

L'acquedotto dell'imperatore Traiano per il porto di *Centumcellae*, oggi Civitavecchia, nel contesto ambientale dei Monti della Tolfa, Italia centrale

Ugo Chiocchini | Già professore di Geologia applicata, Università degli Studi della Tuscia

Fedele Manna | Già professore di Chimica farmaceutica e tossicologica, Sapienza Università di Roma

Luigi Portoghesi | Professore di Pianificazione forestale, Dipartimento per la Innovazione nei Sistemi Biologici, Agro-alimentari e Forestali, Università degli Studi della Tuscia



Termini chiave: Acquedotto, Traiano, *Centumcellae*, Monti della Tolfa, Sorgente, Galleria di drenaggio

Keywords: *Aqueduct, Traiano, Centumcellae, Tolfa Mountains, Spring, Drainage tunnel*

Riassunto

L'acquedotto costruito da Traiano per il porto di *Centumcellae* nel 102 - 110 A.D., lungo 35,5 km, è ubicato nei Monti della Tolfa con morfologia collinare e costituiti in gran parte dal Flysch della Tolfa argilloso-calcareo (Cretacico superiore-Eocene) e dalle lave ricche in silice dell'Unità di Allumiere (Pliocene superiore-Pleistocene inferiore), subordinatamente dalle argille dell'Unità del Fosso di San Savino (Zancleano). Il Complesso delle lave è un acquifero sostenuto dai complessi del Flysch e delle argille caratterizzati da un grado di permeabilità relativa molto basso o nullo, suddiviso verticalmente e lateralmente in compartimenti con grado di permeabilità relativa da medio alto a basso, separati dal *limite di permeabilità* indefinito, e da corpi idrici sospesi a quote differenti di limitata estensione, che emergono in sorgenti minori con portata < 1 l/s e maggiori con portata > 5 l/s. Le sorgenti maggiori Cinque Bottini e Trinità sono state captate dai tecnici romani mediante i cunicoli drenanti. ACEA Ato 2, che gestisce le due sorgenti, non ha consentito l'accesso per controllare la portata, la temperatura, e i parametri chimico fisici dell'acqua. Pertanto, i dati della letteratura

indicano che nel 1693 la portata di aprile è diminuita da 17,5 a 9,5 l/s di agosto, nel 1742 e 1761 mostra valori compresi tra 11,25 e 13-15 l/s, e nel 1953 raggiunge il valore più basso (7,5 l/s). L'indagine sui primi 6 km dell'acquedotto evidenzia che il canale costruito in calcestruzzo ha pendenza media 0,44 %. La cisterna dell'acquedotto, interrata circa 800 m a monte del porto di *Centumcellae*, comprende due vani rivestiti di malta idraulica e comunicanti mediante un tubo di piombo. Ciascun vano ha un volume netto di 593,9 m³: uno con funzione di piscina limaria ("b"), l'altro come serbatoio ("a"). L'acquedotto, sottoposto a sostanziali lavori di restauro dal Papa Innocenzo XII nel 1756-1758, ha funzionato fino alla fine degli anni Cinquanta.

Summary

The aqueduct built by Traiano for the port of Centumcellae in 102 - 110 A.D., 35.5 km long, is located in the Tolfa Mountains with hilly morphology and made up largely of the clayey-calcareous Tolfa Flysch (upper Cretaceous-Eocene) and lava rich in silica of the Allumiere Unit (upper Pliocene-lower Pleistocene), subordinately the Torrent of San Savino Unit clays (Zanclean). The Lava complex is



RISCHIO SISMICO

RESIDUI E ALLUVIONI

ATTIVITÀ ESTRATTIVE

SCAMBIO ED ENERGIE

UNIVERSITÀ E RICERCA

PIANIFICAZIONE

BONIFICHE SITI E DISCARICHE

PROTEZIONE CIVILE

PROFESSIONE E SOCIETÀ

IL GEOLOGO

PROGETTISTA

GESTITI, GEOPARCHI & GEOTURISMO

an aquifer supported by the Flysch and Clay complexes with degree of relative permeability from very low to zero, vertically and laterally divided into compartments characterized by medium high to low degree of relative permeability, separated by an indefinite permeability limit, and perched water bodies at different altitudes of limited extension, that emerge in minor springs with a yield < 1 l/s and major ones with a yield > 5 l/s. The major springs Cinque Bottini and Trinità were captured by the Roman technicians through the drainage tunnels. ACEA Ato 2, that manages the two springs, did not allow access to check the yield, temperature, and chemical physical parameters of the water. Therefore, the literature indicates that in 1693 the yield decreased from 17.5 in April to 9.5 l/s in August, in 1742 and 1761 it shows values between 11.25 and 13-15 l/s, and in 1953 it reaches its lowest value (7.5 l/s). The investigation of the first 6 km of aqueduct shows that the canal built in concrete has an average slope of 0.44%. The terminal cistern of aqueduct, buried about 800 m upstream of the port of Centumcellae, includes two rooms lined with hydraulic mortar and communicating by means of a lead pipe. Each room has a net volume of 593.9 m³: one with the function of a piscina limaria ("b"), the other as a reservoir ("a"). The aqueduct, subjected to substantial restoration work by Pope Innocenzo XII in 1756-1758, operated until the end of the 1950s.

Introduzione

Gli acquedotti con struttura architettonica sopraelevata e le leggi fisiche che le governano costituiscono una tipica espressione dell'ingegneria romana, di cui restano evidenti testimonianze monumentali sia in Roma e in tutto il territorio dell'impero, sia nei testi di Sesto Giulio Frontino (40 circa - 103/104 A.D.) e Marco Vitruvio Pollione (circa 80 a.C. - circa 15 A.D.).

Frontino nel 97 A.D. ottenne dall'imperatore Nerva l'incarico di *curator aquarum*, cioè il magistrato addetto all'uso e alla distribuzione dell'acqua, e scrisse il testo *De Aquaeductu urbis Romae*, in cui descrive il rifornimento dell'acqua nella città di Roma. Si tratta di un testo che non è un trattato sulla tecnologia idraulica, ma un manuale per programmare il lavoro di Frontino. L'Autore descrive gli acquedotti esistenti^[1], la posizione delle sorgenti, il tipo di strutture murarie, la portata di ciascuna di esse,

1 Quando Frontino scrisse il testo, gli acquedotti di Roma erano: Aqua Appia (312 a.C.), Anio Vetus (270 a.C.), Aqua Marcia (144 a.C.), Aqua Tepula (125 a.C.), Aqua Iulia, (33 a.C.), Aqua Virgo (19 a.C.), Aqua Alsietina (2 a.C.), Anio Novus (38 A.D.), Aqua Traiana (109 A.D.).

la quantità di acqua distribuita per ogni servizio pubblico e privato, il sistema standard dei tubi, le leggi, le ordinanze del Senato, ed il controllo dell'imperatore.

Vitruvio, il grande maestro e ingegnere (*magister et machinator*), nel suo testo *De Architectura* illustra gli aspetti tecnici generali delle costruzioni, compresi gli acquedotti. Il testo è frutto dell'esperienza dell'Autore ed è stato scritto quando l'arte del costruire aveva raggiunto la perfezione con il massimo potenziale dell'ingegneria romana, che usava solo il legno, le rocce, la terracotta, la malta con calce, e la forza degli animali.

I resti più importanti degli acquedotti si trovano a Roma in Italia, a Segovia in Spagna, a Colonia in Germania, ed in molti altri siti dell'area mediterranea. La tecnica costruttiva è molto simile per la maggiore parte degli acquedotti e le differenze sono di natura più strutturale che idraulica. Per costruire un acquedotto era necessario innanzitutto trovare una sorgente con portata rilevante, i cui metodi di ricerca sono quelli descritti nel Libro VIII (I. Come reperire l'acqua; II. L'acqua piovana; III. Qualità particolari dell'acqua) del *De Architectura* di Vitruvio, e, in particolare, in base alla verifica della salubrità dell'acqua (VIII, IV, 1): "se le sorgenti scorrono all'aperto, prima di iniziare la canalizzazione si osservi per bene l'aspetto fisico di coloro che abitano nei dintorni e se avranno una valida corporatura, un colorito fresco, gambe sane, occhi non cisposi, l'acqua sarà ottima. E qualora si scavi una nuova fonte, se l'acqua versata in un vaso corinzio o in un altro di buona lega di bronzo non lascerà alcuna macchia, sarà di ottima qualità", e persino "facendo cuocere i legumi avremo conferma della sua bontà e salubrità se la cottura avverrà in tempi rapidi" (VIII, IV, 2). Spettava poi ad un tecnico fornire la decisione finale sulla qualità dell'acqua. Posto che la sorgente doveva avere una portata elevata, il problema principale era di definire le proprietà organolettiche dell'acqua per stabilire se poterla usare in modo conveniente.

Circa le modalità di captazione delle sorgenti si dispone di pochissime notizie, come rilevato da Ashby (1935),^[2] ma gli acquedotti Aqua Marcia, Aqua Claudia, Aqua Appia, Aqua Virgo, e Anio Novus in Roma (Pace, 2010) indicano che le opere di presa erano di diverse tipologie. Le vene di acqua che emergevano in superficie erano raccolte dentro una vasca in muratura, impermeabilizzata con malta idraulica (*opus signinum*)^[3], dalla quale l'acqua scorreva

2 "So little is known about the type of catchment on the Rome aqueducts that no general rule can be established for them".

3 *Opus signinum* è una malta composta da calce e pozzolana

in una vasca di decantazione (*piscina limaria*) connessa al canale di presa, e successivamente dentro il canale dell'acquedotto (*specus*). In generale, la *piscina limaria* era una semplice espansione del canale dell'acquedotto lungo il suo tracciato, oppure un serbatoio laterale in cui l'acqua, diminuendo la velocità, consentiva la decantazione delle particelle in sospensione e di altre impurità. La seconda soluzione era più vantaggiosa perché permette la deposizione delle particelle senza interrompere il flusso dell'acqua.

La necessità di approvvigionamento di acqua per la popolazione e lo scalo marittimo di *Centumcellae* (oggi Civitavecchia), in base al progetto di Apollodoro di Damasco, indusse l'imperatore Traiano ad iniziare grandiosi lavori per la costruzione di un acquedotto avvenuta nel periodo 102 - 110 A.D. Pertanto, i tecnici romani, allo scopo di assicurare acqua di buona qualità ed in quantità idonea, realizzarono l'opera idraulica, lunga circa 35,5 km e con pendenza minima lungo tutto il tracciato, che si svolge seguendo i contorni morfologici delle colline dalla zona delle sorgenti presso Allumiere fino al porto di Civitavecchia, mediante segmenti sopraelevati, interrati e in galleria, e ponti per scavalcare i numerosi corsi d'acqua.

Frangipani (1761), descrivendo l'acquedotto di Civitavecchia, fornisce dati molto dettagliati sulle due sorgenti che lo alimentavano: quelle del passo della Vecchia (= Cinque Bottini), raggruppate nella Botte della Sibilla al piede della Cava Vecchia dell'Allume, con portata 18 oncie (1 oncia = 0,25 l/s; 18 oncie = 4,5 l/s); le tre sorgenti alla base dell'eremo della Trinità con portata 27 oncie (6,75 l/s). Questo secondo gruppo si unisce alla prima sorgente con portata totale 45 oncie (11,25 l/s). Nel 1696 la portata totale era 60 oncie (15 l/s). Inoltre, lungo il tracciato dell'acquedotto sono presenti alcune gallerie, in particolare la galleria di Monte Rovello lunga mezzo miglio (740 m) e alta 60 palmi (1 palmo = 0,0741 m; 60 palmi x 0,0741 = 4,446 m), diversi ponti, conserve, chiusini, botti. Infine, gli ulteriori lavori di restauro dell'acquedotto eseguiti nel periodo 1756 - 1758 ad opera del Papa Innocenzo XII^[4], hanno interessato le

in cui erano immersi frammenti lapidei, oppure derivati dallo sfrido di mattoni e tegole.

4 I progetti di questi lavori sono raffigurati in due celebri stampe riportate in D'Ascenzo (2015). La prima è opera di Cintio Floro e Alessandro Specchi nel 1695 con titolo *Pianta del nuovo aquedotto che conduce l'acqua a Civita Vecchia fabricato in parte sopra le rovine dell'antico costruito da Traiano imperatore* (Stamperia Domenico De Rossi, Roma). La seconda è opera dell'ingegnere Carlo Fontana con il titolo *Veduta De Nuovi Acquedotti di Civitavecchia Delineata dall'Ingegnere Carlo Fontana e Data in Luce nel Corrente Anno 1699* (in Roma, nella Calcografia della R.C.A. Piè di Marmo, Pietro Santi Bartoli incisore, 1699).

strutture oggetto dell'intervento del 1696, mentre quelle originali costruite da Traiano sono rimaste in gran parte "illese e bene conservate".

Gamurrini et al. (1972) evidenziano che l'inizio dell'acquedotto si trova alla base del rilievo collinare dell'eremo della Trinità, dove è presente un grande bacino ad *em-plecton* interrato. L'acquedotto procede con il tracciato che scavalca alcuni fossi.

Secondo Brunori (1990) la portata dei due gruppi di sorgenti misurata nel 1693 è di 70 oncie (1 oncia = 0,25 l/s; 17,5 l/s) in aprile, e 38 oncie (9,5 l/s) in agosto (Padrone, 1695)^[5]. Nel 1742 sono misurate 52 oncie (13 l/s), diminuite nel 1953 a 30 oncie, pari a 600 m³, (7,5 l/sec). Il tracciato del canale, largo 0,60 m e alto 1,40, si snoda lungo circa 24 miglia romane (1 miglio = 1,480 km x 24 = 35,5 km) con pendenza dell'1% fino alla città di *Centuncellae* scavalcando 73 corsi d'acqua con altrettanti ponti. L'Autore, in accordo con Frangipani (1761), ritiene che sia stato necessario scavare alcune gallerie, di cui la più lunga è quella di M. Rovello. L'acqua, che si depura nelle *piscinae limariae*, si riversa nel *castellum aquae*, cioè due cisterne comunicanti interrate con capacità di oltre 1000 m³, e da questo giunge al porto.

Di Giulio (2014) e D'Ascenzo (2015; 2020) descrivono l'acquedotto e le cisterne riprendendo le indicazioni di Brunori (1990).

Gli studi precedenti sull'acquedotto non sono supportati da riferimenti (i) al contesto geologico e idrogeologico del territorio dei Monti della Tolfa in cui è ubicato l'acquedotto di Traiano, (ii) alla tipologia delle opere di presa delle sorgenti, (iii) alla reale funzione della cisterna terminale dell'acquedotto. Pertanto, la presente ricerca, svolta nell'ambito dell'attività dell'Associazione Nazionale per gli Interessi del Mezzogiorno d'Italia (ANIMI) - Società Magna Grecia in relazione al lavoro interdisciplinare per lo studio dei siti archeologici e del loro contesto ambientale, nell'ottica di migliorare le conoscenze sulla costruzione delle terme romane, ha utilizzato le tecniche della Geoarcheologia (Rapp & Hill, 1998; Pollard, 1999; Ghilardi & Desruelles, 2009; Shahack-Gross, 2017; Gilbert, 2017; Gençer & Turan, 2017; Cortéz Pérez et al., 2018; Shillito et al., 2019) allo scopo di illustrare: (i) il contesto geologico e idrogeologico del territorio dei Monti della Tolfa, con particolare riferimento alle sorgenti Cinque Bottini e Trinità che alimentavano l'acquedotto di Traiano; (ii) le

5 Si evidenzia che il testo "Padrone F. (1695) *Sopra la condotta dell'acqua a Civitavecchia, Roma*" riportato nei Riferimenti bibliografici di Brunori (1990) non è reperibile.

opere di presa delle due sorgenti; (iii) il tracciato iniziale dell'acquedotto (fino a 6000 m dalle sorgenti); (iv) la funzione della cisterna terminale dell'acquedotto.

Materiali e metodi

Le operazioni della ricerca sono state sviluppate in quattro fasi. La prima fase è stata dedicata alla acquisizione dei dati di seguito riportati. Presso l'Agenzia Regionale di Protezione Civile – Area Prevenzione, Pianificazione e Prevenzione – Centro Funzionale Regionale, che ha fornito i valori relativi alle temperature e alle precipitazioni dei periodi 1964 - 2011 e 2015 - 2021 della stazione termopluviometrica di Allumiere (534 m s.l.m.; coordinate WGS 84 DMS: 42° 09'28,00" N; 11° 54' 31,40"). I valori della temperatura e delle precipitazioni degli anni 1998, 2012, 2013, 2014 mancano perché la stazione non ha funzionato, e i valori della temperatura massima e minima di cinque anni (1969, 1976, 1977, 1992, 2001) non sono registrati. La serie dei valori della temperatura media mensile e annuale, massima e minima, e quella delle precipitazioni medie mensili e annuali in formato "txt" e "csv" relative ai periodi 1964 - 2011 e 2015 - 2021 sono state elaborate in ambiente Excel anche per determinare i parametri statistici (media aritmetica, scarto quadratico medio, coefficiente di variazione, scarto quadratico medio della media aritmetica.) Inoltre, l'interpolazione dei dati di temperatura e precipitazioni mediante i minimi quadrati, ottenuta con scopi puramente descrittivi, ha consentito di definire la curva di regressione e il coefficiente di determinazione, di modo che è stato possibile fornire il probabile andamento della temperatura e delle precipitazioni per il prossimo decennio. Le stratigrafie dei pozzi del territorio comunale di Allumiere sono state acquisite presso il Dipartimento III "Ambiente e Tutela del Territorio: Acqua-Rifiuti-Energia-Aree Protette" Servizio 2 - "Tutela risorse idriche, aria e energia" (D III) della Città Metropolitana di Roma Capitale, e presso il Portale del Servizio Geologico d'Italia (SGI) dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA). Al riguardo si evidenzia che sono risultati disponibili un pozzo di D III, non idoneo ai fini della ricerca, e cinque pozzi di SGI, di cui tre utili.

Nella seconda fase è stato eseguito il rilevamento geologico sia dell'area tra Tolfa-Allumiere e la valle del F. Mignone, utilizzando le tavolette dell'Istituto Geografico Militare (IGM) I SE La Farnesiana e II NE Tolfa del Foglio 142 Civitavecchia, IV SO Civitella Cesi del Foglio 143 Bracciano (scala 1:25.000), sia della zona delle sorgenti e del tracciato

iniziale dell'acquedotto di Traiano mediante gli elementi 363032 Allumiere, 363031 La Farnesiana, 363043 Tolfa, 36044 Monte Sassicari della Carta Tecnica della Regione Lazio (CTR) in scala 1: 5000, secondo la normativa della del Servizio Geologico Nazionale (1992; 1994) e dell'ISPRA-Difesa del Suolo-Servizio Geologico Nazionale (2009). Per la nomenclatura delle formazioni è stata utilizzata quella ufficiale della Carta Geologica d'Italia in scala 1: 50.000 dei fogli 355 Ronciglione (ISPRA-Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico d'Italia, 2016), 344 Tuscania, 345 Viterbo, 353 Montalto di Castro, 354 Tarquinia (ISPRA-Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico d'Italia in attesa di stampa). Il colore delle rocce delle formazioni è stato determinato mediante la Rock - Color Chart (Geological Society of America, 1991). Inoltre, sono stati esaminati tre campioni di lave non affette da alterazione superficiale secondaria in sezione sottile con spessore di 30 µm con il microscopio polarizzatore Zeiss Axioscope.

La terza fase è stata dedicata alla produzione della Carta dei complessi idrogeologici in scala 1: 25.000 e 1: 5000, in base alla normativa del Servizio Geologico Nazionale (1995), alla carta geologica, ai pozzi disponibili, e al controllo delle sorgenti, le cui quote e coordinate WGS 84 (DD), trasformate in DMS, sono state determinate, rispettivamente, mediante il Barometre Holosterique Altimétrique compensé 1131 con lettura fino a 0,5 m, e il GPSMAP 64 Garmin. *Per quanto riguarda le sorgenti Cinque Bottini e Trinità, gestite dall'Ufficio Acquedotto del Comune di Civitavecchia fino alla fine degli anni Cinquanta e successivamente da ACEA Ato2, si evidenzia che la richiesta di accesso alle due sorgenti è stata inoltrata ad ACEA Spa mediante Posta Elettronica Certificata (PEC). Purtroppo, ACEA Spa, la cui proprietaria è Roma Capitale, non ha fornito alcuna risposta, e, di conseguenza, ha impedito l'accesso alle sorgenti.* Sono state eseguite misure dirette per determinare la portata e la temperatura dell'acqua delle altre sorgenti. La portata è stata misurata nel periodo novembre 2022 - aprile 2023 mediante il metodo volumetrico con un recipiente di plastica appositamente tarato. Le misure eseguite tre volte hanno consentito di ottenere il valore medio. La temperatura è stata controllata mediante uno strumento portatile con sensore, e sono state prodotte osservazioni sui caratteri chimico fisici dell'acqua delle sorgenti. Inoltre, è stata svolta una indagine sulla copertura boschiva delle lave dell'Unità di Allumiere.

