

## CARATTERI STRATIGRAFICI, IDROGEOLOGICI E GEOTECNICI DELLE ALLUVIONI TIBERINE NEL SETTORE DEL CENTRO STORICO DI ROMA.

A. Corazza<sup>(1)</sup> - M. Lanzini<sup>(2)</sup> - C. Rosa<sup>(3)</sup> - R. Salucci<sup>(4)</sup>

<sup>1</sup> Via Ettore Rolli, 30 - 00153 Roma

<sup>2</sup> Via dei Torriani, 27 - 00164 Roma - E-mail: lanzini@aconet.it

<sup>3</sup> Fondazione Ing. C.M. Lerici, Politecnico di Milano - Via V. Veneto 108 - 00187 Roma - E-mail: folerici@tin.it

<sup>4</sup> Via Chisimaio, 38 - 00199 Roma

**RIASSUNTO** - *Caratteri stratigrafici, idrogeologici e geotecnici delle alluvioni tiberine nel settore del Centro Storico di Roma.* - Si discutono i principali aspetti emersi nel corso di recenti studi ed indagini geognostiche relativamente ai depositi alluvionali olocenici del Tevere ed al basamento pliocenico, nel settore del centro storico di Roma. Nel corso di tali indagini e studi si è ottenuta una cospicua mole di nuovi dati stratigrafici, idrogeologici e geotecnici, che hanno contribuito ad una più precisa delimitazione litostratigrafica e geotecnica, ad una migliore comprensione della circolazione idrica sotterranea ed hanno permesso una ricostruzione dell'evoluzione deposizionale del Fiume Tevere. In particolare si è potuto costruire un profilo litostratigrafico e idrogeologico di dettaglio, trasversale alla Valle Tiberina, nel settore del Centro Storico di Roma, ed una serie di mappe che illustrano l'andamento di alcune unità litologiche dei depositi alluvionali.

**ABSTRACT** - *Stratigraphy, hydrogeology and geomechanical characterisation of alluvial deposits in the Historical Centre of Rome (Italy).* - A multidisciplinary study of holocene alluvial deposits of the Tiber River and the pliocenic basement in the Historical Center of Rome is presented. New stratigraphical, hydrogeological and geomechanical data have been performed. A more detailed stratigraphy and geomechanical characterisation, and a more accurate description of the hydraulic underground circulation allow to reconstruct the depositional evolution of the Tiber River. Particularly are presented a lithostratigraphical and hydrogeological section, crosswise the Tiber Valley, in the Historical Center of Rome sector, and several maps showing the pattern of some lithological units of the alluvial deposits.

Parole chiave: depositi alluvionali, stratigrafia, idrogeologia, geotecnica, eustatismo, Olocene, Tevere, Roma.  
Key-words: alluvial deposits, stratigraphy, hydrogeology, soil mechanics, eustasy, Holocene, Tiber, Rome.

### 1. INTRODUZIONE

La disponibilità dei dati delle più recenti campagne di prospezioni geologiche e geotecniche del sottosuolo del Centro Storico di Roma, ha permesso l'allestimento e la presentazione di un quadro sintetico di informazioni integrate sulle caratteristiche geologiche, sedimentologiche, idrogeologiche e geotecniche dei depositi alluvionali olocenici. Per la prima volta tale insieme di dati è stato trattato in maniera complessiva e viene offerto un quadro sintetico dei depositi alluvionali che si prefigge di ricostruire l'evoluzione ambientale olocenica e le sue caratteristiche di dettaglio nell'intera area del Centro Storico.

Si è anche dimostrato che il quadro dei depositi alluvionali non è più definibile in un insieme indiscriminato ma, al contrario, è assolutamente necessario un riferimento ad una stratigrafia geologico-tecnica di dettaglio, per affrontare sia le problematiche più generali che quelle applicative dei vari settori più delicati legati allo sviluppo della città.

Nella presente discussione sono stati utilizzati dati di sondaggio e geotecnici, in possesso degli scriventi o cortesemente avuti da ditte di perforazione -186 son-

daggi- ed una scelta di stratigrafie significative dal testo di Ventriglia (1971) - 125 sondaggi - per un totale di 311 sondaggi esaminati. Di questi sondaggi, 65 sono stati direttamente controllati dagli scriventi e sono stati utilizzati per la costruzione del profilo litostratigrafico di dettaglio. I dati geotecnici, sia di laboratorio che in sito, sono relativi ad indagini e studi eseguiti dagli scriventi: in particolare sono stati esaminati i dati relativi a: prove di laboratorio su circa 271 campioni indisturbati, 147 prove penetrometriche dinamiche SPT (Standard Penetration Test), 48 prove pressiometriche tipo Menard, 30 prove penetrometriche statiche CPT (Cone Penetration Test), 106 prove di permeabilità in foro tipo Lefranc. Inoltre sono state eseguite letture piezometriche periodiche in 78 piezometri (48 tipo Casagrande e 30 tipo a tubo aperto).

Nella Fig. 1 si mostra il settore della valle tiberina oggetto del presente studio, mentre nella Fig. 2 sono ubicati i sondaggi utilizzati. Le perforazioni presenti nella fascia centrale, ove è stato collocato il profilo stratigrafico, sono particolarmente numerose ed in gran parte sono state controllate dagli scriventi; nelle zone più a nord ed a sud invece i dati di sondaggio sono più radi ed hanno richiesto una interpretazione critica.

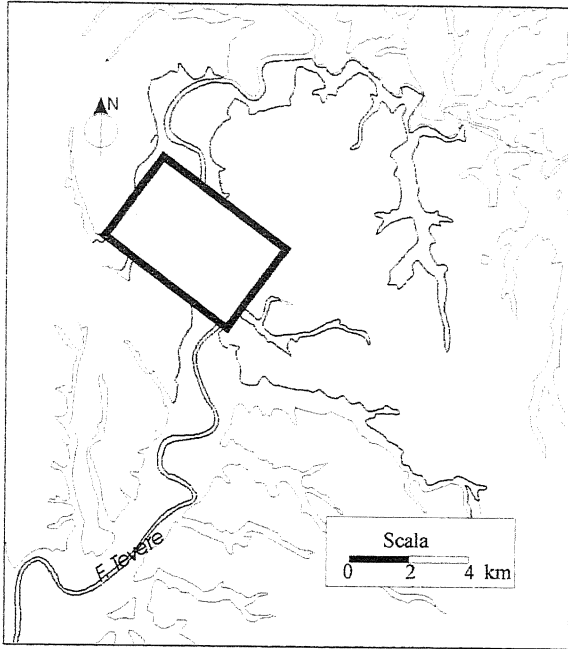


Fig. 1 - Ubicazione dell'area studiata.

*Location of the study area.*

## 2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

### 2.1. Inquadramento geologico-strutturale

La Città di Roma si trova localizzata in corrispondenza del margine tirrenico dell'Appennino Centrale, dove una serie di faglie dirette, a direzione NW-SE e NE-SW, ribassano i depositi carbonatici meso-cenozoici, che costituiscono la struttura dell'Appennino stesso. Al di sopra dei carbonati si sono depositate le sequenze sedimentarie marine plio-pleistoceniche prevalentemente argillose che costituiscono i terreni più antichi affioranti nell'area indagata. Si tratta di una successione di strati argilloso-marnosi con intercalazioni sabbioso-limosi, di colore grigio-azzurro, del Pliocene Superiore ("Argille Vaticane"; Unità del Monte Vaticano, Marra e Rosa, 1995).

Essendo questi i terreni più antichi, sono anche quelli che risentono maggiormente della tettonica distensiva che ha interessato l'area durante il Pliocene superiore ed il Pleistocene inferiore; la stratificazione è abbastanza regolare, con strati che immergono di pochi gradi verso NE. Questi depositi sono notevolmente interessati in genere da faglie dirette e/o probabilmente trascorrenti che interessano anche i termini del Pleistocene inferiore con rigetti verticali apparenti anche superiori ai 30 metri.

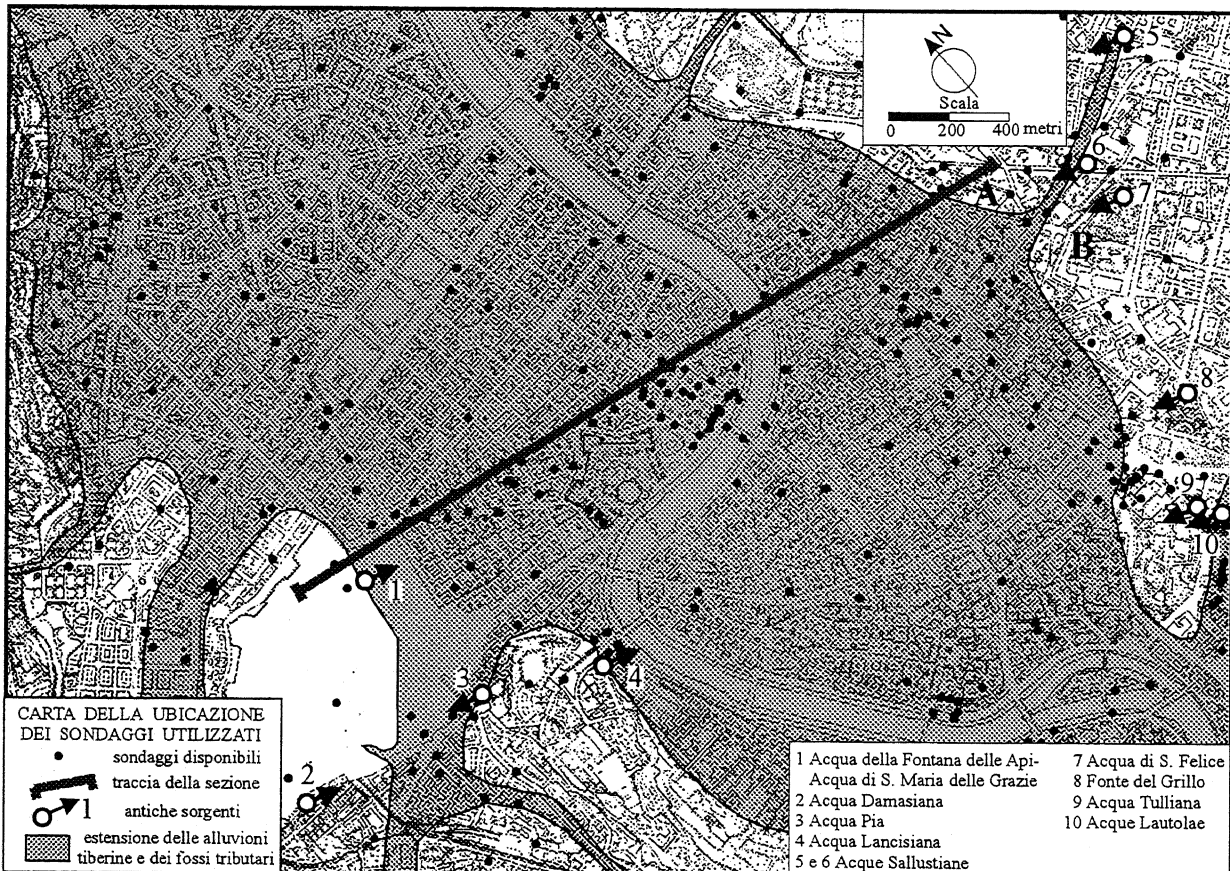


Fig. 2 - Carta della ubicazione dei sondaggi utilizzati nel presente studio e delle antiche sorgenti.

*Map of location of the available core drillings and of the ancient springs.*

La caratteristica maggiore di questi depositi è l'elevato grado di preconsolidazione che essi hanno acquisito nel tempo; le argille in questione costituiscono il bed-rock di tutta l'area romana e ne condizionano sia l'assetto geostrutturale che quello idrogeologico e rappresentano il contenitore delle alluvioni oloceniche oggetto del presente studio.

Al di sopra di queste sequenze argillose, in relazione al sollevamento dell'Appennino e del suo margine tirrenico, si imposta nel Pleistocene inferiore una sedimentazione di tipo costiero e successivamente continentale, collegata alla presenza di un grosso corso d'acqua proveniente da Nord-Ovest, denominato *Paleotevere* (Marra e Rosa, 1995).

Nell'area romana, a partire dal Pleistocene medio (circa 600.000 anni fa), in concomitanza con grosse crisi tettoniche connesse all'orogenesi, si sviluppa una attività vulcanica alcalino potassica, di tipo prevalentemente esplosivo che, con momenti di particolare intensità, si protrae per tutto il corso del Pleistocene superiore; l'area viene interessata, in particolare, dai prodotti del Distretto vulcanico dei Sabatini, localizzato a Nord-Ovest e da quelli del Distretto vulcanico dei Colli Albani, situato a Sud-Est dell'area sulla quale sorgerà la città di Roma. La deposizione di grandi quantità di prodotti vulcanici, in particolare sotto forma di colate piroclastiche (ignimbriti) e di piroclastiti di ricaduta, preceduta e accompagnata da una notevole attività tettonica, con movimenti verticali reciproci complessivi anche di 30-50 metri, causa un notevole sconvolgimento del precedente assetto morfologico dell'area, nonché del suo reticolo idrografico, determinando lo spostamento dei corsi d'acqua principali (*Paleotevere* e *Paleoaniene*) nelle posizioni occupate attualmente dai loro omologhi moderni (Marra e Rosa, 1995).

Durante l'ultima regressione quaternaria (regressione würmiana, apice a 19.000 anni fa) il livello del mare scende fino ad oltre -120 metri rispetto all'attuale. In conseguenza di tale abbassamento del suo livello di base, l'alveo del F. Tevere si abbassa corrispondentemente in maniera considerevole, incidendo fortemente dapprima il substrato pleistocenico, costituito da piroclastiti e depositi alluvionali antichi, e successivamente il substrato pliocenico, attualmente identificabile tra circa -40 e -50 metri s.l.m. nell'area urbana centrale.

Assieme al corso del Tevere anche tutto il reticolo idrografico da questo controllato subisce un approfondimento notevole, in particolare nei tratti di raccordo con il fiume, con gradienti di profondità abbastanza elevati nell'area esaminata; il fiume in questo periodo è incassato in una valle a fondo piatto fortemente controllata dalla tettonica con depositi alluvionali ghiaiosi e da un andamento di tipo "braided".

Alla fine della glaciazione würmiana, a partire da circa 19.000 anni fa, il livello del mare inizia a risalire, secondo gli Autori, dapprima abbastanza velocemente e poi via via più lentamente, con alcune fasi di stasi, sino ad arrivare a stabilizzarsi al livello attuale. Parallela-

mente alla risalita del livello del mare la profonda valle tiberina precedentemente formata si colma di depositi alluvionali (Alessio et al. 1994; Antonioli e Ferranti, 1996; Bellotti et al., 1989; Belluomini et al., 1986; Boudillon et al., 1994).

Nella Fig. 3 viene rappresentata la ricostruzione locale della superficie di tetto delle "Argille Vaticane"; in generale l'andamento è in accordo con quanto già definito in letteratura (Marra e Rosa, 1995). Un elemento di novità è rappresentato da una zona ribassata, compresa fra il Parlamento e Piazza Venezia, ove il tetto scende a quote inferiori ai -45 m s.l.m. In particolare un sondaggio eseguito a Via del Caravita ha raggiunto il bed-rock pliocenico a -48 m s.l.m. ed un secondo sondaggio eseguito a Piazza Venezia ha raggiunto la quota di -47.80 m s.l.m. senza intercettare le Argille plioceniche<sup>1</sup>.

