



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in INGEGNERIA CIVILE AMBIENTALE

Valutazione delle risorse idriche rinnovabili e cenni sul

rischio idrogeologico nel bacino del Betelico (AN)

**Assessment of renewable water resources and notes on hydrogeological risk in the
Betelico catchment (AN)**

Relatore: Chiar.mo

Prof. Alberto Tazioli

Tesi di Laurea di:

Giulia Gurini

Correlatore:

Dott. Davide Fronzi

A.A. 2023 / 2024

SOMMARIO

INTRODUZIONE	4
1.1 Acqua e disastri naturali: dalla siccità alle inondazioni	4
1.2 L'impatto della siccità sulle risorse idriche	7
1.3 L'impatto delle alluvioni	11
1.2 Le sfide future: verso una gestione sostenibile delle risorse idriche	14
1.3 Soluzioni e buone pratiche in Europa	16
1.4 Decreti legislativi in Italia per la gestione della siccità e delle alluvioni	18
1.5 Scopo della tesi	20
1.6 Sintesi dei metodi e dei risultati	22
INQUADRAMENTO AREA STUDIO	24
2.1 Inquadramento geografico	24
2.2 Inquadramento geologico della Regione Marche	27
2.3 Inquadramento geomorfologico	31
2.4 Inquadramento idrogeologico	34
2.5 Inquadramento climatico	37
MATERIALI E METODI	40
3.1 Campo prova	40
3.1.1 Il piezometro	42
3.1.2 Freatimetro	47
3.1.3 Lisimetro a suzione	48
3.1.4 Tensiometro	50
3.1.5 Data logger ZL6	54
3.1.6 Stazione pluviometrica	57
3.1.7 Software	62
RISULTATI	68
4.1 Dinamiche idrologiche nelle Città delle Marche	68
CONCLUSIONI	102
BIBLIOGRAFIA	105
SITOGRAFIA	107

INTRODUZIONE

1.1 Acqua e disastri naturali: dalla siccità alle inondazioni

L'acqua è un elemento essenziale per la vita sulla Terra, supportando la biodiversità, l'agricoltura, l'industria e la vita umana. Tuttavia, questa stessa risorsa può diventare estremamente distruttiva, trasformandosi in un agente di catastrofe attraverso eventi naturali come le alluvioni e la siccità. In questo contesto, il concetto di "scarsità" diventa sempre più rilevante, specialmente alla luce del cambiamento climatico che sta alterando significativamente il ciclo idrologico globale. L'atmosfera, con temperature sempre più elevate, è in grado di trattenere una quantità maggiore di umidità, il che si traduce in fenomeni meteorologici più estremi, da un lato, ciò si manifesta in precipitazioni più intense e frequenti che possono causare gravi alluvioni; dall'altro, si osserva un aumento dell'evaporazione, che contribuisce all'aridità del suolo e intensifica le condizioni di siccità. Inoltre, la riduzione dei ghiacciai e delle calotte polari, come indicato dalle ricerche della NASA, aggiunge un ulteriore livello di preoccupazione, con una perdita annua di 300 miliardi di tonnellate di ghiaccio al Polo Nord e 130 al Polo Sud¹.

Tradizionalmente, la gestione dell'approvvigionamento idrico si è basata su un approccio di "comando e controllo", volto ad ottimizzarne il suo uso riducendone la variabilità naturale. Tuttavia, questo metodo si è rilevato inadeguato di fronte alle complessità e interconnessioni dei sistemi idrici naturali. Un aspetto spesso trascurato è l'evapotraspirazione, attraverso cui gran parte della pioggia ritorna nell'atmosfera sotto forma di vapore, un processo fondamentale per il bilancio globale. È quindi necessario un approccio più integrato e olistico, che includa il miglioramento dei sistemi di accumulo, lo

¹ (www.ambientemareitalia.org)

sviluppo di pratiche agricole più sostenibili, la protezione degli ecosistemi naturali e l'adozione di politiche che promuovano la sostenibilità delle risorse.

Secondo il Rapporto di Valutazione dell'IPCC del 2014 e il rapporto dell'Agenzia Europea dell'Ambiente del 2012, l'Europa, in particolare la regione Mediterranea, è una delle aree più vulnerabili ai cambiamenti climatici. Si prevede un aumento delle temperature medie e massime, soprattutto nei mesi estivi, un incremento della frequenza di eventi climatici estremi (come ondate di calore, siccità e precipitazioni intense) e una riduzione delle precipitazioni annuali e dei flussi fluviali. Questi cambiamenti porteranno a significative alterazioni del regime idrogeologico, aumentando il rischio di frane, colate di fango, crolli di roccia e alluvioni improvvise. Le zone maggiormente a rischio includono la valle del Po e le aree alpine e appenniniche. Inoltre, l'espansione urbana nelle aree perifluviali ha ridotto la capacità del suolo di assorbire l'acqua, aumentando la vulnerabilità a eventi alluvionali. Gli incendi boschivi frequenti, che riducono la capacità del suolo di trattenere acqua, aggravano il problema, favorendo l'erosione e i fenomeni di dissesto idrogeologico.



Fig. 1.1 L'Italia è gravemente esposta al dissesto idrogeologico e manca di un approccio coordinato e sistemico per affrontare il problema. Le misure adottate risultano spesso inefficaci a causa di procedure inadeguate e carenza di dati frammentati tra Stato e Regioni (www.vialibera.it).

In conclusione, l'immagine dell'Italia del dissesto evidenzia chiaramente come il rischio idrogeologico rappresenti una delle maggiori sfide per il nostro paese, aggravato dal cambiamento climatico che sta intensificando la frequenza e la gravità degli eventi estremi. le frane, le alluvioni e la siccità, sebbene sembrino fenomeni distinti, sono legati da un comune denominatore: la gestione inefficace e insostenibile delle risorse idriche, che non tiene conto delle complessità ecologiche e dei nuovi scenari climatici.

La mappa mostra come vaste aree del nostro territorio siano già altamente vulnerabili. Le politiche future dovranno concentrarsi non solo sulla mitigazione degli impatti diretti, come la costruzione di infrastrutture di difesa, ma anche sulla prevenzione attraverso la

protezione degli ecosistemi naturali, la promozione di un'agricoltura sostenibile e riduzione dell'impermeabilizzazione del suolo.

1.2 L'impatto della siccità sulle risorse idriche

La siccità è un fenomeno che sta assumendo una dimensione sempre più preoccupante, soprattutto nelle regioni meridionali d'Italia, come Calabria, Sicilia e Puglia. Negli ultimi anni, queste aree hanno sperimentato una combinazione devastante di ondate di calore estreme e precipitazioni significativamente inferiori alla media, fenomeni che hanno portato a una progressiva riduzione delle riserve idriche e a un impatto drammatico sull'agricoltura, sugli ecosistemi e sulla società nel suo complesso.

Secondo recenti studi, la situazione è resa particolarmente grave dal fatto che la siccità non è più un evento episodico, ma sta si sta trasformando in una condizione permanente. In Sicilia, per esempio, le riserve idriche sono scese a livelli critici, con una riduzione del 45% rispetto al 2023; questo calo drastico ha avuto degli impatti su vari settori, come agricoltura con una perdita del 25% sulla produzione. Questo ha colpito coltivazioni essenziali come agrumi, grano e vigne, con danni economici stimati in oltre 2,7 miliardi di euro.

L'impatto della mancanza di acqua si estende anche alla qualità delle risorse idriche. I livelli ridotti nei fiumi e nelle falde acquifere hanno aumentato la concentrazione di patogeni nelle acque fluviali, complicando la gestione delle riserve e la tutela della salute pubblica. Inoltre, l'alterazione degli ecosistemi fluviali ha favorito la proliferazione di organismi opportunistici come alghe e batteri, che prosperano in acque stagnanti e riscaldate, danneggiando l'ambiente. Questa situazione, che ormai non è più confinata a

singole stagioni ma si sta estendendo nel tempo, richiede un intervento coordinato sia a livello nazionale che europeo.

Le cause delle crisi idriche in Italia sono complesse e vanno oltre il semplice cambiamento climatico. I fattori antropici, come le perdite nelle reti idriche, il degrado delle infrastrutture e la mancanza di interconnessioni tra bacini idrografici, giocano un ruolo cruciale nell'aggravare la scarsità d'acqua. Ad esempio, le perdite nei sistemi idrici italiani sono state tra le più alte d'Europa con circa il 40% dell'acqua che viene disperso prima di raggiungere i consumatori. Questo problema strutturale evidenzia la necessità di investimenti per migliorare l'efficienza delle infrastrutture esistenti e garantire una gestione sostenibile delle risorse idriche².

Il monitoraggio delle riserve serve a prevenire e mitigare le crisi. L'indice SPI (Standardized Precipitation Index) è uno degli strumenti più utilizzati per quantificare il deficit di precipitazione su diverse scale temporali, fornendo indicazioni cruciali sulla gravità della siccità. Inoltre, l'analisi delle temperature mostra come l'incremento termico porti a una maggiore evapotraspirazione, riducendo le risorse disponibili. Anche il monitoraggio delle acque superficiali e sotterranee è importante: il controllo dei livelli delle falde e dei deflussi dei fiumi, nonché l'equivalente idrico della neve nelle aree alpine, sono elementi chiave per prevedere le crisi e adottare misure preventive.

Le strategie di mitigazione delle emergenze idriche possono essere classificate in misure a breve e lungo termine. A lungo termine, si possono adottare tecniche per ridurre la domanda di acqua, come l'adozione di colture meno esigenti, incentivi per il risparmio acquifero e il riciclo dell'acqua nelle industrie. Nel breve termine, misure come le

² (Baldwin & Casalini, 2021)

restrizioni all'uso dell'acqua per scopi non essenziali, la riduzione delle perdite nelle reti idriche e l'adozione di nuove regole gestionali possono aiutare a mitigare gli effetti immediati della siccità³.

Il presidente di Coldiretti Sardegna, Battista Cualbu, ha sottolineato la necessità di dichiarare lo stato di calamità naturale nelle aree più colpite, poiché l'aridità sta avendo ripercussioni devastanti sul settore agropastorale isolano. Nell'isola, il Consorzio di Bonifica della Sardegna Centrale ha già dovuto vietare l'utilizzo dell'acqua per l'irrigazione in diversi comprensori, segnalando una situazione critica che si protrae da mesi. A peggiorare il quadro, l'Autorità di Bacino Regionale ha rilevato un deficit di circa 380 milioni di metri cubi d'acqua negli invasi rispetto alla media storica. Questa carenza di risorse idriche è preoccupante, specialmente in inverni, quando dovremmo invece vedere un recupero delle riserve in vista delle stagioni più calde. Ma non è solo il Sud a essere in difficoltà, anche il Nord sta vivendo una siccità significativa, in regioni come il Piemonte e il Veneto, le precipitazioni sono state inferiori alla norma per diversi anni consecutivi. Questa situazione ha portato a un deficit idrico preoccupante, con riserve superficiali inferiori del 25% rispetto alla norma. Uno dei fattori determinanti di questa crisi è la diminuzione dello Snow Water Equivalent, l'acqua contenuta nella neve, che è in calo, soprattutto negli Appennini, dove si registra una mancanza quasi del 90%.

Questo scenario non è solo una sfida temporanea. Secondo gli esperti, il calo dell'innnevamento sulle Alpi italiane, causato da temperature sempre più elevate, sta trasformando quelle che una volta erano abbondanti nevicate in piogge. Questo

³ (Masia et al., 2018)

cambiamento altera il bilancio idrico, riducendo la resilienza dei nostri acquiferi e limitando l'approvvigionamento idrico nei mesi più critici, la primavera e l'estate.

Guardando al futuro, le previsioni a medio e lungo termine non sono incoraggianti. Si prevede che le temperature rimarranno al di sopra della media, mentre le precipitazioni potrebbero essere insufficienti per compensare il deficit accumulato⁴.

Per far fronte alla crescente crisi idrica in Italia, è emersa l'urgenza di attuare strategie più articolate, superando le semplici misure emergenziali. In questo contesto, il governo italiano ha emanato il Decreto Siccità, un provvedimento che istituisce una Cabina di regia presso la Presidenza del Consiglio dei ministri. Il Decreto Siccità è stato concepito con l'obiettivo di potenziare la resilienza delle infrastrutture idriche italiane, riducendo le significative perdite d'acqua che affliggono il sistema idrico nazionale. In regioni come il Veneto, si stanno sviluppando proposte innovative, come la trasformazione delle cave in bacini di raccolta per ottimizzare la gestione dell'acqua e limitare le dispersioni, che in alcune aree raggiungono livelli critici.

Oltre agli interventi delle infrastrutture, il decreto sottolinea l'importanza di una programmazione a lungo termine, considerata indispensabile per affrontare la questione in maniera sostenibile. Come evidenziato dal Ministro per la Protezione Civile, Nello Musumeci, la gestione efficace dell'acqua non può basarsi solo su risposte reattive, ma richiede una pianificazione strategica ed anticipata. Il piano decennale prevede circa 500 interventi mirati alla modernizzazione delle infrastrutture esistenti, alla costruzione di nuovi invasi e al miglioramento della gestione complessiva delle risorse idriche nel Paese⁵.

⁴ (www.renewablematter.eu)

⁵ (www.rinnovabili.it)

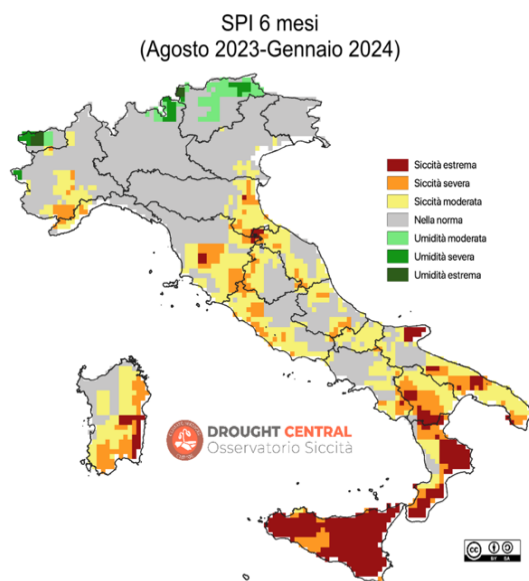


Fig. 1.1.1 1 La mappa dell'Italia che rappresenta l'Indice di Precipitazione Standardizzato (SPI) per il periodo di agosto 2023 – gennaio 2024 rivela una situazione allarmante di siccità, soprattutto in regioni come Calabria e Sicilia (www.renewablematter.eu).

1.3 L'impatto delle alluvioni

Le alluvioni sono eventi naturali devastanti che possono avere conseguenze enormi, non solo in termini di perdita di vite umane ma anche di danni economici e sociali. Ogni anno causano danni significativi in tutto il mondo, con un impatto stimato dall'Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico (OCSE) di circa 40 miliardi di dollari. In Italia, le alluvioni sono un problema crescente, aggravato dal cambiamento climatico e dall'urbanizzazione incontrollata.

Le alluvioni sono spesso accentuate da azioni umane, come l'espansione degli insediamenti urbani in aree a rischio e la riduzione della capacità del suolo di trattenere l'acqua a causa della cementificazione della deforestazione. Questi fattori, combinati con

un aumento delle precipitazioni intense, creano le condizioni ideali per eventi alluvionali catastrofici. Le conseguenze possono essere suddivise in danni diretti e indiretti. I danni diretti includono la distruzione fisica di proprietà, infrastrutture e terreni agricoli, mentre i danni indiretti comprendono le interruzioni ai trasporti, al commercio e ai servizi pubblici, oltre ai costi di emergenza. Entrambe queste categorie possono essere ulteriormente classificate in tangibili (misurabili in termini monetari) e intangibili, come la perdita di vite umane e i danni alla salute⁶.

La gestione del rischio idrogeologico in Italia richiede un approccio integrato che tenga conto delle tre componenti principali del rischio: la pericolosità, la vulnerabilità e l'esposizione.

La pericolosità rappresenta la probabilità che si verifichi un evento idrogeologico come una frana o un'alluvione in una specifica area. La vulnerabilità si riferisce al grado di danno che l'evento potrebbe causare, influenzato dalla resilienza delle strutture presenti. L'esposizione riguarda il valore e l'importanza degli elementi a rischio, come edifici e persone, che sono presenti in quell'area. Per ridurre il rischio di alluvioni, è necessario adottare misure strutturali come la costruzione di dighe e argini, ma anche soluzioni basate sulla natura, come il ripristino delle piane alluvionali e promozione di pratiche agricole sostenibili che riducano l'impatto dei deflussi superficiali⁷.

Negli ultimi anni, l'Italia ha affrontato diverse alluvioni devastanti che hanno messo in evidenza le vulnerabilità del territorio e le carenze nelle infrastrutture di prevenzione. Tra gli eventi più significativi, l'alluvione di Senigallia nel 2014 e quella dell'Emilia-Romagna nel 2023 hanno avuto un impatto drammatico.

⁶ (Peres et al., 2020)

⁷ (Dada et al., 2021)

L'alluvione di Senigallia, avvenuta il 3 maggio 2014, è stata uno degli episodi più gravi nelle Marche. Piogge torrenziali provocarono l'esondazione del fiume Misa, sommergendo strade, abitazioni e attività commerciali. Questo evento causò la morte di persone e danni stimati in oltre 180 milioni di euro. Le cause principali furono le intense precipitazioni e l'inadeguatezza delle infrastrutture di drenaggio. Nonostante la città fosse nota per essere a rischio idrogeologico, le opere di prevenzione risultarono inefficienti. Le arginature del fiume non riuscirono a contenere il flusso d'acqua, aggravato dalla mancata manutenzione e dall'espansione urbana non pianificata lungo le rive del fiume, che ridussero lo spazio per il naturale deflusso delle acque. Otto anni dopo, nel settembre 2022, Senigallia fu nuovamente colpita da un'alluvione devastante. Nonostante gli avvertimenti e l'esperienza accumulata, i miglioramenti infrastrutturali effettuati nel frattempo non furono sufficienti a prevenire il ripetersi del disastro.

L'alluvione dell'Emilia-Romagna nel maggio 2023 è stato un altro episodio devastante. In meno di 48 ore, la regione fu colpita da piogge torrenziali che provocarono l'esondazione di oltre 20 fiumi. Questo evento causò la morte di persone, lasciò migliaia di sfollati e provocò danni economici enormi, con interi paesi e città sommersi dall'acqua. Le cause sono sempre collegate all'inadeguatezza delle infrastrutture di drenaggio e protezione. La mancanza di manutenzione delle opere idrauliche, la cementificazione del territorio e l'espansione urbana senza un'adeguata pianificazione aumentarono il rischio e l'impatto dell'evento.



Fig. 1.1.2 1 L'immagine mostra una mappa dell'Italia che rappresenta la distribuzione della popolazione a rischio alluvione, secondo una scala cromatica che va dal verde al rosso scuro. Dall'analisi fornita dall'ISPRA, le aree più colpite sono le regioni del nord. La Pianura Padana è la più vulnerabile, con elevati livelli di popolazione esposta, specialmente lungo il bacino del fiume Po. Le provincie di Milano, Torino, Modena e Bologna mostrano aree in rosso e arancione, indicando che oltre 20.000 persone in alcune zone sono a rischio. Anche la regione Veneto è critica, in particolare nella provincia di Venezia, dove le condizioni di terreno basso e le infrastrutture esistenti aumentano le inondazioni (www.isprambiente.gov.it).

1.2 Le sfide future: verso una gestione sostenibile delle risorse idriche

L'Italia si trova ad affrontare una serie di sfide crescenti nella gestione delle risorse idriche, aggravate dal cambiamento climatico. L'intensificazione degli eventi estremi, come siccità e alluvioni, richiede un approccio olistico e integrato che possa garantire la sostenibilità delle risorse e la protezione delle comunità vulnerabili. Di seguito sono illustrate le principali sfide e le soluzioni adottate in Europa, nonché i decreti legislativi italiani mirati a fronteggiare questi problemi.

1. *Cambiamento climatico e variabilità idrologica*: il cambiamento climatico sta alterando profondamente il ciclo idrologico, con un aumento della frequenza e dell'intensità degli eventi estremi. L'Italia deve far fronte a un aumento delle temperature, che porta a una maggiore evapotraspirazione e a una riduzione delle risorse idriche disponibili. Allo stesso tempo, le precipitazioni diventano sempre più irregolari, con periodi prolungati di siccità interrotti da eventi di pioggia intensa che causano alluvioni. Questa variabilità rende difficile la pianificazione a lungo termine e richiede un approccio flessibile e adattivo.
2. *Degrado delle infrastrutture idriche*: le infrastrutture idriche italiane, molte delle quali sono state costruite decenni fa stanno invecchiando e mostrano segni di degrado. Perdite d'acqua significative si verificano lungo le reti idriche, con circa il 40% dell'acqua potabile che si perde prima di raggiungere i consumatori. Questo non solo spreca una risorsa preziosa, ma aumenta anche i costi per la gestione dell'acqua e per la manutenzione delle infrastrutture. È quindi necessario un investimento per modernizzare le reti e garantire un utilizzo più efficiente delle risorse idriche.
3. *Gestione integrata delle risorse idriche*: la frammentazione della gestione delle risorse tra diverse autorità locali e nazionali crea inefficienze e difficoltà nel coordinamento delle politiche idriche. In Italia, esistono diverse autorità responsabili della gestione dell'acqua, che spesso operano con scarsa coordinazione. Questo rende difficile l'implementazione di politiche integrate che considerino le esigenze di tutte le parti interessate, dagli agricoltori alle comunità urbane, fino agli ecosistemi naturali.

4. *Urbanizzazione e uso del territorio*: l'espansione urbana incontrollata e i cambiamenti nell'uso del suolo hanno ridotto la capacità del territorio di assorbire l'acqua, aumentando il rischio di alluvioni. La cementificazione delle superfici, la riduzione delle aree verdi e la costruzione nelle aree periferiche hanno diminuito la permeabilità del suolo, aggravando i problemi di deflusso e di gestione delle acque piovane. Inoltre, l'espansione agricola intensiva, spesso non regolamentata, ha portato a un maggiore sfruttamento delle risorse idriche, accentuando i problemi di scarsità.

1.3 Soluzioni e buone pratiche in Europa

Per affrontare queste sfide, diversi paesi europei hanno sviluppato soluzioni innovative che possono servire da modello per l'Italia.

Germania: infrastrutture verdi e pianificazione urbana sostenibile

La Germania ha investito in infrastrutture verdi, come tetti, pareti e aree di ritenzione delle acque piovane, che aiutano a gestire le acque pluviali e riducono il rischio di alluvioni urbane. Queste soluzioni non solo migliorano la gestione dell'acqua, ma contribuiscono anche alla riduzione dell'inquinamento atmosferico e all'aumento della biodiversità urbana. Inoltre, la pianificazione urbana sostenibile in Germania incoraggia la conservazione delle aree naturali e la limitazione della cementificazione, migliorando la resilienza delle città agli eventi estremi⁸.

⁸ (Dada et al., 2021)

Paesi Bassi: l'eccellenza nella gestione delle inondazioni

I Paesi Bassi sono un esempio di eccellenza nella gestione delle inondazioni, grazie ad un approccio integrato che combina infrastrutture ingegneristiche con soluzioni naturali. Il programma “Room for the River” è un modello esemplare di come la rinaturalizzazione delle aree fluviali possa aumentare la capacità di espansione dei fiumi durante i periodi di piena, riducendo al contempo il rischio di alluvioni e migliorando la qualità degli ecosistemi fluviali. Questo programma prevede interventi come l'espansione delle pianure alluvionali, la rimozione di ostacoli artificiali e la creazione di canali secondari per migliorare la gestione delle acque durante i periodi di piena. Questo approccio, che privilegia l'adattamento e la resilienza rispetto alla semplice costruzione di barriere fisiche, potrebbe essere adottato con successo anche in Italia per migliorare la gestione del rischio idrogeologico⁹.