La quarta fase ha consentito di identificare le opere di presa delle sorgenti Cinque Bottini e Trinità, che alimentavano l'acquedotto di Traiano, il tracciato di quest'ultimo tra le sorgenti e la zona della località Grasceto delle Poste

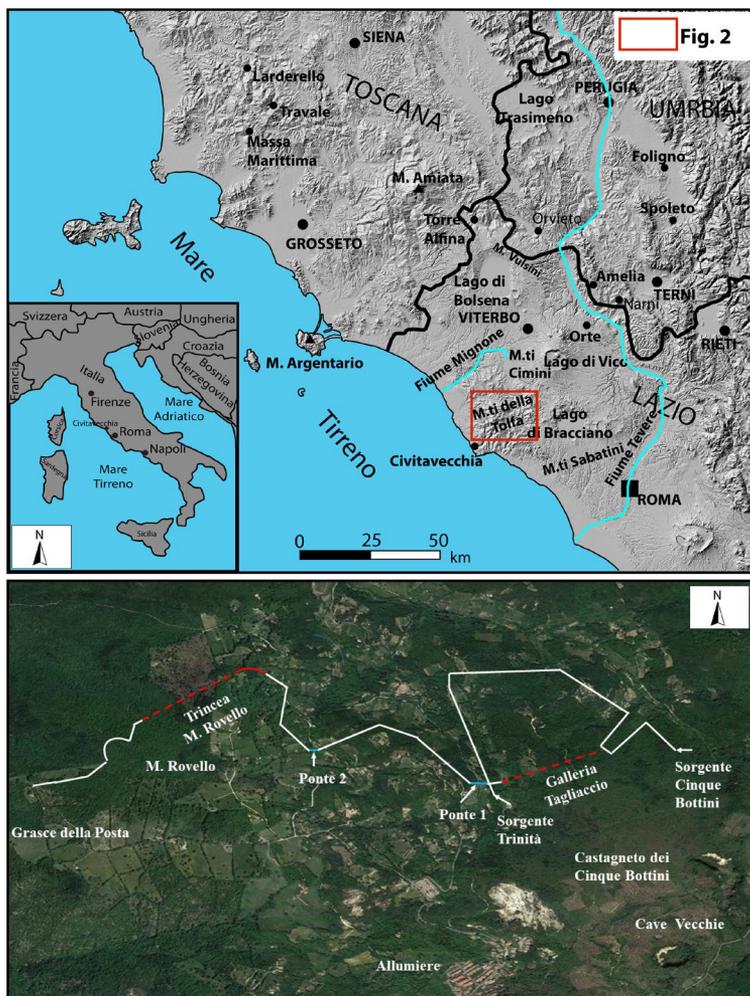


Figura 1 - Ubicazione dell'area studiata. Il rettangolo rosso indica l'area della Figura 2. L'immagine da satellite in basso mostra il tracciato dell'acquedotto di Traiano, le sorgenti Cinque Bottini e Trinità che lo alimentavano, e la variante della galleria Tagliaccio dovuta ai lavori di restauro di Papa Innocenzo XII.

Figure 1 - Location of the study area. The red rectangle indicates the location of Figure 2. The satellite image below shows the Traiano's aqueduct, the Five Bottini and Trinità springs that fed it, and the variant of the Tagliaccio tunnel because of the restoration works of Pope Innocenzo XII.

l'acquedotto di Traiano e le relative opere di presa sono ubicate nel territorio comunale di Allumiere (settore centro-settentrionale dei Monti della Tolfa; Lazio centro occidentale) in sinistra della valle del F. Mignone (Fig. 1), nella tavoletta I SE La Farnesiana del Foglio 142 Civitavecchia e negli elementi 363032 Allumiere e 363031 La Farnesiana della Carta Tecnica della Regione Lazio in scala 1: 5000.

Risultati

Assetto geologico

I Monti della Tolfa sono costituiti in larga misura dal Flysch della Tolfa (FYT; Cretacico superiore–Eocene) e dalle lave dell'Unità di Allumiere (UAL; Pliocene superiore - Pleistocene inferiore), subordinatamente dai sedimenti marini di acque basse dell'Unità di Pian della

(IGM) o Grasse della Posta (CTR), e la reale funzione della cisterna terminale in prossimità dello scalo marittimo di *Centumcellae*. Il tracciato dell'acquedotto è stato determinato mediante il curvimetro Silva Misuratore di Mappa sulle tavolette IGM 142 I SE La Farnesiana e 142 II NE Tolfa. Le misure sono state eseguite tre volte, fornendo valori molto simili, dai quali è stato ricavato il valore medio. Un ulteriore controllo effettuato sul terreno mediante le CTR 363031 La Farnesiana e 363032 Tolfa, il Barometre Holosterique Altimètrique compensè 1131 e il GPSMAP 64 Garmin, ha consentito di suddividere il tracciato in sette sezioni.

Area di studio

Le sorgenti Cinque Bottini e Trinità che alimentavano

Regina (RGG; Piacenziano) e dell'Unità del Fosso di San Savino (SBM; Zancleano) (Fig. 2a). Inoltre, sono presenti piccoli lembi di depositi fluviali lacustri (PGT; Pleistocene superiore).

Dal punto di vista geomorfologico i Monti della Tolfa comprendono un gruppo di colline con forma ellissoidale, orientato in direzione SO-NE, ed elevata energia del rilievo, fino a quote di 510 m s.l.m. ad Allumiere e 515 m s.l.m. a Tolfa. Il reticolo idrografico include numerosi corsi d'acqua con regime torrentizio disposti con andamento radiale, valli con forma di "V" molto accentuata, e pendenza > 30°. In particolare, si evidenzia che il corso d'acqua Fosso della Botte alla quota 203 m s.l.m. cambia il nome in Fosso della Melledra con decorso complessivo da SE verso NO, confluenndo in sinistra del F. Mignone. Uno spartiacque orientato ONO - ESE attraversa i Monti della Tolfa separando

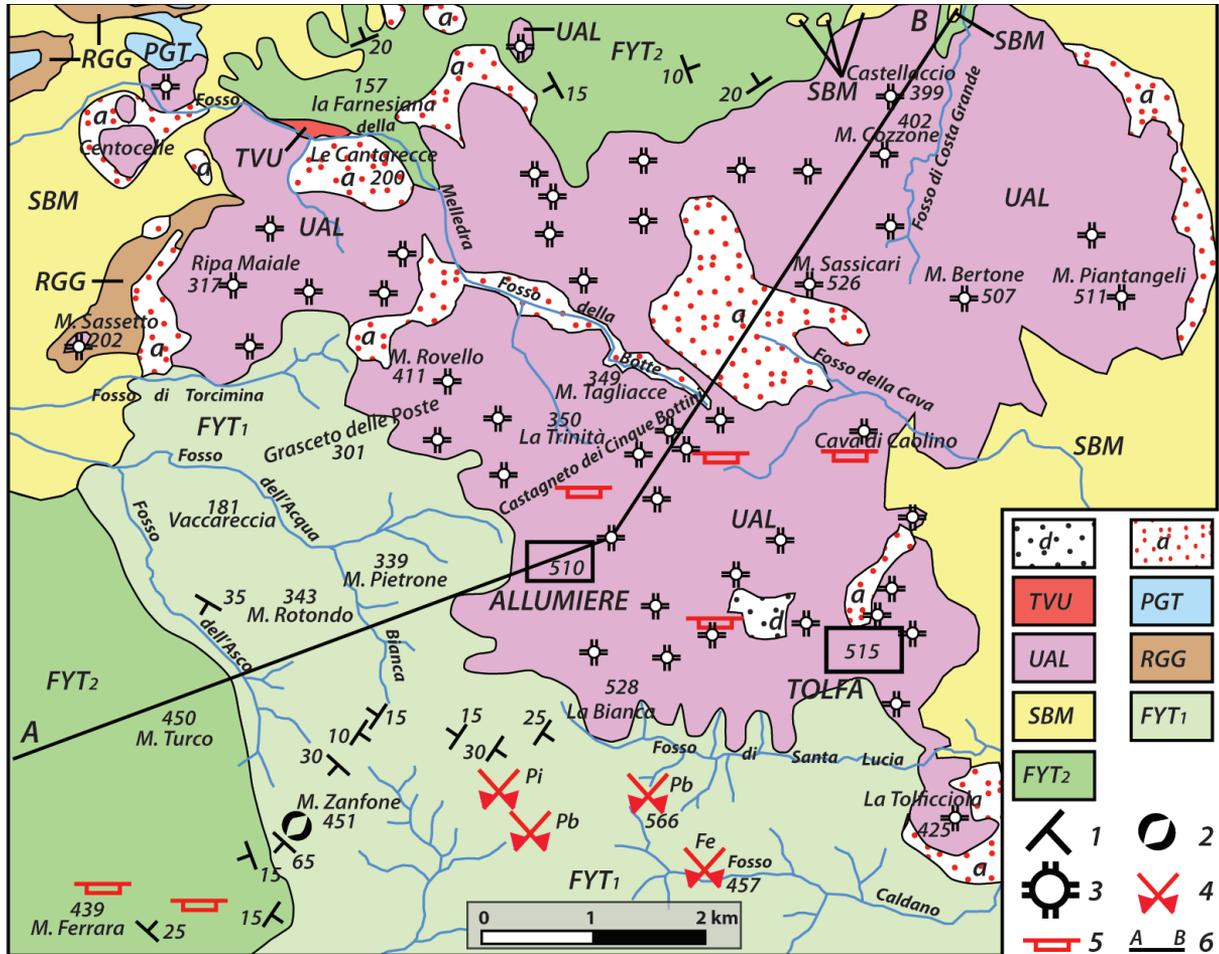


Figura 2a - Carta geologica dei Monti della Tolfa. *d*, accumulo antropico dovuto ad attività mineraria di cava (Olocene); *a*, deposito eluviale (suolo) e colluviale (Olocene); TVU (tufo del Distretto Vulsino; Pleistocene medio - superiore); PGT, Depositi fluviali lacustri (ghiaie, sabbie, limi, argille; Pleistocene superiore); UAL, Unità di Allumiere (lave trachitico-dacitiche grigie; Pliocene superiore - Pleistocene inferiore); RGG, Unità di Pian della Regina (sabbie gialle con lenti di conglomerati; Piacenziano); SBM, Unità del Fosso di San Savino (argille, argille sabbiose e marnose grigie; Zancleano); FYT, Flysch della Tolfa: FYT1, Membro di Poggio Vivo (argilliti grigie, marroni, rossastre, con intercalazioni di marne e calcari marnosi di colore marrone chiaro in strati medi, di calcari silicei di colore grigio scuro in strati sottili e medi; calcareniti torbiditiche di colore grigio e marrone chiaro in strati medi e spessi; Cretacico superiore - Paleocene); FYT2, Membro del Fosso dell'Anitrella (calcari marnosi grigi e nocciola tipo pietra paesina, calcari silicei di colore grigio scuro, e calcareniti torbiditiche grigie in strati medi e spessi; marne di colore marrone chiaro; argilliti marroni e grigie; marne e calcari marnosi rossastri in strati medi nella parte superiore; Eocene); 1, strati dritti; 2, frana sottomarina intraformazionale; 3, domo; 4, miniera inattiva (Fe, di ferro; Pi, di pirite; Pb, di piombo); 5, cava inattiva; 6, traccia di sezione geologica.

Figure 2 a - Geological map of the Tolfa Mountains. *d*, anthropic accumulation because of quarry activity (Holocene); *a*, eluvium (soil) and colluvium deposit (Holocened); TVU (tuff of the Vulsino District; middle - upper Pleistocene); PGT, fluvial lacustrine deposits (gravels, sands, silts, clays; upper Pleistocene); UAL, Allumiere Unit (grey trachyte-dacite lavas; upper Pliocene - lower Pleistocene); RGG, Pian della Regina Unit (yellow sands with lenses of conglomerates; Piacenzian); SBM, Fosso di San Savino Unit (clays, grey sandy and marly sands; Zanclean); FYT, Tolfa Flysch: FYT1, Poggio Vivo Member (grey, brown and reddish argillite with intercalation of light brown marl and marly limestone in medium beds, dark grey siliceous limestone in thin and medium beds; grey and light brown turbidite calcarenite in medium and thick beds; upper Cretaceous-Paleocene); FYT2, Torrent of the Anitrella Member (grey and brown marly limestones of pietra paesina type, dark grey siliceous limestone, and grey turbidite calcarenite in medium and thick beds; light brown marl; brown and grey argillite; marl and reddish marly limestone in medium beds in the upper part; Eocene); 1, bed attitude; 2, intraformational submarine landslide; 3, dome; 4, inactive mine (Fe, of iron; Pi, of pyrite; Pb, of lead); 5, inactive quarry; 6, trace of geological section.

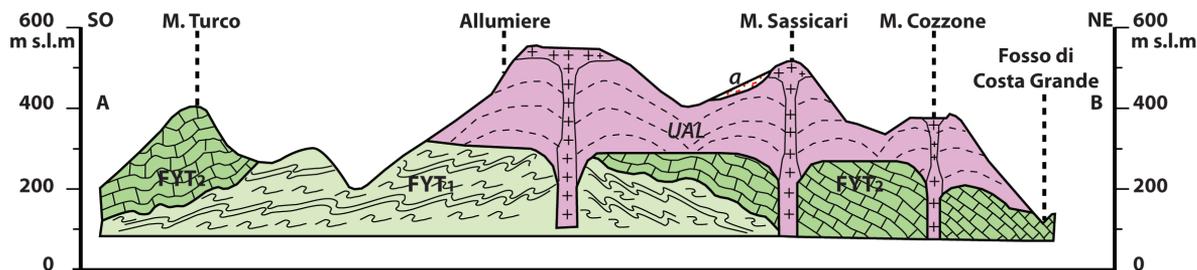


Figura 2b - Sezione geologica. a, deposito eluviale (suolo) e colluviale (Olocene); UAL, Unità di Allumiere (Pliocene superiore – Pleistocene inferiore); Flysch della Tolfa: FYT1, Membro di Poggio Vivo (Cretacico superiore – Paleocene); 5, FYT2, Membro del Fosso dell'Anitrella (Eocene).

Figure 2 - b Geological section. a, eluvium (soil) and colluvium deposit (Holocene); UAL, Allumiere Unit (upper Pliocene – lower Pleistocene); Tolfa Flysch: FYT1, Poggio Vivo Member (upper Cretaceous – Paleocene); Torrent of the Anitrella Member (Eocene).

i torrenti che confluiscono in sinistra del F. Mignone da quelli che sboccano nel Mare Tirreno tra Civitavecchia e Santa Marinella (Fig. 3).

Il Flysch della Tolfa (FYT) (Abbate & Sagri, 1970; Fazzini

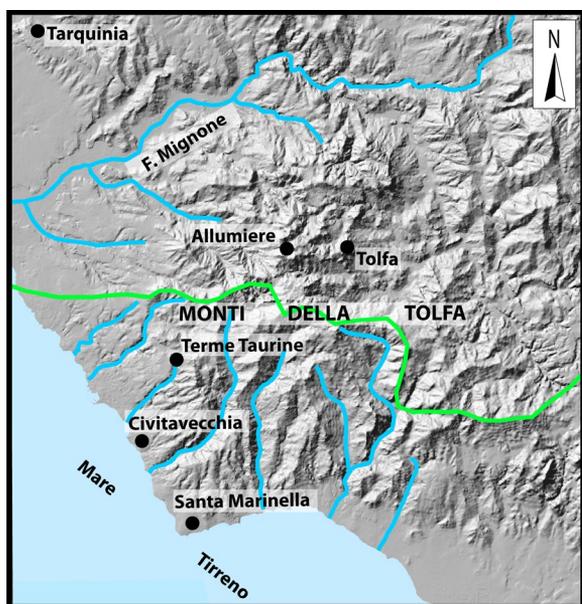


Figura 3 - Assetto geomorfologico dei Monti della Tolfa. La linea verde indica lo spartiacque tra i torrenti in sinistra del F. Mignone e quelli del Mare Tirreno tra Civitavecchia e Santa Marinella.

Figure 3 - Geomorphological setting of the Tolfa Mountains. The green line indicates the watershed between the streams on the left of the Mignone River and those of the Tyrrhenian Sea between Civitavecchia and Santa Marinella.

et al., 1972; Baldi et al., 1974; Boccaletti et al., 1987; Civitelli & Corda, 1993; De Rita et al., 1994, 1997) comprende il Membro di Poggio Vivo (FYT₁), cui segue il Membro di Fosso dell'Anitrella (FYT₂) (ISPRA-Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico d'Italia, in attesa di stampa).

Il Membro di Poggio Vivo (FYT₁), che affiora nella zona a SO di Allumiere e Tolfa, è composto da strati medi di argilliti di colore marrone chiaro 5 YR 5/6, grigio scuro N3, grigio chiaro medio N6 e rosso medio 5 R 4/6 con intercalazioni di strati medi e sottili di marne e calcari marnosi di colore marrone chiaro 5 YR 6/4 e grigio medio N5, e di strati medi e spessi di calcari silicei di colore grigio scuro N3, di calcareniti torbiditiche di colore arancio grigio 10 YR 7/4 e marrone chiaro 5 YR 6/4 in strati medi e spessi. Localmente sono presenti pieghe e piani di taglio a scala decimetrica e gli strati calcarei competenti intercalati tra quelli argillosi meno competenti sono stirati, assottigliati e rotti ad intervalli irregolari formando corpi lenticolari a scala decimetrica (*boudinage*; American Geological Institute, 2005). Inoltre, sul versante occidentale di M. Zanfone lungo la Strada Provinciale 3/A affiora un pacco di strati spessi, medi e sottili piegati interposto tra strati con giacitura concordante, attribuibile ad una struttura da frana sottomarina intraformazionale (*slump structure*; American Geological Institute, 2005). Lo spessore del Membro di Poggio Vivo è di circa 600-700 m e la sua età è Cretacico superiore – Paleocene (ISPRA-Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico d'Italia, in attesa di stampa).

Il Membro del Fosso dell'Anitrella (FYT₂), presente nella zona di M. Turco a SO di Allumiere e nella zona a nord di quest'ultimo, comprende strati spessi, molto spessi e megastrati di calcari marnosi di colore arancio grigio 10 YR 7/4, tipo pietra paesina, calcari silicei, calcareniti torbiditiche di colore arancio grigio 10 YR 7/4, argilliti di colore marrone medio 5 YR 3/4, marne di colore grigio scuro N3, marne e calcari marnosi di colore arancio rosa 10 R 7/4 nella parte alta. Lo spessore del Membro del Fosso dell'Anitrella è di circa 700-800 m e la sua età è Eocene (ISPRA-Dipartimento

Difesa del Suolo-Servizio Geologico d'Italia, in attesa di stampa).

I membri del Flysch della Tolfa sono correlabili con le unità dei Flysch Tolfetani di Fazzini et al. (1972). Infatti, il Membro di Poggio Vivo (FYT₁) corrisponde al Flysch argilloso-calcareo (fc), il Membro di Fosso dell'Anitrella (FYT₂) al Flysch calcareo (fc¹). Il Flysch della Tolfa è stato oggetto di escavazione sia a cielo aperto nella cava di M. Ferrara per la produzione di cemento, sia in quattro miniere per l'estrazione di ferro, piombo e pirite a sud di Allumiere e Tolfa (Fig. 2a).

La ricostruzione dell'assetto tettonico del Flysch della non Tolfa è fortemente condizionata dalla mancanza di affioramenti significativi per riconoscere gli elementi tettonici ed i relativi indicatori cinematici alla meso-scala. Inoltre, non è possibile riconoscere livelli stratigrafici di riferimento e quindi valutare i rigetti delle faglie. Questa difficoltà è stata evidenziata anche da Fazzini et al. (1972) e ISPRA-Dipartimento Difesa del Suolo- Servizio Geologico d'Italia (in attesa di stampa) che hanno individuato alcune pieghe a grande scala, di cui alcune rovesciate con vergenza verso NE. Nel settore centro-occidentale dell'area in esame la giacitura degli strati indica la successione di pieghe antiformi e sinformi, più evidente nel Membro di Poggio Vivo (Fig. 2 b), e nel settore settentrionale anche la giacitura degli strati del Membro del Fosso dell'Anitrella mostra una successione di pieghe simile alla precedente (Fig. 2b). Al riguardo si evidenzia che il Membro del Fosso dell'Anitrella è costituito da una maggiore quantità di litotipi calcarei più competenti, mentre il Membro di Poggio Vivo mostra una elevata quantità di argilliti meno competenti. Questa differenza litologica si riflette nella diversa risposta dei due membri alle sollecitazioni delle deformazioni. Infatti, alla scala dell'affioramento i due membri mostrano talvolta elementi plicativi di tipo concentrico, caratterizzati da asse e piano assiale con inclinazione di 25° - 35° e assetto disarmonico, molto più evidenti nel Membro di Poggio Vivo. L'Unità del Fosso di San Savino (SBM), che affiora nella zona orientale di Tolfa e tra La Farnesiana e il F. Mignone (Fig. 2 a), comprende argille, argille sabbiose, e argille marnose di colore grigio con spessore fino a circa 75 m, la cui età è Zancleano (Chiocchini & Potetti, 1998; De Rita et al., 1997; ISPRA Servizio Geologico d'Italia, in attesa di stampa). L'Unità di Pian della Regina (RGG), si riconosce in sinistra della valle del F. Mignone ed è composta da sabbie gialle ricche di bivalvi, in strati medi e spessi, con giacitura orizzontale e sovrapposti all'Unità del Fosso di San Savino. Lo spessore arriva a circa 50 m e l'età è Piacenziano

(Chiocchini & Potetti, 1998; De Rita et al., 1997; ISPRA Servizio Geologico d'Italia, in attesa di stampa).

Le rocce vulcaniche dell'Unità di Allumiere (UAL) sono costituite da lave ricche in silice della Provincia Magmatica Toscana (Poli et al. 1984; Van Bergen, 1984; Serri et al. 1992; Peccerillo & Donati, 2003; Peccerillo, 2005), che affiorano in 47 domi, per lo più coalescenti, tra Tolfa, Allumiere e la valle del F. Mignone, formando un corpo unitario esteso su una superficie di circa 46 km², con geometria complessiva ellissoidale, il cui asse maggiore è orientato est-ovest (Fig. 2a). Si riconoscono domi isolati solo a Tolfaccia, a sud di Tolfa, Sassetto e Centocelle in sinistra del F. Mignone (Fig. 2a), La Montagnola presso Aurelia, poco a nord di Civitavecchia.

