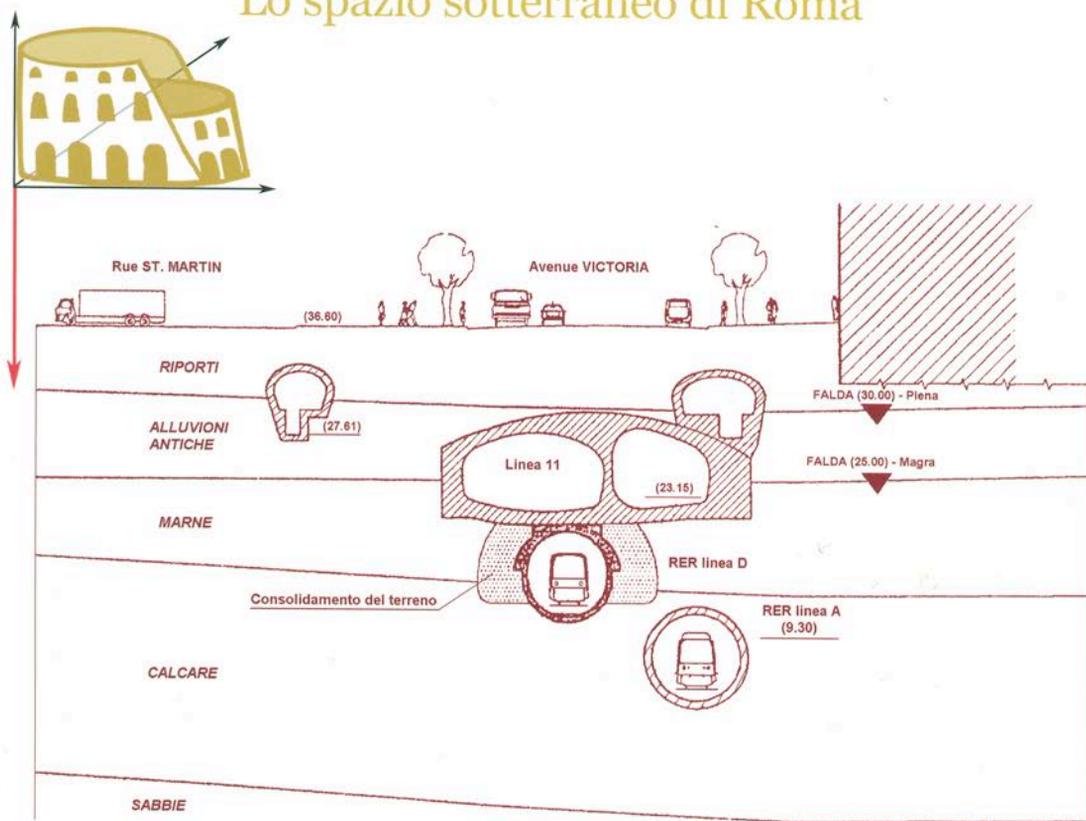




LA IV[^] DIMENSIONE

Lo spazio sotterraneo di Roma



a cura di

Giuseppe Gisotti Giulio Pazzagli Fabio Garbin

I terreni di Roma sotto l'aspetto della geologia tecnica

Giuseppe Cavarretta, Gian Paolo Cavinato, Marco Mancini,
Massimiliano Moscatelli, Antonio Patera, Giuseppe Raspa,
Francesco Pio Stigliano, Roberto Vallone, Daiane Folle,
Fabio Garbin, Salvatore Milli, Sergio Storoni Ridolfi

Introduzione

I diversi soggetti istituzionali e privati che a vario titolo sono interessati alle valutazioni di rischio geologico e alla progettazione di opere di ingegneria nella città di Roma si trovano spesso nella difficoltà di acquisire e interpretare i dati geognostici. Tale difficoltà è dovuta alla grande variabilità litologica, stratigrafica e geotecnica delle formazioni sedimentarie e vulcaniche affioranti e presenti nel sottosuolo. Un'ulteriore complicazione è dovuta alla presenza dei terreni di riporto che, in circa 3000 anni di attività antropica, hanno ricoperto con spessori

Giuseppe Cavarretta, Direttore dell'Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria del CNR, Roma

Gian Paolo Cavinato, Ricercatore. CNR-IGAG, Roma

Marco Mancini, Ricercatore. CNR-IGAG, Roma

Massimiliano Moscatelli, Ricercatore. CNR-IGAG, Roma

Antonio Patera, Ricercatore. CNR-IGAG, Roma

Giuseppe Raspa, Professore di Geostatistica Applicata, Università La Sapienza, Roma

Francesco Pio Stigliano, Ricercatore. CNR-IGAG, Roma

Roberto Vallone, Ricercatore. CNR-IGAG, Roma

Daiane Folle, Dottoranda. Università La Sapienza, Roma

Fabio Garbin (cfr. pag. 23)

Salvatore Milli, Professore associato di Sedimentologia, Università La Sapienza, Roma

Sergio Storoni Ridolfi, Docente incaricato di Geologia Applicata alle vie di comunicazione, Università degli Studi di Roma Tre

variabili i depositi sottostanti.

La città di Roma, tra tutte le grandi metropoli, costituisce pertanto un "laboratorio geologico e geotecnico unico" e, se la variabilità stratigrafica è già stata definita (cfr. Funicello, 1995; Ventriglia, 2002), manca ancora una "codifica geologico-tecnica" per l'intera area urbana del comune di Roma.

Il progetto qui descritto mira pertanto a correlare e rendere tra loro organici i dati geotecnici in possesso di diversi soggetti istituzionali e privati, realizzando una banca dati geotecnica dei terreni della città di Roma. La banca dati è in grado di soddisfare le diverse esigenze degli Enti locali per finalità di valutazione dei rischi, di pianificazione e di progettazione, nonché quelle delle imprese impegnate nella realizzazione di grandi opere civili e dei professionisti che operano nel settore della geognostica e della geotecnica. Il geotecnico pertanto, potendo usufruire delle informazioni archiviate nella banca dati, sarà in grado di pianificare al meglio ogni singola campagna di indagine ottimizzando sia i tempi sia le risorse economiche.

Altrettanto rilevante è l'elaborazione statistica dei dati geotecnici al fine di ottenere stime attendibili di parametri in zone prive di informazioni. In questo modo è possibile produrre una cartografia tematica finalizzata sia a una corretta pianificazione territoriale sia a una valutazione del rischio sismico.