Spagna: gestione della scarsità d'acqua

La Spagna ha affrontato la scarsità d'acqua attraverso un mix di infrastrutture per il trasferimento idrico tra regioni e tecnologie avanzate per l'irrigazione. Il Trasvase Tajo-Segura, uno dei progetti di trasferimento idrico più importanti in Europa, è stato progettato per convogliare acqua dalle regioni più umide del paese a quelle più aride, garantendo un approvvigionamento idrico costante anche durante i periodi di siccità. Inoltre, la Spagna ha investito in tecnologie di irrigazione efficienti, come sistemi a goccia, che riducono il consumo di acqua migliorando al contempo la resa agricola¹⁰.

⁹ (Hervàa-Gamez & Delgado-Ramos, 2019)

¹⁰ (Masia et al., 2018)

Francia: un Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici

La Francia ha sviluppato un Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici che integra la gestione delle risorse idriche con la protezione degli ecosistemi naturali. Questo piano prevede una serie di misure per ridurre gli impatti delle siccità e delle alluvioni, promuovendo una gestione integrata dei bacini idrografici e lo sviluppo di tecnologie avanzate per la previsione degli eventi estremi. Tra le iniziative francesi, vi è la creazione di mappe di vulnerabilità idraulica, che identificano le aree a maggiore rischio di alluvioni e permettono di adottare misure preventive mirate per mitigare i danni. Questo approccio integrato offre un modello di riferimento per l'Italia, che può trarre insegnamenti dall'esperienza francese per migliorare la propria resilienza di fronte ai cambiamenti climatici¹¹.

1.4 Decreti legislativi in Italia per la gestione della siccità e delle alluvioni

L'Italia ha sviluppato una serie di strumenti legislativi per affrontare le sfide legate alla siccità e alle alluvioni, con l'obiettivo di migliorare la resilienza del paese ai cambiamenti climatici e proteggere le risorse idriche.

Decreto legislativo n.152 del 2006 (Codice dell'Ambiente): questo decreto costituisce la base giuridica per la gestione dell'acqua in Italia. Include disposizioni sulla tutela delle risorse idriche, la gestione delle acque reflue, la protezione dalle alluvioni e la gestione sostenibile delle risorse idriche. Il decreto promuove l'adozione di piani di gestione a

¹¹ (Peres et al., 2020)

livello di bacino idrografico, in conformità con la Direttiva Quadro sulle Acque dell'Unione Europea.

Direttiva Alluvioni (Direttiva 2007/60/CE): questa direttiva europea, recepita dall'Italia, richiede agli Stati membri di valutare il rischio di alluvioni, creare mappe delle aree a rischio e sviluppare piani di gestione del rischio di alluvioni. L'obiettivo è ridurre le conseguenze negative per la salute umana, l'ambiente, il patrimonio culturale e l'attività economica associate alle inondazioni. In Italia, la direttiva è stata implementata attraverso i Piani di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA), che prevedono misure strutturali e non strutturali per mitigarne il rischio.

Decreto del Presidente del Consiglio dei ministri (DPCM) del 2017: questo decreto stabilisce il "Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici" (PNACC), che include misure specifiche per affrontare gli impatti delle siccità e delle alluvioni. Il PNACC promuove l'integrazione della gestione delle risorse idriche con la protezione degli ecosistemi naturali, lo sviluppo di tecnologie avanzate per la previsione degli eventi estremi e la creazione di un sistema di allerta precoce per migliorare la resilienza del paese agli eventi climatici estremi.

Decreto Siccità (DL n. 115/2022): questo recente decreto mira a fornire risposte rapide ed efficaci per far fronte alle emergenze idriche, in particolare durante i periodi di siccità prolungata. Include misure per la gestione dell'acqua in agricoltura, incentivi per l'adozione di tecnologie di risparmio idrico, e fondi per migliorare le infrastrutture idriche e ridurre le perdite nelle reti.

1.5 Scopo della tesi

Questa tesi ha come obiettivo principale l'analisi approfondita delle risorse idriche nel bacino del Betelico, situato nella provincia di Ancona, con particolare attenzione alla loro gestione sostenibile e ai rischi idrogeologici associati. Il lavoro si colloca all'interno di un contesto ambientale complesso, caratterizzato da una significativa variabilità delle condizioni idrogeologiche e climatiche, che influenzano profondamente la disponibilità e la qualità delle risorse idriche locali.

L'analisi condotta si basa su una raccolta dettagliata di dati meteorologici, idrologici e geomorfologici, elaborati attraverso strumenti avanzati come il modello di Thornthwaite-Mather. Questo modello ha permesso di calcolare parametri fondamentali come l'evapotraspirazione potenziale ed effettiva, il deflusso superficiale, e lo stoccaggio idrico del suolo, fornendo una visione integrata delle interazioni tra precipitazioni, temperatura e disponibilità d'acqua nel bacino. Questi dati sono stati utilizzati non solo per comprendere il bilancio idrico attuale, ma anche per simulare scenari futuri in risposta a diverse condizioni climatiche e pratiche di gestione.

Lo scopo della tesi non si limita all'analisi del presente, ma si estende alla formulazione di soluzioni pratiche e innovative per la gestione delle risorse idriche del bacino. Tra le soluzioni prospettate, spiccano interventi volti a migliorare l'efficienza dell'uso dell'acqua in agricoltura, come l'ottimizzazione dei sistemi di irrigazione, e l'integrazione di tecniche di ricarica artificiale delle falde acquifere per mitigare gli effetti della siccità. Inoltre, la tesi esplora l'utilizzo di sistemi di monitoraggio in tempo reale per la gestione dei deflussi

superficiali e per la previsione di eventi estremi, come alluvioni, che rappresentano un rischio significativo per la regione.

Un altro aspetto cruciale della ricerca riguarda l'impatto delle attività antropiche sul bilancio del bacino idrico. La tesi analizza come l'urbanizzazione, l'agricoltura intensiva e l'uso del suolo influenzino il ciclo idrologico, alterando la distribuzione delle risorse idriche e aumentando la vulnerabilità del territorio ai rischi idrogeologici. A partire da questi risultati, la ricerca propone una serie di misure di mitigazione, quali la riduzione della impermeabilizzazione del suolo, la creazione di aree di ritenzione naturale e l'adozione di pratiche agricole più sostenibili.

Infine, la tesi si prefigge di fornire un contributo alla pianificazione territoriale, offrendo strumenti e metodologie che possono essere applicati non solo nel bacino del Betelico, ma anche in altre aree con caratteristiche simili. La ricerca si propone come una risorsa per i decisori politici e i gestori del territorio, fornendo loro le informazioni necessarie per prendere decisioni informate che garantiscano una gestione delle risorse idriche più sostenibile e resiliente, in grado di affrontare le sfide poste dal cambiamento climatico e dalla pressione antropica crescente.

1.6 Sintesi dei metodi e dei risultati

La tesi si basa su una combinazione di metodologie avanzate per l'analisi e la modellazione delle risorse idriche nel bacino del Betelico, finalizzate a comprendere le dinamiche idrologiche e a proporre soluzioni per la gestione sostenibile dell'acqua. I metodi utilizzati comprendono l'elaborazione di dati climatici, idrologici e geomorfologici, raccolti attraverso diverse fonti e strumenti di monitoraggio. La metodologia si articola in diverse fasi, ognuna delle quali ha contribuito alla costruzione di un quadro completo del bilancio idrico e dei rischi idrogeologici associati.

Uno degli strumenti più utilizzati è il modello idrologico di Thornthwaite-Mather, applicato per calcolare l'evapotraspirazione potenziale e reale, lo stoccaggio idrico del suolo e il deflusso superficiale. Questo modello ha permesso di valutare come variabili climatiche, come la temperatura e le precipitazioni, influenzino la disponibilità d'acqua e il bilancio idrico complessivo del bacino. I risultati ottenuti attraverso l'applicazione di questi metodi hanno rivelato una serie di aspetti critici del bilancio idrico nel bacino del Betelico. Innanzitutto, è emerso che l'evapotraspirazione rappresenta una componente significativa, influenzata fortemente dalla variabilità climatica stagionale. Durante i mesi estivi, l'evapotraspirazione potenziale supera spesso le precipitazioni, portando a un deficit idrico che può ridurre drasticamente lo stoccaggio idrico del suolo e aumentare il rischio di siccità. L'analisi del deflusso superficiale ha evidenziato come le precipitazioni intense e concentrate in brevi periodi contribuiscano significativamente al rischio di inondazioni, specialmente nelle aree urbane e agricole con alta impermeabilizzazione del suolo. Inoltre, i risultati mostrano che lo stoccaggio idrico nel suolo è una risorsa fondamentale per la resilienza idrologica del bacino, ma che è fortemente influenzato dalle pratiche di

gestione del territorio, come l'uso agricolo intensivo e la deforestazione. Un altro risultato rilevante riguarda l'interazione tra acque superficiali e sotterranee. Lo studio ha mostrato che l'acquifero alluvionale non confinato del bacino è altamente suscettibile a variazioni nei regimi di precipitazione e che la ricarica naturale delle falde è spesso insufficiente a compensare le estrazioni idriche per uso agricolo e civile. Questo porta a un abbassamento del livello delle falde acquifere, che può avere gravi ripercussioni sia sulla disponibilità d'acqua a lungo termine che sulla stabilità del suolo.

La sintesi dei risultati ha portato alla formulazione di una serie di raccomandazioni per la gestione delle risorse idriche nel bacino del Betelico. Tra questo, la necessità di implementare sistemi di irrigazione più efficienti, l'adozione di pratiche agricole che conservino l'umidità del suolo e la promozione di interventi di ricarica artificiale delle falde. Inoltre, viene suggerita l'adozione di politiche di gestione del territorio che riducano l'impermeabilizzazione del suolo e preservino le aree naturali come barriere contro il deflusso superficiale e l'erosione.

In conclusione, i metodi utilizzati in questa tesi hanno permesso di ottenere una comprensione dettagliata delle dinamiche idrogeologiche del bacino del Betelico, evidenziando le criticità e le opportunità per una gestione più efficace e sostenibile delle risorse idriche. I risultati ottenuti forniscono una base solida per l'elaborazione di strategie di mitigazione dei rischi idrogeologici e per la pianificazione di interventi mirati a garantire la sicurezza e la protezione ambientale nel lungo termine.

INQUADRAMENTO AREA STUDIO

La mia indagine si focalizzerà sull'analisi del bacino idrografico del Betelico, situato nel cuore dell'Italia centrale, precisamente nelle Marche, nella provincia di Ancona. Questo bacino, che si estende su una superficie di circa 14km², sarà studiato per le sue caratteristiche geografiche, geologiche, geomorfologiche, idrologiche e climatiche. Il terreno collinare e montuoso del bacino del torrente Betelico presenta una varietà di formazioni geologiche, tra cui substrati arenacei, pelitici-arenacei alluvionali, rendendolo interessante dal punto di vista idrogeologico¹².

2.1 Inquadramento geografico

Il torrente Betelico ha la sua sorgente sulle pendici del Monte Conero, nei pressi di Pian Grande. Esso segue un breve percorso in direzione Nord-Est prima di fluire verso Nord-Nord Ovest, dirigendosi infine, per un percorso di 6,8 chilometri, verso la sua confluenza nel fiume Aspio, di cui diventa affluente¹³. Il Betelico attraversa una fascia collinare al di sotto dell'abitato di Massignano, caratterizzata da un paesaggio che si sviluppa nella vallata del torrente. La Regione Marche ha avviato dei progetti di manutenzione e rinaturalizzazione del torrente, con l'obiettivo di ripristinare le caratteristiche idrauliche e migliorare l'ecosistema locale. Questi interventi includono la pulizia del letto del torrente e la gestione della vegetazione per prevenire ostruzioni e migliorare il deflusso delle acque¹⁴.

¹² (Fronzi et al., 2022)

¹³ (www.it.geoview.info)

¹⁴ (www.regione.marche.it)



Fig. 2.1 1 Inquadramento geografico su scala nazionale (www.d-maps.com).



Fig. 2.1 2 Inquadramento geografico su scala regionale (www.d-maps.com).

Il fiume Aspio, corso d'acqua situato nelle Marche, precisamente nella provincia di Ancona; ha origine dalla fusione dei fossi di Offagna, Polverigi e Gallignano. Inizialmente il fiume scorre verso Est attraversando Aspio Terme, una frazione di Camerano, per poi cambiare direzione dirigendosi a Sud-Est. Lungo il suo percorso, il fiume Aspio riceve le acque di vari affluenti. Sul lato sinistro, il principale affluente è il Rio Marganetto, seguito dai torrenti Boranico e Betelico, che raccolgono le acque provenienti dall'intera parte occidentale del Monte Conero. L'unico affluente significativo proveniente da destra è il Rio Scaricalasino, che si unisce al fiume tra le confluenze dei due torrenti principali del lato sinistro. La connessione tra il torrente Betelico è significativa per la gestione delle risorse idriche e la conservazione dell'ecosistema locale¹⁵.

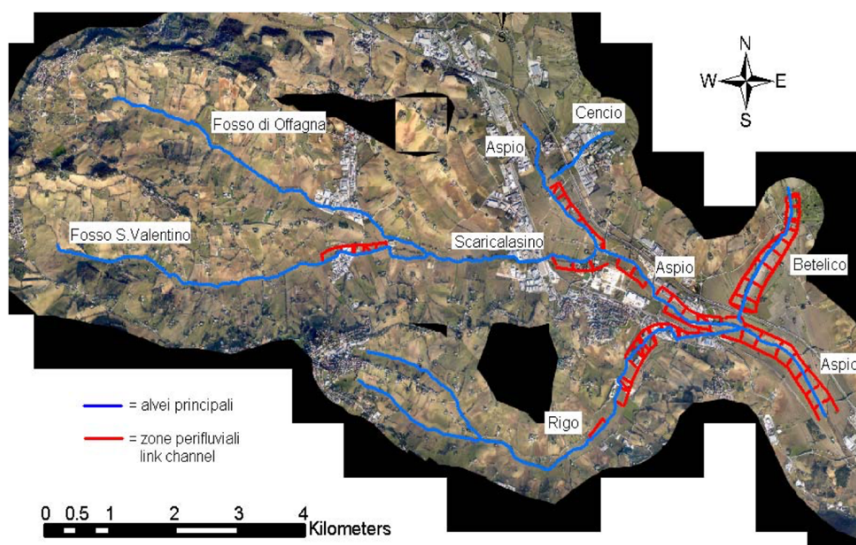


Fig. 2.1 3 Schematizzazione del reticolo idrografico (www.cimafoundation.org).

¹⁵ (www.regione.marche.it)

2.2 Inquadramento geologico della Regione Marche

Dal punto di vista orografico, la Regione può essere divisa in tre fasce longitudinali che si estendono da Ovest a Est. La fascia Preappenninica, di dimensioni limitate, si trova nell'estrema parte Nord-occidentale, da Castel d'Elci a Nord fino alla Serra di Burano a Sud. La fascia Appenninica è caratterizzata principalmente da due dorsali montuose quasi parallele, che insieme all'Appennino Umbro confinante, definiscono la forma arcuata dell'Appennino Umbro-Marchigiano. La fascia Subappenninica, che si estende verso est fino al litorale Adriatico, è principalmente collinare, ad eccezione della zona pedemontana che si estende da Cingoli fino ai Monti della Laga. I principali fiumi delle Marche sono il Foglia, Cesano, Esino, Musone, Potenza, Chienti, Tenna, Aso e Tronto¹⁶. Sotto il profilo geologico, le Marche fanno parte del dominio Umbro-Marchigiano, caratterizzato da rocce sedimentarie che si sono formate in un ambiente marino generale durante un lungo periodo compreso tra il Triassico superiore (circa 200 milioni di anni fa) e il Pleistocene inferiore (circa 2,5 milioni di anni fa). Nella zona orientale, verso la costa, questa successione è sovrapposta in modo incongruo da sedimenti marini, depositati tra il Pliocene medio e il Pleistocene inferiore. Queste serie, rappresentanti cicli distinti, si sono sviluppate su un elemento di crosta continentale in costante evoluzione dal Triassico al Pleistocene, e la tettonica ha influenzato gli ambienti di sedimentazione. Per questa ragione, mostrano significative variazioni di facies e spessori, grazie alle quali è possibile comprendere l'evoluzione nel tempo e nello spazio. La successione che costituisce l'ossatura dell'Appennino appartiene alla "Microplacca di Adria", la quale rappresenta un frammento disarticolato dal margine settentrionale della grande zolla continentale africana.

¹⁶ (Centamore & Micarelli, 1991)

Il supercontinente ereditato dall'orogenesi ercinica (Pangea) presentava un ampio golfo aperto verso est sull'Oceano di Pantalassa, detto Mare della Tetide che si chiudeva a Ovest nell'area dell'attuale Mediterraneo. Il processo di frammentazione del Pangea, avviato alla fine del Permiano, provocò l'immersione di ampie zone del vecchio continente, la disgregazione di zolle tra quella europea ed africana e l'apertura di bacini oceanici, tra cui il bacino oceanico Ligure-Piemontese durante il Giurassico. Le fasi che precedettero e accompagnarono l'apertura di questo braccio oceanico portarono anche alla differenziazione di domini come quello ligure, laziale, toscano, umbro-marchigiano.

Di conseguenza anche il torrente Betelico si trova nella parte orientale dell'Appennino. Le rocce predominanti in quest'area sono di origina marina e comprendono calcari, marne e arenarie. I calcari del Giurassico si sono formati in ambienti marini poco profondi e sono spesso ben stratificati e massicci. Le marne e le marne a fucoidi, depositatesi durante il Cretaceo e l'Eocene, appartengono a un ambiente marino più profondo e mostrano un'alternanza di marna e calcare¹⁷. Le arenarie del Flysch si sono formate nel Cenozoico e sono costituite da un'alternanza di arenarie, stiliti e argille. Le rocce calcaree della regione ospitano acquiferi carsici che alimentano il torrente e sono importanti riserve idriche per l'area.

¹⁷ (Centamore & Micarelli, 1991)

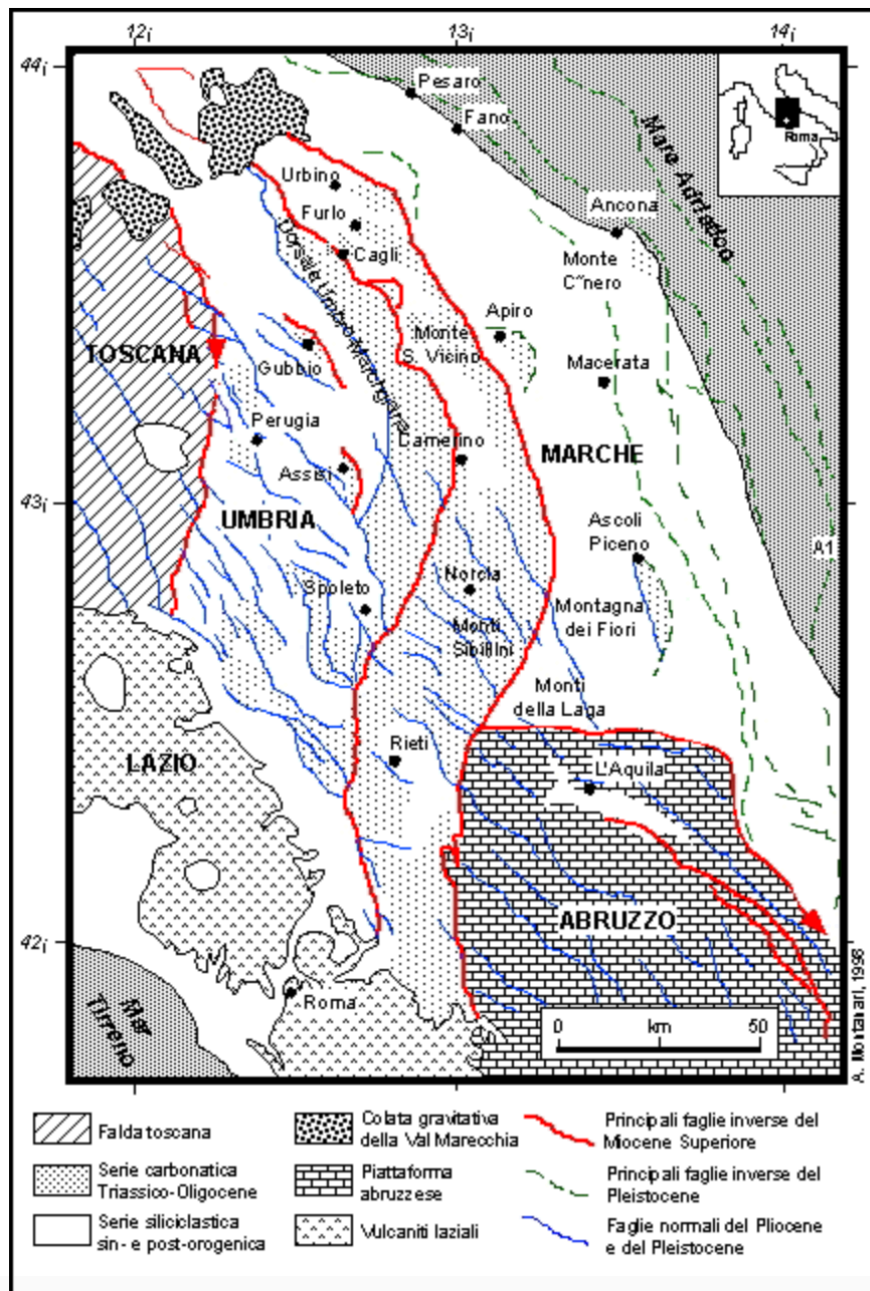


Fig. 2.2 1 Successione Umbro-Marchigiana (www.didalms.it).

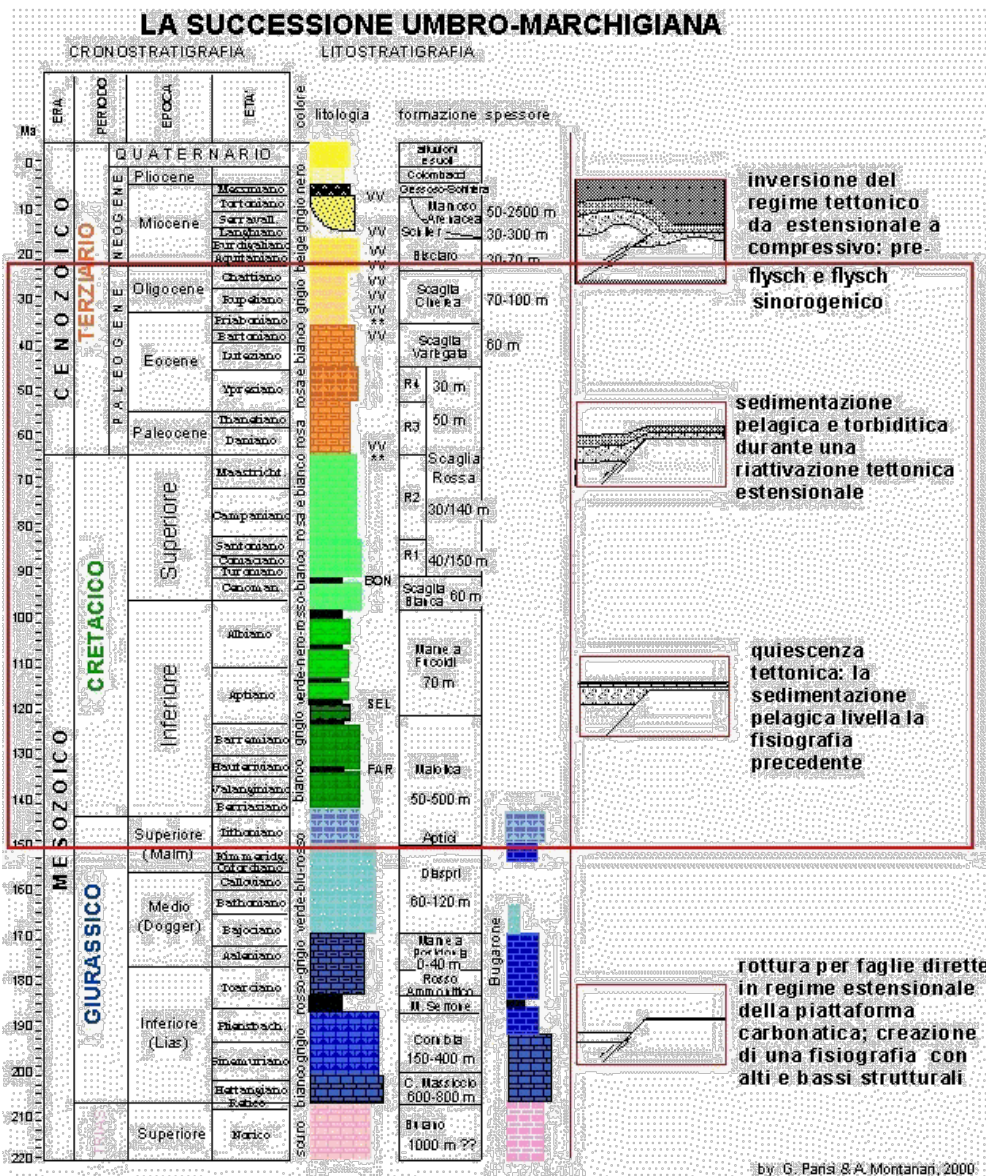


Fig. 2.2 2 Successione Umbro-Marchigiana (www.didalms.it).