## 2.2. Inquadramento morfologico

Il carattere morfologico principale dell'area romana, costituito dalla ampia valle fluviale e dal corso del Fiume Tevere che la attraversa, ha rappresentato un elemento geografico fondamentale per la Città di Roma nel corso dei secoli. La città è in parte sviluppata proprio in corrispondenza della pianura alluvionale del Tevere, dove il piano campagna originario raggiungeva in epoca pre-romana quote comprese fra 8 e 10 m s.l.m., contro gli attuali di circa 15-20 metri s.l.m. a causa dell'accumulo dei terreni di riporto. Prima della definitiva realizzazione dei muraglioni alla fine del secolo scorso, questa piana è stata continuamente soggetta ad episodi di alluvionamento talvolta anche disastrosi per la vita della città (Bencivenga et al., 1995).

La valle tiberina è delimitata dai versanti di due strutture collinari caratterizzate da elementi geologici e geomorfologici differenti.

In riva destra del Tevere è presente come motivo morfologico dominante la dorsale Monte Mario - Monte Vaticano - Gianicolo, che in direzione circa N-S si estende parallelamente alla valle del Tevere per circa 10 km, raggiungendo la quota massima di 139 metri s.l.m. in corrispondenza del Monte Mario, e deprimendosi via via di quota sino ai 60 metri s.l.m. nel settore sud-occidentale della città. Il versante prospiciente la valle tiberina è piuttosto acclive e caratterizzato da una certa continuità morfologica, tranne ove si realizzano gli sbocchi di alcuni affluenti del Tevere (valle dell'Inferno, valle del Gelsomino, ecc.). Le elevate acclività sono giustificate dalla presenza, nella parte basale dei versanti, delle "Argille Plioceniche" della Unità del Monte Vaticano, sovraconsolidate, a loro volta ricoperte dai depositi pleistocenici delle Unità di Monte Mario e di Monte Ciocci (Marra e Rosa, 1995).

In riva sinistra del Tevere il motivo morfologico dominante è completamente differente, ed è dato dalla presenza dei famosi "colli" di Roma, che, notevolmente meno elevati in quota rispetto alla dorsale in riva destra (40-50 metri s.l.m.) ed interessati da tutta una serie di

<sup>1</sup> In questo ultimo sondaggio, che si è dovuto sospendere per motivi cantieristici, negli ultimi 6 metri si è carotato un corpo tufaceo lapideo o semilapideo rossastro, riconoscibile come Tufo Lionato; escludendo, vista la giacitura alla base dei depositi olocenici, una colata piroclastica peraltro sconosciuta in letteratura, si ipotizza che i tufi in questione siano riferibili ad una paleofrana staccatasi dalle coperture tufacee del Campidoglio e gravitata ai piedi di questo all'inizio della deposizione olocenica.

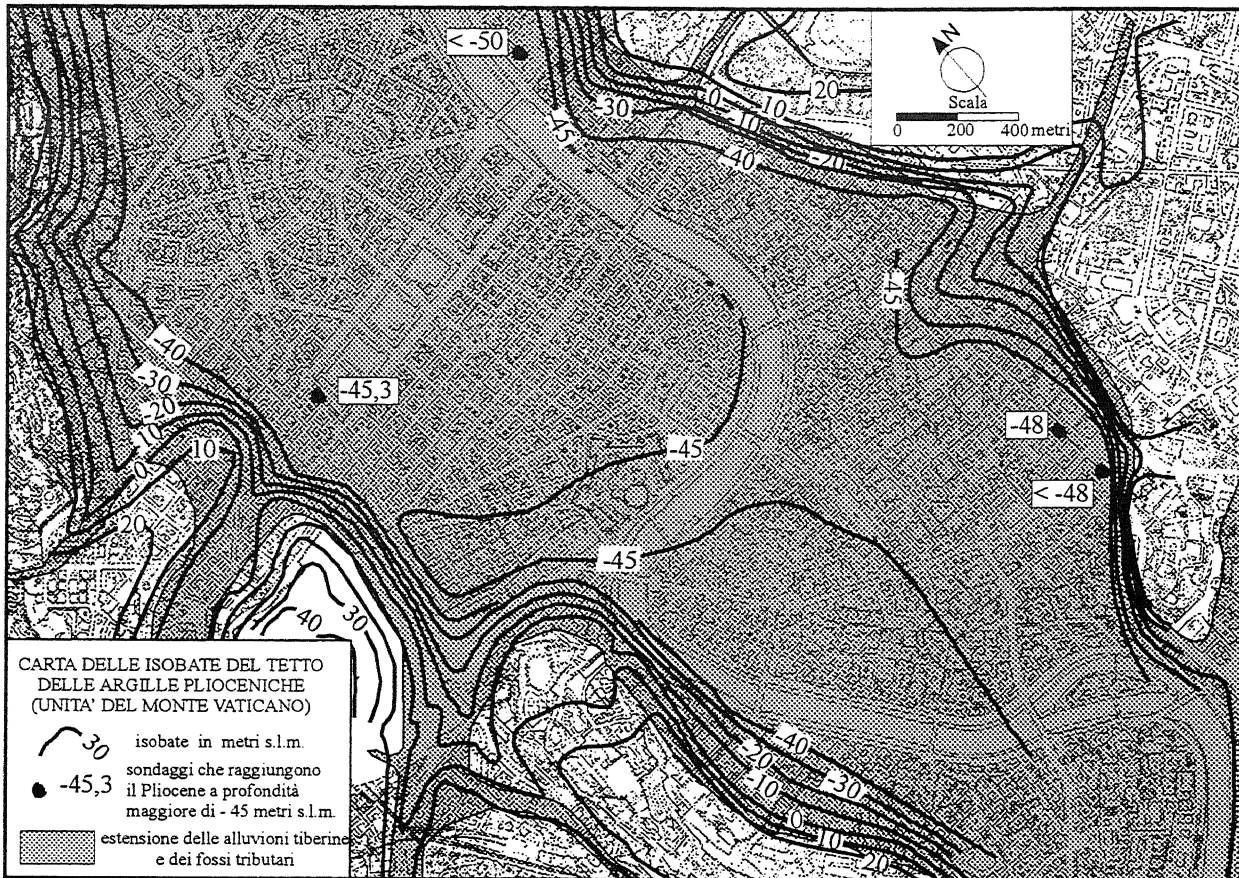


Fig. 3 - Carta delle isobate del tetto delle argille plioceniche (Unità di Monte Vaticano)

*Isobath map of the top of the pliocenic clays (Monte Vaticano Unit).*

incisioni fluviali secondarie, conferiscono a questo settore un aspetto più articolato: il Quirinale, il Viminale, l'Esquilino, il Celio, il Campidoglio, il Palatino e l'Aventino. Verso est i suddetti colli si saldano tra loro fino a realizzare un continuo plateau tufaceo con quote intorno a 50-60 m slm interrotto saltuariamente da valli strette e profondamente incise.

### 3. STRATIGRAFIA DEI TERRENI DELLA PIANA TIBERINA

La successione stratigrafica dei terreni presenti nella pianura alluvionale del Tevere, dal più antico al più recente, viene in seguito descritta (vedi Fig. 4).

#### 3.1. Alluvioni del Tevere e dei suoi affluenti (All) – PLEISTOCENE SUP. - OLOCENE

I depositi alluvionali che colmano la valle del Tevere sono costituiti da un livello basale di ghiaie poligeniche legate all'erosione dei locali depositi plio-pleistocenici e delle sequenze calcaree e siliceo-marmose affioranti nella vicina catena Appenninica. Tali ghiaie, con età stimabili intorno ai 20.000 anni fa, sono solo in parte oloceniche, in quanto geneticamente collegate anche al periodo finale della fase erosiva wurmiana (Bellotti et al., 1989).

Esse presentano uno spessore abbastanza regolare, tra 4 e 6 metri, e quote di tetto e letto comprese rispettivamente tra i -30 ed i -48 metri circa s.l.m. Va evidenziato un locale inspessimento di questo corpo ghiaioso fino a circa 10-12 metri, in corrispondenza degli sbocchi delle valli tributarie di Via del Tritone (Petronia Amnis) e della Valle del Gelsomino (Fig. 5).

La parte principale dei depositi alluvionali della valle del Tevere, che raggiungono spessori complessivi di oltre 40 metri, è costituita da sedimenti limo-argillosi e limo-sabbiosi con una componente di minerali vulcanici. Tali sedimenti sono stati depositi durante la fase olocenica di risalita del livello del mare.

Per quanto riguarda i fossi che confluivano nel Tevere nell'area urbana, oggi completamente mascherati dai terreni antropici e di riporto, anche essi sono caratterizzati da depositi olocenici, con un livello basale di ghiaie, di spessore inferiore a quello del corso principale del Tevere, e da sedimenti argilloso-limosi e sabbiosi di spessori estremamente variabili e decrescenti con la distanza dal Fiume.

Nell'ambito dei depositi olocenici sono state definite le seguenti unità litostratigrafiche individuate correlando i caratteri litologici, deposizionali e fisico-meccanici dei terreni (vedi profilo litostratigrafico - Fig. 4):

- Un livello inferiore, costituito prevalentemente da argille limose e limi argillosi grigiastri più o meno

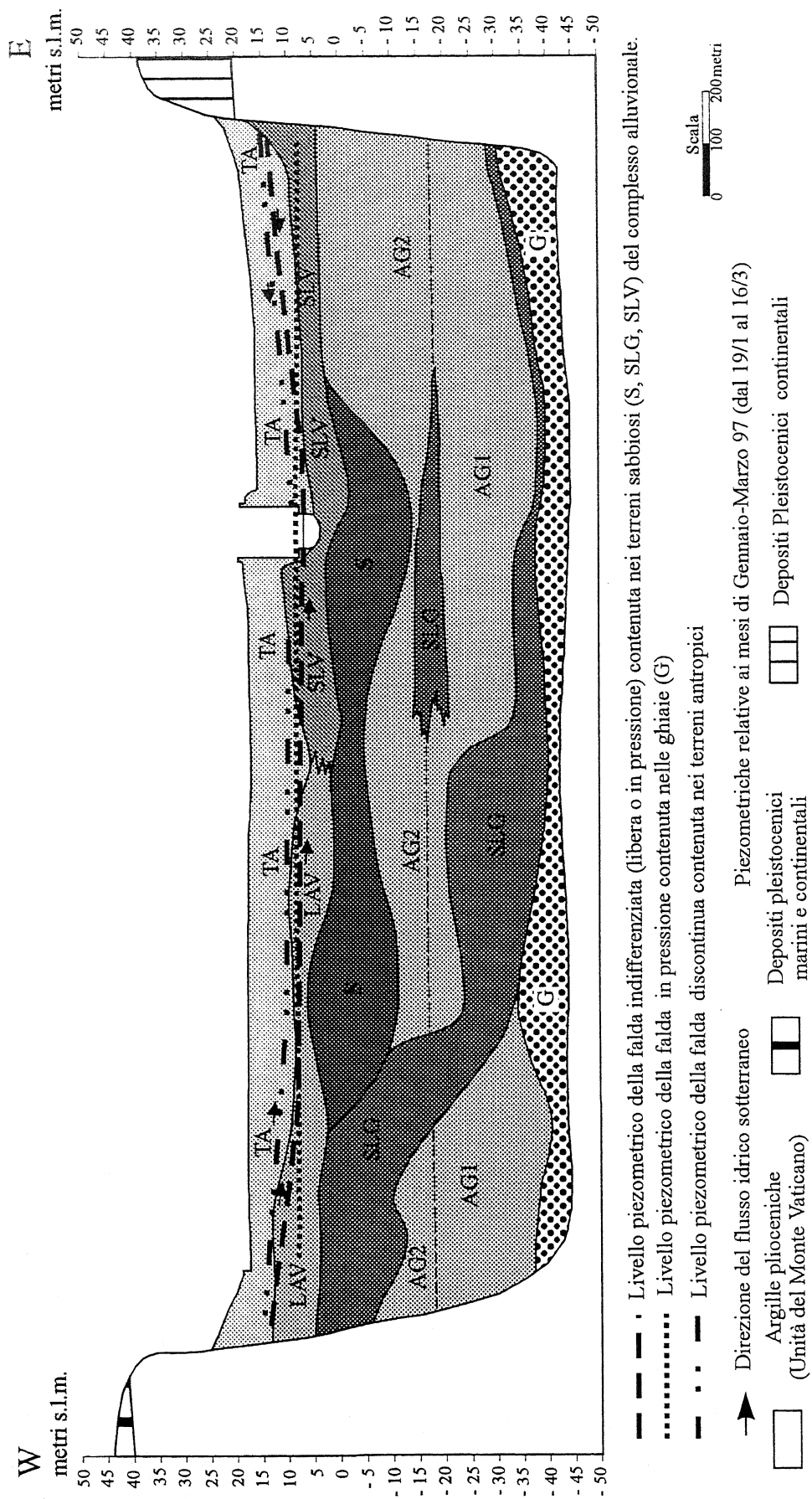


Fig. 4 - Sezione geologica delle alluvioni tiberine nell'area in esame.  
 Cross section of the Tiber valley alluvial deposits in the study area, with the piezometric levels of the different aquifers.

PERIODI	ETA' (MA)	GEOLOGIA	LITOLOGIA	COMPORAMENTO GEOMECCANICO PREVALENTE
Recente ed attuale		TA - <b>TERRENI ANTROPICI</b> Riperti antropici antichi e recenti ed alluvioni storiche	TA - Terreni antropici con elementi eterometrici ed eterogenei, in matrice sabbiosa-limoso; variabile addensamento e/o consistenza; permeabilità molto variabile	comportamento geomeccanico variabile da coesivo ad attritivo, in assetto caotico; variabile deformabilità
Olocene-Pleistocene sup.	< 0.02	All - <b>ALLUVIONI RECENTI</b>  Depositi alluvionali recenti del Tevere e dei suoi affluenti, con sedimenti limo-argillosi e sabbiosi.  Presenza di componenti di natura piroclastica e di orizzonti organici. Ambienti deposizionali di tipo fluviale, fluvio-palustre e fluvio-lacustre.	LAV - Limi argillosi e argille limose marroni e verdastre; mediamente consistenti; mediamente-poco permeabili	comportamento geomeccanico coesivo; media deformabilità
			SLV - Sabbie limose e limi sabbiosi grigio-verdastri; poco addensate e/o consistenti; mediamente permeabili	comportamento geomeccanico congiuntamente attritivo-coesivo
			S - Sabbie medio-grossolane e localmente medio-fini, grigiastre; mediamente addensate; permeabili	comportamento geomeccanico attritivo, media deformabilità
			AG - Argille limose e limi argillosi grigiastri, con livelli organici; poco consistenti fino a circa 30-35 m. dal p.c. (AG2), mediamente consistenti a quote inferiori (AG1); permeabilità da bassa a molto bassa	AG2: comportamento geomeccanico coesivo; elevata deformabilità  AG1: comportamento geomeccanico coesivo; medio-elevata deformabilità
			SLG - Sabbie limose grigiastre, più o meno torbose; da mediamente a poco addensate; mediamente permeabili	comportamento geomeccanico attritivo; medio-elevata deformabilità
	< 0.022	G - <b>GHIAIE DI BASE</b> Deposito ghiaioso legato alla fase erosiva precedente all' alluvionamento olocenico.	G - Ghiaie sabbiose molto evolute di dimensioni centimetriche; molto addensate; molto permeabili	comportamento geomeccanico attritivo; bassa deformabilità
Pleistocene medio-superiore e medio-inferiore	0..2-0.8	<b>DEPOSITI PLEISTOCENICI CONTINENTALI</b> - Depositi piroclastici provenienti dal vulcano dei Colli Albani - Depositi fluvio lacustri del Paleotevere 1 e Paleotevere 2	- Pircolastiti di ricaduta e di deposito da colata piroclastica - Ghiaie, sabbie ed argille	
Pleistocene inferiore	1.2-1.6	<b>DEPOSITI PLEISTOCENICI MARINI E CONTINENTALI</b> - Unità di Monte Mario - Unità di Monte Ciocci	Argille, sabbie, ghiaie	
Pliocene sup.	>1.8	Apl - <b>UNITA' DEL MONTE VATICANO</b> Depositi limo-argillosi con intercalazioni sabbiose e faune a planctonici; ambiente marino.	Apl - Argille grigio-azzurre, con livelli sabbiosi grigiastri; molto consistenti; permeabilità da bassa a molto bassa	comportamento geomeccanico coesivo, sovraconsolidate, bassa deformabilità

Legenda di Fig. 4 - Legend of Fig. 4.

organici (AG) passanti eteropicamente a depositi sabbioso-limosi grigiastri (SLG);

- Un corpo sedimentario intermedio, costituito da sabbie medio-grossolane e localmente medio-fini grigiastre (S);
- Un livello superiore, costituito da limi argillosi e argille limose marroni e verdastre (LAV) e da sabbie limose e limi sabbiosi grigio-verdastri (SLV).