Progettazione e realizzazione del sistema informativo geografico

Un sistema informativo geografico (GIS) è uno strumento software che permette di posizionare e analizzare ogget-

ti ed eventi che si verificano sul globo terrestre. La tecnologia GIS integra le normali operazioni effettuate sulle banche dati, quali ricerche e analisi statistiche, con le funzionalità proprie dei GIS, come l'archiviazione, il trattamento, l'analisi e l'estrazione delle informazioni geografiche per la creazione di grafici e di carte tematiche. Tali capacità distinguono i GIS da altri sistemi informativi e ne fanno uno strumento rivolto ad un'ampia gamma di utenti pubblici e privati che hanno la necessità di visualizzare e analizzare informazioni geografiche per spiegare e prevedere eventi, fornire risultati e pianificare strategie.

Il sistema informativo geografico creato per questo lavoro di ricerca è stato strutturato in modo da permettere l'acquisizione, la gestione e l'aggiornamento di informazioni sia in formato vettoriale sia raster. Nucleo e parte integrante del sistema è la banca dati geologico-geotecnica contenente informazioni stratigrafiche del sottosuolo, dati litologici, geotecnici e idrogeologici.

La fase iniziale del progetto ha previsto la raccolta, la revisione e l'omogeneizzazione dei dati litologici, geotecnici e idrogeologici messi a disposizione sia da Enti pubblici (principalmente APAT e Comune di Roma) sia da imprese private (MetroRoma, Geoplanning, S.G.S. Studio Geotecnico Strutturale, S.I.G. Studio Indagini Geotecniche, IGES s.n.c.) o reperiti in letteratura. Le informazioni sia geografiche sia tabellari sono state archiviate in uno specifico database relazionale di tipo Microsoft Access, detto geodatabase, gestito dal software ArcGIS 9 della ESRI. Il software è stato inoltre utilizzato per tutte le operazioni di

gestione e analisi dei dati geografici sia raster sia vettoriali, archiviati nella proiezione Universale Trasversa di Mercatore - Zona 33 con sistema geodetico di riferimento European Datum 1950.

In merito ai dati geografici in formato digitale immessi nel sistema, si è tenuto conto che tematismi provenienti da diverse fonti non sono sempre perfettamente sovrapponibili tra di loro, presentando talvolta sfalsamenti di vari metri. Per minimizzare l'errore e avere la massima omogeneità di informazioni è necessario quindi utilizzare dati provenienti da una medesima fonte o con una stessa origine o ricondurre tutte le informazioni disponibili a una base topografica

comune. A tal fine è stata scelta come base topografica la Carta Tecnica Regionale (CTR) della Regione Lazio, utilizzata come base nella maggior parte dei lavori presi in esame che, con una scala di 1:10.000, è particolarmente adatta all'analisi dell'area in studio. Come modello digitale del terreno (DTM) è stato utilizzato quello fornito dalla Regione Lazio, con maglia di 20 metri.

Schema della banca dati

La banca dati geologico-geotecnica è stata strutturata secondo le tecniche di modellazione object-oriented. Al momento sono presenti 8004 sondaggi (Fig. 1), con oltre 35000 record relativi

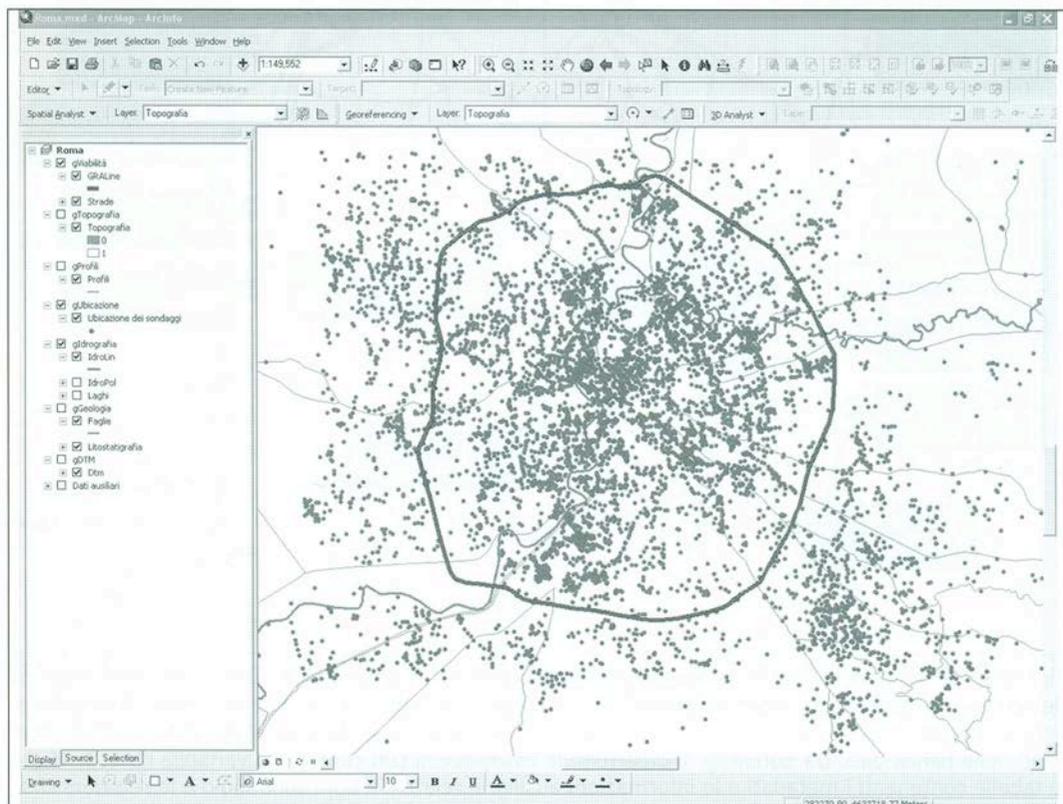


Figura 1 - Tematismi immessi nel sistema informativo. In grigio scuro sono indicati gli oltre 8000 sondaggi presenti nella banca dati.

alla stratigrafia e circa 12000 riferiti alle informazioni di tipo geotecnico.

Lo schema della banca dati, di tipo gerarchico, ha una struttura semplice ed è facilmente estendibile rispetto all'introduzione di nuovi dati e nuovi attributi delle tabelle, in modo tale da potere essere facilmente comprensibile anche da operatori poco esperti. Lo schema è mostrato nella figura 2.

Attraverso semplici interrogazioni scritte nel linguaggio SQL è possibile interrogare la banca dati per fini diversi, quali rappresentazioni cartografiche tematiche o l'estrazione delle informazioni

sulla base di specifiche richieste per l'analisi spaziale dei parametri geologico-geotecnici e idrogeologici. Ad esempio, è possibile selezionare i vari orizzonti stratigrafici principali in rapporto con gli orizzonti posti superiormente o inferiormente, calcolare gli spessori delle unità stratigrafiche o caratterizzare la distribuzione spaziale dei litotipi.