2.3 Inquadramento geomorfologico

La morfologia delle Marche presenta una netta differenza tra la parte occidentale, principalmente montuosa, e quella orientale, prevalentemente collinare, che si estende fino alla costa Adriatica. La parte occidentale è caratterizzata da due catene montuose, spesso con altitudini superiori ai 1000 metri sul livello del mare, composte principalmente da rocce calcaree mesozoiche con orientamento anticlinale¹⁸, intervallate da valli collinari che corrispondono a depositi terrigeni cenozoiche orientati in sinclinale¹⁹. Verso Sud, queste catene si uniscono formando il massiccio dei Monti Sibillini, dove si trova la vetta più alta, il Monte Vettore, che raggiunge i 2422 metri. A settentrione, la catena montuosa degli Appennini segue un andamento approssimativamente Nord-Ovest/Sud-Est, ma successivamente si curva fino a orientarsi prevalentemente in direzione Sud, creando una caratteristica struttura ad arco con una convessità verso Nord-Est²⁰. La conformazione ad arco si riflette su molte caratteristiche dell'intero territorio regionale fino alla Costa Adriatica, che mostra un andamento simile. Nella fascia orientale, il paesaggio è più dolce e si sviluppa su un'ampia struttura monoclinale, composta da strati terrigeni che si inclinano verso Nord-Est, occasionalmente interrotti da piccoli rilievi collinari. Nella parte Nord-occidentale estrema della Regione emergono le argille scagliose della Colata Gravitativa della Valmarecchia, talvolta sovrastate da isolati rilievi formati da materiali litoidi trasportati. La maggior parte dell'area drena verso il Mar Adriatico, mentre solo una piccola porzione, corrispondente all'alto bacino del Fiume Nera, si riversa nel versante

¹⁸ L'orientamento anticlinale si riferisce ad una struttura geologica in cui gli strati di roccia si piegano in un arco convesso verso l'alto. Questa deformazione è dovuta alla compressione delle rocce durante i processi tettonici (www.manualedelgeologo.it).

¹⁹ Una sinclinale è una struttura geologica caratterizzata dalla piegatura degli strati rocciosi in un arco concavo verso il basso. Si forma quando le rocce sono sottoposte a forze tettoniche di compressione che causano una piegatura verso il basso (www.manualedelgeologo.it).

²⁰ (Calamita & Deiana, 1988)

tirrenico. I principali fiumi della Regione scorrono verso Est, attraversando le catene montuose calcaree attraverso valli chiuse, alcuni di essi hanno origine nel bacino Umbro, a Ovest dell'allineamento dei massimi rilievi. Infatti, nel territorio regionale, non c'è sempre una corrispondenza precisa tra la linea delle massime altitudini e lo spartiacque appenninico, il quale si trova spostato verso occidente. Le valli fluviali sono generalmente strette e profonde nella zona montuosa, ma diventano significativamente più ampie nella zona collinare. Le pianure alluvionali non sono molto estese, tranne che nei tratti più vicini alle foci dei fiumi, anche se non superano di solito pochi chilometri di larghezza. Lungo la fascia costiera, si osservano tratti bassi, sabbiosi o ciottolosi, di fronte ad antiche falesie ormai inattive. Le uniche eccezioni a questa morfologia sono rappresentate dalla Riviera del Conero e da alcune parti del litorale a Nord di Pesaro, dove la costa alta si affaccia direttamente sul mare²¹. Il territorio della Provincia di Ancona mostra un netto contrasto tra la sua parte occidentale, principalmente montuosa, e quella orientale, prevalentemente collinare che si estende fino al mare Adriatico. Nella parte occidentale, due dorsali montuose, la dorsale Umbro-Marchigiana a Ovest e quella Marchigiana a Est, sono separate da depressioni collinari, mentre nella parte orientale il terreno è modellato su un'estesa struttura monoclinale, con terreni terrigeni interrotti da pieghe minori. Questa deformazione tettonica si manifesta come un sistema di anticlinali e sinclinali, con una direzione degli assi NO – SE, ed è caratterizzata da numerose faglie parallele e trasversali. Dal punto di vista litologico, la Provincia presenta una grande varietà di rocce, con prevalenza di calcari, conglomerati ed arenarie, marne, gessi ed argille. Vi sono anche depositi di varia granulometria, dai ciottoli alle peliti, con una diminuzione della resistenza al diminuire delle dimensioni dei componenti. Le differenti caratteristiche dei terreni

²¹ (Bisci, Dramis; La geomorfologia delle Marche, 1986)

2.4 Inquadramento idrogeologico

L'idrogeologia si dedica all'analisi delle acque sotterranee, ne esamina la distribuzione, il movimento, la qualità e le interazioni con il suolo e con altri elementi del ciclo idrologico. I corsi d'acqua più importanti delle Marche possono essere suddivisi in due gruppi principali: quelli settentrionali e quelli meridionali. Il primo gruppo, rappresentato dai fiumi Marecchia, Conca, Foglia, Metauro ed Esino, scorre principalmente nella parte settentrionale della Regione. È importante notare che i fiumi Marecchia e Conca, sebbene facciano parte per l'intero corso o per una buona parte della Regione dell'Emilia-Romagna, hanno comunque un ruolo significativo nell'idrografia delle Marche. Il secondo gruppo, invece, è costituito dai fiumi Musone, Potenza, Chieti e Tronto, che scorrono nella parte meridionale. A questi fiumi si aggiunge il Nera che ha una posizione particolare poiché non sfocia direttamente nel Mar Adriatico, ma confluisce nel fiume Tevere. Una minima parte dei bacini idrografici dei fiumi ricade al di fuori del bordo occidentale della Regione, poiché il confine con l'Umbria segue l'andamento della linea spartiacque appenninica. Le caratteristiche che accomunano la maggior parte dei fiumi marchigiani sono lo scarso numero di affluenti, una ridotta lunghezza, un prevalente parallelismo degli alvei, una dissimmetria delle sponde ed ampi letti fluviali con ghiaie. La profondità delle acque di questi fiumi è generalmente bassa e nessuno di questi è navigabile se non per l'estremo tratto prossimo alla foce, spesso adattato a porto-canale. Gli sbocchi al mare dei corsi d'acqua avvengono attraverso foci non ramificate che non sporgono dal profilo della costa. Il profilo trasversale delle valli è asimmetrico, poiché gli alvei non scorrono al centro della loro pianura alluvionale, ma a ridosso dei versanti nella destra idrografica, che presentano un'acclività maggiore rispetto ai versanti opposti.

Globalmente, il sistema idrografico regionale è influenzato da due elementi primari: il gradiente territoriale e la presenza di spostamenti tettonici. Per quanto riguarda il primo aspetto, il progresso longitudinale dei principali corsi d'acqua è vincolato dalla distanza tra la costa e la fascia montuosa dell'Appennino. Nella definizione di un corso preferenziale, è essenziale considerare anche l'impatto delle faglie tettoniche trasversali e delle formazioni collinari parallele alle principali creste montuose. Sulla base dell'orografia, dal confine con l'Umbria verso la costa, si individuano quattro zone, una montuosa caratterizzata da terreni calcarei più resistenti all'erosione, una fascia collinare dove predominano rocce terrigene, una catena montuosa che si unisce verso Sud con la dorsale occidentale dei Monti Sibillini e infine una distesa collinare che degrada dolcemente verso il Mar Adriatico.

La maggior parte dei fiumi ha origine dalla prima zona montuosa, qui i corsi d'acqua presentano portate ridotte e un regime torrentizio dovuto alla vicinanza delle sorgenti, alla forte pendenza e alla scarsa suscettibilità dell'erosione del terreno. Le valli montane sono generalmente strette, profondamente incise e spesso prive di depositi alluvionali con tratti fluviali caratterizzati da pendenze medio-alte. Nella fascia collinare che si estende tra due dorsali calcaree, si osserva un cambiamento nella morfologia dei fiumi, che sono più ampi e hanno pendenze longitudinali e trasversali meno accentuate. Questa variazione è correlata alle caratteristiche litologiche dei terreni costituiti da formazioni marnose e terrigene più recenti e facilmente soggette all'erosione rispetto ai calcari. Lungo i pendii delle colline è comune trovare depositi alluvionali composti da ciottoli calcarei. La portata dei fiumi è leggermente superiore rispetto alla tratta precedente, anche se durante i periodi di magra il flusso superficiale dell'acqua può ridursi, favorendo il deflusso attraverso i detriti nel sottosuolo. Nella seconda zona montuosa, le caratteristiche del reticolo

idrografico sono simili a quelle già descritte per la catena occidentale; i torrenti presentano portate molto variabili, scorrono in valli incise, strette e con versanti ripidi. Nell'ultima parte del territorio marchigiano, si trovano colline con morfologia dolce, costituiti da terreni erodibili, argillosi e sabbiosi. I corsi d'acqua sono influenzati dalla pendenza regionale e scorrono in direzione opposta all'Appennino. A causa di una minore energia del terreno, si osserva una minore tendenza all'erosione del letto fluviale. Inoltre, i depositi alluvionali raggiungono il loro massimo sviluppo, coprendo vaste valli ed estendendosi per diversi chilometri vicino alle foci dei fiumi²³.

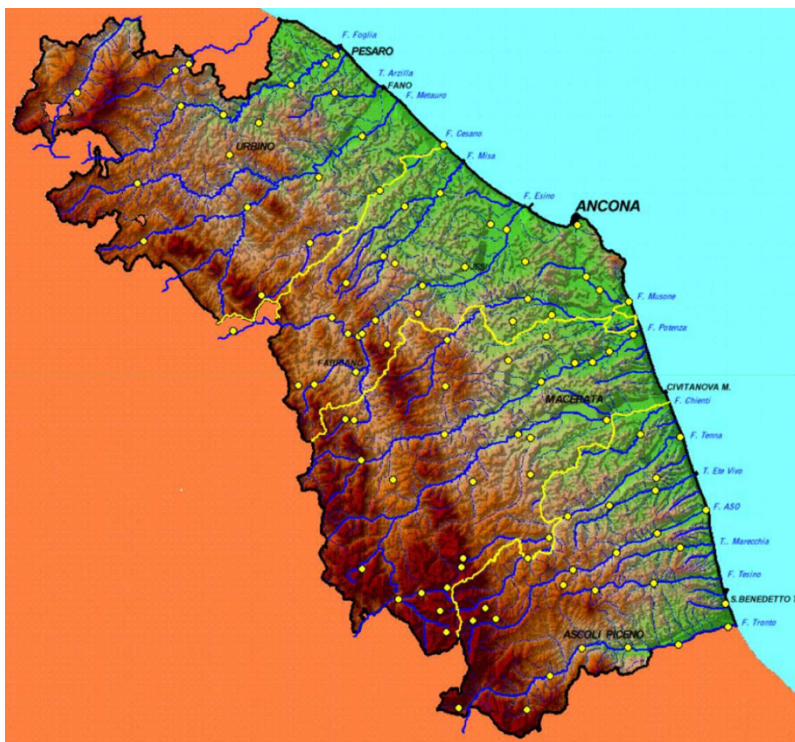


Fig. 2.4 1 Inquadramento idrogeologico Marche (www.regione.marche.it).

²³ (www.regione.marche.it).

2.5 Inquadramento climatico

Il clima è il risultato dell'insieme delle condizioni atmosferiche che caratterizzano una determinata area geografica in un periodo di tempo prolungato, solitamente di almeno 30 anni. Queste condizioni includono parametri come la temperatura, l'umidità, la pressione atmosferica, la direzione e la velocità del vento, le precipitazioni e altri fenomeni meteorologici. Il clima di una regione è influenzato da diversi fattori, tra cui latitudine, altitudine, distribuzione di terra e acqua, correnti oceaniche, topografia locale e copertura vegetale. Questi fattori determinano le caratteristiche climatiche di un'area, come il tipo di clima (tropicale, temperato, desertico), la stagionalità delle precipitazioni e le temperature medie.

L'Italia si estende tra i 36° e i 47° di latitudine Nord; quindi, si trova nella fascia temperata; il 45° parallelo, equidistante tra l'Equatore e il Polo, attraversa la Pianura Padana da Ovest ad Est. Di conseguenza, gran parte dell'Italia è caratterizzata da climi temperati caldi, simili a quelli mediterranei, mentre nell'area settentrionale si osservano già caratteristiche continentali o di transizione. Il clima italiano è influenzato anche dalla sua posizione costiera, che attenua in varia misura i suoi estremi.



Fig. 2.5 1 Le regioni climatiche d'Italia mostrano una vasta gamma di variazioni nelle temperature, nella piovosità e nei venti. Queste variazioni dipendono da fattori come l'altitudine, la posizione geografica e l'influenza del mare. Le sei principali regioni climatiche sono: l'area alpina con inverni rigidi e abbondanti nevicate, la Pianura Padana con un clima continentale caratterizzato da inverni freddi ed estati calde, l'Appennino con precipitazioni abbondanti soprattutto sul versante tirrenico, la zona ligure-tirrenica con inverni miti ed estati non troppo calde grazie all'effetto mitigatore del mare, la zona Adriatica con temperature inferiori e precipitazioni scarse, e infine la zona sudorientale e delle isole con un clima subtropicale caratterizzato da temperature elevate e scarsità di precipitazioni (www.gmpe.it).

Il clima delle Marche è di tipo marittimo, caratterizzato da nette differenze tra un inverno rigido e un'estate calda. Le fluttuazioni stagionali sono influenzate dalle masse d'aria provenienti dall'Atlantico e dall'Europa Centro-Orientale. Durante l'inverno, si verificano prevalentemente venti freddi settentrionali come la bora e il maestrale, soprattutto nelle zone nordiche non protette dal Monte Conero, mentre in estate predominano venti umidi e caldi meridionali come lo scirocco e il garbino. La disposizione geografica delle valli favorisce la formazione di brezze marine tra il mare e l'entroterra. Le temperature variano in base all'altitudine, con medie che oscillano tra i 6° e i 14°C. la stagione più piovosa è l'autunno, seguita dalla primavera e dall'inverno, che mostrano livelli di precipitazione

simili. Le zone interne ricevono più pioggia e d'inverno sono spesso interessate dalla neve, mentre sulla costa le nevicate sono meno frequenti. La nebbia è diffusa nelle aree costiere e collinari.

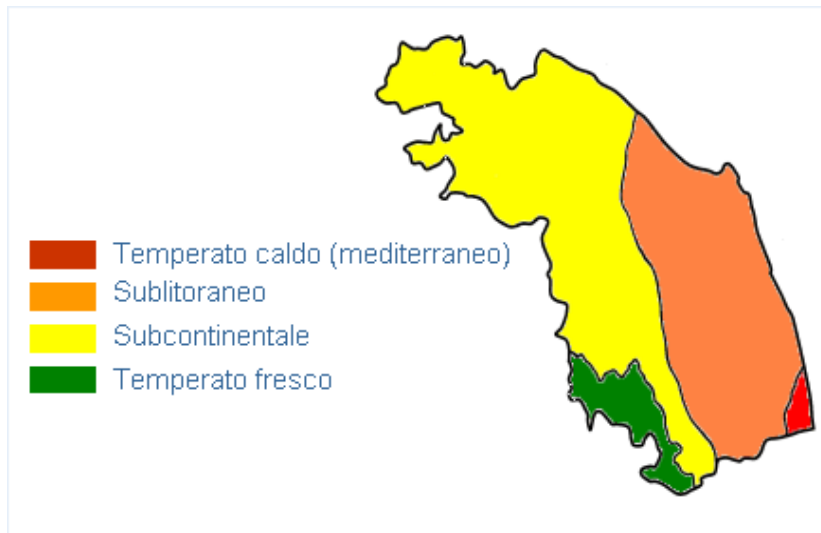


Fig. 2.5 2 Inquadramento clima regione Marche (www.geofisico.it).

MATERIALI E METODI

In questo capitolo si individuano i materiali e i metodi utilizzati per condurre lo studio sul bilancio idrologico del bacino del torrente Betelico. La metodologia adottata è stata appositamente pensata per acquisire dati accurati e rappresentativi, consentendo un'analisi dettagliata delle risorse idriche rinnovabili e delle sfide connesse alla siccità e alle alluvioni presenti nella zona.

3.1 Campo prova

A tale scopo, è stato istituito un campo sperimentale nella valle del Betelico (Fig. 3.1 1 – Fig. 3.1 2) per studiare i processi di infiltrazione pertinenti all'area. Due piezometri sono stati installati per monitorare i livelli d'acqua, uno all'interno del campo prova e uno più profondo all'esterno. Inoltre, sono stati impiegati tensiometri per misurare la tensione matriciale dell'acqua di infiltrazione. Al fine di ottenere dati approfonditi, sono state utilizzate alcune sonde per la misura della conducibilità elettrica, dell'umidità, della temperatura e del potenziale matriciale del suolo a diverse profondità. Un pluviometro è stato impiegato per registrare l'altezza delle precipitazioni meteoriche.



Fig. 3.1 1 Campo prova (www.earth.google.com).



Fig. 3.1 2 Campo prove.

L'analisi e la gestione delle risorse idriche richiedono l'uso di una serie di strumenti scientifici, ciascuno con uno scopo specifico. In sito, vengono utilizzati vari dispositivi per monitorare e comprendere le risorse, essenziali per una gestione sostenibile.

3.1.1 Il piezometro

Il piezometro è uno strumento utilizzato per misurare il livello della falda acquifera e le pressioni interstiziali. Viene installato all'interno di un foro di sondaggio, eseguito tramite carotaggio continuo o a distribuzione di nucleo. Le tipologie di piezometro variano in base alla complessità idrogeologica del sito di studio. Esistono vari tipo di piezometri, ciascuno adatto a specifiche condizioni e terreni.

Il piezometro a tubo aperto è particolarmente adatto per condizioni idrogeologiche con una sola falda libera. È costituito da una tubazione in PVC fessurata o microfessurata e viene installato nel foro di sondaggio. Viene utilizzato un ghiaietto siliceo per riempire l'intercapedine tra la tubazione e il perforo, in più vengono isolati i primi 2-3 metri superficiali con bentonite per evitare che l'acqua di ruscellamento raggiunga la falda. La misurazione del livello dell'acqua all'interno di questi piezometri è effettuata con un freatimetro elettrico o un trasduttore a pressione. In contesti idrogeologici più complessi, come quelli con falde in pressione o artesiane, è preferibile utilizzare il piezometro di Casagrande o a corda vibrante, che consente di misurare anche le pressioni neutre. Esso funziona tramite la variazione del volume del recipiente dovuta alla pressione dell'acqua di falda, che agisce su un pistone mobile ed è adatto principalmente per terreni coesivi come argille e limi. Il piezometro a corda vibrante è utilizzato per misurare la pressione dell'acqua interstiziale in ambienti non più accessibili dopo l'installazione. È costituito da una corda vibrante e un sensore che misura la velocità di propagazione delle onde sonore

lungo la corda, la quale dipende dalla pressione dell'acqua sotterranea. Questo strumento è impiegato in grandi opere come dighe e gallerie, ed è adatto a una varietà di terreni, dai più grossolani ai più fini. La permeabilità dei terreni influisce sui tempi di ripristino delle condizioni idrogeologiche dopo l'installazione della tubazione piezometrica. Dopo l'installazione, è necessario attendere un periodo di tempo variabile, a seconda delle permeabilità del terreno, prima di effettuare la prima lettura. In terreni incoerenti o fratturati, la prima lettura può essere eseguita il giorno successivo, mentre in terreni coesivi, come limi e argille, può essere necessario attendere 7-10 giorni. I piezometri trovano applicazione in vari campi, tra cui il monitoraggio delle falde acquifere, la valutazione della stabilità dei terreni e delle strutture geotecniche, il controllo della contaminazione delle acque sotterranee e la gestione delle risorse idriche²⁴.

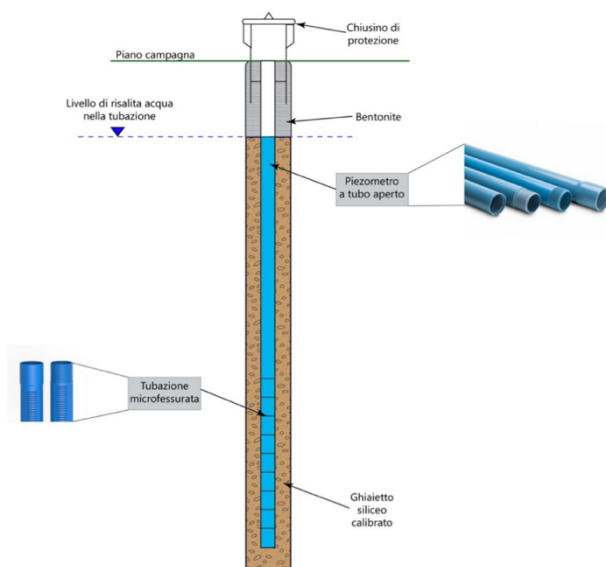


Fig. 3.1.1 1 Piezometro a tubo aperto con dettagli fotografici di tubi in PVC ciechi e microfessurati (www.geostru.eu).

²⁴ (www.geostru.eu)

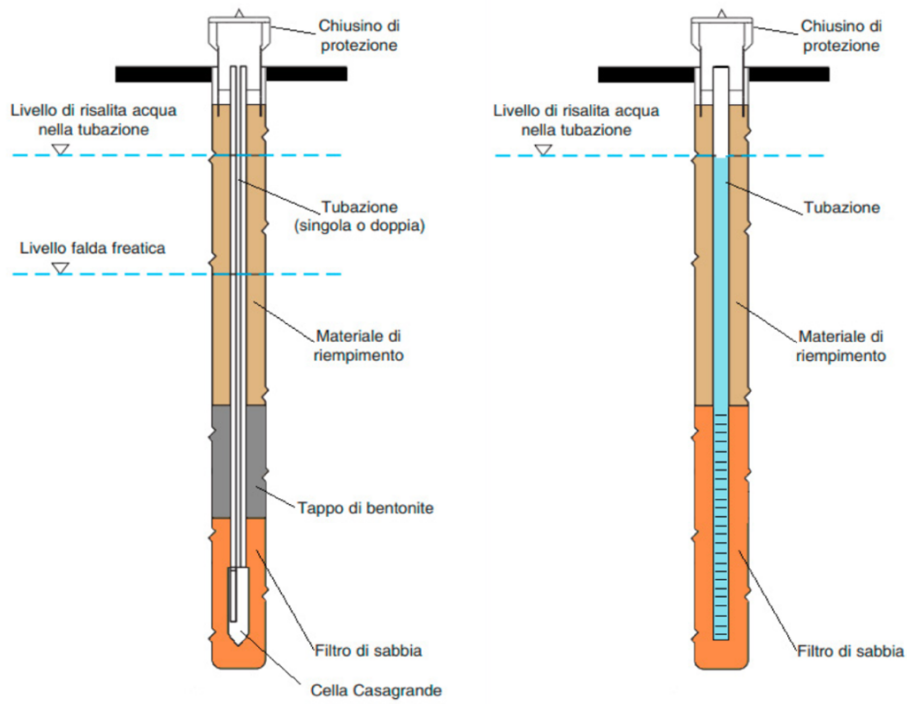


Fig. 3.1.1 2 Piezometro di Casagrande (www.geostru.eu).



