

**DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DELLA TERRA**

*Università degli Studi di Firenze*



**STEFANO MORELLI**

**“APPLICAZIONE DI TECNICHE DI MAPPATURA  
AD ALTA RISOLUZIONE DEGLI ALVEI FLUVIALI”**

**settore scientifico disciplinare: GEO-04**

**Tutore:** Prof. Filippo Catani

**Coordinatore:** Prof. Federico Sani

**XXII CICLO**

Firenze, 31 Dicembre 2009



## RINGRAZIAMENTI

L'autore desidera innanzitutto ringraziare il Prof. Filippo Catani, tutore di questa tesi, per il prezioso supporto scientifico durante i tre anni di dottorato.

Un particolare ringraziamento va al Dott. Samuele Segoni e alla Dott.ssa Minja Kukavicic, con i quali sono state condivise gran parte delle difficoltà legate ai rilievi di campagna e alla sistemazione dei dati. A questo si aggiunge uno speciale riconoscimento al Dott. Alessandro Battistini per il supporto tecnico nell'applicazione dei dati al rischio idraulico, al Dott. Goffredo Manzo per l'aiuto nelle misurazioni topografiche ed infine al Dott. Alessandro Camorani per la contributo fornito nella realizzazione dell'analisi di stabilità arginale.

La fase della ricerca riguardante i numerosi rilievi è stata svolta in collaborazione con il personale del *servizio geologico e progetti di difesa idrogeologica* e della *Direzione Difesa del Suolo e Protezione Civile* della Provincia di Firenze. In particolare è opportuno menzionare il Dott. Leonardo Ermini, che ha messo a disposizione tutte le proprie competenze, affinché il lavoro avesse una completezza di significato ed una continuità spaziale.

Si ringrazia inoltre tutti coloro che a vario titolo hanno sostenuto ed incoraggiato il presente lavoro, specialmente Maria Grazia per l'enorme pazienza dimostrata nei mesi conclusivi del dottorato.





## Tavola dei contenuti

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>1</b>
1.1	INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2	OBIETTIVI DELLA RICERCA .....	3
1.3	STRUTTURA DELLA TESI .....	4
<b>2</b>	<b>IL BACINO DELL'ARNO .....</b>	<b>6</b>
2.1	INQUADRAMENTO GENERALE.....	6
2.2	INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO .....	7
2.3	INQUADRAMENTO GEOLOGICO .....	11
2.4	CARATTERIZZAZIONE DELL'ARNO .....	13
<b>3</b>	<b>AREA DI STUDIO .....</b>	<b>20</b>
3.1	INQUADRAMENTO GENERALE.....	20
3.2	DESCRIZIONE GEOMORFOLOGICA DELL'ARNO .....	21
3.3	DESCRIZIONE GEOMORFOLOGICA DEGLI AFFLUENTI DELL'ARNO .....	24
<b>4</b>	<b>MAPPATURA DI DETTAGLIO .....</b>	<b>32</b>
4.1	INTRODUZIONE.....	32
4.1.1	<i>INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA.....</i>	<i>32</i>
4.1.2	<i>INDIVIDUAZIONE DELLE METODOLOGIE: TEST DI PROVA .....</i>	<i>32</i>
4.2	COMPOSIZIONE DEL SISTEMA GPS.....	37
4.2.1	<i>SPACE SEGMENT: I SATELLITI .....</i>	<i>37</i>
4.2.2	<i>CONTROL SEGMENT: STAZIONI DI MONITORAGGIO.....</i>	<i>38</i>
4.2.3	<i>USER SEGMENT: RICEVENTI GPS.....</i>	<i>40</i>
4.3	DETERMINAZIONE DELLA POSIZIONE .....	41
4.4	PROCEDURE OPERATIVE DI RILEVAMENTO.....	45
4.5	PRINCIPALI PROCEDURE OPERATIVE DI RILEVAMENTO CINEMATICO.....	48
4.6	STRUMENTAZIONE UTILIZZATA .....	50

4.7	IL RILIEVO.....	53
4.8	RISOLUZIONI DEI PROBLEMI LEGATI AL RILIEVO.....	57
<b>5</b>	<b>ELABORAZIONE E SINTESI DEI DATI.....</b>	<b>60</b>
5.1	PREDISPOSIZIONE ED ORGANIZZAZIONE DEGLI ELEMENTI MAPPATI.....	60
5.2	LA CORREZIONE DELLE QUOTE: DA ELLISSOIDE A GEOIDE LOCALE.....	65
5.2.1	<i>INQUADRAMENTO DELLA PROBLEMATICATA</i> .....	65
5.2.2	<i>APPLICAZIONE DEL GEOIDE NAZIONALE ITALGEO99 E ITALGEO2005</i> .....	67
5.2.3	<i>CAMPAGNA DI CONTROLLO</i> .....	67
5.2.4	<i>CREAZIONE DI UN GEOIDE LOCALE</i> .....	69
5.2.5	<i>CONCLUSIONI</i> .....	70
5.3	SINTESI DELLE OPERE DI IMPORTANZA IDRAULICA CLASSIFICATE LUNGO L'ARNO .....	71
5.4	SINTESI DELLE OPERE DI IMPORTANZA IDRAULICA CLASSIFICATE LUNGO GLI AFFLUENTI .....	86
5.5	STATO DI CONSERVAZIONE DELLE OPERE DI IMPORTANZA IDRAULICA CLASSIFICATE LUNGO L'ARNO.....	112
5.6	STATO DI CONSERVAZIONE DELLE OPERE DI IMPORTANZA IDRAULICA CLASSIFICATE LUNGO GLI AFFLUENTI.....	120
5.7	APPROFONDIMENTO DI INDAGINE RELATIVO ALLE OPERE IDRAULICHE TRASVERSALI ALL'ARNO IN FUNZIONE DI UN POSSIBILE RECUPERO .....	123
5.7.1	<i>TERMINOLOGIA</i> .....	123
5.7.2	<i>IL SIGNIFICATO DELLE PESCAIE/TRVERSE</i> .....	124
5.7.3	<i>ANALISI DELLE PESCAIE/TRVERSE</i> .....	125
5.7.4	<i>NOTAZIONI CONCLUSIVE</i> .....	127
5.7.4.1	CRITERI PER L'ASSEGNAZIONE DEL PUNTEGGIO .....	130
5.7.4.2	CONSIDERAZIONI RELATIVE AL RECUPERO DELLE PESCAIE.....	133
5.7.4.3	CONSIDERAZIONI RELATIVE AL RECUPERO DELLE TRAVERSE.....	134
<b>6</b>	<b>APPLICAZIONE DEI DATI AL RISCHIO IDRAULICO .....</b>	<b>137</b>
6.1	PERIMETRAZIONE DELLE AREE ARGINALI A RISCHIO TRACIMAZIONE .....	137
6.1.1	<i>INTRODUZIONE</i> .....	137

6.1.2	<i>ANALISI DELLA SITUAZIONE ATTUALE</i> .....	139
6.1.3	<i>ANALISI DEL FRANCO DI SICUREZZA</i> .....	153
6.2	<b>MODELLO DEI FLUSSI IDRICI SUPERFICIALI NELL'AGGLOMERATO URBANO FIORENTINO</b> .....	157
6.2.1	<i>INTRODUZIONE</i> .....	157
6.2.2	<i>ANALISI IN AMBIENTE GIS</i> .....	158
6.2.3	<i>FLUSSI IDRICI IN CONDIZIONI DI NORMALE SCORRIMENTO DELL'ARNO</i> .....	160
6.2.4	<i>FLUSSI IDRICI IN CASO DI SBARRAMENTO DEI PONTI DELL'ARNO</i> .....	164
6.2.5	<i>FLUSSI IDRICI IN CASO DI FUORIUSCITA INDIFFERENZIATA DELL'ARNO</i> .....	167
6.2.6	<i>CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE</i> .....	170
6.3	<b>INTEGRAZIONE DELLE CRITICITÀ RILEVATE AI MODELLI PROPOSTI</b> .....	171
<b>7</b>	<b>APPLICAZIONE DEI DATI ALLA VERIFICA DI STABILITÀ ARGINALE</b> .....	<b>175</b>
7.1	<b>INTRODUZIONE</b> .....	175
7.2	<b>CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEGLI ARGINI</b> .....	177
7.2.1	<i>ANALISI GRANULOMETRICA</i> .....	179
7.2.2	<i>ANALISI DEI RAPPORTI TRA LE FASI E LIMITI DI ATTERBERG</i> .....	180
7.2.3	<i>DETERMINAZIONE DELLE MISURE TENSIOMETRICHE</i> .....	181
7.2.3.1	<i>LA SUZIONE</i> .....	182
7.2.3.2	<i>DESCRIZIONE DELLO STRUMENTO E DELLA PROVA</i> .....	182
7.2.3.3	<i>ANALISI DEI RISULTATI</i> .....	183
7.2.4	<i>BOREHOLE SHEAR TEST</i> .....	184
7.2.4.1	<i>DESCRIZIONE DELLO STRUMENTO</i> .....	185
7.2.4.2	<i>DESCRIZIONE DELLA PROVA</i> .....	186
7.2.4.3	<i>CRITERIO PER L'INTERPRETAZIONE DELLA PROVA</i> .....	187
7.2.4.4	<i>ANALISI DEI RISULTATI</i> .....	188
7.2.5	<i>AMOOZEMETER TEST</i> .....	189
7.2.5.1	<i>DESCRIZIONE DELLO STRUMENTO</i> .....	189
7.2.5.2	<i>DESCRIZIONE DELLA PROVA</i> .....	191
7.2.5.3	<i>ANALISI DEI RISULTATI</i> .....	193
7.2.6	<i>SINTESI DEI RISULTATI</i> .....	193
7.3	<b>ANALISI DI STABILITÀ</b> .....	194

7.3.1	MODELLO DI DISTRIBUZIONE DELLE PRESSIONI INTERSTIZIALI.....	194
7.3.1.1	GEOMETRIA DEL PROBLEMA.....	195
7.3.1.2	PROPRIETÀ DEL MATERIALE .....	195
7.3.1.3	CONDIZIONI AL CONTORNO.....	196
7.3.2	MODELLO PER LA STABILITÀ DEGLI ARGINI .....	197
7.3.2.1	GEOMETRIA DEL PROBLEMA.....	197
7.3.2.2	SUPERFICIE DI SCIVOLAMENTO.....	198
7.3.2.3	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI MATERIALI.....	198
7.3.2.4	SOLUZIONE DEL PROBLEMA.....	200
7.4	RISULTATI DELL'ANALISI .....	201
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>206</b>
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>215</b>
<b>10</b>	<b>ALLEGATI .....</b>	<b>223</b>

# 1 INTRODUZIONE

## 1.1 INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA

In Italia, e più in particolare in Toscana, alla naturale dinamica evolutiva dell'ambiente fluviale vanno associati quasi sempre gli effetti dell'antropizzazione che ha agito per secoli ed ha interessato, in diversa misura, tutti i fiumi più importanti, tanto che oggi risulta difficile trovare un corso d'acqua che non risenta dell'azione dall'uomo (Rinaldi, 1995). Tra gli interventi condotti in passato direttamente in alveo, i più importanti sono stati le arginature, le canalizzazioni e lo sfruttamento di materiali inerti, intensificatosi quest'ultimo a partire dal dopoguerra. Tutto ciò ha comportato l'innescò di una fase di abbassamento del fondo di molti fiumi toscani, tra cui l'Arno e la Sieve (Rinaldi & Rodolfi, 1993; Tacconi *et al.*, 1994; Agnelli *et al.*, 1998) e un conseguente aumento dell'instabilità delle sponde a causa della loro maggior altezza e pendenza media (Dapporto, 2003).

Oggi dunque, se l'arretramento risulta eccessivamente dannoso per le attività umane, diventa fondamentale intervenire con strategie adeguate di mitigazione, che si fondino sulla comprensione dei processi e dei meccanismi in atto sulla sponda. Inoltre lungo le fasce perifluviali delle aree di pianura, che negli ultimi decenni hanno sopportato la maggiore evoluzione in termini di crescita urbanistica e cambiamento dell'uso del suolo, si avverte la necessità di ridurre al minimo l'esondabilità degli eventi di piena per tutelare i territori adiacenti e tutto quello che di nuovo viene realizzato. Dunque considerando la rapidità con cui è cambiato il volto dei territori attraversati dai corsi d'acqua del bacino dell'Arno (Fig 1.1, 1.2, 1.3, 1.4) e della necessità di evolversi ancora, oggi è quanto mai necessario trovare un modo con cui aggiornare rapidamente e con grande dettaglio la collocazione spaziale dei principali elementi naturali ed antropici di ampie aree di pertinenza fluviale, sintetizzandone anche il loro stato di conservazione, l'alterazione della propria funzionalità ed eventuali caratteristiche strutturali; tutto ciò nell'ottica di conseguire un reale e completo scenario di pericolosità idraulica e di vulnerabilità sia per eventi di piena eccezionale che per situazioni di ordinaria dinamica d'alveo.

