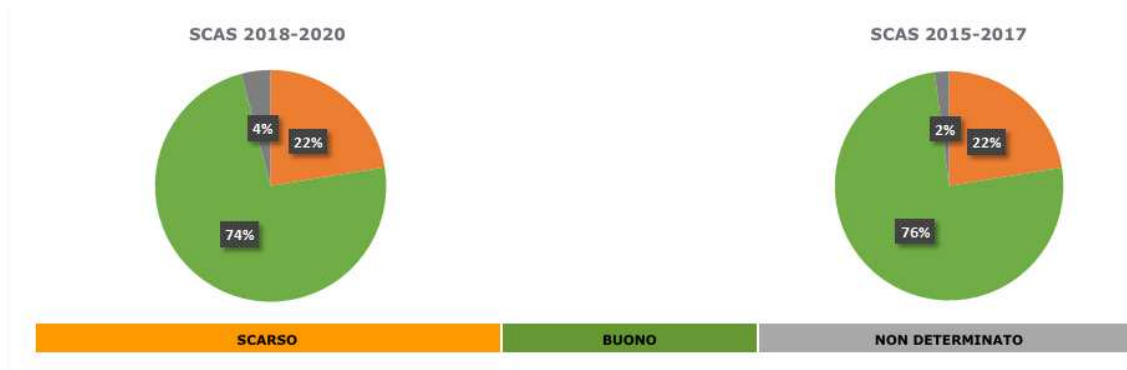


Fig. 1.2.3 – Stato chimico delle acque sotterranee. Confronto tra i due trienni (ARPAM).

Sempre secondo l'ARPAM, nella Regione Marche sono presenti 49 corpi idrici sotterranei (CIS) di cui 24 sono attualmente a rischio (sulla base del DGR n.2224/2009). I CIS della Regione sono tenuti strettamente sotto controllo da 233 stazioni di monitoraggio sia dello stato quantitativo che qualitativo.



Fig. 1.2.4 – Stazioni di monitoraggio e corpi idrici sotterranei nella Regione Marche (ARPAM).

Infatti, secondo il Ministero dell'Ambiente, le Regioni e le Province autonome sono individuate come le principali responsabili di una corretta gestione e un corretto monitoraggio di queste risorse. Sempre citando il Ministero:

“Qualora le attività di monitoraggio evidenzino che gli standard di qualità o i valori soglia stabiliti per le acque sotterranee non vengano rispettati e, pertanto, i corpi idrici risultino

in stato qualitativo (chimico) inferiore al buono, è necessario attuare le misure di ripristino, facenti parte dei cosiddetti “programmi di misure” dei piani di gestione dei bacini idrografici, di cui all’articolo 13 della Direttiva 2000/60 CE (c.d Direttiva Quadro Acque). Parallelamente alla tutela qualitativa delle acque sotterranee (buono stato chimico), la norma nazionale, il citato Decreto Legislativo 30/2009, in recepimento delle disposizioni contenute nella direttiva quadro acque 2000/60/CE, prevede anche il controllo dello stato quantitativo delle risorse sotterranee (buono stato quantitativo). Le Regioni, quindi, assicurano il mantenimento e/o raggiungimento del buono stato dei corpi idrici sotterranei, stabiliscono ed attuano le corrette azioni di monitoraggio e le eventuali misure di ripristino qualora sia accertata la compromissione del buono stato qualitativo (chimico) e quantitativo.”¹⁹

In Italia le entità amministrative che si occupano della gestione integrata dei servizi idrici sono gli ATO (Ambito Territoriale Ottimale). La loro istituzione, a seguito della Legge Galli (Legge n.36 del 1994), aveva come obiettivo il superamento della frammentazione nella gestione idrica, affidando la responsabilità di organizzazione, pianificazione e controllo dell'erogazione dei servizi idrici a un ambito territoriale che potesse garantire una gestione più efficace ed efficiente della risorsa. Ogni ATO si è costituito sulla base di uno o più comuni e province ed è caratterizzato da una omogeneità geografica e idrografica propria. All'interno di ogni ATO si individua un gestore unico che si occupa della gestione del Servizio idrico Integrato (SII), responsabile di ogni singola fase dell'intero ciclo dell'acqua: dalla captazione alla distribuzione²⁰. L'operatività degli ATO, tuttavia, ha sollevato alcune criticità legate alla differente capacità gestionale dei vari ambiti e alla complessità dei coordinamenti tra i vari livelli amministrativi che caratterizzano gli stessi. In particolare, in Italia, la riforma del settore idrico è stata al centro di continui dibattiti nel corso degli ultimi

¹⁹ Cfr. <https://www.mase.gov.it/pagina/la-direttiva-sulla-protezione-delle-acque-sotterranee-dall'inquinamento-e-dal-depauperamento>

²⁰ Parlamento Italiano. Legge 5 gennaio 1994, n.36 – Disposizioni in materia di risorse idriche (Legge galli).

anni, con proposte che mirano a migliorare l'efficienza e la trasparenza nella gestione delle risorse idriche, anche attraverso una possibile riorganizzazione degli stessi ATO²¹.



Fig. 1.2.5 – La suddivisione degli ATO nelle Marche (Monitor-Idrico Marche, 2020).

La regione marche è suddivisa in 5 Ambiti Territoriali Ottimali, tre di questi sono a direzione provinciale (ATO 1, 2 e 3). In ognuna viene istituita un'Assemblea Territoriale d'Ambito, ente pubblico non economico formato dai sindaci di tutti i comuni che si trovano nell'area, Quest'ultima assemblea, funge da ente di governo nell'ATO. A sua volta, l'assemblea sceglie un Presidente e un Vice-Presidente²².

Il Sistema Idrico Integrato accennato precedentemente, invece, è un sistema complesso che comprende l'insieme delle infrastrutture e delle attività necessarie a gestire il ciclo

²¹ Conferenza delle Regioni e delle Province autonome (2019). *Rapporto annuale sulla gestione del Servizio Idrico Integrato*.

²² Monitor-Idrico Marche, 2020

dell'acqua nella sua interezza, in una determinata area. Le fasi che comprende il SII, includono: captazione, ossia la raccolta d'acqua dalle fonti naturali come ad esempio fiumi, laghi, falde acquifere e sorgenti; adduzione, il trasporto dell'acqua captata verso gli impianti di trattamento che hanno il compito di potabilizzarla e renderla utilizzabile attraverso processi di filtrazione e disinfezione; distribuzione, attraverso una rete di acquedotti. Il SII comprende anche la gestione della rete di fognatura e della depurazione delle acque (Leonetti, 2010)²³. Il SII, come detto, è gestito da un unico soggetto in ciascun ATO, il quale può essere un'azienda pubblica, privata o mista. Il Sistema Idrico Integrato è stato istituito allo scopo di garantire un uso efficiente e sostenibile delle risorse idriche, riducendo gli sprechi e garantendo l'accesso libero e universale dell'acqua potabile (Nivarra, 2015)²⁴. La necessità di ingenti investimenti, con lo scopo di ammodernare le infrastrutture rendono tuttavia il SII non esente da criticità e da problematiche. Secondo il rapporto ISTAT sull'acqua degli anni 2020-2023 le perdite idriche sono in risalita in più della metà delle regioni. Nel 2022, il volume delle perdite d'acqua nelle fasi di distribuzione è stato pari a 3,4 miliardi di metri cubi, ovvero più del 40% dell'acqua immessa in rete, a conferma delle pessime condizioni delle reti di distribuzione. Stimando un consumo d'acqua pari alla media nazionale, sempre secondo l'ISTAT, quest'ultima perdita soddisferebbe più di 40 milioni di persone, per un singolo anno, ovvero il 75% circa della popolazione italiana²⁵. In Italia è risultato che nel 2020, l'85% delle risorse idriche prelevate deriva da acque sotterranee. Questa percentuale suggerisce che la modalità di approvvigionamento principale in Italia

²³ Leonetti, E. (2010). La disciplina del servizio idrico integrato: un quadro di sintesi. *Analisi Giuridica dell'Economia*, 9(1), 89-98

²⁴ Nivarra, L. (2015). Il servizio idrico integrato: evoluzione e prospettive. *RIVISTA DI DIRITTO DELL'ECONOMIA, DEI TRASPORTI E DELL'AMBIENTE*, 13, 171-184.

²⁵ ISTAT, *Le statistiche dell'ISTAT sull'acqua*. Report anni 2020-2023

siano le fonti d'acqua sotterranea, a differenza della Sardegna che predilige l'utilizzo idropotabile di acque superficiali²⁵.

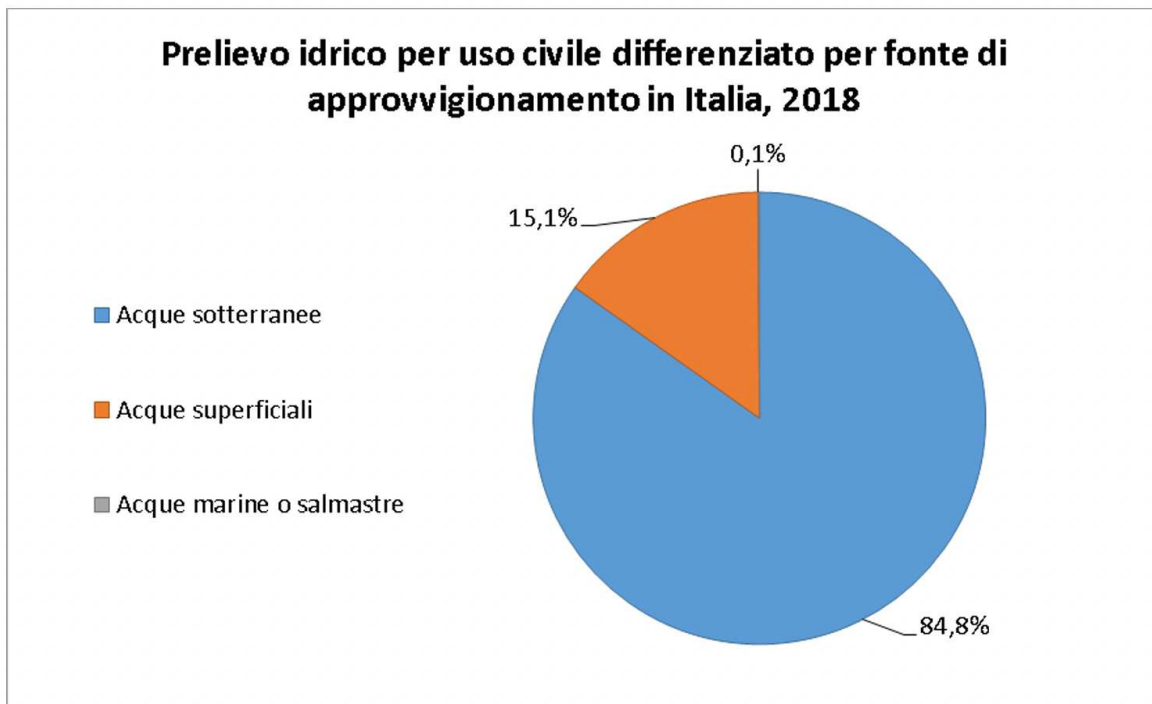


Fig. 1.2.6 - Fonti utilizzate per il prelievo idrico ad uso civile in Italia (elaborazioni ISPRA 2018)

Alla regolamentazione dell'uso, alla protezione delle falde dall'inquinamento e al monitoraggio continuo, si contrappongono due diverse problematiche principali: il problema dell'approvvigionamento idrico e i cambiamenti climatici, generalmente collegati fra loro.

1.2.1 Problema dell'approvvigionamento idrico

A causa della crescita demografica un problema che viene discusso sempre più spesso riguarda, appunto, l'approvvigionamento idrico. Con questo termine si identificano tutte le fasi che vanno dalla captazione alla depurazione, fino all'utente finale attraverso gli impianti pubblici²⁶. Più precisamente, il Ministero della Salute definisce che: *“la zona di*

²⁶ https://www.depuratoriacqualife.it/acqua-da-bere/approvvigionamento-idrico-quando-puo-essere-un-problema/#Che_cosa_si_intende_per_approvvigionamento_idrico

approvvigionamento idrico è un'area geograficamente definita. Al suo interno le acque destinate al consumo umano provengono da una o varie fonti e la loro qualità può essere considerata sostanzialmente uniforme²⁷". In Italia, questa problematica è strettamente connessa a una combinazione di fattori climatici, infrastrutturali e gestionali. Il nostro paese, nel corso degli ultimi decenni, ha assistito a una continua diminuzione delle risorse idriche disponibili, dovuta principalmente al continuo aumento delle temperature che hanno favorito l'evaporazione dell'acqua contenuta all'interno delle riserve idriche superficiali e una diminuzione delle precipitazioni, imputabili al cambiamento climatico. A ciò si aggiunge una rete infrastrutturale spesso obsoleta e soggetta a perdite significative (Turco et al, 2023)²⁸.



Fig. 1.2.1.1 – Esempio delle tubature, obsolete e arrugginite che portavano l'acqua ad Olbia²⁹.

²⁷ [Salute.gov.it](https://www.salute.gov.it)

²⁸ Turco, M., Palazzi, E., Von Hardenberg, J., & Provenzale, (2023). *I problemi dell'approvvigionamento idrico italiano*.

²⁹ <https://www.olbia.it/olbia-e-gallura-ecco-le-tubature-arrugginite-che-portavano-lacqua>

Secondo i dati forniti dall'ISPRA, le stime delle perdite indicano dispersioni idriche fino ad addirittura il 40% in alcune Regioni (ISPRA, 2017)³⁰. Inoltre, la gestione delle risorse idriche è frammentata e inefficace, con competenze divise in maniera scoordinata attraverso gli enti locali (AMBI, 2023)³¹. La quantità d'acqua sottoforma di precipitazioni che è mancata negli ultimi decenni nel nostro paese non è affatto trascurabile. Se a questa mancanza di piogge durante il periodo invernale, che di per sé alle nostre latitudini non dovrebbero mancare, si aggiunge la scarsa disponibilità di riserve idriche precedentemente discussa e l'aumento delle temperature, si innesca una combinazione estremamente dannosa.

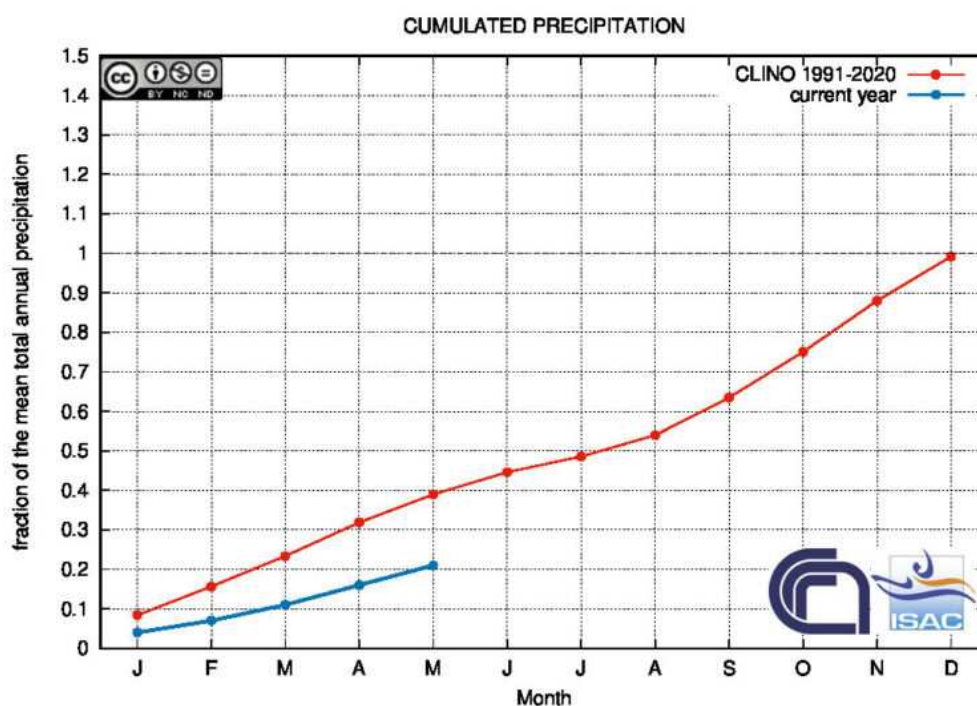


Fig. 1.2.1.2 – Andamento delle precipitazioni comparato tra il periodo 1991-2020 e gennaio-maggio 2022³².

Queste poche precipitazioni, come se non bastasse, sono distribuite in modo non uniforme all'interno del territorio nazionale, esse si concentrano maggiormente a nord nei periodi

³⁰ ISPRA (2017). *Stato attuale delle risorse idriche in Italia*. Rapporto annuale.

³¹ AMBI (2023). *Rapporto nazionale sulle risorse idriche*. Relazione annuale.

³² https://www.ilmessaggero.it/italia/siccita_emergenza_cosa_sta_succedendo_acqua_razionata_news_oggi-6771623.html

primaverili e autunnali³⁰. Secondo le stime del BIGBANG, il modello idrogeologico realizzato dal ISPRA che va ad analizzare il periodo che va dal 1951 al 2021, la situazione futura evidenzia ulteriori possibili impatti dei cambiamenti climatici, sia a breve che a lungo termine³³. Per porre rimedio a tutto questo bisogna analizzare ogni fase dell'approvvigionamento idrico, a partire dal consumatore finale. La popolazione italiana consuma dieci volte più acqua di quanto necessario per soddisfare i propri bisogni primari. Per esempio, le docce sono tra i servizi che causano maggiore dispendio d'acqua, vengono consumati mediamente 20 litri a persona per ogni minuto³⁴. Il primo passo, dunque, per fare in modo che la situazione non degeneri ulteriormente, è la sensibilizzazione pubblica. Piccoli cambiamenti nell'immediato da parte di tutti, possono portare a grandi risultati nel futuro prossimo. Un altro obiettivo da realizzare è rappresentato dall'ammodernamento degli impianti idrici urbani. Nel Piano Nazionale di Riprese e Resilienza (PNRR) è previsto questo passaggio, finanziato da 2 miliardi di euro entro il 2026³⁵. La speranza è quella che i risultati che si vogliono ottenere da questo finanziamento si realizzino nel più breve tempo possibile per uscire da questa difficile situazione.

1.2.2 Fonti in aree urbane

Nelle aree urbane, le fonti possono essere classificate secondo due categorie principali, in base alla loro origine. Il primo gruppo individua le fonti idriche naturali, come ad esempio laghi, fiumi e falde acquifere sotterranee, il secondo comprende le fonti antropiche, tra cui gli acquedotti, i serbatoi artificiali e le sorgenti urbane³⁶. Le fonti di origine naturale sono

³³ Rolle E. & Trezzini F. (2023). *Gestione delle risorse idriche: criticità e scenari*.

³⁴ <https://www.nationalgeographic.it/ambiente/2020/02/il-problema-idrico-italiano-e-tempo-di-tagliare-gli-sprechi>

³⁵ <https://www.italiadomani.gov.it/content/sogei-ng/it/it/home.html>

³⁶ <https://rivistanatura.com/acqua-e-citta-un-modello-per-gestire-le-risorse-idriche/>

spesso soggette a inquinamento a causa dell'alta densità di popolazione e delle attività concentrate nelle città, rendendo necessaria la gestione di questo tipo di risorse fondamentale per poter garantire l'utilizzo di acqua potabile da parte degli abitanti. Infatti, le infrastrutture progettate dall'uomo vanno a svolgere un ruolo di cruciale importanza sotto questo aspetto, sia nel trasporto che nella distribuzione d'acqua, d'altra parte però, in Italia, come ampiamente descritto nel precedente paragrafo, queste opere necessitano di costanti interventi di manutenzione per prevenire perdite e contaminazioni (Corfone, 2012)³⁷.

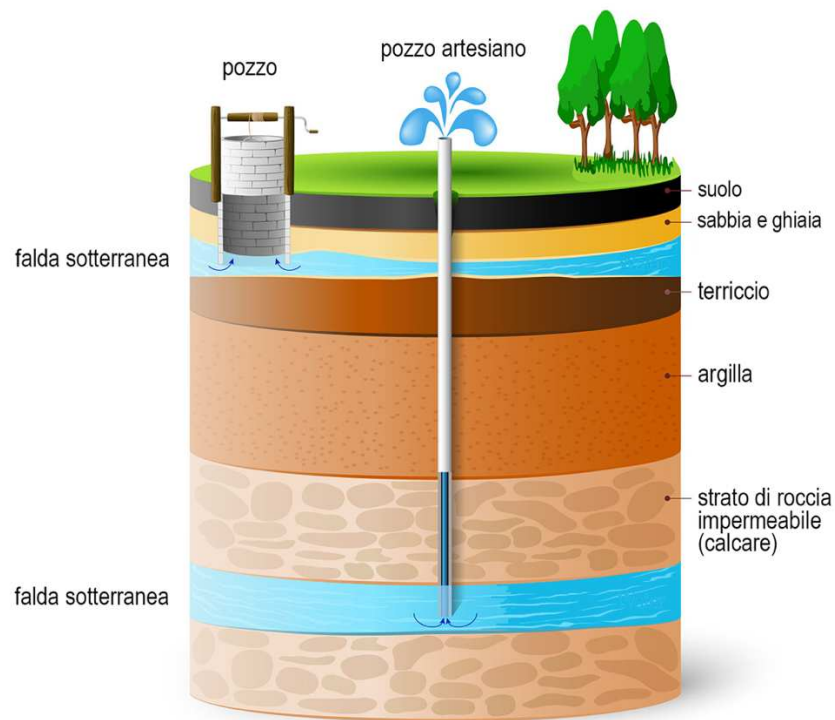


Fig. 1.2.2.1 – Pozzo artesiano, uno dei metodi prevalentemente utilizzati per l'approvvigionamento idrico urbano dalla falda idrica sotterranea³⁸

³⁷ Corfone, C. (2012). *La città idropoietica. Eco Web Town, Magazine of Sustainable Design*, (3).

³⁸ <https://blog.geografia.deascuola.it/articoli/citta-e-acqua>

I pozzi artesiani sono un tipo di fonte antropica utilizzata per l'approvvigionamento idrico umano, vengono scavati in profondità fino a giungere alle falde idriche sottostanti. Durante le precipitazioni l'acqua viene assorbita dal terreno e va ad alimentare le falde idriche. Come si è discusso e confrontato dai dati ISTAT, questo è il metodo principale per l'approvvigionamento idrico nelle città. Questo fa delle risorse idriche sotterranee una delle risorse più importanti e maggiormente da salvaguardare in Italia.