Elaborazione delle informazioni geologiche

La fase di acquisizione e informatizzazione dei dati è stata avviata contemporaneamente alla revisione dell'assetto

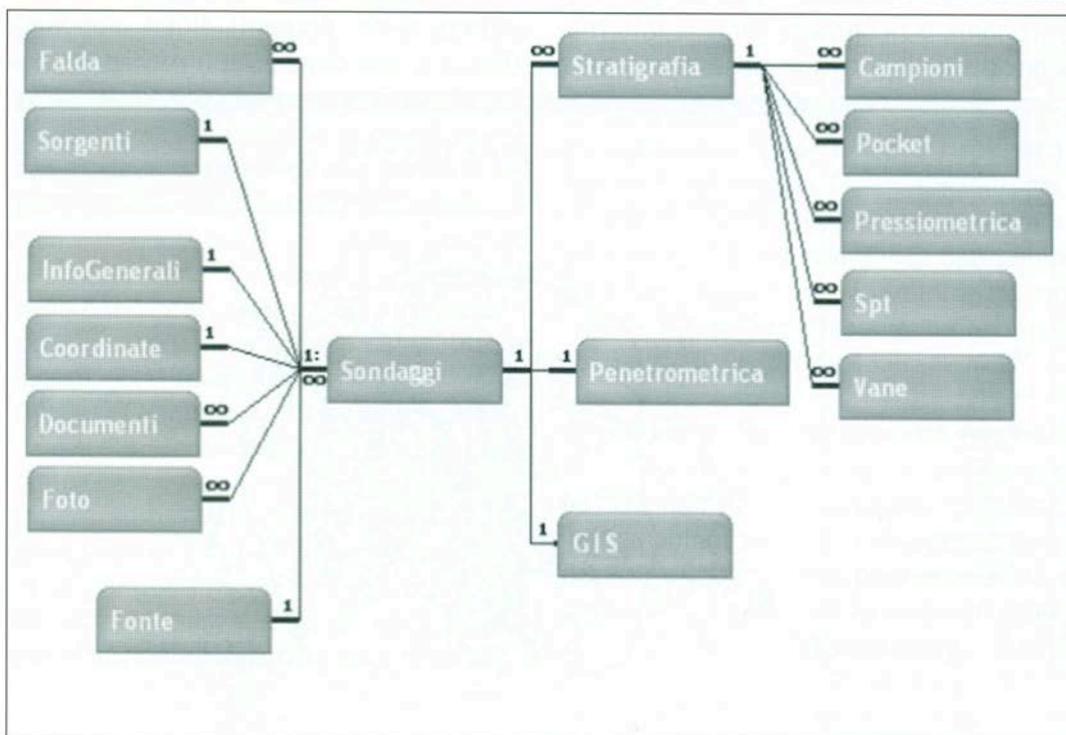


Figura 2 - Schema della banca dati geologico-geotecnica. Il tematismo vettoriale puntuale Ubicazione dei sondaggi (rappresentato con la tabella GIS nella figura), contenuto nel sistema informativo geografico, è collegato con una relazione 1:1 con la tabella Sondaggi che si trova al centro delle relazioni presenti nella banca dati. Da Sondaggi si dipartono le associazioni con cardinalità variabile da 1:0...M con le tabelle contenenti i metadati o le informazioni ausiliarie relative a ogni sondaggio e le relazioni con i dati stratigrafici e geotecnici. Ogni informazione geotecnica è riferita all'intervallo stratigrafico nel quale sono state effettuate le prove (Pocket, Pressiometrica, SPT, Vane) oppure sono stati prelevati i campioni (Campioni).

stratigrafico del sottosuolo di Roma. Al fine di valutare la distribuzione spaziale delle diverse proprietà geologiche e geotecniche, le informazioni di superficie e di sottosuolo sono state integrate e gestite tramite il software di modellazione tridimensionale 3DEarthVision della Dynamic Graphics, interfacciato con ArcGIS 9. La modellazione tridimensionale presenta il vantaggio di essere facilmente comprensibile anche da parte di specialisti di altre discipline e può essere utilizzata in fase di pianificazione e progettazione. Questo tipo di ricostruzioni costituisce, inol-

tre, un valido supporto all'analisi delle geometrie deposizionali e alla rappresentazione della variabilità spaziale dei caratteri geotecnici dei terreni.

Per realizzare il modello geologico sono stati selezionati dalla banca dati oltre 2000 sondaggi geognostici e sezioni stratigrafiche di campagna (Fig. 3). I dati di superficie e di sottosuolo sono stati interpretati e correlati. Oltre 90 pannelli di correlazione sono stati realizzati utilizzando uno schema litostratigrafico, risultato della consultazione, esame critico e sintesi dell'ampia letteratura scientifica