Il corso olocenico del Fiume Tevere, nella prima parte della sua storia, viene interessato dalla deposizione delle argille limose e limi argillosi (AG), con locali orizzonti eteropici sabbioso-limosi (SLG), che vanno a sovrapporsi ai depositi ghiaiosi di base (G); in tale fase il corso del Tevere aveva probabilmente già assunto un aspetto di tipo meandriforme. Gli orizzonti sabbioso-limosi SLG corrispondono infatti alla porzione della valle

interessata direttamente dal corso del fiume che divagava prevalentemente nel settore in riva destra. In particolare, in questo settore l'evoluzione del fiume ha portato le sabbie limose SLG a ricoprire i depositi pelitici AG (Fig. 4).

Successivamente, una importante ripresa dell'attività erosiva lungo il corso principale del Tevere e dei suoi affluenti, ha condizionato fortemente le modalità deposizionali, spostando sensibilmente i sedimenti del fiume e dei suoi affluenti verso termini sabbiosi medio-grossolani (S). Il contatto tra questi ultimi ed i sottostanti depositi limoso-argillosi e sabbioso-argillosi (AG, SLG) è infatti netto e di tipo erosivo. Durante questa fase il corso del Tevere ritorna a posizionarsi nella parte centrale della valle. La fase erosiva responsabile della deposizione delle sabbie S è legata ad un abbassamento temporaneo del livello del mare, connesso a cause cli-

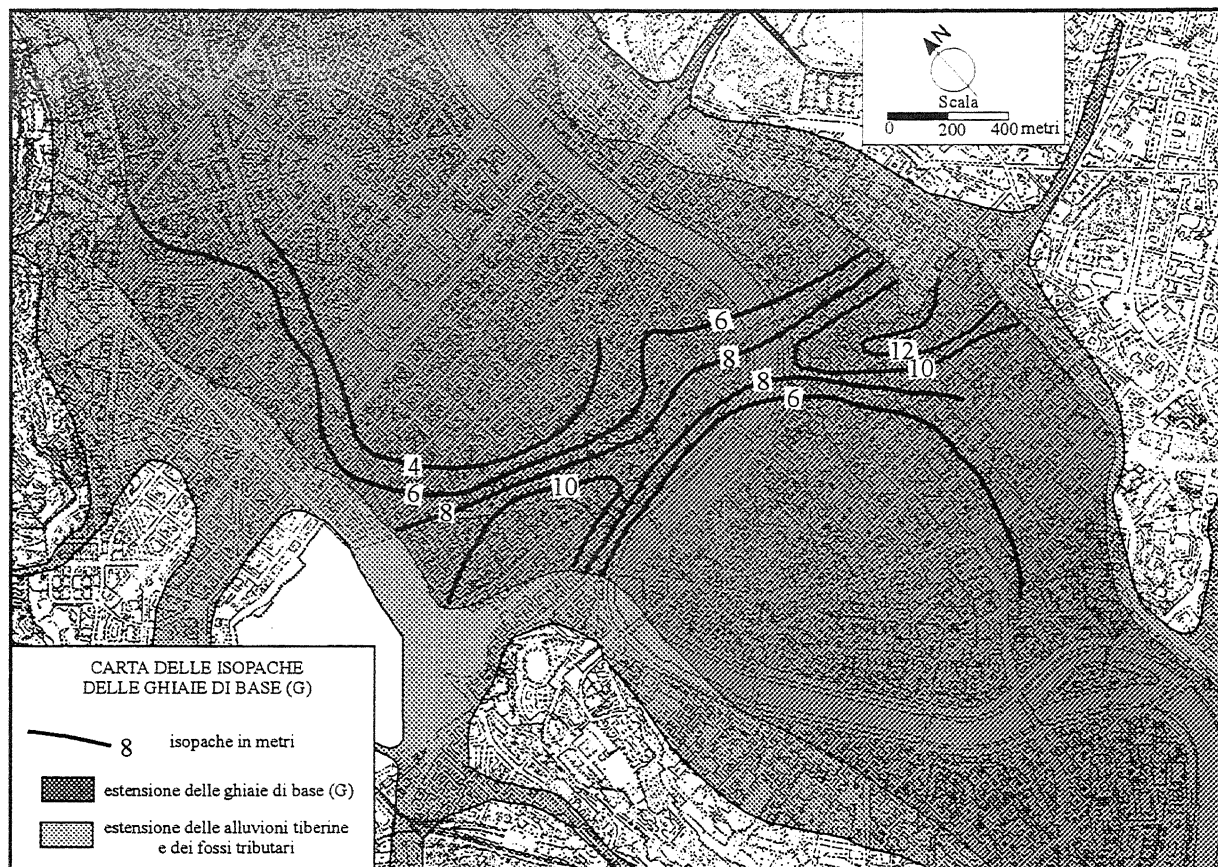


Fig. 5 - Carta delle isopache delle ghiaie di base (G)

*Isopach map of the basal gravel (G)*

matiche, come confermano le stratigrafie dei sondaggi ubicati nella zona della foce del Tevere (Bellotti, 1989). Tali dati mostrano infatti una brusca variazione dei processi sedimentari che passano da una fase di estuario ad una di delta, e quindi ad una fase di progradazione, con la formazione, nell'area deltizia così individuata, di una estesa coltre torbosa datata a circa 5200-5900 anni fa. Informazioni relative a un brusco raffreddamento climatico a scala mondiale intorno ai 6000-5000 anni fa sono state pubblicate da diversi Autori basandosi su dati indipendenti (Denton & Karlén, 1973; Grove, 1988; Antonioli & Frezzotti, 1989; Smiraglia, 1992; Pinna, 1996); la variazione climatica sembra essere stata abbastanza forte, tanto che alcuni studiosi parlano di Neoglaciazione riferendosi a questa fase fredda (Orombelli, 1990; Skinner & Porter, 1987).

In Fig. 6 è possibile osservare le isopache dello strato sabbioso (S) e l'influenza esercitata sulla sua estensione dagli affluenti del Tevere di destra e di sinistra idrografica.

Una successiva attenuazione dell'attività erosiva, connessa ad un nuovo sollevamento del livello marino (fase climatica calda), ha in seguito spostato la sedimentazione fluviale verso termini limoso-sabbiosi e limo-argillosi (SLV, LAV), che mostrano passaggi eteropici reciproci sia in destra che in sinistra del Tevere.

Una possibile correlazione tra la sequenza dei depositi alluvionali olocenici e la curva di risalita del livello

del mare ricostruita da Alessio et al. (1994), in base a datazioni archeologiche e di speleotemi, viene riportata nella fig. 7.

Come evidenziato dalla sezione litostratigrafica di Fig. 4, nel settore in sinistra idrografica la complessa stratificazione sopradescritta risulta assente, e al di sotto dei limi sabbiosi SLV è presente una sequenza continua di argille limose e limi argillosi AG che si estendono verso Piazza del Popolo e Piazza Venezia; un'altra zona dove prevalgono sequenze pressoché continue di AG è l'area di Piazzale Clodio (Fig. 6).

### 3.2. Terreni antropici ed alluvioni storiche (TA) – OLOCENE - RECENTE

La morfologia dell'area di Roma è stata nel corso dei secoli notevolmente modificata dall'intervento dell'uomo, che, in oltre 2500 anni, ha profondamente trasformato la superficie topografica originaria.

I terreni antropici provengono in parte da sbancamenti finalizzati alla costruzione di opere pubbliche e di civili abitazioni, da scarichi di antiche cave e macerie provenienti da incendi e distruzioni, che frequentemente sono stati utilizzati nei secoli passati per bonificare zone paludose e malsane, o come riempimenti delle antiche valli. I terreni antropici inglobano anche resti archeologici di antichi edifici ed opere pubbliche, sepolti nel corso

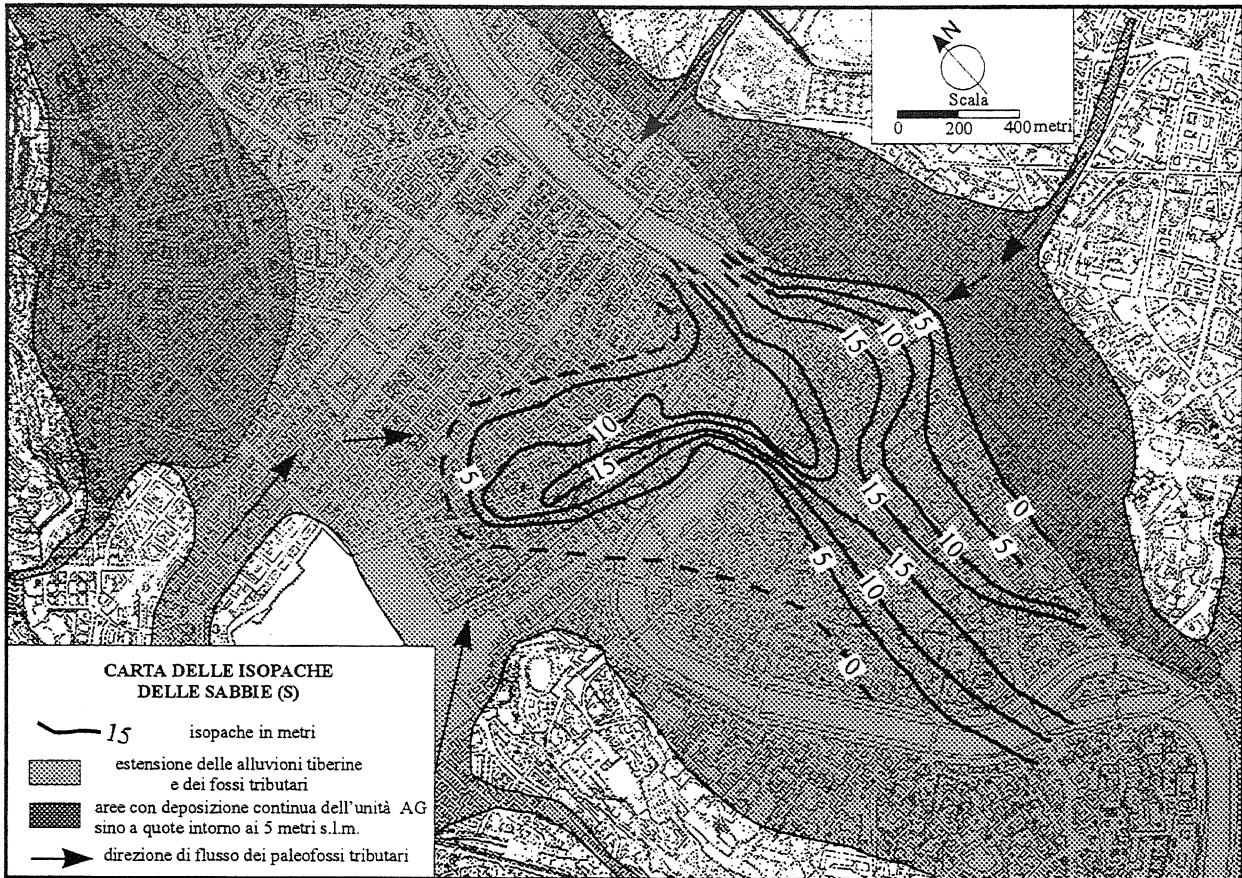


Fig. 6 - Carta delle isopache delle sabbie (S).

*Isopach map of the sands (S)*

dei secoli dalle costruzioni successive e dalle piene del Tevere.

Ai materiali summenzionati si accompagnano e si intercalano i depositi delle alluvioni storiche che contribuiscono a formare un insieme estremamente eterogeneo di materiali, a volte di difficile discriminazione.

Tali terreni costituiscono una coltre continua che copre interamente la piana alluvionale del centro storico di Roma. Lo spessore di questa coltre è variabile da pochi metri sino a più di 20 metri in determinati punti della città, e la sua esistenza costituisce un elemento di cui tenere conto nella progettazione di opere nell'area in esame, anche e soprattutto per la frequente presenza al suo interno di resti di estrema importanza archeologica e storica.

La Fig. 8 mostra l'andamento della quota di letto dei terreni antropici; in tale figura risulta chiaro che gli spessori di questi terreni aumentano generalmente dai bordi della valle verso il Fiume Tevere; questo andamento è perfettamente congruente con la storia dell'utilizzazione dei suoli nel Centro Storico di Roma nel tempo, fino ai riempimenti eseguiti in occasione della realizzazione dei muraglioni lungo il Tevere. Sempre in relazione alla stessa figura, si può evidenziare come alcune depressioni locali del letto dei terreni antropici possano essere messe in relazione con la presenza delle paleovalle degli affluenti del Tevere (Petronia Amnis, Valle dell'Inferno, Valle del Gelsomino, ecc) riempite nel tempo in seguito agli interventi urbanistici.

## 4. IDROGEOLOGIA

### 4.1. Inquadramento idrogeologico

L'assetto idrogeologico della valle del Tevere, così come quello dell'intera area romana, è condizionato dalla presenza, generalmente in profondità e solo in alcune zone in affioramento, dei terreni argillosi plio-pleistocenici, che data la loro bassa permeabilità ed elevato spessore, rappresentano il substrato impermeabile.

L'andamento del substrato e la litologia, la giacitura e lo spessore dei terreni ad esso sovrastanti determinano situazioni idrogeologiche diversificate nell'ambito della valle e in particolare una notevole asimmetria tra l'assetto dei rilievi in riva destra e quello dei rilievi in sinistra del fiume.

Nelle colline in riva destra, il substrato affiora fino a quote di +50 m s.l.m. (Città del Vaticano) ed è ricoperto da ridotti spessori di terreni sabbiosi o ghiaiosi, sede di modeste falde idriche.

Nei rilievi collinari in riva sinistra, il substrato argilloso mostra un andamento pseudopianeggiante (da +10 a -10 m s.l.m.) ed è ricoperto prevalentemente dal complesso di terreni ghiaioso-sabbioso-limosi dell'Unità A del Paleotevere 2 e marginalmente dai terreni sabbio-travertinosi dell'Unità di Valle Giulia e del Paleotevere 1 (Marra e Rosa, 1995). Nell'orizzonte ghiaioso di base dell'Unità A del Paleotevere 2 ha sede un'importante falda idrica in pressione con acque fortemente mineralizzate.