Nonostante sia il metodo di approvvigionamento idrico principale, in aree prevalentemente golenali, sono stati sepolti in profondità, comunque in contatto con la falda, decine di migliaia di fusti contenenti letame e masse di rifiuti industriali, speciali e tossico-nocivi come solventi, vernici, materiali farmaceutici e rifiuti ospedalieri. Dalla degradazione di questi si ottengono diossine e composti organici stabili che tendono ad accumularsi e a non degradarsi nel tempo. In Piemonte l'82% dei pozzi analizzati è risultato inquinato da atrazina, nelle altre regioni si sono registrate percentuali inferiori ma comunque degne di nota (Cotecchia, 1990)³⁹. Questo ha portato al conseguente abbandono, sostituiti da altri che non sono a contatto con aree inquinate, con l'obiettivo di ridurre l'inquinamento di queste fonti idriche fondamentali. La pianificazione e la gestione riguardo il rifornimento di queste risorse, prelevate dalle fonti naturali e antropiche, devono quindi considerare un punto d'incontro per sfruttare il meno possibile le risorse naturali disponibili.

Un altro esempio di fonti d'acqua utilizzate per l'approvvigionamento idrico in ambiente urbano, sono le sorgenti urbane, le fontane e i lavatoi. Queste rappresentano come le città si sono formate durante i secoli a seconda delle conformazioni geologiche tipiche delle diverse

³⁹ Cotecchia, V. (1990). Strategie progettuali e gestionali delle risorse idriche. *Ce. SET: atti degli incontri. XX-La valutazione delle risorse idriche: come governare la scarsità (2.3. 1990)*, 1990, 1000-1045.

zone, si tratta di sorgenti di origine antropica utilizzate dalle popolazioni negli anni. Soltanto nelle Marche se ne contano tantissime e tra queste vi è la sorgente oggetto di questo studio: la fonte del Filello ad Ancona. Oltre questa, le popolazioni delle altre città marchigiane hanno saputo sfruttare le risorse disponibili per mettere a disposizione degli abitanti acqua potabile e non per qualsiasi tipo di utilizzo.



Fig. 1.2.2.2 - Fontana pubblica ad Ascoli Piceno, costruita nel 1884 anche per fornire agli abitanti della città acqua potabile facilmente reperibile⁴⁰.



Fig. 1.2.2.3 e Fig. 1.2.2.4 – A sinistra la fonte Abbazia di Val di Castro a poggio San Romualdo e a destra la fonte del Filello ad Ancona⁴¹, oggetto del presente elaborato

⁴⁰ https://www.fotoantologia.it/foto-14605/Ascoli_Piceno_Piazza_Arringo_fontana.html

⁴¹ <https://www.whymarche.com/fonti-fontane-e-lavatoi/>

Le fontane e i lavatoi, presenti tutt'ora nelle città, come quelle delle figure precedenti, sono elementi urbani che, oltre alla funzione di manufatti architettonici, hanno avuto nei secoli la funzione di distribuire l'acqua agli abitanti delle città. Le società svilupparono diverse tipologie di condutture sotterranee e acquedotti per poter fornire queste risorse ai cittadini. Ben noti sono i sistemi acquedottistici degli antichi romani, sicuramente un popolo che sapeva come sfruttare le risorse idriche disponibili traendone beneficio. Infatti, durante l'epoca dell'Impero Romano, dal trattato *De aquaeductu urbis Romae* di Sesto Julius Frontinus risalente al 91 d.C., il console responsabile della gestione della rete acquedottistica, si legge come Roma disponesse di 9 acquedotti che andavano a distribuire acqua a 39 fontane e quasi 600 bacini pubblici⁴².

1.3 Scopo della tesi

L'obiettivo principale dell'elaborato in questione è la caratterizzazione e la determinazione dell'area di ricarica di un acquifero in un contesto urbano, utilizzando metodi idrogeologici e strumenti di mappatura digitale. Questo studio si inserisce all'interno di un più ampio quadro di gestione sostenibile delle risorse idriche, con particolare attenzione agli effetti che l'urbanizzazione comporta sulle dinamiche di ricarica degli acquiferi. L'area di studio selezionata per questo progetto si trova nella città di Ancona, nei pressi del porto, dove in via Papa Giovanni XXIII si rinviene la fonte del Filello. Si tratta di una sorgente storica della città, una costruzione che si pensa risalga all'epoca greco-romana, come evidenziato dalle note storiche raccolte nel paragrafo 2.3 di questo elaborato. La città di Ancona è un contesto urbano complesso, influenzato nell'ultimo secolo dalle attività antropiche, come la costruzione di infrastrutture impermeabili e la modifica del paesaggio naturale. Queste

⁴² <https://formedacqua.com>

caratteristiche rappresentano una sfida significativa per la conservazione delle risorse idriche sotterranee.

In particolare, questa tesi si propone di raggiungere in sintesi i seguenti obiettivi:

- Individuare l'area presunta di ricarica della sorgente
- Valutare l'efficacia delle metodologie gestionali della risorsa in ambiente urbano
- Sviluppare un modello di approccio idrogeologico replicabile in altri contesti urbani

In primo luogo, quindi, identificare con precisione l'area di ricarica dell'acquifero, sviluppato nella zona nord-est rispetto alla fonte del Filello. Questo include un'analisi dettagliata dei fattori geologici e climatici che influenzano il processo di ricarica, come la stratigrafia dell'area, l'immersione degli strati e l'evapotraspirazione, utilizzando strumenti di modellazione e mappatura del territorio come il software QGIS. In secondo luogo, lo scopo è quello di considerare l'efficacia delle tecniche di gestione idrica attualmente in uso nel contesto urbano anconetano, con particolare attenzione posta ai volumi di infiltrazione efficace, indicatore cruciale per la sostenibilità a lungo termine delle risorse idriche locali. Terzo punto, sviluppare un modello idrogeologico replicabile per altre aree urbane simili che consenta di affrontare le sfide poste dall'urbanizzazione in relazione alla gestione degli acquiferi. Il modello sviluppato si basa sull'integrazione di dati idrogeologici, analisi climatiche e tecniche di gestione delle risorse.

L'obiettivo principale è in definitiva quello di proporre soluzioni che minimizzino gli impatti negativi sulla ricarica degli acquiferi portati dall'impermeabilizzazione delle superfici. La ricerca effettuata permette, inoltre, di fornire una base scientifica per decisioni politiche e gestionali, mirate alla protezione delle risorse idriche in contesti urbani. In un'epoca in cui la disponibilità di acqua dolce è minacciata dai cambiamenti climatici e dall'espansione

urbana, la determinazione accurata dell'area di ricarica degli acquiferi urbani diventa fondamentale per garantire la sostenibilità ambientale e la sicurezza idrica delle popolazioni. Questo studio offre un approccio innovativo e multidisciplinare che combina l'uso di tecnologie avanzate con la conoscenza geologica e idrogeologica tradizionale, permettendo di affrontare con maggiore efficacia le sfide poste dall'interazione tra ambiente naturale e costruito. Il lavoro qui presentato si articola in diverse fasi: inizialmente, è stata condotta una dettagliata revisione della letteratura esistente per comprendere i principali fattori che influenzano la ricarica degli acquiferi in contesti urbani complessi. Successivamente, sono stati raccolti e analizzati sul campo, utilizzando strumentazioni per misurazioni precise della portata idrica e pluviometri per la raccolta di dati idrogeologici. Questi dati sono stati poi integrati, attraverso l'utilizzo di un software GIS, permettendo di mappare l'area di studio e identificare le zone critiche per la ricarica della falda acquifera, attraverso la cartografia messa a disposizione dalla Regione Marche. Infine, i dati ottenuti dalle analisi sono stati utilizzati per sviluppare un modello che può essere applicato ad altre aree urbane simili, fornendo un quadro di riferimento per la gestione sostenibile delle risorse idriche.

Questa tesi, in conclusione, mira a contribuire significativamente al campo dell'ingegneria civile e ambientale applicata alle aree urbane, fornendo strumenti pratici e conoscenze scientifiche che possono essere utilizzate per migliorare la gestione delle risorse idriche a livello locale, promuovendo un approccio più sostenibile e resiliente in ambienti urbani complessi come quello della città di Ancona.

1.4 Sintesi dei metodi e dei risultati

Nel capitolo 2 della tesi in questione, sono stati descritti dettagliatamente i metodi adottati e gli strumenti utilizzati per lo studio e la mappatura del bacino di alimentazione della sorgente

urbana di riferimento. Il lavoro ha combinato approcci multidisciplinari, integrando analisi idrogeologiche, rilievi in situ e l'utilizzo di software GIS per mappare le superfici coinvolte. Inoltre, grazie all'utilizzo del metodo di Hargreaves e Samani si è stimata l'evapotraspirazione potenziale (ET_0), un parametro di cruciale importanza per la determinazione delle precipitazioni nette coinvolte nel periodo di riferimento, calcolata, appunto, sottraendo l'evapotraspirazione dalla precipitazione totale.

Per la caratterizzazione dell'area di studio, sono stati rilevati vari tipi di pavimentazioni presenti all'interno dell'area di studio, distinguendo tra asfalto, ghiaia, aree verdi, edifici e altre tipologie di superfici. A ciascuna di queste è stato affidato un coefficiente di infiltrazione potenziale (CIP) differente. I coefficienti restituiscono un valore percentuale di quanta acqua è in grado di infiltrarsi all'interno del terreno, stimati riflettendo sulla capacità di ciascuna pavimentazione di consentire l'infiltrazione dell'acqua all'interno del suolo e del sottosuolo. Successivamente sono stati calcolati i volumi di infiltrazione efficace per ciascuna superficie, moltiplicando l'altezza della precipitazione netta (in mm di pioggia) per l'area e il rispettivo CIP.

I risultati ottenuti dalle analisi condotte hanno evidenziato che l'acqua infiltrata all'interno del suolo, che è andata a contribuire alla ricarica dell'acquifero urbano in questione, nel periodo di riferimento, compreso tra l'8/03/24 e il 5/06/24, ha un volume compreso tra circa 1360 e 1570 metri cubi. Il volume effettivo si trova nell'intervallo compreso tra i due valori determinati, che dipendono dai coefficienti di infiltrazione potenziale effettivi. In particolare, essendo il volume direttamente proporzionale ai CIP, questi sono stati stimati secondo dei range e pertanto, all'interno di questi intervalli, si troveranno i CIP effettivi per ogni tipologia di pavimentazione. L'intervallo che definisce il volume di infiltrazione efficace nel

terreno è stato successivamente confrontato con il volume delle acque erogate dalla sorgente, la fonte del Filello, nel medesimo arco temporale. Il confronto ha confermato una sostanziale congruenza tra i due valori, infatti, il volume erogato dalla fonte è risultato pari a circa 1540 metri cubi, compreso nei valori ipotizzati precedentemente. Questa verifica ha pertanto rafforzato la validità delle ipotesi iniziali riguardanti l'estensione del bacino di alimentazione.

In conclusione, l'analisi che si descriverà nel dettaglio all'interno dei paragrafi successivi, ha dimostrato che l'area del bacino di alimentazione dell'acquifero urbano, che ha una superficie stimata in circa 7,2 ettari, è correttamente definita. Il risultato, come detto, è stato ottenuto grazie all'ausilio del QGIS e all'impiego combinato di dati geologici, idrogeologici e climatici. Per una trattazione più approfondita degli strumenti e delle metodologie applicate che hanno permesso di giungere al risultato finale si rimanda alla trattazione eseguita ai capitoli 2 e 3 di questo elaborato. Le conclusioni tratte da questi due capitoli permettono non solo di contribuire alla comprensione delle dinamiche idrologiche urbane, ma, soprattutto, forniscono un quadro utile per la gestione sostenibile di queste risorse in altri contesti simili.

MATERIALI E METODI

2.1 Inquadramento dell'area di studio

Le indagini effettuate, che hanno permesso di ricavare i dati sui quali si basa questo elaborato, sono state eseguite nei pressi del duomo di San Ciriaco ad Ancona. In particolare, la sorgente si trova in via Giovanni XXIII.



Fig. 2.1.1 Zona di esecuzione delle indagini (Google Maps)

La zona in questione è caratterizzata da una immersione delle rocce e da un clima che hanno influenzato e influenzano tutt'ora l'evapotraspirazione del territorio.

2.1.1 Geologia

Circa 200 milioni di anni fa le terre emerse erano raggruppate in un unico grande continente detto Pangea e intorno ad esso un vasto oceano detto Panthalassa. Dalla frattura della Pangea si sono venuti a formare due grandi blocchi: il primo si formò a Nord detto Laurasia, che

comprendeva le terre destinate a diventare oltre che l'America settentrionale anche l'Europa e grande parte dell'Asia, mentre il secondo a Sud chiamato Gondwana. Alla fine dell'era Mesozoica (circa 130 milioni di anni fa) il movimento tettonico delle placche subì un invertimento di direzione, in particolare il progressivo allontanamento che si stava insediando fu seguito da un avvicinamento delle stesse generando le catene montuose come le Alpi e gli Appennini. Queste catene montuose sono costituite principalmente da rocce sedimentarie, nella fattispecie l'Appennino marchigiano da rocce carbonatiche come i calcari (Bosellini et al, 2005)⁴³.

L'area di Ancona si affaccia sul mare Adriatico, sul lembo orientale della sinclinale di Tavernelle, struttura geologica caratterizzante della città. I terreni sub affioranti sono costituiti principalmente da argille marnose intercalate a sabbia, risalenti al Pliocene inferiore, mentre sulla costa si trovano formazioni calcaree risalenti al Cretacico superiore. I terreni del territorio si sviluppano su una successione per lo più carbonatica attribuibile alla successione umbro-marchigiana che appunto, dal Miocene in poi, ha contribuito alla formazione degli Appennini (Centamore et al, 1986).

⁴³ BOSELLINI, Alfonso, et al. *Storia Geologica d'Italia: gli ultimi 200 milioni di anni*. Zanichelli, 2005.

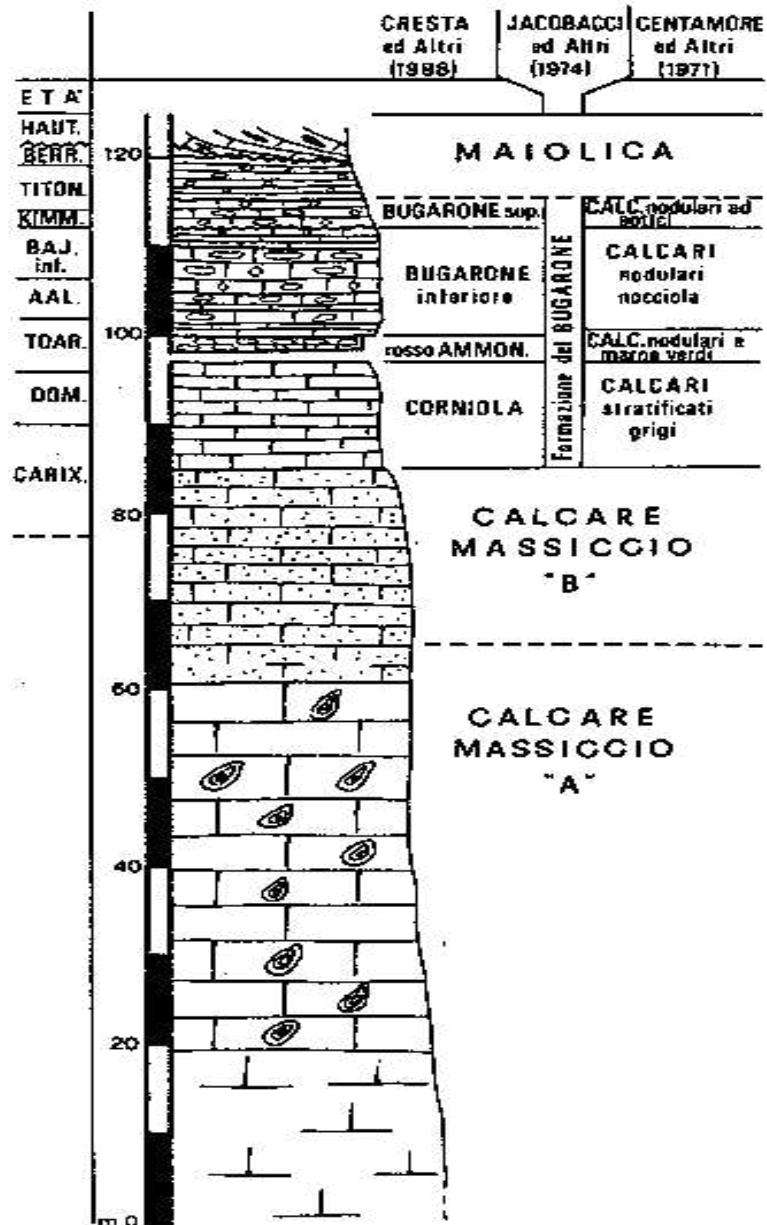


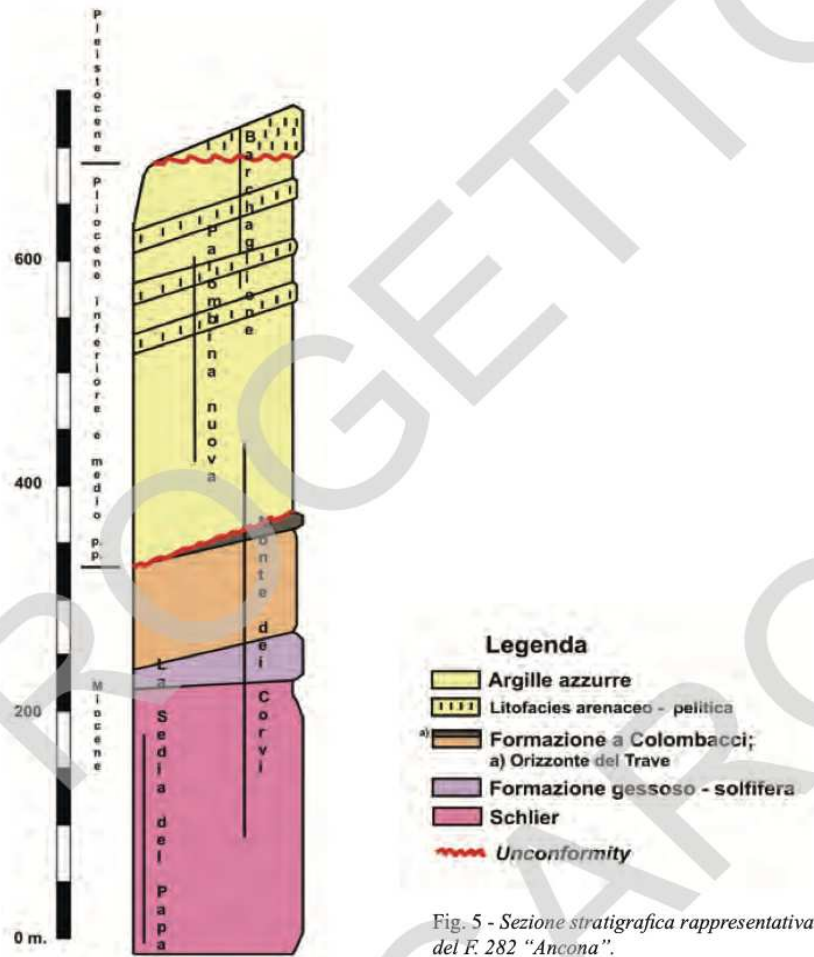
Fig. 2.1.1.1 Successione umbro-marchigiana (Centamore et al, 1971)⁴⁴

Quest'ultima, la ritroviamo largamente nella zona centrale del territorio marchigiano mentre nella parte più esterna troviamo un'altra successione marina, sviluppatasi tra il Pliocene

⁴⁴ CENTAMORE, EMGAU, et al. Contributo alla conoscenza del Giurassico dell'Appennino umbro-marchigiano. *Studi Geologici Camerti*, 1971, 1: 7-89.

inferiore e il Pleistocene inferiore e depositi continentali quaternari (Centamore et al, 1986)⁴⁵, come visibile in Fig. 2.1.1.2:

22



1.1 - SUCCESSIONE MARINA

Fig. 2.1.1.2 Successione marina⁴⁶

La successione marina affiora lungo la porzione di fascia costiera compresa tra Ancona e l'abitato di Portonovo, è composta alla base da marne e marne calcaree compatte mentre va

⁴⁵ CENTAMORE, E., et al. Il trias-paleogene delle marche. *Studi Geologici Camerti, Volume Speciale "La Geologia delle Marche"*; Università di Camerino: Camerino, Italy, 1986, 9-27.

⁴⁶ https://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/note_illustrative/282_Ancona.pdf

a terminare superiormente con strati marnosi e argille ricche di materiale organico (https://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/note_illustrative/282_Ancona.pdf).

2.1.2 *Clima ed evapotraspirazione*

Il clima si definisce come l'insieme delle condizioni atmosferiche che caratterizzano una regione in un determinato periodo di tempo che solitamente è 30 anni, periodo nel quale si effettuano le misurazioni per definire il clima di un'area specifica (staticmy.zanichelli.it). I fattori che lo influenzano maggiormente sono la latitudine, la longitudine, l'altitudine e la vicinanza dal mare. Anche le correnti marine tendono a influenzare il clima, andando a spostare le acque calde e le acque fredde da una zona all'altra. La combinazione di questi fattori fa sì che sia possibile individuare cinque gruppi climatici ben distinti: climi caldo-umidi, aridi, temperati, freddi, nivali (staticmy.zanichelli.it).

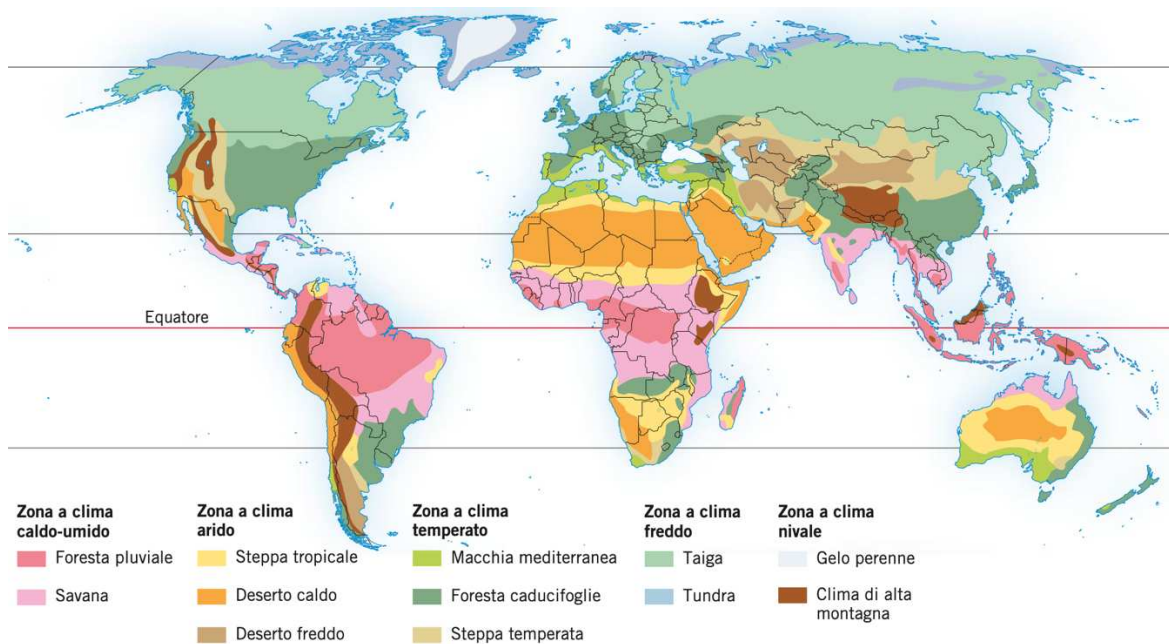


Fig. 2.1.2.1 I cinque gruppi climatici principali (staticmy.zanichelli.it)

Per quanto riguarda il clima in Italia, questo è particolarmente vario per via della forma allungata della penisola, che comprende diverse latitudini, e in secondo luogo a causa della

presenza della catena appenninica che taglia a metà il territorio da Nord a Sud e influenza inevitabilmente il trasferimento delle masse d'aria. Buona parte dell'Italia rientra tra i climi temperati caldi mentre la parte settentrionale rientra nei climi continentali. Lungo le coste tirreniche e adriatiche, come per la città di Ancona, il clima predominante è quello mediterraneo, caratterizzato da estati secche e aride e inverni miti e piovosi⁴⁷.