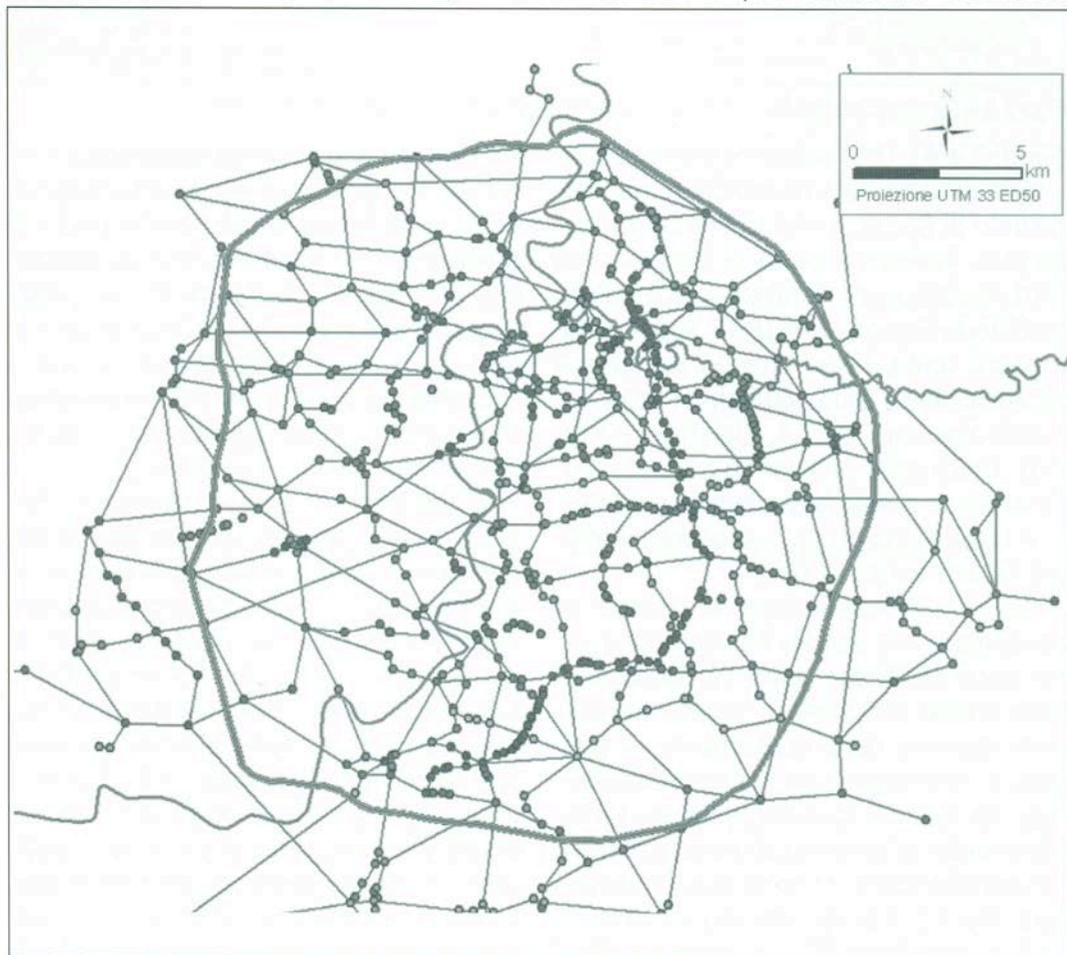


Figura 3 - Ubicazioni dei sondaggi utilizzati per la realizzazione del modello geologico e tracce dei pannelli di correlazione.

TEMPO (Ma)	CRONOSTRATIGRAFIA		LITOSTRATIGRAFIA da Conato et al., 1980	UBSU Marra & Rosa, 1995	STRATIGRAFIA SEQUENZIALE da Milli, 1992, 1994, 1997, 2005		UNITA' LITOSTRATIGRAFICHE INFORMALI presente lavoro		
	sistema	serie			sequenze deposizionali di 4° ordine	sequenze deposizionali di 3° ordine			
0.1	Quaternario	Pleistocene	Duna rossa Formazione "Il Fronte"	Unità Vitinia Unità Aurelia Unità San Paolo Unità Valle Giulia Unità Paleotevere 2B Unità Paleotevere 2A Unità Paleotevere 1b Unità Paleotevere 1a	Depositi Vulcanici	PG9	Riporti antropici (RP) Alluvioni recenti (AR)	Alluvioni terrazzate (AT) Alluvioni antiche (AA) Unità Ponte Galeria Paleotevere (PGT)	
0.3			Formazione Vitinia			PG7	Sequenza Ponte Galeria		Alluvioni terrazzate (AT) Vulcaniti (VT)
0.3			Formazione Aurelia			PG6			
0.5			Formazione S. Cosimato			PG5	Sequenza Monte Mario		Unità Monte Mario (MM)
0.5			Formazione Ponte Galeria			PG4			
0.7						PG3	Unità Monte Mario (MM)		
0.7			PG2						
0.9			PG1			Unità Monte Mario (MM)			
0.9			PG0						
1.1			Pleistocene inferiore			Formazione Monte Mario	Unità Monte delle Piche		Sequenza Monte Mario
1.3	Unità Monte Ciocci								
1.5	Unità Monte Mario								
1.7									
1.9	Neogene	Pliocene	Pt. sup.	Marne Vaticane		Sequenza Vaticana	Unità Monte Vaticano (MV)		

Figura 4 - Schema stratigrafico di sintesi dell'area romana. Modificato da Milli (1997).

(Figg. 3 e 4). Otto unità litostratigrafiche informali sono state riconosciute nel sottosuolo di Roma: Unità di Monte Vaticano (MV, Pliocene), Unità di Monte Mario (MM, Pleistocene inferiore), Unità di Ponte Galeria-Paleotevere (PGT, Pleistocene medio), Unità delle Vulcaniti sabatine e albane e Unità delle Alluvioni antiche (rispettivamente VT e AA, Pleistocene medio), Unità delle Alluvioni terrazzate (AT, Pleistocene medio-superiore), Unità delle Alluvioni recenti (AR, Olocene), Unità dei Riporti antropici (RP).

Le descrizioni litologiche relative ai sondaggi e alle sezioni stratigrafiche sono state codificate dopo l'archiviazione nella banca dati utilizzando le informazioni desunte dalle correlazioni. A ogni record corrisponde un codice alfanumerico, nel quale le prime due lettere fanno riferimento all'unità stratigrafica, mentre i numeri indicano il tipo di litologia/tessitura (Fig. 5). Tramite interrogazioni scritte nel linguaggio SQL, è stato possibile estrarre le informazioni per l'analisi spa-

ziale dei diversi parametri geologici. Una prima elaborazione delle informazioni estratte dalla banca dati ha consentito di realizzare, per tutte le unità stratigrafiche riconosciute, carte preliminari degli spessori e carte delle isobate delle superfici basali. Le correlazioni e le codifiche della banca dati sono state progressivamente corrette verificando in continuo le informazioni elaborate.

Il modello geologico-stratigrafico definitivo, derivato da questa procedura iterativa di elaborazione e controllo, è coerente con l'assetto geologico definito dagli Autori precedenti (Ambrosetti & Bonadonna, 1966; Bonadonna, 1968; Funiciello, 1995; Marra & Rosa, 1995; Milli, 1997). Un'analisi attenta dei pannelli di correlazione, delle carte dei limiti inconformi tra le diverse unità stratigrafiche e delle carte di variazione degli spessori ha permesso di definire in modo dettagliato l'evoluzione tettonico-sedimentaria del sottosuolo della città di Roma negli ultimi 2 Ma, con particolare

riguardo alla Unità delle Alluvioni recenti (ultimi 18 ka).

L'evoluzione morfologica del reticolo idrografico del Tevere e dei suoi affluenti, come appare oggi, e l'architettura deposizionale del sistema fluvio-deltizio sono la conseguenza della variazione relativa del livello del mare negli ultimi 18 ka (Bellotti et al., 1994, 1995). La morfologia della discontinuità basale associata a questa variazione è stata ricostruita utilizzando la geologia di superficie e le informazioni dei sondaggi che interessano le alluvioni recenti. Questa analisi, inoltre, ha permesso di definire l'organizzazione stratigrafica e le geometrie dei corpi deposizionali. Tre intervalli stratigrafici, in particolare, sono stati distinti nei depositi alluvionali della valle del Tevere (Unità AR) tra le tratte nord e sud del Grande Raccordo Anulare (di seguito GRA), così disposti in successione stratigrafica:

1) le ghiaie basali, con un limite inferiore compreso tra -35 m slm a nord e -60 m a sud e con spessori variabili, negli stessi settori, tra 5-10 m e 20-25 m;

2) un corpo intermedio costituito da limi e argille organiche con lenti di sabbie e ghiaie, che ha spessore variabile tra 20 m a nord e 40 m a sud e che mostra una netta diminuzione granulometrica e un arricchimento in materia organica nella stessa direzione;

3) sabbie, limi e argille superiori, con spessori pressoché costanti di 20-25 m da nord a sud, che costituiscono i depositi di chiusura dell'Unità AR.