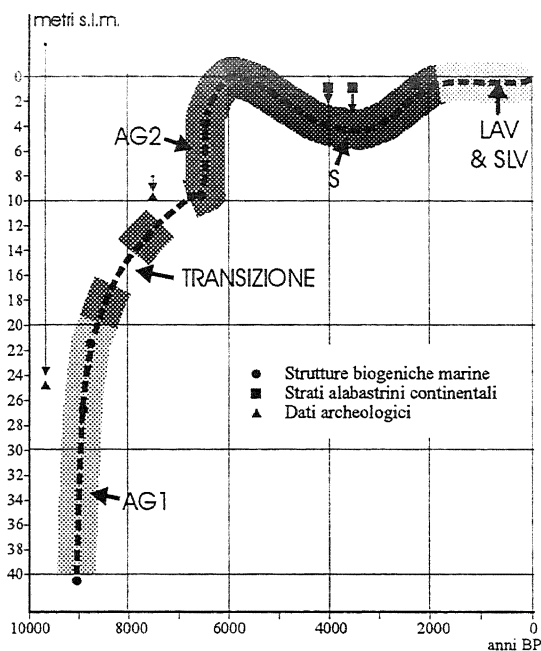


Fig. 7 - Curva di variazione del livello del mare negli ultimi 10.000 anni (modificata da Antonioli e Ferranti, 1996) con le ipotizzate correlazioni con i depositi alluvionali tiberini.

*Sea-level curve of the last 10.000 years (modified after Antonioli & Ferranti, 1996) and correlations with the Tiber alluvial deposits.*

Nella pianura alluvionale compresa tra i rilievi, il substrato argilloso è notevolmente profondo (giunge a quote inferiori a -45 m s.l.m.) ed è ricoperto da un potente ed eterogeneo complesso di depositi alluvionali. In tale complesso sono presenti sostanzialmente due falde: la prima è contenuta nell'orizzonte ghiaioso che caratterizza la base dei depositi alluvionali (G); la seconda, suddivisa in varie porzioni, affiancate o sovrapposte, è contenuta nei terreni sabbiosi del complesso alluvionale, sostanzialmente formato da sedimenti limosi e argillosi.

Dal punto di vista idrogeologico le tre zone sopra descritte sono ben distinte e separate in quanto gli scambi d'acqua, vuoi per ragioni idrogeologiche (descritte nel seguito) vuoi per cause antropiche (realizzazione di opere come i muraglioni sul Tevere) sono estremamente limitati.

#### 4.2. Assetto idrogeologico nei rilievi collinari in destra Tevere

Sulla dorsale Monte Mario-Vaticano-Gianicolo, al di sopra del substrato argilloso pliocenico, sono presenti con una certa continuità i terreni sabbiosi e ghiaiosi delle Unità di Monte Ciocci e di Monte Mario. In questi terreni è contenuta una modesta circolazione idrica sotterranea che trova la sua alimentazione nell'infiltrazione delle acque meteoriche che avviene nelle aree non urbanizzate della città a cui si aggiunge il probabile contributo delle perdite dalle reti idriche. La circolazione emerge al contatto tra questi terreni e le sottostanti argille plioceniche e dà luogo a una serie di piccole sorgenti, note fin dall'antichità, alcune delle

quali sono ancora esistenti (fig. 2). Tra le sorgenti storiche del Vaticano si ricordano l'Acqua della Fontana delle Api - Acqua di Santa Maria delle Grazie e l'Acqua Damasiana; tra quelle del Gianicolo l'Acqua Pia e l'Acqua Damasiana. Le acque sorgive, dal punto di vista chimico, sono classificabili come bicarbonato-alcalino-terrose (Rughi, 1986; Corazza e Lombardi, 1995).

Le quote del limite tra le argille plioceniche e i sovrastanti terreni sabbioso-ghiaiosi sono più elevate di quelle del tetto dei terreni alluvionali del Tevere per cui non esiste alcuna comunicazione idraulica tra le circolazioni idriche nei rilievi in riva destra del fiume e le circolazioni nelle alluvioni.

#### 4.3. Assetto idrogeologico nella piana tiberina

Pur essendo numerosi gli studi idrogeologici generali sulla zona di Roma (Martini et alii, 1961; Ventriglia, 1971, 1990; Albani et alii, 1972, 1973; Corazza et alii, 1986; UNIGEO, 1986; Carboni et alii, 1991; Corazza e Giuliano, 1994; Corazza e Lombardi 1995a, 1995b; Corazza, 1997), le indagini specifiche sulle alluvioni del Tevere entro la città sono datate nel tempo (Terrigi, 1887; Barigioni Pereira, 1890; Canevari, 1890; De Angelis D'Ossat, 1906; Frosini, 1928, 1930; Maddalena e Palumbo, 1928; Manfredini, 1950) e ricostruiscono solo in modo parziale l'assetto idrogeologico del complesso alluvionale.

L'acquisizione recente di una notevole mole di dati ha permesso di ampliare il quadro conoscitivo sui terreni acquiferi e le circolazioni idriche sotterranee presenti nel complesso, sulle influenze delle oscillazioni del livello del fiume sul livello delle falde e sulle relazioni tra le circolazioni idriche nelle alluvioni e quelle presenti nei terreni pleistocenici che costituiscono i rilievi bordanti la piana tiberina.

In particolare per lo studio, oltre ai dati stratigrafici, sono stati analizzati i risultati di 106 prove di permeabilità in foro tipo Lefranc e si è effettuato per alcuni mesi (dicembre 1996 - marzo 1997) il monitoraggio con letture settimanali dei livelli idrici di 78 piezometri (30 tipo a tubo aperto, installati prevalentemente nei terreni di riporto e 48 tipo Casagrande, installati nelle varie unità litostratigrafiche dei terreni alluvionali e nelle ghiaie di base).

Le alluvioni della valle del Tevere poggiano direttamente sul substrato impermeabile. Esse sono caratterizzate alla loro base dalla presenza di un orizzonte ghiaioso (G), con buona permeabilità ( $k = 10^{-4} - 10^{-5}$  m/sec), che sposa la superficie delle argille plioceniche (ApI) e che contiene una falda idrica in pressione.

Il livello piezometrico della falda, almeno per il periodo di monitoraggio, segue le oscillazioni del Tevere. Durante tale periodo, nell'intervallo di tempo in cui l'acqua del fiume ha mantenuto una quota più o meno costante (tra 6,5 e 7,0 m s.l.m.), il livello piezometrico medio della falda è risultato di circa 8,0 m s.l.m. (Fig. 4).

La causa delle escursioni del livello è sicuramente la comunicazione idraulica della falda con il fiume che probabilmente non si attua però nella zona urbana del Tevere, dove la falda pare isolata verso l'alto da terreni impermeabili o poco permeabili, ma in zone più lontane della piana tiberina dove scompare la copertura impermeabile. Tale affermazione sembra suffragata dal fatto

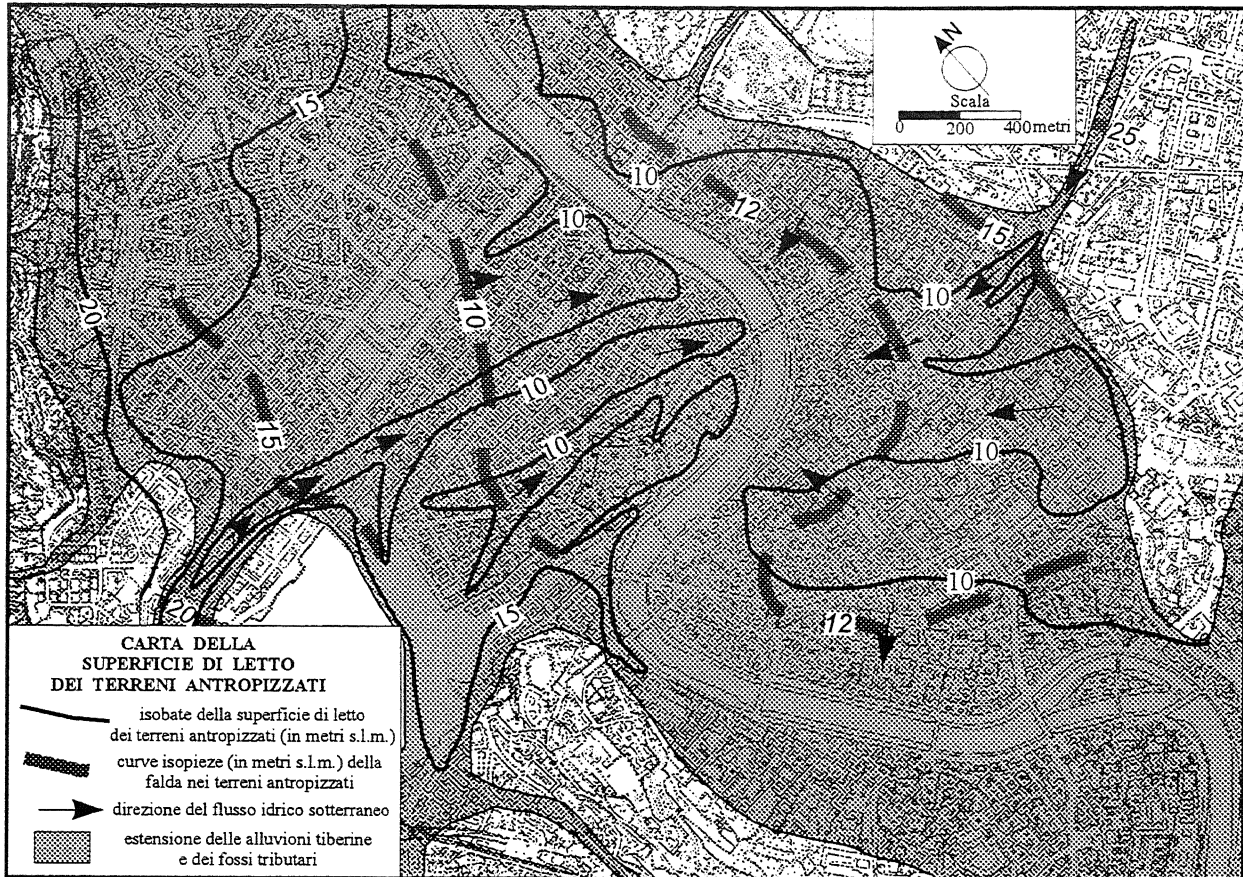


Fig. 8 - Carta della superficie di letto dei terreni antropizzati e curve isopieze della relativa falda.

*Isobath map of the bed of the archaeological layers and isopiestic lines of the respective aquifer.*

che, quando il fiume non è in piena, i livelli piezometrici nelle aree vicine al corso d'acqua sono sempre sensibilmente più alti di quelli del livello del Tevere a Ripetta e quindi sono correlabili con livelli più elevati del fiume, propri delle zone poste a settentrione dell'area di studio.

In gran parte della valle la falda risulta sicuramente confinata, in quanto coperta al tetto, direttamente o con l'interposizione di terreni sabbioso-limosi, dalle argille AG, poco o nulla permeabili. Nelle zone più vicine al fiume, invece, la falda potrebbe risultare anche semiconfinata, in quanto coperta al tetto dalle sabbie SLG, meno permeabili delle ghiaie ma comunque non impermeabili.

L'acqua circolante nelle ghiaie G è caratterizzata da una elevata mineralizzazione (il residuo fisso supera anche i 2 g/l) e da una composizione chimica che, a causa presumibilmente della presenza di gas disciolti ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ) può variare da pozzo a pozzo (si riscontrano infatti acque classificabili come bicarbonato-alcaline e acque classificabili come solfato-clorurato-alcaino-terrose (Corazza e Lombardi, 1995).

L'orizzonte ghiaioso G è presente con continuità fino al mare e la direzione del flusso idrico della falda è orientato da nord verso sud, seguendo l'andamento del substrato impermeabile pliocenico le cui quote si approfondiscono verso mare arrivando fino a -70/-80 m s.l.m. (Manfredini, 1950; Bellotti et al., 1989). Il gradiente idraulico della falda è molto basso tenuto conto che nell'area di studio, come detto in precedenza, il livello

piezometrico risulta di circa 8,0 m s.l.m. mentre nella zona di Ostia Antica, a circa 32 km di distanza lungo il corso del fiume, risulta invece di 0,5 m s.l.m.

Al disopra dell'orizzonte ghiaioso G il complesso dei depositi alluvionali è costituito da un pacco di terreni a diversa litologia (argille, limi, sabbie e limitatamente ghiaie), associati nelle più diverse proporzioni. Questo pacco è caratterizzato da frequenti passaggi laterali e verticali tra litotipi a permeabilità anche molto diversa fra di loro: terreni a permeabilità discreta, come le sabbie S ( $k = 10^{-4} - 10^{-6}$  m/sec) o a permeabilità bassa, come le sabbie limose SLG e SLV ( $k = 10^{-6} - 10^{-8}$  m/sec) risultano così sovrapposti, affiancati e sottoposti a terreni a permeabilità molto bassa, come le argille AG e i limi argillosi LAV ( $k = 10^{-8} - 10^{-10}$  m/sec).

Tutti i terreni sono quindi in grado di cedere acqua in quantità che dipendono dalla permeabilità e spessore di ciascun litotipo e dal gradiente idraulico, naturale o imposto artificialmente a seguito di realizzazione di opere nel sottosuolo. I terreni alluvionali più permeabili (sabbie S e, in misura minore, sabbie limose SLV e SLG) contengono delle falde idriche che a seconda dello spessore e dall'andamento spaziale dei litotipi impermeabili possono essere completamente confinate (con acqua in pressione) oppure semiconfinata (con acqua parzialmente in pressione) o libere. L'estrema variabilità laterale dei terreni e le variazioni granulometriche degli stessi determinano le condizioni per una interconnes-

sione tra le varie falde che si attua o tramite un contatto idraulico diretto o attraverso il passaggio d'acqua (*drenanza*) attraverso gli orizzonti meno impermeabili di separazione.

Le diverse falde contenute nei terreni più permeabili del pacco alluvionale superiore possono essere ricondotte quindi ad una sola circolazione idrica sotterranea sia pure suddivisa in vari livelli, con diverse o assenti condizioni di confinamento. Questa falda idrica differenziata ha dei livelli piezometrici che degradano dal margine delle colline verso il Tevere, che ne costituisce quindi il recapito naturale. Il livello piezometrico segue le oscillazioni del livello del fiume a causa della comunicazione idraulica tra i terreni permeabili e l'alveo fluviale che si attua attraverso le unità sabbiose SLV e S. Tali oscillazioni sono tanto maggiori quanto più elevata è la permeabilità degli acquiferi (le oscillazioni più alte sono state riscontrate infatti nei piezometri intestati nell'unità S) e quanto minore è la distanza dal fiume. I tempi di risposta del livello di falda alle variazioni del livello del fiume, sulla base di una serie di letture piezometriche, sono risultati essere repentini (al massimo alcune ore per i piezometri posti a Piazza Cavour).

Analizzando i livelli piezometrici relativi ad un periodo di circa 2 mesi (metà gennaio - metà marzo 1997), in cui all'idrometro di Ripetta il livello del Tevere è rimasto sostanzialmente invariato (meno di 80 cm di dislivello), si è visto come in riva destra del fiume le quote piezometriche degradino lentamente dal margine della piana (quota circa 16 m s.l.m.) verso il fiume. In corrispondenza di Piazza Risorgimento si assiste al brusco passaggio di quota da 14 m a 8 m s.l.m. e poi la piezometrica degrada dolcemente verso il Tevere; in riva sinistra, invece, i dati a disposizione permettono di individuare solo una piezometrica di quota 12 m s.l.m. nella zona di via del Corso e una di quota 7 m s.l.m. vicino al Tevere (Fig. 4).