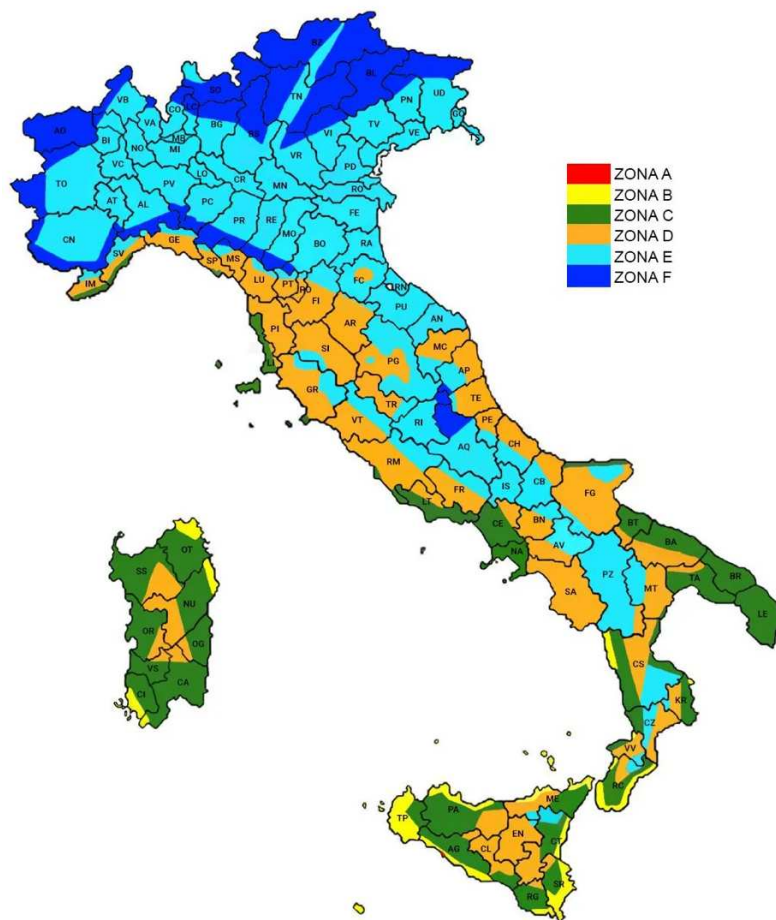


Fig. 2.1.2.2 Le regioni climatiche in Italia: A- inverni miti ed estati calde; B-clima temperato; C-estati calde e inverni freddi; D-clima più rigido con inverni freddi e nevosi; E-clima più rigido e freddo di D; F-aree alpine, temperature più basse rispetto a E (Zanichelli).

⁴⁷ https://staticmy.zanichelli.it/catalogo/assets/9788808402035_04_CAP.pdf

Uno dei processi maggiormente importanti per quanto riguarda questo elaborato è l'evapotraspirazione. Si tratta di un processo sia fisico che biologico, caratterizzante il ciclo idrologico dell'acqua soprattutto alle nostre latitudini, restituendo in atmosfera circa il 50% di tutte le precipitazioni annuali (Chahine, 1992)⁴⁸. Essa si definisce come la quantità d'acqua che viene trasferita in atmosfera tramite i processi di evaporazione diretta dagli specchi d'acqua (laghi, fiumi, mari ecc.), dal terreno e dalla vegetazione, nonché la traspirazione a carico di quest'ultima. L'evapotraspirazione si suddivide in evapotraspirazione reale e potenziale. Si parla di evapotraspirazione potenziale quando il contenuto d'acqua presente nel terreno non va a caratterizzare un limite al processo, bensì esso dipende solo dalle caratteristiche climatiche, quali: vento, temperatura, umidità relativa. L'evapotraspirazione potenziale (ET_0), dunque, rappresenta la massima quantità d'acqua che riesce a evaporare solo per effetto dei fattori climatici e pertanto è sempre maggiore dell'evapotraspirazione reale (Braca et al, 2024)⁴⁹.

2.1.3 Criticità: effetti dell'urbanizzazione

Nelle aree urbane, il ciclo idrologico naturale viene fortemente alterato a causa dell'elevata presenza di superfici impermeabili, quali strade, piazzali, infrastrutture e edifici, che riducono significativamente l'infiltrazione dell'acqua piovana nel suolo e sottosuolo. Di conseguenza, durante le forti piogge, l'acqua che finisce su queste superfici va a sovraccaricare il sistema fognario di intere città, venendo quindi, ultimamente, trasportata a mare. Infatti, le infrastrutture idriche urbane sono progettate per convogliare le acque piovane nel sistema fognario e sovraccaricandosi questo può dar vita a forti allagamenti durante le piogge torrenziali. Secondo le stime ISTAT (Istituto Nazionale di Statistica), nel

⁴⁸ Chahine, M. T. (1992). The hydrological cycle and its influence on climate. *Nature*, 373-380

⁴⁹ BRACA, Giovanni; MARIANI, Stefano; TROPEANO, Robertino. INTERNAL FLOW.

periodo 1991-2020, il 53% dell'acqua piovana che cade in Italia ritorna all'interno dell'atmosfera, mediante l'evaporazione e la traspirazione della vegetazione. Il restante 47% va ad alimentare fiumi, laghi e falde acquifere (ISTAT, 2022)⁵⁰. Nelle aree urbane, quest'ultima percentuale diminuisce drasticamente a causa delle superfici impermeabilizzate che costituiscono il tappeto urbano delle città. Inoltre, la mancanza di raffreddamento per evapotraspirazione tende ad aumentare la percezione del caldo nei mesi estivi (UN Water, 2022)⁵¹.

2.2 Strumentazione utilizzata nelle indagini

Le prove effettuate in sito sono state svolte utilizzando più tipologie di strumenti che in questo paragrafo verranno descritti nel dettaglio.

2.2.1 GPS AquaMeter

Durante le misure in situ è stato utilizzato il GPS AquaMeter, un dispositivo palmare utilizzato per l'analisi della qualità delle acque. Lo strumento è dotato di un display da 80 caratteri LCD retroilluminato con una memoria di 1110 set completi, inclusi dati GPS. Il dispositivo ha un'altezza di 180 mm, larghezza di 90 mm e 39 mm di spessore e pesa 425 grammi⁵².

⁵⁰ <https://www.istat.it/it/files/2022/03/REPORTACQUA2022.pdf>

⁵¹ UN Water (2022): Groundwater making the invisible visible. Paris: UNESCO (The United Nations world water development report.

⁵² <https://www.geolab.it/sonde-multiparametriche-aquaread/gps-aquameter>



Fig. 2.2.1.1 – GPS AquaMeter (www.egeolab.it/sonde-multiparametriche-aquaread/gps-aquameter/amp)

Il dispositivo è dotato anche di una sonda, l'AP-7000, dotata di un cavo dalla lunghezza di 1,5 metri, in grado di determinare parametri indicatori della qualità dell'acqua. Sono stati misurati, per questo elaborato: il ph, la temperatura (°C) e l'elettroconduttività (μS/cm). È possibile, appunto, collegare la sonda con il dispositivo palmare Aquameter GPS per la visualizzazione e la gestione dei dati in tempo reale riguardanti il monitoraggio della qualità delle acque. È composta da alluminio anodizzato di tenore marino che ne consente l'utilizzo sia in acqua dolce, come quella erogata dalla sorgente di riferimento, che salata.



Fig. 2.2.1.2 – Sonda multiparametrica AP-7000, utilizzata in combinazione con GPS AquaMeter (www.egeolab.it/sonde-multiparametriche-aquaread/gps-aquameter/amp)

Le sonde per la misura dell'elettroconduttività (EC) sono basate solitamente su celle di conduttività a quattro elettrodi, misurando la capacità di una soluzione di condurre corrente elettrica, dando un'indicazione della salinità e della qualità delle acque (Sawyer et al, 2003)⁵³. Per quanto riguarda la misurazione del pH, questa è fornita grazie all'utilizzo di un elettrodo in vetro e uno di riferimento. Questi determinano l'attività di ioni idrogeno in una soluzione, valutando l'alcalinità o l'acidità della stessa. Infine, le sonde di temperatura impiegano dei sensori come termocoppie, misurandola con elevata precisione. La temperatura inoltre è un dato che influisce sia sull'EC che sul ph (Bard & Faulkner, 2001)⁵⁴.

⁵³ Sawyer, C. N., McCarty, P. L., & Parkin, G. F. (2003). Chemistry for Environmental Engineering and Science. McGraw-Hill.

⁵⁴ Bard, A. J., & Faulkner, L. R. (2001). Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications. Wiley.

2.2.2 Pluviometri rete centro funzionale Regione Marche

I pluviometri sono strumenti utilizzati in idrologia, oltre che in meteorologia, per la misurazione delle piogge. Lavorano raccogliendo acqua piovana convogliandola all'interno di appositi contenitori calibrati, permettendo così di quantificare la pioggia caduta in una determinata area.



Fig. 2.2.2.1 – Pluviometro (CAE Tech)⁵⁵

Questo strumento fornisce indicazioni cruciali per il monitoraggio delle condizioni climatiche, la prevenzione contro le inondazioni e la gestione delle risorse idriche. Le normative, in Italia, regolano sia l'utilizzo che la calibrazione dei pluviometri, in modo da garantire l'affidabilità dei dati raccolti⁵⁶. La rete dei pluviometri nelle Marche è garantita e

⁵⁵ <https://www.cae.it/ita/prodotti/pluviometri/pg10-e-pg10r-pluviometro-pd-9.html>

⁵⁶ Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), 2021.

gestita dal centro funzionale Protezione Civile. Grazie a questa rete, la Regione, fornisce dati in continuo aggiornamento e sempre affidabili⁵⁷.

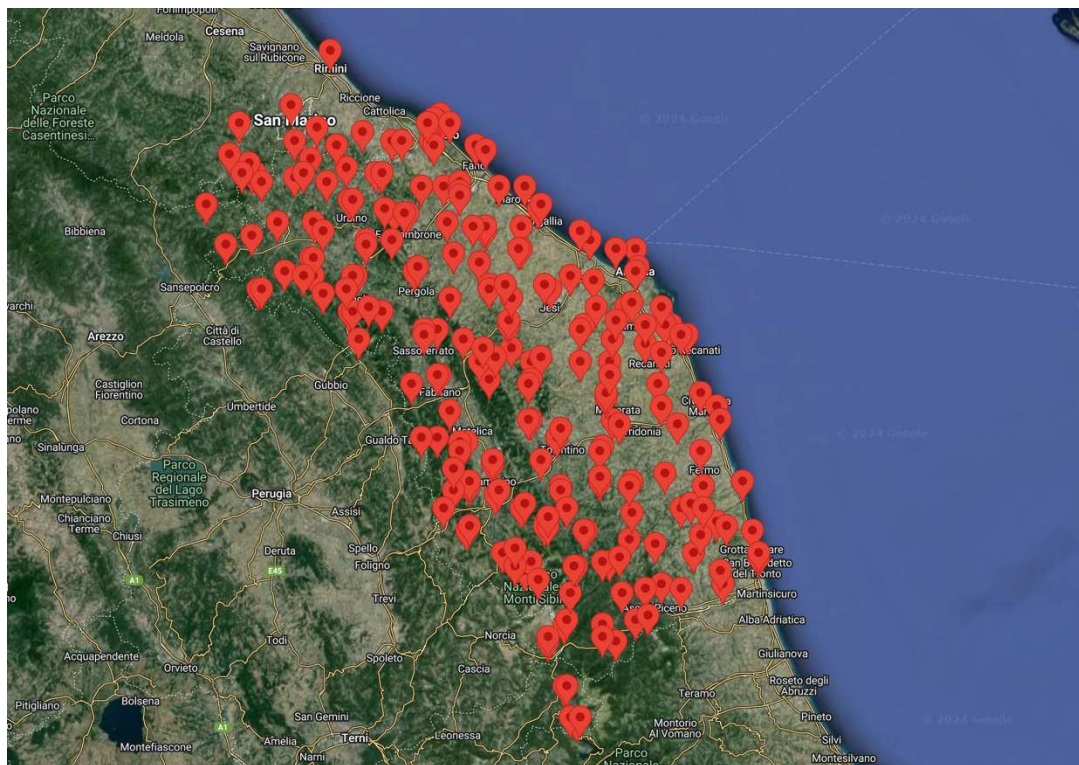


Fig. 2.2.2.2 – Rete pluviometrica Regione Marche (SIRMIP ON-LINE)

La stazione di riferimento per questo elaborato appartiene alla Rete Meteo-Iidro-Pluviometrica Regionale (RMIPR) e si trova ad Ancona, precisamente al Palazzo Leopardi, sede nella città della Regione Marche, in via Tiziano 44, a circa un chilometro e mezzo dalla sorgente oggetto delle misurazioni di questo elaborato. Le stazioni della rete hanno il compito di registrare i valori dei parametri che monitorano e inviarli alla centrale (CCSR). Ognuna di queste stazioni è composta da centralina elettronica di acquisizione (data-logger), di sistema di trasmissione dati tramite radio uhF, di un sistema di alimentazione autonomo costituito da pannelli solari e, infine, da una propria sensoristica che varia a seconda della

⁵⁷ ARPAM (2022). *Monitoraggio della qualità dell'aria e delle risorse idriche*.

configurazione e dei parametri da monitorare. La rete conta un totale di 101 stazioni, tutte operanti, che forniscono dati sulla banda radio uhF. Dal punto di vista della trasmissione dati esse sono dette “passive”, infatti, trasmettono dati solo su richiesta della centrale CCSR e si attivano solo se rilevano un dato che supera un certo valore impostato nel firmware della stazione⁵⁸.

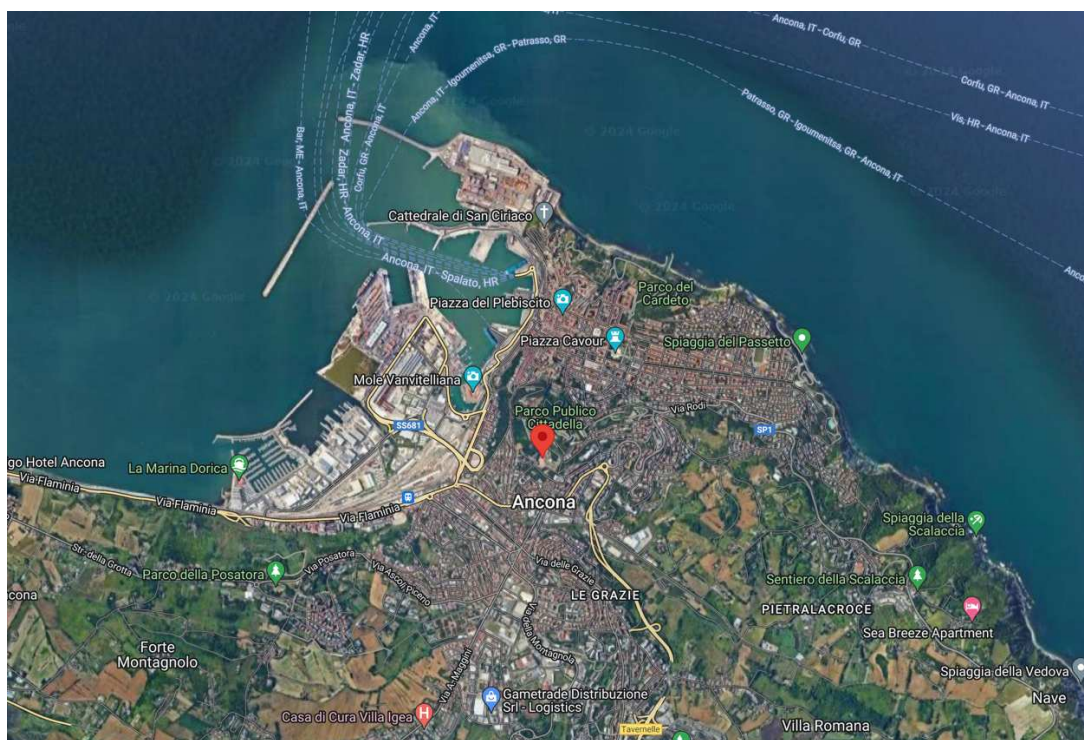


Fig. 2.2.2.3 – Pluviometro di riferimento per questo elaborato (SIRMIP ON-LINE)

2.2.3 QGIS e cartografia

Per la descrizione del Geographic Information System (GIS), bisogna partire dal definire i SIT (Sistemi Informativi Territoriali). I SIT sono il complesso di strumenti utilizzato per l’analisi e la distribuzione di informazioni in diversi ambiti. Sono sistemi sviluppati da organizzazioni che hanno necessità di un sistema di raccolta dei dati per catalogarli e utilizzarli quando necessario (ad esempio banche e servizi anagrafici). Il GIS, invece, è la

⁵⁸ www.regione.marche.it

componente informatica dei SIT, con lo scopo di raggruppare le informazioni territoriali e renderle utilizzabili, per poi trasformarle consentendo la realizzazione di diversi lavori finalizzati all'analisi e gestione del territorio, tra questi si hanno la realizzazione delle carte catastali e, utile per questo elaborato, l'acquisizione di informazioni provenienti da fonti diverse e l'analisi dei dati disponibili⁵⁹. L'utilizzo di questi sistemi ha acquisito sempre più importanza in molti campi, ad oggi sono strumenti decisivi per le diverse analisi del territorio e per prendere decisioni su come agire per risolvere i problemi. Insieme ai dati di Telerilevamento, il GIS aiuta a prevenire le crisi dovute alle calamità naturali, andando a studiare la vulnerabilità dei territori esposti a questi eventi e i rischi a cui sono soggetti. Sono molto utili anche nella fase successiva per valutarne i danni e pianificare strategie di soccorso. L'accesso ai database geografici permette la realizzazione di mappe tematiche che l'utente può interrogare, ottenendo informazioni utili come ad esempio conoscerne la superficie, il perimetro e altri parametri geometrici (Prades & Amparore, 2012)⁶⁰. Un software GIS utilizzato largamente è QGIS, software opensource usato ai fini dell'elaborato in questione, che permette di usare geoprocessi consentendo una totale gestione dell'informazione che classifica così QGIS come uno dei software più utilizzati⁶¹. La versione del QGIS utilizzata per ottenere i risultati discussi di questa tesi è la 3.36.0 – Maidenhead. Per risalire alle informazioni descritte nei prossimi paragrafi si è fatto uso di diversi layer tra i quali “Copertura regioni zona WGS84”, dati ortofoto a colori del 2012 (Fig. 2.2.3.2), e l'aerofotogrammetrico (Fig. 2.2.3.3), entrambi con sistema di riferimento affidato a “Monte Mario / Italy zone 2” e pubblicati dalla Regione Marche. La prima

⁵⁹ <https://www.sportellotelematicopolifunzionale.it/?q=sit-e-gis>

⁶⁰ Prades, L., & Amparore, A. (2012); GIS e Telerilevamento per l'assistenza umanitaria. Applicazioni nel Programma Alimentare Mondiale.

⁶¹ <https://www.geocorsi.it/N565/il-software-qgis-open-source-geoprocessi-geodatabase-e-webgis.html>

creazione di un'ortofotocarta in scala 1:10000 è stata realizzata mediante rilevamento aereo negli anni 1977-78-79 e aggiornati poi con altri voli nel 1984/85 e 1988/89. L'informazione altimetrica è descritta, mediante curve di livello con equidistanza di 10 m e direttrici ogni 50 m. L'ortofotocarta è rappresentata mediante la rappresentazione conforme di Gauss-Boaga parametrizzati all'ellissoide medio europeo (ED 1950). Le ortofotocarte del rilievo fotogrammetrico della Regione Marche coprono l'intera porzione del territorio marchigiano, come riportato in Fig. 2.2.3.1.

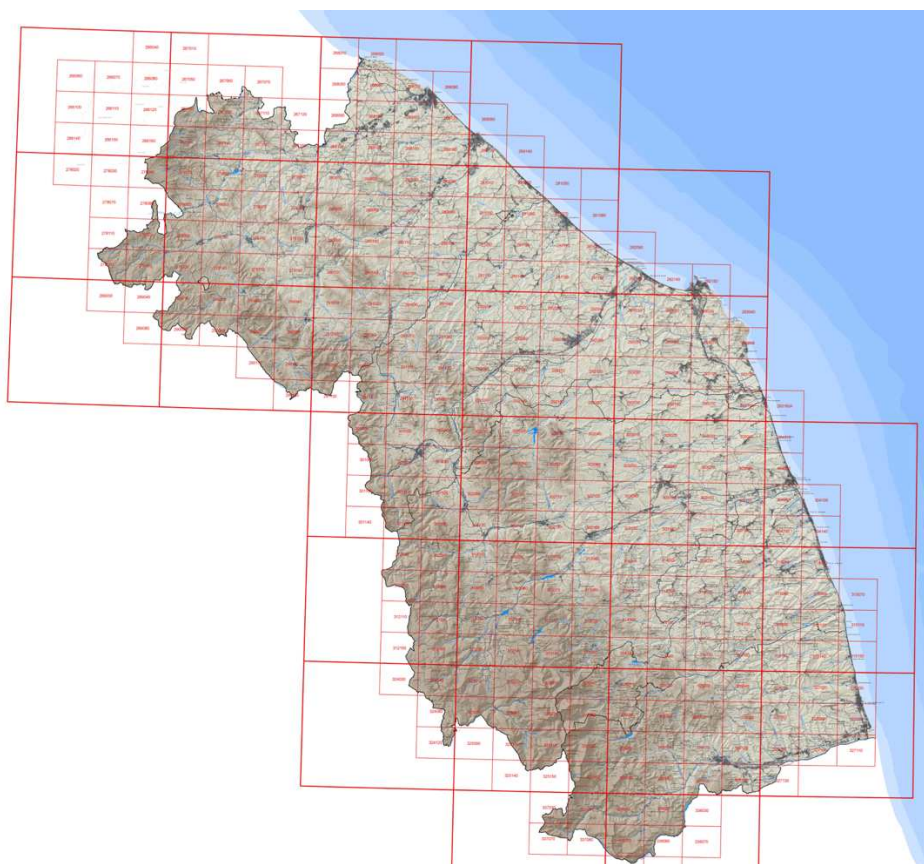


Fig. 2.2.3.1 – Quadro di unione delle ortofotocarte 1:10000 della Regione Marche¹⁷

Attraverso il portale della Regione è possibile accedere a tutti i file .tif dei rilievi fotogrammetrici del 1988/89, compresi appunto i file relativi alla città di Ancona.