Litologia/tessitura	Codice	Associazione di litologie/tessiture
Ghiaia	AR1	Ghiaie e ghiaie sabbiose
Ghiaia con sabbia	AR1s	
Sabbia	AR2	Sabbie e sabbie limose con ghiaia
Sabbia con ghiaia	AR2g	
Sabbia con limo	AR2l	
Sabbia di origine vulcanica	AR2v	
Sabbia con torba	AR2t	
Alternanza sabbia-ghiaia	AR13	Limi e limi sabbiosi con resti organici
Limo	AR3	
Limo di origine vulcanica	AR3v	
Limo con sabbia	AR14	
Limo con torba	AR3t	Limi argillosi e argille con sabbia
Argilla	AR4	
Argilla con sabbia	AR4s	
Alternanza sabbia-argilla	AR24	Argille organiche e torbe
Argilla con torba	AR4t	
Torba	AR6	

Figura 5 - Esempio di classificazione litologico-tessiturale per l'Unità AR.

Le alluvioni recenti, come pure tutti i depositi associati alle unità più antiche, sono ricoperti da una coltre di riporti antropici (Unità RP), che ha uno spessore massimo (oltre 20 m) in corrispondenza del centro storico della città.

Elaborazione delle informazioni geotecniche

L'elaborazione del modello geologico è stata preliminare alla creazione del modello geotecnico che è basato sul riconoscimento di corpi litologicamente omogenei all'interno di ciascuna unità stratigrafica precedentemente definita. Di questi corpi omogenei vengono definiti i caratteri geometrici e i parametri geomeccanici. Il modello geotecnico così realizzato, integrato con un modello idrogeologico adeguato, costituisce un valido supporto nella fase di progettazione preliminare di piccole e grandi

opere, soprattutto in termini di programmazione della fase esecutiva delle indagini.

La modellazione geotecnica è stata avviata per tutte le unità stratigrafiche riconosciute. Questioni di opportunità, relative alla rilevanza dei fattori di rischio geologico, hanno tuttavia indirizzato prioritariamente l'attenzione verso l'Unità AR all'interno del GRA. La scelta di realizzare il modello geotecnico delle alluvioni recenti è stata anche condizionata: a) dall'assenza di deformazione tettonica; b) dall'ampia disponibilità di sondaggi, presenti in massima parte lungo l'asta fluviale del Tevere (oltre 2000 sondaggi geognostici, di cui circa 950 con informazioni geotecniche); c) dal fatto che questi terreni ospitano le fondazioni di molti edifici storici e monumenti e sono attraversati da tutte le linee della metropolitana (le Linee A e B, nonché la futura Linea C).

All'interno dei depositi alluvionali recenti sono state distinte 19 classi litologico-tessiturali che sono state raggruppate in 5 associazioni (Fig. 5): 1) ghiaie e ghiaie sabbiose, 2) sabbie e sabbie limose con ghiaia; 3) limi e limi sabbiosi con resti organici; 4) limi argillosi e argille con sabbia; 5) argille organiche e torbe. Le informazioni estratte dalla banca dati, codificate in base alle classi e alle associazioni appena definite (vedi paragrafo precedente), sono state analizzate con metodologie geostatistiche per ricostruire la variabilità spaziale dei caratteri litologico-tessiturali. L'analisi dei parametri fisico-meccanici delle alluvioni è attualmente in corso di realizzazione. Al fine di identificare una metodologia idonea alla ricostruzione spaziale delle caratteristiche geomeccaniche (in questa

fase coesione drenata e angolo di attrito drenato) è stata effettuata un'elaborazione preliminare dei dati geognostici.

I campioni analizzati per la determinazione dei parametri fisici e meccanici, nel seguito chiamati anche geomeccanici, sono oltre 950. Le determinazioni hanno interessato complessivamente 25 parametri, di cui 13 di tipo fisico e 12 di tipo meccanico. A causa della differente provenienza delle informazioni e della diversa disponibilità di parametri, le determinazioni non hanno interessato sistematicamente tutti i campioni. I parametri più rappresentati, con numeri sufficienti da consentire delle elaborazioni d'insieme, sono i 13 parametri fisici e i due più importanti parametri meccanici. I parametri fisici analizzati sono: peso per unità di volume ($PvKnM^3$), peso per unità di volume della parte solida ($PvSKnm^3$), contenuto d'acqua naturale ($WnPerc$), limite liquido ($LIperc$), limite plastico ($LpPerc$), indice plastico (IP), indice di consistenza (IC), indice di attività colloidale (A), indice dei vuoti (EO), frazioni granulometriche di ghiaia ($GhiaiaPerc$), sabbia ($SabbiaPerc$), limo ($LimoPerc$) e argilla ($ArgillaPerc$). I parametri meccanici sono l'angolo di attrito drenato da prove di taglio diretto ($PhidTd$) e coesione drenata da prove di taglio diretto ($CdKpaTd$). I campioni in cui sono disponibili le misure di tutti e 15 i parametri sono 55 (prevalentemente argillosi), mentre i campioni provvisti delle due misure meccaniche sono 328. I campioni corredati delle 13 misure fisiche sono invece 125 e il loro numero sale a 863 se le determinazioni fisiche si riducono alle quattro frazioni granulometriche.

Come si evince dall'esame degli scatterplot riportati nella Figura 6, che evi-

denziano l'andamento con la profondità dell'angolo di attrito drenato e della coesione drenata, la ricerca di possibili legami tra le 19 litologie e i 2 parametri meccanici ha portato a risultati difficilmente interpretabili, se si eccettua la diversa variabilità della coesione drenata nelle sabbie e nelle sabbie limose. Gli scatterplot riportano i valori di coesione drenata e angolo di attrito drenato, differenziati secondo 6 e non 19 litologie poiché le restanti tredici sono rappresentate in maniera frammentaria nei 328 campioni.

Molto probabilmente la mancanza di un legame evidente tra litologie e caratteristiche meccaniche è dovuta al fatto che, mentre i parametri fisico-meccanici si riferiscono a campioni di 0.5 m di lunghezza, le litologie si riferiscono a spessori generalmente variabili e dell'ordine di svariati metri.