Le lave sono caratterizzate da intensa alterazione superficiale secondaria molto diffusa, che le rende molto friabili e di colore bianco N 9 con chiazze e venature di colore giallo chiaro arancione 10YR 8/6. Tale stato di alterazione, dovuto alla silicizzazione della pasta di fondo, alla caolinnizzazione dei feldspati, alla ossidazione della biotite, alla trasformazione degli ortopirosseni in serpentino, e alla formazione di plaghe di calcite nella pasta di fondo (De Rita et al., 1997), produce, inoltre, coltri di deposito eluviale (suolo) e colluviale ("a" in Fig. 2a) costituite da sabbie grossolane eterometriche e ghiaie in matrice sabbiosa e più raramente limoso-argillosa, di colore moderatamente rosso arancione 10R 6/6, con frammenti grossolani di lava alterata di colore bianco N 9, il cui spessore arriva a circa 6-10 m in alcuni versanti, valli, e vallecole. Questi depositi eluviali e colluviali, particolarmente estesi nelle zone tra Allumiere e Tolfa, lungo la valle del Fosso della Botte, M. Sassicari, Ripa Maiale, Le Cantarecce, e La Farnesiana (Fig. 2a), hanno favorito lo sviluppo di boschi, talora con denso sottobosco, che ancora coprono buona parte dell'area dell'Unità di Allumiere. Negli affioramenti di lave non alterate le rocce sono molto compatte, di colore grigio chiaro N 7, e mostrano in alcune zone piccoli fori dovuti alla emissione dei gas, e strutture da flusso, fessure verticali o molto inclinate per lo più aperte, connesse alla contrazione della lava durante il raffreddamento, fratture verticali o molto inclinate dovute alle fasi della tettonica distensiva del Pliocene e Pleistocene. Lo spessore dell'Unità di Allumiere raggiunge il massimo di circa 250 m nell'area di Allumiere, e diminuisce verso le zone periferiche.

L'esame petrografico di tre campioni non affetti da alterazione superficiale secondaria (La Rocca a Tolfa, Trinità e la zona di M. Rovello a nord di Allumiere) indica che la struttura delle lave è porfirica molto accentuata

con fenocristalli di sanidino (Or 71 – 81), plagioclasio An (46 - 59), clinopirosseno augite, ortopirosseno iperstene, biotite⁶, ossidi di tipo ilmenite, in pasta di fondo vetrosa e ipocristallina con plaghe di calcite. Inoltre, sono stati riconosciuti apatite e zirconio come accessori. I numerosi studi (Lauro et al., 1965; Lombardi et al., 1965a, 1965b, 1974; Negretti & Morbidelli, 1963; Negretti et al., 1966; Lauro & Negretti, 1969; Alberti et al., 1970; Ferrini et al., 1970; Taylor & Turi, 1976; Devoto & Lombardi, 1977; Vollmer, 1977; De Rita et al., 1994, 1997; Pinarelli, 1991; Palozza, 2019) e il diagramma alcali totali-silice (TAS) di Le Bas et al. (1992) suggeriscono che la composizione delle lave è trachidacitica, mentre le lave di La Montagnola e Reloso mostrano, rispettivamente, composizione riolitica (De Rita et al., 1994; 1997), e di tipo latitico e quarzolattico (Palozza, 2019).

Per quanto riguarda i rapporti tra l'Unità di Allumiere e le formazioni sedimentarie, costituite dall'Unità del Fosso di San Savino e dal Flysch della Tolfa, si evidenziano le seguenti osservazioni sul terreno.

- L'Unità del Fosso di San Savino si rinviene sia a Tolfa, fino a quota 380 m s.l.m., sia nella zona di Fontanile del Cerreto nei pressi di Castellaccio, circa 6 km a nord di Tolfa a quota 210 m s.l.m., dove è alla base dell'Unità di Allumiere. Questa giacitura si osserva anche lungo il Fosso di Costa Grande poco a sud di M. Cozzone.
- Le lave affiorano nelle principali valli dei torrenti a quote inferiori a quelle dell'Unità del Fosso di San Savino.
- Nel domo della Tolfaccia, circa 4 km a SO di Tolfa, l'Unità del Fosso di San Savino affiora alla quota più elevata (350-400 m s.l.m.) dei Monti della Tolfa.
- Nel domo in località La Montagnola, circa 6 km a nord di Civitavecchia, è conservato un lembo metamorfosato dell'Unità del Fosso di San Savino.
- Nell'affioramento di M. Sassetto, in prossimità della ferrovia dismessa Orte-Civitavecchia, circa 3 km a SO di La Farnesiana, sono presenti blocchi dell'Unità del Fosso di San Savino coinvolte dal processo di risalita delle lave (De Rita et al., 1997). Nella zona delle cave di caolino e alunite, circa un km a nord di Allumiere, un sondaggio ha evidenziato che sotto l'Unità di Allumiere sono presenti circa 45 m di sedimenti argillosi dell'Unità di Fosso di San Savino sovrapposti al Flysch della Tolfa. Questi sedimenti argillosi sono presenti anche in un pozzo alla base

delle lave dell'Unità dei Allumiere nella zona di La Bianca circa 1,5 km a SE di Allumiere.

Inoltre, i dati di alcuni sondaggi eseguiti nel 1954-1955 per ricerca nell'area delle miniere di piombo, ferro, e pirite a sud di Allumiere e Tolfa (Fig. 2a), indicano la presenza di corpi intrusivi di tipo granitico e quarzítico a profondità di circa 100 m sotto il Flysch della Tolfa (De Rita et al., 1967). Infatti, in questa area sono stati riconosciuti dicchi e rocce ipoabissali (Ferrini et al., 1970), e il Flysch della Tolfa, che mostra tracce di termometamorfismo in diverse zone, è sollevato rispetto agli altri affioramenti dei Monti della Tolfa. Di conseguenza, poiché tali dati confermano la presenza di corpi intrusivi a bassa profondità, le rocce vulcaniche si sono messe in posto con modalità intrusiva (De Rita et al., 1997) e i duomi possono essere considerati come cripto-duomi (Cas & Wright, 1987). Circa l'età della messa in posto delle lave dell'Unità di Allumiere, Lombardi et al. (1974) indicano il Pliocene superiore – Pleistocene inferiore, confermato da De Rita et al. (1997), mentre l'età radiometrica di Villa et al. (1989) è di 3,46 Ma, cioè la parte alta del Pliocene inferiore. Tenendo presente che i domi mostrano di essersi formati contemporaneamente in un periodo di tempo relativamente breve, questa discrepanza può essere spiegata ritenendo che l'età di 3,46 Ma sia riferita alle fasi di cristallizzazione del magma in profondità e che i corpi lavici siano risaliti in un periodo successivo (De Rita et al., 1997).

Quanto sopra illustrato suggerisce che le lave dell'Unità di Allumiere si sono intruse fino a breve distanza dalla superficie e la messa in posto dei domi ha provocato il sollevamento del Flysch della Tolfa e dell'Unità del Fosso di San Savino. Pertanto, l'area dei Monti della Tolfa è stata sollevata di circa 100 m con il massimo di 200 m nella zona della Tolfaccia (Marinelli et al., 1993). Anche l'Unità di Allumiere è stata sottoposta ad escavazione a cielo aperto in numerose cave di alunite e caolino tra Allumiere e Tolfa, dove è presente un esteso deposito dovuto a tale attività ("d" in Fig. 2a).

Presso La Farnesiana, sulla sponda destra del Fosso della Melledra, affiora un tufo di colore arancione chiaro 10 YR 8/2 costituito da matrice fine con piccoli fenocristalli di leucite analcimizzata e numerosi vacuoli (TVU), riferito all'attività del Distretto Vulsino (Alberti et al., 1970; Fazzini et al., 1972).

I Depositi fluviali lacustri (RGT), ubicati in tre limitati affioramenti in sinistra del F. Mignone (Fig. 2a), comprendono ghiaie, sabbie gialle, limi e sono riferiti al Pleistocene superiore (De Rita et al., 1997;

⁶ Formula chimica: augite Ca (Mg, Fe, Al) (Al Si)₂ O₆; iperstene (Mg, Fe) SiO₃; biotite (K, H)₂ Al₂ (Si₃ O₄)₃.

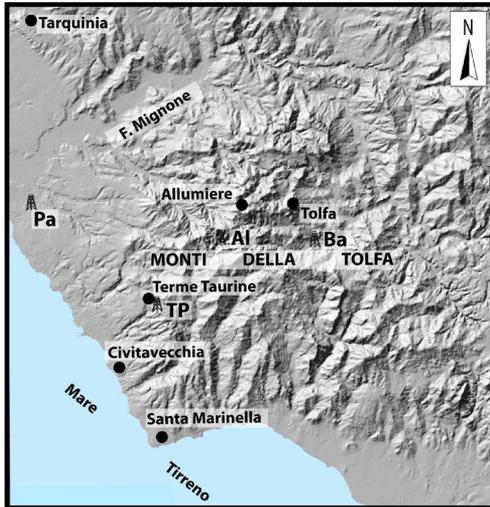


Figura 4 - Ubicazione dei pozzi dell'Enel (Pa, Pantani; Al, Allumiere; Ba, Bagnarello) e delle Terme dei Papi (TP).

Figura 4 - Location of the wells of Enel (Pa, Pantani; Al, Allumiere; Ba, Bagnarello) and Spa of Popes (TP).

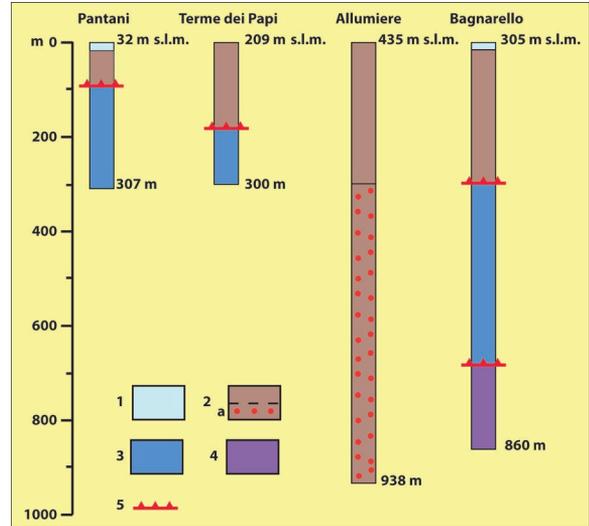
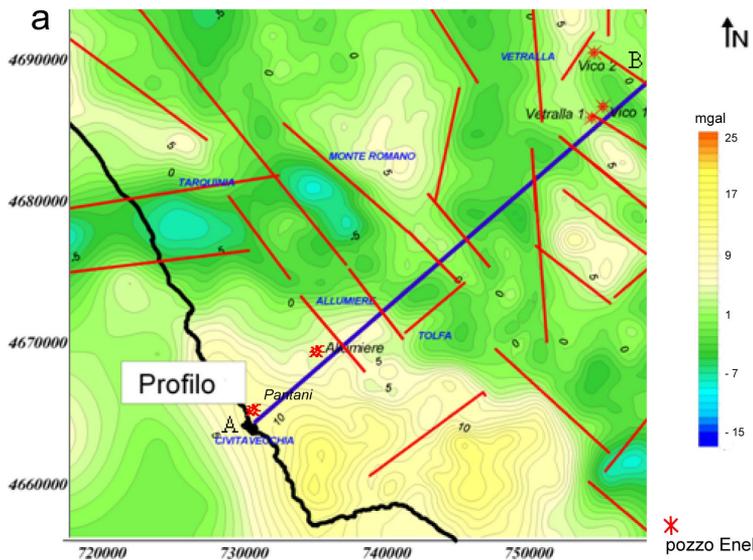


Figura 5 - Stratigrafia dei pozzi Pantani (1961), Allumiere (1962), Bagnarello (1962) dell'Enel e delle Terme dei Papi (2019). 1, travertino (Olocene); 2, Flysch della Tolfa: a, con noduli di pirite (Cretacico superiore-Eocene); 3, Falda Toscana: Calcari Diasprini (Dogger), 4, Calcari e Marne con Rhaeticula Contorta - Calcare Cavernoso (Triassico superiore); 5, contatto di sovrapposizione tettonica.

Figure 5 - Logs of the wells Pantani (1961), Allumiere (1962), Bagnarello (1962) of Enel and TP of Spa of Popes (2019). 1, travertine (Holocene); 2, Tolfa Flysch: a, with pyrite nodules (upper Cretaceous-Eocene); 3, Tuscan Nappe: Diasprino Limestone (Dogger); 4, Limestone and Marl with Rhaeticula Contorta-Cavernoso Limestone (upper Triassic); 5, tectonic overlapping contact.



ISPRa-Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico d'Italia, in attesa di stampa).

L'assetto stratigrafico e strutturale dei Monti della Tolfa, ricostruito anche mediante i pozzi perforati dall'Enel per ricerca geotermica (Pantani, Allumiere, Bagnarello) e dalle Terme dei Papi (Fig. 4 e 5), il modello gravimetrico, e (Fig. 6)

Figura 6 - Carta della gravità residuale (a) e profilo del modello gravimetrico (b) dei Monti della Tolfa. 1, unità vulcaniche (Pliocene-Pleistocene); 2, Flysch della Tolfa (Cretacico superiore-Eocene); 3, unità Mesozoico-Cenozoiche della Falda Toscana; 4 substrato quarzítico-filladico (Permiano); 4, faglia diretta. Da Chiocchini et al. (2010) modificato.

Figure 6 - Map of the residual gravity (a) and section of the gravimetric model (b) of the Tolfa Mountains. 1, volcanic units (Pliocene-Pleistocene); 2, Tolfa Flysch (upper Cretaceous-Eocene); 3, Mesozoic-Cenozoic units of the Tuscan Nappe; 4, quartzite-phyllite substrate (Permian); 4, normal fault. From Chiocchini et al. (2010) modified.

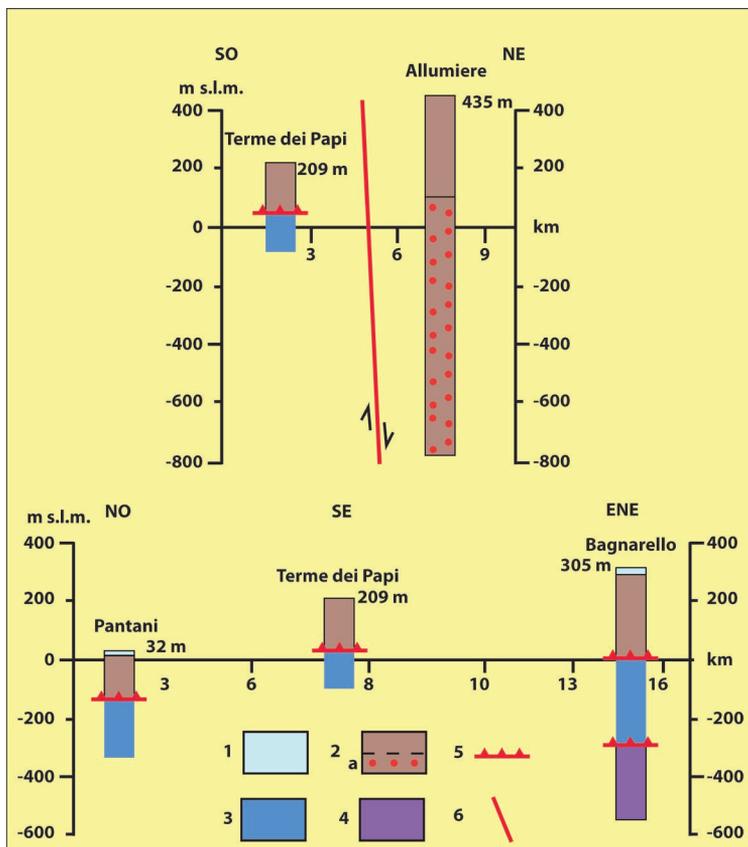


Figura 7 - Sezioni di correlazione dei pozzi dell'Enel e delle Terme dei Papi. 1, travertino (Olocene); 2, Flysch della Tolfa: a, con noduli di pirite (Cretaceo superiore – Eocene); Falda Toscana: 3, Calcari Diasprini (Dogger), 4, Calcari e Marne con Rhaetavicula Contorta–Calcarea cavernoso (Triassico superiore); 5, contatto di sovrapposizione tettonica; 6, faglia diretta.

Figure 7 - Correlation sections of the wells of Enel and Spa of Papes. 1, travertine (Holocene); 2, Tolfa Flysch: a, with pyrite nodules (upper Cretaceous-Eocene); 3, Tuscan Nappe: Diasprino Limestone (Dogger); 4, Limestone and marl with Rhaetavicula contorta–Cavernoso Limestone (upper Triassic); 5, tectonic overlapping contact; 6, normal fault.

6 mostra che l'area di Tolfa-Allumiere è compresa in un horst.

Il rilevamento geologico ha confermato le indicazioni della mappa del Progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia) relative ai movimenti franosi attivi che interessano sia il Flysch della Tolfa nel territorio di Allumiere e Tolfa, in particolare la Strada Provinciale 3/A, mediante scivolamento rotazionale/traslattivo, colamento lento, zone con frane superficiali diffuse, e meno frequenti movimenti di tipo complesso, sia le lave dell'Unità di Allumiere tramite movimenti per crollo/ribaltamento nelle zone di Allumiere, Tolfa, e Ripa Maiale.

le sezioni di correlazione dei pozzi (Fig. 7), evidenzia la sovrapposizione tettonica del Flysch della Tolfa sulla Falda Toscana. Quest'ultima giace sul substrato quarzítico filladico del Permiano, ed è costituita dai Calcari Diasprini del Dogger, sovrascorsi sulla successione prevalentemente dolomitica che comprende i Calcari e Marne con Rhaetavicula Contorta e il Calcarea Cavernoso del Triassico superiore (parte inferiore della Falda Toscana). Tale assetto stratigrafico e strutturale, dovuto alle fasi di deformazione dell'Oligocene-Miocene inferiore e del Miocene medio superiore (Kligfield et al., 1986; Brunet et al., 1997; Rossetti et al., 1999; ISPRA – Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico d'Italia, in attesa di stampa) successivamente è stato suddiviso in horst e graben ad opera delle fasi della tettonica distensiva del Pliocene e Pleistocene (Consiglio Nazionale delle Ricerche, 1987; ISPRA – Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico d'Italia, in attesa di stampa). Si evidenzia che la Falda Toscana è stata oggetto di ricerche per lo sfruttamento dei fluidi idrotermali da parte della Società Terni, dell'Enel e dell'Agip nell' area di Civitavecchia. La sezione gravimetrica della Figura

Il rischio sismico del territorio comunale di Allumiere, Tolfa e Civitavecchia è classificato con il grado 3B e indice di accelerazione (ag) $< 0,10^{[7]}$, con una probabilità di essere superato pari al 10% in 50 anni. Si tratta di un rischio sismico basso che implica scuotimenti modesti.

Assetto idrogeologico

Elementi climatici

Sono state analizzate le seguenti variabili climatiche della stazione di Allumiere:

- T°C: temperatura media mensile e annuale;
- Pmm: precipitazioni totali medie mensili e annuali;
- ER: evapotraspirazione reale annuale;
- PE: precipitazioni efficaci annuali.

Inoltre, sono stati stimati i seguenti parametri statistici:

- N: numero di osservazioni della serie di valori;
- MA: media aritmetica della serie dei valori;
- MAX, MIN: rispettivamente, valore massimo e valore minimo della serie;

⁷ Questo indice rappresenta l'accelerazione orizzontale massima su suolo rigido e pianeggiante.

| Stazione termo-pluviometrica Allumiere | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|----------|
| Bacino del Fiume Mignone | | | | | | | | | | | | | |
| Quota 534 m s.l.m. Coordinate WGS 84 DMS 42°09'28" N – 11°54'31,40" E | | | | | | | | | | | | | |
| T°C | G | F | M | A | M | G | L | A | S | O | N | D | An-nuale |
| Men-sile | 6,11 | 6,57 | 8,65 | 11,64 | 15,75 | 19,88 | 22,97 | 22,90 | 19,34 | 14,91 | 10,44 | 7,39 | 13,88 |
| MAX | 9,07 | 9,59 | 12,28 | 15,19 | 19,78 | 24,04 | 27,86 | 27,41 | 23,52 | 18,58 | 13,38 | 10,18 | 17,56 |
| MIN | 3,33 | 3,55 | 5,24 | 7,56 | 11,62 | 15,23 | 17,85 | 18,23 | 15,12 | 11,54 | 7,40 | 4,73 | 10,12 |
| P mm | G | F | M | A | M | G | L | A | S | O | N | D | 974,38 |
| Men-sile | 102,66 | 99,58 | 87,29 | 75,13 | 64,93 | 35,42 | 17,85 | 36,39 | 78,13 | 114,43 | 138,43 | 124,14 | |

Tabella 1 – Valori della temperatura (T°C) media mensile e annuale (55 anni), massima (MAX) e minima (MIN) (46 anni), e delle precipitazioni (P mm) medie mensili e annuali (55 anni) della stazione termo-pluviometrica Allumiere nei periodi 1964 - 2011 e 2015 - 2021.

Table 1 - Values of the mean monthly and annual temperature (T°C) (55 years), maximum (MAX) and minimum (MIN) (46 years) and mean monthly and annual precipitation (P mm) (55 years) of the thermo-pluviometric station of Allumiere in the periods 1964 - 2011 and 2015 - 2021.

- SQM: scarto quadratico medio della serie;
- CV: coefficiente di variazione (rapporto SQM/MA);
- SQMMR: scarto quadratico medio della media relativo (rapporto CV/radice quadrata di N).

Temperatura

La temperatura media annuale (T°C) è 13,88°C, le medie mensili sono comprese tra il minimo 6,11°C in gennaio e il massimo 22,97°C in luglio (Tabella 1 e 2, Fig. 8a). Il valore medio più basso della temperatura minima si verifica in gennaio con 3,33°C, il valore medio più alto in agosto con 18,23°C, e il valore medio più basso della temperatura massima avviene in gennaio con 9,07°C, il più alto in luglio con 27,86°C.

L'elaborazione dei dati mediante il metodo dei minimi quadrati, illustrato nel grafico di Figura 8b, evidenzia la positività dell'andamento della temperatura media annua. Pertanto, estrapolando questa tendenza al prossimo decennio, si può ipotizzare che il valore medio della temperatura aumenti.