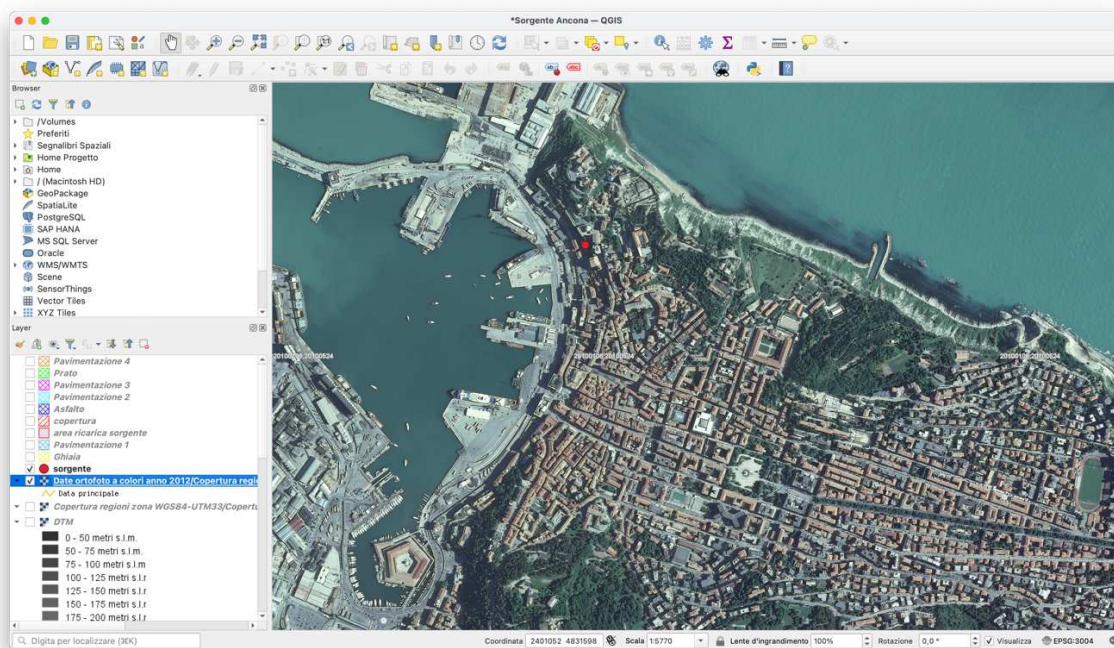


Fig. 2.2.3.2 – Ortofotocarta di Ancona, evidenziata in rosso la posizione della sorgente oggetto dell’elaborato (Regione Marche)⁶²

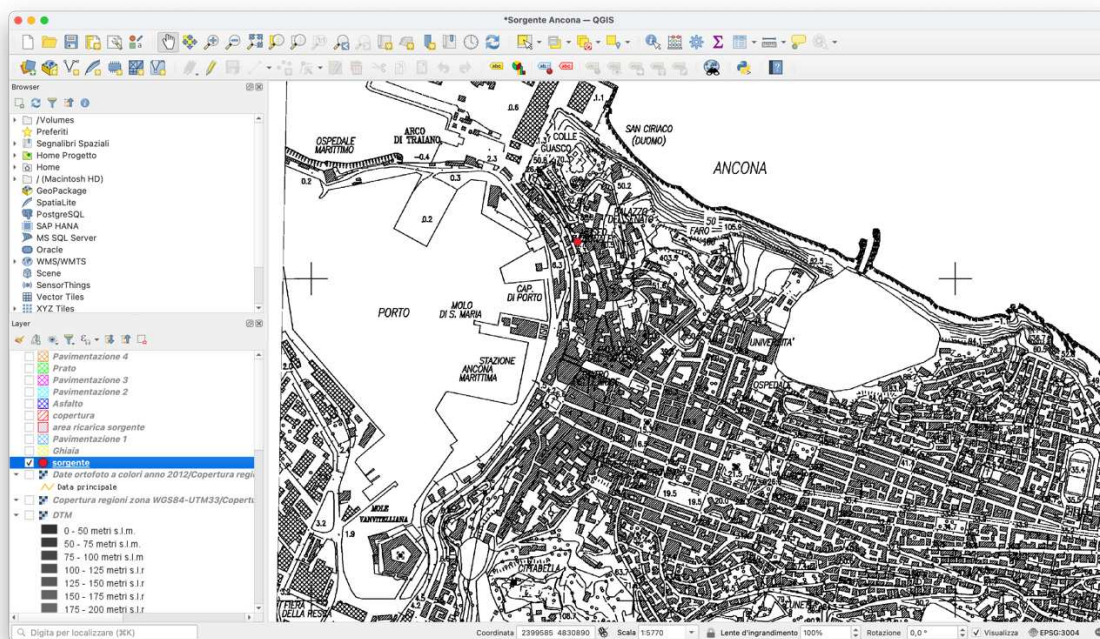


Fig. 2.2.3.3 – Aerofotogrammetrico di Ancona, evidenziata in rosso la posizione della sorgente oggetto dell’elaborato (Regione Marche)

⁶² <https://www.regione.marche.it/Regione-Utile/Paesaggio-Territorio-Urbanistica/Cartografia/Repertorio/Ortofotocarteregionali10000>

2.3 Determinazione delle portate erogate dalla sorgente nel periodo

Nella zona del porto di Ancona, sul lato nord-est del palazzo degli anziani si trova la fonte del Filello, una delle più antiche sorgenti anconetane ancora attive e, probabilmente, una delle poche fonti utilizzate per l'approvvigionamento idrico della città nel medioevo (Pirani, 1979)⁶³. Il nome della fonte "filello", cioè rivolo d'acqua, deve la sua origine al getto debole d'acqua che dal muro adiacente alla fonte, ricade all'interno della vasca (Panzini, 1996)⁶⁴.

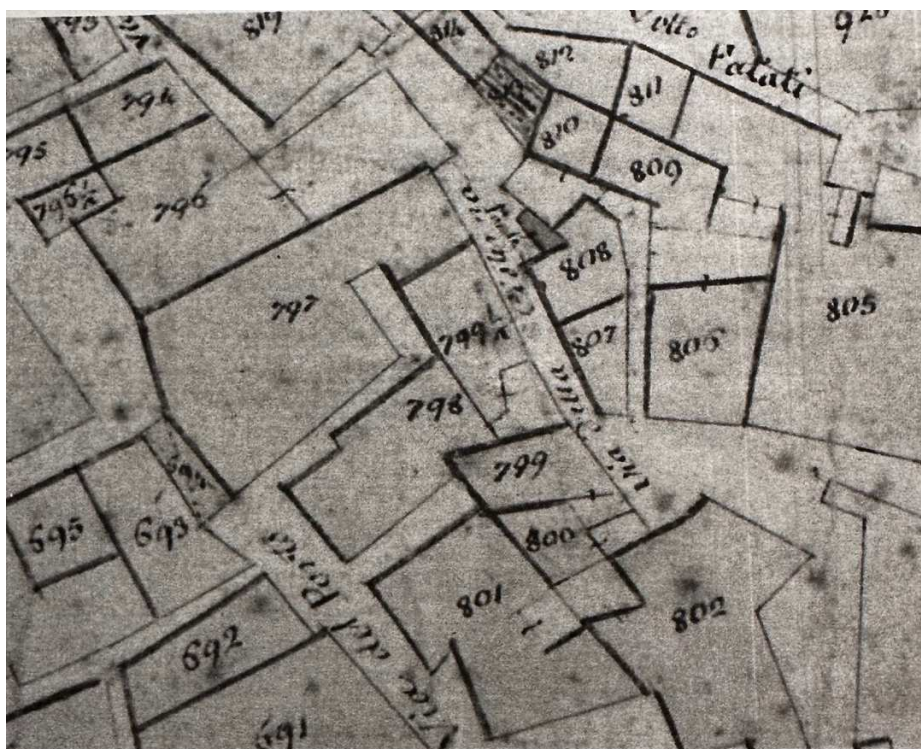


Fig. 2.3.1 – Individuazione della fonte del Filello lungo la via della Cisterna (Catasto Pontificio, 1813)

L'acqua è il bene più prezioso per la vita umana e questo i popoli Piceni, poi seguiti da Greci e Romani lo sapevano bene, scegliendo Ancona come insediamento non solo per la sua posizione sul mare Adriatico, ma anche per l'acqua che scorreva dai suoi colli. È probabile

⁶³ PIRANI, Vincenzo. *Ancona dentro le mura*. Gilberto Bagaloni Editore, 1979.

⁶⁴ M. Panzini, *Dizionario del Vernacolo Anconitano*, 1996

che Ancona avesse una fonte pubblica già in epoca greco-romana e medievale, proprio la fonte del Filello (Desideri, 2021)⁶⁵.



Fig. 2.3.2 – La fonte del Filello ad Ancona⁶⁴.

Questa fonte la si trova scendendo attraverso un vicolo che da Piazza Stracca, dove ha sede il Palazzo degli Anziani, va verso l'area portuale. Lungo la discesa ci si troverà davanti ai resti di un grande arco medievale e, attraversandolo, sulla destra, ci si troverà di fronte alla fonte ancora attiva, attornata da mura greche risalenti al V-VI secolo a.C. La qualità dell'acqua che sgorgava dalla fonte, tuttavia, era considerata di più bassa qualità rispetto ad altre fonti nelle vicinanze e secondo delle ipotesi da studi di speleologia urbana, il ruolo della fonte era quello di contenimento e depurazione delle acque (Pirani, 1979)⁶⁶ (Forlani &

⁶⁵ Desideri Claudio, 2021. *La Fonte del Filello e la crescita della città*. Il Resto del Carlino.

⁶⁶ Cfr. Pirani Vincenzo. *Ancona dentro le mura*. Gilberto Bagaloni Editore, 1979. p. 83

Recanatini, 1997)⁶⁷. Prima della Seconda Guerra mondiale, la fonte si trovava in via della Cisterna (fig. 2.3.1) al centro di un quartiere popolare densamente abitato, noto come “la città vecchia”. Durante il bombardamento del '43, che causò centinaia di vittime, questo quartiere fu distrutto, ma la fonte rimase intatta. Ad oggi, eccetto la fonte del Filello, non è rimasto niente del quartiere prima del bombardamento, che fu risanato ma non ricostruito (Antonini et al, 2007).



Fig. 2.3.3 – Il quartiere popolare noto come “la Città Vecchia” prima del bombardamento del '43 che lo distrusse, lasciando sorprendentemente intatta la fonte (Ancona nel tempo, 2015)

⁶⁷ Cfr. Forlani Aldo, Recanatini Alberto. *La città sotto*, 1997, p. 82



Fig. 2.3.4 – L'arco medievale che si trova scendendo verso l'area portuale da Piazza Stracca e dopo il quale si trova la fonte del Filello (da Google)



Fig. 2.3.5 – La fonte del Filello. In secondo piano si vede l'arco che conduce alla fonte dal vialetto che scende verso l'area portuale (da Google).



Fig. 2.3.6 – Localizzazione della fonte del Filello (da Google Earth).

I cunicoli lungo i quali scorre l'acqua prima di affluire alla fonte e che si sviluppano all'interno del Colle Guasco, nella zona retrostante la fonte del Filello, sono scavati all'interno dei litotipi marnoso-calcarei della formazione dello Schlier. In questi, la circolazione idrogeologica è molto limitata e strettamente legata alla laminazione del complesso idrogeologico delle marne (Antonini et al, 2007)⁶⁸.

⁶⁸ Antonini, G., Mainiero, M., Recanatini, A., & Marchigiano, G. S. (2007). Il cunicolo della Fonte del Filello sotto il colle Guasco di Ancona. *BAR INTERNATIONAL SERIES*, 1611(2), 639

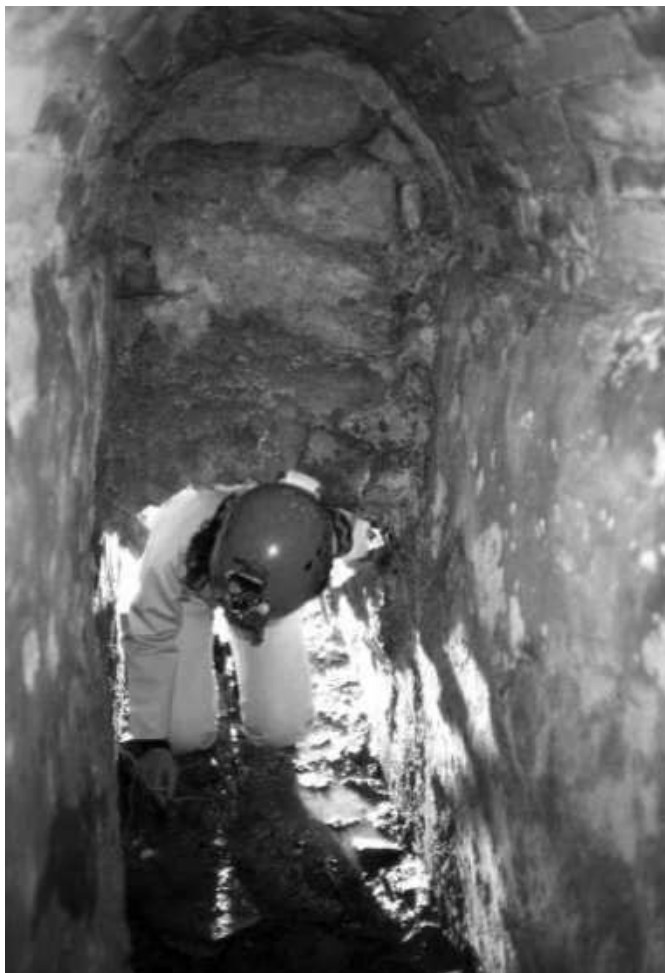


Fig. 2.3.7 – Passaggio che va dalla cisterna al cunicolo di alimentazione della fonte (Antonini et al, 2007)

Le misure di portata della fonte, ai fini della determinazione dell'area di ricarica dell'acquifero, sono state effettuate durante il periodo che va dal 12 marzo al 5 giugno 2024, mediamente due volte a settimana. Dalla sorgente vi sono due diversi punti di deflusso significativi provenienti dal muro in mattoni sulla quale la vasca si appoggia, il primo punto è dotato di un cannello in ghisa di diametro 5cm da cui fuoriesce la maggior parte dell'acqua piovana di infiltrazione, il secondo punto è costituito da una serie di crepe nella parete, laterali al cannello, le cui perdite sono rilevanti ai fini del bilancio finale. Entrambi i punti permettevano all'acqua di convergere all'interno di un chiusino facilmente accessibile da cui vi era una mandata che li canalizzava all'interno della pubblica fognatura. Nel pozzetto,

inoltre, vi è un ulteriore contributo di acqua di infiltrazione, in basse quantità, passante attraverso una terza condotta di circa 25 cm². Sono state effettuate le misure su tutti e tre i punti precedentemente descritti, che da ora in poi verranno nominati come descritto in Fig. 2.3.8 e Fig. 2.3.9. Le misure determinate nel chiusino primario, sono servite esclusivamente come controllo di quelle determinate sul muro flusso primario e secondario, visto che la vasca permette di convogliare entrambi i flussi provenienti dal muro direttamente all'interno del chiusino.

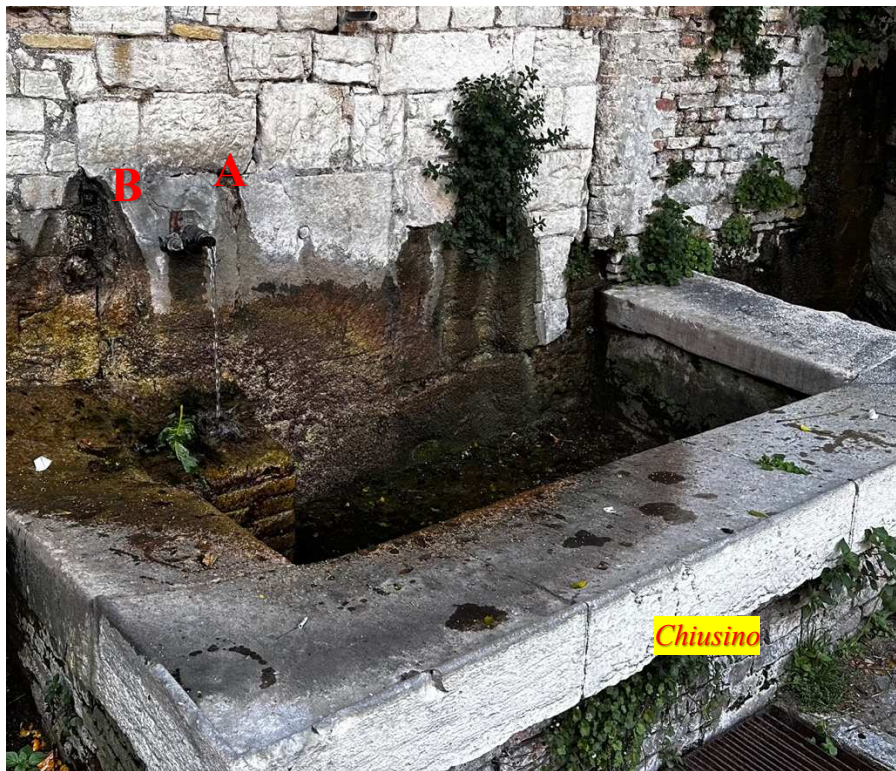


Fig. 2.3.8 – I due principali punti di uscita della sorgente: A- Muro flusso primario; B-Muro flusso secondario.



Fig. 2.3.9 – Il secondo e il terzo punto di deflusso: C- Chiusino primario; D- Chiusino secondario; E- Punto di accesso alla pubblica fognatura

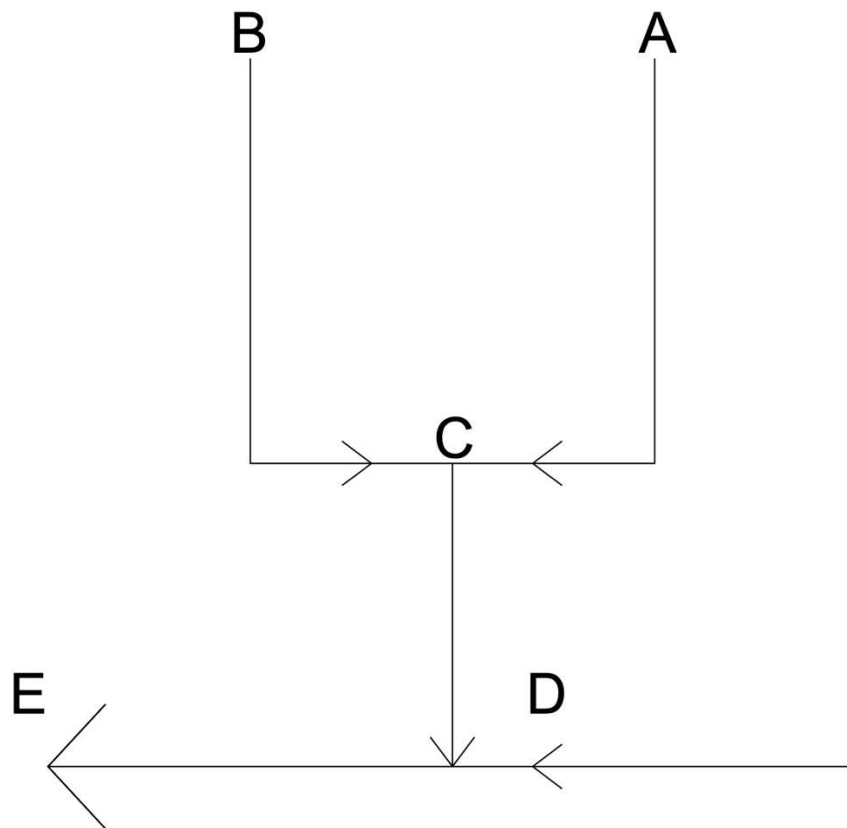


Fig. 2.3.10 – Schema dei flussi della sorgente

Data la scarsa precisione delle misure sul punto C, dovuta alla posizione che non permetteva una misura efficace e priva di errori, si è scelto di utilizzare i dati di portata nei punti A e B. Tramite il punto E, l'acqua dalla vasca e dal punto D viene canalizzata fino ad arrivare alla pubblica fognatura. Come si può vedere da Fig. 2.3.11, dal muro al di sotto della sorgente, le perdite sono state indice nel tempo del completo esaurimento della sorgente dovuto ai periodi di secco.