Attualmente lo studio della geomorfologia fluviale finalizzato a caratterizzare nel dettaglio il quadro globale delle aree di pertinenza e a prevederne le possibili dinamiche evolutive necessita di riscontri quantitativi che sono reperibili soltanto tramite sopralluogo diretto (Nardi *et al.*, 2008). Tuttavia le nuove tecnologie a disposizione hanno velocizzato nettamente

l'operatività sul campo, permettendo di coprire estesi settori in tempi tutto sommato abbastanza contenuti (Zuccalà *et al.*, 2005).



Fig. 1.1. Foto Badia a Settimo (Scandicci) nel 1954



Fig. 1.2. Foto Badia a Settimo (Scandicci) nel 1996



Fig. 1.3. Foto Badia a Settimo (Scandicci) nel 2004

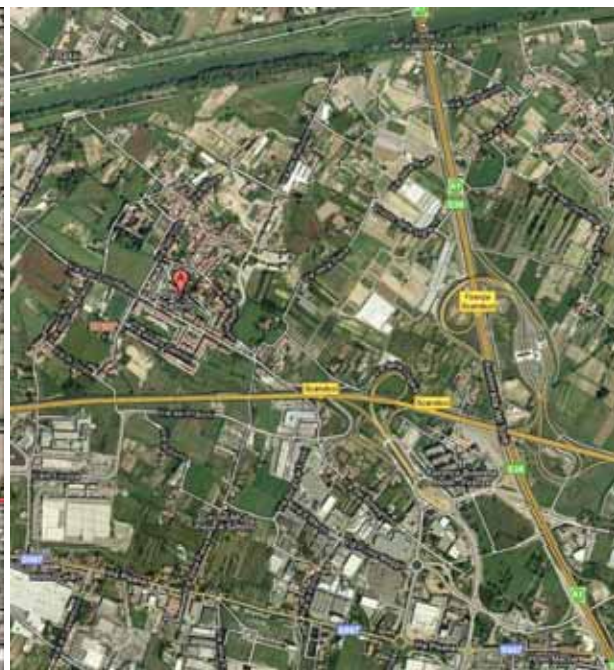


Fig. 1.4. Foto Badia a Settimo (Scandicci) nel 2009 (Google©)

La necessità di agire direttamente nelle aree di interesse, se pur supportati da strumentazioni sempre più sofisticate, nasce dal complesso rapporto che si è instaurato nel tempo tra le opere di origine antropiche e gli elementi naturali. Di fatto gli interventi di rilevanza fluviale si sono diversificati nel tempo ed integrati in maniera diversa con le varie componenti del territorio e

ciò si è verificato poiché si è assistito ad un evidente mutamento della sensibilità progettuale, ad un approfondimento della cultura ambientale e alla nascita di un approccio interdisciplinare alle problematiche idrauliche. Tutti questi nuovi criteri hanno portato alla realizzazione di opere sicuramente meno impattanti rispetto a quelle tradizionali dagli effetti ormai noti in condizioni normali, ma talvolta imprevedibili in caso di alterazione delle condizioni al contorno. In questo caso soltanto un operatore esperto può valutare sul campo le situazioni contingenti facendo uso di un approccio multidisciplinare ed integrato (Zolin, 2005).

## 1.2 OBIETTIVI DELLA RICERCA

La ricerca ha come obiettivo generale l'acquisizione di una base conoscitiva di estremo dettaglio degli elementi antropici e naturali che caratterizzano le fasce perfluviali di un tratto abbastanza esteso dell'Arno ed alcuni suoi affluenti da applicare poi alla comprensione della sicurezza idraulica.

Gli obiettivi, distinti secondo le varie fasi di lavoro, sono:

- a) definizione dello stato dell'arte in materia di strumentazioni relative alla raccolta dati topografici per le applicazioni di idraulica fluviale
- b) Sviluppo di rapide ed accurate metodologie operative per la mappatura di dettaglio delle aste fluviali
- c) Attuazione di tali metodologie all'Arno e alcuni significativi affluenti nella Provincia di Firenze (Mugnone, Terzolle, Vingone, Greve, Bisenzio, Marina e Ombrone)
- d) Implementazione di un "database Geografico" appropriato per una rapida ed aggiornata gestione del Rischio idrogeologico
- e) Sintesi organica degli elementi individuati in relazione al livello di criticità riscontrato.
- f) Applicazione dei dati alla valutazione di pericolosità nella aree arginate con particolare attenzione per il centro cittadino di Firenze
- g) Applicazione dei dati alla valutazioni di stabilità arginale

Il lavoro è stato eseguito seguendo un approccio multidisciplinare che ha visto l'uso di tecniche relative alla Geomorfologia Classica ed Applicata, la Geologia Tecnica, la Geologia Applicata, la Topografia ed in parte l'Idraulica Fluviale. Il perseguimento di tutti gli obiettivi è stato realizzato grazie anche alle varie conoscenze messe a disposizione dagli enti gestori del

rischio idraulico per i settori presi in considerazione (Autorità di Bacino, Provincia e Comune di Firenze)

### 1.3 STRUTTURA DELLA TESI

Nella prima parte della tesi viene effettuato un dettagliato inquadramento relativo all'area di studio e alle sue principali problematiche. Segue un resoconto dettagliato sulle metodologie adottate per la caratterizzazione geomorfologica e morfometrica delle fasce perifluviali oggetto di studio. Nella fase successiva l'attenzione si sposta invece sulla fase di elaborazione dati e sintesi degli elementi mappati. Infine vengono mostrate due possibili applicazioni dei dati acquisiti in relazione alla sicurezza delle aree contermini ai corsi d'acqua analizzati.

L'argomentazione della tesi è stata quindi organizzata secondo i seguenti capitoli:

**Capitolo 2. Il bacino dell'Arno:** Questo capitolo contiene l'inquadramento geografico, geomorfologico e geologico del bacino del fiume Arno. Di seguito viene riportata una sintetica descrizione dell'asta fluviale dell'Arno relativa alla sua dinamica fluviale e agli interventi principali di regimazione che sono stati realizzati nel tempo.

**Capitolo 3. Area di studio.** In questo capitolo viene presentata la caratterizzazione geomorfologica dell'area di studio, comprendente il corso dell'Arno nel Valdarno Medio e nel tratto terminale del Valdarno superiore (limite geografico torrente Vacchereccia) ed i tratti finali dei suoi affluenti che sono caratterizzati da almeno un tratto classificato in seconda categoria

**Capitolo 4. Caratterizzazione geomorfologica e morfometrica di dettaglio.** Questo capitolo contiene la descrizione della strumentazione impiegata per la mappatura di dettaglio preceduta da una breve introduzione sui test di prova effettuati per la scelta della apparecchiatura più idonea. Segue la sintesi delle procedure operative impiegate con la strumentazione in nostro possesso e la descrizione delle caratteristiche del rilievo.

**Capitolo 5. Elaborazione e sintesi dei dati.** In questo capitolo viene affrontata tutta la fase di elaborazione dati dal momento in cui essi vengono generati dalla strumentazione fino all'inserimento in ambiente GIS e alla risistemazione finale. Tra i vari passaggi effettuati vi è quello della correzione delle quote attraverso l'applicazione di un geoide locale, appositamente



definito, ai punti misurati. Infine viene fatta una sintesi degli elementi naturali ed antropici mappati, compreso l'approfondimento relativo alle opere idrauliche trasversali all'Arno.

**Capitolo 6. Applicazione dei dati al rischio idraulico.** In questo capitolo vengono presentati e discussi i risultati delle applicazioni delle quote arginali misurate ai modelli di piena previsti per l'Arno con tempi di ritorno differenti. Infine alcune considerazioni sulla morfologia urbana della città di Firenze e le criticità riscontrate nella prima parte mostrano il rischio idraulico nel centro storico della città.

**Capitolo 7. Applicazione dei dati alla analisi di stabilità arginale.** Questo capitolo comprende la verifica di stabilità effettuata con metodi speditivi sul rilevato arginale di Restone (Figline Valdarno). Attraverso indagini di laboratorio, misurazioni di campagna e modellazioni numeriche, si intende contribuire ad una valutazione più accurata del rischio idraulico nelle aree dotate di protezione arginale.

**Capitolo 8.** In questo capitolo vengono riassunte le conclusioni del lavoro di ricerca svolto evidenziando sia i risultati raggiunti che le problematiche aperte.

## 2 IL BACINO DELL'ARNO

### 2.1 INQUADRAMENTO GENERALE

Attualmente il *bacino del fiume Arno* (Fig. 2.1) comprende, per gli effetti della legge 183/89, il bacino idrografico in senso stretto con l'aggiunta di una fascia di territorio compresa tra lo Scolmatore, a Sud, ed il Fiume Morto, a Nord, inclusa l'area di bonifica di Coltano-Stagno ed il bacino del torrente Tora che oggi confluisce nello Scolmatore. Il territorio del bacino così descritto interessa la Regione Toscana per il 98% circa e la Regione Umbria per il 2% circa, comprendendo le province di Arezzo, Firenze, Pistoia, Pisa e, marginalmente, Siena, Lucca, Livorno e Perugia (ADB Arno 2002, Ravazzani, 2004). Il deflusso medio annuo delle portate dell'Arno misurato alla stazione di misura di S. Giovanni alla Vena è di circa 110 m<sup>3</sup>/s. Tale stazione si trova a circa 37 km dalla foce nel punto in cui il fiume non riceve più nessun affluente (<http://www.adbarno.it>).

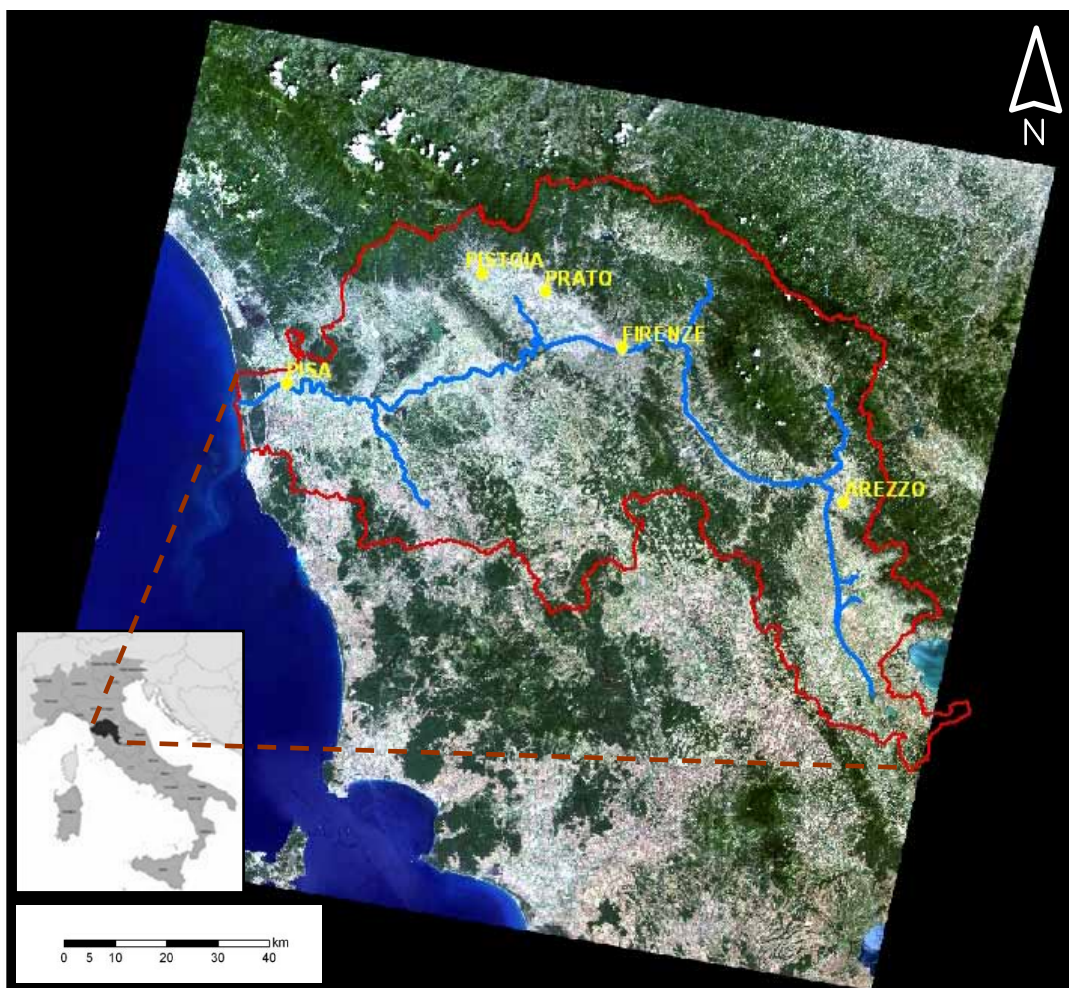


Fig. 2.1 - Immagine da satellite Landsat ETM del 26 Giugno 2000 path/row 192/29 floating. Composizione a colori veri delle bande del visibile (321) stampate rispettivamente in rosso, verde e blu (Tofani, 2007).