Anche la variazione sistematica dei parametri geomeccanici con la profondità sembra, a un primo esame, esclusa: solo l'angolo d'attrito drenato, limitatamente alle litologie del gruppo dei limi argillosi e argille, mostra di avere un limite massimo di 30 gradi dopo i 20 m di profondità. Questo aspetto e la differenza di comportamento dell'angolo d'attrito drenato per le sabbie e sabbie limose saranno oggetto di approfondimento.

Con l'intento di sfruttare le informazioni disponibili per la ricostruzione dei parametri meccanici, si è passati allo studio del legame statistico tra questi e i parametri fisici. Si è cominciato con un'Analisi in Componenti Principali (ACP) con-

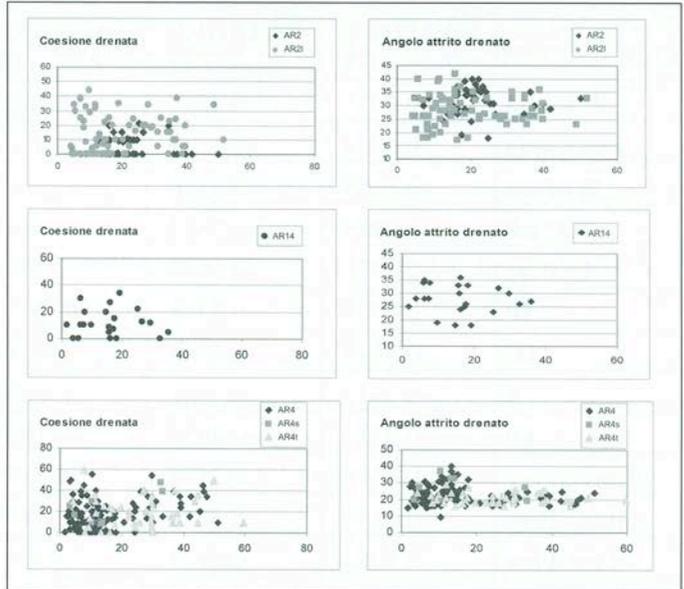


Figura 6 - Scatterplot profondità/coesione drenata (colonna a sinistra) e profondità/angolo di attrito drenato (colonna a destra)

siderando come variabili attive i 13 parametri fisici e come supplementari quelli meccanici. Per tale motivo sono stati utilizzati i 55 campioni provvisti di informazione completa.

Per effetto della ridondanza delle informazioni, dovuta alle correlazioni esistenti tra le variabili, si è ottenuto che i primi 5 fattori dell'Analisi spiegano oltre l'85% dell'intera variabilità. Il loro significato rispetto alle variabili può essere dedotto dalla Tabella 1 che riporta i coefficienti di correlazione tra le variabili (attive e supplementari) e i primi 5 fattori.

Il Fattore 1, che spiega il 29.15% della variabilità totale, è dominato da 3 parametri fortemente correlati tra di loro: il contenuto in acqua, l'indice dei vuoti e il peso per unità di volume. Il fattore è debolmente correlato sia con l'angolo d'attrito drenato sia con la coesione drenata.

Il Fattore 2, che spiega il 24.53% della variabilità totale, è dominato dal contenuto di argilla, dal limite liquido e dal-

	FATTORE 1	FATTORE 2	FATTORE 3	FATTORE 4	FATTORE 5
PvKnm3	0.8337	0.4020	0.1285	0.0028	-0.1077
PvSKnm3	0.3904	-0.1549	-0.4364	0.4246	0.0697
WnPerc	-0.9098	-0.3516	0.0313	-0.0346	0.0644
LIPerc	-0.0418	-0.7822	0.5393	0.1761	-0.1146
LpPerc	-0.4872	-0.0909	0.3795	0.7460	-0.0538
IP	0.3386	-0.7368	0.2619	-0.4033	-0.0753
IC	0.7434	-0.0758	0.4041	0.4206	-0.1087
A	-0.2627	0.3252	0.6070	-0.3992	-0.1968
E0	-0.8723	-0.4053	-0.1063	0.0393	0.1510
GhiaiaPerc	-0.3506	0.2591	0.1423	0.0354	-0.7424
Sabbia Perc	-0.3595	0.5229	-0.4495	0.0997	-0.3071
LimoPerc	-0.1087	0.6124	0.5597	0.0249	0.4703
ArgillaPerc	0.3385	-0.8520	-0.2191	-0.0727	-0.1274
PhidTd	-0.1605	0.7413	-0.1444	0.0150	-0.2178
CdKpaTd	0.2482	-0.3147	-0.1864	0.5211	-0.0576

Tabella 1

l'indice plastico. Gli ultimi due parametri sono ben correlati tra di loro (correlazione 0.70) e mediamente correlati con il primo, con correlazioni rispettivamente 0.48 e 0.63. Questo fattore è ben correlato con l'angolo d'attrito drenato (correlazione 0.74).

Il Fattore 3, che spiega il 14.14 % della variabilità totale, non sembra dominato da particolari grandezze fisiche e risulta mediamente correlato con il contenuto di sabbia e il peso della parte solida, in contrapposizione con il contenuto in limo, indice di attività colloidale e il limite liquido. Il fattore è scarsamente correlato sia con l'angolo d'attrito drenato sia con la coesione drenata.

I Fattori 4 e 5, che spiegano il 9.90 % e il 7.70 % della variabilità totale, sono ben correlati rispettivamente al limite plastico e al contenuto di ghiaia. Il pri-

mo risulta mediamente correlato alla coesione drenata (correlazione 0.52), mentre il secondo è debolmente correlato con l'angolo d'attrito drenato (correlazione 0.22).

La proiezione delle variabili attive e supplementari nel piano dei primi due fattori è mostrata nella Figura 7. Si osservi, dalla posizione del punto in Figura 7, che l'angolo d'attrito drenato è fortemente correlato con il Fattore 2, mentre la coesione drenata è debolmente correlata con il Fattore 1 (0.25) e il Fattore 2 (-0.31)

In conclusione, dall'ACP si deduce che mentre l'angolo d'attrito drenato è fortemente condizionato dai Fattori 2 e 5, per conto del contenuto di argilla e di ghiaia agenti in maniera inversa, la coesione drenata è mediamente influenzata dai Fattori 1, 2, 3 e 4, per conto di tutti

i parametri, ad eccezione di peso per unità di volume, indice dei vuoti e contenuto di sabbia.

Da questa analisi appare chiaro che la ricostruzione spaziale delle caratteristiche meccaniche può trarre vantaggio dalla conoscenza dei parametri fisici (considerati come variabili ausiliarie), in maggior misura per l'angolo d'attrito drenato e meno per la coesione drenata. I metodi per effettuare questo tipo di stima sono la tradizionale regressione lineare multipla e, più efficacemente, il cokriging. La regressione lineare multipla consiste nell'interpolare un iper-piano dei minimi quadrati tra la variabile di interesse e tutte le altre e, quindi, di dedurre, a partire dal piano interpolato, i valori della variabile di interesse nei punti in cui non sono noti. Il metodo non tiene però conto delle correlazioni spaziali, considerate invece dal cokriging. Questo stimatore, infatti, sfrutta le correlazioni spaziali tra la variabile di interesse e le variabili ausiliarie per confezionare lo stimatore lineare più efficace tra quelli corretti.