Precipitazioni

Il valore annuale medio delle precipitazioni totali (P mm), che si verificano prevalentemente in autunno e inverno, è 974,38 mm (Tabella 1 e 2, Fig. 8a). I giorni piovosi si registrano in ottobre (114,43 mm), novembre (138,43 mm), dicembre (124,14 mm), e gennaio (102,66 mm), e i valori più bassi delle precipitazioni si verificano in giugno (35,42 mm), luglio (17,85 mm), e agosto (36,39 mm).

L'elaborazione dei dati mediante il metodo dei minimi quadrati, illustrato nel grafico di Figura 8c, indica la

tendenza negativa dell'andamento delle precipitazioni medie annue. Quindi, estrapolando questa tendenza al prossimo decennio, è possibile ipotizzare che il valore medio delle precipitazioni diminuisca.

Parametri derivati

La combinazione dei dati termici e di quelli pluviometrici consente di eseguire stime sulla evapotraspirazione reale (ER) e sulle precipitazioni efficaci annue (PE).

Evapotraspirazione

L'evapotraspirazione reale (ER) espressa in mm/annui è stata calcolata in base alla formula di Turc (1954):

$$ER = P / \sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}$$

in cui P è la precipitazione totale media annua, e

$$L = 300 + 25T + 0,05T^3$$

è un parametro funzione cubica della temperatura media annua T in °C.

Pertanto, per il periodo 1964 - 2011 e 2015 - 2021, essendo $L = 300 + 347 + 133,7 = 780,7$, si ottiene:

$$ER = 974,38 / 1,57 = 620,6 \text{ mm.}$$

Precipitazioni efficaci

Le precipitazioni efficaci annue medie (PE), che rappresentano la risorsa idrica totale naturale potenziale rinnovabile, si calcolano, per il periodo 1964 - 2011 e 2015 - 2021, mediante la differenza tra la media delle precipitazioni annue (974,38 mm) e la media dell'evapotraspirazione reale annua (620,6 mm):

$$PE = P \text{ mm} - ER = 353,78 \text{ mm} = 353,78 \text{ l/m}^2.$$

| Stazione termo-pluviometrica Allumiere Bacino del Fiume Mignone Quota 534 m s.l.m. Coordinate WGS 84 DMS 42°09'28" N – 11°54'31,40" E | | |
|---|--------------------|-----------------------|
| Anno | Temperatura (T °C) | Precipitazioni (P mm) |
| 1964 | 14,75 | 103,13 |
| 1965 | 13,60 | 81,46 |
| 1966 | 13,93 | 100,39 |
| 1967 | 14,20 | 80,96 |
| 1968 | 13,58 | 85,73 |
| 1969 | 11,77 | 89,31 |
| 1970 | 13,88 | 61,32 |
| 1971 | 13,82 | 82,22 |
| 1972 | 13,68 | 106,25 |
| 1973 | 13,95 | 78,11 |
| 1974 | 13,83 | 84,97 |
| 1975 | 14,26 | 85,12 |
| 1976 | 13,98 | 88,94 |
| 1977 | 12,53 | 88,69 |
| 1978 | 13,45 | 99,70 |
| 1979 | 13,43 | 115,82 |
| 1980 | 12,78 | 94,05 |
| 1981 | 13,18 | 75,27 |
| 1982 | 14,11 | 58,90 |
| 1983 | 13,64 | 66,58 |
| 1984 | 12,99 | 110,23 |
| 1985 | 14,02 | 61,30 |
| 1986 | 13,75 | 84,55 |
| 1987 | 13,83 | 90,45 |
| 1988 | 14,21 | 54,52 |
| 1989 | 14,12 | 69,67 |
| 1990 | 14,11 | 66,82 |
| 1991 | 13,45 | 83,65 |
| 1992 | 12,66 | 78,65 |
| 1993 | 13,99 | 44,52 |

| | | |
|------|-------|--------|
| 1994 | 15,00 | 66,69 |
| 1995 | 13,58 | 64,93 |
| 1996 | 13,51 | 124,82 |
| 1997 | 14,28 | 101,75 |
| 1998 | - | 74,02 |
| 1999 | 13,57 | 72,18 |
| 2000 | 14,13 | 69,59 |
| 2001 | 13,37 | 57,78 |
| 2002 | 14,13 | 80,48 |
| 2003 | 14,64 | 60,17 |
| 2004 | 13,87 | 97,48 |
| 2005 | 12,56 | 103,00 |
| 2006 | 13,49 | 70,60 |
| 2007 | 13,78 | 49,73 |
| 2008 | 13,55 | 101,12 |
| 2009 | 13,76 | 85,62 |
| 2010 | 13,03 | 109,27 |
| 2011 | 14,08 | 59,92 |
| 2015 | 14,48 | 80,97 |
| 2016 | 14,35 | 70,25 |
| 2017 | 14,36 | 40,57 |
| 2018 | 14,52 | 97,65 |
| 2019 | 14,47 | 109,53 |
| 2020 | 14,58 | 70,57 |
| 2021 | 14,73 | 75,98 |

Parametri statistici

| | | |
|--------------|-------|--------|
| N | 55 | 55 |
| MA (°C; mm) | 13,88 | 974,38 |
| MAX (°C; mm) | 17,56 | 138,43 |
| MIN (°C; mm) | 10,12 | 17,85 |
| SQM (°C; mm) | 0,50 | 224,24 |
| CV | 3,62 | 23,01 |
| SQMMR (%) | 0,07 | 30,24 |

Tabella 2 – Valori medi annuali della temperatura (T°C) e valori medi mensili delle precipitazioni (P mm) (55 anni) della stazione termo-pluviometrica Allumiere nei periodi 1964 – 2011 e 2015 – 2021. N, numero delle osservazioni; MA, media aritmetica della serie dei valori; MAX, valore massimo, MIN, valore minimo della serie; SQM, scarto quadratico medio della serie; CV, coefficiente di variazione (rapporto tra SQM e MA); SQMMR, scarto quadratico medio della media aritmetica (rapporto tra CV e la radice quadrata di N).

Table 2 - Mean annual values of temperature (T°C) and mean monthly values of precipitation (P mm) (55 years) of the thermo-pluviometric station of Allumiere in the periods 1964 – 2011 and 2015 – 2021. N, number of observations; MA, arithmetic mean of the series of values; MAX, maximum value, MIN, minimum value of the series; SQM, standard deviation of the series; CV, coefficient of variation (ratio between SQM and MA); SQMMR, standard deviation of the arithmetic mean (ratio of CV to the square root of N).

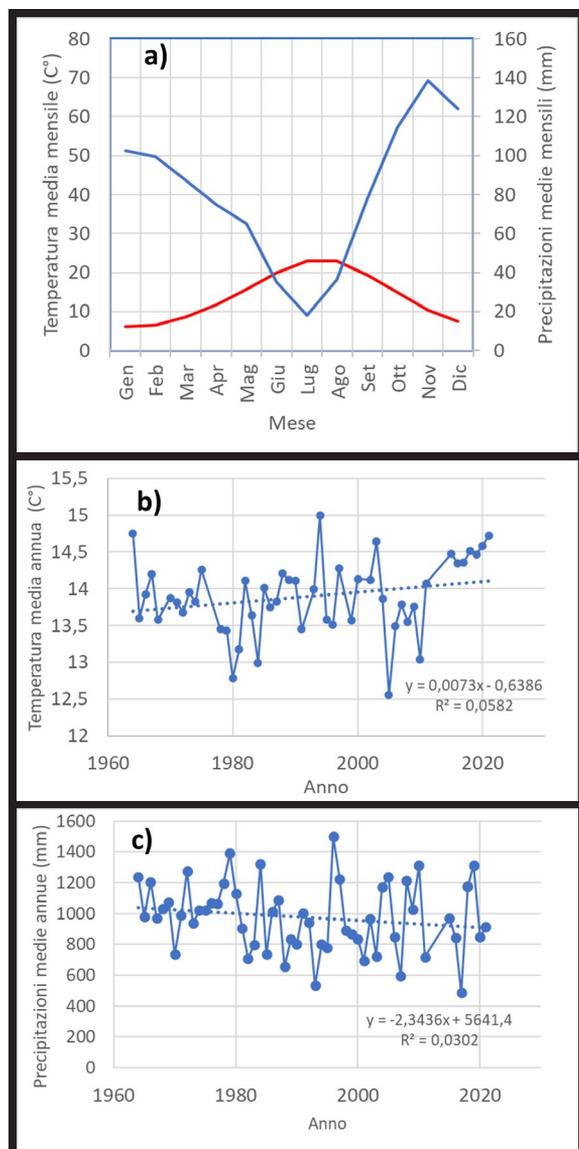


Figura 8 - a) Diagramma dell'andamento della temperatura media mensile in gradi centigradi (linea azzurra) e delle precipitazioni medie mensili in millimetri (linea rossa) della stazione Allumiere nei periodi 1964 - 2011 e 2015 - 2021. b) Diagramma dell'andamento delle variazioni della temperatura media annua in gradi centigradi della stazione Allumiere nei periodi 1964 - 2011 e 2015 - 2021. R2, coefficiente di determinazione. c) Diagramma dell'andamento delle variazioni delle precipitazioni medie annue in millimetri della stazione Allumiere nei periodi 1964 - 2011 e 2015 - 2021. R2, coefficiente di determinazione

Figure 8 - a) Diagram showing the trend of the average monthly temperature in Celsius degrees (blue line) and the average monthly rainfalls in millimeters (red line) at the Allumiere station in the periods 1964 - 2011 and 2015 - 2021. R2, coefficient of determination. b) Diagram showing the variation of the average annual temperature in Celsius degrees at the Allumiere station in the periods 1964 - 2011 and 2015 - 2021. R2, coefficient of determination. c) Diagram showing the trend of changes in the average annual rainfalls in millimeters at the Allumiere station in the periods 1964 - 2011 and 2015 - 2021. R2, coefficient of determination

E' possibile ritenere che le condizioni ambientali e climatiche del passato, in particolare i livelli delle precipitazioni, siano state simili a quelle attuali e che abbiano favorito le attività antropiche e lo sviluppo socioeconomico, come è avvenuto tra il 350 e il 150 a.C., anche in presenza della Piccola Età Glaciale Arcaica tra il 520 a.C. e il 357 d.C. (Ortolani & Pagliuca, 2007; Luterbacher et al., 2016).

I complessi idrogeologici

Nell'area dei Monti della Tolfa sono stati riconosciuti i seguenti complessi idrogeologici, dal più antico a quello più recente: Complesso del Flysch (Cretacico superiore - Eocene), Complesso delle argille (Pliocene inferiore), Complesso delle lave (Pliocene superiore - Pleistocene inferiore), Complesso detritico (Pliocene superiore - Olocene) (Fig. 9a).

Il Complesso del Flysch, costituito dal Flysch della Tolfa, è caratterizzato da un grado di permeabilità relativa per fratturazione da molto basso a nullo e Coefficiente di Infiltrazione Potenziale (CIP) < 0,5 (Celico, 1988; Civita, 2005). Questo complesso corrisponde ai "Depositi torbiditici indifferenziati" di Ambrosi et al. (1984) e Bono et al. (1989) con funzione di acquiclude degli acquiferi carbonatici mesozoici sottostanti, al "Complesso dei flysch argillosi con intercalazioni litoidi" di Boni et al. (1986), alle "Rocce lapidee e sciolte con permeabilità ridottissima o nulla" di Ventriglia (1988), al "Complesso dei flysch marnoso-argillosi" di Capelli et al. (2012a), e alla "Unità Flyscioide F1 Monti della Tolfa" di Capelli et al. (2012b), con permeabilità relativa bassissima, infiltrazione efficace nulla, e potenzialità irrilevante. Queste indicazioni sono confermate dal basso valore del coefficiente di conducibilità idraulica ($k = 5 \times 10^{-8} - 5 \times 10^{-9}$ m/s) determinato specificamente per il Complesso del Flysch nell'area di Viterbo (Piscopo et al., 2006), con condizioni litostratigrafiche e strutturali identiche a quelle dell'area in esame (Foglio 345 Viterbo; ISPRA Servizio Geologico d'Italia, in attesa di stampa).

Il Complesso delle argille, composto dall'Unità del Fosso di San Savino e corrispondente ai "Depositi marini argillosi e argilloso-sabbiosi" di Ambrosi et al. (1984) e Bono et al. (1989), al "Complesso delle argille marine" di Boni et al. (1986), alle "Rocce lapidee e sciolte con permeabilità ridottissima o nulla" di Ventriglia (1988), e al "Complesso delle argille" di Capelli et al. (2012a, b), è caratterizzata da un grado di permeabilità relativa da bassissimo a nullo con CIP = 0,15 (Celico, 1988; Civita, 2005).

Il Complesso delle lave, costituito dall'Unità di Allumiere, corrisponde in parte ai "Depositi vulcanici della serie

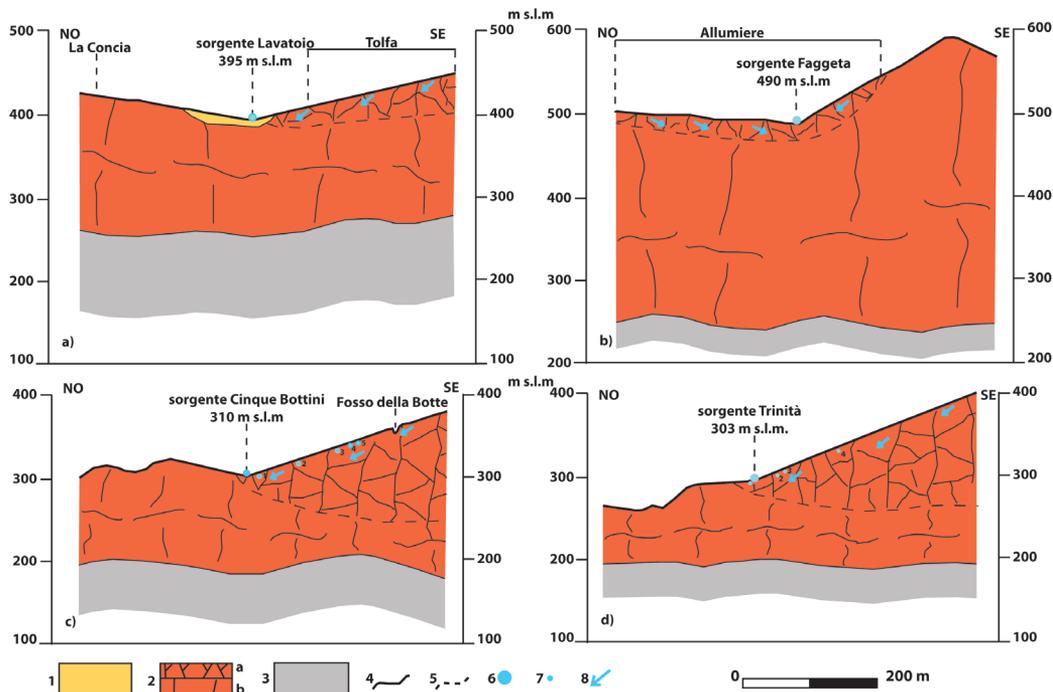


Figura 9b - Sezioni idrogeologiche che illustrano schematicamente la suddivisione del Complesso delle lave in compartimenti con permeabilità relativa differente, la circolazione delle acque sotterranee, e la genesi delle sorgenti per limite di permeabilità indefinito al contatto tra compartimenti con grado di permeabilità relativa medio alto e compartimenti con grado di permeabilità relativa scarso. Le sorgenti delle sezioni a) e b) sono quelle minori (Faggeta, Acqua Bianca, Lavatoio), le sorgenti delle sezioni c) (Cinque Bottini) e d) (Trinità) sono quelle maggiori, che alimentavano l'acquedotto di Traiano. 1, Complesso detritico con grado di permeabilità relativa medio alto per porosità; 2, Complesso delle lave con grado di permeabilità relativa per fessurazione e fratturazione medio alto (a) e basso (b); 3, Complesso del Flysch con grado di permeabilità relativa per fratturazione da molto basso a nullo; 4, limite inferiore di tipo impermeabile; 5, limite indefinito di permeabilità; 6, sorgente; 7, punto di captazione di vene di acqua; 8, circolazione delle acque sotterranee.

Figure 9b - Hydrogeological sections that schematically illustrate the subdivision of the Lava complex into compartments with different relative permeability, the circulation of groundwater, and the genesis of the springs because of the indefinite permeability limit at the contact between compartments with medium high degree of relative permeability and compartments with low degree of relative permeability. The springs of sections a) and b) are the minor ones (Beechwood, White Water, Washtub), the springs of sections c) (Five Bottini) and d) (Trinità) are the major ones, that fed the Traiano's aqueduct. 1, Detrital complex with medium high degree of relative permeability because of porosity; 2, Lava complex with medium high (a) and low (b) degree of relative permeability because of cracking and fracturing; 3, Flysch complex with degree of relative permeability because of fracturing from very low to zero; 4, lower limit of the impervious type; 5, indefinite permeability limit; 6, spring; 7, point of collection of veins of water; 8, groundwater circulation.

a quelli caratterizzati da un grado di permeabilità relativa basso, separati tramite un *limite di permeabilità indefinito* (Civita, 2005) (Fig. 9b). La conseguente anisotropia idraulica dell'intero ammasso roccioso suggerisce che il CIP di questo complesso è mediamente 0,65 (Celico, 1988; Civita, 2005). Pertanto, l'aliquota di infiltrazione corrisponde al 65% delle precipitazioni efficaci PE, cioè $65\% \cdot 353,78 = 230$ mm/anno: questo valore è uguale a quello riportato da Capelli et al. (2012b).

Il Complesso detritico, che comprende il deposito antropico e quello eluvio colluviale nella parte superiore alterata del Complesso delle lave, i Depositi fluviali lacustri, e l'Unità di Pian della Regina, mostra permeabilità relativa medio alta per porosità con CIP = 0,80 – 0,90 (Celico, 1988;

Civita, 2005).

Le stratigrafie dei pozzi 1 (profondità 51 m), 2 (profondità 100 m), 3 (profondità 80 m) forniscono ulteriori indicazioni sui complessi idrogeologici, confermando la presenza del Complesso detritico con spessore di 7 – 12 m a tetto della successione. L'ammasso roccioso del Complesso delle lave è alterato, caolinitizzato, e fratturato con spessore 41,5 m nel pozzo 1, fratturato e con spessore 55 m nel pozzo 2, mentre nel pozzo 3 mostra l'alternanza di due livelli poco e molto fratturati il cui spessore complessivo è 70 m. I pozzi 1 e 2 hanno intercettato il substrato impermeabile del Complesso del Flysch e del Complesso delle argille a quota, rispettivamente, 233,5 m s.l.m. (zona intermedia del Fosso della Botte), e 455 m s.l.m. (zona La Bianca) (Fig. 9a)

Tabella 3 – Quota (m s.l.m.), coordinate WGS 84 DMS, portata (Q l/s), e temperatura (T °C) delle sorgenti minori del Complesso delle lave. (*), non-potabile.**Table 3** - Height (m a.s.l.), WGS 84 DMS coordinates, yield (Q l/s), and temperature (T °C) of the minor springs of the Lava complex. (*), not drinkable.

| Nome | Data | Quota | Coordinate WGS 84 DMS | Q | T | |
|--------------------------|------------|-------|-----------------------|-------------------|-------|------|
| Lavatoio (L) | 04/11/2022 | 395 | 42°09'38,77" N | 0,16 | 14,2 | |
| | 02/12/2022 | | | 0,16 | 14,2 | |
| | 04/01/2023 | | | 0,18 | 14,1 | |
| | 03/02/2023 | | | 11°56'31,9" E | 0,19 | 14,1 |
| | 03/03/2023 | | | 0,16 | 14,2 | |
| | 23/04/2023 | | | 0,15 | 14,3 | |
| Casa Polveriera 1 (CP 1) | 04/11/2022 | 493 | 42°09'42,7" N | 0,027 | 10,7 | |
| | 02/12/2022 | | | 0,027 | 10,7 | |
| | 04/01/2023 | | | 0,028 | 10,6 | |
| | 03/02/2023 | | | 11°55'14,66" E | 0,028 | 10,6 |
| | 03/03/2023 | | | 0,026 | 10,7 | |
| 23/04/2023 | 0,026 | 10,8 | | | | |
| Casa Polveriera 2 (CP 2) | 04/11/2022 | 460 | 42°09'11,9" N | 0,82 | 12,6 | |
| | 02/12/2022 | | | 0,82 | 12,6 | |
| | 04/01/2023 | | | 0,83 | 12,5 | |
| | 03/02/2023 | | | 11°55'26,14" E | 0,83 | 12,5 |
| | 03/03/2023 | | | 0,81 | 12,7 | |
| 23/04/2023 | 0,81 | 12,7 | | | | |
| Cave Vecchie (CV) | 04/11/2022 | 485 | 42°09'37,47" N | 0,022 | 13,3 | |
| | 02/12/2022 | | | 0,022 | 13,3 | |
| | 04/01/2023 | | | 0,023 | 13,1 | |
| | 03/02/2023 | | | 11°08'42,9" E | 0,023 | 13,1 |
| | 03/03/2023 | | | 0,022 | 13,2 | |
| 23/04/2023 | 0,021 | 13,3 | | | | |
| Faggeta (F) | 04/11/2022 | 490 | 42°09'13,82" N | 0,05 | 16,8 | |
| | 02/12/2022 | | | 0,05 | 16,8 | |
| | 04/01/2023 | | | 0,06 | 16,5 | |
| | 03/02/2023 | | | 11°54'20,16" E | 0,06 | 16,4 |
| | 03/03/2023 | | | 0,05 | 16,8 | |
| 23/04/2023 | 0,04 | 16,7 | | | | |
| Acqua Bianca* (AB) | 04/11/2022 | 535 | 42°07'53,11" N | 0,05 | 15,6 | |
| | 02/12/2022 | | | 0,05 | 15,6 | |
| | 04/01/2023 | | | 0,06 | 15,4 | |
| | 03/02/2023 | | | 11°54'13,28" E | 0,06 | 15,3 |
| | 03/03/2023 | | | 0,05 | 15,5 | |
| 23/04/2023 | 0,05 | 15,6 | | | | |
| Le Cantarecce (LC) | 04/11/2022 | 175 | 42°11'30,17" N | 0,06 | 16,3 | |
| | 02/12/2022 | | | 0,06 | 16,2 | |
| | 04/01/2023 | | | 0,07 | 16,1 | |
| | 03/02/2023 | | | 11°52'27,09" E | 0,07 | 16,1 |
| | 03/03/2023 | | | 0,06 | 16,2 | |
| 23/04/2023 | 0,05 | 16,3 | | | | |
| Acqua del Campaccio (AC) | 04/11/2022 | 203 | 42°11'2,79" N | 0,04 | 16,3 | |
| | 02/12/2022 | | | 0,04 | 16,3 | |
| | 04/01/2023 | | | 0,05 | 16,1 | |
| | 03/02/2023 | | | 11°53'30,04" E | 0,05 | 16,2 |
| | 03/03/2023 | | | 0,04 | 16,2 | |
| 23/04/2023 | 0,04 | 16,3 | | | | |
| StLF | 04/11/2022 | 296 | 42°10'35,49" N | 0,028 | 17,3 | |
| | 02/12/2022 | | | 0,028 | 17,2 | |
| | 04/01/2023 | | | 0,03 | 17,1 | |
| | 03/04/2023 | | | 11°53'30,59" E | 0,03 | 17,1 |
| | 03/03/2023 | | | 0,029 | 17,2 | |
| 23/06/2023 | 0,029 | 17,2 | | | | |

in posizione marginale rispetto ai domi, mentre il pozzo 3 non ha attraversato il substrato impermeabile. Nel pozzo 1 la portata massima è 0,35 l/s, quella di esercizio non è determinata. Nel pozzo 2 la portata massima è 3 l/s, quella di esercizio 2 l/s. Nel pozzo 3 sono indicati solo due imprecisati livelli di acqua. Pertanto, i valori di portata dei tre pozzi sono molto bassi (Fig. 10).