## 2.2 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

La superficie totale bacino imbrifero dell'Arno si estende su un'area di 8.228 km<sup>2</sup> ed è per questo il quinto fiume italiano dopo Po, Tevere, Adige e Tanaro. Le maggiori altitudini si riscontrano nel gruppo montuoso del Falterona e del Pratomagno, rispettivamente con le vette di Monte Falco (1.657 m.s.m.) e del Poggio Uomo di Sasso (1.537 m.s.m.), mentre fortemente predominante è la parte del territorio classificabile come collinare e pianeggiante. L'andamento altimetrico dell'intero bacino viene rappresentato dalla curva ipsografica di figura 2.2, che descrive la ripartizione dell'intera superficie in funzione dell'altitudine.

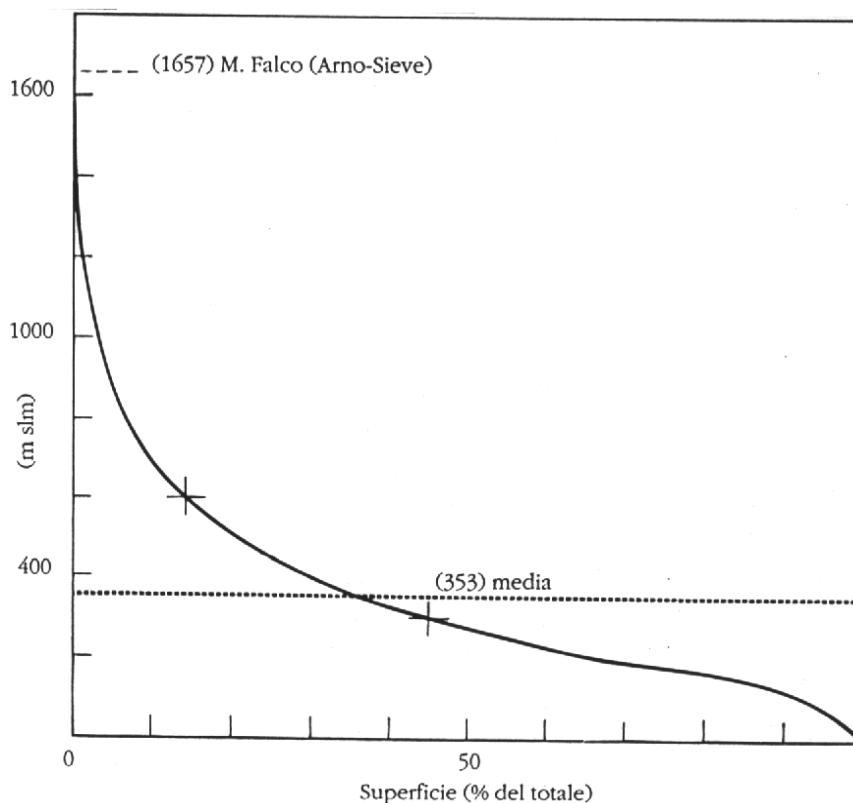


Fig. 2.2 - Curva Ipsografica Del Fiume Arno

L'intero bacino viene solitamente suddiviso in 6 settori, ciascuno contraddistinto da una peculiare fisiografia la cui origine è direttamente riconducibile a fenomeni di geodinamica regionale (Fig 2.3).

Il Casentino (883 km<sup>2</sup>) è costituito dall'alto bacino dell'Arno dalle origini alla confluenza con la Chiana. E' delimitato dai contrafforti dell'Appennino ad est e del Pratomagno ad ovest e le maggiori vette di tutto il bacino dell'Arno cadono proprio sullo spartiacque di questo

sottobacino. Gli affluenti sono numerosi, ma tutti di carattere torrentizio poiché i terreni a forte pendenza costituiscono la percentuale maggiore del territorio. Ad esempio le pendenze comprese tra il 20 e il 35% sono solo 1\3 del territorio e sebbene costituiscano aree fisiograficamente svantaggiose per l'insediamento umano, ciò non ha impedito nel passato la diffusione di estese pratiche agricole e pastorali

La Val di Chiana (1.368 km<sup>2</sup>) si differenzia nettamente dai bacini affluenti e confluenti poiché la storia tettonica distensiva e la natura litologica dei sedimenti ha determinato la formazione di una vasta zona prevalentemente pianeggiante o sub-pianeggiante che è rimasta paludosa fino a tempi relativamente recenti. Infatti anche se i primi interventi tesi a regolamentare il regime idraulico della zona può essere fatto risalire agli Etruschi, le prime vere e proprie operazioni di bonifica iniziarono a partire dal 1300 e si sono concluse definitivamente soltanto negli anni Trenta del XX secolo. Le pendenze mostrano sensibili aumenti unicamente sui rilievi collinari a margini orientali ed occidentali del bacino che tuttavia raggiungono quote modeste. La quota di base del bacino si può individuare invece intorno ai 220 m s.l.m. presso la confluenza della Chiana in Arno, valore che si discosta di poco dalla quota media del fondovalle alluvionale (250 m s.l.m.).

Il Valdarno Superiore (984 km<sup>2</sup>) è un bacino parallelo al Casentino chiuso a destra dal Pratomagno e a sinistra dai modesti rilievi della provincia di Siena. Esso presenta una estesa area depressa che ha consentito la formazione di una lunga e non molto ampia pianura di fondovalle caratterizzata da superfici terrazzate di origine fluvio-lacustre. Il raccordo tra queste superfici e gli alti rilievi del Pratomagno è piuttosto netto, mentre è relativamente morbido il passaggio ai più modesti rilievi occidentali del Chianti.

Il bacino della Sieve (843 km<sup>2</sup>) al pari del Casentino, costituisce invece un bacino a se stante ai piedi della dorsale Appenninica. Esso si presenta come una ampia area depressa delimitata da alte e ripide dorsali che la chiudono nettamente sia a monte che a valle. Infatti la Sieve si trova ad incidere la dorsale stessa prima di confluire in Arno. Il territorio attraverso cui l'omonimo fiume scorre è denominato Mugello nella parte con andamento ovest-est e Valdisieve nella parte con andamento nord-sud. La Sieve confluisce nell'Arno poco a monte di Firenze, delimitando a valle il Valdarno Superiore. Nell'ampia depressione che è essa rappresenta, l'evoluzione geologica quaternaria ha determinato una notevole accumulazione di depositi fluvio-lacustri e colluviali, che con il tempo si sono evoluti in estesi pianalti, superfici terrazzate incise e conoidi a debole pendenza al raccordo tra il fondovalle e i rilievi appenninici.

Il Valdarno Medio (1.383 km<sup>2</sup>) si origina a valle di Pontassieve e idrograficamente comprende i sottobacini del Bisenzio e dell'Ombrone in destra, della Greve (con il suo importante

tributario Ema) in sinistra. La confluenza dell'Ombrone in Arno determina la chiusura del bacino. Il Bacino è geologicamente un'ampia depressione tettonica, la deposizione fluvio-lacustre ha riempito questa depressione con depositi anche molto potenti (sino a 550m) in una situazione geomorfologica favorevole all'accumulo tuttora attiva. Da qui la notevole estensione della pianura alluvionale e delle grandi conoidi debolmente inclinate. Il raccordo della piana con i fianchi delle dorsali non è uniforme e si presenta generalmente netto ad eccezione della parte sud-orientale del bacino nei dintorni di Firenze e nel bacino della Greve.

Il Valdarno Inferiore (2.767 km<sup>2</sup>) rappresenta la vasta area del bacino dell'Arno a valle dorsale Monte Albano - Monti del Chianti ed è caratterizzato in sinistra dai lunghi sottobacini della Pesa, dell'Elsa e dell'Era, separati tra loro da bassi rilievi collinari, e in destra da una ampia pianura di bonifica con il sottobacino Valdinievole - Padule di Fucecchio. A valle di Pontedera l'Arno fluisce verso la foce, contenuto in arginature di difesa, che impediscono un interscambio tra l'acqua del fiume e quella della pianura pisana. Nella parte distale prossima al mare la pianura alluvionale si raccorda dolcemente con una ampia piana costiera. Oltre alle ampie aree delle pianure alluvionali e costiere, superfici pianeggianti e subpianeggianti di diversa estensione si ritrovano diffusamente su alti morfologici. È possibile infatti incontrare ampie superfici sommitali di raccordo o veri e propri altopiani. Le aree a forte pendenza sono piuttosto limitate e si trovano in corrispondenza di scarpate e rotture di pendenza legate a particolari situazioni geomorfologiche (ad esempio le 'balze' di Volterra, Monti Pisani, altipiani di travertino dell'alta Val d'Elsa). Sono comunque le aree collinari, a predominare percentualmente all'interno del bacino (Regione Toscana & Arpat, 2001; ADB Arno 2002).

Il disegno complessivo della rete idrografica dell'Arno è riconducibile a due morfotipi principali: di tipo intraorogenico nella porzione orientale e di tipo transorogenico nella porzione più occidentale, quando l'Arno oltrepassa l'abitato di Pontassieve. La sua organizzazione gerarchica è di ordine relativamente elevato, mentre la densità di drenaggio è mediamente abbastanza bassa ma assai variabile, conseguenza diretta dell'evoluzione tettonica dell'orogeno appenninico. Anche i processi morfologici insistenti nelle varie aree appaiono differenzialmente condizionati anche se in generale le condizioni climatiche, morfologiche e pedogenetiche attuali del bacino dell'Arno sono favorevoli a condizioni di biostasia. Tale regime morfoclimatico porta solitamente a condizioni tali per cui si instaurano continui processi pedogenetici che favoriscono lo sviluppo di una completa copertura vegetale dei suoli (Castiglioni, 1991). Tutto questo determina la protezione e stabilizzazione delle superfici, la limitazione dei fenomeni di erosione e dell'instabilità superficiale. Anche i processi di movimento di massa almeno nelle aree a pendenze moderate e per le tipologie di movimento

più superficiali risultano solitamente ostacolati. Tuttavia la presenza continua dell'uomo altera profondamente questa tendenza naturale e difatti lo sviluppo dell'agricoltura, del pascolo e delle attività selvicolturali ha aumentato pian piano tutti i fattori di instabilità e diminuito quelli che la limitavano. L'intensità e le caratteristiche della pressione antropica sono addirittura accentuate negli ultimi 50 anni in quanto sono state introdotti nuovi potenti fattori di instabilità quali le attività legate all'urbanizzazione, lo sviluppo delle infrastrutture di comunicazione ed il ritorno della copertura vegetale incontrollata conseguente all'abbandono delle pratiche agricole su estese superfici. Tali modalità di pressione da parte dell'uomo hanno provocato inoltre l'aumento dell'azione erosiva diretta dei fiumi sia per incisione che per erosione di sponda, favorito determinati processi di deposizione (es. alvei arginati pensili) e persino cambiato la dinamica morfologica del litorale marino che attualmente soffre di un progressivo e generale smantellamento (ADB Arno, 2002).