Al fine di evidenziare le prestazioni dei due stimatori, sono stati stimati con entrambi i metodi i 55 valori dell'angolo d'attrito drenato nei punti di prelievo dei rispettivi campioni e quindi i valori ottenuti sono stati confrontati con i valori misurati. Questa operazione è di solito nota come cross-validazione.

Per una più facile operatività, nel cokriging le variabili ausiliarie sono state coinvolte non direttamente, ma attraverso i primi 5 fattori dell'ACP.

Ancora, per mettere in evidenza l'apporto delle variabili ausiliarie, le stime sono state effettuate anche con il kriging che, come è noto, tiene conto della correlazione spaziale della sola variabile di interesse.

I risultati della cross-validazione, sia attraverso l'istogramma degli errori sia attraverso gli scatterplot tra misure e stime, sono mostrati rispettivamente nelle figure 8 e 9.

In aggiunta, nella Tabella 2 sono riportate le statistiche della cross-validazione consistenti in: deviazione standard degli errori di cross-validazione, correlazione misure/stime, pendenza della retta di regressione misure/stime.

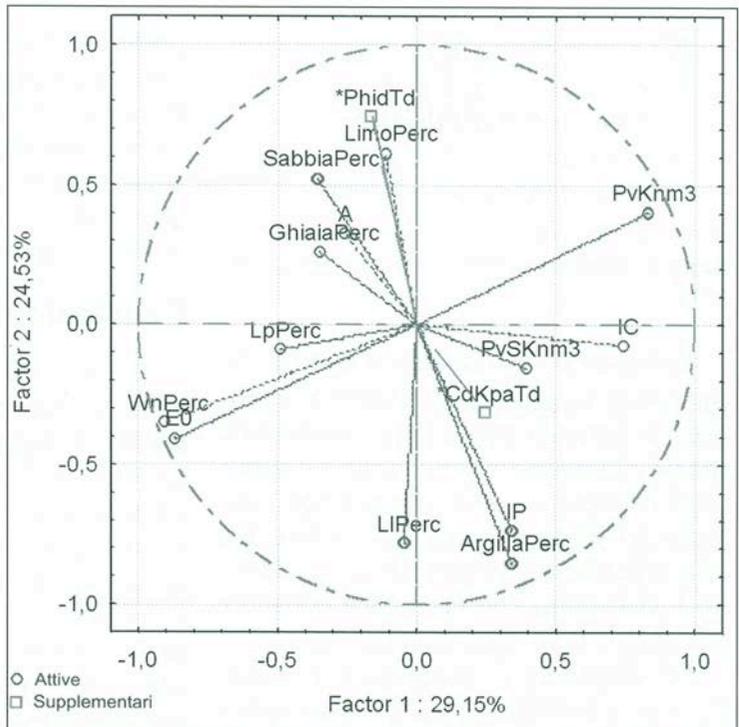


Figura 7 - Analisi in Componenti Principali: cerchio di correlazione.

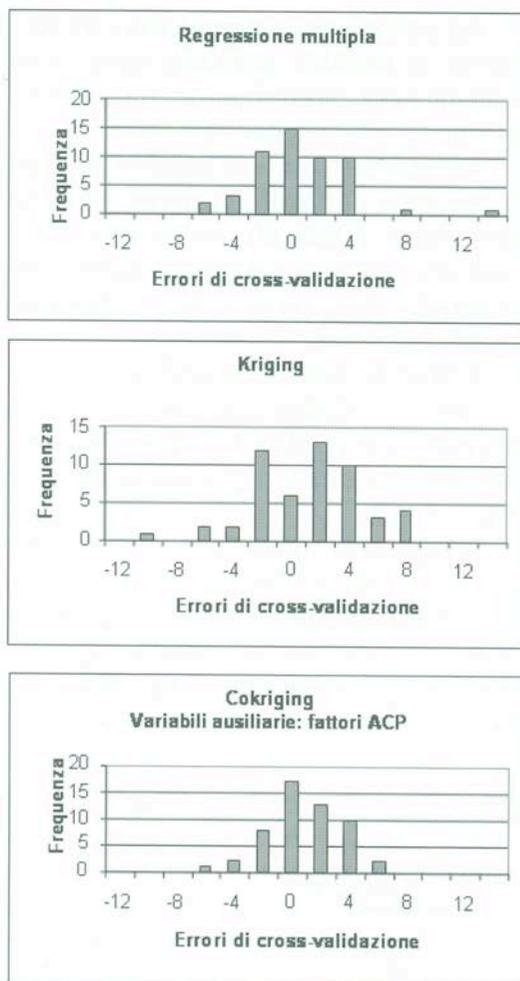


Figura 8. Istogrammi degli errori di cross-validazione.

Dall'esame dei risultati si evince che con l'apporto delle variabili ausiliarie, anche non tenendo conto delle correlazioni spaziali (regressione multipla), si ottengono risultati più validi che non con l'apporto dell'elemento spaziale limitato alla sola variabile di interesse (kriging). Mentre il cokriging, che considera entrambi gli aspetti, fornisce i risultati migliori.

Per effettuare il cokriging nelle modalità sopra esposte, che coinvolge tutti i parametri fisici nella stima attraverso i

primi 5 fattori, sono sfruttabili solo 125 dei 950 campioni disponibili. Coinvolgendo invece tutte le variabili si sfrutta la totalità dell'informazione disponibile. Bisogna però aggiustare un modello di correlazione con 14 variabili contro le 6, una di interesse e 5 ausiliarie, del cokriging sperimentato. La difficoltà operativa è però compensata dalla maggiore quantità di informazione utilizzata. Una soluzione intermedia potrebbe essere quella di considerare come variabili ausiliarie solo le quattro frazioni granulometriche. I campioni utilizzabili sarebbero in questo caso 863 (il 10% in meno) e le variabili in gioco nel cokriging sarebbero appena 5. In questo caso occorrerà valutare la diminuzione di accuratezza che, in base a quanto detto, non dovrebbe interessare l'angolo di attrito drenato, ma solo la coesione drenata.

A conclusione dell'analisi spaziale dei parametri fisico-meccanici, i risultati saranno utilizzati per la caratterizzazione dei volumi omogenei dal punto di vista litologico-tessiturale e per la definizione delle unità litotecniche delle alluvioni recenti (AR) e, in una fase successiva, delle altre unità stratigrafiche.