Fig. 3.1.1 3 Piezometro a corda vibrante (www.geostru.eu).

Nel bacino del Betelico, al di fuori del campo prova in Via Bagnolo a Camerano, è stato installato un piezometro a tubo aperto.

La Fig. 3.1.1 4 mostra il piezometro a tubo aperto con una sonda collegata ad una corda. Questa sonda viene calata nel piezometro e lasciata in posizione per rilevare il livello dell'acqua o la pressione interstiziale. La misurazione viene comunemente effettuata mediante un freatometro elettrico. La sonda rileva la profondità a cui si trova l'acqua e trasmette questi dati, permettendo un monitoraggio continuo e preciso delle condizioni idrogeologiche. La sonda visibile nella figura è multiparametrica e viene usata per il monitoraggio delle acque sotterranee, rilevando parametri come pressione e temperatura. La pressione viene determinata per capire il livello dell'acqua basato sulla pressione idrostatica, mentre la temperatura è monitorata per valutare i cambiamenti che possono influenzare i vari processi geochimici e biologici.

Queste sonde sono costruite con materiali resistenti come acciaio inossidabile o titanio ed inoltre, il loro utilizzo prevede l'inserimento nel piezometro fino alla profondità desiderata.

Nelle figure (3.1.1 4 – 3.1.1 5) si osserva la sonda che viene estratta dal piezometro e posizionata su una basetta collegata al computer. Utilizzando il software "Diver-Office", indicato per la gestione dei dati raccolti dalle "Mini-diver", vengono mostrati in tempo reale i parametri misurati e altri dettagli operativi.



Fig. 3.1.1 4 Piezometro e sonda.

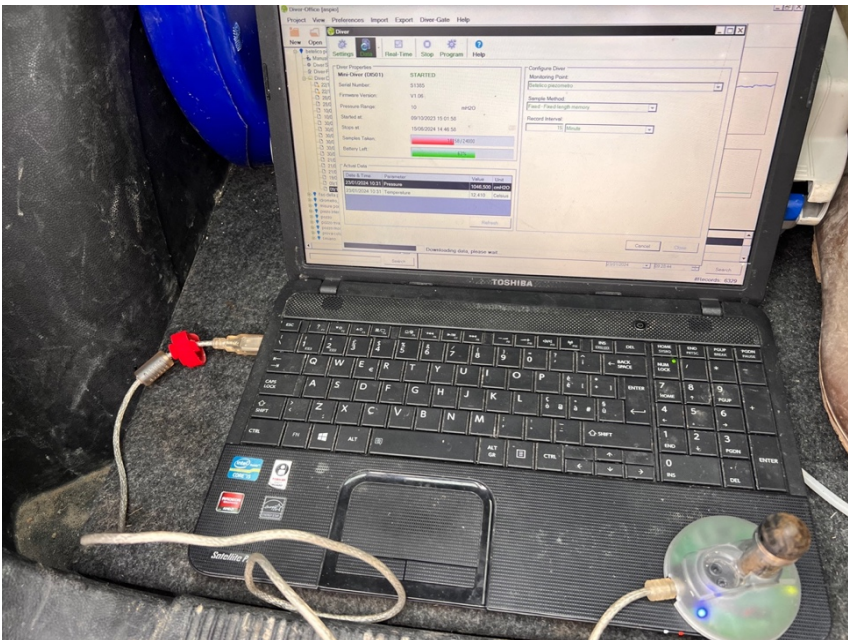


Fig. 3.1.1 5 Scaricamento dati di temperatura e pressione.

3.1.2 Freatimetro

Il freatimetro, noto anche come “idrometro per pozzi” o “water level meter” (WLM), è uno strumento fondamentale per misurare il livello statico dell’acqua all’interno di pozzi e piezometri; ma oltre a questi può essere utilizzato anche per misurare i livelli d’acqua in serbatoi, cisterne e bacini.

I freatimetri sono apprezzati per la loro semplicità e velocità d’uso. Sono costituiti da una sonda, detta anche puntale, montata su un nastro o cavo graduato (millimetrato o centimetrato) che contiene conduttori elettrici, un circuito elettronico di rilevamento e segnalazione, e un avvolgicavo che tiene insieme il tutto. I modelli più evoluti dispongono di un potenziometro di regolazione che consente di modificare la sensibilità della sonda per garantire misurazioni accurate in diverse condizioni ambientali, come la presenza di acqua di ricaduta o intrusioni saline.

Il puntale è composto da due elettrodi e rileva la presenza di acqua attivando un segnale acustico e luminoso quando entra a contatto con essa. Questo permette all’operatore di leggere facilmente la profondità della superficie sul nastro graduato rispetto alla testa del pozzo. Esistono vari tipo di freatimetri, tra cui i termo-freatimetri, che misurano sia il livello che la temperatura, e i freatimetri TLC che misurano livello, temperatura e conducibilità.



Fig.3.1.2 1 Freatimetro.

3.1.3 Lisimetro a suzione

I lisimetri sono strumenti utilizzati per raccogliere e analizzare l'acqua del suolo, permettendo il monitoraggio del trasporto dei soluti e delle dinamiche idriche. Questi dispositivi, circondati da terreno il meno disturbato possibile, con o senza vegetazione, sono isolati dal suolo circostante e possono misurare la quantità d'acqua che percola attraverso una pietra porosa posta alla base del dispositivo²⁵. Per installare correttamente i lisimetri sul campo, è importante considerare gli aspetti climatici, il tipo di suolo e la vegetazione presente, al fine di minimizzare eventuali errori. Ne esistono di diversi tipi, uno dei più comuni è quello a suzione nel quale viene applicata una depressione al sistema di raccolta.

Il lisimetro a suzione è un tipo di dispositivo che consente il campionamento di liquidi presenti nel suolo, permettendo la valutazione dei nutrienti disciolti, della salinità, del pH e di altri parametri utili per lo sviluppo delle piante. È costituito da una tazza porosa, spesso

²⁵ (Lazarovitch et al., 2006)

realizzata in ceramica o PTFE (politetrafluoroetilene), collegata a un sistema di vuoto che crea una pressione negativa per aspirare acqua attraverso la tazza che viene sepolta a una profondità specifica²⁶.

L'installazione corretta del lisimetro prevede la preparazione anticipata del foro e del letto di malta di silicio. Durante l'inserimento del letto, lo strumento deve essere mantenuto centrato nel foro e poi si dispongono i sigilli di bentonite nella parte superiore. Completate queste azioni, entra in funzione quando viene rimossa l'acqua al suo interno, garantendo così un corretto campionamento e monitoraggio.

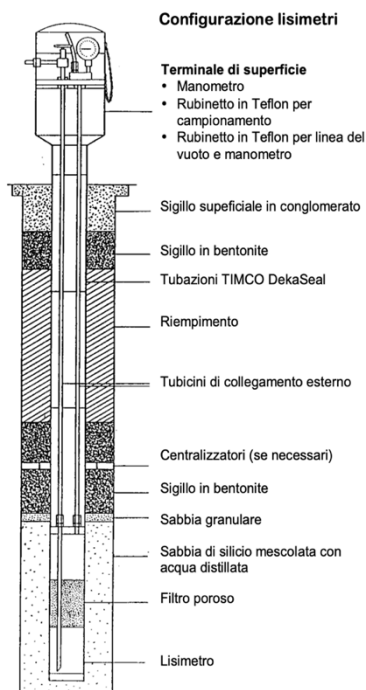


Fig. 3.1.3 1 Configurazione lisimetro.

²⁶ (Everett & McMillion, 1985)

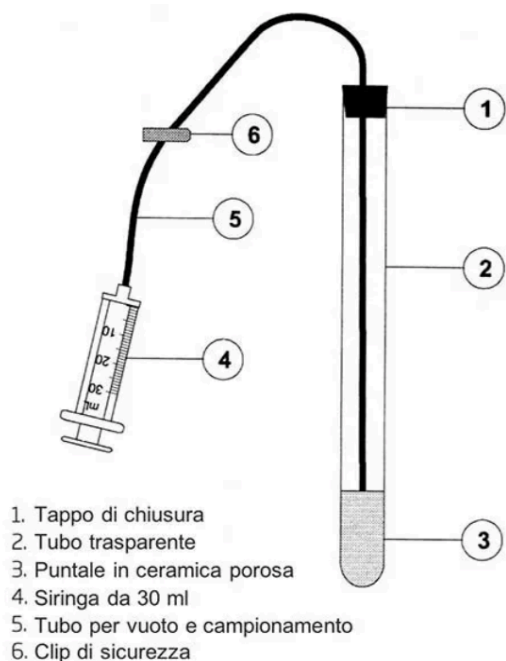


Fig. 3.1.3 2 Lo strumento è costituito da una punta in ceramica porosa inerte, un tubo cavo in plastica trasparente dove viene generato il vuoto e un tubicino di gomma che consente di creare il vuoto e aspirare il campione (www.scubla.it).

3.1.4 Tensiometro

Il tensiometro è uno strumento utilizzato per misurare il potenziale idrico del suolo, fondamentale per studiare la dinamica dell'umidità nel terreno, l'irrigazione e i processi idrologici. Misura il potenziale matriciale, ossia la forza con cui l'acqua viene trattenuta dal terreno, indicando quanta energia devono esercitare le radici delle piante per rimuovere e utilizzare acqua²⁷.

I componenti base che lo costituiscono sono una tazza di ceramica porosa, un tubo di plastica riempito d'acqua e un misuratore di vuoto o manometro. La tazza di ceramica, posta in contatto idraulico con il terreno, consente il trasferimento del fluido tra il suolo e

²⁷ (Stannard, 1992)

l'interno del tensiometro. La tensione dell'acqua si equilibra con il vuoto all'interno dello strumento e il misuratore ne fornisce una lettura diretta²⁸ (Fig. 3.1.4 1).

Per attivare il tensiometro viene usato un fluido blu che inibisce la crescita delle alghe all'interno dello strumento e rende più facile osservare l'aria accumulata. Alternativamente, si può utilizzare acqua semplice senza l'additivo blu. Successivamente l'unità viene riempita e si crea un vuoto con una pompa manuale. L'operazione va ripetuta finché non si vedono più bolle d'aria dallo stelo del comparatore, una volta pronto, lo strumento va sigillato.

Nei terreni morbidi, il tensiometro può essere inserito con una semplice spinta, mentre nei terreni duri è necessario realizzare un foro con una trivella. In entrambi i casi, bisogna pressare bene il terreno in superficie²⁹. Dopo l'installazione, a seconda dell'umidità del terreno, si deve attendere un periodo variabile per ottenere letture attendibili di suzione, se è umido e le letture sono basse, l'accumulo di aria sarà minimo. Mentre se è asciutto, con valori di aspirazione tra 40 e 60 centibar, l'aria si accumulerà rapidamente nei primi giorni dopo l'installazione. Dopo le prime operazioni di rimozione d'aria, il tasso di accumulo diminuirà e questi interventi saranno necessari solo settimanalmente o meno.

²⁸ (Hubbell & Sisson, 1998)

²⁹ (Sisson et al., 2002)



Fig. 3.1.4 1 Tensiometro (www.agriexpo.online).

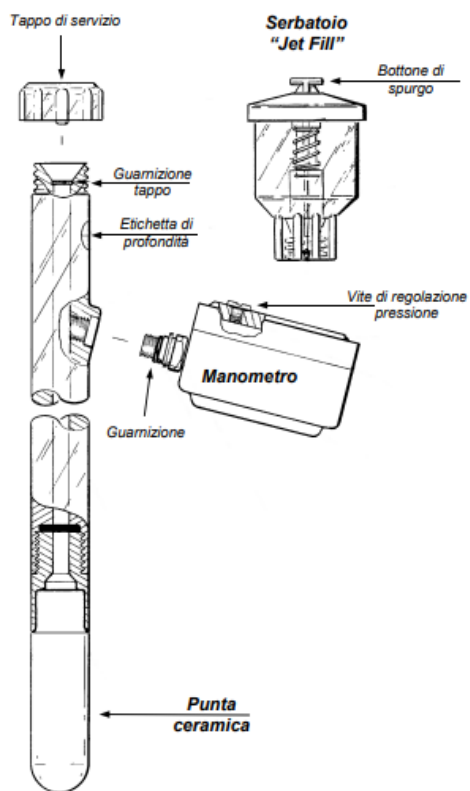


Fig. 3.1.4 2 Composizione tensiometro (www.ecosearch.info).

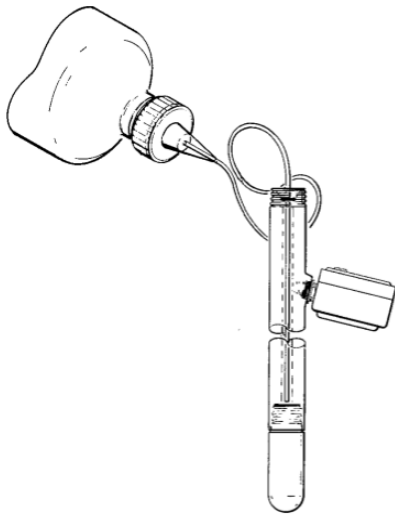


Fig. 3.1.4 3 Per le operazioni di riempimento è consigliabile avere a disposizione una bottiglia di plastica e un tubicino. Inserire il tubicino nel corpo del tensiometro fino in fondo e poi premere sulla bottiglietta per riempirlo di liquido. Mantenere il tensiometro in posizione verticale fino a quando il liquido non abbia saturato la punta di ceramica e inizi a gocciolare. Se si devono riempire più tensiometro, è utile posizionarli in un lavandino o in un secchio abbastanza profondi (www.ecosearch.info).

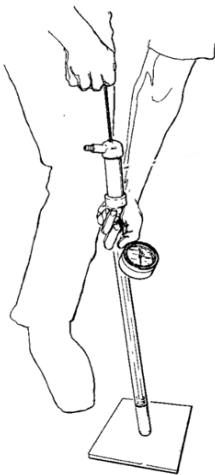


Fig. 3.1.4 4 Una volta certi che la punta di ceramica sia completamente satura, riempire il tensiometro completamente e creare un vuoto all'interno utilizzando una pompa manuale. Per fare ciò, appoggiare la punta su una tavola di legno, mentre il gommino della pompa manuale viene premuto contro la guarnizione del tappo del tensiometro. Aspirando con la pompa si crea un vuoto che fa gorgogliare l'acqua (www.ecosearch.info).

3.1.5 Data logger ZL6

Il data logger ZL6 è uno strumento avanzato prodotto dal gruppo METER, utilizzato per la raccolta, gestione e condivisione dei dati in tempo reale. È dotato di sei porte per sensori permettendo il monitoraggio simultaneo dei vari parametri ambientali come umidità del suolo e le condizioni atmosferiche. La sua robustezza è garantita da un pannello solare integrato per la ricarica della batteria, un'antenna nascosta per prevenire danni e un alloggiamento con classificazione IP56 per resistere alla pioggia.



Fig. 3.1.5 1 Data logger ZL6 (www.metergroup.com).



Fig. 3.1.5 2 Data logger presente nel campo prove.

Sensori per rilevamenti specifici:

L'umidità nel suolo è una variabile fondamentale nel controllo dello scambio di acqua ed energia termica tra la superficie terrestre e l'atmosfera, principalmente attraverso i processi di evaporazione e traspirazione delle piante. Per misurare questa variabile, si può utilizzare il sensore di umidità del suolo TEROS 12, che è in grado di calcolare il contenuto d'acqua nel suolo da 0 al 100%, la temperatura del substrato in un intervallo che va da - 40° a + 50°C, e rilevare la conducibilità elettrica nell'intervallo da 0 a 23dS/m.

Questo sensore utilizza aghi in acciaio inossidabile per effettuare le misurazioni: l'umidità del suolo viene misurata tra l'ago più profondo e quello centrale, la conducibilità tra l'ago centrale e quello più superficiale, mentre la temperatura è misurata tramite un termistore presente nell'ago centrale. La calibrazione del TEROS massimizza la precisione delle misurazioni e riduce al minimo le variazioni da sensore a sensore, fornendo dati affidabili per la gestione delle risorse idriche e studi ecologici.



Fig. 3.1.5 3 Sensore TEROS 12 (www.metergroup.com).

Il potenziale idrico misura l'energia posseduta dall'acqua in un sistema e per valutarlo si può utilizzare il sensore TEROS 21. Esso è progettato per essere facile da usare, senza manutenzione e permette la raccolta di dati a lungo termine, ideale per studi ambientali e

agricoli. Determina se c'è abbastanza acqua per la vegetazione e ne monitora i suoi movimenti nel suolo.



Fig. 3.1.5 4 Sensore TERO 21 (www.metergroup.com).

Il sensore 5TE è un dispositivo utilizzato per monitorare la conducibilità elettrica, il contenuto volumetrico d'acqua e la temperatura del suolo. Questo sensore utilizza una frequenza di 70MHz che aiuta a minimizzare gli effetti della salinità e della tessitura del suolo sulle misurazioni. La conducibilità elettrica viene valutata mediante elettrodi in acciaio inossidabile, mentre la temperatura è misurata con un termistore incorporato.

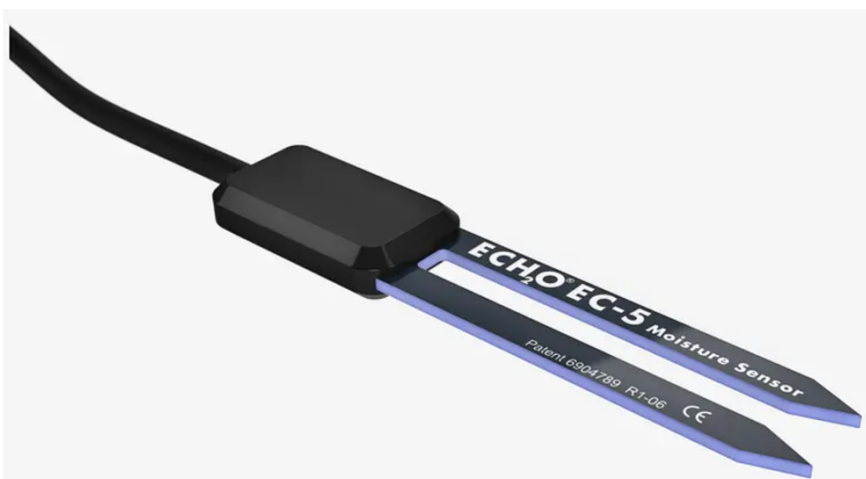


Fig. 3.1.5 5 Sensore 5TE (www.metergroup.com).

3.1.6 Stazione pluviometrica

Le stazioni pluviometriche sono particolari stazioni meteorologiche dotate di un pluviometro o di una misura radar che permette di misurare la quantità di pioggia caduta. Queste stazioni possono avere una configurazione semplice con il solo pluviometro o trasduttore di precipitazione, oppure possono integrare diverse tipologie di sensori sulla stessa piattaforma. In Italia, la quantità di pioggia caduta viene generalmente misurata in millimetri. Un millimetro di pioggia equivale, in una situazione ideale in cui l'acqua non viene assorbita dal terreno e non scorre via, a coprire uniformemente il suolo con uno strato di un millimetro di profondità.

Le stazioni pluviometriche possono utilizzare sensori “a bascula” o radar, alcuni dei quali sono riscaldati per evitare il congelamento durante gli eventi nevosi e garantire così misurazioni accurate anche in inverno. Inoltre, possono distinguere tra pioggia, neve e grandine, migliorando la precisione delle misurazioni in diverse condizioni meteorologiche³⁰.

³⁰ (www.comaitorino.it)



Fig.3.1.6 1 Stazione pluviometrica Ancona.

La figura 3.1.6 1 rappresenta la stazione pluviometrica di Ancona, situata sul Monte Conero, costituita da vari componenti che lavorano in sinergia per fornire informazioni accurate sul clima locale.

Il pluviometro digitale, montato sulla sommità di un pale metallico, è progettato per raccogliere e misurare la quantità di pioggia che cade in una determinata area. I dati raccolti sono essenziali per prevedere eventi estremi come siccità e/o alluvioni.

Esistono vari tipi di pluviometri in base al loro design e funzionalità. Una distinzione viene fatta tra analogici e digitali.

Gli analogici, o totalizzatori, hanno una forma conica o cilindrica che raccoglie direttamente le precipitazioni e le immagazzina all'interno, variano nella capacità di

raccolta e nel materiale di costruzione; i modelli più semplici sono realizzati in plastica e hanno una capacità tra 40 e 70mm. Solitamente vengono fissati al suolo su un paletto e sono destinati ad un uso domestico. I modelli totalizzanti ad alta capacità devono il loro design al professor Hellmann; sono costruiti in metallo, acciaio inossidabile, alluminio o zinco, di forma cilindrica e sono composti da una parte di raccolta superiore, un imbuto e una parte inferiore o serbatoio. Hanno una capacità tra 100 e 220 mm e vengono solitamente posizionati su un palo ad un'altezza di 1,5 metri³¹.



Fig.3.1.6 2 Pluviometro in plastica (www.raig.it).

I pluviometri digitali permettono di misurare sia le precipitazioni totali che la loro intensità. Possono essere integrati in stazioni meteorologiche automatiche o installati singolarmente, collegati elettricamente o in modalità wireless a una stazione centrale e il

³¹ (www.raig.it)

loro funzionamento si basa su un sistema di bilancio interno. La pioggia entra nel pluviometro attraverso l'area di apertura e viene convogliata tramite un imbuto fino al sistema di oscillazione. La pioggia raccolta causa sui bilancieri che oscillano e scaricano l'acqua. Ogni scarico corrisponde a un registro di precipitazione, solitamente di 0,2 mm, trasmesso elettricamente come segnale e registrato nel sistema di memorizzazione centrale. La frequenza indica l'intensità delle precipitazioni è espressa in mm/h. Il pluviometro si svuota automaticamente e continua a funzionare, registrando i dati senza accumulare acqua. Per un corretto funzionamento, è preferibile installare lo strumento su una superficie piana, se è inclinato il sistema non opererà correttamente. Inoltre, per prevenire oscillazioni causate dal vento, si consiglia di utilizzare cavi di tensione per le stazioni automatiche installate su pali di altezza superiore a 2 metri³².



Fig.3.1.6 3 Pluviometro digitale (www.raig.it).

³² (www.raig.it)

All'interno del quadro elettrico c'è un dispositivo, noto come data logger che raccoglie, memorizza ed elabora i dati provenienti da vari sensori. Grazie alla sua capacità di immagazzinare grandi quantità di dati, esso permette di avere una cronologia dettagliata delle condizioni meteorologiche, utile per analisi a lungo termine.