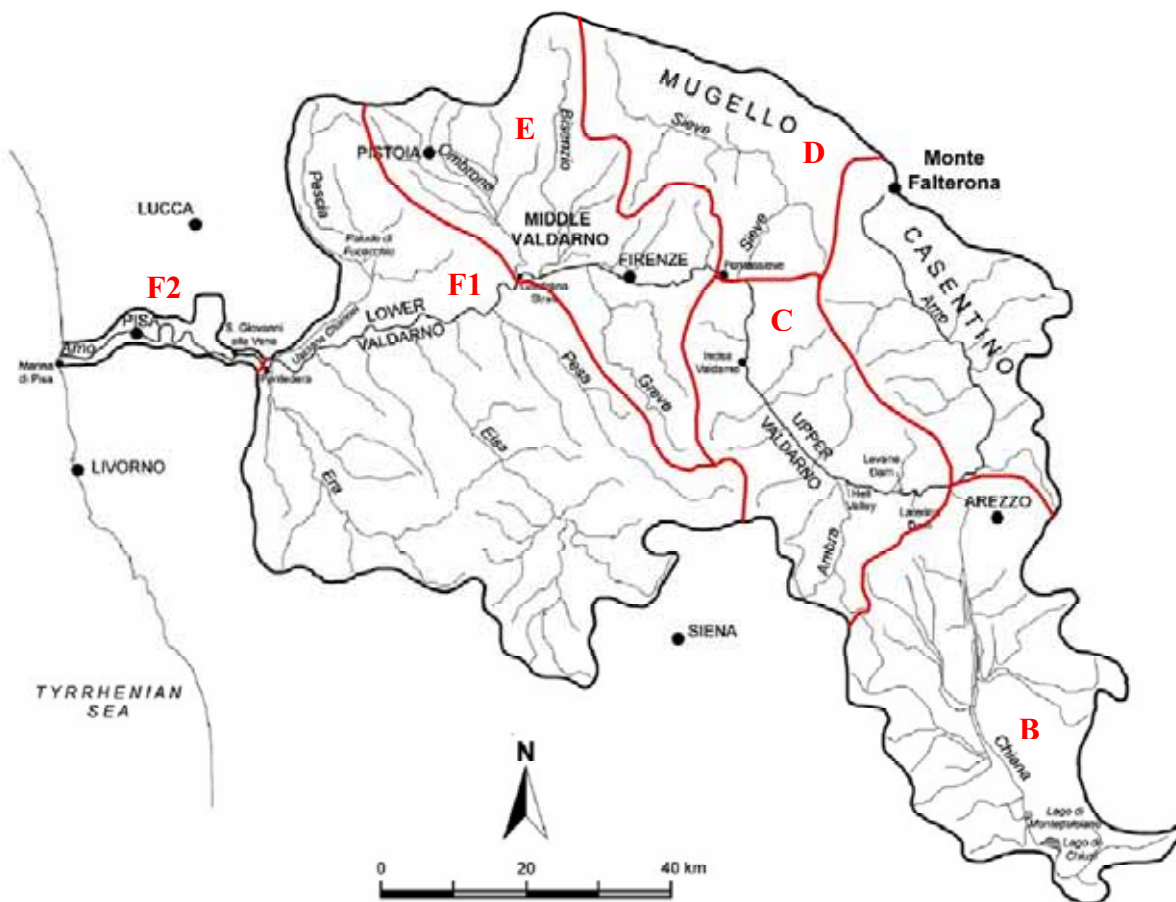


Fig. 2.3 - Bacino idrografico dell'Arno: A-Casentino, B-Val di Chiana, C-Valdarno Superiore, D-Bacino della Sieve, E-Valdarno Medio, F1-Valdarno Inferiore (area con apporti esterni), F2 (area senza apporti esterni) (Cencetti & Tacconi, 2005 modificato)

## 2.3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il bacino del fiume Arno è ubicato settore nel settentrionale della catena a falde appenninica, un edificio strutturale (Boccaletti *et al.*, 1980; Bortolotti, 1992) formatosi per impilamento delle Unità Liguridi a vergenza NE ed E sulle Unità Tosco-Umbre (Tofani, 2007). La fase orogenetica è stata caratterizzata da un regime compressivo-plicativo fino al Miocene medio-superiore, durante il quale il fronte compressivo è migrato progressivamente verso NE a partire dal Tortoniano. Contemporaneamente a tale migrazione, nei settori più interni della catena ha cominciato a verificarsi una fase distensiva che ha scomposto l'edificio appenninico in un sistema di alti strutturali (*horst*) e fosse tettoniche (*graben*), di forma allungata con allineamento NW-SE. L'esistenza di queste ultime ha esercitato una notevole influenza sulla sedimentazione neoautoctona, dando origine ad una serie di bacini marini e continentali (Catani *et al.*, 2005). I primi si sono formati ad occidente e sono stati interessati dalle trasgressioni marine mioceniche e plioceniche; i secondi, nella parte più orientale, sono state sede di sedimentazione fluvio-lacustre durante il Plio-Pleistocene (Fig. 2.4) (Martini & Sagri, 1993).

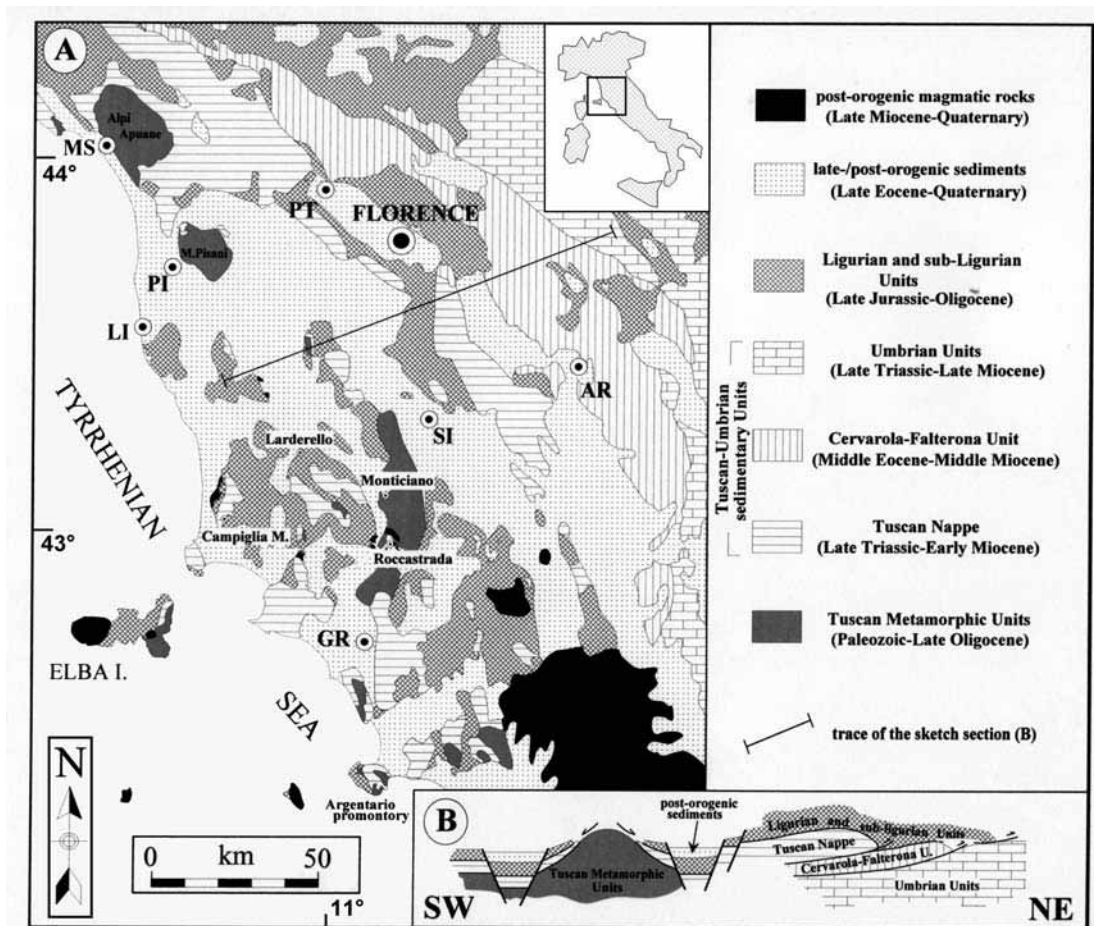


Fig 2.4 - Carta e sezione geologica dell'appennino settentrionale (Pandeli *et al.*, 2001)



Questa evoluzione tettonica ha determinato una morfologia caratterizzata da dorsali con direzione NW-SE costituiti da unità Mesozoiche e Terziarie, tra le quali sono poste i bacini neogenici e quaternari (Provincia di Firenze, 2006). Si possono distinguere quattro principali allineamenti di catene da Ovest ad Est (Fig 2.5):

1. M. Pisano, Montagnola Senese: composto principalmente da rocce clastiche e carbonatiche della Serie toscana del Paleozoico e Mesozoico;
2. M. Albano-Chianti: composto principalmente da flysch arenacei oligo-miocenici della Serie Toscana;
3. Caldana- M. Morello, Pratomagno: il primo settore formato da formazioni calcareo-marnose (Cretaceo Superiore-Eocene) delle unità Liguri e il secondo settore da flysch arenacei oligo-miocenici della Serie Toscana;
4. M. Falterona-Mandrioli-Alpe di Catenaiola: formato principalmente da formazioni marnose-arenacee oligo-mioceniche dei complessi tosco-emiliani.

I bacini intermontani sono caratterizzati invece da quattro diversi domini sedimentari, schematizzabili da W verso E come segue: Valdarno inferiore, contraddistinto da depositi marini pliocenici; Valdarno medio e Valdarno superiore caratterizzati da sedimenti fluvio-lacustri plio-pleistocenici; i sottobacini del Mugello e del Casentino dominati da successioni fluvio-lacustri plio-pleistocenici; Val di Chiana, interessata sia da sedimenti marini pliocenici che da sedimenti lacustri plio-pleistocenici. La parte a granulometria fine di questi sedimenti, rappresentata da argille e limi, ha un comportamento compressibile e risulta quindi suscettibile a fenomeni di subsidenza, soprattutto in corrispondenza di acquiferi oggetto di prolungati ed intensi emungimenti a scopi civili od industriali (Canuti *et al.*, 2006)

Complessivamente il bacino dell'Arno è composto principalmente, lungo i rilievi, da flysch e rocce lapidee a prevalente componente pelitica e da terreni coesivi e granulari nei bacini collinari. Rocce ignee, metamorfiche e calcaree affiorano in limitati settori del bacino.

Le formazioni geologiche sono in prevalenza impermeabili in quanto costituite da argille, marne, scisti argillosi, calcari marnosi e arenarie compatte. La parte prevalentemente permeabile del bacino non supera il 5% dell'intera superficie. La copertura alluvionale, quasi ovunque di spessore modesto, è presente sul 23% della superficie. Nel complesso le rocce costituenti il bacino dell'Arno sono facilmente erodibili. La stessa colorazione, generalmente giallastra, delle acque fluenti, è indice di un forte trasporto solido in sospensione. Ciò determina una intensa tendenza alla denudazione del bacino, nonostante che la Toscana, nel suo



complesso, sia una delle regioni più ricche di bosco rispetto alla superficie complessiva agraria e forestale. (Regione Toscana & Arpat, 2001; ADB Arno, 2002).

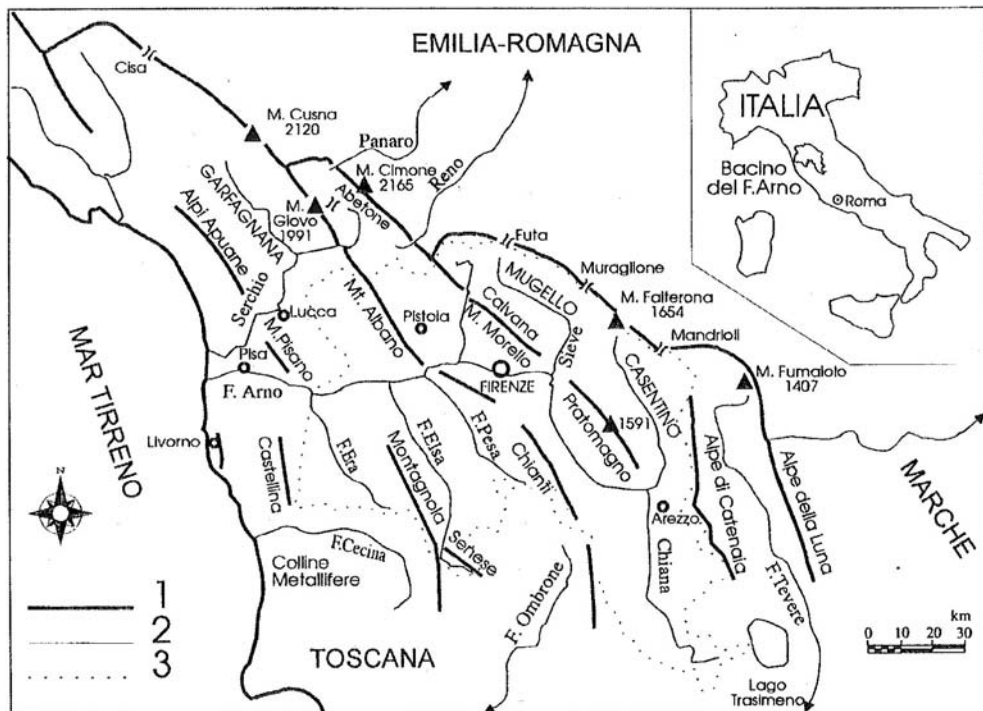


Fig. 2.5 - Schema fisiografico del bacino del fiume Arno (da Canuti *et al.*, 1994). 1) principali catene, 2) fiumi principali, 3) limite del bacino idrografico.