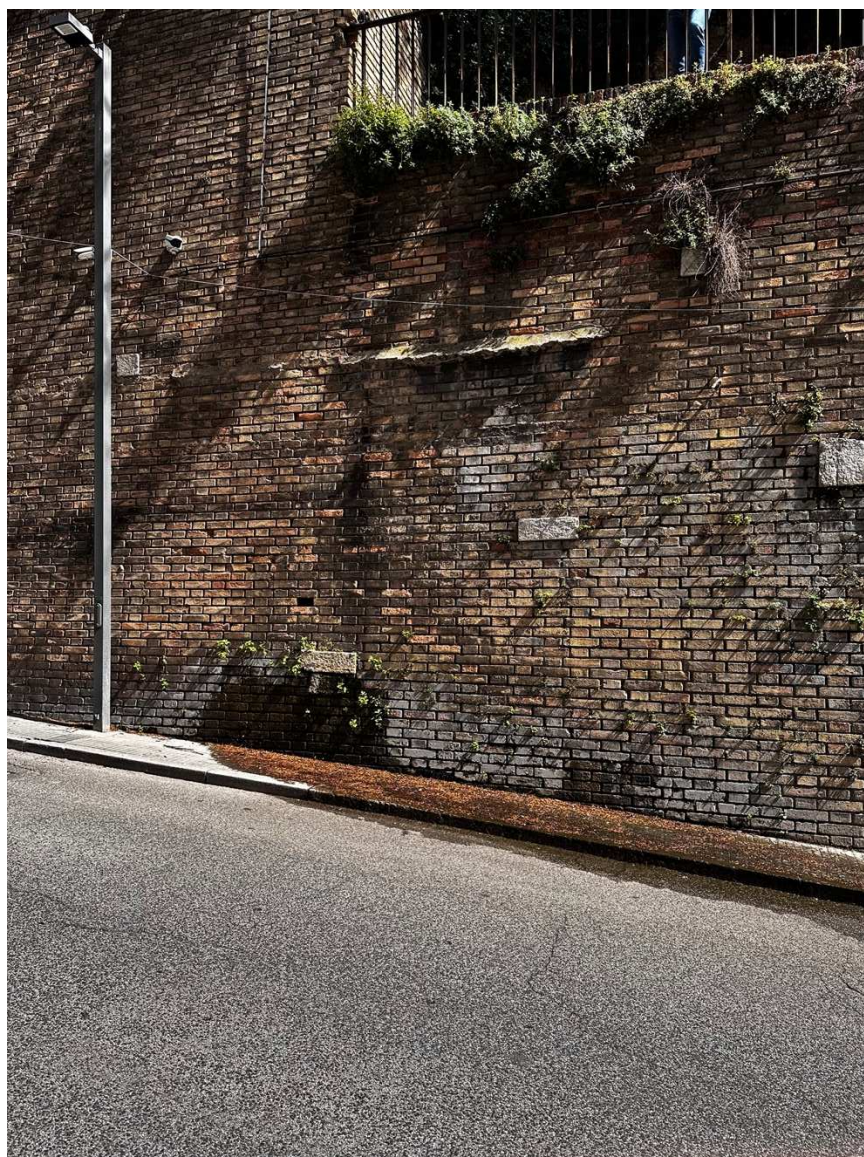


Fig. 2.3.11 – Perdite della sorgente viste da via Papa Giovanni XXIII (05/04/24)

Le portate [L^3/T] sono state determinate mediante dei contenitori graduati, si è riempito di una certa quantità il contenitore e si è cronometrato il tempo necessario. Si è diviso infine il volume per il tempo risalendo dunque alla portata. Sono state effettuate ogni volta tre misure per lo stesso punto, e poi sono state mediate per ridurre al minimo gli errori di misurazione. I risultati ottenuti dalle misurazioni sono stati riportati su un file Excel che ha permesso di creare un grafico dell'andamento dei deflussi durante il periodo delle misurazioni.



Fig. 2.3.11 – Contenitore graduato (5 litri) in plastica, per la misurazione delle portate



Fig.2.3.12 – Cilindro graduato (500 ml) in plastica, per la misurazione delle portate



Fig. 2.3.13 – Set di imbuti di diversa grandezza, utilizzati per il convogliamento delle portate nei punti della sorgente dove è stato più difficile prelevare acqua con i soli contenitori e cilindri graduati.

Il contenitore graduato da 5 litri in figura 2.3.11 è stato maggiormente utilizzato per registrare la portata del punto “muro flusso primario” (punto A in figura 2.3.7), il cilindro graduato da 500 ml in figura 2.3.12, invece, è servito principalmente a misurare la portata di “muro flusso secondario” e “chiusino flusso secondario” (punto B e D in figura 2.3.7). Le prove effettuate sulla sorgente, per quanto riguarda le misure di portata e l’analisi per la determinazione dei volumi di infiltrazione efficaci, hanno fornito dei dati che sono stati elaborati mediante Microsoft Excel. Il programma è in grado di immagazzinare dati ed elaborarli con l’obiettivo di fornire grafici rappresentativi dei risultati ottenuti che si discuteranno nel capitolo successivo.

2.3.1 Analisi della conduttività, del pH e della temperatura

Al fine di avere un riscontro circa la qualità dell’acqua che defluisce dalla fonte, sono stati misurati i parametri di conduttività, temperatura e pH tramite il GPS AquaMeter, descritto al paragrafo 2.2.1. La conduttività ci da informazioni riguardo la facilità di trasmissione elettrica di un materiale⁶⁹. Essendo una caratteristica intrinseca del materiale, dipende dalla temperatura dello stesso. Per quanto riguarda l’acqua, la conduttività è una proprietà che dipende dalla quantità degli ioni disciolti, come ad esempio sali, acidi e basi. Un aumento di queste caratteristiche è indicatore della presenza di contaminanti che derivano da attività agricole, industriali oppure, nel nostro caso, da attività urbane (Hounslow, 1995)⁷⁰. Ciò che influenza questo parametro, tuttavia, non sono queste sostanze contenute all’interno dell’acqua, bensì la capacità di queste sostanze di trasportare cariche elettriche, che in

⁶⁹ <https://www.alxyon.com/it/biblioteca/acqua/la-conduttività-elettrica-dell-acqua.html>

⁷⁰ Hounslow, A. W. (1995). *Water Quality Data: Analysis and Interpretation*. CRC Press.

presenza di una differenza di potenziale, a causa del loro movimento, generano corrente elettrica (www.alxyon.com).

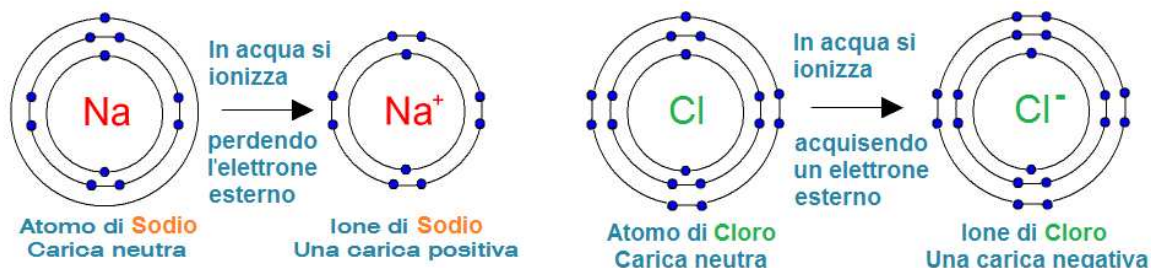


Fig. 2.3.1.1 – Processo di ionizzazione dei sali di Sodio e Cloro in acqua. Le cariche sono in grado di muoversi grazie a una differenza di potenziale e generare corrente elettrica. Questi sali sono detti elettroliti. (Alxyon.com)

La conduttività, dunque, riflette il contenuto di elettroliti in acqua la sua unità di misura è il microSiemens/centimetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$). Un Siemens (S) misura la conducibilità di un corpo che, sotto la tensione di 1 volt, lascia fluire all'interno una corrente di 1 ampere (Alxyon.com). La maggior parte delle acque commercializzate hanno un valore di conduttività tra 100 e 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e secondo la normativa italiana (D.lgs. 31/2001), per essere destinate al consumo umano, non devono superare i 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (lamiacqua.it)⁷¹. Essendo, come detto, un parametro che dipende strettamente dalla temperatura, è stato riportato il valore di quest'ultima per ogni misurazione della conduttività elettrica. Il ph, invece, misura la concentrazione di ioni idrogeno in una soluzione, minore sarà il valore e maggiore sarà la concentrazione di ioni H^+ . La scala di misurazione va da 0 a 14, se pari a 7 la soluzione sarà neutra, se maggiore di 7 si dice basica e se minore si dice acida⁷². L'acqua pura ha un valore pari a 7, che corrisponde alla neutralità, tuttavia, in natura, il valore del pH ha un valore

⁷¹ <https://www.lamiacqua.it/conducibilita-acqua>

⁷² <https://www.auroradagostino.it/il-ph-dellacqua-per-saperne-di-piu/#:~:text=L'acqua%20pura%20è%20neutra,la%20mancanza%20di%20ioni%20H%2B>.

compreso tra 6,5 e 8,5. In particolare, nelle acque di sorgente, il pH è solitamente basico e compreso tra 7 e 8⁷³.

2.4 Metodo di determinazione dei volumi di infiltrazione efficace nel periodo

Si è sviluppata una procedura per la determinazione dell'infiltrazione efficace, con l'obiettivo di stimare l'apporto del regime pluviometrico al bilancio idrico delle acque sotterranee. Diversi fattori influenzano l'infiltrazione efficace, tra questi troviamo il tempo di durata e la posizione in cui si sono svolte le precipitazioni, le temperature del suolo e la loro distribuzione, la geologia e le caratteristiche stratigrafiche delle formazioni presenti nella zona e infine, fattore tra i più importanti discussi all'interno di questo elaborato, l'uso del suolo. Tra i vari elementi che influenzano la stima dell'infiltrazione efficace sono stati trattati:

- Il regime delle precipitazioni;
- I caratteri geologici delle formazioni affioranti all'interno del bacino;
- La temperatura;
- L'evapotraspirazione potenziale;
- L'uso del suolo.

2.4.1 Precipitazioni e temperatura

I dati relativi alle precipitazioni e alla temperatura nel bacino sono stati ricavati da quelli forniti dalla Regione Marche⁷⁴. In particolare, dai pluviometri descritti al paragrafo 2.2.2 di questo elaborato, è stata estrapolata la serie storica di precipitazioni che va dal 12/03/24 al

⁷³ <https://www.inabottle.it/it/benessere/ph-acqua-cos-e-quali-sono-livelli-ottimali>

⁷⁴ <https://www.regione.marche.it/Regione-Utile/Protezione-Civile/Console-Servizi-Protezione-Civile/SIRMIP-online>

5/06/24, periodo in cui sono state effettuate le misurazioni sulla sorgente. La Regione e la Protezione Civile mettono a disposizione attraverso il SIRMIP ON-LINE una serie di dati riguardanti precipitazioni, temperatura, pressione atmosferica, direzione e intensità del vento, umidità e altri parametri utili per il monitoraggio delle condizioni ambientali.

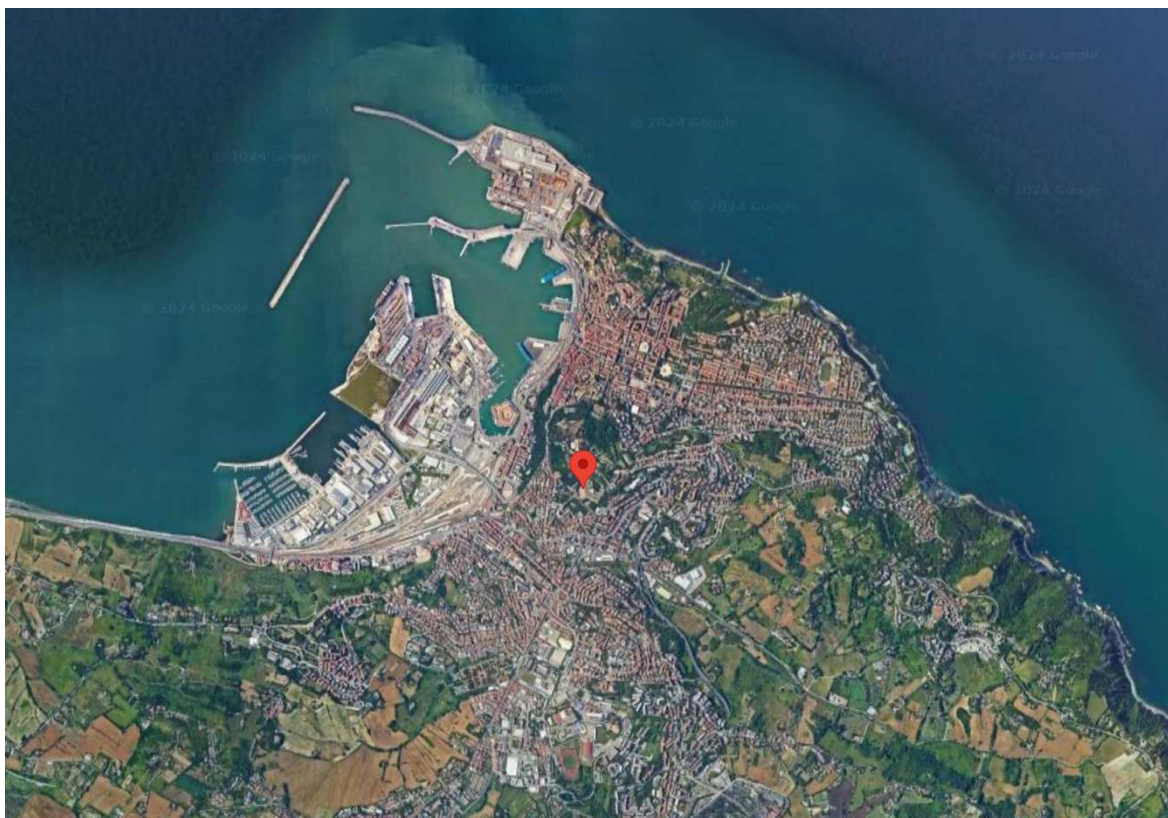


Fig. 2.4.1.1 – Pluviometro di riferimento. Sensore 1638, Regione Marche (SIRMIP ON-LINE)

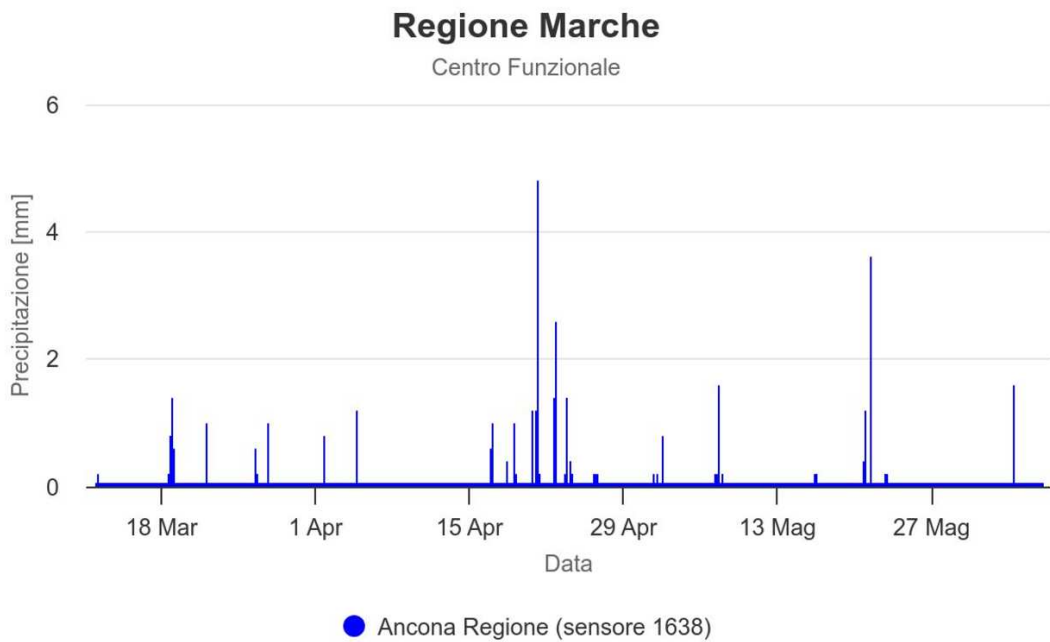


Fig. 2.4.1.2 – Dati di precipitazione (mm) dal 12/03/24 al 05/06/24. Sensore 1638, Regione Marche (SIRMIP ON-LINE)

Nello stesso punto indicato in Fig. 2.4.1.1, la Regione mette a disposizione un sensore di monitoraggio della temperatura. Anche in questo caso sono stati registrati i dati forniti durante il periodo delle misurazioni in sito.

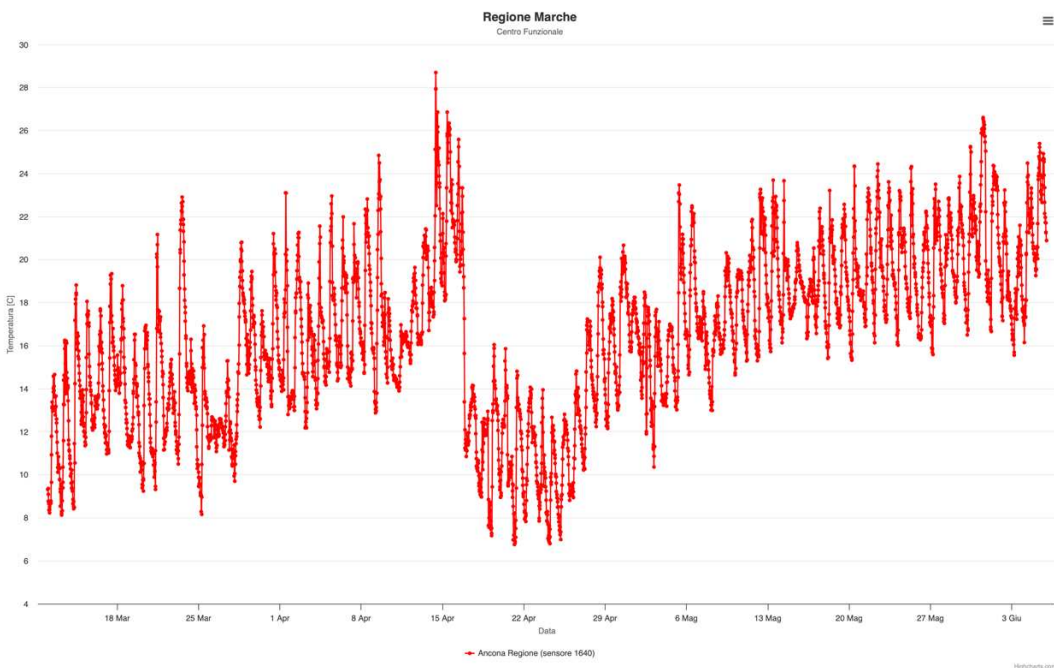


Fig. 2.4.1.3 – Dati di temperatura (°C) dal 12/03/24 al 5/06/24. Sensore 1640, Regione Marche (SIRMIP ON-LINE)

2.4.2 Caratteri geologici del bacino

Da uno studio effettuato dal Comune di Ancona, mediante delle prove penetrometriche dinamiche “DPSH”, la stratigrafia della zona di studio può essere riassunta come segue:

- Da 0 a 9-16,4 metri dal p.c. troviamo dei terreni di riporto costituiti da limo sabbioso argilloso e frammenti di laterizi;
- Da 9-16,4 metri dal p.c. fino a fine prova: formazione dello Schlier, composta da una sequenza di marne, marne calcaree, marne argillose grigie e, in misura minore, calcari marnosi biancastri. Gli strati sono generalmente di spessore medio sottile.

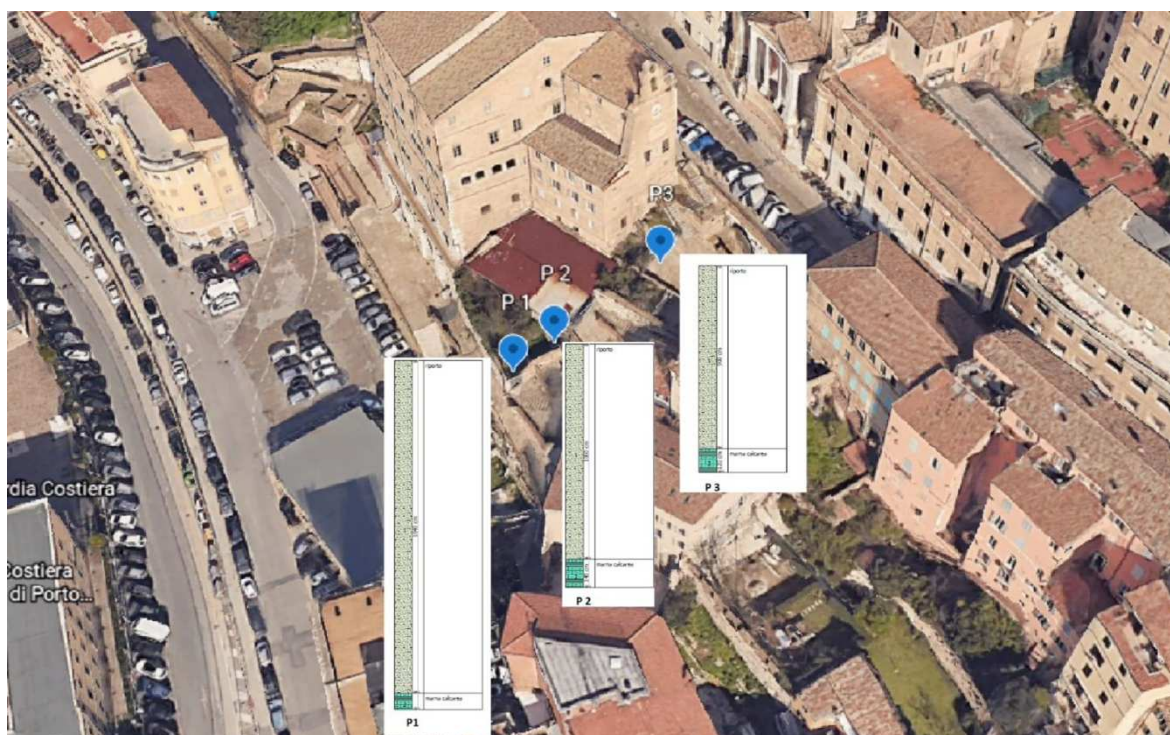
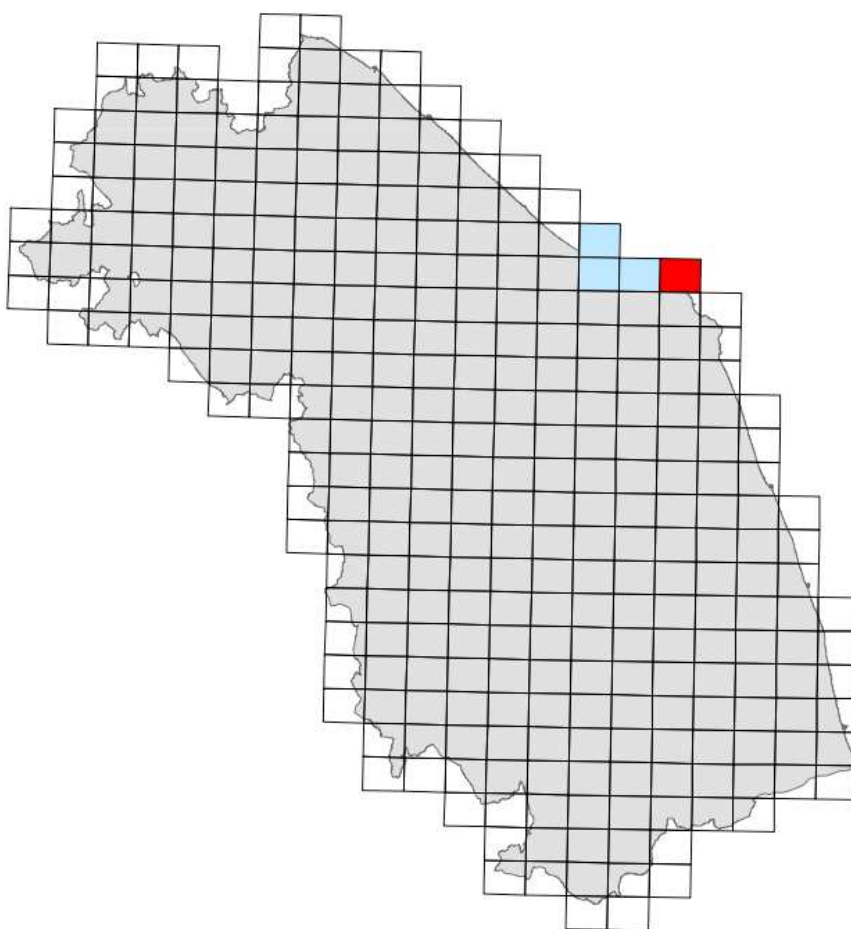


Fig. 2.4.1.4 – Prove penetrometriche dinamiche “DPSH” eseguite in tre diversi punti nei pressi di Piazza Dante, in vicinanza della sorgente urbana oggetto delle misurazioni (Comune di Ancona)

Le prove non hanno evidenziato la presenza di falde acquifere nei tre punti evidenziati, sintomo che il bacino di alimentazione della sorgente non interessa la zona adiacente la sorgente, in quanto, in questo caso, si sarebbe dovuta individuare una quota di falda acquifera

compatibile con la quota di emergenza della sorgente stessa. L'analisi della carta geologica regionale (sezione 282150 Ancona) messa a disposizione dalla Regione Marche, per quanto riguarda la stratigrafia nella zona, ha evidenziato un'immersione degli strati di Schlier a 40° in direzione sud-ovest. L'inclinazione di questa successione calcareo marnosa ha fatto ipotizzare che le acque di infiltrazione dovute agli eventi piovosi venissero convogliate nella zona del porto, di conseguenza l'area di alimentazione dell'acquifero dovrà essere sviluppata nella zona nord-est dell'area in esame.