Le sorgenti del Complesso delle lave

La suddivisione dell'ammasso roccioso del Complesso delle lave in compartimenti con grado di permeabilità relativa medio alto sovrapposti e/o adiacenti a quelli con grado di permeabilità relativa basso ha favorito l'emergenza di diverse sorgenti con portata $Q < 0,1$ l/s (sorgenti minori), e $Q > 5$ l/s (sorgenti maggiori) a quote differenti (Tabella 3). Secondo Camponeschi & Nolasco (1978), che hanno eseguito una rilevante ricerca sulle risorse naturali della regione Lazio, si riconoscevano le seguenti sorgenti di cui riportano solo la *portata stimata*: Faggeta, Acqua Bianca, Le Cantarecce, Acqua del Campaccio, M. Pietroso nel territorio del Comune di Allumiere; Lavatoio nel territorio del Comune di Tolfa. La presente ricerca ha consentito di individuare sei nuove sorgenti, di cui quattro minori (Casa Polveriera 1 e 2, Cave Vecchie, StLF) e due maggiori

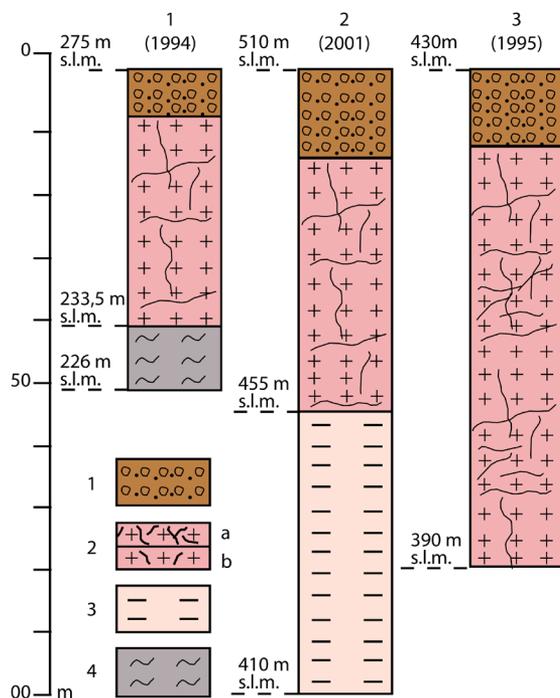


Figura 10 - Stratigrafia dei pozzi 1, 2, 3. 1, Complesso detritico; 2, Complesso delle lave (a, livello molto fratturato; b, livello poco fratturato); 3, Complesso delle argille; 4, Complesso del Flysch.

Figure 10 - Stratigraphy of wells 1, 2, 3. 1, Detrital complex; 2, Lava complex (a, highly fractured level; b, little fractured level); 3, Complex of clays; 4, Flysch complex.

(Cinque Bottini e Trinità) (Tabella 3 e Fig. 9a).

ACEA Ato 2 indica i dati di seguito riportati per i comuni di Allumiere Zona 1 e Tolfa Zona 1 Poggio delle Croci. Il primo comune “è servito da una collezione di sette fonti sotterranee locali riferibili ad acquiferi di natura vulcanica (vulcaniti acide) eventualmente miscelate con le acque del fiume Mignone potabilizzato a Monte Anciano”. La Zona 1 di Tolfa “è servita da una collezione di quattro sorgenti locali riferibili ad un acquifero di natura vulcanica, da una sorgente locale riferibile ad un acquifero di natura mista (calcareo vulcanica), e da un pozzo locale. A queste vengono saltuariamente aggiunte le acque del fiume Mignone potabilizzate a Monte Anciano”.

Per quanto riguarda il Comune di Allumiere, le parole “fonti sotterranee” non sono chiare e neppure specifiche per indicare la tipologia di acque sotterranee e di sorgenti, e non sono presenti “acquiferi vulcanici”, ma esiste un solo acquifero vulcanico, cioè il Complesso delle lave. Per il Comune di Tolfa, il riferimento ad un acquifero di natura mista calcareo vulcanica è errato perché nella struttura di un singolo acquifero non possono coesistere rocce

sedimentarie, come i calcari, e vulcaniche (lave e rocce piroclastiche). Inoltre, non è indicata l’ubicazione della collezione di sette sorgenti del Comune di Allumiere e di cinque sorgenti del Comune di Tolfa.

Le sorgenti minori

Sono state riconosciute nove sorgenti con una portata inferiore a 1 l/s (Tabella 3 e Fig. 9a), di cui sei sono quelle di Camponeschi & Nolasco (1978) con la relativa *portata stimata*: Lavatoio, $Q = 1$ l/s; Faggeta, Q non indicata; Acqua Bianca, $Q = 0,3$ l/s; Le Cantarecce, $Q = 0,5$ l/s; Acqua del Campaccio, $Q = 0,1$ l/s; M. Pietroso, $Q = 1$ l/s. La sorgente denominata Cave Vecchie (CV in Tabella 3) ha alimentato l’acquedotto per fornire acqua a Tolfa, progettato dalla Società Italiana per le Condotte d’Acqua nel 1884 (Sgriscia & Sereni, 1989). La ricerca di questi Autori illustra il difficile e tormentato percorso seguito dalla costruzione dell’acquedotto. I dati tecnici reperiti dagli Autori sono solo il profilo piano-altimetrico e la “Pianta topografica Delle sorgenti del Laghetto⁸⁾ in scala 1: 2000 m”, redatta dall’ingegnere Roberto Ceccarelli nel 1887. In questa mappa sono indicati tre gruppi di sorgenti, ma non vi è alcun riferimento alla loro portata.

Per quanto riguarda la portata delle sorgenti si osserva quanto di seguito riportato (Tabella 3).

- La sorgente M. Pietroso non è stata individuata perché è estinta.
- Il confronto tra i valori della *portata stimata* delle sorgenti Lavatoio, Faggeta, Acqua Bianca, Le Cantarecce, e Acqua del Campaccio sopra riportati, e i valori della portata misurata nel periodo di osservazione (novembre 2022- aprile 2023; Tabella 3), indica che la portata è diminuita drasticamente in circa 44 anni.
- I valori della portata di tutte le sorgenti suggeriscono un leggero aumento nei mesi di gennaio e febbraio in corrispondenza dell’incremento dei valori delle precipitazioni nei mesi di ottobre, novembre, dicembre, gennaio (Tabella 1 e 2 e Fig. 8).
- La sorgente Acqua Bianca eroga acqua non potabile.

Le sorgenti maggiori Cinque Bottini e Trinità

Queste sorgenti, che alimentavano l’acquedotto di Traiano e non riconosciute da Camponeschi & Nolasco (1978), sono ubicate nei rilievi collinari del Castagneto dei Cinque Bottini del territorio del Comune di Allumiere (Fig. 9a e 11). Il reticolo idrografico comprende il Fosso della Botte,

⁸ Questo toponimo non è riportato nella cartografia topografica ufficiale dell’Istituto Geografico Militare (IGM) e della Carta Tecnica della Regione Lazio.

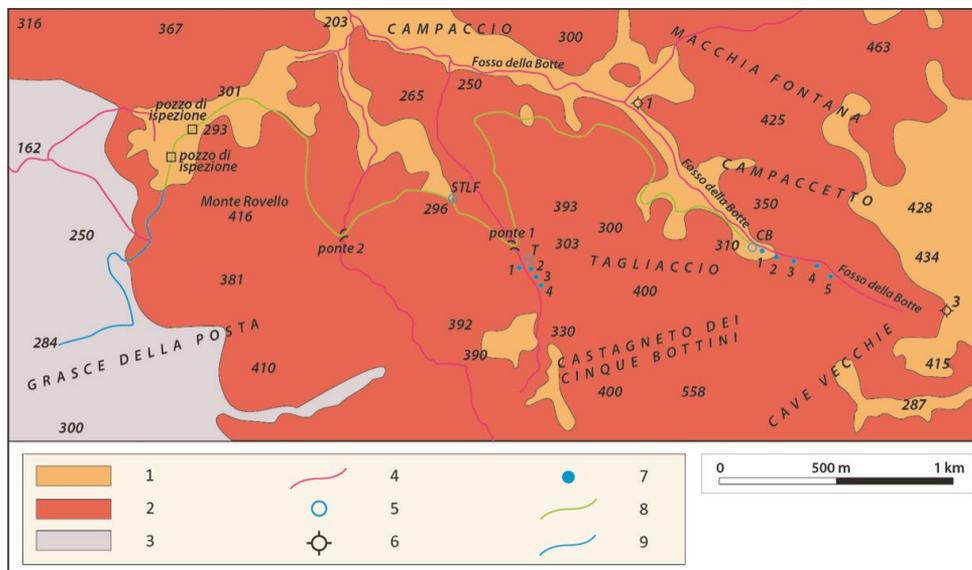


Figura 11 - Carta dei complessi idrogeologici dell'area delle sorgenti Cinque Bottini e Trinità che alimentavano l'acquedotto di Traiano. 1, Complesso detritico con grado di permeabilità relativa medio alto per porosità e Coefficiente di Infiltrazione Potenziale 0,80-0,90 (Olocene); 2, Complesso delle lave con grado di permeabilità relativa per fessurazione e fratturazione da medio alto a medio basso e Coefficiente di Infiltrazione Potenziale 0,65 (Pliocene superiore – Pleistocene inferiore); 3, Complesso del Flysch con grado di permeabilità relativa per fratturazione da molto basso a nullo e Coefficiente di Infiltrazione Potenziale < 0,5 (Cretacico superiore-Eocene); 4, torrente; 5, sorgente (AC, Acqua del Campaccio; StLF, strada per La Farnesiana; CB, Cinque Bottini; T, Trinità); 6, pozzo; 7, punti di captazione di vene di acqua 8, tracciato dell'acquedotto di Traiano non osservabile; 9, tracciato dell'acquedotto di Traiano osservabile.

Figure 11 - Map of the hydrogeological complexes of the area of the Five Bottini and Trinità springs that fed the Traiano's aqueduct. 1, Detrital complex with a medium high degree of relative permeability because of porosity and Potential Infiltration Coefficient 0.80-0.90 (Holocene); 2, Lava complex with medium high to low degree of relative permeability because of cracking and fracturing, and Potential Infiltration Coefficient 0.65 (upper Pliocene – lower Pleistocene); 3, Flysch complex with degree of relative permeability because of fracturing from very low to zero and Potential Infiltration Coefficient < 0.5 (upper Cretaceous-Eocene); 4, torrent; 5, spring (AC, Water of the Campaccio; StLF, road to La Farnesiana; CB, Five Bottini; T, Trinità); 6, well; 7, points of collection of veins of water 8, layout of the unobservable Traiano's aqueduct; 9, observable layout of the Traiano's aqueduct.

che lambisce in sinistra la sorgente Cinque Bottini a quota 310 m s.l.m., e il suo torrente tributario di sinistra, con la sorgente Trinità sulla sponda destra a quota 303 m s.l.m. (Fig. 11).

Per quanto riguarda il controllo delle due sorgenti, è necessario ribadire che l'impossibilità di accesso ha impedito di misurare la portata, la temperatura, e i parametri chimico fisici dell'acqua. I dati disponibili, prima della gestione di Acea Ato 2 iniziata alla fine degli anni Cinquanta, sono pochi e distanziati nel tempo. Infatti, Frangipani (1761) indica 11,25 l/s e successivamente 15 l/s senza specificare il mese. Brunori (1990) riporta le seguenti portate: 17,5 l/s in aprile, e 9,5 l/s in agosto 1693, 13 l/s nel 1742, e 7,5 l/s nel 1953, senza specificare il mese. Sistemando questi dati in ordine cronologico, si nota che nel 1693 la portata di aprile è diminuita da 17,5 a 9,5 l/s di agosto (circa il 54%), mentre nel 1742 e 1761 mostra valori simili, compresi tra 11,25 e 13-15 l/s, e nel 1953 raggiunge il valore più basso (7,5 l/s). I dati sopra illustrati indicano che il Complesso delle lave

costituisce un acquifero fessurato e fratturato, sostenuto dal Complesso del Flysch ed in minore misura dal Complesso delle argille con permeabilità relativa molto bassa e/o nulla, che ne costituiscono il limite inferiore di tipo impermeabile. Tale acquifero è caratterizzato da anisotropia idraulica dell'intero ammasso roccioso, connessa alla suddivisione verticale e laterale in compartimenti con un grado di permeabilità relativa da medio alto a basso tramite il limite di permeabilità indefinito (Civita, 2005). Al riguardo, si deve considerare che il Complesso delle lave si è depositato su una morfologia preesistente, modificata dalla intrusione, che ha causato l'emissione delle lave e il sollevamento del Complesso del Flysch e del Complesso delle argille, e attualmente forma spartiacque sotterranei differenti da quelli superficiali più antichi.

Le variazioni dei bassi valori di portata di tutte le sorgenti e dei pozzi sono connesse a quelle dell'andamento delle precipitazioni durante l'anno idrogeologico, cioè il tempo "t" compreso tra due minimi della portata "Q", essendo Q

= $f(t)$, nel contesto degli afflussi – deflussi dell'acquifero del Complesso delle lave. Inoltre, tutte le sorgenti sono dovute a *limite di permeabilità indefinito* (Civita, 2005), che controlla la loro quota, compresa tra 175 m s.l.m. (Le Cantarecce) e 535 m s.l.m. (Acqua Bianca). Il contesto idrogeologico e la temperatura pressoché costante dell'acqua delle sorgenti minori, compresa tra circa 10,7°C e 17°C (Tabella 3) suggeriscono che la circolazione delle acque sotterranee si sviluppa prevalentemente in senso verticale seguendo in genere percorsi relativamente brevi. L'entità della portata delle sorgenti è strettamente collegata alle dimensioni geometriche dei compartimenti del Complesso delle lave con permeabilità relativa medio alta: le sorgenti minori sono riferite ai compartimenti con dimensioni ridotte (Fig. 9b, sezioni "a" e "b"), mentre le sorgenti maggiori Cinque Bottini e Trinità sono collegate ai compartimenti con dimensioni più grandi (Fig. 9b, sezioni "c" e "d"). Questo tipo di sorgenti con *limite di permeabilità indefinito* dell'acquifero del Complesso delle lave, connesso alla Provincia Magmatica Toscana, è stato riconosciuto anche nell'acquifero vulcanico del Monte Amiata della stessa provincia magmatica in Toscana meridionale, essendo costituito da un complesso trachitico-dacitico basale più antico e un successivo complesso costituito da domi e colate quarzolattitiche del Pleistocene medio (Mazzuoli & Pratesi, 1963; Ferrari et al., 1996; Senarum Universitatis, 2008; Barazzuoli et al., 2020)).

Pertanto, quanto sopra illustrato suggerisce che il Complesso delle lave, alimentato esclusivamente dalla infiltrazione della pioggia e neve cadute sui rilievi collinari, è un acquifero che contiene corpi idrici sospesi a quote differenti di importanza locale e di limitata estensione, in accordo con Capelli et al. (2012a). L'insieme della captazione delle sorgenti maggiori consentiva una portata significativa, tale da giustificare la costruzione dell'acquedotto per il porto di *Centumcellae*.

Osservazioni sui caratteri chimico fisici dell'acqua delle sorgenti

Tenuto conto dello scopo della ricerca, si ritiene utile fare un breve riferimento ai dati relativi alla composizione chimica della sorgente Acqua del Campaccio riportati da Camponeschi & Nolasco (1978). Si tratta delle analisi effettuate da Carpi nel 1827 e Valcauda nel 1887, nelle quali la composizione dell'acqua è espressa sotto forma di sali e di ossidi, come era di norma espressa all'epoca, mentre in quella del 1933 essa è riportata come cationi ed anioni, ad esclusione del silicio espresso come silice. Al

fine di valutare l'andamento nel tempo della composizione dell'acqua mediante il confronto dei suddetti dati, è stato necessario calcolare le concentrazioni dei cationi e degli anioni più significativi per le analisi del 1827 e 1887. L'analisi del 1827 è caratterizzata dalla prevalenza di Ca^{2+} (0,417 g/l) rispetto al Fe^{3+} (0,0331 g/l) ed alla silice SiO_2 (0,0034 g/l), dalla quantità rilevante di HCO_3^- (0,6830 g/l), e dal residuo fisso di g/l 1,6723. L'analisi del 1887 mostra un andamento simile con la prevalenza di Ca^{2+} (0,3542 g/l) rispetto al Fe^{3+} (0,0442 g/l) ed alla silice SiO_2 (0,027 g/l) cui si associamo una quantità rilevante di HCO_3^- (0,9017 g/l) ed un residuo fisso di 1,661 g/l. Le quantità di ferro, bicarbonati e silice presenti nel campione del 1887 sono maggiori di quelle presenti nell'analisi del 1827, con un leggero incremento del rapporto ferro/calcio. Tali differenze potrebbero essere dovute alle metodiche analitiche utilizzate nel 1827 che, piuttosto complesse e meno precise, si sono evolute nel tempo dando una migliore accuratezza e riproducibilità con i dati nel 1887, oltre che all'enorme intervallo di tempo intercorso (60 anni), che potrebbe aver modificato la composizione dell'acqua. Una migliore rispondenza dei dati sembra esistere tra le analisi del 1887 e 1933 (46 anni), anno in cui il modo di riportare i risultati cambia completamente, esprimendoli in cationi ed anioni come oggi. In quest'ultima analisi è evidente una prevalenza di Ca^{2+} (0,3105 g/l) rispetto al Fe^{3+} (0,0383 g/l) ed alla silice SiO_2 (0,027 g/l), cui si associa una quantità rilevante di HCO_3^- (1,0768 g/l) ed un residuo fisso di 1,648 g/l.

I dati fin qui riportati evidenziano che l'impronta chimica dell'acqua non si è sostanzialmente modificata nell'arco di ben 106 anni, a causa del contatto con le rocce laviche contenenti minerali silicati. In particolare, la prevalenza di calcio rispetto al ferro nell'acqua e la bassa concentrazione di SiO_2 potrebbero essere dovute al contatto dell'acqua con le lave nelle quali i pirosseni sono più alterati con conseguente diminuzione di FeO ed MgO, e le plaghe di calcite nella pasta di fondo, oltre ad incrementare la quantità di CaO, abbassano il contenuto di SiO_2 , come evidenziato da De Rita et al. (1997). Nelle analisi sopra riportate non è presente il valore del pH, che, data la presenza di CO_2 , sicuramente deve essere acido contribuendo così alla solubilizzazione della calcite con rispettivo incremento in acqua sia di Ca^{2+} che di HCO_3^- .

Per quanto concerne le sette sorgenti del Comune di Allumiere e le quattro sorgenti del Poggio delle Croci gestite da ACEA Ato 2 non sono disponibili dati relativi alle acque che la stessa ACEA Ato 2 utilizza a scopo potabile, mescolandole con quelle del F. Mignone potabilizzate a Monte

Anciano. Le analisi disponibili sono relative alle miscele a scopo potabile realizzate dall'ACEA Ato 2, che, come tali, non possono dare alcuna indicazione circa la composizione dell'acqua delle sorgenti e di quella del F. Mignone prima della loro miscelazione.

Le opere di presa delle sorgenti Cinque Bottini e Trinità



Figura 12 - Bottino di presa della sorgente Cinque Bottini.
Figure 12 - Catchment room of the Five Bottini spring.



Figura 13 - Bottino di presa della sorgente Trinità.
Figure 13 - Catchment room of the Trinità spring.

Allo scopo di comprendere le modalità di costruzione delle opere di presa delle sorgenti Cinque Bottini e Trinità (Fig. 12 e 13), è utile un breve riferimento preliminare alle tecniche costruttive moderne per confronto con le opere di presa adottate dai tecnici romani.

Le opere di presa comprendono due gruppi (Civita, 2005). Il

primo gruppo si riferisce alle opere di presa direttamente alle sorgenti (bottino di presa, drenaggi addossati), mirate a raccogliere le portate delle sorgenti. Nel secondo gruppo sono comprese le opere di presa che drenano le acque direttamente dall'acquifero, essenzialmente mediante opere orizzontali (gallerie e trincee drenanti) e opere verticali (pozzi). Queste opere sono definite complete o incomplete se interessano o meno il substrato impermeabile alla base dell'acquifero.