## 2.4 CARATTERIZZAZIONE DELL'ARNO

L'Arno nasce sul versante sud occidentale del monte Falterona (1654 m s.l.m.), nell'Appennino tosco-romagnolo, dal congiungimento di una serie di modesti torrenti che scendono in un ampio anfiteatro. Non è possibile perciò determinare un unico luogo da cui esso ha inizio, anche se per convenzione la sorgente è stata fissata in località Capo d'Arno (1358 m s.l.m.). Dopo aver percorso una lunghezza totale di 241 km, che lo rende il principale corso d'acqua della Toscana, esso sfocia nel Mar Tirreno a nord di Marina di Pisa. Inizialmente esso ha un aspetto prevalentemente torrentizio e soltanto a partire da Stia, circa sette chilometri a valle delle sue origini, comincia ad avere un alveo alluvionale mobile. Dopo un primo tratto percorso nel bacino intermontano del Casentino con direzione prevalente Nord-Ovest/Sud-Est, l'Arno sbocca nella piana di Arezzo attraverso la stretta di S. Maria. In prossimità del bordo occidentale di questa zona pianeggiante, si congiunge con il Canale Maestro della Chiana. Entra quindi nel Valdarno Superiore dove scorre con direzione Sud-Est/Nord-Ovest sino a Pontassieve, luogo in cui riceve le acque del suo principale affluente di destra: la Sieve. Da qui piega decisamente verso Ovest e mantiene tale direzione fino allo sbocco in mare. E' in questo

ultimo tratto che confluiscono tutti gli altri importanti affluenti di destra e di sinistra: Bisenzio, Ombrone pistoiese, Mugnone, Pescia, Greve, Pesa, Elsa, Usciana ed Era (ADB Arno, 2002; Cencetti & Tacconi, 2004). Una volta entrato nella pianura di Pisa l'Arno scorre diretto verso la foce ad una quota più elevata rispetto alla pianura circostante con la conseguenza di non riuscire più a ricevere altri affluenti e sfocia con un delta piuttosto esteso nel mar Tirreno in prossimità di Marina di Pisa. Bocca d'Arno è il nome con cui è comunemente chiamato l'ultimo tratto del fiume, in corrispondenza della sua foce (ADB Arno, 2002). Un tempo anche il fiume Serchio confluiva in destra d'Arno poco prima di lambire il Monte Pisano, ma esso con il passare degli anni, ha modificato il suo corso fino a sfociare direttamente in mare, costituendo oggi un bacino a sé stante (Ravazzani, 2004). Come già accennato l'asta fluviale ha in tutto uno sviluppo di 241 km, mentre lo sviluppo dell'asse della valle risulta più corto di 18 km a causa dei numerosi meandri che il fiume ancora forma nel tratto terminale, specialmente tra le confluenze dell'Era e la Pesa. Esaminando per di più il profilo longitudinale (Fig. 2.6) si può osservare che il primo tratto (5 km) ha un andamento concavo regolare, molto ripido, con una pendenza media del 140‰. Vi è poi un netto punto di flesso a 25 km dalla sorgente, più o meno all'altezza di Poppi e qui la pendenza si riduce al 2,5‰, che si mantiene tale fino al termine del Valdarno medio in corrispondenza della stretta della Gonfolina. Successivamente negli ultimi 82 km di percorso la pendenza media assume un valore di 0,4‰ (ca 40 cm di dislivello ogni mille metri) (ADB Arno, 2002). I sedimenti sul fondo dell'alveo sono in prevalenza ghiaiosi tra il Casentino e la stretta della Gonfolina, mentre diventano prevalentemente sabbiosi nel tratto compreso tra la confluenza del fiume Elsa e la foce (Tacconi *et al.*, 1994).

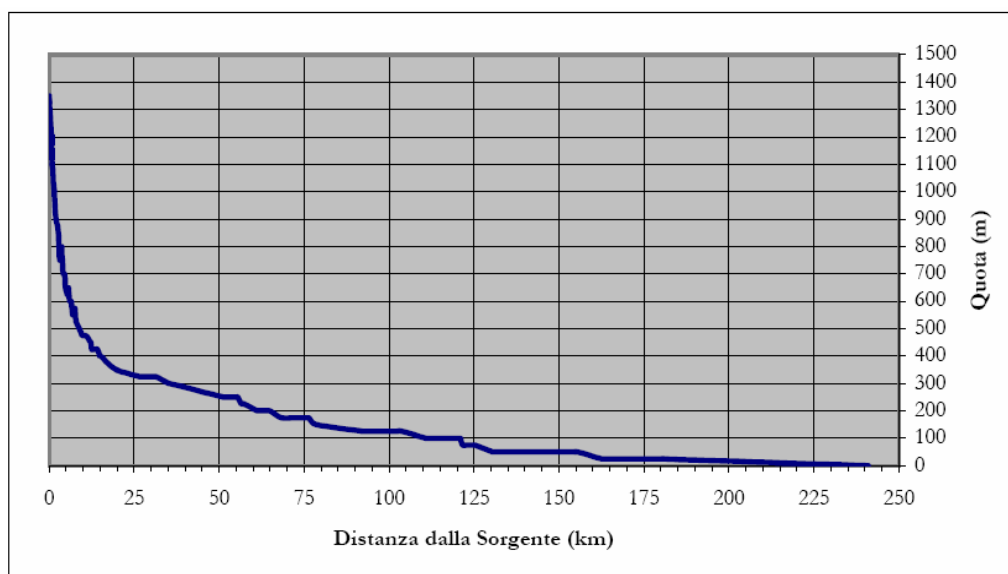


Figura 2.6 - Profilo altimetrico approssimativo del corso del fiume Arno dalla Sorgente alla Foce (ADB 2002)

Il regime idrologico dell'Arno è caratterizzato da portate di magra molto ridotte e portate massime eccezionali che sono in grado di provocare rovinose inondazioni (Agnelli *et al.*, 1998). In base ad una dettagliata ricostruzione storica delle piene dell'Arno Agnelli *et al.* (1998), aggiornando le ricerche di Morozzi (1762), segnalano che dal 1177 ben 56 eventi hanno invaso la città di Firenze (Fig. 2.7, 2.8, 2.9). L'ultima di queste inondazioni avvenne nel novembre del 1966 con una portata stimata di oltre 4000 m<sup>3</sup>/s immediatamente a monte della città, mentre la capacità del canale nello stesso tratto era di circa 2500 m<sup>3</sup>/s (Rinaldi & Simon, 1998). Tutti questi eventi sono in gran parte riconducibili al fatto che nel corso dei secoli i numerosi interventi antropici in alveo e nelle zone di alimentazione (tabella 2.1) hanno interferito notevolmente con la normale mobilità planimetrica del fiume, specialmente in prossimità dei centri abitati, passando da un alveo in naturale equilibrio con la pianura alluvionale ad un alveo fortemente controllato dall'uomo. I tratti urbani di Firenze e Pisa sono stati i primi a subire modificazioni importanti, mentre nelle restanti parti l'azione antropica è andata progressivamente intensificandosi nel corso dei secoli attraverso un'ampia serie di interventi (tabella 2.1). In figura 2.10 è riportata una mappa relativa alle modifiche effettuate in tempi storici nella parte terminale del corso dell'Arno.

MEDIUM	LARGE	EXCEPTIONAL
1261, 1303, 1305, 1362, 1368, 1378, 1406, 1434, 1490, 1491, 1520, 1538, 1550, 1621, 1641, 1651, 1660, 1674, 1683, 1695, 1698, 1715, 1745, 1761	1177, 1269, 1282, 1284, 1288, 1334, 1345, 1380, 1456, 1465, 1515, 1532, 1543, 1544, 1646, 1676, 1677, 1680, 1687, 1688, 1705, 1709, 1714, 1719	1333, 1547, 1557, 1589, 1740, 1758, 1844, 1966

Fig. 2.7 - Alluvioni storiche avvenute a Firenze dal 1177 ad oggi (Caporali *et al.*, 2005)



Fig. 2.8 - Alluvione del 1844 a Firenze in una stampa dell'epoca



Fig. 2.9 - Aree inondate durante l'alluvione del 1844, da una mappa di Manetti del 1847.

PERIODO STORICO	INTERVENTI EFFETTUATI
<b>ETRUSCO - ROMANO</b>	<p>Primi tentativi di bonifica delle paludi nelle aree di fondovalle del bacino dell'Arno (epoca etrusca)</p> <p>Costruzione di prime arginature nei centri abitati di Pisa e Firenze (epoca romana)</p> <p>Costruzione di canali artificiali nella pianura pisana (epoca romana)</p>
<b>476 - 1500</b>	<p>Rinforzamento delle arginature nel tratto di Pisa e nel Valdarno superiore</p> <p>Canali artificiali nella pianura di Pisa per il miglioramento della navigabilità interna e per migliorare le condizioni di drenaggio della pianura (nei secoli IX-X)</p> <p>Rettificazione completa del tratto di Firenze ed inglobamento nelle mura cittadine (nei secoli XII-XIV)</p> <p>Tagli di meandro nella pianura di Pisa (Vettola e Cascine nuove, 1338-1341)</p>
<b>1500 - 1700</b>	<p>Taglio di meandro tra Calcinaia e San Giovanni alla Vena (Rettifica di Montecchio, 1559)</p> <p>Taglio di meandro di Castel del Bosco (Montopoli in Val d'Arno) (1561)</p> <p>Taglio di meandro in località la Tinaia tra Montelupo ed Empoli (seconda metà del 1500)</p> <p>Sistemazione della foce (Rettifica Ferdinanda, 1606)</p> <p>Costruzione di canali diversivi (Bocchette di Putignano, 1558; Trabocco di Fornacette, 1568)</p>
<b>1700 - 1900</b>	<p>Canalizzazione del Valdarno superiore (1703-1723)</p> <p>Sistemazione idraulica della piana di Laterina (1757)</p> <p>Canalizzazione del Casentino e della piana di Arezzo (1816-1840)</p> <p>Sistemazione idraulica del tratto fluviale nella pianura di Firenze (inizi XVIII secolo a valle della città, XIX secolo a monte della città)</p> <p>Taglio di meandro presso Pisa (Rettifica di Barbaricina, 1771-1774)</p> <p>Restringtoni e sistemazioni arginali nella pianura di Pisa (1840-1847)</p> <p>Realizzazione di un canale emissario (o Fosso Imperiale) che sottopassa in botte l'Arno per il miglioramento dell'efficienza delle condizioni idrauliche del Padule di Bientina (1859)</p>
<b>1900 - 2009</b>	<p>Costruzione delle dighe di Levane e La Penna per scopi idroelettrici (1957)</p> <p>Realizzazione del canale scolmatore di Pontedera (1976)</p> <p>Interventi "strutturali" di tipo idraulico-forestale localizzati nei tratti più vulnerabili dell'Arno ed i suoi principali affluenti che affiancano interventi "non strutturali" pensati per l'abbattimento della vulnerabilità del territorio (monitoraggio, sensibilizzazione della popolazione, legislazione, pianificazione territoriale adeguata....)(1997-2009)</p>

tabella 2.1 - Interventi in alveo e nelle aree di pianura contermini nelle varie fasi storiche (Canuti *et al.*, 1994; Agnelli *et al.*, 1998; Pagliara, 2004; Ercolini, 2006; Donati *et al.*, 2008.)



Fig. 2.10 - Le modifiche effettuate sull'Arno in tempi storici nel tratto compreso tra Fucecchio e la foce (da ADB Arno, 1996):  
**(1a)(1b)** I bisarni costruiti per la messa in sicurezza di Fucecchio, Santa Croce e Castelfranco di Sotto  
**(5)** L'ansa dello Zambra  
**(6)** Le bocchette di Putignano  
**(7)** Il trabocco di Fornacette e l'Arnaccio (canale di diversione)  
**(8)** La rettificazione di Montecchio - San Giovanni alla Vena  
**(9)** Il taglio ferdinandeo del 1606 a rettificazione della foce dell'Arno  
**(10)** Il taglio dei meandri di Barbaricina del 1770  
**(11)** L'emissario, la bonifica del lago di Bientina e la chiusura del Sorezza  
**(12)** Il canale dei Navicelli

Tale intensa artificializzazione è stata necessaria per permettere alle popolazioni di insediarsi stabilmente nella pianura alluvionale e sviluppare le proprie attività socio-economiche legate allo sfruttamento della risorsa idrica. Questo fenomeno ha d'altro canto incrementato i rischi idrogeologici ed in particolare il rischio di alluvione. Infatti la naturale dinamica evolutiva di un corso d'acqua cerca di assumere la forma plano-altimetrica che permetta la massima efficienza idraulica, e trovando tutte le opere realizzate dall'uomo nelle aree di pertinenza fluviale sono inevitabili interferenze ai normali flussi che a volte possono arrivare a generare energie tali da indurre danni, anche gravi, a qualsiasi manufatto (Rinaldi, 1999). Nel tempo il regime idrico dell'Arno ha sofferto sempre più queste modificazioni ed è stato quindi costretto a subire anche provvedimenti orientati esclusivamente alla riduzione del rischio idraulico nei territori antropizzati contigui ai corsi d'acqua: invasi di regolazione, scolmatori, drizzagni, arginature in frodo o con golena, protezioni spondali, opere trasversali e longitudinali (tabella 2.1) (Apat, 2004). I criteri di intervento si sono succeduti e diversificati col passare dei secoli in seguito all'evoluzione dei materiali da costruzione, dei mezzi, del grado di approfondimento della conoscenza dei processi naturali in atto e del modificarsi della concezione dell'ambiente fluviale (Apat, 2004). Tutti questi lavori non hanno mai comunque eliminato definitivamente il problema della esondazioni, se non in aree localizzate, e la conseguenza principale più rilevante è stata quella di ottenere una fissazione planimetrica del tracciato e la comparsa in tempi più recenti di una dinamica fluviale prevalentemente di tipo altimetrico.