Inoltre, la stazione comprende anche un Barologger, cioè uno strumento di misurazione progettato per registrare le variazioni di pressione atmosferica con alta precisione, utilizzato principalmente per compensare le fluttuazioni della pressione atmosferica nelle misurazioni dei Levelogger. Misura la pressione atmosferica in unità di psi, kPa o mbar, fornendo dati essenziali per garantire la precisione delle letture del livello dell'acqua.



Fig.3.1.6 4 Solinst Barologger è uno strumento di misura utilizzato per registrare le variazioni della pressione barometrica. È progettato e prodotto da Solinst, un'azienda canadese specializzata in strumenti di monitoraggio ambientale.

3.1.7 Software

Qui di seguito verranno elencati i software utilizzati per l'elaborazione dei dati di temperatura e pressione delle stazioni di monitoraggio di Ancona, Svarchi, Osimo Monteragolo e Baraccola.

Excel

Microsoft Excel è un software di foglio di calcolo sviluppato da Microsoft, ampiamente utilizzato per gestire, analizzare e visualizzare dati. Offre una vasta gamma di funzionalità, tra cui tabelle pivot, grafici, strumenti di analisi dati, formule matematiche e statistiche, e macro per l'automazione di compiti ripetitivi. Grazie alla sua versatilità e potenza, è fondamentale in molti settori, dalla finanza all'ingegneria, dalla gestione dei progetti alla ricerca scientifica. Per quanto riguarda le elaborazioni dei dati climatici, è stato utilizzato per analizzare i dati mensili di temperature e precipitazioni per diverse località della provincia di Ancona. I dati raccolti sono stati inseriti in fogli di calcolo dove sono state applicate formule per calcolare medie e somme, infine, l'uso di grafici pivot ha permesso di visualizzare le tendenze climatiche e di facilitare l'interpretazione dei risultati³³.

Thornthwaite-Mather App

Thornthwaite-Mater è un'applicazione web utilizzata per il calcolo del bilancio idrico, utile per la gestione delle risorse. Questo metodo stima il bilancio tra l'acqua entrante, proveniente dalle precipitazioni, e l'acqua uscente attraverso l'evapotraspirazione, il rifornimento delle falde acquifere e il deflusso dei corsi d'acqua³⁴.

³³ (www.microsoft.com)

³⁴ (<http://thornwaterbalance.com/index.html>)

Un elemento chiave di questo modello è rappresentato dall'evapotraspirazione, che gioca un ruolo cruciale nel ciclo dell'acqua. Essa si riferisce alla quantità di acqua che viene trasferita nell'atmosfera attraverso processi di evaporazione dagli specchi d'acqua, dal suolo, dalla vegetazione e dalla traspirazione delle piante. In particolare, si distingue l'evapotraspirazione potenziale (PET) che rappresenta il massimo volume di acqua trasferibile in vapore in condizioni ideali, ossia senza limitazioni legate alla disponibilità d'acqua nel terreno. La PET, calcolata utilizzando il metodo Thornthwaite, dipende da variabili climatiche come temperatura, umidità relativa e ore di luce solare giornaliera. Questo indicatore viene stimato su una griglia regolare a risoluzione di 1km che copre l'intero territorio nazionale e costituisce la base per i modelli di stima dell'evapotraspirazione reale (AET). La differenza tra PET e AET determina il cosiddetto "deficit idrico", ovvero la quantità di acqua mancante per il pieno sviluppo delle coltivazioni e della vegetazione, che può essere compensata con l'irrigazione.

Nel contesto dell'evapotraspirazione, la differenza tra le precipitazioni totali (P) e la PET, indicata con P-PET, fornisce un'indicazione sulla disponibilità di acqua nel suolo rispetto a quanto viene perso per evapotraspirazione. Quando P-PET è positivo, significa che le precipitazioni superano l'evapotraspirazione potenziale, suggerendo che ci sia un surplus d'acqua disponibile per ricaricare le falde acquifere, mantenere l'umidità del suolo, e supportare la vegetazione. Al contrario, un valore negativo indica che la PET è maggiore, segnalando un deficit idrico che potrebbe portare a condizioni di stress per la vegetazione, a meno che non venga compensato da altre fonti d'acqua come l'irrigazione.

Il concetto di stoccaggio dell'umidità del suolo (ST) si riferisce alla quantità di acqua immagazzinata nel suolo, che può essere utilizzata dalle piante per la traspirazione e che

contribuisce alla sostenibilità dell'ecosistema locale. Il suolo agisce come una spugna, assorbendo l'acqua dalle precipitazioni o dall'irrigazione e trattenendola negli spazi porosi tra le particelle del terreno. Quest'acqua immagazzinata viene utilizzata dalle piante attraverso le radici per la traspirazione e può anche evaporare direttamente dalla superficie del suolo. Lo stoccaggio dell'umidità del suolo varia in base a diversi fattori, tra cui:

- Tipo di suolo: i suoli sabbiosi, ad esempio, hanno una bassa capacità di trattenere l'acqua rispetto ai suoli argillosi, che possono immagazzinarla di più grazie alla loro struttura fine e alla maggiore capacità di ritenzione idrica.
- Profondità del suolo: suoli più profondi hanno un maggiore volume di stoccaggio rispetto a quelli più superficiali, poiché possono contenere più acqua nei loro strati.
- Precipitazioni e irrigazione: la quantità di acqua immagazzinata dipende dalle precipitazioni ricevute o dall'acqua fornita tramite irrigazione, più piove o più si irriga, maggiore sarà la quantità d'acqua stoccata nel suolo, fino al raggiungimento della capacità massima dove si avrà un eccesso.
- Tasso di evapotraspirazione: questo influisce sulla velocità con cui l'acqua viene rimossa dal suolo.

Per comprendere appieno la dinamica idrologica di una regione, è essenziale considerare anche il concetto di riserva d'acqua (S). Le riserve d'acqua rappresentano la quantità totale immagazzinata in un sistema, che può essere naturale o artificiale. Queste si manifestano in diverse forme all'interno del ciclo idrogeologico:

- Riserva d'acqua superficiale: si riferisce all'acqua presente nei laghi, fiumi, bacini artificiali, serbatoi e stagni. Queste riserve sono fondamentali per

l'approvvigionamento idrico, l'irrigazione agricola, la produzione di energia idroelettrica e molti altri usi.

- Riserva d'acqua sotterranea: comprende l'acqua immagazzinata nelle falde acquifere sotterranee, che risulta particolarmente preziosa durante i periodi di siccità, quando le riserve superficiali potrebbero essere insufficienti.
- Riserva d'acqua nel suolo: si riferisce all'acqua trattenuta nei pori del suolo, essenziale per la crescita delle piante.
- Riserve d'acqua glaciale e nevosa: queste riserve, costituite da calotte glaciali, ghiacciai e depositi di neve stagionale, rappresentano fonti d'acqua che, attraverso lo scioglimento, alimentano i flussi dei fiumi e laghi, specialmente durante i mesi estivi.

Un altro parametro importante è il deflusso superficiale (RO) che rappresenta l'acqua che scorre sulla superficie terrestre dopo eventi di precipitazione, scioglimento della neve o altri apporti idrici, quando la capacità di infiltrazione del suolo viene superata. Serve per comprendere come l'acqua si distribuisce e si muove all'interno di un ecosistema, poiché indica la quantità che non viene assorbita dal suolo e che invece contribuisce ai flussi nei fiumi, laghi e bacini idrografici. Il deflusso si verifica quando le precipitazioni eccedono la capacità del suolo di trattenere l'acqua, o quando il suolo è già saturo. La gestione del RO è essenziale per prevenire fenomeni di inondazione, specialmente in contesti urbani o agricoli dove l'impermeabilizzazione del suolo riduce la capacità di assorbimento del terreno. Invece tot RO si riferisce al deflusso superficiale totale, che rappresenta la quantità complessiva di acqua che scorre sulla superficie risultante dalla combinazione di diversi

processi idrologici. Questo totale include non solo il deflusso diretto derivante dalle precipitazioni, ma anche dal contributo del SMRO, ovvero l'acqua che defluisce una volta che il suolo ha raggiunto la saturazione. Questo valore è influenzato da diversi fattori. Le precipitazioni, soprattutto quando sono intense e prolungate, tendono ad aumentare il tot RO, superando la capacità del suolo di assorbire acqua. Se il suolo è già saturo o vicino alla saturazione, un ulteriore apporto di precipitazioni si traduce in un aumento del deflusso. Anche le caratteristiche del terreno e della vegetazione incidono, ad esempio, i terreni con bassa capacità di infiltrazione, come quelli argillosi, e le aree con scarsa copertura vegetale, tendono a generare un tot RO più elevato. Infine, nelle aree urbane, la presenza di superfici impermeabili, come strade e edifici, riduce la capacità del suolo di assorbire acqua contribuendo così ad aumentare il deflusso.

In conclusione, SMRO è l'acronimo di "Soil Moisture Runoff", ovvero il deflusso causato dall'umidità del suolo. Quando il suolo ha assorbito tutta l'acqua che può trattenere, quella in eccesso non può più infiltrarsi e inizia a defluire. Questo tipo di deflusso è legato alla capacità del suolo di trattenere l'acqua e si verifica generalmente durante periodi di forti piogge o dopo lo scioglimento della neve, quando l'umidità del suolo è già elevata.

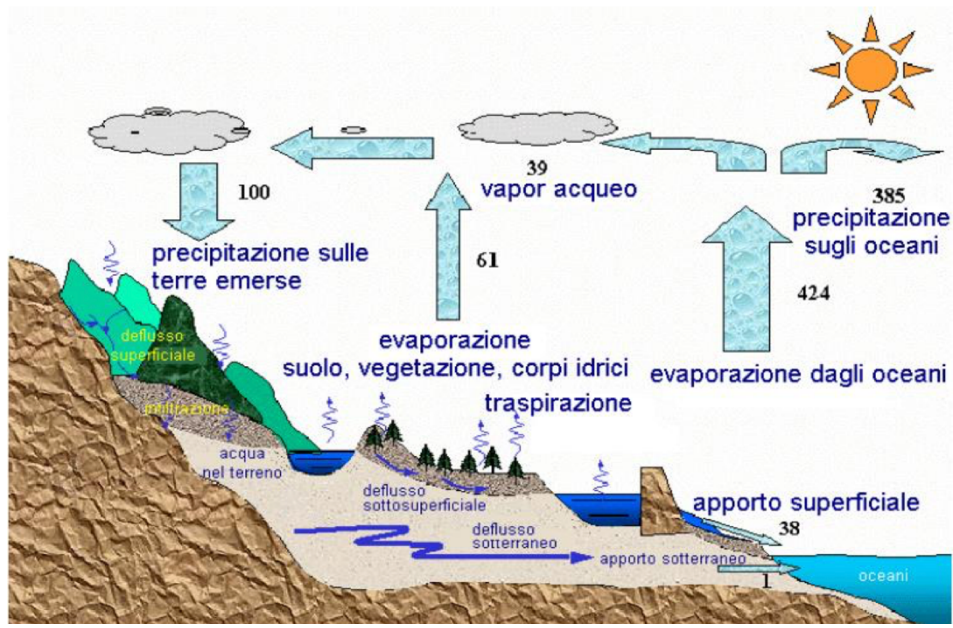


Fig. 1.3.7 1 L'immagine rappresenta il ciclo idrogeologico, che illustra il movimento continuo dell'acqua tra la superficie terrestre, l'atmosfera e il sottosuolo. L'acqua evapora dagli oceani e dalle terre emerse, si condensa formando nubi e precipita sotto forma di pioggia o neve. Le precipitazioni possono infiltrarsi nel suolo, ricaricando le falde acquifere, o defluire verso fiumi e oceani. Questo ciclo chiuso è essenziale per mantenere l'equilibrio idrico globale e per la gestione sostenibile delle risorse idriche (www.unirc.it).

RISULTATI

Questo capitolo presenta un'analisi approfondita dei risultati ottenuti attraverso l'elaborazione dei dati relativi a diverse stazioni di misura ubicate in diverse località attorno ad Ancona: Ancona Regione, Osimo Monteragolo, Svarchi e Baraccola, utilizzando strumenti come Excel e il modello idrogeologico di Thorntwaite-Mather. Sebbene queste stazioni siano limitrofi e caratterizzate da condizioni climatiche simili, l'analisi dettagliata dei dati consente di evidenziare sottili differenze nelle dinamiche idrogeologiche specifiche di ciascuna località.

4.1 Risultati di applicazione del bilancio alle singole stazioni

Attraverso l'utilizzo di grafici verranno illustrati i principali parametri esaminati, tra cui l'evapotraspirazione potenziale ed effettiva, lo stoccaggio idrico del suolo e il deflusso superficiale. Questi risultati offrono una visione integrata delle interazioni tra precipitazioni, temperatura e disponibilità d'acqua, fornendo una base solida per comprendere il bilancio della zona.

ANCONA REGIONE

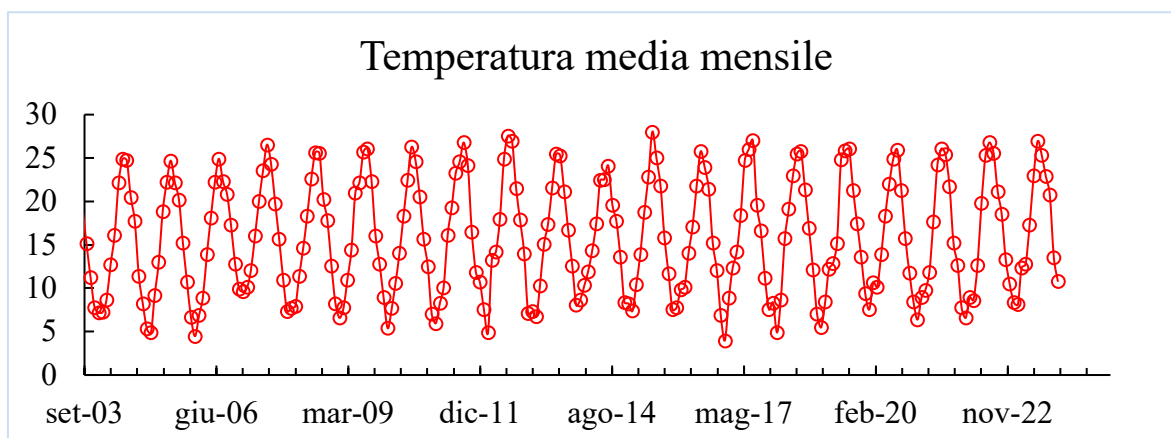


Grafico 4.1 1 Mostra l'andamento della temperatura media mensile dal settembre 2003 al dicembre 2023, con cicli stagionali che oscillano tra circa 5°C e 30°C.

Il grafico 4.1 1, elaborato tramite Excel, rappresenta l'andamento delle temperature medie mensili registrate presso la stazione meteorologica di Ancona, coprendo un periodo compreso tra settembre 2003 e dicembre 2023. Questo diagramma a linee evidenzia le fluttuazioni stagionali tipiche di un clima temperato, mostrando chiaramente i picchi di temperatura durante i mesi estivi e i minimi nei mesi invernali.

La sequenza ciclica delle temperature, con oscillazioni regolari tra estate e inverno, riflette una dinamica stagionale consolidata, caratteristica delle condizioni climatiche locali. Tuttavia, l'elemento di maggior rilievo è l'apparente assenza di una tendenza marcata. Nel corso dei quasi vent'anni di osservazione, non si rileva un aumento o una diminuzione significativa delle temperature medie, suggerendo una stabilità termica a lungo termine in quest'area specifica. La stabilità potrebbe essere dovuta a una complessa interazione tra variabilità naturale e influenze locali, come la prossimità al mare, le caratteristiche orografiche e le correnti atmosferiche regionali.

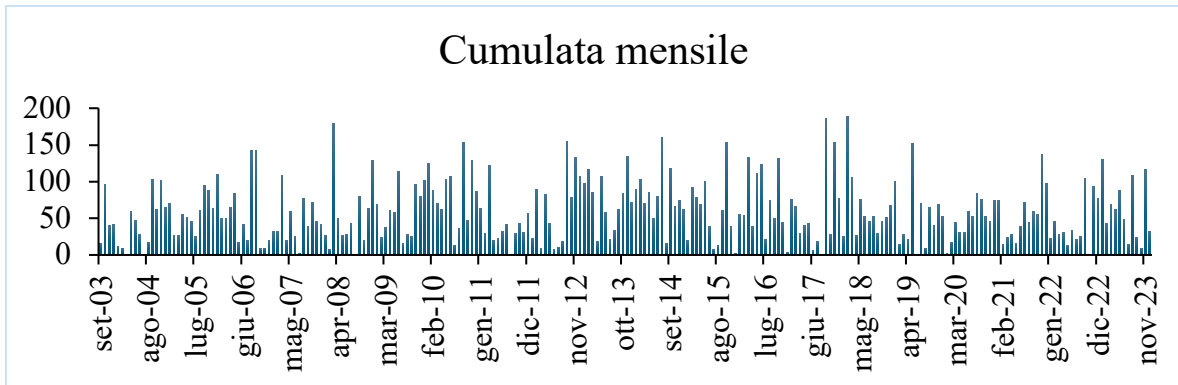


Grafico 4.1 2 Mostra l'andamento delle precipitazioni mensili dal settembre 2003 al dicembre 2023, con valori variabili che mostrano picchi sporadici superiori a 150 mm in corrispondenza di eventi piovosi intensi.

Il grafico 4.1.2 rappresenta le precipitazioni medie mensili registrate presso la stazione meteorologica di Ancona. Le barre verticali indicano la quantità di pioggia (in millimetri) accumulata durante ciascun mese.

Osservando il grafico, si nota una notevole variabilità nella distribuzione delle precipitazioni mensili nel corso degli anni. Alcuni mesi mostrano picchi di precipitazione significativi, con valori che superano i 100 mm, mentre in altri mesi sono molto più ridotte o addirittura quasi assenti.

Non emerge un modello stagionale chiaro come nel caso delle temperature medie mensili; le precipitazioni sembrano distribuite in modo irregolare nel corso dell'anno e degli anni. Tuttavia, si possono notare periodi di maggiore aridità, dove le barre sono più basse e ravvicinate, seguite da mesi in cui si verificano eventi di pioggia più intensi.

L'analisi di questo grafico è cruciale per comprendere le dinamiche idrogeologiche della regione di Ancona, in particolare in relazione alla gestione delle risorse idriche e alla pianificazione di strategie di mitigazione dei rischi.

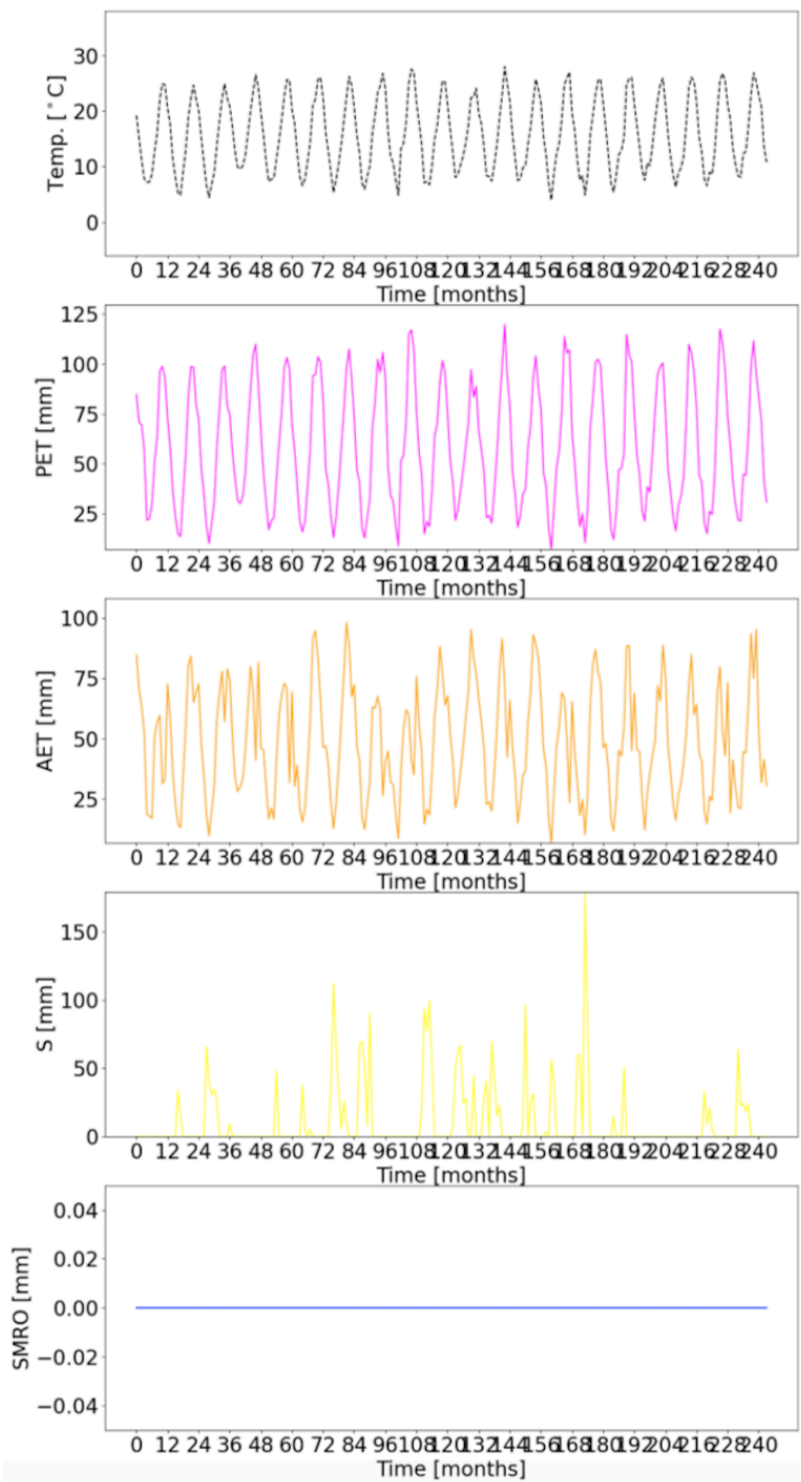


Grafico 4.1 3 Mostra l'andamento mensile delle variabili idrologiche: temperatura media, evapotraspirazione potenziali, evapotraspirazione reale, riserva idrica del suolo e deflusso da saturazione del suolo. I grafici evidenziano le oscillazioni stagionali e le interazioni tra clima e disponibilità idrica nel tempo.

I grafici elaborati con l'applicazione Thornthwaite-Mather rappresentano una serie di dati raccolti su un periodo di 20 anni e offrono una visione dettagliata di vari parametri cruciali come temperatura, precipitazioni, evapotraspirazione e deflusso superficiale. Quest'ultimi sono fondamentali per prevedere e mitigare eventi estremi come alluvioni, frane e siccità.

Di seguito una descrizione di ciascun grafico 4.1 3:

1. Temperatura (Temp) [°C]: il grafico della temperatura media mensile mostra una serie di oscillazioni regolari che rappresentano il ciclo stagionale di Ancona. Le temperature variano tipicamente tra valori minimi di circa 5°C durante i mesi invernali (gennaio e febbraio) e valori massimi intorno ai 25-30°C nei mesi estivi (luglio e agosto). Questo modello ciclico evidenzia la natura temperata del clima di Ancona, con inverni miti ed estati calde. Le oscillazioni sono regolari, segnalando una stabilità climatica nel corso degli anni senza evidenti tendenze di riscaldamento o raffreddamento a lungo termine.
2. Evapotraspirazione Potenziale (PET) [mm]: la PET rappresenta la quantità massima di acqua che potrebbe essere persa per evaporazione e traspirazione in condizioni ideali di disponibilità idrica. Il grafico mostra uno schema che segue strettamente quello delle temperature. Nei mesi estivi del 2017, la PET raggiunge valori elevati, spesso oltre i 100 mm, mentre in quelli invernali, come nell'anno 2014, scende sotto i 25 mm. Questo riflette l'aumento della domanda evaporativa durante i periodi caldi, quando l'energia solare è più intensa.
3. Evapotraspirazione effettiva (AET) [mm]: il grafico dell'AET mostra la quantità reale di acqua che viene evaporata e traspirata dal suolo e dalla vegetazione.