Per le opere di presa direttamente alle sorgenti come quelle di Cinque Bottini e Trinità, si verificano due situazioni: sorgente unica ben individuata, ovvero presenza di piccole emergenze e vene sparse in una zona più o meno limitata. Nel primo caso si rimuovono i detriti intorno alla sorgente, si esegue uno scavo nella roccia per ospitare una vasca di raccolta (bottino di presa) in muratura o cemento armato (Fig. 14), e si costruiscono due vasche ad una quota più bassa rispetto al bottino: una per la sedimentazione dei detriti, l'altra di carico con le opere di derivazione. Le opera

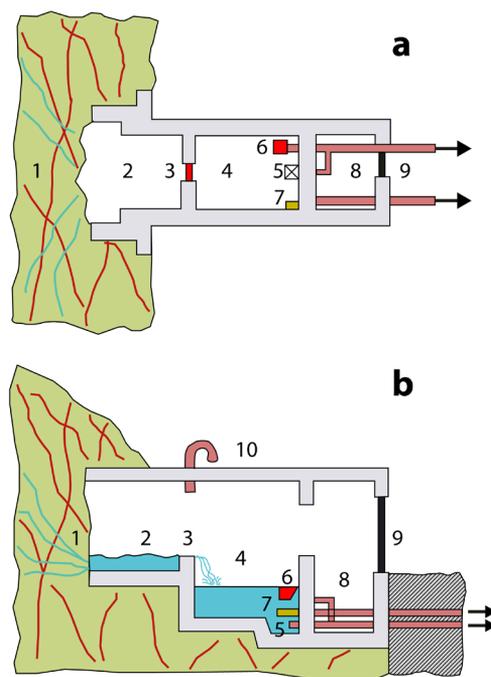


Figura 14 - Schema del bottino di presa di una sorgente, in pianta (a) e in sezione (b). 1, acquifero; 2, bottino di presa; 3, stramazzo per misura di portata; 4, vasca di carico; 5, scarico di fondo; 6, scarico di troppo pieno; 7, filtro; 8, camera di manovra; 9, sportello di ingresso; 10, condotto di aerazione. Da Civita (2005) modificato.

Figure 14 - Scheme of the catchment room of a spring, in plan (a) and in section (b). 1, aquifer; 2, catchment room; 3, overfall for measuring the yield; 4, loading basin; 5, bottom emptying; 6, overflow emptying; 7, filter; 8, maneuvering chamber; 9, inlet door; 10, ventilation pipe. From Civita (2005) modified.

di presa e le vasche con le pareti interne impermeabilizzate sono interrate allo scopo di proteggere la temperatura e la qualità dell'acqua. Nel secondo caso con diverse piccole emergenze le opere di presa sono orizzontali, mediante cunicoli drenanti o trincee a quota inferiore rispetto alle emergenze. In questo ultimo caso sono definite drenaggi addossati (Civita, 2005; Fig. 15).

Le opere di presa delle sorgenti Cinque Bottini e Trinità si riferiscono a vene di acqua captate a quote differenti utilizzando i cunicoli drenanti, quindi rientrano nel secondo caso. Quelle della sorgente Cinque Bottini sono ubicate alle quote 312 m (1), 320 m (2), 335 m (3), 342 m (4), 346 m (5) s.l.m. (Fig. 9b, sezione "c"). Quelle della sorgente Trinità si trovano alle quote 303 m (1), 305 m (2), 310 m (3), 320 m (4) s.l.m. (Fig. 9b, sezione "d"). La captazione delle vene di acqua delle due sorgenti, illustrata da Lulier (1887) in una mappa in scala 1: 400, mostra la rete di cunicoli drenanti costituita dall'"allacciatura delle sorgenti del passo della Vecchia" (Cinque Bottini) e dagli "allacciamenti del Romitorio della Trinità". La prima "allacciatura" comprende "il condotto che riceve i braccioli laterali", un contenitore dell'acqua delle vene captate ("botte antica"), e il "principio del grande acquedotto". Gli "allacciamenti" della Trinità includono il "ponte museo di Traiano", il "purgatore" illustrato in pianta e in sezione longitudinale e trasversale, "l'acquedotto intermedio", il "primo, secondo, e terzo braccio", due "botte con le sorgive", un "bottino per unire l'acqua", un "braccio con l'alberi", e un "braccio con suoi braccioli". Attualmente è possibile (i) riconoscere l'ingresso di un cunicolo drenante (Fig. 16) di fronte al bottino di presa della sorgente Trinità, attribuibile al "primo braccio"; (ii) osservare l'acqua, convogliata nel sottosuolo in canalette con base in laterizio, nei pozzetti profondi mediamente due metri, collocati in prossimità della sponda sinistra del Fosso della Botte per la sorgente Cinque Bottini, e del suo tributario di sinistra per la sorgente Trinità; e infine, (iii) l'acqua che arriva nel recapito del bottino di presa delle sorgenti Cinque Bottini e Trinità (Fig. 12 e 13).

Il sistema dei cunicoli drenanti è stato utilizzato anche nello scavo delle rocce piroclastiche presso il Lago di Bracciano, circa 20 km a est di Allumiere, per costruire il condotto principale, il ramo di adduzione di Vicarello, il ramo delle Sette Botti, e il sistema del Fosso della Calandrina dell'acquedotto che Traiano fece costruire nel 109 – 114 A.D. (Aqua Traiana; a cura di Cifarelli & Marcelli, 2022), cioè subito dopo la costruzione dell'acquedotto per il porto di *Centumcellae*. Pertanto, si può ritenere che le opere di presa delle sorgenti Cinque Bottini e Trinità rientrano nel

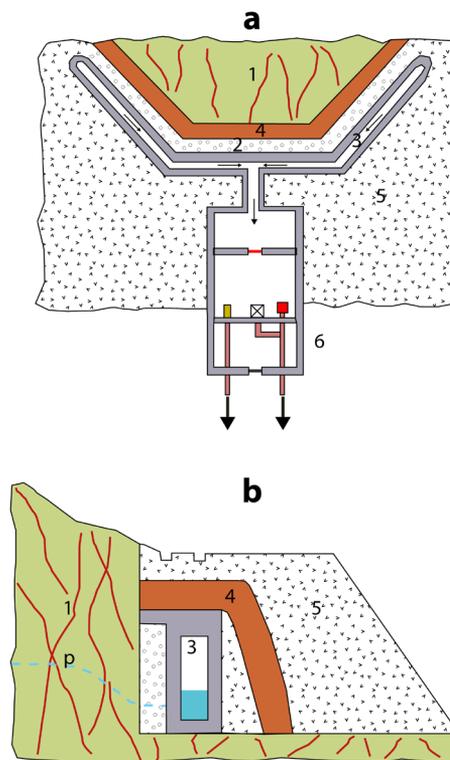


Figura 15 - Schema di un drenaggio addossato, in pianta (a) e in sezione (b). 1, acquifero; 2, vespaio; 3, canaletta prefabbricata; 4, strato di argilla; 5, materiale di riporto; 6, bottino di presa; p, piezometrica. Da Civita (2005) modificato.

Figure 15 - Scheme of a leaning drainage, in plan (a) and in section (b). 1, aquifer; 2, loose stone drainage; 3, prefabricated small canal; 4, bed of clay; 5, landfill; 6, catchment room; p, piezometric level. From Civita (2005) modified.

secondo caso mediante cunicoli drenanti.

La copertura boschiva dell'Unità di Allumiere

Una ricerca geopedologica e forestale sul versante settentrionale di M. Piantangeli (Alessandrini et al., 2008) (Fig. 2a), circa 1 km a SE di Tolfa, indica che i suoli sviluppati sulle lave trachandesitiche dell'Unità di Allumiere sono *Xeroubret andico* e *Haploxeralf ultic* secondo la Soil Taxonomy (Usda, 1975 – 1999). Tali suoli mostrano una tessitura franca e franco sabbiosa, humus acido con sostanza organica tipo *moor*, buon contenuto di sostanza organica e di azoto, pH acido e differente saturazione in basi. Tenendo presente la sostanziale omogeneità della composizione mineralogica dell'Unità di Allumiere, si può ragionevolmente ritenere che questi tipi di suoli siano diffusi in tutta l'area costituita dalle lave trachandesitiche di questa unità. A questo tipo di

suoli, fertili ma facilmente erodibili, si addice di più un uso forestale o pascolivo e che, comunque, non comporti il frequente rimescolamento degli orizzonti superficiali conseguenza delle lavorazioni agricole. Anche per questo motivo il territorio del comune di Allumiere è coperto per il 50% da boschi che sono costituiti prevalentemente da querceti. Al di sopra di 400 m s.l.m. compaiono con maggiore frequenza i castagneti mentre nella parte più alta del territorio comunale, oltre 550 m s.l.m., vegetano alcuni lembi di faggeta. La presenza delle diverse specie arboree è determinata, oltre che dalla quota, anche dalla pendenza, dall'esposizione e dalla giacitura dei terreni. Le aree boscate sono spesso inframezzate da pascoli ed altre formazioni vegetali (macchie ed arbusteti). La sorgente Cinque Bottini si trova in un tratto della stretta valle del Fosso della Botte dove la vegetazione forestale è edificata da grandi alberi di faggio (*Fagus sylvatica*) con partecipazione di Carpino bianco (*Carpinus betulus*). La presenza del faggio, specie molto esigente di umidità sia nel suolo che atmosferica, a una quota così bassa (310 m s.l.m.) è conseguenza delle peculiari condizioni microclimatiche e pedologiche presenti nel fondo della stretta vallecola. L'aria fresca e umida che vi si accumula determina il fenomeno dell'inversione termica; di conseguenza, il normale susseguirsi dei tipi di bosco lungo il gradiente altitudinale cambia, e lembi di faggeta possono trovarsi a vivere più in basso rispetto ai querceti e castagneti. Il suolo vulcanico, sciolto e profondo che si accumula nella valle aumenta la disponibilità di acqua e nutrienti per le piante di faggio consentendo loro di crescere in maniera vigorosa. Poco sopra la valle, le condizioni climatiche tornano a essere quelle ordinarie della fascia collinare dei Monti della Tolfa: pertanto riprende il sopravvento il querceto che caratterizza anche l'area attorno alla sorgente Trinità. Una volta abbandonato la valle del Fosso della Botte, il percorso dell'acquedotto in territorio di Allumiere si svolge tutto al di sotto di 300 m s.l.m., attraversando per un lungo tratto un paesaggio dove la vegetazione forestale è costituita da querceti termofili. Si tratta di formazioni forestali dominate da querce caducifoglie quali cerro (*Quercus cerris*) e roverella (*Quercus pubescens*) cui si accompagnano altre specie arboree della fascia basale come il leccio (*Quercus ilex*), il carpino nero (*Ostrya carpinifolia*), l'orniello (*Fraxinus ornus*), l'acero campestre (*Acer campestre*), la fillirea (*Phillyrea latifolia*), l'erica arborea (*Erica arborea*). Questi boschi sono gestiti attraverso il governo a ceduo matricinato e, quindi, tagliati in media ogni venti anni



Figura 16 - Ingresso di un cunicolo drenante della sorgente Trinità in sinistra del torrente tributario di sinistra del Fosso della Botte. L'asta è lunga 1,5 m.

Figure 16 - Entrance to a drainage tunnel in front of the Trinità spring on the left of the left tributary torrent of the Torrent of the Botte. The rod is 1.5 m long.

e per questo formati da alberi di ridotte dimensioni ed età. Il sottobosco non è molto ricco quando la copertura arborea è chiusa. Nei primi anni dopo il taglio, la maggiore disponibilità di luce al livello del suolo consente lo sviluppo di diverse specie arbustive come rovo (*Rubus ulmifolius*), pero selvatico (*Pyrus sylvatica*) ginestre (*Cytisus scoparius*, *C. sessilifolius*, *Spartium junceum*), prugnolo (*Prunus spinosa*) biancospino (*Crataegus monogina*), vitalba (*Clematis vitalba*), pungitopo (*Ruscus aculeatus*).

Il tracciato iniziale dell'acquedotto

E' utile ricordare che Vitruvio (VIII, VI, 1) fornisce le seguenti indicazioni per gli acquedotti: "Esistono tre tipi di condutture: canali in muratura, condotte in piombo, e tubazioni di terracotta. Per il primo caso la costruzione deve essere eseguita con solida muratura e una pendenza compresa tra un quarto e un mezzo piede^[9] ogni cento (= 29,64 m), dotata di una copertura a volta per proteggere l'acqua dal sole. In prossimità delle mura si costruisca un serbatoio comunicante con tre bacini di immissione per raccogliere l'acqua: nel serbatoio si devono disporre tre condotti ugualmente ripartiti fra i tre bacini di raccolta comunicanti tra loro, in modo che, quando l'acqua sta per traboccare da quelli laterali si riversi in quello centrale". Inoltre, Vitruvio suggerisce (VIII, VI, 3): "Se tra la città e la fonte di approvvigionamento sono presenti rilievi, sarà necessario scavare gallerie facendo attenzione

a mantenere la pendenza necessaria. Se il terreno è di natura tufacea o rocciosa è sufficiente scavare un canale, se invece è terroso o sabbioso si crea un rivestimento in muratura sul fondo e sui lati, con relativa copertura a volta, poi si potrà far scorrere l'acqua. Inoltre, si devono creare pozzi di aerazione ad intervalli di centoventi piedi (= 35,6 m) l'uno dall'altro”.

Il tracciato iniziale dell'acquedotto, restaurato dal Papa Innocenzo XII, è riportato con il relativo simbolo nella tavoletta IGM 142 I SE La Farnesiana (Fig. 17)^[10], e si sviluppa parallelamente al sentiero tra la sorgente Cinque Bottini e la località Grasceto delle Poste, mentre negli elementi della CTR è riportato con il simbolo di sentiero solo in minima parte. Si evidenzia, inoltre, che negli elementi della CTR mancano anche i simboli di due ponti e delle sorgenti principali. Allo scopo di descrivere gli elementi fondamentali del tracciato, sono state individuate sette sezioni (Fig. 18). Inoltre, si precisa che la sezione 6 è ubicata sul versante settentrionale di M. Rovello nella spessa coltre di deposito eluviale e colluviale (“a” in Fig. 2a), i cui parametri fisico meccanici non erano noti ai i tecnici romani. Pertanto, dopo aver constatato che il deposito eluviale e colluviale, corrispondente al materiale terroso

o sabbioso di Vitruvio (VIII, VI, 3), non avrebbe potuto garantire la stabilità e la sicurezza di una galleria, come ipotizzato da Frangipani (1761) e Brunori (1990), i suddetti tecnici hanno deciso di scavare una trincea a cielo aperto allo scopo di facilitare l'approvvigionamento del materiale, la progressione della costruzione del canale (*specus*) dell'acquedotto mediante calcestruzzo^[11], e mantenere la corretta pendenza del canale. Per la costruzione del canale, in cui erano inseriti due pozzi di ispezione (Fig. 18), sono state necessarie casseforme prodotte con il legname del bosco, costituito da querce e castagni. Quando sono terminati i lavori del canale, la trincea è stata rinterrata con il materiale eluvio colluviale scavato in precedenza. Il sistema della trincea a cielo aperto è stato utilizzato anche per l'acquedotto di Traiano presso il Lago di Bracciano, sopra ricordato (Aqua Traiana; a cura di Cifarelli & Marcelli, 2022). Le quote del tracciato iniziale del canale dell'acquedotto sono riferite alla sua base.

Sezione 1. Dalla sorgente Cinque Bottini (ACEA Ato 2) (progressiva 0 m; quota 310 m s.l.m.; DMS 42°10'29,47" N - 11°54'46,42" E) alla quota 301 m s.l.m. (progressiva 700 m; DMS 42°10'35,18" N. 11°54'25,37" E). Distanza 700 m. Dislivello 8,8 m. Pendenza 0,012, ovvero 1,2 %.

Sezione 2. Dalla quota 301 m s.l.m. (progressiva 700 m) al ponte 1, costituito da tre archi, il cui asse, lungo 35 m, è orientato N75°O (progressiva 2505 m; quota 299,4 m s.l.m.;

10 Si evidenzia che nella tavoletta IGM 142 I SE La Farnesiana il tracciato originale della zona di M. Tagliacce, illustrato nelle figure 1 in basso e 17, è stato sostituito per mezzo della variante della galleria omonima. Il tracciato originale è stato riportato anche nella Figura 17 per completezza dell'informazione.

11 Il calcestruzzo è composto di inerti millimetrici di lava fino alla sezione 6 (Fig. 18), successivamente da calcari marnosi, legati con calce (prova con HCL diluito 10%).

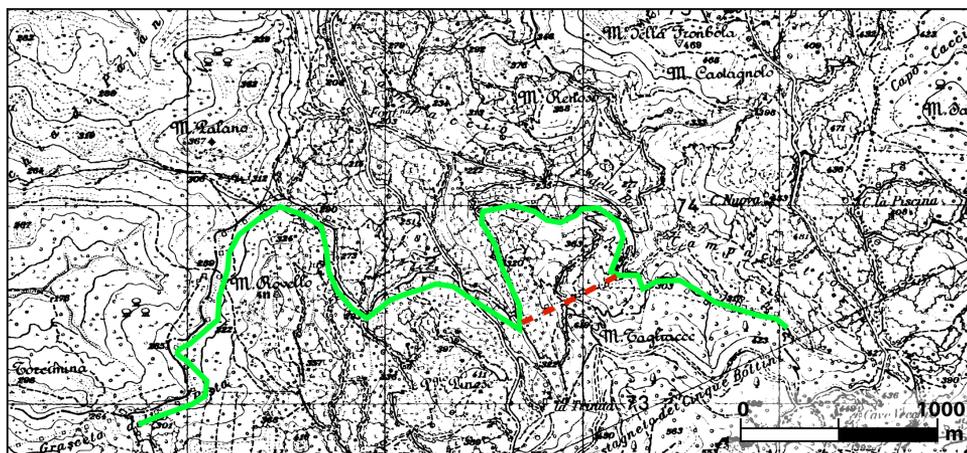


Figura 17 - Il tracciato iniziale originale dell'acquedotto è evidenziato nello stralcio della tavoletta IGM142 I SE La Farnesiana mediante la linea verde. La linea tratteggiata in rosso indica la variante della galleria di M. Tagliacce, riportato nello stralcio della tavoletta.

Figure 17 - The original initial layout of the aqueduct is highlighted in the excerpt of the sheet IGM 142 I SE La Farnesiana by means of the green line. The dotted line in red indicates the variant of the Mount Tagliacce tunnel that replaced the original layout.

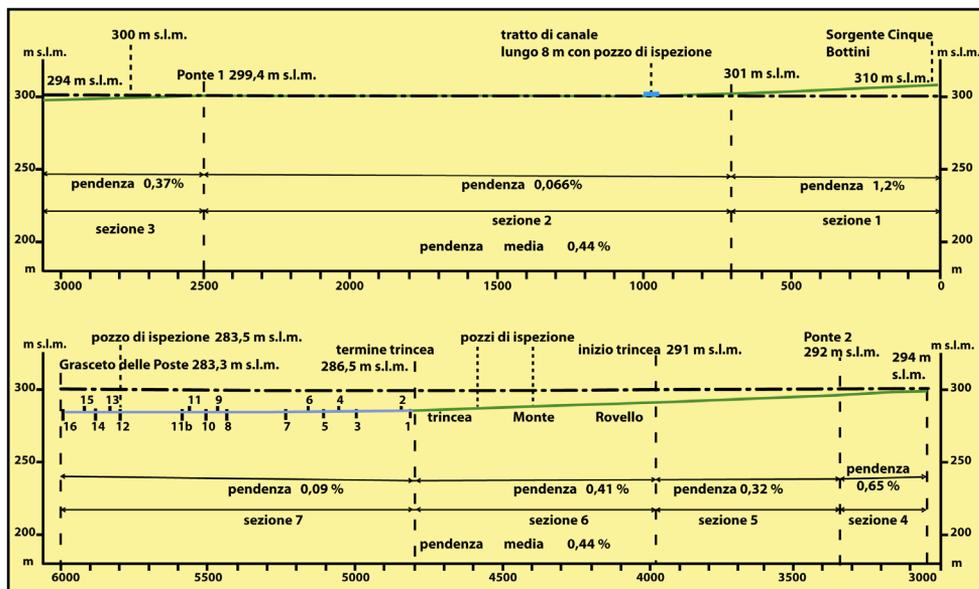


Figura 18 - Ricostruzione del tracciato dell'acquedotto di Traiano dalla sorgente Cinque Bottini alla località Grasceto delle Poste. I segmenti riconoscibili sono indicati in azzurro. I numeri della sezione 7 indicano i sedici segmenti del canale riscontrati lungo il sentiero dal pozzo di ispezione della trincea M. Rovello alla località Grasceto delle Poste.

Figure 18 - Reconstruction of the Traiano's aqueduct from the Five Bottini spring to Grasceto delle Poste. The recognizable segments are indicated in light blue. The numbers in section 7 are referred to the sixteen segments of the canal found along the path from an inspection well of the Mount Rovello trench to Grasceto delle Poste.

DMS della spalla nordoccidentale $42^{\circ}10'26,5''$ N - $11^{\circ}54'2,7''$ E). Distanza 1815 m. Dislivello 1,2 m. Pendenza 0,00066, pari a 0,066 %. Alla progressiva 975 m (DMS $42^{\circ}10'44,88''$ N - $11^{\circ}54'23,16''$ E) un tratto di canale con la calotta rotta, lungo 8 m, largo 0,6 m, comprende un pozzo di ispezione^[12] con dimensioni 0,5 x 0,6 m, la cui profondità non è valutabile per la presenza di abbondanti detriti.

Sezione 3. Dal ponte 1 (progressiva 2505 m) alla quota 294 m s.l.m. (progressiva 3045 m; DMS $42^{\circ}10'23,16''$ N - $11^{\circ}52'39,54''$ E). Distanza 535 m. Dislivello 2 m. Pendenza 0,0037, ovvero 0,37 %.