Il brusco cambiamento del gradiente idraulico che si attua nella zona intorno a Piazza Risorgimento, è dovuto al passaggio eteropico tra le sabbie limose SLV, a bassa permeabilità, e le sabbie S, a discreta permeabilità. Alle stesse cause, vista la presenza nel sottosuolo delle sabbie S, va ricondotta anche la bassa cadente piezometrica riscontrabile, fino al Tevere.

Le letture piezometriche effettuate evidenziano dei dati anomali che sono comunque spiegabili con la specifica situazione idrogeologica delle alluvioni, dove molto spesso si osservano quote piezometriche diverse anche per sondaggi ubicati vicini tra loro. Ciò è dovuto alle variazioni di permeabilità all'interno degli stessi acquiferi o ai fenomeni di drenanza tra vari acquiferi che determinano delle perdite di carico differenziate e quindi influiscono sulla morfologia della superficie piezometrica. Altra causa generatrice dei dati anomali potrebbe essere la non perfetta installazione di alcuni piezometri o la messa in comunicazione, per i piezometri a tubo aperto, di più orizzonti acquiferi.

Relativamente alle falde superficiali delle alluvioni, a risultati analoghi a quelli derivanti dall'indagine qui esposta erano giunti gli studi idrogeologici condotti, tra la fine del secolo scorso e la prima metà di questo secolo, per i progetti relativi alla risistemazione del tronco urbano del Tevere e alla realizzazione della ferrovia metropolitana di Roma (Barigioni Pereira, 1890; Canevari, 1890; Frosini, 1928, 1930; Maddalena e Palumbo, 1928). Tali studi,

nell'ambito dei quali sono state effettuate osservazioni sul livello d'acqua nei pozzi protratte per diversi anni, hanno inoltre evidenziato che, nei periodi di magra del Tevere, il livello della falda superiore si mantiene più elevato di quello del fiume; nei periodi di piena il livello nei pozzi cresce in modo geometrico con l'innalzamento del fiume fino a raggiungere una determinata soglia, variabile da pozzo a pozzo, superata la quale la crescita rallenta fino ad arrestarsi. In alcuni dei pozzi tenuti sotto osservazione si è inoltre osservata una influenza diretta delle precipitazioni sul livello di falda.

#### 4.4. Assetto idrogeologico nei rilievi collinari in sinistra Tevere

Nell'area in questione sul substrato pliocenico poggia il complesso dei sedimenti pleistocenici. Esso è sede di una importante ed estesa falda idrica in pressione contenuta nelle ghiaie di base dell'Unità del Paleotevere 2, estese fino a Via del Tritone (zona "B" - Fig. 2), e di una falda libera, di molta minore importanza, limitata alla zona di Villa Borghese e localizzata nelle ghiaie dell'Unità di Ponte Galeria (zona "A" - Fig. 2).

La circolazione idrica contenuta nelle ghiaie dell'Unità del Paleotevere 2 mostra un flusso sotterraneo orientato da sud-est verso nord-ovest. Nelle zone esterne al centro storico la piezometrica mostra quote di poco inferiori a 20 m s.l.m. La quota si abbassa poi progressivamente andando verso fronti dove l'acquifero è stato troncato dall'erosione dove scende a quote minori di 16 m s.l.m.

La falda dava luogo in epoca romana ad importanti sorgenti: Acque Sallustiane, Acqua Tulliana, Acque Lautole, Fonte di Giuturna, Acqua di S. Clemente, Acqua di Mercurio, *Fons Apollinis*, Fonte delle Camene, Piscina Pubblica (fig. 2). Le sorgenti erano situate laddove le incisioni dei paleoaffluenti del Tevere (*Petronia Amnis*, *Spinon*, Fosso Labicano, *Nodicus*) oggi sepolte dai terreni di riporto, giungevano a tagliare l'acquifero (Corazza e Lombardi, 1995).

L'analisi dei dati piezometrici evidenzia chiaramente l'azione drenante esercitata dai livelli più permeabili dei terreni alluvionali che riempiono le depressioni vallive mentre, allo stato delle conoscenze, non è individuabile una analoga azione da parte delle alluvioni del Tevere. Il dato può essere spiegato con il fatto che le alluvioni del Tevere lungo il margine sinistro della valle sono costituite praticamente solo dalle argille AG che, vista la loro bassa permeabilità, sono in grado di tamponare lateralmente la falda. Il dato viene confermato anche dai livelli piezometrici dei sondaggi eseguiti per il restauro del Vittoriano.

Le acque circolanti nelle ghiaie dell'Unità del Paleotevere 2 mostrano una certa uniformità nella composizione chimica e possono essere classificate come bicarbonato-alcaline (Corazza e Lombardi, 1995).

#### 4.5. Assetto idrogeologico nei terreni antropici

Nell'area di studio l'assetto idrogeologico viene anche caratterizzato dalla presenza, al di sopra dei terreni di origine naturale, di un manto di terreni di origine antropica (TA).

La permeabilità dei terreni di riporto può essere considerata media, ma varia fortemente sia in senso orizzontale che verticale in relazione alla variazione di porosità, e cioè della loro tipologia e del grado di compattazione. In particolari condizioni, i riporti possono essere sede di una circolazione idrica diffusa o localizzata. La circolazione sembra essere generalmente sostenuta dallo strato basale del complesso, più antico e quindi maggiormente addensato e meno permeabile. Le falde idriche nei terreni antropici raggiungono una certa consistenza in corrispondenza della pianura del Tevere e delle valli secondarie oggi parzialmente colmate dai riporti. In alcuni casi particolari ove la circolazione mostra delle potenzialità elevate è ipotizzabile che all'infiltrazione diretta ad opera delle precipitazioni (resa minima ad opera dell'urbanizzazione) si aggiunga una alimentazione da parte delle antiche sorgenti, oggi sepolte dai riporti, o da parte di perdite nella rete acquedottistica o fognaria.

Tutti i piezometri del tipo a tubo aperto installati nei terreni di riporto mostrano dei livelli idrici. Tali livelli testimoniano la presenza di acqua ma nulla si può dire a proposito della potenzialità delle falde idriche. Va segnalato comunque che tale potenzialità è in alcune zone, come quella di Via del Corso, vicino alla galleria Colonna, molto elevata tanto che per mantenere all'asciutto i sotterranei della galleria devono essere messe in funzione delle pompe, almeno per alcune ore.

Nella Piana Tiberina le misure dei livelli d'acqua nei riporti sono numerose ed hanno permesso di ricostruire, con sufficiente attendibilità, la superficie piezometrica della falda.

Per chiarire meglio l'andamento della falda, limitatamente alla piana tiberina, si è anche ricostruita la superficie di letto dei riporti (Fig. 8); nella stessa figura sono state disegnate le curve isopieze della falda.

In destra del Tevere si evidenzia nettamente un flusso idrico proveniente dalla Valle dell'Inferno (Via A. Emo) con quote piezometriche che da 20 m s.l.m., in corrispondenza di Piazza S. Maria delle Grazie, degradano verso 15 m s.l.m., in corrispondenza di Via Ottaviano-Via Barletta. La falda degrada poi dolcemente verso il fiume e si può riconoscere distintamente una isopieza di quota 10 m s.l.m. che risente in qualche maniera delle incisioni dei fossi, che prima del riempimento con i riporti, solcavano la piana e terminavano nel Tevere.

In sinistra del Tevere si individua chiaramente flusso idrico proveniente dalla valle dell'antico *Petronia Amnis* (Via del Tritone) con quote piezometriche che da 25 m s.l.m., in corrispondenza di Piazza Barberini, degradano verso 15 m s.l.m., in corrispondenza di Largo Nazareno. Questo flusso concentrato lungo via del Tritone è presumibilmente la causa della forte potenzialità delle falde nella zona del Corso vicino alla galleria Colonna.

L'andamento della falda segue poi quello del corso del fiume; si individua una isopieza di quota 12 m s.l.m., posta più o meno equidistante dalla riva del Tevere.

I livelli dell'acqua, in base alle letture fino qui effettuate, sono variabili e nei piezometri ubicati vicino al Tevere seguono le oscillazioni del livello del fiume.

Le oscillazioni del livello piezometrico della falda nei riporti, nelle zone lontane dal Tevere, vanno ricondotte con tutta probabilità alle modalità di alimentazione

di questa falda. L'alimentazione, infatti, deriva solo in minima parte dalle infiltrazioni delle acque di pioggia ed è dovuta principalmente alle perdite delle rete acquedottistica e fognaria, le cui dinamiche non seguono gli andamenti naturali di ricarica.

I dati sulla composizione chimica delle acque circolanti nei riporti sono molto scarsi. Le poche analisi conducono ad una classificazione delle acque come bicarbonato-alcalino-terrose (Corazza e Lombardi, 1995), che non può essere in ogni caso considerata, vista la diversità degli apporti, quella di tutte le acque circolanti nei riporti.

## 5. CARATTERISTICHE FISICO-MECCANICHE DEI TERRENI

Nella letteratura scientifica non sono riportati dati di dettaglio dei parametri fisico-meccanici delle alluvioni tiberine: soltanto alcune indagini hanno approfondito localmente il comportamento geotecnico di spessori più o meno potenti delle alluvioni oloceniche (Calabresi et al. 1980, per l'area del Palazzo di Giustizia; linea A della metropolitana di Roma). Non va dimenticato il contributo fondamentale, pur con dati geotecnici dispersi arealmente e disomogenei, di U. Ventriglia (1971) e quello più recente di Bozzano et al, 1997.

Dal punto di vista geotecnico i dati recentemente acquisiti dagli scriventi permettono, almeno per tutta la fascia alluvionale del centro storico, una parametrizzazione delle alluvioni oloceniche sufficientemente attendibile. Nella descrizione dei caratteri geotecnici sono utilizzate esperienze maturate in studi geologico-tecnici in numerose zone della piana alluvionale di Roma (linea C della Metropolitana, Borghetto Flaminio, Nuovo Auditorium, Piazza delle Cinque Scole, Via di San Gregorio, Fosso di Malafede, area del Depuratore Sud, Ara Pacis, ecc.).

### 5.1 Parametrizzazione fisico-meccanica

La parametrizzazione fisico-meccanica delle varie unità litotecniche è stata effettuata basandosi sui risultati di prove geotecniche eseguite sia in laboratorio che in sito, che sono state controllate direttamente dagli scriventi.

#### Prove geotecniche di laboratorio

Si fa riferimento ad un totale di 271 campioni esaminati, su circa 300 prelevati, che hanno interessato tutte le unità litotecniche individuate.

Le prove di laboratorio sono consistite, oltre che nelle usuali procedure di riconoscimento (peso specifico, densità, granulometrie e Limiti di Atterberg), in prove meccaniche per la definizione della resistenza al taglio a breve ed a lungo termine.

I litotipi tendenzialmente argillosi sono stati sottoposti prevalentemente a prove di taglio diretto lento con scatola di Casagrande e triassiali consolidati-drenati per la verifica del comportamento in condizioni drenate, mentre le condizioni non drenate sono state esaminate con prove di compressione semplice (ELL)

e Triassiali non consolidati-non drenati; sono inoltre stati eseguiti alcuni triassiali consolidati-non drenati con misura delle pressioni interstiziali. I terreni tendenzialmente attritivi (sabbie e sabbie limose) sono verificati sempre a lungo termine, esclusivamente con prove di taglio diretto lento.

Le caratteristiche di deformabilità sono state investigate con prove di Compressione Edometrica, concentrate nei litotipi più spiccatamente pelitici; in tutte le prove è stato eseguito un ciclo di scarico. I depositi olocenici (AG, LAV) sono stati sottoposti a carichi fino a 3,2 MPa, mentre per le argille plioceniche (Apl) i carichi hanno raggiunto valori di 6,4 MPa.

Inoltre sono state eseguite n. 8 analisi mineralogiche ed una serie di 12 prove per la determinazione del contenuto di sostanza organica nella unità litotecnica AG; attraverso tali ultime prove si determina inizialmente il Carbonio Organico, mentre il contenuto in sostanza organica è valutato come segue:

$$SO (\%) = CO (\%) \cdot 1.72$$

#### Prove geotecniche in sito

Nel corso dei sondaggi sono state eseguite n. 147 penetrometrie dinamiche tipo SPT (Standard Penetration Test); tali prove sono state eseguite su tutti i litotipi della serie stratigrafica e fino a circa 25 m dal piano campagna. La parametrizzazione geomeccanica utilizzando i dati penetrometrici è eseguita attraverso i metodi più accreditati in letteratura: per terreni tendenzialmente sabbiosi, i valori di  $N_{spt}$  sono significativi per la stima delle densità relative ( $D_r$ ) e dell'angolo di attrito di picco ( $\phi_p$ ) in base ai grafici di Gibbs & Holtz (1957) e di Schmertmann (1977), che tengono conto dell'influenza delle pressioni di confinamento e delle profondità di prova. La stima del Modulo di Deformazione per terreni tendenzialmente granulari può essere eseguita con il metodo proposto da Denver (1982), utilizzando le curve relative alle litologie di volta in volta più opportune. In letteratura sono presenti anche modelli per la valutazione di alcuni parametri ( $C_u$ ,  $\phi$ ) per terreni tendenzialmente coesivi, ma che vanno utilizzati con una certa cautela.

Sono inoltre state eseguite n. 48 prove Pressiometriche tipo Menard, in foro ed a varie profondità; da tali prove oltre ai parametri pressiometrici si sono valutati i moduli di elasticità  $e$ , in relazione ai vari litotipi, i valori

di coesione e di angolo di attrito. Inoltre, a fianco di alcuni sondaggi, sono state eseguite n. 30 penetrometrie statiche CPT con penetrometro da 20 t e punta elettrica; le prove hanno sempre richiesto un preforo per superare lo strato dei riporti. La parametrizzazione dei terreni attraverso le penetrometrie CPT è eseguita attraverso le metodologie più accreditate in letteratura per depositi argillosi e/o sabbiosi (Schmertmann, 1972; Baligh, 1975; Mitchell & Gardner, 1975; Robertson & Campanella, 1983).

Le carote appena estratte con caratteristiche essenzialmente pelitico-siltose, sono state testate con Penetrometro e Vane Test Tascabili, in modo di valutare la resistenza a breve termine ( $C_u$ ); tali valori sono stati utili riferimenti per controllare i risultati delle prove di laboratorio.

#### 5.2. Caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni

La individuazione delle varie unità litotecniche è stata sviluppata cercando di correlare le caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni con la storia deposizionale, con le tensioni geostatiche agenti e con la storia tensionale dei depositi alluvionali.

Qui di seguito si descrivono le caratteristiche fisiche principali ed il comportamento geomeccanico globale delle varie unità litotecniche in termini prevalentemente qualitativi, rimandando alla Tab.1 l'individuazione dei parametri fisico-meccanici più significativi; per la valutazione del campo di variabilità di alcuni parametri ed eventuali correlazioni si fa riferimento ad una serie di grafici significativi (Fig. 9, per le unità litotecniche limo-argillose e Fig. 10, per le unità sabbiose). Non vengono presentati grafici dei parametri fisico-meccanici del complesso delle Argille plioceniche in quanto l'oggetto del presente studio è limitato alle alluvioni oloceniche tiberine.