Conclusioni

È stato realizzato un modello geologico dei terreni della città di Roma ed è in corso di realizzazione la modellazione geotecnica. Il primo passo del progetto è stato la creazione di un sistema informativo geografico contenente la banca dati geologico-geotecnica nella quale sono archiviate le informazioni stratigrafiche del sottosuolo e i dati litologici, geotecnici e idrogeologici. Al momento sono presenti 8004 sondaggi, con oltre 35000 record relativi alla stratigrafia e circa

12000 riferiti alle informazioni di tipo geotecnico.

Per realizzare il modello geologico sono stati selezionati dalla banca dati oltre 2000 sondaggi geognostici e sezioni stratigrafiche di campagna. I dati di superficie e di sottosuolo sono stati interpretati e correlati. Oltre 90 pannelli di correlazione sono stati realizzati utilizzando un nuovo schema litostratigrafico in cui sono definite le unità stratigrafiche informali.

L'elaborazione del modello geologico è stata preliminare all'avvio della creazione del modello geotecnico. La modellazione geotecnica è stata avviata per tutte le unità stratigrafiche attraverso il riconoscimento di corpi omogenei per caratteri fisici e geomeccanici.

Questioni di opportunità relative ai fattori di rischio geologico, tuttavia, hanno indirizzato l'attenzione verso l'Unità AR all'interno del GRA. Le informazioni estratte dalla banca dati, codificate in base alla classificazione litologico-tessiturale, sono state analizzate con metodologie geostatistiche per ricostruire la variabilità spaziale dei caratteri litologici. Parallelamente è stata avviata l'analisi geostatistica dei parametri geomeccanici che ha permesso di valutare il cokriging come migliore metodo di stima dei parametri stessi in aree prive di informazione.

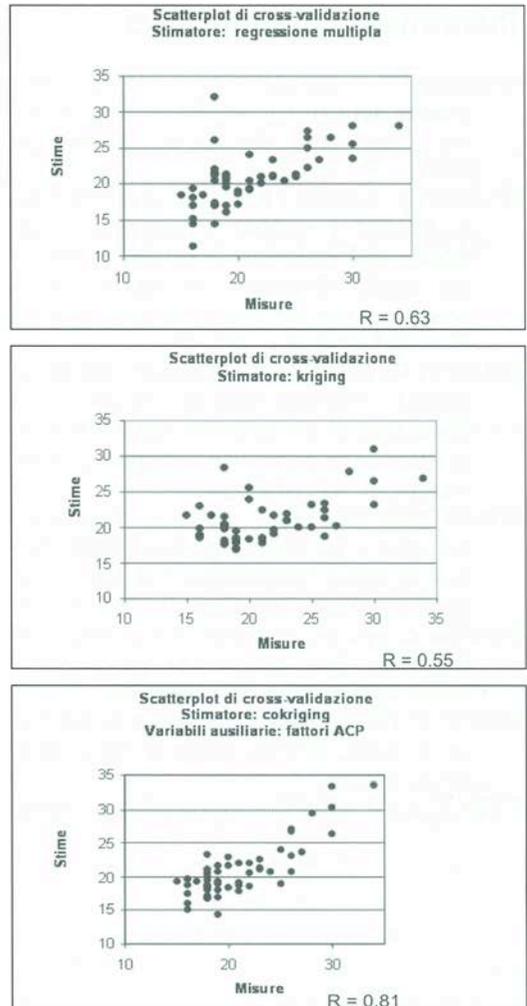


Figura 9. Scatterplot misure/stime.

STATISTICHE	STIMATORE		
	Regressione multipla	Kriging	Cokriging Variabili aus: fattori ACP
Deviazione standard errori stima	3.51	3.71	2.53
Correlazione stime/misure	0.64	0.55	0.82
Pendenza retta regressione stime/misure	0.72	0.79	0.88

Tabella 2

A conclusione dell'analisi spaziale dei parametri fisico-meccanici, i risultati saranno utilizzati per la caratterizzazione dei corpi geologici e per la definizione delle unità litotecniche delle alluvioni recenti (AR) e, in una fase successiva, delle altre unità stratigrafiche.

Riferimenti bibliografici

- AMBROSETTI P., BONADONNA F.P.(1966) - Revisione dei dati sul Plio-Pleistocene di Roma. - *Atti Accad. Gioenia di Sci. Nat.*, 18, 33-72.
- BELLOTTI P., CHIOCCI F.L., MILLI S., TORTORA P., VALERI P. (1994) - Sequence stratigraphy and depositional setting of the Tiber delta: integration of high-resolution seismics, well logs and archeological data. *Jour. Sed. Res.*, 64, 416-432.
- BELLOTTI P., MILLI S., TORTORA P., VALERI P. (1995) - Physical stratigraphy and sedimentology of the Late Pleistocene-Holocene Tiber delta depositional sequence. *Sedimentology*, 42, 617-634.
- BONADONNA F.P. (1968) - Studi sul Pleistocene del Lazio V. La biostratigrafia di Monte Mario e la "fauna malacologica mariana" di Cerrulli Irelli. *Mem. Soc. Geol. It.*, 7, 261-321.
- CONATO V., ESU D., MALATESTA A., ZARLENGA F. (1980) - New data on the Pleistocene of Rome. *Quaternaria*, 22, 131-176.
- DATE C. J. (1995) - *An introduction to database systems*, 6th Ed. Wiley & Sons, Reading, 840 pp.
- FUNICIELLO R. (1995) - "La geologia di Roma. Il centro storico di Roma". Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia, Volume 50, 550 pp.
- MARRA F, ROSA C. (1995) - Stratigrafia e aspetto geologico dell'area romana. In R. Funicello (Ed.) 1995, "La geologia di Roma. Il centro storico di Roma". Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia, 50, 49-118.
- MILLI S. (1997) - Depositional settings and high-frequency sequence stratigraphy of the middle-upper pleistocene to Holocene deposits of the Roman basin. - *Geologica Romana*, 33, 99-136.
- VENTRIGLIA U. (2002) - *Geologia del territorio del Comune di Roma*. Amministrazione Provinciale di Roma, Roma. Volume e tavole fuori testo.

Ringraziamenti

Gli Autori ringraziano la Sig.ra Luciana Angeloni e la Sig.ra Donatella Lori per il supporto amministrativo, il Sig. Marco Albano per il supporto cartografico, la Sig.ra Silvia Severi per quello tecnico. Si ringraziano, inoltre, l'APAT, il Comune di Roma, MetroRoma, Geoplanning, S.G.S. Studio Geotecnico Strutturale, S.I.G. Studio Indagini Geotecniche, IGES s.n.c., per i dati forniti.