*Fig. 2.4.1.5 –
Quadro d'unione
sezioni 1:10000
(Regione Marche)*



Fig. 2.4.1.6 – Carta geologica regionale sezione 282150, si evidenzia come la formazione dello Schlier (in arancione) sia inclinata di 40° in direzione sud-ovest verso il porto di Ancona (Regione Marche)⁷⁵

⁷⁵ <https://www.regione.marche.it/Regione-Utile/Paesaggio-Territorio-Urbanistica/Cartografia/Repertorio/Cartageologicaregionale10000>

LEGENDA GEOLOGICA

DEPOSITI CONTINENTALI QUATERNARI

SISTEMA DEL MUSONE

(OLOCENE)

	MUSa1	Frane in evoluzione
	MUSa1q	Frane senza indizi di evoluzione
	MUSa1a	Frane antiche
	MUSb2	Depositi eluvio-colluviali
	MUSbn	Depositi alluvionali terrazzati sabbie (a), sabbie limose (b)
	MUSg2a	Depositi di spiaggia attuale ghiaie, ghiaie sabbiose

SUCCESSIONE UMBRO-MARCHIGIANO-ROMAGNOLA

SUCCESSIONE PLOCIENICA

	FAA	ARGILLE AZZURRE Zancleano p.p. - Emiliano p.p.
	tv	ORIZZONTE DEL TRAVE Messiniano superiore p.p. - Pliocene inferiore p.p.(?)

SUCCESSIONE MIOCENICA

	FCO	FORMAZIONE A COLOMABACCI Messiniano superiore
	GES	FORMAZIONE GESSOSO SOLFIFERA Messiniano p.p.
	GESa	Gessi microcristallini in strati laminati siti al tetto della formazione Messiniano p.p.

SUCCESSIONE CALCAREO E/O MARNOSA CRETACICO-MIOCENICA

	SCH	SCHLIER Tortoniano p.p. - Messiniano p.p.
--	-----	--

	Deposito antropico / Struttura antropica
	Contatto stratigrafico o litologico
	Contatto stratigrafico o litologico incerto
	Sovrascorrimento incerto
	Stratificazione diretta

Fig. 2.4.1.7 – *Legenda geologica di fig. 2.4.1.6 (Regione Marche)*

Sulla base di queste considerazioni è stata definita l'area del bacino di alimentazione della sorgente tramite il programma QGIS, descritto nel paragrafo 2.2.3, che verrà giustificato nel capitolo 3.3.

2.4.3 *Evapotraspirazione potenziale*

L'evapotraspirazione potenziale (ET_0) è stata definita precedentemente come la capacità evapotraspirativa di un terreno, che dipende dalle caratteristiche climatiche della zona di riferimento (vento, temperatura, umidità, radiazione astronomica ecc.). Diversi studiosi

hanno messo a punto modelli matematici che sono in grado di stimare ET_0 partendo dalla conoscenza di più parametri climatici (Armiraglio S. et al, 2003)⁷⁶.

Metodo	Temperatura	RH	Vento	Eliofania relativa	Radiazione globale	Radiazione netta	Radiazione astron.	Evaporato
Thornthwaite	X							
Blaney-Criddle	X	(X)	(X)	(X)			X	
Radiazione solare	X	(X)	(X)	(**)	X			
Hargreaves	X						X	
Turc	X	(*)		(**)	X			
Penman	X	X	X	X		(X)		
Evaporimetro		(X)	(X)					X

Fig. 2.4.3.1 – I diversi metodi empirici per la determinazione di ET_0 , partendo dalla conoscenza di ipotesi climatiche differenti (Santonoceto C.)

Il modello di calcolo che viene utilizzato per determinare l' ET_0 all'interno di questo elaborato è stato sviluppato da Hargreaves e Samani (Hargreaves e Samani, 1982)⁷⁷:

$$ET_0 = 0,0023 Ra (T_m + 17.8) (T_{max} - T_{min})^{0.5}$$

Dove:

ET_0 = evapotraspirazione potenziale (mm d⁻¹)

Ra = radiazione solare extraterrestre in mm di acqua evaporata al giorno (mm d⁻¹)

T = temperatura media dell'aria (°C), ricavata dalla media tra la T_{max} e la T_{min}

⁷⁶ ARMIRAGLIO, STEFANO, et al. Calcolo informatizzato del bilancio idrico del suolo. *Natura Bresciana Annali Museo Civico di Scienze Naturali di Brescia*, 2003, 33: 209-216.

⁷⁷ Hargreaves G.H. & Samani Z.A., 1982. Estimating potential evapotranspiration. Tech. Note, J.Irrig. and Drain.

$T_{\max} - T_{\min}$ = differenza tra temperatura massima e minima ($^{\circ}\text{C}$)

0,0023 e 17.8 = costanti empiriche proposte da Hargreaves e Samani nell'85;

ET_0 può essere calcolata su diversi intervalli di tempo (su base giornaliera, mensile o annua).

La scelta dell'intervallo temporale dipende da diversi fattori, tra cui l'accuratezza richiesta e il quantitativo di dati a disposizione, che solitamente vengono forniti da stazioni meteorologiche. I dati a disposizione per il calcolo dell' ET_0 , all'interno di questo elaborato, sono: temperatura media, temperatura massima e minima e radiazione astronomica, su base giornaliera.

Data	Temp. min [$^{\circ}\text{C}$]	Temperatura media [$^{\circ}\text{C}$]	Temp. max [$^{\circ}\text{C}$]	R_a [mm/d]	ET_0 [mm/d]
12/03/24	8,23	11,24	14,66	10,14	1,7
13/03/24	8,13	11,94	16,25	10,25	2,0
14/03/24	8,42	13,26	18,82	10,36	2,4
15/03/24	11,35	13,92	18,06	10,47	2,0
16/03/24	11,48	14,05	17,71	10,59	2,0
17/03/24	10,97	14,63	19,35	10,70	2,3
18/03/24	11,34	14,49	18,79	10,81	2,2
19/03/24	10,13	12,90	16,53	10,92	2,0
20/03/24	9,24	13,00	16,95	11,04	2,2
21/03/24	9,32	14,57	21,17	11,15	2,9
22/03/24	11,15	13,19	15,36	11,26	1,7
23/03/24	10,5	16,82	22,91	11,37	3,2
24/03/24	9,88	13,63	16,30	11,48	2,1
25/03/24	8,16	12,18	16,92	11,59	2,4
26/03/24	11,08	12,16	12,69	11,70	1,0
27/03/24	10,41	12,28	15,30	11,81	1,8
28/03/24	9,70	15,74	20,81	11,92	3,0
29/03/24	13,80	16,43	19,45	12,03	2,3
30/03/24	12,22	14,93	17,62	12,14	2,1
31/03/24	13,17	16,53	21,21	12,25	2,8
01/04/24	12,80	15,64	23,11	12,36	3,3
02/04/24	12,99	16,93	21,27	12,47	2,9
03/04/24	12,18	15,47	18,91	12,57	2,5
04/04/24	13,07	16,00	21,56	12,68	3,0
05/04/24	14,37	17,39	22,96	12,78	3,1
06/04/24	14,34	17,30	21,99	12,89	2,9

Data	Temp. min [°C]	Temperatura media [°C]	Temp. max [°C]	R _a [mm/d]	ET ₀ [mm/d]
07/04/24	14,13	17,69	21,67	12,99	2,9
08/04/24	14,72	18,41	22,82	13,10	3,1
09/04/24	12,88	17,93	24,85	13,20	3,9
10/04/24	14,27	15,66	18,47	13,30	2,1
11/04/24	13,90	15,56	16,97	13,40	1,8
12/04/24	15,18	17,17	19,64	13,50	2,3
13/04/24	16,06	18,77	21,43	13,60	2,6
14/04/24	17,34	21,55	28,70	13,70	4,3
15/04/24	18,09	22,59	26,86	13,79	3,8
16/04/24	11,15	19,96	25,59	13,89	4,4
17/04/24	10,17	12,44	14,16	13,98	1,9
18/04/24	7,56	10,75	12,95	14,08	2,1
19/04/24	7,17	11,38	16,05	14,17	2,9
20/04/24	9,03	11,59	15,86	14,26	2,6
21/04/24	6,76	10,65	14,81	14,35	2,7
22/04/24	7,83	11,40	14,07	14,44	2,4
23/04/24	7,85	9,90	13,95	14,53	2,4
24/04/24	6,80	9,48	12,67	14,61	2,2
25/04/24	6,99	10,27	12,81	14,70	2,3
26/04/24	8,94	11,72	14,82	14,78	2,4
27/04/24	10,22	14,11	17,24	14,87	2,9
28/04/24	12,24	16,09	20,11	14,95	3,3
29/04/24	12,15	15,34	18,19	15,03	2,8
30/04/24	13,01	17,63	20,67	15,11	3,3
01/05/24	15,66	16,90	18,25	15,19	2,0
02/05/24	11,90	15,50	18,49	15,26	3,0
03/05/24	10,36	14,59	17,69	15,34	3,0
04/05/24	13,19	15,24	17,00	15,41	2,3
05/05/24	13,02	17,91	23,47	15,48	4,1
06/05/24	14,65	18,62	22,50	15,56	3,6
07/05/24	13,75	16,36	18,51	15,63	2,7
08/05/24	12,99	15,96	18,31	15,69	2,8
09/05/24	15,67	17,88	20,32	15,76	2,8
10/05/24	14,64	17,69	19,53	15,83	2,8
11/05/24	15,29	18,34	21,87	15,89	3,4
12/05/24	15,30	19,61	23,27	15,95	3,8
13/05/24	15,73	19,72	23,70	16,01	3,9
14/05/24	16,14	18,62	23,67	16,07	3,8
15/05/24	17,39	18,90	20,79	16,13	2,5
16/05/24	16,33	18,31	20,54	16,19	2,8
17/05/24	16,57	19,24	22,39	16,24	3,4
18/05/24	15,41	18,90	23,22	16,30	3,9
19/05/24	16,84	19,31	22,57	16,35	3,4

Data	Temp. min [°C]	Temperatura media [°C]	Temp. max [°C]	R _a [mm/d]	ET ₀ [mm/d]
20/05/24	15,33	18,85	24,35	16,4	4,3
21/05/24	16,89	19,68	23,32	16,45	3,6
22/05/24	16,14	20,26	24,45	16,49	4,2
23/05/24	17,09	19,80	23,62	16,54	3,7
24/05/24	16,03	19,90	23,21	16,58	3,8
25/05/24	16,38	19,36	24,33	16,63	4,1
26/05/24	16,28	19,11	22,25	16,67	3,5
27/05/24	15,59	20,01	23,51	16,71	4,0
28/05/24	17,04	20,15	22,87	16,74	3,5
29/05/24	17,99	20,32	23,87	16,78	3,6
30/05/24	16,50	20,74	25,26	16,82	4,4
31/05/24	18,06	22,37	26,61	16,85	4,5
01/06/24	16,66	21,44	24,38	16,88	4,1
02/06/24	17,00	19,30	23,24	16,91	3,7
03/06/24	15,56	18,45	21,60	16,94	3,5
04/06/24	16,15	20,74	24,49	16,96	4,3
05/06/24	19,26	22,59	25,40	16,99	3,9

Tab. 2.4.3.1 – Tabella di calcolo evapotraspirazione potenziale (ET₀)

2.4.4 Uso del suolo e attribuzione dei CIP

Come si è visto nel paragrafo 2.1.3 gli effetti dell'urbanizzazione condizionano fortemente il bilancio idrologico di un'area urbana come quella in esame. Questa analisi permette di comprendere meglio il comportamento delle risorse idriche ove si ha un'alta densità di abitazioni e infrastrutture, riducendo l'infiltrazione e aumentando il deflusso superficiale provocando, nei peggiori casi, allagamenti e sovraccarico delle reti fognarie. Ai fini di completare il bilancio idrologico in oggetto, diventa quindi fondamentale distinguere l'uso del suolo nella zona. Il problema della determinazione dei Coefficienti di Infiltrazione Potenziale (CIP) nei bilanci idrologici è di cruciale importanza. I CIP rappresentano la frazione percentuale di precipitazioni che riesce a infiltrarsi nel suolo e percolare verso le

falde acquifere⁷⁸. Questi coefficienti, pertanto, danno un'indicazione sul volume delle acque di precipitazione che si infiltrano all'interno del terreno a seconda delle proprietà fisiche dei terreni presi in considerazione (Viaroli et al, 2019)⁷⁹. Si rende necessario, dunque, considerare che le diverse pavimentazioni presenti all'interno dell'area in esame, come ad esempio strade, parcheggi e edifici, riducono diversamente l'infiltrazione efficace delle precipitazioni, così come le aree verdi e i parchi. Oltre al fatto che le rocce di cui sono costituiti i terreni (come sabbie e ghiaie) hanno capacità di traspirazione diverse⁷⁹. Si è reso necessario quindi distinguere il tipo di pavimentazione nell'area che si è ipotizzata essere di alimentazione della sorgente (Fig. 2.4.2.5) e attraverso l'utilizzo del GIS e di rilevamenti in sito si sono distinte otto diverse tipologie, a cui sono state assegnate diversi CIP:

1. Asfalto
2. Aree verdi
3. Edifici
4. Ghiaia
5. Pavimentazione 1
6. Pavimentazione 2
7. Pavimentazione 3
8. Pavimentazione 4

⁷⁸ “Green Infrastructure in Urban Areas” - European Environment Agency (EEA)

⁷⁸ “Urban Hydrology for Small Watersheds” - USDA Natural Resources Conservation Service (NRCS)

⁷⁹ Viaroli et al, *Journal of Hydrology* 556 (2018). 72-86

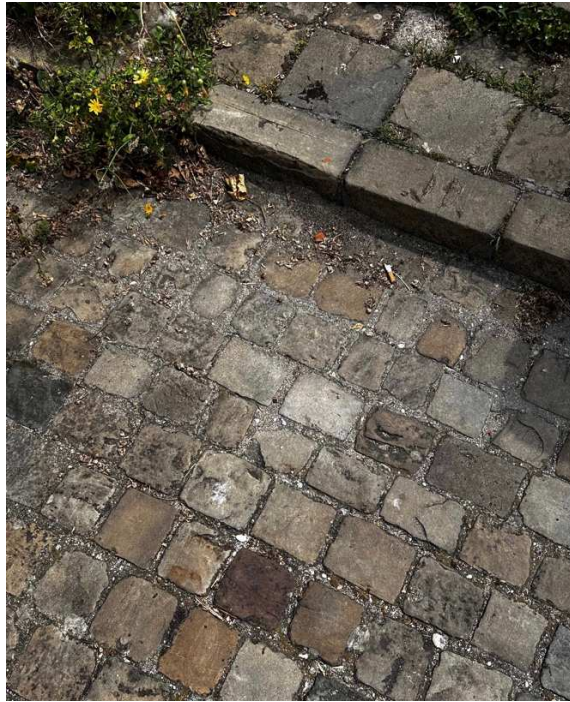


Fig. 2.4.4.1 – Pavimentazione tipo 1



Fig. 2.4.4.2 – Pavimentazione tipo 2



Fig. 2.4.4.3 – Pavimentazione tipo 3

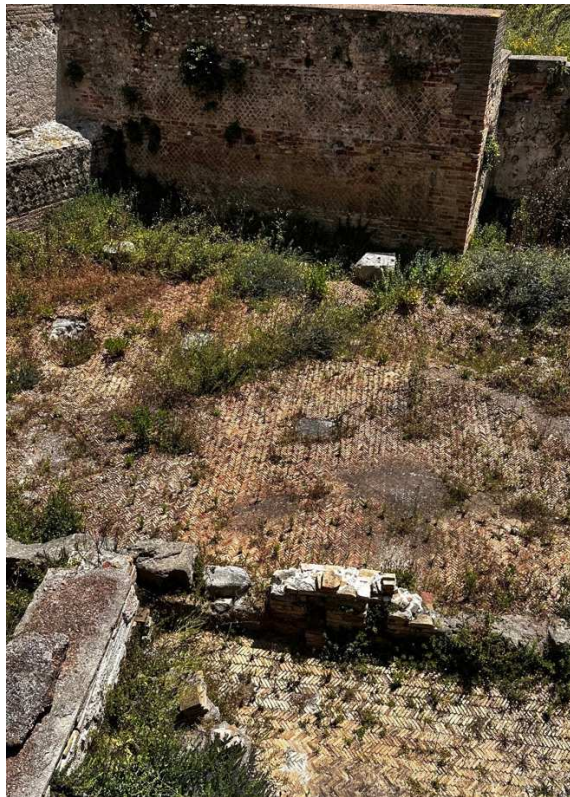


Fig. 2.4.4.4 – Pavimentazione tipo 4

Queste tipologie di superficie sono distribuite in vario modo nell'area del bacino di alimentazione che si era ipotizzata. Si è riportata la disposizione di queste ultime, attraverso il programma QGIS che, inoltre, ha fornito informazioni riguardo la superficie in m² di ognuna di esse.



Fig. 2.4.4.5 – Distribuzione delle tipologie di superfici sull'area di alimentazione del bacino ipotizzata.
 Verde: aree verdi; Rosso: edifici; Blu: asfalto; Giallo: ghiaia; Azzurro: pavimentazione; Ciano: pavimentazione 2; Fucsia: pavimentazione 3; Arancione: pavimentazione 4

Come precedentemente introdotto, queste pavimentazioni hanno delle capacità di traspirazione differenti, di conseguenza saranno caratterizzate da CIP (Coefficienti di Infiltrazione Potenziale) differenti tra loro. Sono stati ipotizzati come riportato in tabella:

	Area (m ²)	CIP
Asfalto	6.765	0,04-0,06
Edifici	13.421	0,08-0,12
Aree verdi	40.725	0,75-0,85

	Area (m ²)	CIP
Ghiaia	7.049	0,75-0,85
Pavimentazione 1	803	0,07-0,11
Pavimentazione 2	2.815	0,06-0,10
Pavimentazione 3	563	0,07-0,11
Pavimentazione 4	569	0,07-0,11

Tab. 2.4.4.1 – Area e CIP di ogni tipologia di superficie rilevata

Questi coefficienti verranno in seguito moltiplicati per l'altezza di precipitazione nel trimestre di riferimento e per la superficie in m² della specifica pavimentazione, con lo scopo di ottenere il volume di infiltrazione efficace nel periodo delle misurazioni.

2.5 Metodologia di calcolo

Si procederà a confrontare i metri cubi erogati dalla sorgente nel periodo, determinati mediante i dati di portata ricavati dalla sorgente, e i metri cubi di infiltrazione efficace, ricavati rilevando le precipitazioni nette e le caratteristiche dell'area in esame descritti nel paragrafo precedente. Questi devono risultare, se l'area del bacino di alimentazione ipotizzata è corretta, conformi tra loro, accettando un errore massimo del 5%. Nel capitolo successivo si illustreranno i risultati ottenuti da questo confronto.

RISULTATI

3.1 Volumi erogati dalla sorgente nel periodo

Si riportano di seguito i grafici ottenuti delle portate di efflusso uscenti dalla sorgente. In particolare, questi mostrano l'andamento degli efflussi nel tempo, permettendo di evidenziare, tre picchi di portata principali: il primo il 26/03/24, il secondo l'8/04/24 e il terzo il 24/04/24. In ascissa si riporta il periodo delle misurazioni che va dal 12/03 al 5/06 del 2024 mentre sulle ordinate si hanno i valori delle portate, espressi in millilitri al secondo (ml/s), ricavate dai punti di efflusso citati come in fig. 2.3.8 e fig. 2.3.9.