#### COMPLESSO DEI DEPOSITI PLIOCENICI (Unità del Monte Vaticano) - Apl

La caratteristica principale dell'Unità di Monte Vaticano ora descritta è l'elevato grado di preconsolidazione che essa ha acquisito nel tempo e che ha determinato l'instaurarsi di alti valori di resistenza al taglio; tale caratteristica di resistenza è inoltre in genere accentuata dal non trascurabile carattere marnoso. Si sono esaminati 25 campioni.

Unità Litotecniche	Umidità (%)	Densità (KN/m <sup>3</sup> )	Angolo di Attrito (°)	c' (KPa)	E /Eed (KPa)	Coeff. di permeab. (m/sec)
LSO	30-45	17-19	25-30	0-20	6.000-14.000	10 <sup>-6</sup> ÷10 <sup>-8</sup>
LAV	20-30	18-20	18-25	15-30	3.000-14.000	10 <sup>-7</sup> ÷10 <sup>-10</sup>
SLV	20-40	17-20	27-35	0-20	10.000-20.000	10 <sup>-6</sup>
S	20-30	17-20	30-40	0-10	15.000-31.000	10 <sup>-4</sup> ÷10 <sup>-6</sup>
AG	20-60	15-20	15-26	5-25	3.000-12.000	10 <sup>-8</sup> ÷10 <sup>-10</sup>
SLG	20-30	18.5-20	25-35	0-15	8.000-14.000	10 <sup>-6</sup> ÷10 <sup>-8</sup>

Tab. 1 - Principali parametri fisico-meccanici delle unità litotecniche.

Main physical-mechanical parameters of the different lithofacies.

Trattasi di depositi schiettamente marini limo-argillosi con frequenti orizzonti centimetrici e decimetrici sabbiosi, di colore grigiastro. La classifica USCS (Unified Soil Classification System) individua termini ML e CL, con bassa plasticità e consistenza semisolido-solido: l'indice di consistenza è sempre superiore all'unità ( $I_c = 1,1-2,0$ ). La densità è elevata ( $19-21 \text{ KN/m}^3$ ) mentre il contenuto in acqua è sempre molto basso ( $W_n = 18-22\%$ ).

Il comportamento geomeccanico è decisamente coesivo con valori elevati della coesione drenata ( $C' = 30-80 \text{ KPa}$ ) e non drenata ( $C_u = 180-500 \text{ KPa}$ ); l'angolo di attrito efficace è in genere basso ed intorno a valori di  $\phi' = 18^\circ-24^\circ$ .

Le caratteristiche di deformabilità sono qui espresse attraverso l'Indice di Compressibilità, relativo alla fase di ricomprensione della curva edometrica, con valori di  $C_c = 0,04-0,21$ , che esprimono una bassa deformabilità, in accordo anche con i bassi valori dell'indice dei vuoti ( $e = 0,45-0,65$ ).

## COMPLESSO DEI DEPOSITI ALLUVIONALI

### Ghiaie di base (G)

Alla base dei depositi olocenici ed a contatto con il basamento pliocenico si estende uno strato di ghiaie e ghiaie sabbiose eterogenee, con elementi di dimensioni centimetriche. In tali depositi ovviamente non sono disponibili prove di laboratorio e/o in sito; si stima comunque un comportamento geomeccanico decisamente attritivo, con coesione nulla e bassa deformabilità.

### Unità delle alluvioni oloceniche del Tevere e dei suoi affluenti (All)

I sedimenti olocenici dal punto di vista geotecnico, pur nella variabilità granulometrica e deposizionale, sono caratterizzati da uno stato sostanzialmente normal-consolidato, bassi valori di resistenza al taglio e medio-elevata deformabilità. Questi caratteri geotecnici determinano delicati problemi fondazionali, di stabilità e di interazioni con le infrastrutture insediative esistenti per eventuali interventi progettuali e una amplificazione delle accelerazioni sismiche dovute alla differenziale di impedenza fra bed-rock pliocenico ed alluvioni oloceniche (Funicello et al., 1995; Boschi et al., 1995).

### Sabbie limose e limi sabbiosi grigiastri (SLG)

Trattasi di depositi sabbiosi limo-argillosi di colore grigiastro, con un variabile e locale contenuto organico; la percentuale della frazione sabbiosa è mediamente del 40-50%. Localmente il contenuto della frazione argillosa può raggiungere valori più elevati (25-30%) soprattutto in prossimità delle eteropie con l'Unità AG. In laboratorio sono stati esaminati 18 campioni indisturbati.

I Limiti di Atterberg sono prossimi alla linea "A" con Limite Liquido sempre inferiore a 50%; soltanto il 17% dei campioni disponibili è risultato non plastico. La classifica USCS individua termini SC, SM, CL, ML.

Si individua un prevalente comportamento geomeccanico di tipo attritivo ( $\phi' = 25-35^\circ$ ) mentre la coesione drenata è intorno a  $c' = 0-15 \text{ KPa}$ ; in laboratorio si sono ottenuti alcuni valori ancora più elevati della coesione che sono relativi ad orizzonti relativamente più limo-argillosi.

Le caratteristiche di deformabilità, stimate da prove pressiometriche in foro tipo Menard, danno valori di  $E = 8.000-14.000 \text{ KPa}$ .

### Argille limose con livelli organici (AG)

Trattasi di argille limose e limi argillosi grigiastri, con variabile contenuto organico soprattutto concentrato in livelletti nerastri di dimensioni millimetriche e centimetriche; si sono esaminati 158 campioni.

I valori di umidità e di densità si disperdono in un campo abbastanza esteso ( $W_n = 20-60\%$ ;  $\gamma = 15-20 \text{ KN/m}^3$ ); trattasi sempre di terreni CH, OH e MH, ad alta compressibilità e di consistenza da molle-plastica a plastica. Nell'Abaco di Casagrande i valori di IP e LL si dispongono lungo la retta A e con valori che arrivano ad un massimo di IP = 50-60 % e LL = 80-100 %; l'indice di Attività individua comunque sempre terreni da inattivi a normalmente attivi ( $A = 0,4-1,0$ ).

Il comportamento geomeccanico è decisamente coesivo con medio-bassi valori di resistenza al taglio ( $\phi' = 15^\circ-26^\circ$ ;  $c' = 5-25 \text{ KPa}$ ), ottenuti da prove di taglio diretto; nei grafici allegati i valori di  $c'$  superiori a 35-40 KPa fanno riferimento a prove Triassiali consolidate-drenate. I Moduli Edometrici, relativi ai livelli tensionali in sito, sono medio-bassi individuando una medio-elevata deformabilità, soprattutto in presenza di sostanza organica ( $E_{ed} = 3.000-12.000 \text{ KPa}$ ).

Alcune analisi mineralogiche su campioni prelevati a -16/-22 m s.l.m. hanno dato un contenuto mineralogico essenzialmente caolinico-illitico (10-14%) con clorite al 5-10% e smectite trascurabile (1-3%); questi valori sono in accordo con l'Indice di Attività (A) precedentemente valutato. Il contenuto in minerali non argillosi appare caratterizzato dalla prevalenza di calcite (48-55%) e Quarzo (23%) e trascurabile contenuto in feldspati (6%).

I risultati delle prove con Penetrometro e Vane Test tascabili, eseguiti su carote appena estratte, hanno evidenziato una differenziazione in due membri: uno superiore e meno consistente (AG2) esteso fino a 30-35 m di profondità dal piano campagna (circa -15/-20 m s.l.m.) e un secondo membro sottostante relativamente più consistente (AG1). Tale differenziazione è stata confermata sostanzialmente dalle prove di laboratorio e dalle penetrometrie statiche CPT ed è verificabile sia in sinistra idrografica che in destra idrografica. Orizzonti di discontinuità geotecnica, a quote intorno a -15/-20 m s.l.m., sono già stati riscontrati in penetrometrie statiche CPT eseguite in depositi limo-argillosi olocenici nell'area dell'aeroporto di Fiumicino (Mortari, 1975).

I parametri presentati nei grafici di Fig. 9 sono relativi alla totalità dei campioni della unità litotecnica AG e si può supporre che una certa variabilità dei parametri geomeccanici sia dovuta anche alle frequenti eteropie in destra idrografica con depositi sabbiosi (S, SLV, SLG) i quali possono aver nel tempo influito sulle caratteristiche geotecniche locali delle argille AG con fenomeni di drenaggio e/o di sovrappressione interstiziale.

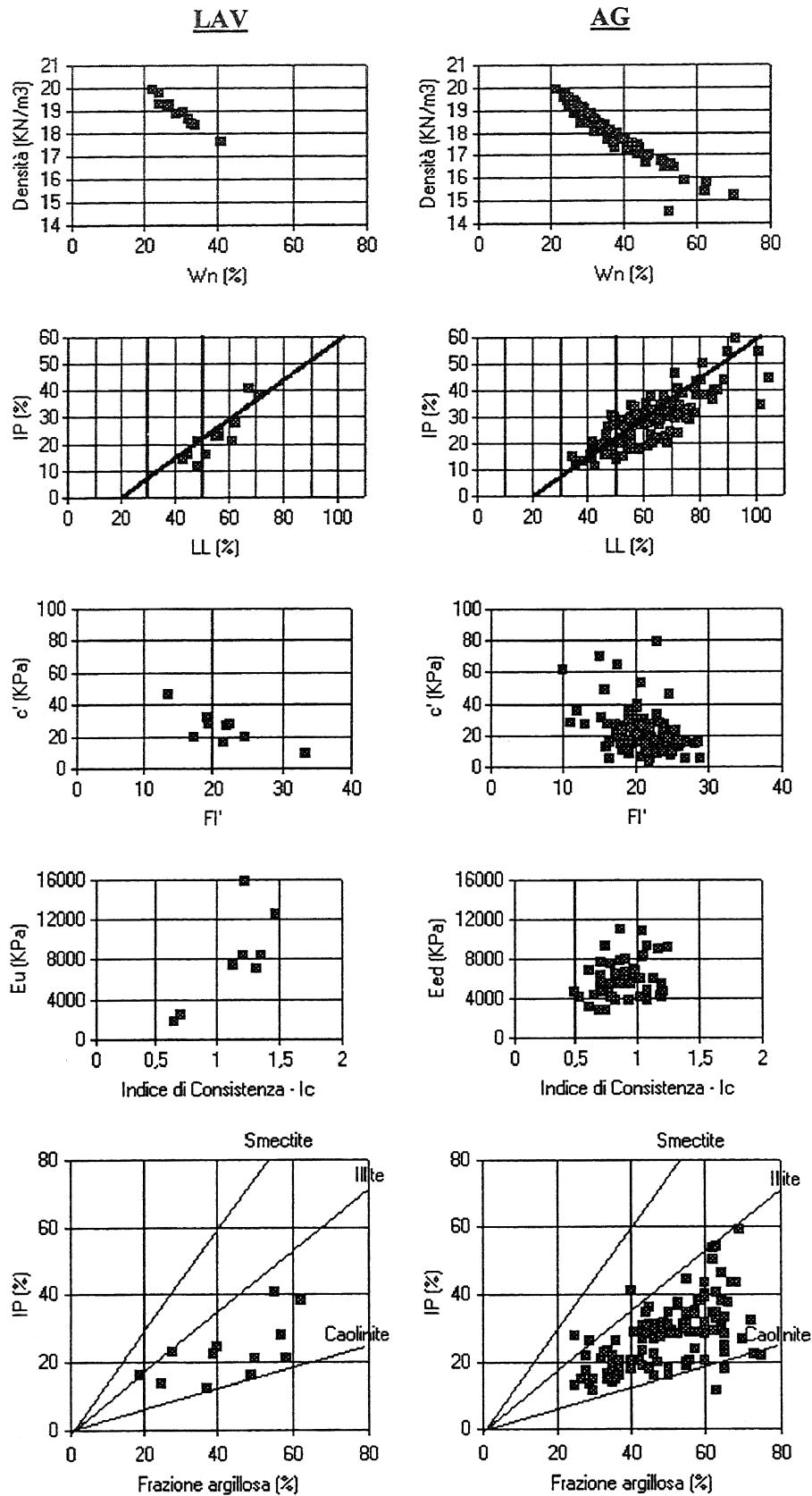


Fig. 9 - Caratteristiche fisico-meccaniche delle alluvioni tiberine: unità litotecniche limo-argilose (LAV, AG).

Physical-mechanical characteristics of the Tiber alluvial deposits: clays and silty clays (LAV,AG).

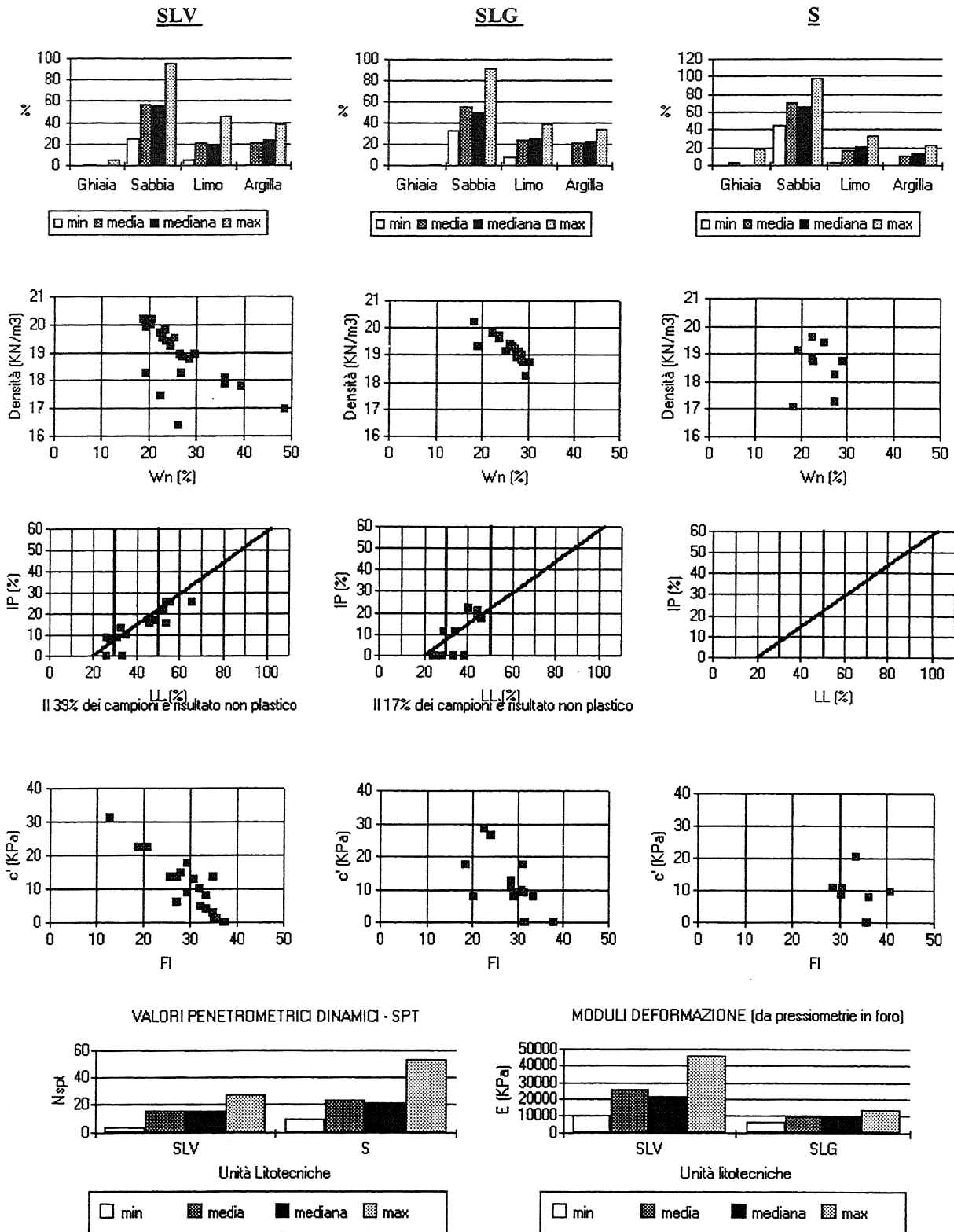


Fig. 10 - Caratteristiche fisico-meccaniche delle alluvioni tiberine: unità litotecniche sabbiose e sabbioso-limose (SLV, SLG, S).  
 Physical-mechanical characteristics of the Tiber alluvial deposits: sand and silty sand (SLV, SLG, S).