Infatti variazioni verticali importanti del canale sono documentate soltanto a partire dal 1844 (Rinaldi, 1998), mentre sulla base di alcune notizie storiche e degli studi effettuati da Pranzini

(1989) si ritiene che prima di tale data gran parte del sistema fluviale fosse in una fase di accumulo, o almeno non in erosione, malgrado i numerosi interventi realizzati nelle epoche precedenti. Probabilmente una intensa deforestazione del bacino di alimentazione e la conseguente erosione del suolo che si è protratta anche per gran parte del 1800 hanno fornito una grande quantità di sedimento tale da controbilanciare l'aumento della capacità di trasporto che è derivata dalla canalizzazione (Becchi & Paris, 1989). A partire dalla fine del 1800 e in particolare durante i primi decenni del 1900 la promulgazione di una serie di leggi sull'uso del suolo hanno portato ad una estesa riforestazione e quindi un trattenimento del sedimento in ampi settori, causando una maggiore riduzione di apporto solido al sistema fluviale.

Durante gli ultimi 60 anni altre importanti attività umane si sono impostate lungo il fiume (l'escavazione di materiale dall'alveo e la costruzione delle dighe di Levane e La Penna) limitando ancor di più la quantità dei sedimenti trasportati e creando quindi uno squilibrio sempre maggiore tra apporto di materiale e capacità di trasporto dello stesso. Questo sbilanciamento ha costretto l'Arno ad entrare in una nuova fase di adeguamento al fine di raggiungere un nuovo stato di equilibrio dinamico (Rinaldi & Simon, 1998). Essa si è tradotta nell'abbassamento del fondo del fiume, specialmente nel Valdarno Superiore ed Inferiore (Fig. 2.11) e la cui evoluzione spaziale è stata condizionata dalla presenza di alcuni settori dal fondo fisso (es. la soglia della Gonfolina, il condotto sotterraneo a Bientina, il canale cementificato nel tratto pisano, ecc...). L'abbassamento totale è comunque oscillato dai 2 ai 4 metri nel Valdarno Superiore e dai 5 ai 9 metri nel Valdarno Inferiore raggiungendo il suo valore massimo a circa 70 chilometri dalla foce. In particolare il maggior sviluppo di tale fenomeno si è registrato tra gli anni cinquanta e gli anni ottanta del XX secolo con accelerazioni all'intensificarsi delle attività di scavo in alveo dopo la seconda guerra mondiale e successivamente alla costruzione delle dighe di Levane e La Penna (Billi & Rinaldi, 1997).

Ad ogni modo fin dai primi segni di abbassamento del fondo si è cercato di arginare il fenomeno realizzando anzitutto nuovi sbarramenti trasversali alla corrente (traverse) o recuperando la funzionalità di vecchie pescaie, convertendole ad una esclusiva funzione di regimazione idraulica. L'uso di tali opere idrauliche è stato incoraggiato perché esse sono in grado di fissare immediatamente il fondo ad una quota prestabilita e nel lungo periodo provocare l'innalzamento del fondo dell'alveo nel tratto di monte (Benini, 1990). Infatti la quota di soglia così realizzata rappresenta il nuovo livello di base della parte di bacino che si estende a monte e di conseguenza si innesca una fase di lento rimodellamento morfologico del bacino sotteso fino ad un migliore profilo di equilibrio. Purtroppo queste opere non sono mai

riuscite ad eliminare completamente il problema e al massimo hanno avuto solo un effetto localizzato.

Taconi *et al.* (1994) infatti hanno riscontrato un persistente e generalizzato deficit sedimentario evidenziato dalla scarsità o assenza di corpi sedimentari, dall'erosione dell'alveo e da un dissesto delle sue sponde, problema verso il quale negli ultimi anni le autorità competenti sembrano finalmente aver posto l'adeguata attenzione. Cencetti & Tacconi (2004) aggiungono inoltre che la recente evoluzione dinamica dell'Arno ha portato anche a seri problemi di stabilità delle opere idrauliche, in particolar modo i ponti, e a fenomeni di erosione regressiva nei torrenti tributari. Per comprendere meglio la portata di tali fenomeni Rinaldi (1999) ha recentemente realizzato una suddivisione schematica del fiume Arno, a valle della diga di Levane, in base all'entità degli abbassamenti del fondo rilevati con diversi profili longitudinali e alla ubicazione dei punti di attività estrattiva di materiale inerte in alveo o nella pianura adiacente. In particolare distingue:

- 1) tratti con abbassamento del fondo limitato (inferiore a cinquanta centimetri), assente, o localmente in sedimentazione;
- 2) tratti con abbassamento del fondo mediamente inferiore ai due metri;
- 3) tratti con abbassamento del fondo mediamente compreso tra due e quattro metri;
- 4) tratti con abbassamento del fondo mediamente compreso tra quattro e sei metri;
- 5) tratti con abbassamento del fondo mediamente superiore ai sei metri;
- 6) zone di estrazione di inerti in alveo o nella pianura.

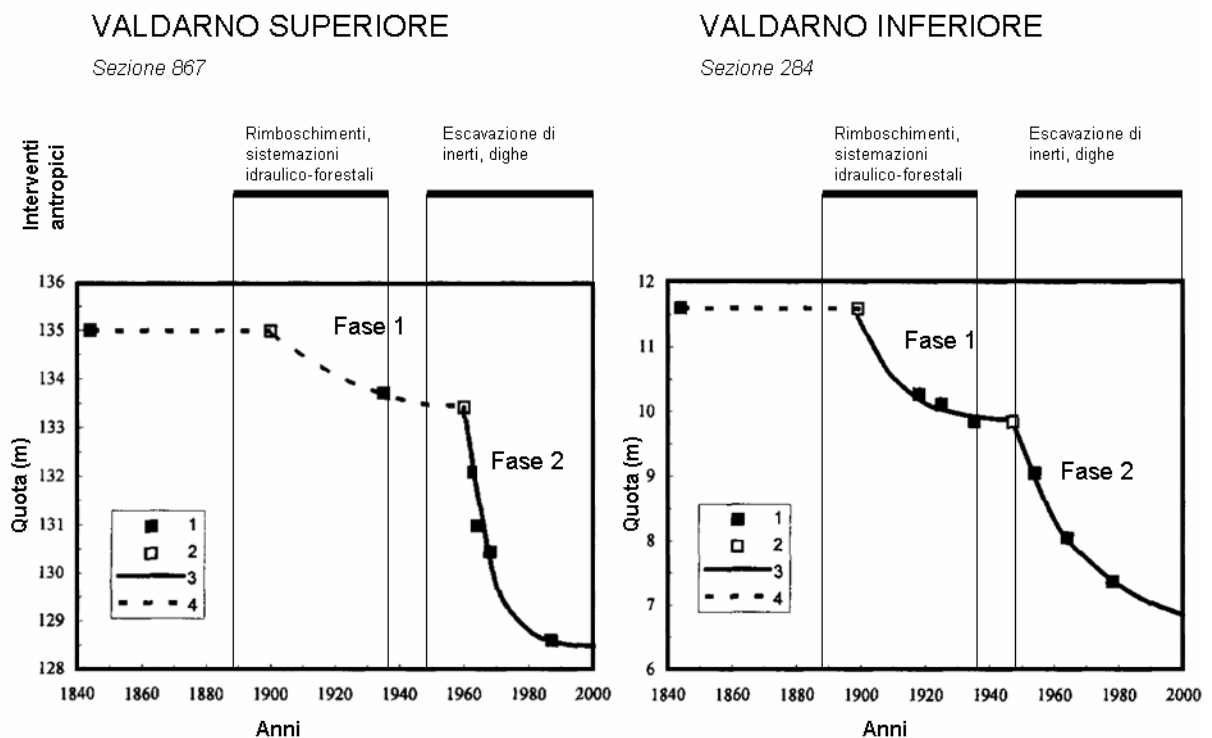


Fig. 2.11 - Abbassamento del fondo nel tempo in relazione ai principali interventi antropici. 1) dati misurati, 2) dati ipotizzati, 3) curva di abbassamento calcolata, 4) andamento presunto (Rinaldi & Simon, 1998 e Rinaldi, 2006 modificati)



### 3 AREA DI STUDIO

#### 3.1 INQUADRAMENTO GENERALE

L'area di studio include un'ampia porzione del fiume Arno per una estensione totale di 65 km (Fig. 3.1) e i tratti terminali di alcuni suoi torrenti tributari per una lunghezza complessiva di 42 km (Fig. 3.2); tutti all'interno della provincia di Firenze. La campagna di misurazione ed analisi è stata realizzata infatti lungo le sponde del fiume Arno dal confine con la provincia di Arezzo in corrispondenza con il Borro Vacchereccia (Valdarno Superiore) fino al confine con la provincia di Prato in corrispondenza della confluenza con l'Ombrone, estendendosi in sponda sinistra fino al circondario Empolese-Valdelsa in località Camaioni (Valdarno Medio). Gli studi relativi agli affluenti sono stati invece eseguiti per quei corsi d'acqua che sono in relazione con il tratto di Arno precedentemente descritto e che hanno almeno un tratto classificato in seconda categoria ai sensi del RD 523/1904. L'analisi di questi corsi d'acqua è stata eseguita dalla confluenza fino a comprendere tutte le aree urbanizzate della pianura alluvionale nelle quali i torrenti in oggetto costituiscono un serio problema gestionale. A queste caratteristiche corrispondono i corsi d'acqua del Valdarno Medio con la confluenza in Arno a valle della città di Firenze e fra essi troviamo l'Ombrone Pistoiese, il Vingone, il Bisenzio, il Marina, la Greve, il Mugnone ed il Terzolle.

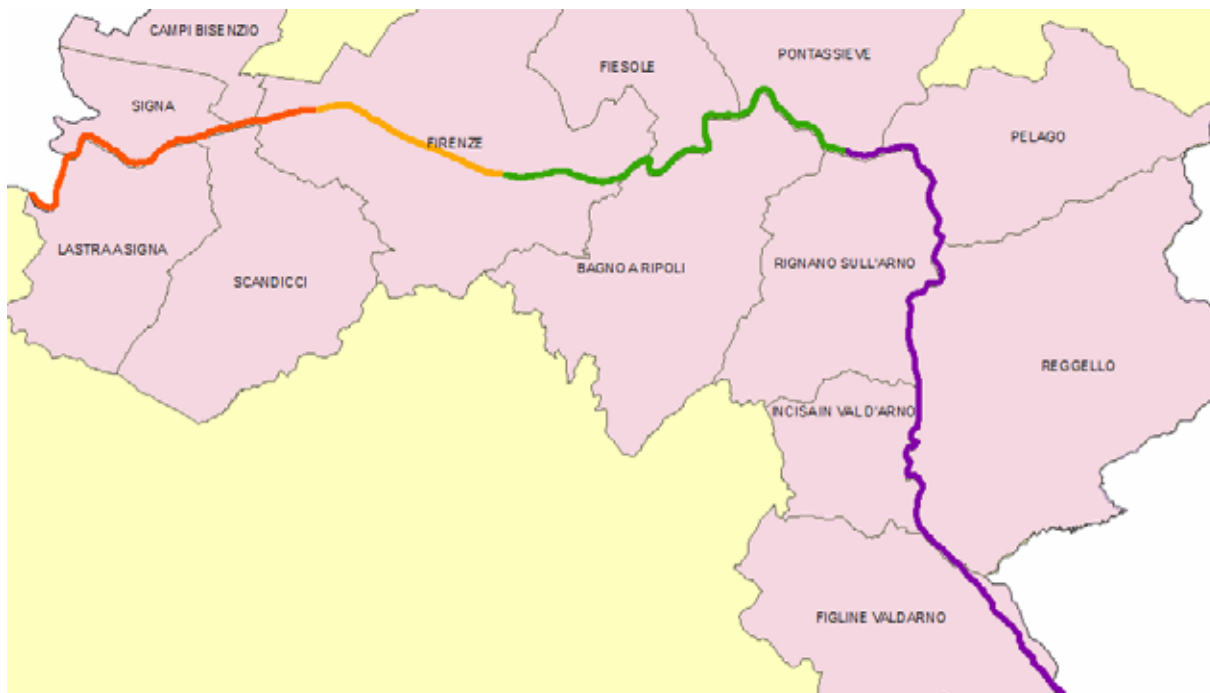


Fig. 3.1 - Asta del fiume Arno compresa nei limiti provinciali (in giallo) e i 13 Comuni coinvolti nello studio; nella figura sono evidenziati con colori differenti le diverse fasi in cui è stato suddiviso il lavoro.