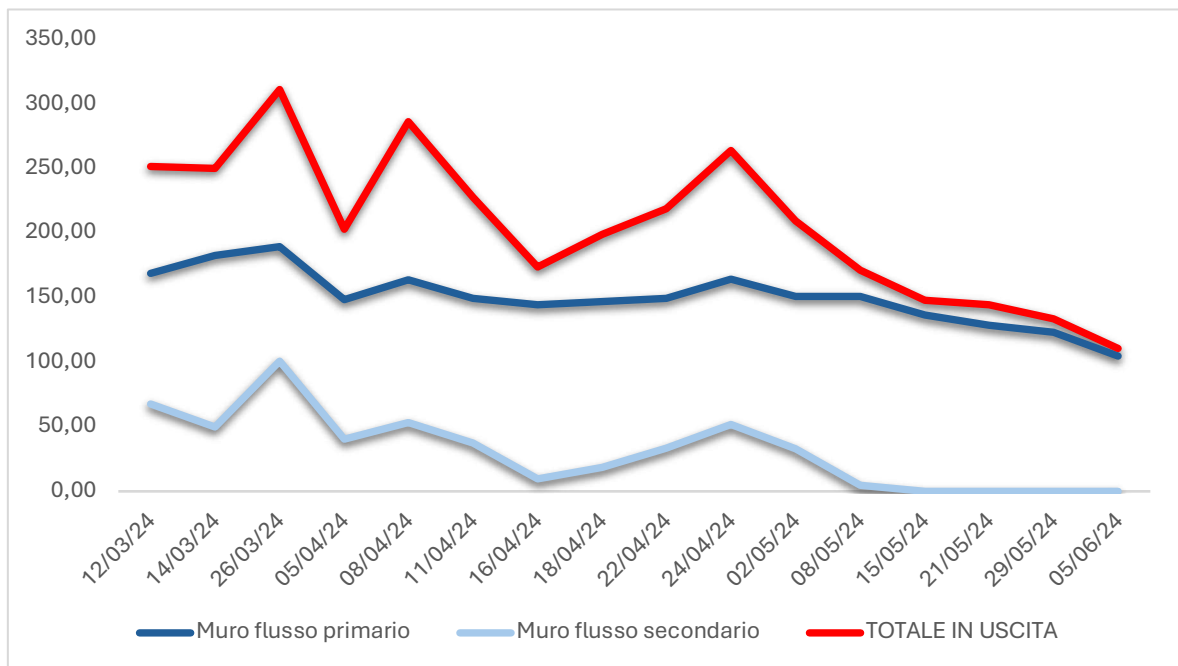


Fig. 3.1.1 – Andamento delle portate nel tempo ricavate da muro flusso primario, muro flusso secondario e totale in uscita (la somma dei due precedenti e del contributo dato dal chiusino primario)

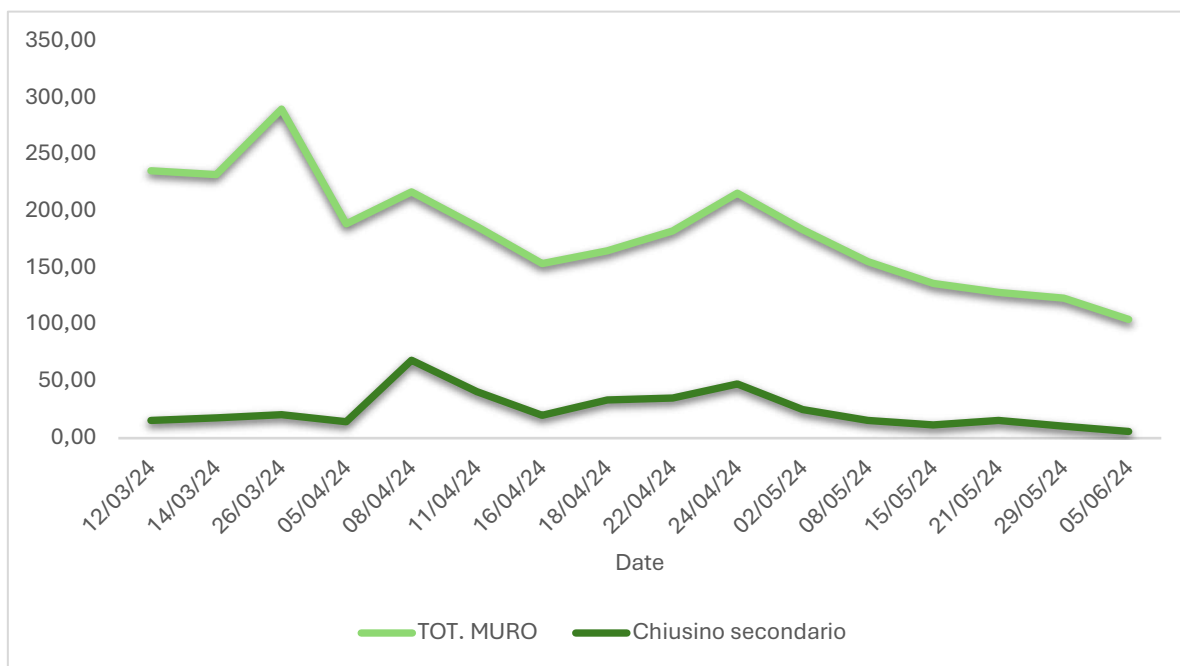


Fig. 3.1.2 – Andamento delle portate nel tempo ricavate da chiusino secondario e dal totale dei contributi effluenti dal muro. La somma dei due dati restituisce il totale in uscita.

Dai dati dei sensori gestiti dal centro funzionale della Regione Marche, descritti al capitolo 2.4.1 di questo elaborato, sono stati ricostruiti i grafici dell'andamento della temperatura minima, media e massima, della precipitazione totale e della precipitazione netta. Parametri utili per il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale (ET_0). La precipitazione netta, infatti, è stata determinata come differenza tra la precipitazione totale e il contributo dovuto all'evapotraspirazione potenziale, calcolata mediante la formula di Hargreaves e Samani descritta nel capitolo 2.4.3. Sull'asse delle ascisse si riporta, come per i grafici precedenti, il periodo delle misurazioni.

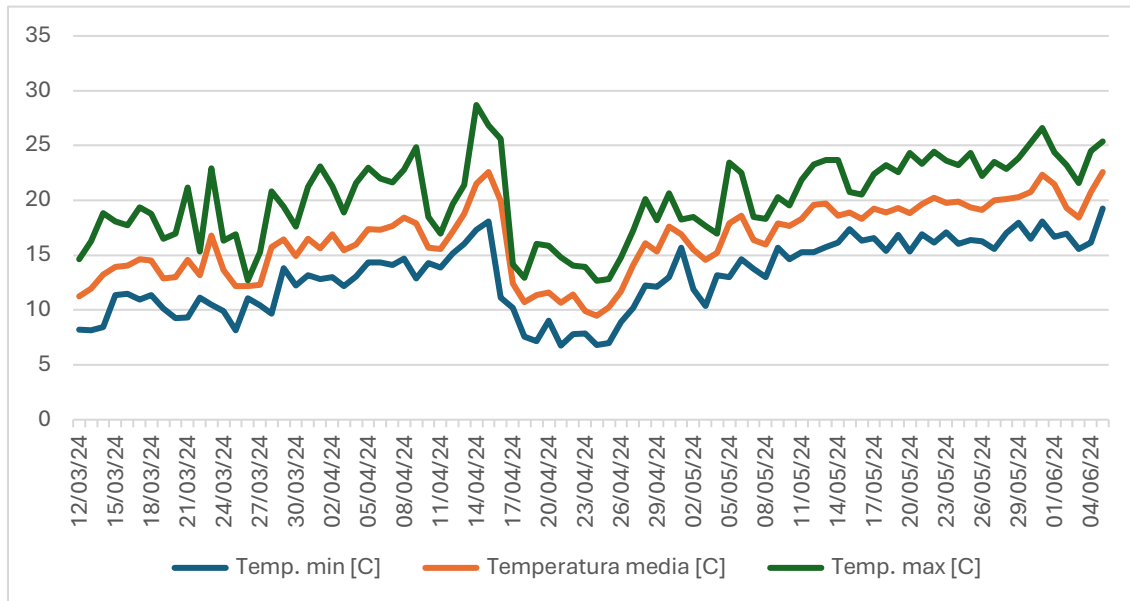


Fig. 3.1.3 – Andamento della temperatura minima, media e massima nel periodo. Sulle ascisse il periodo delle misurazioni e sulle ordinate la temperatura espressa in gradi Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

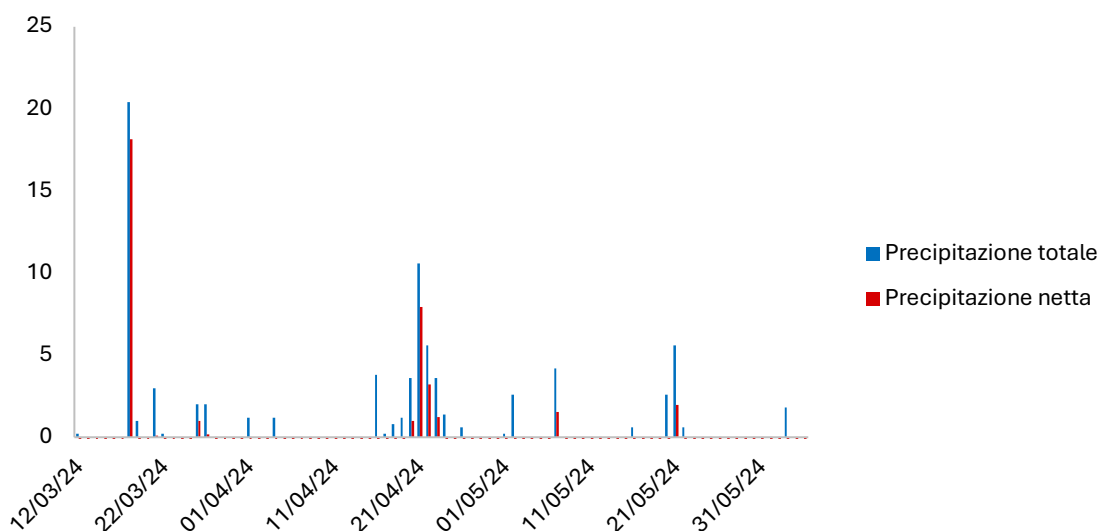


Fig. 3.1.4 – Grafico delle precipitazioni totali e nette durante il periodo delle misurazioni. Sulle ordinate si riportano le precipitazioni espresse in millimetri (mm).

Da questi emerge, tramite il confronto tra i dati del totale in uscita dalla sorgente e le precipitazioni, che il primo e il terzo corrispondono a eventi piovosi, mentre il secondo picco, quello dell'8 aprile, non corrisponde a eventi piovosi particolari. Nel capitolo 3.1.2 si discuteranno le possibili cause di questa discrepanza. Si riporta la sovrapposizione del grafico del totale in uscita con quello delle precipitazioni al netto dell'evapotraspirazione,

cioè la quantità d'acqua effettivamente infiltrata all'interno del bacino di alimentazione della sorgente.

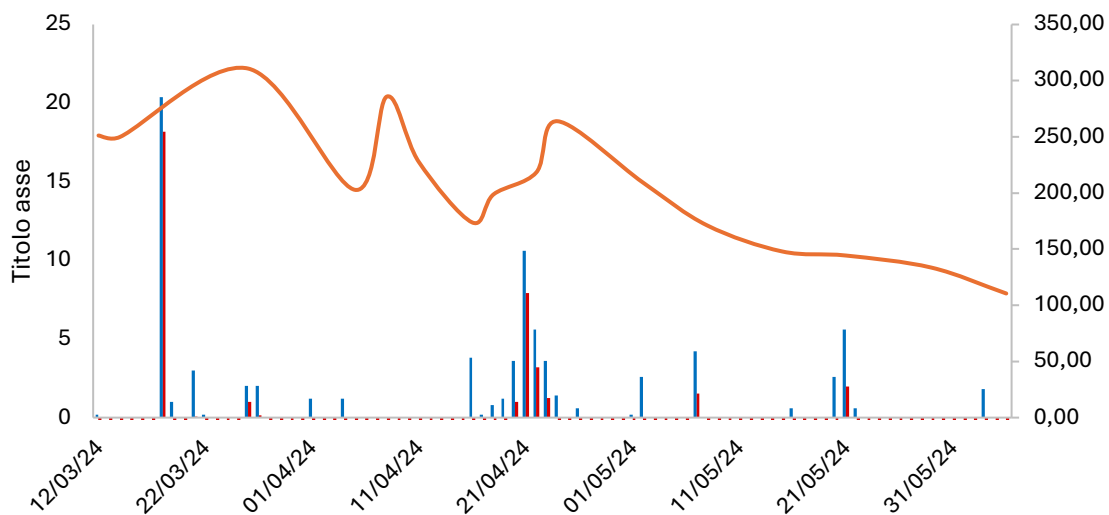


Fig. 3.1.5 – Sovrapposizione del grafico del totale in uscita dalla sorgente (curva in arancione) e delle precipitazioni totali e nette nel periodo delle misurazioni.

Nei periodi in cui l'acquifero si avviava verso l'esaurimento e la sorgente permetteva un basso efflusso di portata, specialmente per il "muro flusso secondario", si è fatto uso di un foglio di carta d'alluminio per convogliare i flussi all'interno del cilindro graduato, in modo da poter limitare le perdite. Come detto precedentemente, il contributo di "chiusino flusso primario" (punto C in figura 2.3.7), è stato monitorato esclusivamente con lo scopo di verificare la corretta misurazione dei punti di efflusso sul muro. Quest'ultimo contributo, essendo stato comunque un buon indice di verifica, è risultato più basso rispetto alla somma delle portate in A e B, probabilmente a causa della ritenuta idraulica della vasca. Il totale in uscita, utilizzato per determinare i metri cubi erogati dalla sorgente, è dato dunque dalla somma dei contributi muro flusso primario, secondario e chiusino flusso secondario.

Data	Muro flusso primario [ml/s]	Muro flusso secondario [ml/s]	Chiusino flusso secondario [ml/s]	Totale in uscita [ml/s]
12/03/24	168,49	67,32	15,37	251,18
14/03/24	182,42	49,81	17,62	249,85
26/03/24	189,27	100,68	20,86	310,81
05/04/24	148,12	40,49	14,22	202,83
08/04/24	163,74	53,44	68,65	285,83
11/04/24	149,26	37,24	41,04	227,54
16/04/24	144,49	9,41	19,86	173,76
18/04/24	146,59	18,60	33,64	198,83
22/04/24	149,28	33,54	35,53	218,35
24/04/24	164,05	51,96	47,86	263,87
02/05/24	150,94	32,84	25,40	209,18
08/05/24	150,53	4,78	15,79	171,10
15/05/24	136,19	0,00	11,79	147,98

Data	Muro flusso primario [ml/s]	Muro flusso secondario [ml/s]	Chiusino flusso secondario [ml/s]	Totale in uscita [ml/s]
21/05/24	128,52	0,00	15,78	144,30
29/05/24	123,22	0,00	10,33	133,55
05/06/24	104,63	0,00	5,89	110,52

Tab. 3.1.1 – Dati di portata della sorgente nel periodo

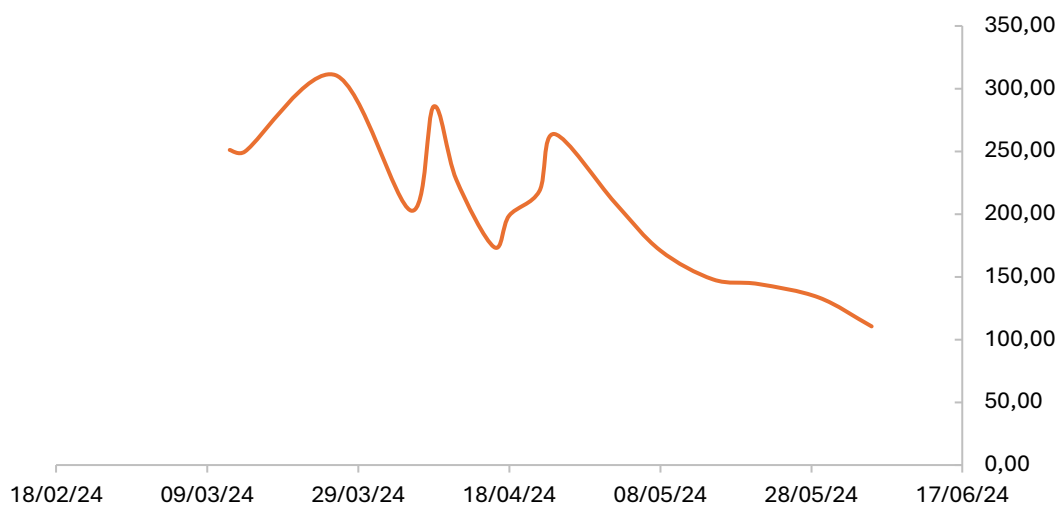


Fig. 3.1.6 – Grafico dell'andamento degli efflussi nel tempo. Sull'asse delle ascisse le date del periodo in cui poi si confronterà la serie con i dati dei pluviometri forniti dalla Regione Marche; sull'asse delle ordinate le portate in ml/s.

Questi dati verranno poi confrontati con la serie storica dei dati pluviometrici forniti dalla Regione Marche, per andare a ricercare una congruenza tra i dati ricavati in sito e le piogge al netto dell'evapotraspirazione, con l'obiettivo di poter risalire all'area del bacino di alimentazione della sorgente urbana. In effetti, come si illustrerà nel prossimo paragrafo, i

picchi delle portate devono corrispondere a periodi umidi in cui l'evapotraspirazione consenta l'infiltrazione dell'acqua all'interno dei terreni. Le misure di portata sono terminate il 5 giugno 2024, quando si è constatato che l'acquifero andava verso il completo esaurimento dell'acqua, dovuto alle temperature in aumento e alla stagione estiva povera di eventi piovosi. La parabola discendente si è iniziata a delineare dal 24/04/24, data dell'ultimo picco di portata. Da lì in poi il flusso totale in uscita è diminuito sempre di più, come visibile anche nel grafico precedente. Il 15/05/24, il muro secondario ha registrato il completo esaurimento, come visibile nelle immagini successive.



Fig. 3.1.7 – Flusso in uscita dal muro al 26/03/24.



Fig. 3.1.8 – Flusso in uscita dal muro al 5/06/24, si vede che il muro secondario, a sinistra, è completamente asciutto. Sintomo che l'acquifero si avviava verso il completo esaurimento.

Dalla tabella 2.3.1 si può ricavare il volume medio di portate erogato nel periodo semplicemente moltiplicando la media del totale in uscita rilevato per il numero di giorni, facendo attenzione alle opportune unità di misura.

Data	Totale in uscita (ml/s)
12/03/24	251,18
14/03/24	249,85
26/03/24	310,81
05/04/24	202,83
08/04/24	285,83
11/04/24	227,54
16/04/24	173,76

Data	Totale in uscita (ml/s)
18/04/24	198,83
22/04/24	218,35
24/04/24	263,87
02/05/24	209,18
08/05/24	171,10
15/05/24	147,98
21/05/24	144,30
29/05/24	133,55

Tab. 3.1.2 – Totale in uscita dalla sorgente nel periodo

La portata media in uscita dalla sorgente equivale a 206,22 ml/s cioè 0,20622 litri al secondo. Significa che mediamente la sorgente eroga $0,20622 * 86400 = 17817,4$ litri al giorno (l/d), che corrispondono a 17,82 m³/d. A questo punto, conoscendo la portata media in uscita in metri cubi al giorno, per ricavare il volume erogato dalla sorgente basterà moltiplicare per la durata del periodo delle misurazioni in giorni. In particolare, le misurazioni sono state registrate durante un periodo di 86 giorni (tra il 12/03/24 e il 5/06/24), dunque i metri cubi d'acqua erogati dalla sorgente nel periodo sono $17,32 \text{ m}^3/\text{d} * 86 \text{ d}$ ovvero 1533,88 m³.

3.1.1 Analisi del picco di portata dell'8 aprile 2024

Si evince, analizzando i dati registrati dell'8 aprile 2024, che il contributo dovuto al chiusino secondario, è il più alto registrato in tutto il periodo. L'acqua che sgorga da questo punto ha una provenienza ignota, a differenza di quella effluente dai due punti sul muro. Infatti, dalle

note storiche della fonte del Filello, discusse al paragrafo 2.3, l'acqua captata da questi ultimi due punti proviene, secondo gli autori, dai cunicoli scavati all'interno della formazione dello Schlier che arrivano alla sorgente.

Data	Portata
08/04/24	68,65

Tab 3.1.1.1 – Portata captata al giorno 8/04/24 sul chiusino secondario, la più alta registrata nel periodo

Dalla tabella 2.3.1 la media delle misurazioni effettuate sul chiusino secondario, escludendo il contributo dell'8 aprile, è di 22,07 ml/s. La portata misurata quel giorno sul chiusino secondario, dunque, è stata di 46,58 ml/s sopra la media e quella del totale in uscita ha visto un picco non giustificato dagli eventi piovosi, come visibile in figura 3.1.5. Concentrandosi sul contributo del chiusino secondario, se la misura di portata captata è maggiore del picco di pioggia rilevato dai pluviometri, ci sono diverse possibili spiegazioni in grado di giustificare questa discrepanza:

1. Afflusso da fonti aggiuntive: oltre alla pioggia, potrebbero esserci ulteriori fonti che contribuiscono all'efflusso, ad esempio perdite delle reti idriche o afflussi dalle fognature domestiche.
2. Fattori geologici e idrogeologici: le falde acquifere e il terreno possono rilasciare in ritardo, rispetto agli eventi di pioggia, l'acqua accumulata nel tempo. Questo può avvenire quando il sottosuolo è saturo o se ci sono falde acquifere superficiali. Precedenti eventi piovosi potrebbero aver saturato il terreno o riempito i sistemi di raccolta, causando un rilascio ritardato dell'acqua.

3. Fattori antropici: l'impermeabilizzazione dovuta a edifici, strade e marciapiedi, nonché modifiche ai sistemi di drenaggio, possono alterare il percorso e la quantità di acqua piovana che raggiunge la sorgente urbana.

L'ipotesi più probabile di questo aumento di portata può essere la perdita dalle reti idriche, visto e considerato che il punto di efflusso che fornisce questa discrepanza è caratterizzato da una mandata che potrebbe essere allacciata a una condotta per il trasferimento delle acque urbane. Tuttavia, tutte le ipotesi sopraelencate potrebbero essere corrette e solo un'analisi più approfondita potrebbe fornire la causa della discrepanza tra la portata misurata e i dati registrati dai pluviometri. Analizzare questi fattori richiede studi approfonditi e indagini dettagliate dei sistemi di drenaggio urbano.



Fig. 3.1.1.1 – Punto di uscita chiusino secondario. Si vede bene che la direzione della mandata è in direzione trasversale rispetto al punto di uscita della vasca alimentata dalla sorgente, questo può indicare che la condotta potrebbe essere allacciata a una rete idrica urbana.

3.1.2 Risultati sulla conduttività, sul pH e sulla temperatura

Per quanto riguarda la misura di EC e della temperatura questi sono stati misurati a partire dal 16/04/24.

Data	Temperatura (°C)	EC (mS/cm)
16/04/24	16,90	1433
18/04/24	16,60	1448
22/04/24	16,60	1442
24/04/24	-	-
02/05/24	17,70	1393
08/05/24	17,50	1424
15/05/24	17,60	1419
21/05/24	16,90	1403
29/05/24	17,40	1435
05/06/24	18,13	1428

Tab. 3.1.2.1 – Parametri di elettroconduttività (EC) e temperatura dell'acqua in uscita dalla sorgente.

La temperatura dell'acqua ha visto un aumento dovuto all'avvicinarsi della stagione estiva, mentre l'elettroconduttività si è mantenuta in un intervallo compreso tra 1350 e 1450 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indicando che questa ha dei parametri non verificati per il consumo umano.