Sezione 4. Dalla quota 294 m s.l.m. (progressiva 3045 m) al ponte 2, costituito da due archi, il cui asse, lungo 15 m, è orientato N55°E (progressiva 3350 m; quota 292 m s.l.m.; DMS della spalla nordoccidentale $42^{\circ}10'30,4''$ N - $11^{\circ}53'29,8''$ E; DMS della spalla sudorientale $42^{\circ}10'30,66''$ N - $11^{\circ}52'30,60''$ E). Distanza 310 m. Dislivello 2 m. Pendenza 0,0065, pari a 0,65 %.

Sezione 5. Dal ponte 2 (progressiva 3350 m) all'inizio della trincea M. Rovello (progressiva 3965 m; quota 290 s.l.m.; DMS $42^{\circ}53'12,12''$ N - $11^{\circ}10'48,06''$ E). Distanza 620 m. Dislivello 2 m. Pendenza 0,0032, ovvero 0,32 %.

Sezione 6. Dall'inizio della trincea M. Rovello (progressiva 3695 m) al termine della trincea M. Rovello (progressiva 4800 m; quota 286,5 m s.l.m.; DMS $42^{\circ}10'36,1''$ N - $11^{\circ}52'56,1''$ E). Distanza 835 m. Dislivello 3,5 m. Pendenza 0,0041, pari a 0,41 %. Alle progressive 4395 e 4585 m sono presenti due pozzi di ispezione (quota 291 e 290 m s.l.m.; DMS $42^{\circ}10'41,12''$ N - $11^{\circ}52'57,62''$ E; $42^{\circ}10'44,74''$ N - $11^{\circ}53'1,54''$ E) con dimensioni 0,6 x 0,7 m e profondi, rispettivamente, 1,8 m e 5,2 m.

Sezione 7. Dal termine della trincea M. Rovello (progressiva 4800 m) alla località Grasceto delle Poste (progressiva 6000 m; quota 283,3 m s.l.m.; DMS $42^{\circ}10'14,85''$ N - $11^{\circ}52'36,46''$ E). Distanza 1185 m. Dislivello 1,1 m. Pendenza 0,0009, ovvero 0,09 %.

Seguendo il sentiero dai pozzi di ispezione della sezione 6 alla località Grasceto delle Poste, dove è presente un manufatto cubico in cemento con porta in ferro a quota 284,1 m s.l.m., sono stati riconosciuti e numerati progressivamente sedici segmenti del canale tra le quote 284,8 e 283,3 m s.l.m. (Fig. 18). La parte superiore del canale di

12 Sui quattro lati della stampa dell'ingegnere Carlo Fontana, ricordata nella nota 7, sono riportate immagini secondarie che illustrano elementi particolari. A sinistra: "Acquedotto nuovo con suoi Pozzi", "Botte per allacciar le Acque", "Figura del Condotto in Piombo ritrovato in Civitavecchia". A destra: "Acquedotto sotterraneo con suoi Pozzi", "Ricettacoli di grandissima capacità e diramat.ne delle acque in vicinanza di Civitavecchia", "Fontana da situarsi sul Porto".

tutti i segmenti è parzialmente rotta.

Segmento 1. DMS 42°10'36,1" N - 11°52'56,1" E. Progressiva 4800 m. Larghezza 0,54 m. Altezza non valutabile per la presenza di abbondanti detriti.

Segmento 2. DMS 42°10'35,58" N - 11°52'55,8" E. Progressiva 4830 m. Larghezza 0,54 m. Altezza non valutabile per la presenza di abbondanti detriti.

Segmento 3. DMS 42°10'31,14" N - 11°52'53,76" E. Progressiva 4990 m. Larghezza 0,54 m. Altezza non valutabile per la presenza di abbondanti detriti. Su una parete è presente un frammento di malta idraulica (opus signinum).

Segmento 4. DMS 42°10'30,30" N - 11°52'54,0" E. Progressiva 5055 m. Larghezza 0,54 m. Altezza non valutabile per la presenza di abbondanti detriti.

Segmento 5. DMS 42°10'29,04" N - 11°52'52,98" E. Progressiva 5105 m. Larghezza 0,54 m. Altezza non valutabile per la presenza di abbondanti detriti.

Segmento 6. DMS 42°10'27,84" N - 11°52'51,36" E. Progressiva 5160 m. Larghezza 0,54 m. Altezza non valutabile per la presenza di abbondanti detriti.

Segmento 7. DMS 42°10'2" N - 11°52'47,46" E. Progressiva 5235 m. Dimensioni non valutabili per la presenza di abbondanti detriti.

Segmento 8. DMS 42°10'22,44" N - 11°52'49,74" E. Progressiva 5435 m. Dimensioni non misurabili.

Segmento 9. DMS 42°10'21,84" N - 11°52'49,32" E. Progressiva 5465 m. Comprende due tratti attaccati. Dimensioni non misurabili.

Segmento 10. DMS 42°10'20,64" N - 11°52'49,62" E. Progressiva 5510 m. Larghezza 0,54 m. Dimensioni non valutabili per la presenza di abbondanti detriti.

Segmento 11. DMS 42°10'50,40" N - 11°52'18,66" E. Progressiva 5565 m. Larghezza 0,54 m. Altezza non valutabile per la presenza di abbondanti detriti.

Segmento 11b. DMS 42°10'18,30" N - 11°52'50,10" E. Progressiva 5580 m. Con doppio canale non ispezionabile.

Segmento 12. DMS 42°10'17,10" N - 11°52'44,58" E. Progressiva 5800 m. E' presente un pozzo di ispezione, nella cui parte inferiore si osserva il canale con copertura a volta, come suggerito da Vitruvio (VIII, VI, 3). Dimensioni 0,54 x 0,54 m, altezza totale 1,20 m, di cui 0,7 m attribuiti al canale.

Segmento 13. DMS 42°10'16,62" N - 11°52'43,44" E. Progressiva 5830 m. Larghezza 0,54 m. Altezza non valutabile per la presenza di abbondanti detriti.

Segmento 14. DMS 42°10'15,84" N - 11°52'41,10" E. Progressiva 5880 m. Non ispezionabile.

Segmento 15. DMS 42°10'15,60" N - 11°52'39,30" E. Progressiva 5925 m. Con doppio canale. Il canale sinistro è largo

0,54 m, quello destro 0,8 m, mentre la profondità non è valutabile per la presenza di abbondanti detriti.

Segmento 16. DMS 42°10'14,85" N - 11°52'36,46" E. Progressiva 6000 m. Si trova alla base del manufatto e le dimensioni non sono misurabili.

La variante del tracciato dell'acquedotto dovuta al Papa Innocenzo XII (1756, 1757, 1758; Frangipani, 1761)

La variante è costituita dalla galleria Tagliaccio, il cui portale nordorientale si trova a quota 302 m s.l.m. La distanza dalla sorgente Cinque Bottini al portale nordorientale è 580 m con dislivello 6 m, e la pendenza media del canale è 1 %. Il portale sudoccidentale della galleria è ubicato a quota 300,7 m s.l.m. e a 42,50 m dalla spalla sudorientale del ponte 1, con altezza 1,80 m, larghezza 1,60 m. La lunghezza della galleria dal portale nordorientale a quello sudoccidentale è 510 m con dislivello 1,3 m e pendenza media 0,25 %. Inoltre, è presente una cisterna per la raccolta dell'acqua delle sorgenti Cinque Bottini e Trinità, adiacente alla spalla sudorientale del ponte 1 (progressiva 3350 m; quota 292 m s.l.m.). La cisterna è lunga 3,42 m, larga 3,04 m, alta 1,45 m. La distanza della cisterna dalla spalla nordoccidentale del ponte è 125 m con dislivello 0,40 m, e pendenza media 0,32 %.

Quanto sopra illustrato indica che il tracciato dell'acquedotto dalla sorgente Cinque Bottini alla località Grasce-to delle Poste, lungo 6000 m, è stato costruito seguendo le indicazioni di Vitruvio (VIII, VI, 1, 3). La pendenza del canale (*libramentum, mensura declivitatis*), in cui l'acqua scorre mediante la sola forza della gravità, è compresa tra un massimo di 1,2 % nella sezione 1 ed un minimo di 0,09 % nella sezione 7 con media 0,44 %, ed è in accordo con Vitruvio (VIII, VI, 1), che suggerisce un valore della pendenza "compreso tra un quarto e un mezzo piede ogni cento" (tra 0,0741 e 0,1482 m ogni 29,64 m), cioè non inferiore a 0,05 %. Al riguardo si evidenzia la grandissima abilità dei tecnici romani, che hanno realizzato la corretta pendenza del canale lungo tutto il tracciato dell'acquedotto (35,5 km) utilizzando per la livellazione il *corobate*, la cui struttura è descritta da Vitruvio (VIII, V, 1 - 3). Inoltre, sono stati riconosciuti quattro pozzi di ispezione alle progressive 975 m, 4395 m, 4585 m, e 5800 m.

La resistenza passiva che contrasta il movimento dell'acqua è connessa essenzialmente all'attrito sul fondo e sulle pareti del canale. A parità di velocità la portata è proporzionale alla sezione, e a parità di sezione l'attrito minimo si riscontra dove il perimetro bagnato è minimo. L'acqua deve vincere le perdite di carico, cioè la resistenza allo scorrimento, e di conseguenza defluire con velocità

ideale per mantenere la stabilità dell'acquedotto. Allo scopo di evitare tale rischio, era necessario che nell'opera di captazione (incile) fosse inserita una piccola quantità di acqua lentamente.

Circa la sezione del canale, si evidenzia che la forma geometrica della copertura è osservabile solo nel segmento 12, dove è di tipo a volta. Secondo Pace (2010) la copertura non era costante lungo tutto il tracciato, ma poteva essere a volta, piana, e triangolare. Nella Figura 19 sono illustrati i tre tipi di sezione con area equivalente, ma diverso raggio idraulico^[13]: "b" è la sezione con minima perdita di carico, caratterizzata da altezza metà della base; "a" è la sezione con la copertura a volta del segmento 12 della sezione 7; "c" è la sezione con massima perdita di carico. La perdita di carico è molto importante per i seguenti motivi:

(i) diminuendo la pendenza del canale a parità di velo-

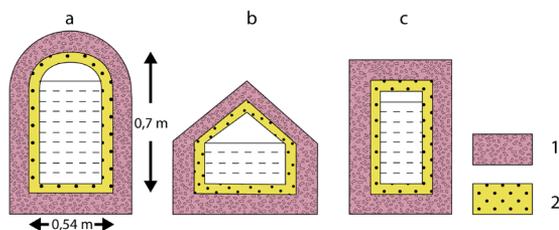


Figura 19 - Sezioni con uguale flusso e differenti coperture del canale dell'acquedotto. 1, calcestruzzo; 2, malta idraulica.

Figure 19 - Sections with equal flow and different covers of the aqueduct canal. 1, concrete; 2, hydraulic mortar.

rità dell'acqua, e quindi di portata, si ottiene una quota maggiore in città; (ii) un costo minore per la costruzione del canale, perché il perimetro bagnato nella sezione del canale diminuisce. Pertanto, i tre parametri pendenza, perdite di carico e sezione del canale sono essenziali per il calcolo del canale di un acquedotto.

La cisterna terminale dell'acquedotto

Questa struttura idraulica (coordinate WGS 84 DMS 42°6'11,14" N - 11°31'42,24" E), ubicata nella Caserma "Giorgi" del Centro Simulazione e Validazione (Ce. Si. Va.) dell'Esercito Italiano a quota 45 m s.l.m. a Civitavecchia e circa 800 m dal porto di *Centumcellae* costruito da Traiano (Fig. 20), mostra forma geometrica prismatica con il lato maggiore orientato in direzione NE - SO, e volte a botte. Allo scopo di proteggere la temperatura e la qualità dell'acqua, la cisterna è stata costruita nel sottosuolo,

costituito dal Membro di Poggio Vivo del Flysch della Tolfa, alla profondità di circa 6 m. La cisterna è divisa mediante un muro nei due vani "a" e "b" (Fig. 21), che includono due pilastri con analoga forma geometrica prismatica e un tetto con volte.

Le dimensioni dell'altezza dei due vani sono state definite mediando i valori dei punti più bassi e di quelli più alti delle volte. Il pavimento, i muri e il tetto dei due vani sono rivestiti dalla malta idraulica dell'*opus signinum* con spessore 8 cm e mostrano il colore marrone rosso fino a circa 5 m di altezza, dovuto alla presenza dello ione ferro nell'acqua delle sorgenti del Complesso delle lave (Fig. 22). L'asportazione di una parte della malta idraulica nel muro di un lato maggiore del vano "b" ha messo in luce il paramento in *opus reticulatum* con conci squadrati di calcare marnoso del Flysch della Tolfa. Un tubo di piombo con diametro interno di 10 cm consentiva il deflusso dell'acqua attraverso il muro tra i vani "a" e "b". Un secondo tubo di piombo con diametro interno 24 cm, che attraversa il muro esterno del vano "a", era collegato al canale dell'acquedotto per il deflusso dell'acqua verso il porto. La volta del vano "b" mostra una apertura, riconoscibile in superficie, utilizzata sia per collegare il canale dell'acquedotto al vano "b", consentendo il deflusso dell'acqua nel suo interno, sia per la manutenzione. Sono altresì presenti in ciascun vano quattro aste metalliche verticali con sezione circolare, inserite nella muratura delle volte; due aste terminano a circa 1,5 m dal pavimento, mentre le altre due sono collegate ai tubi di piombo. Queste aste, la cui data di installazione è incerta, fanno verosimilmente parte di un meccanismo idoneo a manovrare una saracinesca per regolare il deflusso dell'acqua tra i due vani e verso l'esterno.

Dimensioni del vano "a": lato maggiore 12,320 m, lato minore 8,686 m, altezza media 5,7 m. Dimensioni del pilastro 1: larghezza 1,19 m, altezza media 5,7 m. Volume del pilastro 1: $1,19 \times 1,19 \times 5,7 = 8,1 \text{ m}^3$. Dimensioni del pilastro 2: larghezza 1,20 m, altezza media 5,7 m. Volume del pilastro 2: $1,20 \times 1,20 \times 5,7 = 8,20 \text{ m}^3$

Dimensioni del vano "b": lato maggiore 12,322 m, lato minore 8,694 m, altezza media 5,7 m. Dimensioni del pilastro 1: larghezza 1,21 m, altezza media 5,7 m. Volume del pilastro 1: $1,21 \times 1,21 \times 5,7 = 8,34 \text{ m}^3$. Dimensioni del pilastro 2: larghezza 1,22 m, altezza media 5,7 m. Volume del pilastro 2: $1,22 \times 1,22 \times 5,7 = 8,48 \text{ m}^3$

Volume del vano "a": $12,320 \times 8,686 \times 5,7 = 609,9 \text{ m}^3$

Il volume interno del vano "a" ($609,9 \text{ m}^3$), al netto del volume dei due pilastri ($16,3 \text{ m}^3$), è $593,6 \text{ m}^3$.

13 Il raggio idraulico è il rapporto (R) tra l'area della sezione (A) e il perimetro bagnato (P). Il minimo attrito si riscontra nei punti in cui il perimetro bagnato è minimo e, di conseguenza, il raggio medio è massimo.



Figura 20 - Ubicazione della cisterna e del segmento terminale dell'acquedotto presso il porto romano a Civitavecchia.

Figure 20 - Location of the terminal cistern and segment of aqueduct at the Roman port in Civitavecchia.

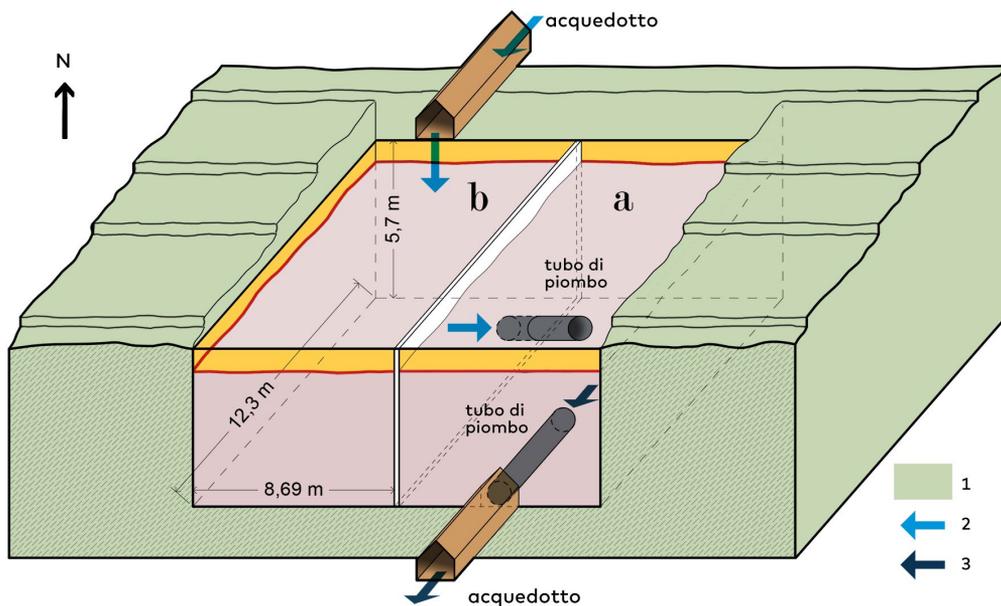


Figura 21 - La cisterna costruita nel sottosuolo con i vani "a" e "b". 1, Flysch della Tolfa – Membro di Poggio Vivo; 2, flusso dell'acqua in entrata; 3, flusso dell'acqua in uscita.

Figure 21 - The cistern was built underground with the rooms "a" and "b". 1, Tolfa Flysch – Poggio Vivo Member; 2, incoming water flow; 3, outgoing water flow.

Volume del vano "b": $12,322 \times 8,694 \times 5,7 = 610,62 \text{ m}^3$

Il volume interno del vano "b" ($610,62 \text{ m}^3$), al netto del volume dei due pilastri ($16,82 \text{ m}^3$) è $593,8 \text{ m}^3$.

La cisterna è il recapito terminale dell'acquedotto. L'acqua defluiva dal canale dell'acquedotto nel vano "b" della cisterna, che svolgeva la funzione di *piscina limaria*, consentendo la decantazione delle particelle in sospensione. Il percorso dell'acqua in uscita avveniva dal vano "b" verso il vano "a" mediante il tubo di piombo che attraversa il muro di separazione dei due vani, e successivamente dal vano "a" verso il canale dell'acquedotto mediante il secondo tubo di piombo. Pertanto, la cisterna non può essere considerata un *castellum aquae* o *castellum divisorium*, come ipotizzato da Brunori (1990), la cui funzione era di distribuire l'acqua alle numerose utenze pubbliche e subordinatamente a quelle private (Pace, 2010). Il colore marrone rosso dei muri dei due vani fino a circa 5 m di altezza indica chiaramente che il livello dell'acqua non superava mai tale limite (Fig. 22).

Discussione e Conclusioni

Il territorio dei Monti della Tolfa è caratterizzato da colline con elevata energia del rilievo, in cui sia la natura litologica con rilevante componente argillosa del Flysch della Tolfa e lapidea delle lave dell'Unità di Allumiere, sia il reticolo idrografico, costituito da corsi d'acqua con regime torrentizio ed elevato gradiente, sono responsabili dell'erosione lineare con il relativo trasporto del carico solido, e dello sviluppo di movimenti franosi in diverse zone del territorio comunale di Allumiere e Tolfa. Questa configurazione orografica, la sua instabilità morfologica, e la copertura boschiva, verosimilmente più estesa di quella attualmente presente nei Monti della Tolfa, sono stati attentamente valutati dai tecnici romani che hanno progettato l'acquedotto e successivamente eseguito i lavori per la sua realizzazione. Prima della apertura dei cantieri dell'acquedotto è stato necessario costruire strade di servizio, eseguire la livellazione del tracciato dell'acquedotto mediante il *corobate* e il contemporaneo taglio del bosco, in particolare nei primi sei chilometri del tracciato, e provvedere ad aprire alcune cave per estrarre la pietra e il materiale sabbioso e quello argilloso, necessari alla produzione degli inerti, della calce, dei mattoni, e alla preparazione del calcestruzzo e della malta idraulica (*opus signinum*). A tale scopo si evidenzia che il materiale eluviale e colluviale prodotto dalla alterazione delle lave dell'Unità di Allumiere, e le rocce calcaree e marnose del Flysch della Tolfa sono



Figura 22 - Vano "a" della cisterna con i due pilastri. Si nota il colore marrone rosso sul pavimento e sui muri fino a circa 5 metri di altezza.
Figure 22 - Room "a" of the cistern with the two pillars. Note the red brown color on the floor and walls up to about 5 meters in height.

risultati particolarmente utili e facilmente disponibili.

La captazione delle vene di acqua delle sorgenti Cinque Bottini a quota 310 m s.l.m. e Trinità a quota 303 m s.l.m. è eseguita mediante i cunicoli drenanti e le loro diramazioni convogliati in tre cunicoli, i contenitori per le sorgenti e la raccolta dell'acqua, dei quali uno è munito di depuratore. L'acqua defluisce nel sottosuolo in canalette con base in laterizio e arriva nel recapito dei bottini di presa delle sorgenti Cinque Bottini e Trinità. Per quanto riguarda la costruzione e l'alloggiamento della forma del canale e della cisterna terminale, il cantiere è organizzato in trincea a cielo aperto allo scopo di agevolare sia l'approvvigionamento del materiale, sia la progressione della costruzione dal basso verso l'alto. Per la produzione della calce si usavano fornaci alimentate con l'abbonante legname derivato dal taglio del bosco, che è stato utilizzato anche per approntare le casseforme per il calcestruzzo, le centine per costruire gli archi dei ponti, e le paratie per il contenimento provvisorio di scavi con dimensioni rilevanti, come quello in trincea di M. Rovello, e per l'alloggiamento della cisterna terminale. Nella zona della sorgente Cinque Bottini Brunori (1990) ha evidenziato la presenza di cippi, distanziati 200 m, con la lettera "V" su ambedue i lati, forse per indicare la fascia di suolo pubblico di rispetto relativa al tracciato dell'acquedotto. Le pareti della sezione interna del canale con forma geometrica a volta e della cisterna terminale sono rivestite con la malta idraulica (*opus signinum*).