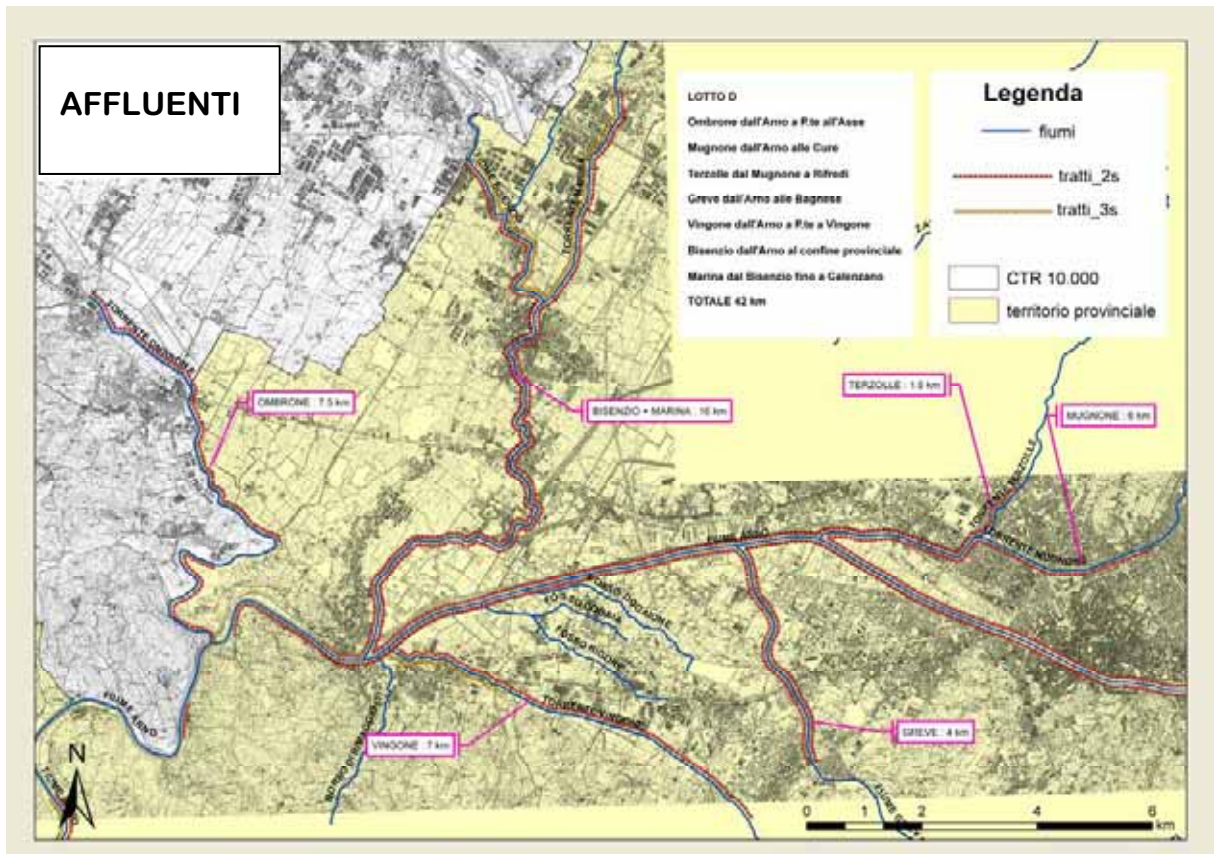


Fig. 3.2 - Mappa generale dei tributari affluenti dell'Arno. In giallo è evidenziato il territorio provinciale a cui sono state sovrapposte le CTR 10.000. Con tratteggio rosso sono indicate le sponde in seconda categoria

### 3.2 DESCRIZIONE GEOMORFOLOGICA DELL'ARNO

Lo sviluppo della porzione di Arno esaminata risulta fortemente influenzata dalla morfologia del bacino. In particolar modo la presenza di una serie di pianure alluvionali separate da strette soglie costringono il fiume ad assumere caratteristiche morfologiche ed idrodinamiche distinte (Canuti *et al.*, 1994). Nel primo caso il flusso delle acque è confinato tra sponde rocciose, scaricando su di esse la propria energia, mentre nel secondo il fiume mostra una tendenza ad avere un alveo mobile, che tuttavia sin dall'antichità è stato fortemente limitato, specialmente nelle aree urbanizzate o a forte impatto antropico (Rinaldi & Simon, 1998). Proprio per questo motivo al fine di ottenere una migliore disamina dell'intero tratto dell'Arno si è deciso di suddividere l'area di studio in Unità Geomorfologiche Omogenee, ognuna delle quali corrisponde ad un settore con una evoluzione morfologica diversa (Fig. 3.3).

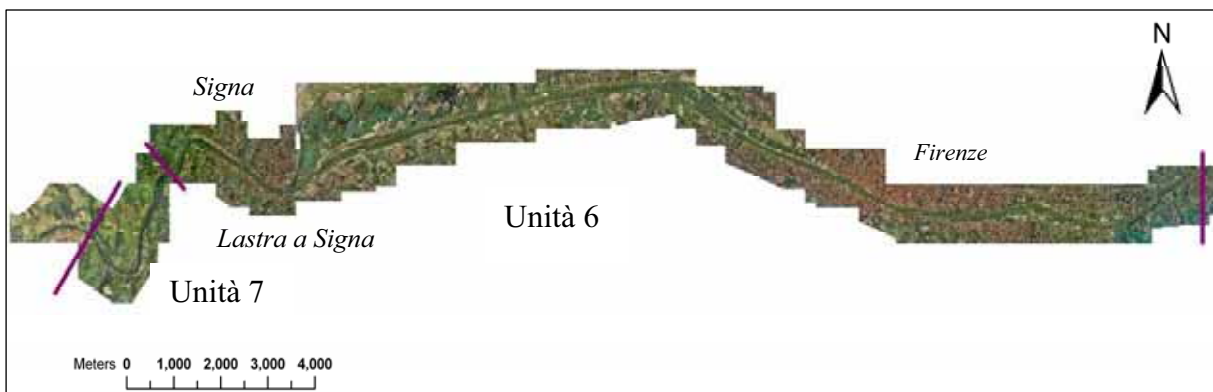
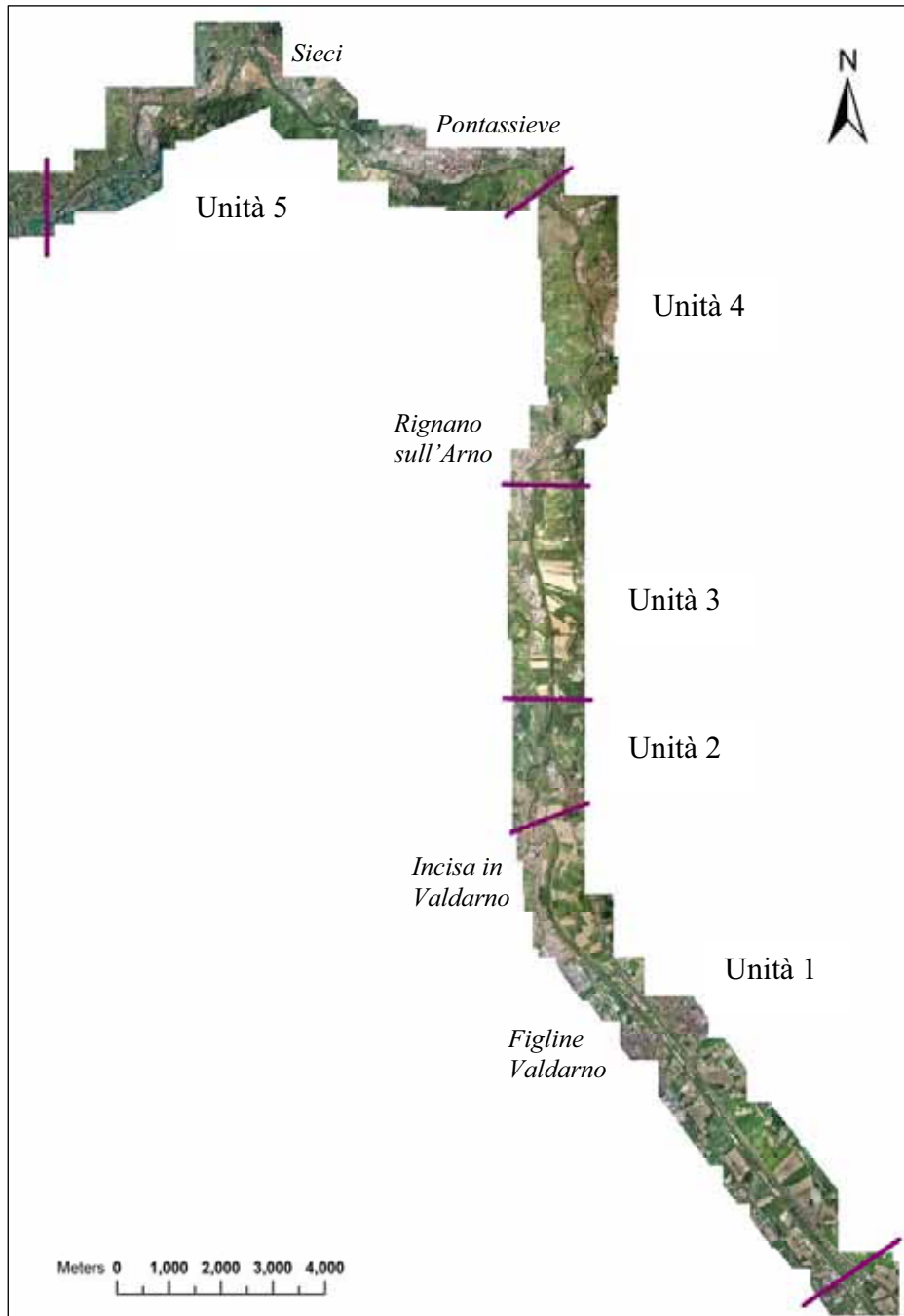


Fig. 3.3 - Area di studio suddivisa in Unità Geomorfolgiche Omogenee (da unità 6 a unità 7)

I primi 11 km del corso dell'Arno all'interno dell'area di studio si sviluppano nell'ambito della pianura alluvionale del Valdarno Superiore, dove il fiume ha sviluppato un letto ampio più di 100 m ed un corso d'acqua quasi rettilineo (unità 1). Nel tratto iniziale fino alla cittadina di Figline troviamo molte barre fluviali alternate di forma allungata. Esse sono caratteristiche dei corsi d'acqua canalizzati, nei bassi regimi di corrente e sono solitamente spazzate via nei regimi superiori (Sukegawa, 1973). In questo caso però visto il progressivo abbassamento che l'alveo ha subito negli ultimi decenni le barre sono rimaste come sospese e si sono mantenute fino ad oggi nonostante importanti piene, permettendo in certi casi persino la crescita di vegetazione arbustiva ed arborea (Fig. 3.4).