Rispetto alla PET, l'AET presenta una maggiore instabilità, riflettendo fluttuazioni nella disponibilità idrica. Nei mesi con abbondanti precipitazioni, l'AET può avvicinarsi ai valori della PET, mentre nei periodi secchi è limitata dall'acqua disponibile nel suolo. Questo diagramma serve per capire quanto della potenziale evapotraspirazione si realizza effettivamente, influenzando l'umidità del suolo e la salute della vegetazione. Anni come il 2012 mostrano una discrepanza notevole, con AET che rimane bassa nonostante l'alta PET, segnalando una scarsità d'acqua disponibile nel suolo. In anni di siccità, l'AET è limitata dalla disponibilità di acqua, mostrando valori più bassi nonostante la domanda evaporativa elevata. Questo è evidente nel 2017, quando l'AET è particolarmente bassa durante l'estate.

4. Stock o riserva d'acqua (S) [mm]: il grafico S mostra lo stoccaggio o la riserva d'acqua nel sistema idrologico. Questo valore fluttua in risposta a periodi di pioggia e siccità, riflettendo la capacità del suolo e delle riserve idriche di trattenere o rilasciare acqua. Per Ancona, il monitoraggio di questa riserva è fondamentale per la gestione delle risorse a lungo termine, garantendo la disponibilità d'acqua durante i periodi secchi e mitigando i rischi durante i periodi di abbondanza.
5. Contenuto di umidità del suolo (SMRO) [mm]: il contenuto di umidità del suolo è rappresentato come una linea stabile, suggerendo che nel periodo osservato non ci sono state grandi fluttuazioni. Tuttavia, questo potrebbe indicare un approccio semplificato nella modellazione dei dati o una mancanza di variazioni significative rilevate durante il periodo di studio. La stabilità dell'umidità è importante per prevenire fenomeni di desertificazione o, al contrario, di saturazione e conseguente rischio frane.

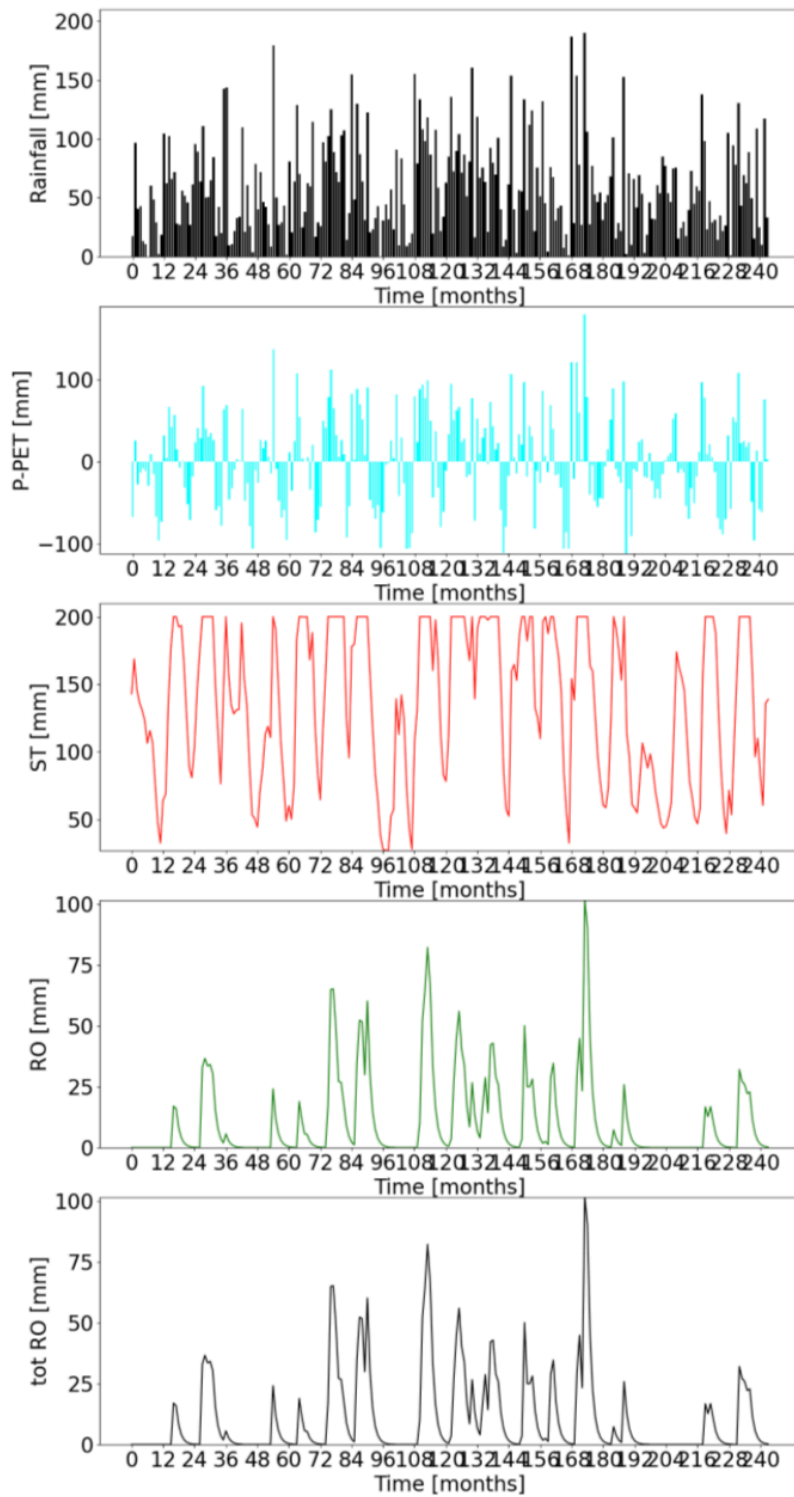


Grafico 4.1 4 Mostra l'andamento delle variabili idrologiche: precipitazioni, bilancio idrico netto, stoccaggio dell'umidità del suolo, deflusso superficiale e deflusso superficiale totale.

Il grafico 4.1 4 illustra l'interazione tra apporti idrici, evapotraspirazione, capacità di stoccaggio del suolo e deflusso, evidenziando l'equilibrio tra disponibilità e perdita d'acqua nel sistema locale.

1. Precipitazioni (Rainfall) [mm]: il grafico delle precipitazioni mensili per Ancona evidenzia una notevole variabilità, con mesi caratterizzati da intense precipitazioni e altri molto più secchi. Ci sono anni, come il 2014 e il 2018, dove si osservano picchi di pioggia che superano i 150 mm in alcuni mesi. Questi possono essere associati a eventi di precipitazioni intensi o temporali, che possono causare allagamenti e incrementare il rischio idrogeologico. In contrasto, si osservano periodi di siccità prolungata, con mesi di precipitazioni quasi nulle, come nel 2011 e nel 2017, andando a causare stress idrico e problemi di approvvigionamento.
2. Differenza tra precipitazioni e PET (P-PET) [mm]: questo grafico rappresenta la differenza tra precipitazioni e PET, mostrando l'equilibrio idrico mensile. Valori positivi indicano mesi in cui le piogge superano la PET, suggerendo un potenziale accumulo d'acqua nel suolo; questo è particolarmente evidente in anni come il 2014, suggerendo condizioni favorevoli per la ricarica delle riserve. Mentre, valori negati indicano che la PET supera le precipitazioni, segnalando un deficit idrico; questo riguarda anni come il 2007 e 2017, indicando un potenziale rischio di siccità.
3. Stoccaggio del suolo (ST) [mm]: il grafico illustra le fluttuazioni nella quantità d'acqua immagazzinata nel terreno. Si osservano picchi di stoccaggio dopo periodi di pioggia intensa e una diminuzione in quelli secchi o con alta evapotraspirazione. Serve per comprendere la capacità del suolo di trattenere l'acqua, un fattore

determinante per la prevenzione di fenomeni come frane e smottamenti. Anni come il 2014 mostrano picchi elevati, seguiti da un rapido declino, il che suggerisce che il suolo si satura velocemente e poi si asciuga altrettanto rapidamente. Durante periodi di siccità, come nel 2017, lo stoccaggio del suolo raggiunge minimi molto bassi, indicando una riduzione significativa dell'umidità del suolo, che potrebbe contribuire a fenomeni di desertificazione e aumentare il rischio di erosione del suolo.

4. Deflusso superficiale (RO) [mm]: il grafico mostra i momenti in cui l'acqua non viene assorbita dal suolo e scorre sulla superficie. Ad Ancona, il deflusso tende ad aumentare bruscamente durante i periodi di piogge intense, come nel 2014 e 2018, che possono superare la capacità di infiltrazione del suolo. I picchi di deflusso sono chiaramente visibili e sono indicativi del rischio inondazioni, soprattutto in aree urbane dove l'impermeabilità del suolo è maggiore. Durante periodi secchi, come il 2017, il deflusso superficiale è minimo, riflettendo la scarsità di piogge e l'alta capacità del suolo di assorbire l'acqua disponibile.
5. Totale del deflusso superficiale (tot RO) [mm]: il grafico del deflusso superficiale totale cumula l'acqua che scorre sulla superficie nel tempo. Questo è particolarmente utile per capire l'accumulo a lungo termine del deflusso superficiale. Nel contesto di Ancona, elevati valori cumulativi suggeriscono un aumento del rischio di alluvioni e sottolineano l'importanza di infrastrutture adeguate alla gestione delle acque piovane.

BARACCOLA

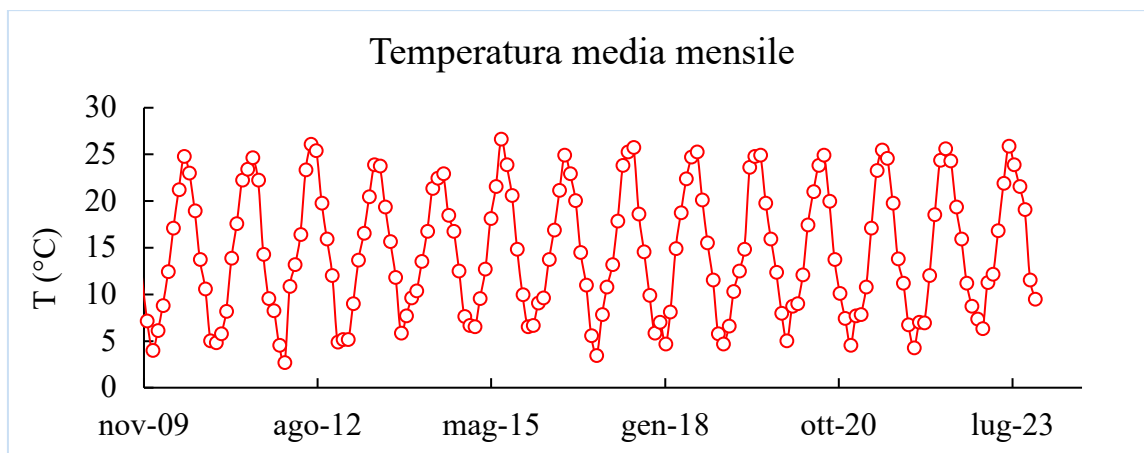


Grafico 4.1 5 Mostra l'andamento della temperatura media mensile da novembre 2009 a dicembre 2023 registrata nella stazione di Baraccola, con valori che oscillano tra 5°C e 28°C.

Il grafico 4.1 5 rappresenta la temperatura media mensile registrata presso la stazione di Baraccola, coprendo un periodo che va da novembre 2009 a dicembre 2023. Le temperature mostrano un chiaro ciclo stagionale, con valori che oscillano regolarmente tra minimi invernali intorno ai 5°C e minimi stagionali estivi che raggiungono circa 25-28°C.

Osservando l'andamento delle temperature, si nota che gli inverni tendono a rimanere stabili attorno ai valori minimi tipici della stagione fredda, mentre le estati mostrano picchi che variano leggermente da un anno all'altro. Alcune estati, come quelle del 2015 e del 2019, sembrano essere leggermente più calde, con temperature che raggiungono valori più vicini ai 28°C. tuttavia, non ci sono evidenze di una tendenza crescente o decrescente nel lungo periodo, suggerendo che il clima della zona di Baraccola rimane stabile nel periodo osservato.

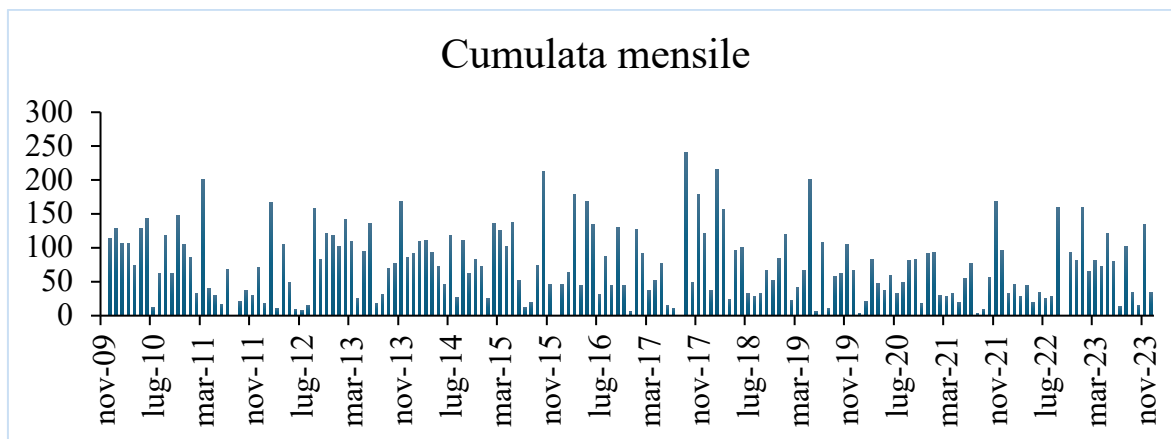


Grafico 4.1 6 Mostra l'andamento delle precipitazioni mensili da novembre 2009 a dicembre 2023, con valori variabili che mostrano picchi superiori a 150 mm in corrispondenza di eventi piovosi.

Il grafico 4.1 6 mostra la cumulata mensile delle precipitazioni registrate presso la stazione di Baraccola. Dal grafico, emerge una notevole variabilità nelle precipitazioni mensili, con alcuni mesi che registrano accumuli significativamente elevati, superiori a 150 mm, mentre altri mesi mostrano precipitazioni molto basse o addirittura nulle. Questa variabilità è tipica delle regioni temperate, dove le precipitazioni possono essere distribuite in modo irregolare nel corso dell'anno.

Si osservano picchi di precipitazioni particolarmente elevati in mesi come novembre 2013, settembre 2015 e novembre 2016, dove le precipitazioni superano i 200 mm. Questi picchi indicano la presenza di eventi meteorologici intensi, come temporali o perturbazioni prolungate, che possono aver portato a un accumulo rapido di acqua. Al contrario, ci sono periodi di siccità o precipitazioni molto basse, come nei mesi di agosto 2011, maggio 2014 e febbraio 2017, dove gli accumuli sono inferiori a 50 mm.

Il grafico 4.1 6 mostra anche una certa stagionalità, con i mesi autunnali e invernali che tendono a registrare accumuli più elevati rispetto ai mesi estivi, che sono generalmente più

secchi. Tuttavia, questa stagionalità non è rigida, poiché ci sono esempi di mesi estivi o primaverili con precipitazioni significative, come luglio 2014 e aprile 2016.

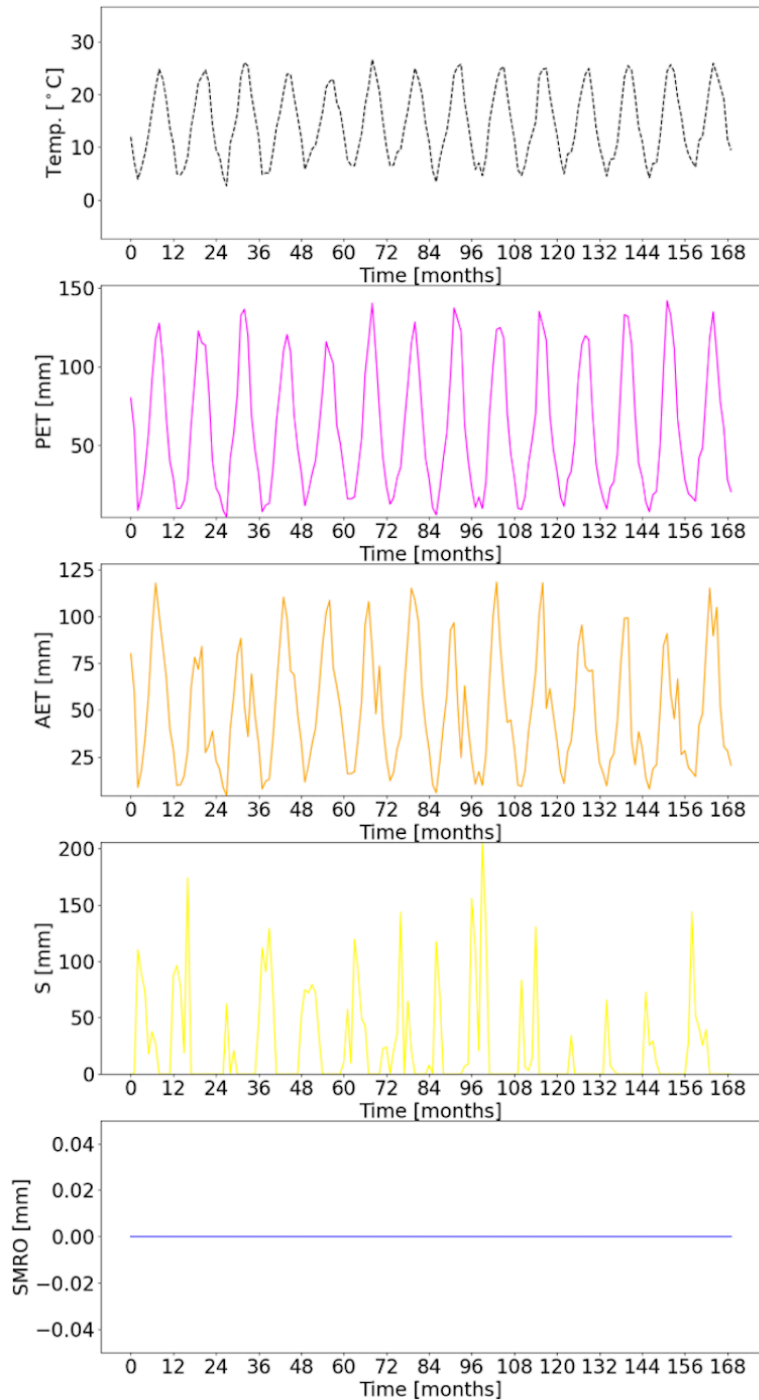


Grafico 4.1 7 Mostra l'andamento mensile delle variabili idrologiche: temperatura media, evapotraspirazione potenziali, evapotraspirazione reale, riserva idrica del suolo e deflusso da

saturazione del suolo. I grafici evidenziano le oscillazioni stagionali e le interazioni tra clima e disponibilità idrica nel tempo.

Ecco un'analisi del grafico 4.1 7 relativo alla zona della Baraccola:

1. Temperatura (Temp) [mm]: il grafico della temperatura media mensile nella zona della Baraccola evidenzia un ciclo stagionale regolare, tipico di un clima temperato, con temperature che oscillano tra circa 5°C nei mesi invernali e fino a 30°C nei mesi estivi. Questa stabilità nel ciclo annuale suggerisce una relativa costanza climatica nel corso dei 20 anni osservati. Tuttavia, si notano estati particolarmente calde, come nel 2006 e nel 2013, dove le temperature hanno superato i 30°C, indicando la presenza di ondate di calore. Anche gli inverni mostrano variazioni, con alcune stagioni invernali, come nel 2005 e nel 2014, caratterizzate da minimi termici meno severi, intorno ai 10°C.
2. Evapotraspirazione potenziale (PET) [mm]: il grafico dell'evapotraspirazione potenziale segue da vicino l'andamento delle temperature, mostrando valori elevati durante i mesi estivi, soprattutto in anni come il 2006 e il 2013, dove la PET ha raggiunto picchi tra 125 e 150 mm. Questa elevata domanda evaporativa, se non bilanciata da adeguate precipitazioni, può contribuire a condizioni di siccità, aggravando lo stress idrico nella zona. La PET durante i mesi invernali, invece, è molto più bassa, come ci si aspetta in un clima temperato, con valori che scendono sotto i 25 mm.
3. Evapotraspirazione effettiva (AET) [mm]: il grafico mostra una variabilità che dipende dalla disponibilità di acqua nel suolo. Nei periodi secchi, come nel 2007 e

nel 2012, l'AET è inferiore alla PET, il che suggerisce che il suolo non aveva sufficiente umidità per soddisfare la domanda evaporativa, portando a uno stress idrico. Durante i periodi più umidi, come nel 2010 e nel 2015, l'AET è più elevata e si avvicina ai valori della PET, indicando una buona disponibilità idrica nel suolo, sufficiente a supportare la vegetazione e i processi evaporativi.

4. Stock o riserva d'acqua (S) [mm]: il grafico mostra fluttuazioni significative in risposta agli eventi di precipitazione e ai periodi secchi. Anni piovosi come il 2010 e il 2015 vedono un aumento della riserva d'acqua, che è cruciale per garantire la disponibilità di risorse idriche durante le stagioni più secche. Nei periodi secchi come il 2007 e il 2012, la riserva d'acqua si riduce notevolmente, indicando un esaurimento delle risorse idriche, che potrebbe comportare difficoltà per l'approvvigionamento idrico e per l'agricoltura.
5. Contenuto di umidità del suolo (SMRO) [mm]: il grafico mostra una linea relativamente stabile nel corso dei vent'anni, suggerendo che, nonostante le variazioni stagionali nelle altre variabili, il contenuto di umidità nel suolo della Baraccola è rimasto in un range di equilibrio. Questa stabilità potrebbe riflettere una buona capacità di ritenzione idrica del suolo, che è importante per mantenere la vegetazione e ridurre l'erosione del suolo, soprattutto durante i periodi di siccità.