3.2 Volumi di infiltrazione efficace nel periodo

Riprendendo in considerazione i risultati descritti in tabella 2.4.3.1 per quanto riguarda il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale ET_0 e le ipotesi fatte riguardanti i coefficienti di infiltrazione potenziale (CIP) per i diversi tipi di pavimentazione nella zona, esplicitati in tabella 2.4.4.1, questi verranno utilizzati, in questo paragrafo, per giungere alla determinazione del volume di infiltrazione efficace nel periodo. Le precipitazioni nette sono state calcolate come differenza tra precipitazioni totali ed evapotraspirazione potenziale. ET_0 , infatti, rappresenta un'indicazione di quanta pioggia è in grado di infiltrarsi all'interno del terreno, al netto della temperatura e della radiazione solare extraterrestre, come definito da Hargreaves e Samani. Nei giorni in cui non si verificano fenomeni di pioggia, o comunque la precipitazione totale è uguale o inferiore al valore di ET_0 , la differenza tra questi due parametri fornisce un risultato negativo, poiché l'evapotraspirazione potenziale è un indicatore sempre maggiore di zero. Al verificarsi di queste condizioni, durante il periodo considerato, la precipitazione netta registrata è pari a zero, come si evince in tabella 3.2.1.

Data	ET_0 [mm]	Precipitazione totale (mm)	P.tot- ET_0	Precipitazione netta (mm)
12/03/24	1,7	0,2	-1,5	0,0
13/03/24	2,0	0	-2,0	0,0
14/03/24	2,4	0	-2,4	0,0
15/03/24	2,0	0	-2,0	0,0
16/03/24	2,0	0	-2,0	0,0
17/03/24	2,3	0	-2,3	0,0
18/03/24	2,2	20,4	18,2	18,2
19/03/24	2,0	1	-1,0	0,0
20/03/24	2,2	0	-2,2	0,0

Data	ET ₀ [mm]	Precipitazione totale (mm)	P.tot-ET ₀	Precipitazione netta (mm)
21/03/24	2,9	3	0,1	0,1
22/03/24	1,7	0,2	-1,5	0,0
23/03/24	3,2	0	-3,2	0,0
24/03/24	2,1	0	-2,1	0,0
25/03/24	2,4	0	-2,4	0,0
26/03/24	1,0	2	1,0	1,0
27/03/24	1,8	2	0,2	0,2
28/03/24	3,0	0	-3,0	0,0
29/03/24	2,3	0	-2,3	0,0
30/03/24	2,1	0	-2,1	0,0
31/03/24	2,8	0	-2,8	0,0
01/04/24	3,3	1,2	-2,1	0,0
02/04/24	2,9	0	-2,9	0,0
03/04/24	2,5	0	-2,5	0,0
04/04/24	3,0	1,2	-1,8	0,0
05/04/24	3,1	0	-3,1	0,0
06/04/24	2,9	0	-2,9	0,0
07/04/24	2,9	0	-2,9	0,0
08/04/24	3,1	0	-3,1	0,0
09/04/24	3,9	0	-3,9	0,0
10/04/24	2,1	0	-2,1	0,0
11/04/24	1,8	0	-1,8	0,0
12/04/24	2,3	0	-2,3	0,0
13/04/24	2,6	0	-2,6	0,0
14/04/24	4,3	0	-4,3	0,0
15/04/24	3,8	0	-3,8	0,0
16/04/24	4,4	3,8	-0,6	0,0
17/04/24	1,9	0,2	-1,7	0,0
18/04/24	2,1	0,8	-1,3	0,0
19/04/24	2,9	1,2	-1,7	0,0
20/04/24	2,6	3,6	1,0	1,0
21/04/24	2,7	10,6	7,9	7,9
22/04/24	2,4	5,6	3,2	3,2
23/04/24	2,4	3,6	1,2	1,2
24/04/24	2,2	1,4	-0,8	0,0
25/04/24	2,3	0	-2,3	0,0
26/04/24	2,4	0,6	-1,8	0,0
27/04/24	2,9	0	-2,9	0,0
28/04/24	3,3	0	-3,3	0,0
29/04/24	2,8	0	-2,8	0,0
30/04/24	3,3	0	-3,3	0,0

Data	ET ₀ [mm]	Precipitazione totale (mm)	P.tot-ET ₀	Precipitazione netta (mm)
01/05/24	2,0	0,2	-1,8	0,0
02/05/24	3,0	2,6	-0,4	0,0
03/05/24	3,0	0	-3,0	0,0
04/05/24	2,3	0	-2,3	0,0
05/05/24	4,1	0	-4,1	0,0
06/05/24	3,6	0	-3,6	0,0
07/05/24	2,7	4,2	1,5	1,5
08/05/24	2,8	0	-2,8	0,0
09/05/24	2,8	0	-2,8	0,0
10/05/24	2,8	0	-2,8	0,0
11/05/24	3,4	0	-3,4	0,0
12/05/24	3,8	0	-3,8	0,0
13/05/24	3,9	0	-3,9	0,0
14/05/24	3,8	0	-3,8	0,0
15/05/24	2,5	0	-2,5	0,0
16/05/24	2,8	0,6	-2,2	0,0
17/05/24	3,4	0	-3,4	0,0
18/05/24	3,9	0	-3,9	0,0
19/05/24	3,4	0	-3,4	0,0
20/05/24	4,3	2,6	-1,7	0,0
21/05/24	3,6	5,6	2,0	2,0
22/05/24	4,2	0,6	-3,6	0,0
23/05/24	3,7	0	-3,7	0,0
24/05/24	3,8	0	-3,8	0,0
25/05/24	4,1	0	-4,1	0,0
26/05/24	3,5	0	-3,5	0,0
27/05/24	4,0	0	-4,0	0,0
28/05/24	3,5	0	-3,5	0,0
29/05/24	3,6	0	-3,6	0,0
30/05/24	4,4	0	-4,4	0,0
31/05/24	4,5	0	-4,5	0,0
01/06/24	4,1	0	-4,1	0,0
02/06/24	3,7	0	-3,7	0,0
03/06/24	3,5	1,8	-1,7	0,0
04/06/24	4,3	0	-4,3	0,0
05/06/24	3,9	0	-3,9	0,0

Tab. 3.2.1 – Tabella di calcolo precipitazione netta nel periodo

Si ottiene dunque che, nel periodo che va dal 8/03/24 al 5/06/24, le precipitazioni nette totali, date dalla somma delle precipitazioni nette giorno per giorno, sono state pari a 36,3 mm. A

questo punto per risalire ai metri cubi di infiltrazione efficace nel periodo si procederà a moltiplicare questa altezza di precipitazione netta per l'area della superficie ipotizzata e poi nuovamente per i range dei CIP attribuiti a ogni pavimentazione sulla base delle considerazioni fatte nel capitolo 2.4.

	Area (mq)	CIP	mm netti	mc netti
Asfalto	6765	0,04-0,06	36,28	9,82-14,72
Coperture	13421	0,08-0,12	36,28	38,95-58,42
Prato	40725	0,75-0,85	36,28	1108,02-1255,75
Ghiaia	7049	0,75-0,85	36,28	191,78-217,36
Pavimentaz.1	803	0,07-0,11	36,28	2,04-3,20
Pavimentaz.2	2815	0,06-0,10	36,28	6,13-10,21
Pavimentaz.3	563	0,07-0,11	36,28	1,43-2,25
Pavimentaz.4	569	0,07-0,11	36,28	1,44-2,27

Tab. 3.2.2 – Tabella di calcolo metri cubi netti di infiltrazione efficace.

Dalla somma dei metri cubi netti di infiltrazione efficace ottenuti dalla tabella precedente si evince che l'acqua che si è infiltrata nel suolo e nel sottosuolo, durante il periodo di riferimento, ha un volume compreso tra 1359,61 e 1564,19 metri cubi.

3.3 Determinazione finale superficie del bacino di alimentazione

Sulla base dei precedenti risultati si osserva che 1533,88 m³, cioè il volume erogato dalla sorgente durante il periodo, è compreso nell'intervallo in cui si trova il volume d'infiltrazione efficace calcolato nel paragrafo precedente, ovvero tra circa 1360 e 1560 metri cubi. Questo confronto finale conferma che c'è congruenza tra i due volumi e che, perciò, l'area del bacino di alimentazione dell'acquifero urbano ipotizzata è effettivamente corretta. La superficie di quest'ultima, visibile in figura 3.3.1 e calcolata tramite il software QGIS, è pari a circa 7,2 ettari.



Fig. 3.3.1 – Area finale del bacino di alimentazione della sorgente urbana.

CONCLUSIONI

Lo studio svolto per la determinazione del bacino di alimentazione dell'acquifero urbano, specificatamente basato sui dati raccolti dalla fonte del Filello nei pressi del porto di Ancona, ha permesso di acquisire una più approfondita comprensione delle dinamiche idrogeologiche che caratterizzano la città, e più in particolare, le aree urbane che la costituiscono. La ricerca ha avuto modo di dimostrare la cruciale importanza di integrare metodi multidisciplinari allo scopo di caratterizzare le risorse idriche sotterranee, considerando l'influenza delle attività antropiche e delle continue modifiche territoriali, tipiche delle zone urbanizzate. Le analisi dettagliate dei dati geologici, idrogeologici e climatici che sono state sviluppate, unitamente all'utilizzo di software GIS per la mappatura della zona in questione e di modelli matematici, ha consentito di identificare l'area di ricarica dell'acquifero e quantificare i volumi di infiltrazione efficace. La congruenza tra il volume delle acque erogate dalla sorgente durante il periodo di studio, determinato mediante le misure in situ effettuate, e il volume delle infiltrazioni, calcolato sulla base dei sensori forniti dalla Regione Marche, ha confermato l'accuratezza delle ipotesi iniziali. Le misure di portata effettuate sulla fonte del Filello hanno mostrato come la sorgente permetta lo sfruttamento delle risorse idriche efficacemente, nel lungo periodo. Da quello che si è potuto osservare, grazie alla rete idrica a cui è collegata, la sorgente urbana permette un corretto convogliamento dell'acqua all'interno della rete fognaria e ha la capacità di evitare criticità dovute a fenomeni di sovraccarico. Infatti, durante il periodo in cui sono state effettuate le misurazioni, non si sono evidenziati particolari fenomeni di perdite idriche che vadano ad intaccare l'equilibrio urbano nella zona. Le uniche perdite idriche degne di nota sono quelle che della sorgente sfociano su via Papa Giovanni XXIII, come visibile in figura 2.3.11. Tuttavia, grazie alla

pendenza della strada, queste vengono facilmente convogliate attraverso un chiusino a pochi metri distante che ne permette lo smaltimento. I risultati che si sono ottenuti dalle misurazioni registrate, in combinazione con i dati messi a disposizione dalla Regione, dimostrano come l'area che è stata ricavata, del suddetto bacino di alimentazione, stimata tramite il QGIS, copra 7,2 ettari e sia fortemente influenzata da fattori quali la permeabilità dei diversi tipi di pavimentazione urbana e dei diversi terreni, la presenza di costruzioni quali infrastrutture, edifici o comunque coperture impermeabili e la frequenza delle acque piovane. Le ipotesi fatte su questi parametri e la precisione dei dati di infiltrazione sono dipesi dalla qualità delle rilevazioni pluviometriche e dalla rappresentatività dei coefficienti di infiltrazione potenziale (CIP). La stima dei CIP ha avuto un'importanza cruciale ai fini di questo elaborato per diverse ragioni. Infatti, in contesti urbani come quello anconetano, dove l'urbanizzazione intensa modifica significativamente le caratteristiche naturali del suolo, le ipotesi fatte sugli intervalli in cui si definiscono i coefficienti di infiltrazione potenziale aiutano, oltre a definire i volumi d'acqua che si infiltrano efficacemente all'interno del terreno, a comprendere e gestire efficacemente il ciclo idrologico, con l'obiettivo di una gestione delle risorse idriche più proficua. Dalla trattazione di questi coefficienti si è evidenziato come, in ambito urbano, la presenza di coperture impermeabili riduca drasticamente l'infiltrazione efficace nel suolo e nel sottosuolo, favorendo il ruscellamento e la conseguente gestione difficile delle acque piovane. Le aree urbane sono particolarmente vulnerabili a fenomeni di inondazione, la corretta stima di questi coefficienti aiuta a mappare le zone a rischio più alto e progettare sistemi di drenaggio e infrastrutture verdi. La tesi in questione, pertanto, offre un approccio multidisciplinare che può essere replicato in altre aree urbane con l'obiettivo di migliorare la gestione delle risorse idriche e arginare gli effetti negativi dell'urbanizzazione.

In conclusione, lo studio e la determinazione del bacino di alimentazione dell'acquifero urbano rappresenta un tassello fondamentale nella comprensione e nella gestione delle risorse idriche sotterranee. L'integrazione di ulteriori studi scientifici approfonditi con politiche di gestione più partecipative, in combinazione con il costante adattamento alle variazioni ambientali e climatiche, rappresentano le chiavi per un futuro sostenibile delle acque urbane. Proseguire in questa direzione permette non solo di proteggere gli acquiferi urbani, ma anche di migliorare la qualità della vita delle popolazioni che dipendono da queste risorse. La speranza è che questo elaborato possa servire da modello per studi futuri e contribuisca a una maggiore consapevolezza sull'importanza della gestione delle risorse idriche in contesti urbani complessi.

Bibliografia

1. “Green Infrastructure in Urban Areas” - European Environment Agency (EEA)
2. “Urban Hydrology for Small Watersheds” - USDA Natural Resources Conservation Service (NRCS)
3. Antonini, G., Mainiero, M., Recanatini, A., & Marchigiano, G. S. (2007). *Il cunicolo della Fonte del Filello sotto il colle Guasco di Ancona. BAR INTERNATIONAL SERIES, 1611(2), 639*
4. ARMIRAGLIO, STEFANO, et al. Calcolo informatizzato del bilancio idrico del suolo. *Natura Bresciana Annali Museo Civico di Scienze Naturali di Brescia*, 2003, 33: 209-216.
5. Bard, A. J., & Faulkner, L. R. (2001). *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*. Wiley.
6. Bates, B., Kundzewicz, Z., & Wu, S. (2008). *Climate change and water*. Intergovernmental Panel on Climate Change Secretariat.
7. Bettini, V. & Giacomelli, A. (2010). *Le risorse idriche: Problemi e prospettive*. Edizioni Ambiente.
8. BOSELLINI, Alfonso, et al. *Storia Geologica d'Italia: gli ultimi 200 milioni di anni*. Zanichelli, 2005.
9. BRACA, Giovanni; MARIANI, Stefano; TROPEANO, Robertino. INTERNAL FLOW.
10. CENTAMORE, E., et al. *Il trias-paleogene delle marche. Studi Geologici Camerti, Volume Speciale “La Geologia delle Marche”*; Università di Camerino: Camerino, Italy, 1986, 9-27.

11. CENTAMORE, EMGAU, et al. (1971). *Contributo alla conoscenza del Giurassico dell'Appennino umbro-marchigiano. Studi Geologici Camerti*, 1: 7-89.
12. Chahine, M. T. (1992). The hydrological cycle and its influence on climate. *Nature*, 373-380
13. Desideri Claudio (2021). *La Fonte del Filello e la crescita della città*. Il Resto del Carlino.
14. Elisa Scocchera e Andrea Minutolo (2021). *Acque Sotterranee - il necessario è invisibile agli occhi*, Ufficio Scientifico Legambiente, pag. 9 e pag. 13
15. Forlani Aldo, Recanatini Alberto. *La città sotto*, 1997, p. 82
16. Hargreaves G.H. & Samani Z.A., 1982. Estimating potential evapotranspiration. Tech. Note, J.Irrig. and Drain.
17. Hounslow, A. W. (1995). *Water Quality Data: Analysis and Interpretation*. CRC Press.
18. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA),.
19. M. Panzini, *Dizionario del Vernacolo Anconitano*, 1996
20. Pascolini-Campbell, M., Reager, J. T., Chandanpurkar, H. A., & Rodell, M. (2021). RETRACTED ARTICLE: A 10 per cent increase in global land evapotranspiration from 2003 to 2019. *Nature*, 593(7860), 543-547.
21. Pirani Vincenzo. *Ancona dentro le mura*. Gilberto Bagaloni Editore, 1979. p. 83
22. PIRANI, Vincenzo. *Ancona dentro le mura*. Gilberto Bagaloni Editore, 1979.
23. Prades, L., & Amparore, A. (2012); GIS e Telerilevamento per l'assistenza umanitaria. Applicazioni nel Programma Alimentare Mondiale.

24. Ragab, R., & Prudhomme, C. (2002). *Climate change and water resources management in arid and semi-arid regions: Prospective and challenges for the 21st century*. Biosystems Engineering, 81(1), 3-34.
25. Sawyer, C. N., McCarty, P. L., & Parkin, G. F. (2003). *Chemistry for Environmental Engineering and Science*. McGraw-Hill.
26. Taylor, R., Aureli, A., Allen, D., Banks, D., Villholth, K. G., & Stigter, T. (2022). *Acque sotterranee, acquiferi e cambiamenti climatici*.
27. UN Water (2022): *Groundwater making the invisible visible*. Paris: UNESCO (The United Nations world water development report)
28. Giovanni Formentin, (2013). *Modalità di stima della ricarica della falda in seguito all'infiltrazione delle acque di pioggia*, pag. 2
29. Giovanni Formentin, (2013). *Modalità di stima della ricarica della falda in seguito all'infiltrazione delle acque di pioggia*, pag. 7
30. Napoleoni, Q., Garbin, F., Scarapazzi M., & Tramonti, L. (2017). *Prove di permeabilità sui giunti di palancole*.
31. Elaborazione ISPRA su dati reporting WISE, monitoraggio 2015-2021 (aggiornamento ottobre 2022)
32. Turco, M., Palazzi, E., Von Hardenberg, J., & Provenzale, (2023). *I problemi dell'approvvigionamento idrico italiano*.
33. ISPRA (2017). *Stato attuale delle risorse idriche in Italia*. Rapporto annuale.
34. AMBI (2023). *Rapporto nazionale sulle risorse idriche*. Relazione annuale.
35. Rolle E. & Trezzini F. (2023). *Gestione delle risorse idriche: criticità e scenari*.
36. Conferenza delle Regioni e delle Province autonome (2019). *Rapporto annuale sulla gestione del Servizio Idrico Integrato*.

37. Parlamento Italiano. *Legge 5 gennaio 1994, n.36 – Disposizioni in materia di risorse idriche (Legge galli).*
38. Leonetti, E. (2010). *La disciplina del servizio idrico integrato: un quadro di sintesi.* *Analisi Giuridica dell'Economia*, 9(1), 89-98
39. Nivarra, L. (2015). Il servizio idrico integrato: evoluzione e prospettive. *RIVISTA DI DIRITTO DELL'ECONOMIA, DEI TRASPORTI E DELL'AMBIENTE*, 13, 171-184.
40. Monitor-Idrico Marche, 2020
41. ISTAT, *Le statistiche dell'ISTAT sull'acqua.* Report anni 2020-2023
42. Corfone, C. (2012). *La città idropoietica.* *Eco Web Town, Magazine of Sustainable Design*, (3).
43. Cotecchia, V. (1990). Strategie progettuali e gestionali delle risorse idriche. *Ce. SET: atti degli incontri. XX-La valutazione delle risorse idriche: come governare la scarsità (2.3. 1990)*, 1990, 1000-1045.
44. Viaroli et al, *Journal of Hydrology* 556 (2018). 72-86

Sitografia

1. https://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/note_illustrative/282_Ancona.pdf
2. https://staticmy.zanichelli.it/catalogo/assets/9788808402035_04_CAP.pdf
3. <https://www.egeolab.it/sonde-multiparametriche-aquaread/gps-aquameter>
4. <https://www.regione.marche.it/Regione-Utile/Protezione-Civile/Console-Servizi-Protezione-Civile/SIRMIP-online>
5. <https://www.cae.it/ita/prodotti/pluviometri/pg10-e-pg10r-pluviometro-pd-9.html>
6. <https://www.sportellotelematicopolifunzionale.it/?q=sit-e-gis>
7. <https://www.geocorsi.it/N565/il-software-qgis-open-source-geoprocessi-geodatabase-e-webgis.html>
8. <https://www.regione.marche.it/Regione-Utile/Paesaggio-Territorio-Urbanistica/Cartografia/Repertorio/Ortofotocarteregionali10000>
9. <https://www.regione.marche.it/Regione-Utile/Paesaggio-Territorio-Urbanistica/Cartografia/Repertorio/Cartageologicaregionale10000>
10. <https://www.whymarche.com/fonti-fontane-e-lavatoi/>
11. <https://www.istat.it/it/files/2022/03/REPORTACQUA2022.pdf>
12. <https://www.alxyon.com/it/biblioteca/acqua/la-conduttività-elettrica-dell-acqua.html>
13. <https://www.lamiacqua.it/conducibilita-acqua>
14. <https://www.auroradagostino.it/il-ph-dellacqua-per-saperne-di-piu/#:~:text=L'acqua%20pura%20è%20neutra,la%20mancanza%20di%20ioni%20OH%2B>
15. <https://www.inabottle.it/it/benessere/ph-acqua-cos-e-quali-sono-livelli-ottimali>
16. https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change_it

17. <https://www.climate.gov>
18. <https://www.regione.piemonte.it/web/temi/ambiente-territorio/ambiente/acqua/aree-ricarica-degli-acquiferi-profondi>
19. <https://www.cafcspa.com/educational/acqua/falde-acquifere/falde-acquifere.html>
20. https://docs.dicatechpoliba.it/filemanager/303/RISORSE%20IDRICHE%202012-2013/3.Bilancio_idrologico-Indici%20vegetazione.pdf
21. <https://fc79.gw-project.org/italiano/capitolo-9/#9.1>
22. <https://www.arpa.marche.it/acque-sotterranee-nuovo>
23. <https://www.mase.gov.it/pagina/la-direttiva-sulla-protezione-delle-acque-sotterranee-dall'inquinamento-e-dal-depauperamento>
24. https://www.depuratoriacqualife.it/acqua-da-bere/approvvigionamento-idrico-quando-puo-essere-un-problema/#Che_cosa_si_intende_per_approvvigionamento_idrico
25. <https://www.olbia.it/olbia-e-gallura-ecco-le-tubature-arrugginite-che-portavano-lacqua>
26. https://www.ilmessaggero.it/italia/siccita_emergenza_cosa_sta_succedendo_acqua_razionata_news_oggi-6771623.html
27. <https://www.nationalgeographic.it/ambiente/2020/02/il-problema-idrico-italiano-e-tempo-di-tagliare-gli-sprechi>
28. <https://www.italiadomani.gov.it/content/sogei-ng/it/it/home.html>
29. <https://rivistanatura.com/acqua-e-citta-un-modello-per-gestire-le-risorse-idriche/>
30. <https://blog.geografia.deascuola.it/articoli/citta-e-acqua>
31. https://www.fotoantologia.it/foto-14605/Ascoli_Piceno_Piazza_Arringo_fontana.html

32. <https://formedacqua.com>

33. [Salute.gov.it](https://salute.gov.it)