L'esercizio dell'acquedotto, come accade attualmente in quello moderno, consiste soprattutto nel monitoraggio (i) della impermeabilizzazione con la malta idraulica (*opus signinum*) di tutte le strutture, (ii) delle portate, delle opere di presa, dei livelli e della torbidità dell'acqua delle sorgenti

Cinque Bottini e Trinità, (iii) della cisterna per la raccolta della loro acqua presso il ponte 1, e (iv) della cisterna terminale. Particolare cura è stata dedicata al controllo della velocità dell'acqua nel canale, che deve scorrere con moto laminare e vincere le perdite di carico, cioè la resistenza allo scorrimento, per mantenere la stabilità dell'acquedotto. Pertanto, era necessario inserire nelle opere di captazione una piccola quantità di acqua lentamente. La manutenzione dell'acquedotto è costituita da molte attività allo scopo di mantenere tutte le sue parti in efficienza e funzionali. Il controllo del canale avveniva mediante gli appositi pozzi di ispezione, e la cisterna terminale era soggetta a manutenzione periodica, essenzialmente per eliminare l'accumulo delle particelle decantate dall'acqua. Lo stato di conservazione dell'acquedotto, anche a seguito dei lavori di restauro dovuti a Papa Innocenzo XII nel 1756 – 1758, è complessivamente buono, tenendo presente che esso ha fornito acqua a Civitavecchia sino alla fine degli anni Cinquanta.

I risultati della ricerca, eseguita mediante le tecniche della Geoarcheologia, consentono di colmare la rilevante lacuna degli studi precedenti relativa (i) al contesto geologico e idrogeologico del territorio dei Monti della Tolfa, in cui è ubicato l'acquedotto lungo 35,5 km, in particolare il suo tracciato iniziale (fino a 6000 m dalle sorgenti), che l'imperatore Traiano ha fatto costruire per addurre acqua al porto di *Centumcellae*, (ii) alla tipologia delle opere di presa delle sorgenti, (iii) alla reale funzione della cisterna terminale dell'acquedotto

Ringraziamenti

La ricerca è stata supportata dall'Associazione Nazionale per gli Interessi del Mezzogiorno d'Italia (ANIMI). Gli Autori sono grati ai seguenti Enti e persone: Rossella Zaccagnini ed Enrico Ciavoni della Soprintendenza Archeologica, Belle Arti e Paesaggio per la Provincia di Viterbo e l'Etruria Meridionale, e Fabrizio Santillo del Centro di Simulazione e Validazione dell'Esercito Italiano (Ce. Si. Va.) presso Civitavecchia, per l'accesso alla cisterna dell'acquedotto; Angelo Regnani per le preziose indicazioni relative sia al tracciato dell'acquedotto, sia all'ubicazione delle sorgenti; Giuseppina Favella e Luca Chiocchini per il supporto alle numerose operazioni sul terreno, e quest'ultimo anche per l'elaborazione dei dati della stazione termo-pluviometrica di Allumiere; il Dipartimento III "Ambiente e Tutela del Territorio: Acqua-Rifiuti-Energia-Aree Protette" Servizio 2 - "Tutela risorse idriche, aria e energia" della Città

Metropolitana di Roma Capitale per la stratigrafia di un pozzo; Giulio Fancello dell'Agenzia Regionale di Protezione Civile – Area Prevenzione. Pianificazione e Previsione – Centro Funzionale Regionale, per avere fornito i dati della stazione termo-pluviometrica di Allumiere; Giovanni Savarese, Paolo Di Stefano e Francesco Madonna per la composizione grafica delle figure.

ORCID

Ugo Chiocchini: <http://orcid.org.0000-0003-4106-3350>

Contributo degli Autori

Ugo Chiocchini ha progettato e supervisionato la ricerca, ha eseguito il rilevamento geologico e idrogeologico dei Monti della Tolfa, il rilevamento del tracciato iniziale e della cisterna terminale dell'acquedotto, ha acquisito i dati della stazione termo-pluviometrica di Allumiere, e ha elaborato i dati dei pozzi. Fedele Manna ha curato le osservazioni sui caratteri chimico fisici dell'acqua delle sorgenti. Luigi Portoghesi ha svolto l'indagine sulla copertura boschiva dell'Unità di Allumiere. Tutti gli autori hanno collaborato alla revisione del manoscritto.

Riferimenti bibliografici

- Abbate E., Sagri M. (1970) The eugeosynclinal sequences. *Sedimentary Geology*, 4, 251 – 340.
- Alberti A., Bertini M., Del Bono G., Nappi G., Salvati L. (1970) Note illustrative del Foglio 136 Tuscania e 142 Civitavecchia scala 1: 100.000 della Carta Geologica d'Italia. Servizio Geologico d'Italia. Poligrafico & Cartevalori, Ercolano (Napoli), 141 p.
- Alessandrini A., Blasi S., Biondi F., Chiocchini U., Di Filippo A., Eusepi G., Piovesan G., Santarelli G. (2008) Geopedologia e dendroauxoclimatologia di cedui di oltre turno. *Ambiente e Territorio*, anno V – novembre-dicembre, 6, 14 - 18.
- Ambrosi U., Bono P., Capelli G., Goletti M. (1984) Carta Idrogeologica (scala 1: 200.000), Carta della Idrologia di Superficie, Carta dei Topoietri e delle Temperature (scala 1: 400.000) della regione vulcanico-sedimentaria del Lazio nordoccidentale e della Toscana meridionale p.p.: idrogeologia e idrologia di superficie. C.N.R., Centro di Studio per la Geologia dell'Italia Centrale – Istituto di Geologia e Paleontologia, Università degli Studi "La Sapienza", Roma.
- American Geological Institute (2005) *Glossary of Geology*. Eds. Neuendorf K.K.E., Mehl J.P. Jr., Jackson J.A. Fifth Edition, 779 p.
- Ashby T. (1935) *The Aqueducts of Ancient Rome*. Oxford, 342 p.
- Baldi P., Decandia F.A., Lazzarotto A., Calamai A. (1974) Studio geologico del substrato della copertura vulcanica nella zona dei laghi di Bolsena, Vico e Bracciano. *Mem. Soc. Geol. It.*, 13, 575 – 606.
- Barazzuoli P., Migliorini J., Capacci F. (2020) Water resources and main groundwater bodies in the Province of Siena in the framework of the land management plan. IAH – Flowpath 2019. *Acque Sotterranee - Italia Journal of Groundwater*. AS 32-433, 51 – 61.
- Boccaletti M., Decandia F.A., Gasperi G., Gelmini R., Lazzarotto

- A., Zanzucchi G. (1987) Carta strutturale dell'Appennino Settentrionale. Pubbl. 429, Note illustrative. CNR Progetto Finalizzato Geodinamica, Tipografia Senese.
- Boni C., Bono P., Capelli G. (1986) Schema idrogeologico dell'Italia centrale. Mem. Soc. Geol. It., 35, 991 – 1012.
 - Bono P., Capelli G., Cattena C. (1989) Caratteristiche idrogeologiche del bacino del Fiume Mignone. In: Angeletti C. e Ascari G., Esperienze di analisi e gestione dei bacini imbriferi. "Valutazione dello stato dell'ambiente nel bacino del Fiume Mignone", 79 – 111, con Carta Idrogeologica del bacino del Fiume Mignone. Amministrazione Provinciale di Roma – Università degli Studi Sapienza, Roma.
 - Brunet C., Monié P., Jolivet L. (1997) Geodynamic evolution of the Alpine Corsica based on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ data (abstract). Terra Nova EUG, 9, 93.
 - Brunori E. (1990) L'acquedotto di Traiano. In: Caere e il suo territorio da Agylla a Centumcellae. A cura di A. Maffei e F. Nastasi, Libreria dello Stato – Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, 215 – 219.
 - Camponeschi B., Nolasco F. (1978) Le risorse naturali della regione Lazio. Monti della Tolfa e Monti Ceriti. Regione Lazio, 3, 175 p.
 - Capelli G., Mastroiillo L., Mazza R., Petitta M., Baldoni F., Banzato F., Cascone D., Di Salvo C., La Vigna F., Taviani S., Teoli P. (2012a) Carta Idrogeologica del Territorio della Regione Lazio. S.E.L.C.A.
 - Capelli G., Mastroiillo L., Mazza R., Petitta M. (2012b) Carta delle Unità Idrogeologiche della Regione Lazio (scala 1: 250.000). S.E.L.C.A.
 - Cas R.A.F., Wright J.V. (1987) The evolution of igneous rocks. Chapman e Hall, London, 528 p.
 - Celico P. (1988) - Prosperezioni idrogeologiche. Vol. II. Liguori Editore, Napoli.
 - Chiocchini U., Potetti M. (1998) Caratteri sedimentologici e stratigrafici delle Calcareniti di Tarquinia (Provincia di Viterbo). Boll. Serv. Geol. d'It., CXVII, 33 – 52.
 - Cifarelli F. M., Marcelli M. a cura di (2022) Aqua Traiana. Le indagini fra Vicarello e Trevignano Romano. Gangemi Editore, 256 p.
 - Civita M. (2005) Idrogeologia applicata e ambientale. Casa Editrice Ambrosiana, 794 p.
 - Civitelli G., Corda L. (1993) The Allochthonous Succession. Sabatini Volcanic Complex. Edited by M. Di Filippo. Quaderni de La Ricerca Scientifica, 114, Progetto Finalizzato Geodinamica - Monografie Finali, Vol. 11, 19 – 28.
 - Consiglio Nazionale delle Ricerche (1987) Progetto Finalizzato Geodinamica. Neotectonic Map of Italy. Vol. 4 Quaderni della Ricerca Scientifica. L.A.C., Firenze.
 - Cortéz Pérez J., de Sanjosé Blasco J.J., Atkinson D.J., del Rio Pérez L.M. (2018) Assessment of the Structural Integrity of the Roman Bridge of Alcantara (Spain) using the TLS and GPR. Remote Sensing, 10, 387; doi: 103390/rs 10030387.
 - D'Ascenzo A. (2015) Il termalismo e l'approvvigionamento idrico come chiave di lettura dello sviluppo urbano e territoriale di Civitavecchia. Geostorie. Bollettino e Notiziario del Centro Italiano per gli Studi Storico-Geografici. Anno XXIII – n. 1-2, 7-67.
 - D'Ascenzo A. (2020) Civitavecchia e le sue acque. Terme, acquedotti e fontane nella cartografia e nella letteratura. Prospettive Editrice, 218 p.
 - De Rita D., Bertagnini A., Carboni M.G., Ciccacci S., Di Filippo M., Faccenna C., Fredi P., Funicelli R., Sciacca P., Vannucci N., Zarlenga F. (1994) Geological-petrographical evolution of the Ceriti Mountains area (Latium, Central Italy). Mem. Descr. Carta Geol. d'It., 49, 291 – 322.
 - De Rita D., Bertagnini A., Faccenna C., Landi P., Rosa C., Zarlenga F., Di Filippo M., Carboni M.G. (1997) Evoluzione geopetrografica-strutturale dell'area tolfaiana. Boll. Soc. Geol. It., 116, 143 – 175.
 - Devoto G., Lombardi G. (1977) Le formazioni sedimentarie ed eruttive del settore Tolfaiano-Cerite (Lazio nord-occidentale). Quad. Acc. Naz. Lincei, 227 (2), 1-35.
 - Di Giulio D. (2014) Le cisterne romane del Ce. Si. Va.: testimonianza maestosa dell'acquedotto di Traiano. In: Aquarum calentium voces. Bollettino della Società Storica civitavecchiese, XVIII, 75-84.
 - Fazzini P., Gelmini R., Mantovani P., Pellegrini M. (1972) Geologia dei Monti della Tolfa (Lazio Settentrionale; provincia di Viterbo e Roma). Mem. Soc. Geol. It., 11 (1), 65 – 144.
 - Ferrari L., Conticelli S., Burlamacchi L., Manetti P. (1996) Volcanological evolution of the Monte Amiata, southern Tuscany: new geological and petrochemical data. Acta Vulcanologica, 8, 41 – 56.
 - Ferrini V., Lombardi G., Morbidelli L., Negretti G.C. (1970) Studio geopetrografico del complesso vulcanico tolfaiano-cerite (Lazio). VI. Le manifestazioni ipoabissali. Ist. Petr. Università di Roma.
 - Frangipani A. (1761) Istoria dell'antichissima città di Civitavecchia. Pagliarini, Roma.
 - Gamurrini G.E., Cozza A., Pasqui A., Mengarelli R. (1972) Formae Italiae - Serie II, Documenti, Vol. 1. Carta archeologica d'Italia (1881-1891). Materiali per l'Etruria e la Sabina, 115. Unione Accademica Nazionale – Istituto di Topografia Antica dell'Università di Roma. Leo Olski Editore. Firenze MCMLXXII.
 - Gençer U., Turan H. (2017) The masonry techniques of a historical bridge in Hypokremos (İçmeler). DOI: 10.4305/METUJFA.2017.1.6, 187 – 207.
 - Geological Society of America (1991) The Rock-Color Chart.
 - Ghilardi M., Desruelles S (2009) Geoarchaeology: where human, earth sciences meet with technology. SAPIENS, 2/2, Special Issue, 1 – 9.
 - Gilbert AS (Ed.) (2017) Encyclopedia of Geoarchaeology. Springer, 1046 p.
 - ISPRA-Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico Nazionale (2009) Carta Geologica d'Italia – 1: 50.000. Progetto CARG: Modifiche e Integrazioni al Quaderno N. 1/1992. Quaderni Serie III, 12, 3, 54 p.
 - ISPRA-Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico d'Italia (2016) Carta Geologica d'Italia in scala 1: 50.000. Foglio 355 Ronciglione. D.R.E. Am Italia.
 - ISPRA-Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico d'Italia. Carta Geologica d'Italia in scala 1: 50.000. Foglio 344 Toscana, Foglio 345 Viterbo, Foglio 353 Montalto di Castro, Foglio 354 Tarquinia. In attesa di stampa.
 - Kligfield R., Hunziker J., Dallmeyer R.D., Schamel S. (1986) Dating of deformation phases using $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ techniques: results from the Northern Apennines. Journ. Struct. Geol., 8, 781 – 798.
 - Lauro C., Negretti G.C., Morbidelli L., Lombardi G. (1965) I. Studio geopetrografico del complesso vulcanico tolfaiano-cerite. Lineamenti geostutturali della Tuscia Romana centro-occidentale, con particolare riguardo alle regioni tolfaiana, cerite e manziate, e notizie bibliografiche. Istituto di Petrografia Università di Roma, 53 p.
 - Lauro C., Negretti G.C. (1969) Il vulcanismo della tuscia romana: le manifestazioni vulcaniche acide del settore centro-occidentale. Istituto di Petrografia Università di Roma.
 - Le Bas M.I., Le Maitre R.W., Woolley A.R. (1992) The construction of the total alkali-silica chemical classification of volcanic rocks. Mineral. Petr., 46, 1-22.
 - Lombardi G., Morbidelli L., Negretti G.C. (1965 a) Lineamenti geopetrografici e strutturali degli affioramenti vulcanici del settore tolfaiano (Lazio). Rend. Soc. Min. Ital., 21, 151-156.
 - Lombardi G., Morbidelli L., Negretti G.C. (1965 b) Gli affioramenti eruttivi della Tolfaia (Monti della Tolfa). Rend. Soc. Min. It., 21, 157-164.
 - Lombardi G., Morbidelli L., Negretti G.C. (1974) Età delle vulcaniti acide dei complessi Tolfaiano, Cerite e Manziate (Lazio Nord-occidentale). Per. di Min., 43, 181 – 204.
 - Lulier C.N. (1887) Acquedotto Traiano. Disegni relativi alle prese

- d'acqua e conduttura dell'anno 1730. Città di Civitavecchia.
- Luterbacher J. et al. (2016) European summer temperatures since Roman times. *Environ. Res. Letters*, 11 (2016) 024001. doi: 10.1088/1748-9326/11/2/024001.
 - Marinelli G., Barberi F., Cioni (1993) Sollevamenti neogenici e intrusioni acide della Toscana e del Lazio settentrionale. *Mem. Soc. Geol. It.*, 49, 279 – 288.
 - Mazzuoli R., Pratesi M. (1963) Rilevamento e studio chimico-petrografico delle rocce vulcaniche del Monte Amiata. *Atti Soc. Tosc. Sc. Nat. Mem.*, 70, 355 – 429.
 - Negretti G.C., Lombardi G., Morbidelli L. (1966) Studio geopetrografico del complesso Tolfetano-Cerite. IV. Le manifestazioni vulcaniche acide del settore Cerite. Istituto di Petrografia Università di Roma.
 - Negretti G.C., Morbidelli L. (1963) Studio geopetrografico del complesso Tolfetano-Cerite. III. Le manifestazioni vulcaniche acide del settore civitavecchiese-tolfetano. Istituto di Petrografia Università di Roma.
 - Ortolani F., Pagliuca S. (2007) Evidenze geologiche di variazioni climatico-ambientali storiche nell'area mediterranea. *Quaderni della Società Geologica Italiana*, 1, 13 - 17.
 - Pace P. (2010) Acquedotti di Roma e il De aquaeductu di Frontino. Consiglio Nazionale delle Ricerche. Edizioni Betmultimedia, terza edizione, 326 p.
 - Palozza F. (2019) Studio mineralogico/petrografico di due campioni di lava dell'apparato tolfetano. Tesi di Laurea. Corso di Laurea Triennale in Scienze Geologiche. Università degli Studi Roma Tre, 42 p.
 - Peccerillo A., Donati C. (2003) The Tuscan Magmatic Province. *Per. Mineral.* 72, Special Issue, 27 – 39.
 - Peccerillo A. (2005) Plio-Quaternary volcanism in Italy. *Petrology, Geochemistry, Geodynamics* (Vol. 365). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
 - Pinarelli L. (1991) Geochemical and isotopic (Sr, Pb) evidence of crust-mantle interaction in acid melts – Tolfa-Cerveteri-Manziana volcanic complex (central Italy): a case story. *Chemical Geology*, 92, 177 – 195.
 - Piscopo V., Barbieri M., Monetti V., Pagano G., Pistoni S., Ruggi E., Stanzione D. (2006) Hydrogeology of thermal waters in Viterbo area, central Italy. *Hydrogeology Journal*, 14, 1508 – 1521.
 - Poli G., Frey F.A., Ferrara G. (1984) Geochemical characteristics of the south Tuscany (Italy) Volcanic Province: constraints on lava petrogenesis. *Chem. Geol.*, 43, 203 – 221.
 - Pollard A.M. (1999) Geoarchaeology: an introduction. In: A.M. Pollard (Ed.). *Geoarchaeology: exploration, environments, resources*. Geological Society London, 165, 7 – 14.
 - Rapp Jr G.R., Hill C.L. (1998) *Geoarchaeology: The Earth-Science approach to archaeological interpretation*. Yale University Press, New Haven.
 - Rossetti F., Faccenna C., Jolivet L., Funicello R., Tecce F., Brunet C. (1999) Syn- versus post-orogenic extension: the case study of Giglio Island (Northern Tyrrhenian Sea, Italy). *Tectonophysics*, 304, 71 – 93.
 - Senarum Universitatis (2008) *Studio geostrutturale, idrogeologico, e geochimico della regione amiatina*, 367 p.
 - Serri G., Innocenzi F., Manetti P., Tonarini S., Ferrara G. (1992) Il magmatismo neogenico-quadernario dell'area tosco-laziale-umbra: implicazioni sui modelli di evoluzione geodinamica dell'Appennino settentrionale. *Studi Geologici Camerti, volume speciale*, 1991/1, 429-463.
 - Servizio Geologico Nazionale (1992) *Carta Geologica d'Italia – 1: 50.000. Guida al Rilevamento*. Quaderni Serie III, 1, 203 p.
 - Servizio Geologico Nazionale (1994) *Carta Geomorfologica d'Italia – 1: 50.000. Guida al Rilevamento*. Quaderni Serie III, 4, 42 p.
 - Servizio Geologico Nazionale (1995) *Carta Idrogeologica d'Italia – 1: 50.000. Guida al Rilevamento e alla Rappresentazione*. Quaderni Serie III, 5, 33 p. con Tabelle.
 - Sgriscia D., Sereni U. (1989) La Fontana di Piazza Vecchia. Il primo acquedotto di Tolfa, 30 p., EL. Graf., Grafica Aldo Presta.
 - Shahack-Gross R. (2017) Archaeological formation theory and geoarchaeology: State-of-the-art in 2016. *Journal of Archaeological Science*, 79, 36-43.
 - Shillito L.M., Blong J., Sawyer A., Mackay H. (2019) Introduction. *Geoarchaeology from landscapes to material culture: Papers from the 7th Developing International Geoarchaeology Conference*. *Geoarchaeology*, 34, 377-379.
 - Taylor H.P., Turi B. (1976) High ¹⁸O igneous rocks from the Tuscan magmatic province, Italy. *Contr. Miner. Petr.*, 55, 33-54.
 - Turc L. (1954) Le bilan d'eau de sols: relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. *La Houille blanche, 3 journées de l'hydraulique de la Société Hydrotechnique de France*, Paris, 36-44.
 - United States Department of Agriculture (Usda) (1975 – 1999) *Soil Taxonomy System of Soil Classification and for Making and Interpreting Soil Surveys*. National Resources Conservation Service (NRCS).
 - Van Bergen M.J. (1984) Magmas and inclusions of Monte Amiata, Tuscany, Italy. *Geologica Ultraiectina*, 37, 175 p.
 - Ventriglia U. (1988) *Idrogeologia della provincia di Roma. Volume I Regione Tolfetana*. Provincia di Roma.
 - Villa L.M., Giuliani O., De Grandis G., Cioni R. (1989) *Datazioni K-Ar dei vulcani di Tolfa e Manziana*. *Boll. GNV*, 1989/2, 1025 - 1026.
 - Vollmer R. (1977) Isotopic evidence for genetic relations between acid and alkaline rocks in Italy. *Geoch. Cosm. Acta*, 40, 283-295