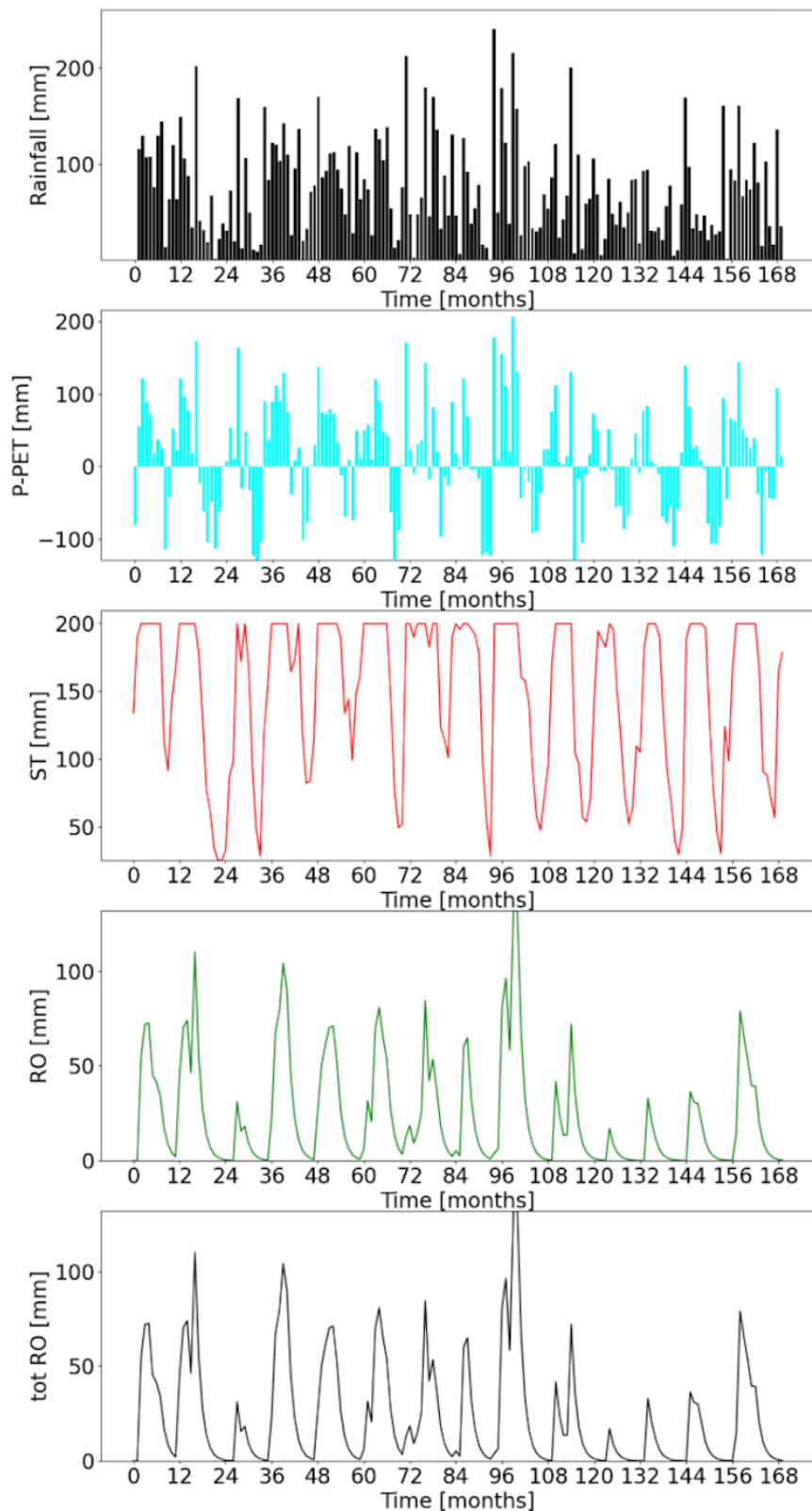


Grafico 4.1 8 Mostra l'andamento delle variabili idrologiche: precipitazioni, bilancio idrico netto, stoccaggio dell'umidità del suolo, deflusso superficiale e deflusso superficiale totale.

Analisi del grafico 4.1 8:

1. Precipitazioni (Rainfall) [mm]: il grafico delle precipitazioni mensili rivela una considerevole variabilità, con eventi di pioggia molto intensi registrati in anni come il 2004, il 2010 e il 2015, dove le precipitazioni hanno superato i 200 mm in alcuni mesi. Questi periodi di pioggia intensa sono indicativi di possibili alluvioni o temporali prolungati, che possono aumentare significativamente il rischio idrogeologico nella zona della Baraccola. Al contrario, gli anni 2007 e 2011 sono caratterizzati da mesi con piogge molto basse, suggerendo la possibilità di periodi di siccità prolungata, che potrebbe avere un impatto negativo sulle risorse idriche e sull'agricoltura locale.
2. Differenza tra precipitazioni e PET (P-PET) [mm]: il grafico che rappresenta la differenza tra precipitazioni e PET evidenzia chiaramente i periodi di surplus e deficit idrico. Anni come il 2007 e il 2012 mostrano un netto deficit idrico, con la PET che supera la pioggia, segnalando condizioni di aridità che potrebbero aver avuto conseguenze negative per l'agricoltura e gli ecosistemi locali. Al contrario, gli anni 2010 e 2015 mostrano periodi di surplus idrico, in cui le precipitazioni hanno superato la PET, consentendo una ricarica delle riserve idriche del suolo.
3. Stoccaggio del suolo (ST) [mm]: il grafico mostra come il suolo della Baraccola risponde agli eventi di pioggia e ai periodi secchi. Durante gli anni piovosi come il 2010 e il 2015, si osserva un aumento significativo dello stoccaggio d'acqua nel suolo, che contribuisce alla ricarica delle falde e alla stabilità idrologica dell'area. Al contrario, negli anni secchi come il 2007 e il 2012, il livello di stoccaggio diminuisce drasticamente, riflettendo una ridotta capacità del suolo di trattenere

acqua, il che aumenta il rischio di degrado del suolo e riduzione della produttività agricola.

4. Deflusso superficiale (RO) [mm]: il deflusso superficiale nella zona della Baraccola aumenta durante i periodi di piogge intense, come nel 2004, 2010 e 2015, indicando che il suolo è stato saturato a tal punto che l'acqua non poteva più essere assorbita, causando un aumento del flusso superficiale. Questi picchi, come nel 2007 e nel 2012, il deflusso è notevolmente ridotto, riflettendo la scarsa quantità di precipitazioni e l'alta capacità di assorbimento del suolo.
5. Totale del deflusso superficiale (tot RO) [mm]: il grafico evidenzia come l'acqua si accumula sulla superficie durante gli eventi piovosi. In anni come il 2004, il 2010 e il 2015, si osserva un rapido aumento del deflusso cumulato, corrispondente ai periodi di piogge intense. Al contrario, nei periodi secchi come nel 2007 e nel 2012, l'accumulo di deflusso è molto più lento, indicando che gran parte dell'acqua piovana è stata assorbita dal suolo, riducendo così il rischio di inondazioni.

effetti sul comfort termico e sulla salute della popolazione locale. D'altra parte, non si osservano inverni particolarmente rigidi; le temperature medie invernali si mantengono generalmente sopra i 5°C, segnalando una moderata variabilità stagionale senza estremi climatici significativi.

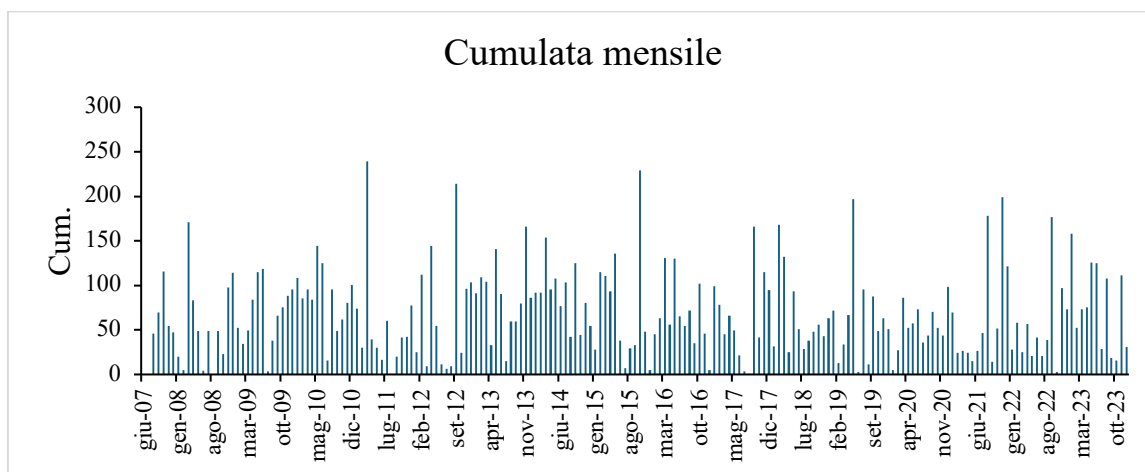


Grafico 4.1 10 Mostra l'andamento della cumulata mensile delle precipitazioni da giugno 2007 a dicembre 2023, con registrazione di accumuli notevoli, superiori a 150 mm.

Dal grafico 4.1 10 emerge una variabilità significativa nelle precipitazioni mensili, tipica delle regioni temperate. Alcuni mesi registrano accumuli notevoli, superiori a 150 mm, mentre altri mesi mostrano precipitazioni molto basse o quasi nulle. Questa distribuzione irregolare delle precipitazioni è caratteristica di un clima con marcate stagionalità, in cui i mesi invernali e autunnali tendono a essere più umidi rispetto ai mesi estivi. Picchi di precipitazioni particolarmente alti sono visibili nei mesi come dicembre 2010, dicembre 2014 e dicembre 2019, dove gli accumuli superano i 200 mm. Questi valori suggeriscono la presenza di eventi meteorologici intensi, come perturbazioni prolungate o temporali

violenti, che possono avere un impatto significativo sul territorio, aumentando il rischio di alluvioni e erosione del suolo. Al contrario, ci sono periodi di bassa precipitazione, con accumuli inferiori a 50 mm, particolarmente evidenti nei mesi estivi e in alcuni inverni secchi come quelli del 2007, 2012 e 2017. Questi periodi possono essere associati a condizioni di siccità, che potrebbero influenzare negativamente l'approvvigionamento idrico e le attività agricole della zona. In generale, il grafico mostra che, nonostante la presenza di alcuni mesi con precipitazioni eccezionalmente alte, la distribuzione delle piogge a Osimo Monteragolo è piuttosto variabile, con la tendenza verso precipitazioni più abbondanti durante i mesi invernali e autunnali.

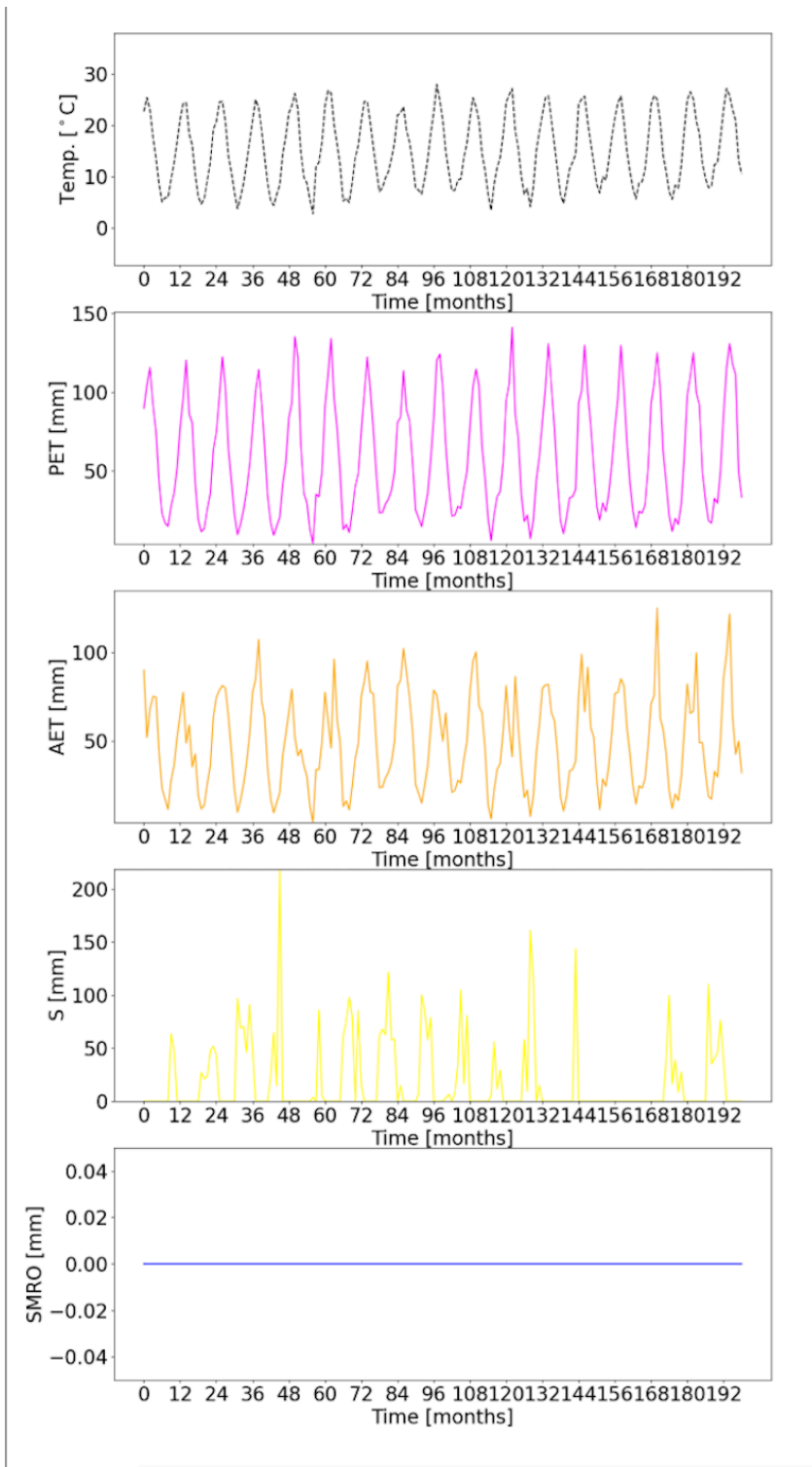


Grafico 4.1 11 Mostra l'andamento mensile delle variabili idrologiche: temperatura media, evapotraspirazione potenziali, evapotraspirazione reale, riserva idrica del suolo e deflusso da saturazione del suolo. I grafici evidenziano le oscillazioni stagionali e le interazioni tra clima e disponibilità idrica nel tempo.

Ecco un'analisi del grafico 4.1 11 relativo alla zona di Osimo Monteragolo:

1. Temperatura (Temp) [°C]: il grafico della temperatura media mensile per la zona di Osimo Monteragolo segue un ciclo stagionale tipico di un clima temperato. Le temperature oscillano tra circa 5°C nei mesi invernali e 30°C nei mesi estivi, e questa oscillazione osservata nell'arco di circa 16 anni, indica una stabilità climatica. Tuttavia, come nelle altre località della regione, si notano estati particolarmente calde in alcuni anni, come nel 2006 e nel 2013, con picchi che superano i 30°C, suggerendo la presenza di ondate di calore. Gli inverni, sebbene generalmente miti, mostrano variazioni, con alcune stagioni che presentano temperature minime meno rigide, intorno ai 10°C, come nel 2005 e nel 2014, segnalando la possibilità di inverni più caldi del solito.
2. Evapotraspirazione potenziale (PET) [mm]: l'evapotraspirazione potenziale segue un modello che rispecchia strettamente l'andamento delle temperature, con valori elevati durante i mesi estivi, in particolare negli anni 2006 e 2013, dove la PET raggiunge picchi tra i 125 e i 150 mm. Questo indica una forte domanda evaporativa nei mesi più caldi, e se non adeguatamente bilanciata da precipitazioni, potrebbe portare a condizioni di siccità. Durante i mesi invernali, la PET scende drasticamente, riflettendo le minori esigenze evaporative tipiche di questa stagione.
3. Evapotraspirazione effettiva (AET) [mm]: l'evapotraspirazione effettiva a Osimo Monteragolo mostra una significativa variabilità che riflette la disponibilità idrica del suolo. Durante gli anni, come il 2007 e il 2012, l'AET è molto inferiore alla PET, suggerendo che il suolo non aveva sufficiente umidità per soddisfare la domanda evaporativa, portando a condizioni di stress idrico. Nei periodi più umidi,

come il 2010 e il 2015, l'AET aumenta, avvicinandosi ai valori della PET, indicando che l'acqua disponibile nel suolo era sufficiente a supportare i processi evaporativi e la crescita vegetale.

4. Stock o riserva d'acqua (S) [mm]: il grafico evidenzia fluttuazioni significative in risposta agli eventi di precipitazione. Durante gli anni piovosi, come il 2010 e il 2015, si osserva un aumento della riserva d'acqua, il che è cruciale per garantire la disponibilità idrica durante i periodi secchi. Tuttavia, durante i periodi di siccità, come il 2007 e il 2012, la riserva d'acqua si riduce notevolmente, suggerendo un esaurimento delle risorse idriche nel suolo, che potrebbe comportare difficoltà per l'approvvigionamento idrico e l'agricoltura nella zona.
5. Contenuto di umidità del suolo (SMRO) [mm]: il grafico del contenuto di umidità mostra una linea costante, suggerendo che l'umidità del suolo è rimasta relativamente stabile nel corso del periodo osservato. Questa stabilità potrebbe riflettere una buona capacità del suolo di mantenere un equilibrio tra le precipitazioni ricevute e l'evapotraspirazione, oppure potrebbe indicare che il modello utilizzato per rilevare l'umidità del suolo non cattura le variazioni stagionali o locali più sottili.

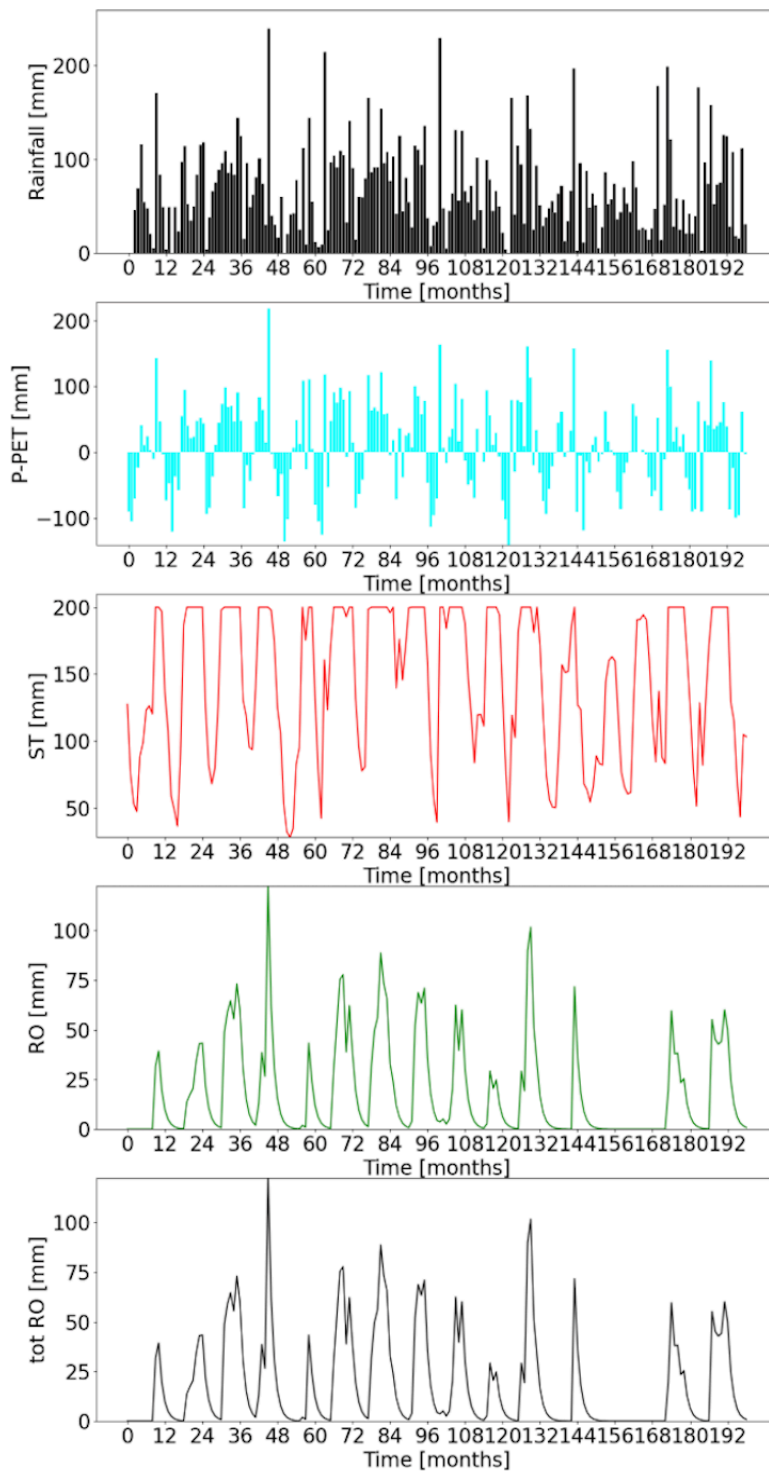


Grafico 4.1 12 Mostra l'andamento delle variabili idrologiche: precipitazioni, bilancio idrico netto, stoccaggio dell'umidità del suolo, deflusso superficiale e deflusso superficiale totale.

Analisi del grafico 4.1 12:

1. Precipitazioni (Rainfall) [mm]: il grafico delle precipitazioni mostra una notevole variabilità, con eventi di pioggia molto intensi in anno come il 2004, 2010 e 2015, dove le precipitazioni superano i 200 mm in alcuni mesi. Questi periodi di piogge intense possono essere associati a temporali violenti o perturbazioni prolungate, che incrementano il rischio di inondazioni e allagamenti nella zona. D'altra parte, anni come il 2007 e il 2011 mostrano mesi con precipitazioni ridotte.
2. Differenza tra precipitazioni e PET (P-PET) [mm]: la differenza nel grafico evidenzia chiaramente i periodi di surplus e deficit idrico. Nei mesi estivi, come nel 2007 e nel 2012, si osserva un marcato deficit idrico, con la PET che supera di gran lunga le precipitazioni, indicando condizioni di aridità che potrebbero aver influito negativamente sulla vegetazione e sulle riserve idriche locali. Anni come il 2010 e il 2015, al contrario, mostrano un aumento idrico, dove le precipitazioni superano la PET, favorendo la ricarica delle falde acquifere.
3. Stoccaggio del suolo (ST) [mm]: il grafico mostra come le riserve idriche del suolo a Osimo fluttuano in risposta alle precipitazioni ai periodi di siccità. In anni piovosi come il 2010 e il 2015, si osserva un significativo incremento dello stoccaggio d'acqua nel suolo, che è fondamentale per sostenere l'ecosistema e le attività agricole. Al contrario, durante i periodi secchi come nel 2007 e nel 2012, lo stoccaggio del suolo diminuisce drasticamente, segnalando una ridotta capacità di ritenzione idrica, che potrebbe esacerbare il rischio di degrado del suolo e riduzione della produttività agricola.

4. Deflusso superficiale (RO) [mm]: il deflusso superficiale mostra picchi evidenti durante i periodi di piogge intense, come nel 2004, 2010 e 2015, quando il suolo è stato probabilmente saturato a tal punto da non poter assorbire ulteriormente l'acqua, provocando un aumento del deflusso. Questi picchi sono particolarmente rilevanti per la gestione del rischio di inondazioni e per la pianificazione delle infrastrutture di drenaggio. Durante i periodi secchi, come nel 2007 e nel 2012, il deflusso è minimo, indicando che l'acqua piovana è stata assorbita quasi completamente dal suolo, riducendo così il rischio di allagamenti.

5. Totale del deflusso superficiale (tot RO) [mm]: il grafico illustra come l'acqua si accumula sulla superficie durante gli eventi di pioggia. In anni come 2004, 2010 e 2015, il deflusso cumulato aumenta rapidamente, indicando un periodo di forte precipitazione e una conseguente saturazione del suolo. Al contrario, nel 2007 e 2012, il deflusso cumulato cresce molto lentamente, suggerendo che l'acqua piovana è stata in gran parte assorbita dal suolo, contribuendo a ricaricare le riserve idriche sotterranee piuttosto che a scorrere in superficie.