Per poter meglio analizzare i parametri fisico-meccanici delle argille limose in esame si sono esaminati esclusivamente i risultati delle prove di laboratorio di 55 campioni relativi al settore in sinistra idrografica ove le argille AG sono presenti con una serie deposizionale continua, senza intercalazioni sabbiose (vedi Fig. 4); nella Fig. 11 sono graficizzati alcuni di questi parametri in funzione della profondità.

L'analisi dell'andamento dei parametri fisico-meccanici delle argille AG con la profondità (Fig. 11) mostra in maniera evidente la differenziazione nei due membri (AG1 e AG2) in corrispondenza della quota intorno a -15/-20 m slm, ove si realizza un infittimento dei livelletti organici. Inoltre nel membro superiore i parametri appaiono quasi non risentire del carico litostatico agente, mentre nel membro inferiore l'influenza delle tensioni geostatiche appare ben evidente (vedi in particolare i grafici della distribuzione di Cu e Eed con la profondità, in Fig. 11).

Per verificare se la diversa consistenza dei due membri AG1 e AG2 potesse dipendere dalla sostanza organica, si è eseguita una serie di prove su campioni casualmente scelti sia superiormente che inferiormente al passaggio precedentemente indicato intorno a circa -15/-20 m slm. I risultati individuano una fascia relativamente più organica circa a -20 m slm ed una diminuzione del contenuto di sostanza organica a profondità superiori, ma sempre con un contenuto organico piuttosto basso (1-3%); da notare che i campioni sono stati prelevati con lo scopo di individuare la S.O. dispersa nella matrice senza privilegiare i livelletti organici nerastrati di dimensioni millimetriche e centimetriche.

Si nota infatti che, prescindendo dai livelli millimetrici e centimetrici decisamente organici, in genere il colore prevalente del deposito è sempre ed omogeneamente grigiastro senza diffuse colorazioni nerastrate massive; vale a dire che, dai risultati ottenuti, non si può comunque definire le argille limose in questione come generalmente organiche. A tale riguardo possiamo inoltre dire che, sulla base della personale esperienza in zone adiacenti e prossime alla valle tiberina o all'interno di depositi recenti dei suoi affluenti, in corrispondenza di limi argillosi nerastrati e decisamente organici si sono ottenute percentuali di sostanza organica superiori a 5-10 % (Via dei Primatei Sportivi, Fosso di Malafede, Via Giustiniano Imperatore, ecc.). Risulta pertanto, per le alluvioni tiberine qui descritte, un con-

tenuto medio-basso di sostanza organica nella matrice limo-argillosa, in compresenza di una maggiore o minore frequenza di livelli decisamente organici nerastrati (vedi Fig. 12).

Tale differenziazione in due membri è stata inoltre confermata dalle prove penetrometriche statiche CPT, particolarmente idonee a valutare la resistenza al taglio di terreni argillosi soffici; per il membro superiore AG2 si sono ottenuti i seguenti valori di resistenza alla punta ( $R_p$ ) e laterale ( $R_l$ ):  $R_p = 0,05-1,00$  MPa e  $R_l = 0,01-0,03$  MPa. Invece per il membro inferiore AG1, relativamente più consistente, si sono ottenuti i valori di  $R_p = 1,00-1,6$  MPa e  $R_l = 0,02-0,04$  MPa.

La differenziazione geotecnica sopra descritta è stata individuata anche nell'ambito di una tesi inedita sulle alluvioni oloceniche tiberine (Andreucci, 1998), nella quale, oltre a valori di sostanza organica che confermano sostanzialmente quelli da noi raccolti, sono riportate numerose analisi mineralogiche, dalle quali risulta che il contenuto percentuale dei minerali argillosi, rispetto a quelli non argillosi, è di circa il 40% nel membro superiore AG2 e del 20% nel membro inferiore; inoltre si riscontra, dal membro inferiore a quello superiore, un aumento repentino del contenuto illitico (dal 12% al 25%) ed una parallela diminuzione del contenuti in calcite (dal 50% al 35%). Il membro inferiore, relativamente più consistente, sarebbe pertanto meno ricco in minerali argillosi e più ricco in calcite.

La differenziazione geotecnica fra i due membri è pertanto dovuta, oltre che alla diversa distribuzione in sostanza organica, anche a un diverso contenuto mineralogico.

I dati riguardanti le variazioni del contenuto in sostanza organica dispersa, della frequenza dei livelli organici e del contenuto mineralogico fra i due membri, possono essere legati a variazioni climatiche ed in particolare ad un temporaneo rallentamento della risalita del livello del mare verificatosi circa 8000-6500 anni fa. Tale rallentamento è evidenziato dalla curva di risalita riportata in Alessio, 1994 (vedi anche Antonioli e Ferranti, 1996; Bellotti, 1989) e coincide con una quota (-10/-20 m slm) che è concorde con quella di circa -15/-20 m slm della fascia di transizione fra i membri AG1 e AG2 (vedi Fig. 7). In questa fase si sarebbe determinato un relativo aumento della frequenza dei livelli organici, un pur limitato aumento del contenuto in S.O. dispersa e una variazione del contenuto minera-

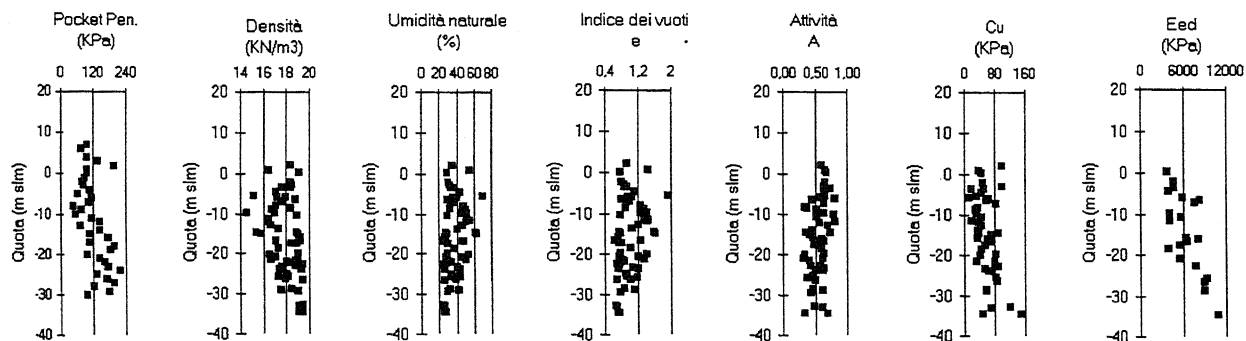


Fig. 11 - Distribuzione delle caratteristiche fisico-meccaniche con la profondità della unità litotecnica AG..

*Physical-mechanical characteristics trend with depth of the AG lithofacies.*

logico dei depositi, con arricchimento percentuale dei minerali argillosi nel membro superiore. Questi fenomeni sono correlabili con una variazione del regime sedimentologico del Tevere, visto che il fiume, alla foce e nello stesso periodo, tende a passare da un sistema a laguna aperta eualina a laguna ristretta mesoalina (Belluomini et al., 1986).

#### Sabbie grigiastre grossolane (S)

Si tratta di sabbie prevalentemente quarzose. Le granulometrie medio-grossolane, la loro incoerenza e la totale saturazione hanno permesso soltanto pochi campionamenti affidabili (14 campioni); pertanto la parametrizzazione è affidata in maniera sostanziale a dati di prove penetrometriche dinamiche SPT. L'umidità varia dal 20 al 30 % mentre la densità ha valori intorno a 17-20 KN/m<sup>3</sup>; la Classifica USCS individua termini riferibili a SM e SW-SM e tutti i campioni indisturbati disponibili sono risultati non plastici. Il comportamento geomeccanico è decisamente attritivo con angolo di attrito efficace sempre superiore a 30° e coesione nulla; soltanto in corrispondenza di alcuni orizzonti con circa 10-15 % di argilla si sono ottenuti valori di coesione intorno a  $c' = 5-10$  KPa.

Dalle prove penetrometriche dinamiche tipo SPT si sono ottenuti valori variabili da 10 a 50 colpi/30cm, dai quali si stima una media Densità Relativa ( $Dr = 50-60\%$ ) e Moduli di Deformazione intorno a  $E = 15.000-31.000$  KPa.

#### Sabbie limose e limi sabbiosi verdastrati (SLV)

Granulometricamente trattasi di sabbie limose e limi sabbiosi grigio-verdastrati, con la frazione sabbiosa che tende a diminuire con la profondità; si sono analizzati 23 campioni.

Il contenuto argilloso è in genere assente o marginale, ma localmente può raggiungere il 15-35 %. I Limiti di Atterberg variano da termini decisamente non plastici a bassi valori di plasticità con valori allineati lungo la li-

nea A dell'Abaco di Casagrande (il 39% dei campioni disponibili è risultato non plastico); la classifica USCS individua terreni SC, SM, CL, ML.

Dalle prove meccaniche di laboratorio si individua un prevalente comportamento geomeccanico di tipo attritivo, anche se localmente il contenuto limoso e a volte argilloso può determinare un certo apporto di resistenza coesiva ( $\phi' = 27-35^\circ$ ;  $c' = 0-20$  KPa). Il discreto grado di variabilità dei parametri geotecnici riscontrato, sia stratigraficamente che arealmente, è da mettere in relazione alle dinamiche deposizionali fluviali variabili soprattutto trasversalmente al talweg.

Le prove penetrometriche dinamiche hanno riscontrato valori medi intorno a 8-27 colpi/30cm; dai valori SPT si stimano valori medio-bassi della Densità Relativa ( $Dr = 35-45\%$ ). In corrispondenza di questo litotipo si sono eseguite alcune prove pressiometriche dalle quali si sono stimati valori del modulo di deformazione in sito  $E = 10.000-20.000$  KPa (da alcune prove pressiometriche si sono stimati valori più elevati:  $E = 35.000-40.000$  KPa, in corrispondenza degli orizzonti a quote più elevate, probabilmente da mettere in relazione a fenomeni di essiccamento, per oscillazioni della falda).

#### Limi argillosi verdastrati (LAV)

In eteropia con le sabbie limose sopra descritte sono state individuate, nelle aree più distanti dell'asta tiberrina, dei depositi sempre grigio-verdastrati, ma con prevalenza della frazione granulometrica limo-argillosa.

Dai 14 campioni esaminati in laboratorio si valuta una bassa plasticità e media consistenza ( $IP = 10-30$ ;  $Ic = 0,6-1,3$ ); la classifica USCS individua terreni CL e ML con valori che si dispongono sulla retta A della Carta di Plasticità. I valori di umidità e densità sono abbastanza omogenei ( $W_n = 20-30\%$ ;  $\gamma = 18-20$  KN/m<sup>3</sup>), mentre l'Indice di Attività indica una bassa attività colloidale ed un contenuto mineralogico essenzialmente illitico e caolinico ( $A = 0,5-0,8$ ). I parametri geomeccanici sono tipici di un terreno a comportamento tendenzialmente coesivo ( $\phi' = 18-25^\circ$ ;  $c' = 15-30$  KPa).

In questo litotipo è stata eseguita una sola prova edometrica, con un valore di  $E_{ed} = 5.500$  KPa, relativo al livello tensionale in sito; sulla base di alcune prove pressiometriche si possono invece stimare valori in sito di  $E = 7.000-12.000$  KPa. Per aumentare statisticamente la popolazione di dati si sono calcolati anche i valori di deformabilità non drenata  $E_u$  sulla base della relazione empirica  $E_u = 100 \div 150 \cdot C_u$  (Duncan, 1976), ricavati da numerose misure sulle carote con Pocket e Vane Test tascabili, dalla quale risultano valori in sostanziale accordo con quelli sopra valutati (nel grafico di Fig. 9 sono mostrati i valori di deformabilità non drenata  $-E_u$ ).

I parametri di resistenza al taglio e di deformabilità tendono a diminuire con la profondità per fenomeni di sovraconsolidazione dovuti ad essiccamento e/o a variazione dei livelli piezometrici che hanno interessato i livelli superiori; la relativa maggiore consistenza degli orizzonti superiori è probabilmente da mettere anche in relazione a consolidazione dovuta alle tensioni indotte dagli edifici (antichi e moderni) soprastanti.

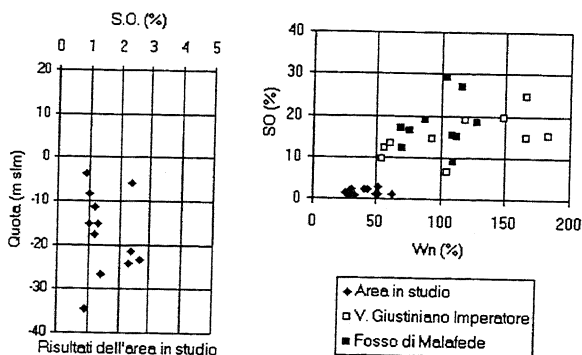


Fig. 12 - Unità litotecnica AG. Contenuto in sostanza organica e confronto con depositi simili in altre zone delle alluvioni tiberrine urbane.

AG lithofacies. Organic matter content comparing with similar deposits in other urban tiberine sites.

### Alluvioni recenti dei fossi (LSO)

I depositi alluvionali tiberini sono collegati agli apporti fluviali provenienti da una serie di valli e vallecicole, incise nelle argille vaticane o nei depositi pleistocenici; in particolare, in relazione al settore del Centro Storico, si fa riferimento ai Fossi del Gelsomino, della Valle dell'Inferno (in destra idrografica) ed alle antiche valli Petronia Amnis, Spinon e Fosso Labicano (in sinistra idrografica). Tali depositi si presentano costituiti da sabbie e limi sabbiosi e da limi argillosi ricchi in sostanze organiche ed elementi lapidei fluitati, di origine prevalentemente piroclastica. La percentuale di frammenti tufacei e di minerali vulcanici rimaneggiati, quasi sempre presenti, è estremamente variabile, in relazione sia alla granulometria del deposito che alla geologia del settore che alimentava il trasporto solido del corso d'acqua.

Dai risultati di laboratorio, relativi a 19 campioni, si valutano densità e umidità naturale abbastanza disperse ( $\gamma = 17-19 \text{ KN/m}^3$ ;  $W_n = 30-45\%$ ); la classifica USCS individua terreni ML, MH, OL, OH.

Si individua un comportamento geomeccanico variabile a secondo del prevalere di una matrice sabbiosa o limo-argillosa; trattandosi inoltre prevalentemente di materiale piroclastico rimaneggiato e più o meno argillificato si individuano a volte valori medio-alti dei Limiti di Atterberg ( $LL = 40-70\%$ ). Si può assumere comunque una resistenza al taglio governata prevalentemente dalla resistenza attrittiva con  $\phi' = 25-30^\circ$  e  $c' = 0-20 \text{ KPa}$ , valori questi stimati dalle prove SPT.

Le prove penetrometriche dinamiche hanno dato valori variabili da 16 a 55 colpi/30cm, dai quali si stimano parametri di deformabilità  $E = 6.000-14.000 \text{ KPa}$ , indice di elevata deformabilità.

### COMPLESSO DEI DEPOSITI ANTROPICI

#### *Terreni antropici ed alluvioni storiche (TA)*

Dal punto di vista granulometrico sono costituiti prevalentemente da sabbie limose, con abbondanti elementi lapidei eterometrici ed eterogenei anche di dimensioni più che decimetriche; localmente sono presenti frammenti di strutture murarie e discariche di antiche macerie.

In genere non sono possibili campionamenti indisturbati affidabili di tali terreni e pertanto la parametrizzazione viene eseguita, oltre che attraverso l'esame visuale delle carote, attraverso numerose prove penetrometriche dinamiche; i valori ottenuti sono ovviamente estremamente dispersi, con valori variabili da 10 a 40 colpi/30cm, fino a rifiuto. I valori a rifiuto fanno riferimento a locali accumuli grossolani di spezzoni lapidei di murature, di travertino e ad antiche discariche di macerie.

I valori penetrometrici, in considerazione delle limitate profondità di prova (basse tensioni di confinamento), indicano Densità Relative particolarmente scadenti ed intorno a  $Dr = 40-60\%$ , ma l'assetto caotico e l'eterogeneità geotecnica induce cautamente a considerare tali terreni come suscettibili di locali elevate deformabilità ( $E = 3.000-10.000 \text{ KPa}$ ). Inoltre sono stati individuati locali valori della Densità Relativa molto elevati ( $Dr > 60-70\%$ ) soprattutto in caso di riporti relativamente più antichi e negli orizzonti più profondi.

Alla luce dei dati di cui sopra, il comportamento geomeccanico risulta estremamente variabile, ma prevalentemente si può assumere come attrittivo.

A tale proposito è da sottolineare l'importanza di una precisa analisi stratigrafica e geotecnica dei riporti per problematiche di stabilità delle infrastrutture urbane del centro storico, in quanto gli edifici attualmente esistenti sono in genere fondati entro la coltre dei terreni antropici che sono "cresciuti" via via nel tempo e sovente le strutture fondali degli edifici sono legate a strutture sepolte ancora più antiche.

## 6. CONCLUSIONI

La disponibilità di una cospicua mole di dati di recente acquisizione ha permesso la definizione di un quadro conoscitivo di dettaglio sulle caratteristiche stratigrafiche, idrogeologiche e geotecniche dei depositi alluvionali del Tevere nel Centro Storico di Roma, che fino ad oggi venivano descritti generalmente in maniera indifferenziata.

L'analisi integrata di queste caratteristiche ha consentito l'individuazione, all'interno del complesso alluvionale tiberino, di unità deposizionali ben definite e omogenee, permettendo una ricostruzione della evoluzione paleogeografica del Fiume dal Pleistocene superiore ad oggi.

Si è così potuto ricostruire un profilo stratigrafico ed idrogeologico di dettaglio attraverso la valle alluvionale e si sono elaborate una serie di carte tematiche relative all'andamento del tetto del substrato pliocenico, e di alcune unità deposizionali significative della storia evolutiva del Tevere (isopache delle ghiaie di base G, isopache della unità sabbiosa medio-grossolana S ed isobate del letto dei terreni antropici e di riporto); sono stati inoltre realizzati alcuni grafici rappresentativi delle caratteristiche fisico-meccaniche e di deformabilità delle varie unità individuate e del loro andamento con la profondità.

La sintesi di tutti i dati ha permesso di ricostruire l'evoluzione del corso del Tevere durante le varie fasi deposizionali.

Nella fase successiva al periodo glaciale würmiano, accompagnato da una notevole erosione, nella valle fluviale vengono deposte ghiaie (G) in un ambiente a canali intrecciati di tipo "braided".

In seguito, in corrispondenza dell'innalzamento del livello marino, si imposta un corso meandriforme con depositi prevalentemente sabbioso-limosi (SLG) che migra nel tempo verso la sponda destra della valle, affiancato da aree palustri con depositi prevalentemente limoso-argillosi (AG). Sulla base delle caratteristiche fisico-meccaniche sono stati individuati, all'interno del corpo limo-argilloso AG, due membri caratterizzati da una evidente differenza dei valori di consistenza: un membro superiore (AG2), meno consistente, esteso fino a circa 35-40 m di profondità dal piano campagna (circa -15/-20 m slm) ed un membro inferiore (AG1), relativamente più consistente. L'esistenza di questi due membri potrebbe essere spiegata con il temporaneo rallentamento della risalita del livello del mare verificatosi circa 8500-6500 anni: tale rallentamento, di probabile causa climatica, dovrebbe aver determinato un relativo aumento della frequenza dei livelli organici e un pur limitato aumento del contenuto

in S.O. dispersa. In concomitanza di ciò si è realizzata anche una variazione del contenuto mineralogico dei depositi, con arricchimento percentuale dei minerali argillosi nel membro superiore.

Alla deposizione dei limi argillosi AG fa seguito una fase erosiva, connessa probabilmente ad una variazione climatica, in corrispondenza della quale si determina la messa in posto di sabbie medio-grossolane S; le sabbie costituiscono un corpo lenticolare la cui geometria è localmente condizionata dagli apporti degli affluenti del Tevere.

Una successiva attenuazione dell'attività erosiva, connessa ad un nuovo sollevamento del livello marino, ha spostato la sedimentazione fluviale verso i termini limoso-sabbiosi SLV e limo-argillosi LAV, distribuiti eteropicamente in tutta la valle tiberina.

In epoca protostorica e storica le attività dell'uomo portano alla produzione di un notevole strato di depositi antropici, ai quali si intercalano sedimenti alluvionali recenti, che ricopre in tutta la valle tiberina il complesso alluvionale descritto.

La disponibilità di una consistente mole di dati ha permesso una dettagliata caratterizzazione fisico-meccanica dei sedimenti alluvionali, con la definizione dei principali parametri fisici, di resistenza al taglio e di deformabilità. Si sono così individuate, all'interno del corpo alluvionale, delle unità litotecniche definite da omogenee caratteristiche stratigrafiche, deposizionali, di permeabilità e fisico-meccaniche.

L'analisi dei dati idrogeologici, comprendenti il monitoraggio per quattro mesi dei livelli piezometrici, ha permesso di evidenziare nel corpo alluvionale la presenza di due falde: la prima, profonda e in pressione, contenuta nello strato ghiaioso di base e la seconda, più superficiale, libera o in pressione, contenuta nei termini sabbiosi delle alluvioni. Durante il periodo di monitoraggio il livello piezometrico di entrambe queste falde ha seguito l'andamento del fiume, ma mentre per la falda superiore ciò è dovuto al contatto idraulico in loco tra fiume e acque sotterranee, per la seconda falda tale contatto avviene presumibilmente in zone distanti dall'area di studio.

Dal punto di vista metodologico i risultati di questo lavoro hanno evidenziato l'importanza della collaborazione fra specialisti delle varie discipline afferenti alle Scienze della Terra e l'importanza di una analisi interpretativa unitaria dei vari contesti geologici, idrogeologici e geotecnici. Tale approccio si rivela oggi utile per affrontare le problematiche legate alla progettazione delle infrastrutture necessarie allo sviluppo della città di Roma.

## RINGRAZIAMENTI

Desideriamo ringraziare il Prof. R. Funicello ed il Prof. M. Sciotti per la lettura critica del manoscritto e per gli ottimi consigli ed incoraggiamenti fornitici per il miglioramento del testo.

## BIBLIOGRAFIA

Albani R, Lombardi L. & Vicinanza P. (1972), *Idrogeologia della Città di Roma*. Ingegneria Sanitaria, **20**, (3), p. 106-118.

- Albani R, Lombardi L. & Vicinanza P. (1973), *Idrogeologia della Città di Roma*. Atti del II Convegno internazionale sulle acque sotterranee, Palermo.
- Alessio M., Antonioli L., Belluomini G., Improta S., Manfra L. & Preite Martinez M. (1994), *La curva di risalita del mare Tirreno negli ultimi 40 ka ottenuta mediante datazioni di speleotemi sommersi e dati archeologici*. Geosub 94, Convegno internazionale di geologia subacquea, Palinuro 8-10 Giugno 1994, Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **52**, p. 261-276.
- Antonioli F. & Frezzotti M. (1989), *I sedimenti tardo-pleistocenici ed olocenici compresi nella fascia costiera tra Sabaudia e Sperlonga*. Mem. Soc. Geol. It., **42**, p. 321-334.
- Antonioli F. & Ferranti L. (1996), *La risalita del livello del mare Tirreno nel corso dell'Olocene. Cinquanta anni di ricerche*. Mem. Soc. Geol. It., **51**, no. 1, p. 93-99.
- Andreucci A., (1998), *I depositi alluvionali recenti del Fiume Tevere nell'area urbana di Roma*. Tesi di laurea non pubblicata. Univ degli Studi di Roma la Sapienza, Dip. Scienze della Terra.
- Barigioni Pereira Santiago C. (1890), *Delle acque del sottosuolo di Roma presso il Campidoglio*. Ann. Soc. Ing. Arch. It., **5**, p. 239-253.
- Bellotti P., Carboni M.G., Milli S., Tortora P. & Valeri P. (1989), *La piana deltizia del Fiume Tevere: analisi di facies e ipotesi evolutiva dall'ultimo low stand glaciale all'attuale*. Giornale di Geologia, **51**, n.1, p. 71-91.
- Belluomini G., Iuzzolini P, Manfra L., Mortari R. & Zalaffi M. (1986), *Evoluzione recente del delta del Tevere*. Geologica Romana, **25**, p. 213-234.
- Bencivenga M., Di Loreto E. & Liperi L. (1995), *Idrologia*. In: "La Geologia di Roma. Il Centro Storico". Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia, **50**, p. 123-172.
- Boschi E, Caserta A., Conti C., Di Bona M., Funicello R., Malagnini L., Marra F., Martines S.G., Rovelli A. & Salvi S. (1995), *Resonance of Subsurface Sediments: an Unforeseen Complication for Designers of Roman Columns*. Bulletin of Seismological Society of America, **85**, n. 1, p. 320-324.
- Boudillon F., Pescatore T. & Senatore M.R. (1994), *Cicli deposizionali del Pleistocene superiore-Olocene sulla piattaforma continentale del Golfo di Salerno (Tirreno meridionale)*. Boll. Soc. Geol. It., **113**, p. 303-316.
- Bozzano R., Funicello R., Gaeta M., Marra F., Rosa C. & Valentini G. (1997), *Recent alluvial deposits in Rome (Italy): morpho-stratigraphic, mineralogical and geomechanical characterisation*. Proceedings International Symposium on Engineering Geology and the Environment, Athens, **1**.
- Calabresi G. Cassinis C. & Nisio P. (1980), *Influenza del regime del Tevere sul comportamento di un fabbricato monumentale adiacente*. Atti del XIV Convegno Nazionale di Geotecnica, AGI.
- Camponeschi B. & Nolasco F. (1982), *Le risorse naturali della Regione Lazio: Roma e i Colli Albani*. Regione Lazio, **7**, Roma.
- Canevari R. ed altri (1890), *Dei lavori di sistemazione del Tevere in rapporto alle acque vaganti nel sottosuolo di Roma*. Ann. Soc. Ing. Arch. It., **5**, Roma.

- Carboni M.G., Funicello R., Parotto M., Marra F., Salvi S., Corazza A., Lombardi L. & Feroci M. (1991), *Geologia e idrogeologia del centro storico di Roma*. Progetto strategico Roma Capitale, CNR, Roma.
- Corazza A. & Giuliano G. (1994), *Idrogeologia e vulnerabilità delle risorse idriche sotterranee della città di Roma*. L'ambiente nel centro storico e a Roma, Secondo Rapporto: il suolo/sottosuolo, Comune di Roma, Roma.
- Corazza A., Lombardi L. & Polcari M. (1986), *Carta idrogeologica della città di Roma, scala 1:10000, 73°* Congresso Soc. Geol. It., sessione poster, Roma.
- Corazza A. & Lombardi L. (1995), *Idrogeologia del centro storico*. In "La geologia di Roma. Il Centro Storico". Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia, **50**, p. 173-211.
- Corazza A. & Lombardi L. (1995), *Le acque sotterranee*. In "L'Ecosistema Roma - Ambiente e territorio". F.lli Palombi Editori, p.40-46.
- Corazza A. (1997), *Le acque sotterranee della città di Roma*. In: "Relazione sullo Stato dell'Ambiente a Roma. Primo rapporto. Maggioli Editore, p. 89-97.
- De Angelis D'Ossat G. (1906), *I veli acquiferi della pianura Tiberina*. Boll. Soc. Ing. e Arch. It., **31-32**, Roma.
- Duncan J.M., Buchigani A.L. (1976), *An Engineering Manual for Settlement Studies*. Dept. of C.E., Univ. of California, Berkeley.
- Frosini P. (1928), *Le acque freatiche del sottosuolo di Roma*. Roma.
- Funicello R., Lombardi L., Marra F. & Parotto M. (1995), *Seismic damage and geological heterogeneity in Rome's Colosseum area: are they related?* Annali di Geofisica, **38**, n. 5-6, p. 927-937.
- Gigli E. (1971), *Cosa c'è sotto Roma?. La pianura del Tevere (limitatamente al centro storico)*. Capitolium, **46**, n. 5/6, p. 46-71.
- Maddalena L. & Palumbo E. (1928), *Sull'esame geognostico del sottosuolo di Roma in occasione degli studi per il progetto delle ferrovie metropolitane*. Riv. Tecn. Ferr. It., **34**, n. 5-6, Roma.
- Manfredini M. (1950), *Le falde idriche artesiane del sottosuolo di Roma*. Quaderno 3, Serv. Geol. d'Italia, p. 13-15.
- Marra F. & Rosa C. (1995), *Caratteri Geologico-Stratigrafici*. In: "La Geologia di Roma. Il Centro Storico". Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia, **50**, p. 49-118.
- Martini P., Albani R., Mouton J., Curli G. (1961), *Contribution à la connaissance de l'hydrogéologie de la région de Rome à la suite des recherches exécutées par "l'Azienda Comunale Elettricità ed Acque di Roma" (ACEA)*. Mem. AIH Napoli, 1961.
- Mortari R. (1975), *Resistenza alla penetrazione di argille lagunari recenti*. XII Convegno Nazionale di Geotecnica, AGI, Cosenza, 18-21 Settembre 1975
- Rughi D. (1986), *La struttura del Colle Capitolino e del Colle Palatino alla luce dei recenti dati di esplorazione del sottosuolo*. Tesi di Laurea inedita, Relatore Prof. R. Funicello, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Roma.
- Terrigi G. (1887), *Relazione della Commissione per lo studio delle acque del sottosuolo della città*. Boll. R. Acc. med. Roma, **13**, (6), Roma.
- Unigeo (1986), *Idrogeologia del territorio romano entro le Mura Aureliane e geologia delle aree del Palatino e delle Terme di Caracalla*. ISMES. Studio inedito, Roma.
- Ventriglia U. (1971), *La geologia della città di Roma*. Amministrazione Provinciale di Roma, Roma.
- Ventriglia U. (1990), *Idrogeologia della Provincia di Roma*. Provincia di Roma, Ass. LL.PP. Viab. e Trasp., Roma.

Ms. ricevuto il 16 settembre 1999  
 Testo definitivo ricevuto il 20 marzo 2000

Ms. received: September 16, 1999  
 Final text received: March 20, 2000