SVARCHI

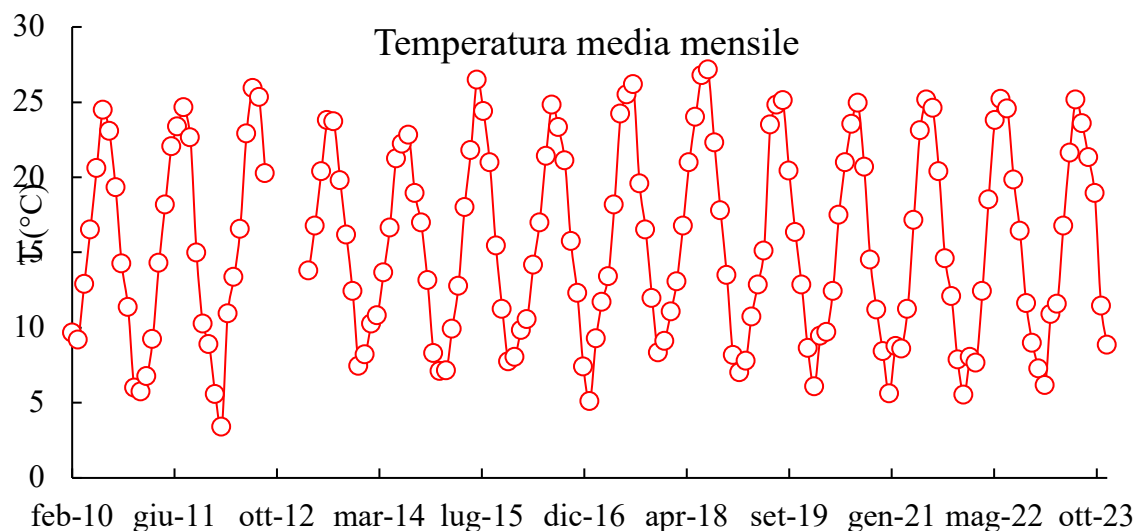


Grafico 4.1 13 Mostra l'Andamento della temperatura media mensile registrata presso la stazione di Svarchi, nel periodo che va da febbraio 2010 a dicembre 2023.

Il grafico 4.1 13 mostra l'andamento della temperatura media mensile registrata presso la stazione di Svarchi, coprendo un periodo che va da febbraio 2010 a dicembre 2023. Le temperature seguono un chiaro schema stagionale, tipico del clima temperato, con variazioni regolari tra minimi invernali e massimi estivi.

Le temperature medie invernali si aggirano intorno ai 5°C, mentre i mesi estivi vedono un aumento delle temperature che spesso raggiungono e superano i 25°C. questo ciclo stagionale è evidente lungo tutto il periodo osservato, con picchi estivi e minimi invernali che si ripetono annualmente. Non si notano cambiamenti drastici o tendenze significative che suggeriscano un riscaldamento o un raffreddamento a lungo termine, indicando una relativa stabilità del clima nella zona di Svarchi. Tuttavia, si osservano alcune estati più calde rispetto ad altre, come quelle del 2015, 2017 e 2022, dove le temperature

raggiungono i 27-28°C. questi picchi possono indicare la presenza di ondate di calore più intense durante questi anni. Al contrario, gli inverni rimangono generalmente miti, con rare fluttuazioni che scendono sotto i 5°C.

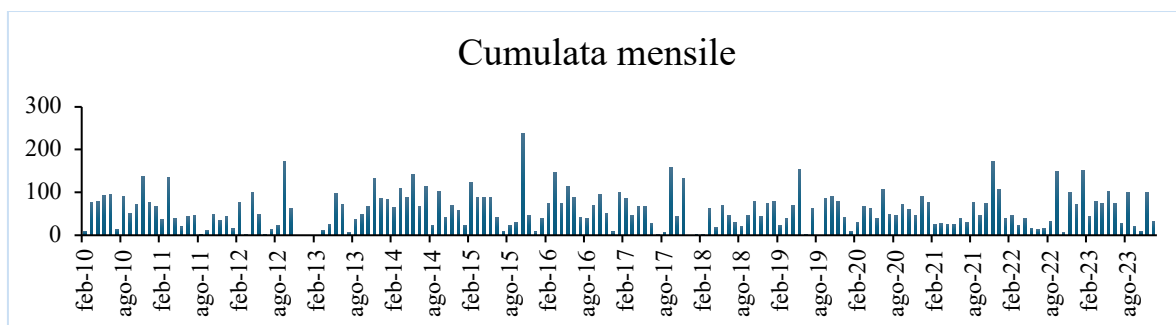


Grafico 4.1 14 Mostra l'andamento delle precipitazioni mensili registrate per la stazione di Svarchi, in un periodo compreso tra febbraio 2010 e dicembre 2023. Si ha un'oscillazione tra gli accumuli che variano tra i 50 e 100 mm.

Dal grafico 4.1 14 si evidenzia una marcata variabilità nelle precipitazioni mensili, tipica del clima temperato della regione. Alcuni mesi registrano accumuli significativi, superando i 100 mm, mentre altri mostrano precipitazioni molto basse, inferiori ai 50 mm, o quasi nulle. Questa distribuzione irregolare delle precipitazioni è tipica delle aree con forte stagionalità, dove i mesi invernali e autunnali tendono a essere più umidi rispetto ai mesi estivi. Si possono notare picchi di precipitazioni particolarmente alti in mesi come dicembre 2010, febbraio 2012 e novembre 2016, dove gli accumuli superano i 150 mm. Questi valori elevati suggeriscono la presenza di eventi meteorologici intensi, come forti temporali o perturbazioni prolungate, che possono avere un impatto significativo sull'ambiente, aumentando il rischio di alluvioni ed erosione del suolo. Al contrario, periodi con precipitazioni molto basse si verificano soprattutto durante i mesi estivi e in

alcuni inverni secchi, come nel 2011, 2013 e 2017, dove gli accumuli mensili scendono sotto i 50 mm. Questi periodi possono indicare condizioni di siccità, che potrebbero influenzare negativamente l'approvvigionamento idrico e le attività agricole della zona.

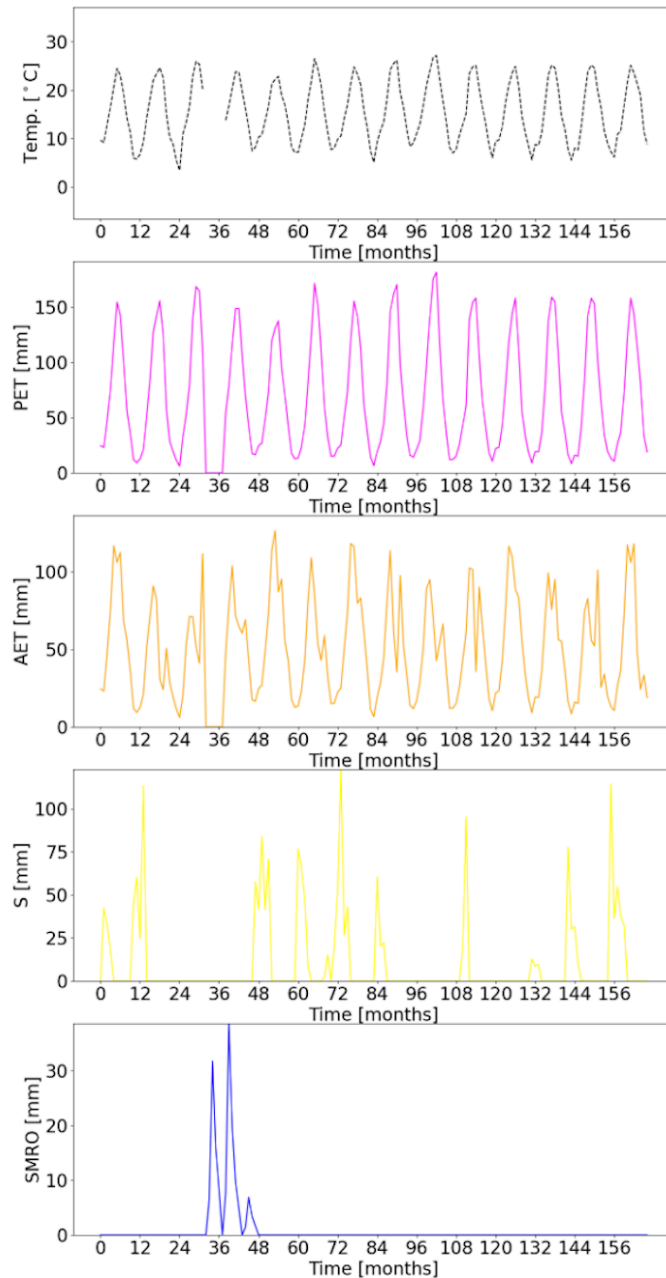


Grafico 4.1 15 Mostra l'andamento mensile delle variabili idrologiche: temperatura media, evapotraspirazione potenziali, evapotraspirazione reale, riserva idrica del suolo e deflusso da

saturazione del suolo. I grafici evidenziano le oscillazioni stagionali e le interazioni tra clima e disponibilità idrica nel tempo.

Analisi del grafico 4.1 15:

1. Temperatura (Temp) [°C]: il grafico della temperatura media mensile per Svarchi mostra un andamento stagionale ben definito, con temperature che vanno da 5°C in inverno ai 30°C in estate. Come per le altre città, negli anni 2005 e 2010, si registrano temperature superiori ai 30°C durante la stagione estiva.
2. Evapotraspirazione potenziale (PET) [mm]: l'evapotraspirazione potenziale segue l'andamento delle temperature, con valori elevati durante i mesi estivi, negli anni 2006 e 2012, dove la PET ha raggiunto picchi tra 125 e 150 mm. Questo evidenzia una forte domanda evaporativa nei mesi più caldi, che, se non bilanciata da adeguate precipitazioni, potrebbe portare a stress idrico e siccità. Nei mesi invernali, la PET diminuisce drasticamente, riflettendo la minore necessità di evaporazione durante le stagioni fredde.
3. Evapotraspirazione effettiva (AET) [mm]: il grafico mostra una notevole variabilità, che riflette la disponibilità idrica del suolo. Negli anni secchi, come 2007 e 2012, l'AET è molto inferiore alla PET, suggerendo che il suolo non disponeva di sufficiente umidità per soddisfare la domanda evaporativa, portando a condizioni di stress idrico. Nei periodi più umidi, come nel 2010 e nel 2013, l'AET è più elevata e si avvicina ai valori della PET.
4. Stock o riserva d'acqua (S) [mm]: il grafico evidenzia fluttuazioni significative in risposta agli eventi di precipitazione. Durante gli anni piovosi del 2010 e 2013, si osserva un aumento della riserva d'acqua, il che è cruciale per garantire la

disponibilità idrica durante i periodi secchi. Mentre, negli anni come 2007 e 2012, la riserva d'acqua si riduce notevolmente, suggerendo un esaurimento delle risorse idriche nel suolo.

5. Contenuto di umidità del suolo (SMRO) [mm]: il grafico mostra variazioni occasionali, ma generalmente stabili nel corso degli anni. La stabilità del contenuto di umidità nel suolo può riflettere una capacità del suolo di mantenere un equilibrio tra precipitazioni e evapotraspirazione, o potrebbe indicare che il modello utilizzato per rilevare l'umidità non cattura le variazioni stagionali.

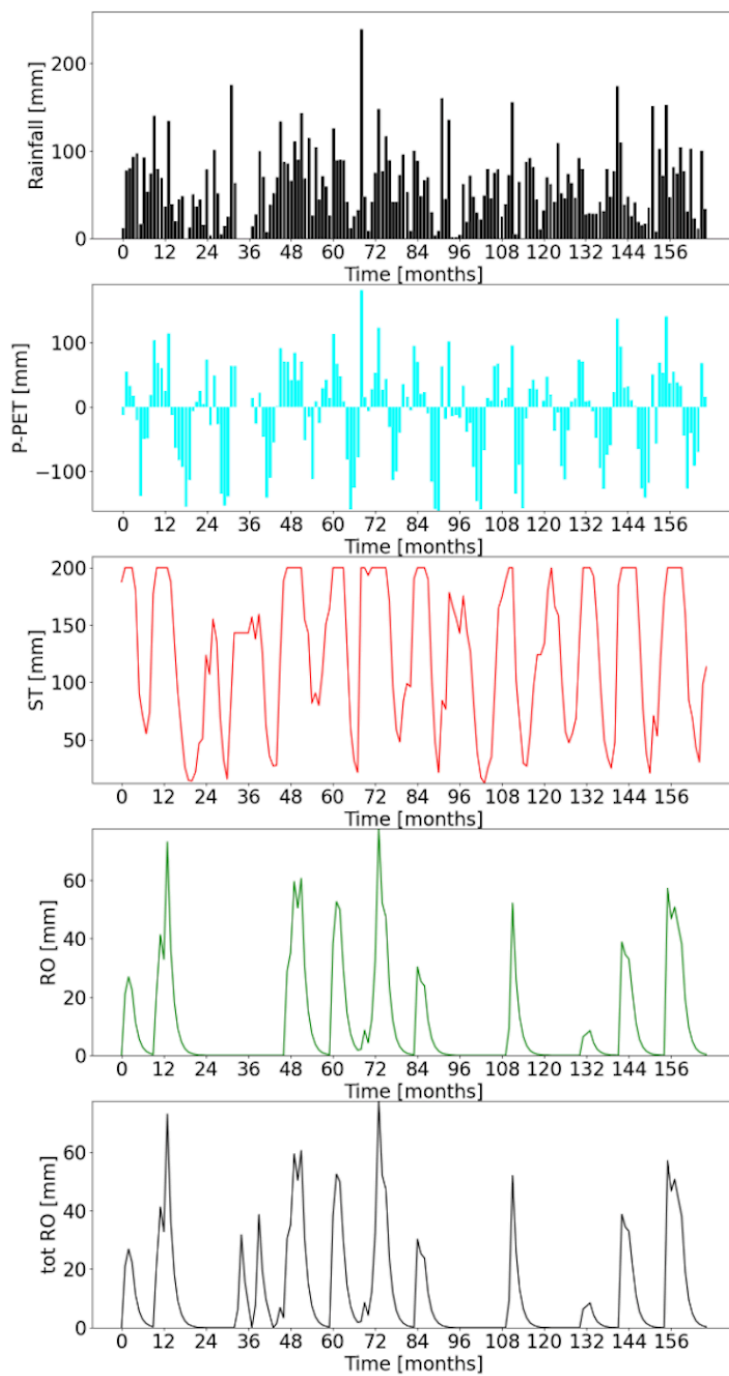


Grafico 4.1 16 Mostra l'andamento delle variabili idrologiche: precipitazioni, bilancio idrico netto, stoccaggio dell'umidità del suolo, deflusso superficiale e deflusso superficiale totale.

Analisi del grafico 4.1 16:

1. Precipitazioni (Rainfall) [mm]: il grafico delle precipitazioni mensili a Svarchi evidenzia una variabilità significativa, con eventi di pioggia particolarmente intensi in alcuni anni come il 2006 e il 2012, dove le precipitazioni hanno superato i 150 mm. Questi episodi di pioggia intensa possono essere associati a perturbazioni stagionali o temporali che aumentano il rischio di inondazioni locali. Al contrario, anni come il 2007 e il 2011 presentano mesi con precipitazioni notevolmente inferiori, suggerendo la possibilità di periodi di siccità, che potrebbero influenzare negativamente le riserve idriche e l'agricoltura.
2. Differenza tra precipitazioni e PET (P-PET) [mm]: la differenza fornisce un quadro chiaro dei periodi di surplus e deficit idrico a Svarchi. Durante i mesi estivi di anni come 2007 e 2012, si osserva un evidente deficit idrico, con la PET che supera di gran lunga le precipitazioni, indicando condizioni di aridità che potrebbero aver influito sulle risorse. Anni come 2010 e 2013, mostrano periodi di surplus idrico, in cui le precipitazioni superano la PET, favorendo la ricarica delle riserve e garantendone una maggiore sostenibilità.
3. Stoccaggio del suolo (ST) [mm]: il grafico mostra come le riserve idriche nel terreno fluttuano in risposta alle precipitazioni e ai periodi secchi. Durante gli anni piovosi, come il 2010 e il 2013, si osserva un significativo incremento dello stoccaggio d'acqua nel suolo, essenziale per sostenere l'ecosistema locale. Invece, durante i periodi secchi, 2007 e 2012, lo stoccaggio del suolo diminuisce, segnalando una ridotta capacità di ritenzione idrica.

4. Deflusso superficiale (RO) [mm]: il deflusso superficiale evidenzia picchi significativi durante i periodi di piogge intense, come nel 2006, 2010 e 2013, quando il suolo è stato saturato, portando a un aumento del deflusso superficiale. Questi picchi sono cruciali per la gestione del rischio di inondazioni e per la pianificazione delle infrastrutture di drenaggio. Durante i periodi secchi, come nel 2007 e 2012, il deflusso è ridotto, indicando che l'acqua piovana è stata quasi completamente assorbita dal suolo.

5. Totale del deflusso superficiale (tot RO) [mm]: il grafico mostra come l'acqua si accumula sulla superficie durante gli eventi di pioggia. In anni come il 2006, 2010 e 2013, il deflusso accumulato aumenta rapidamente, indicando periodi di forte precipitazione e conseguente saturazione del suolo. Durante gli anni 2007 e 2012, il deflusso cumulato cresce molto lentamente, suggerendo che gran parte dell'acqua piovana è stata assorbita dal suolo.

CONCLUSIONI

Il presente studio ha fornito un'analisi esaustiva delle risorse idriche rinnovabili e del rischio idrogeologico nel bacino del Betelico, un'area situata nella provincia di Ancona, nelle Marche. Il bacino del Betelico, con caratteristiche idrogeologiche peculiari, rappresenta un caso di studio significativo per comprendere le dinamiche idriche in un contesto geografico complesso come quello dell'Italia centrale. Le conclusioni tratte da questo studio non solo contribuiscono alla lettura scientifica, ma forniscono anche indicazioni pratiche per la gestione sostenibile delle risorse idriche e del rischio in aree simili.

Uno dei principali risultati emersi dall'analisi è l'importanza dell'evapotraspirazione nel determinare il bilancio del bacino. Durante i mesi estivi, l'evapotraspirazione supera di gran lunga le precipitazioni, portando a un deficit idrico significativo. Questo fenomeno è stato accentuato dalle recenti tendenze climatiche che mostrano un aumento delle temperature e una riduzione delle precipitazioni estive. Questo porta inevitabilmente a una riduzione dello stoccaggio idrico del suolo e a una maggiore vulnerabilità a fenomeni di siccità. Lo studio dei flussi superficiali ha evidenziato che il territorio regionale è particolarmente soggetto a rischio alluvioni, soprattutto in periodi di precipitazioni intense. Le piogge torrenziali trovano un terreno fertile per causare danni, soprattutto in aree caratterizzate da un'alta impermeabilizzazione del suolo. In queste zone, infatti, la capacità di assorbimento delle acque è drasticamente ridotta, provocando un incremento dei deflussi superficiali che alimentano il rischio di inondazioni. Questo risultato sottolinea la necessità di interventi mirati a migliorare la gestione delle acque superficiali, come l'incremento

delle aree verdi urbane, la riduzione delle superfici impermeabili e la realizzazione di infrastrutture che possano assorbire e gestire le acque piovane in eccesso.

Le implicazioni pratiche di questi risultati sono molteplici e riguardano vari settori, dall'agricoltura alla pianificazione urbana, fino alla gestione delle risorse idriche a livello regionale. Innanzitutto, è evidente che le attuali pratiche agricole nel bacino del Betelico necessitano di una revisione. L'agricoltura intensiva, che si basa su un elevato consumo di risorse, non è più sostenibile in un contesto di crescente scarsità d'acqua. È necessario promuovere l'adozione di tecniche di coltivazione più sostenibili, che includano l'uso di sistemi di irrigazione efficienti, come l'irrigazione a goccia o la microirrigazione di precisione, che minimizza le perdite di acqua, e l'introduzione di colture resistenti alla siccità. Inoltre, l'utilizzo di tecniche di ricarica artificiale delle falde acquifere potrebbe mitigare gli effetti dell'aridità prolungata, contribuendo a mantenere stabili i livelli delle falde sotterranee anche in periodi di siccità prolungata.

Sul fronte della gestione del territorio, i risultati indicano la necessità di una pianificazione più oculata. La cementificazione diffusa, in particolare nelle aree urbane e periurbane, ha ridotto la capacità del suolo di assorbire le precipitazioni, aumentando il rischio alluvioni. È pertanto imperativo sviluppare strategie di urbanizzazione che considerino la gestione delle acque come un elemento centrale. Per mitigare questi effetti, è necessario un cambiamento nelle politiche di gestione del territorio. Si raccomanda l'implementazione di sistemi di monitoraggio in tempo reale dei parametri idrologici, che potrebbero fornire dati cruciali per la gestione delle emergenze e per la prevenzione degli eventi estremi.

In conclusione, il lavoro svolto rappresenta un contributo alla comprensione delle complessità idrologiche del bacino del Betelico e offre strumenti pratici e teorici per

affrontare le sfide emergenti. Le raccomandazioni qui proposte non solo mirano a risolvere i problemi attuali, ma a garantire la protezione e la sostenibilità a lungo termine delle risorse, un obiettivo essenziale per la prosperità delle comunità locali.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Baldwin K., & Casalini F., *Building the resilience of Italy's agricultural sector to drought*, Maggio 2021
- [2] Masia S., Rossi G., & Cancelliere A., *Drought mitigation measures: a comprehensive framework*, 2018
- [3] Peres D.J., Cannarozzo M., & Bonaccorso B., *Effect of urbanization on surface runoff and performance of green roofs and permeable pavement for mitigating urban floods*, 2020
- [4] Dada O., Zhang Y., & Bourke R., *Nature-based disaster risk reduction of floods in urban areas. Water resources management*, 2021
- [5] Dada O., Zhang Y., & Bourke R., *Enhancing blue-green infrastructure in German cities with the involvement of urban society: insights from Frankfurt/Main and Stuttgart*, 2021
- [6] Hervàa-Gamez C., & Delgado-Ramos G., *Room for the river: innovation, or tradition? The case of the Noordwaard*, 2019
- [7] Masia S., Rossi G., & Cancelliere A., *Interbasin water transfers in Spain: interregional conflicts and governance responses*, 2018
- [8] Peres D.J., & Cancelliere A., *Adaptation strategies to climate change for water resources management*, 2020c

- [9] Fronzi D., Gaiolini M., Mammoliti E., Colombani N., Palpacelli S., Marcellini M., & Tazioli A., *Groundwater-surface water interaction revealed by meteorological trends and groundwater fluctuations on stream water level*, 2022
- [10] Centamore E., & Micarelli A., *Geologia delle Marche: un'inquadratura stratigrafica e strutturale*, 1991
- [11] Calamita F., & Deiana G., *La geologia strutturale delle Marche: assetto e storia evolutiva*, 1988
- [12] Bisci C., & Dramis F., *La geomorfologia delle Marche*, 1986
- [13] Lazarovitch N., Perelman A., Gobrecht S., & Rachmilevitch S., *An automated rotating lysimeter system for greenhouse evapotranspiration studies*, 2006
- [14] Everett L., & McMillion L.G., *A ceramic cup soil water sampler for use in passive extraction*, 1985
- [15] Stannard D.I., *Tensiometers: theory, construction, and use*, 1992
- [16] Hubbell J.M., & Sisson J.B., *Tensiometers: theory, construction, and use*, 1998
- [17] Sisson J.B., Toll D.G., Asquith J.D., Fraser A., Hassan A., Grace Liu, Lourenço S., Joao Mendes, Noguchi T., Osinki P., & Stirling R., *Tensiometer techniques for determining soil water retention curves*, 2002

SITOGRAFIA

{1} www.ambientemareitalia.org

{2} www.vialibera.it

{3} www.renewablematter.eu

{4} www.rinnovabili.it

{5} www.it.geoview.info

{6} www.regione.marche.it

{7} www.d-maps.com

{8} www.cimafoundation.org

{9} www.didalms.it

{10} www.manualedelgeologo.it

{11} www.terreraremarche.it

{12} www.provincia.ancona.it

{13} www.gmpe.it

{14} www.geofisico.it

{15} www.earth.google.com

{16} www.geostru.eu

{17} www.scubla.it

{18} www.agriexpo.online

{19} www.ecosearch.info

{20} www.metergroup.com

{21} www.comaitorino.it

{22} www.raig.it

{23} www.microsoft.com

{24} www.isprambiente.gov.it