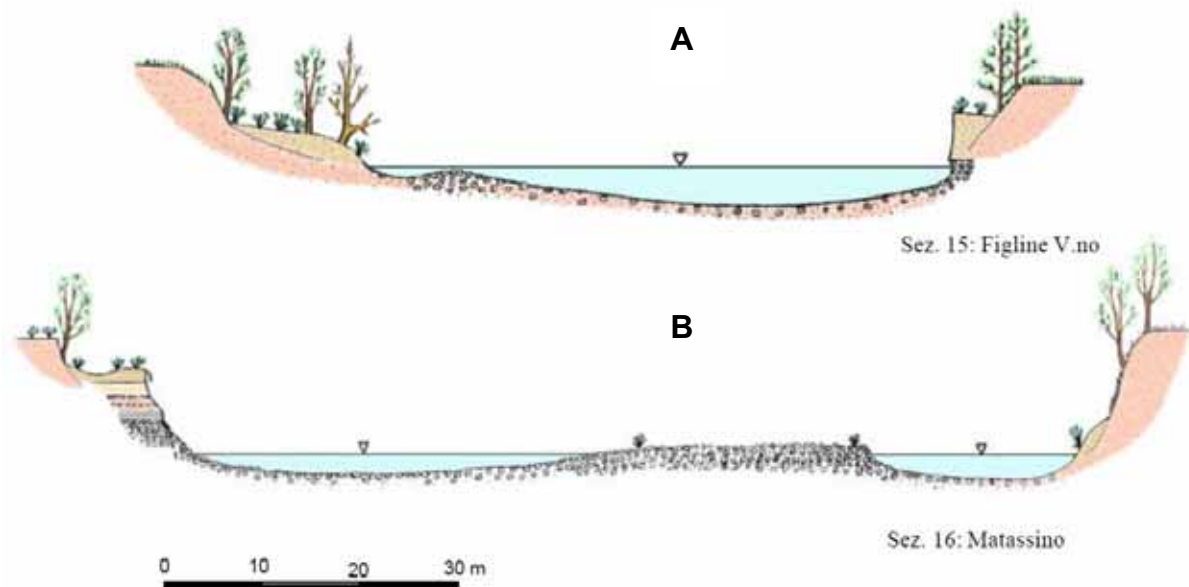


Fig 3.4 - sezioni idrauliche in località Figline Valdarno (A) e Matassino (B) (Dapporto, 1999)

La pianura alluvionale contigua ha subito negli ultimi decenni un incisivo impatto antropico, principalmente legato all'attività di estrazione e all'ampliamento delle grandi aree urbane (Figline Valdarno e Incisa). Entrambe le sponde hanno quasi ovunque argini alti e ripidi ad alcuni metri di distanza dalla loro scarpata principale, la quale oggi risulta relativamente stabile e poco soggetta a franamento. Successivamente il fiume attraversa la "Soglia dell'Incisa", un tratto tortuoso di circa 3 km in cui il corso è confinato su un letto roccioso incassato tra sponde molto ripide (unità 2). L'ampiezza del letto in questo caso è intorno ai 70-100 m. Gli affioramenti e la presenza di quattro antiche pescaie hanno mantenuto sostanzialmente immutati in tempi storici sia il profilo altimetrico che lo sviluppo planimetrico dell'Arno. Dopo questo angusto passaggio il fiume sbocca nella pianura alluvionale di Rignano (unità 3), in cui per 4 km scorre in direzione S-N con assenza di corpi sedimentari e con un'ampiezza di 70-100

m. L'Arno in questo tratto sembra essere stabile da un punto di vista planimetrico, nonostante sia privo di grandi opere idrauliche a protezione della sponda. Segue un tratto di circa 7 km (unità 4) in cui il fiume torna ad essere confinato entro sponde e letto in roccia contraddistinto da alcune barre fluviali inattive, le più grandi delle quali sono anche vegetate. Esso sbocca poi nella gola di Pontassieve, dove le caratteristiche fisiografiche sono quelle di una stretta pianura alluvionale in cui però il corso del fiume, che riduce ulteriormente la sua ampiezza a 50-100 m, è condizionato da frequenti affioramenti rocciosi (unità 5). In molti casi la sponda sinistra è costituita da ripide pareti di montagna che influenzano considerevolmente l'evoluzione del fiume e provocano la formazione di numerose barre laterali. Questo tratto si sviluppa con numerose anse per circa 13 km prima di entrare nella pianura fiorentina (unità 6). Qui l'Arno scorre per circa 24 km ed è caratterizzato da numerosi interventi di rettificazione che a partire dal XII secolo (Natoni, 1944) hanno permesso di passare da un letto a canali anastomizzati ad un letto dal corso rettilineo e dall'ampiezza considerevolmente ridotta (massimo 150 m invece dei circa 1000 m osservabili in alcuni disegni storici). Nel tratto cittadino le sponde sono ormai fisse e l'alveo controllato da alcune importanti traverse, mentre nelle restanti aree l'alveo gode di una maggiore libertà orizzontale, condizionata comunque dalla presenza di argini in terra e da varie opere idrauliche in zona di golena. Il controllo dello spazio piano compreso tra la riva di un corso d'acqua ed il suo argine non è quindi totale ed in alcune aree, specialmente a valle di Firenze, si verificano talvolta fenomeni di instabilità di sponda. L'ultimo tratto (circa 3 km) percorso dall'Arno prima di abbandonare il territorio provinciale è la Gola della Gonfolina, in cui il letto è confinato tra sponde rocciose costituite da arenarie della formazione del Macigno (unità 7).

### 3.3 DESCRIZIONE GEOMORFOLOGICA DEGLI AFFLUENTI DELL'ARNO

Tutti gli affluenti scorrono nella pianura fiorentina a valle della città di Firenze, eccetto del tratto terminale dell'Ombrone (Fig 3.5) che è incassato per 3.5 km fra boscosi rilievi collinari in uno stretto e sinuoso tratto. Nel corso dei lavori tutto questo tratto è stato mappato, estendendo poi i rilievi ad altri 4.0 km nella zona pianeggiante che unisce l'area incassata al centro abitato di Poggio a Caiano, per un totale di 7.5 km su 47 km complessivi. Praticamente il tratto analizzato corrispondente a tutto il suo sviluppo nel territorio provinciale fiorentino e termina alla confluenza con l'Arno, del quale è affluente destro.

I suoi principali corsi d'acqua tributari sono soprattutto nel comune di Pistoia e Quarrata e a causa di essi, che ne aumentano la portata in autunno, l'Ombrone contribuisce notevolmente,

alle piene dell'Arno. Grazie a questa caratteristica esso nel passato venne usato, allo stesso modo dell'Arno, come via di trasporto che tuttavia fu abbandonata nel XIX secolo. Il tratto effettivamente praticabile, con l'esclusione dei periodi di magra estiva, era proprio quello che partiva dalla confluenza nell'Arno fino allo scalo di Poggio a Caiano. Nel XIV secolo tale tratto venne usato per abbreviare il trasporto della lana verso Prato. Lungo questo torrente hanno viaggiato anche molti materiali da costruzione e tra il XVI ed il XIX fu alquanto importante il trasporto minerali di ferrosi provenienti dalle cave dell'isola d'Elba.



Fig. 3.5 - Il torrente Ombrone

Il Bisenzio (Fig 3.6) è stato rilevato per 13 km su un totale di 47 km, dal confine tra la Provincia di Prato e quella di Firenze, attraverso il comune di Campi Bisenzio ed infine quello di Signa fino alla confluenza con l'Arno. Esso scarica le proprie acque in destra idrografica del fiume Arno, costringendolo a formare un'ampia ansa verso sud che lambisce elevati rilievi collinari. Questo torrente sfocia a monte di un'area densamente urbanizzata (Ponte a Signa e Signa) che fin dai primi insediamenti ha sempre avuto il problema di difendersi contemporaneamente sia dalle piene dell'Arno che da quelle del Bisenzio. La sua pericolosità è dovuta principalmente al fatto è che esso ha un regime spiccatamente torrentizio, ma è anche legata all'estremo restringimento ed incanalamento che esso ha subito nel corso del tempo. Il Bisenzio infatti quando entra nel comune di Campi Bisenzio vede diminuire il proprio alveo in maniera sensibile, nonostante le sue acque ricevono ancora quelle di alcuni importanti corsi d'acqua. Ad esempio il torrente Marinella raggiunge il Bisenzio in località Capalle ed il Marina presso il capoluogo. A San Mauro a Signa riceve invece le acque del Fosso Macinante



provenienti direttamente dall'Arno tramite la pescaia di Santa Rosa, posta ad una distanza di circa 8 km nel centro di Firenze. Numerosi sono gli allagamenti ed le inondazioni che ancora oggi si ricordano. Ad esempio dopo un'alluvione nel 1630, venne inviato sul Bisenzio addirittura Galileo Galilei il quale si dichiarò contrario ad interventi di raddrizzamento delle anse presenti nel tratto a valle di Prato e favorevole invece ad interventi localizzati di pulizia dell'alveo (Westfall, 1989). In tempi più recenti invece solo nel XX secolo si sono verificate tre alluvioni disastrose: nel 1926 (Campi Bisenzio); il 4 novembre 1966 (Campi Bisenzio e Signa) e nel 1991 (Campi Bisenzio) (Becchi *et al.*, 1995). Sebbene si tratti di un fiume minore, il Bisenzio ha comunque avuto l'onore di essere menzionato in alcune opere della letteratura italiana (Dante Alighieri nella *Divina Commedia, Inferno*, Canto XXXII, vv. 40-60, Gabriele D'Annunzio nelle "*Laudi*", "*Elettra*" , "*Le Città del Silenzio*", Curzio Malaparte nei "*Maledetti Toscani*") senza riferimento in questo caso ad eventi disastrosi.



Fig. 3.6 - Il torrente Bisenzio

Il torrente Marina (Fig 3.7) è affluente sinistro del fiume Bisenzio e gli studi in questo torrente sono stati realizzati a partire dalla confluenza col Bisenzio per un tratto lungo 3 km, su un complessivo di 13 km, di cui tutti nel comune di Campi Bisenzio. Il Marina entra nel territorio comunale di Campi Bisenzio in località Le Prata, riceve le acque del Garille Nuovo e confluisce nel Bisenzio nei pressi della località di Fornello. Tutto il tratto analizzato presenta, come ogni altro corso d'acqua di pianura, importanti difese longitudinali che nei tratti industriali attraversati sono caratterizzati da veri e propri muri d'argine o rilevati in terra rinforzati internamente da spessi muraglioni tali da far assumere al torrente i caratteri

morfologici tipici di un canale artificiale dall'alveo piatto e fortemente incassato. Negli anni passati una serie di eventi alluvionali hanno colpito il tratto vallivo del torrente Marina. Tra questi si ricorda l'evento del 1991, del 1993 e recentemente quello del 1999. Tra i tre citati, l'evento del 1993 è stato certamente il più dannoso, poiché provocò dissesti nell'alveo e danni ingenti alle difese idrauliche, oltre all'inondazione di alcuni stabilimenti in sinistra idraulica (Officine Galileo). In seguito a questi episodi sono stati studiati dalle amministrazioni locali alcuni interventi strategici per la riduzione del rischio idraulico, quali il rafforzamento e la riqualifica dei manufatti arginali, ma soprattutto l'attivazione di alcune casse di espansione nei tratti pedemontani. L'intento di quest'ultime è quello di laminare le portate in arrivo ai tratti vallivi che risultano anche essere i tratti più critici, specialmente in corrispondenza di alcuni vecchi ponti che non sono in grado di smaltire correttamente abbondanti deflussi liquidi.



Fig 3.7 - Il torrente Marina

La Greve (Fig 3.8) è stata rilevata invece per 4 km su un totale di 43 km dal centro di Scandicci fino alla foce, che è situata in sinistra idrografica dell'Arno ad un chilometro a monte della località Ugnano nel comune di Firenze. Questo torrente attraversa un tratto pianeggiante che, data la vicinanza alle maggiori città della piana fiorentina, ma soprattutto alle principali vie di comunicazione, ha subito da sempre una forte urbanizzazione. Per proteggere da una possibile esondazione le infrastrutture, che sono state costruite sempre più a ridosso del torrente, sono state realizzate nuove opere idrauliche o rinforzate quelle preesistenti. Principalmente si tratta di opere longitudinali, quali argini, muri e rivestimenti spondali che hanno artificializzato e irrigidito il fiume facendogli perdere progressivamente la sua funzionalità ecosistemica. Nel

1929 ad esempio venne modificato per motivi di sicurezza il corso della Greve in prossimità della attuale Piazza Marconi, dando origine all'area così come la conosciamo oggi.



Fig 3.8 - Il torrente Greve

Il torrente Mugnone (Fig 3.9) è stato mappato per 6 km su 17.5 complessivi dal quartiere fiorentino delle Cure fino alla confluenza con l'Arno del quale è tributario di destra. Nasce nelle colline a nord est di Firenze, in comune di Fiesole, bagna la periferia di Firenze e, dopo aver ricevuto le acque dal suo principale affluente (Terzolle) e aver costeggiato il parco fiorentino delle Cascine, si getta nell'Arno in prossimità del Viadotto dell'Indiano. Ha un regime idrologico tipicamente torrentizio, con piene insidiose durante l'autunno. In condizioni meteorologiche particolari di forte piovosità si è spesso verificata l'esondazione del torrente con gravi danni agli edifici circostanti e disagi alla popolazione. L'ultimo di questi eventi avvenne nella zona dello Statuto nel 1992 (Becchi *et al.*, 1995), spingendo l'amministrazione locale ad una maggiore attenzione per queste aree.

In origine il Mugnone sfociava nell'Arno nei pressi dell'attuale Ponte Vecchio e la confluenza tra i due fiumi, assieme alle possibilità di guado, fu probabilmente la causa della scelta del sito per l'edificazione della città romana. Nel Medioevo il fiume fu deviato verso nord-ovest per riempire i fossati prospicienti alle mura della terza cerchia; Porta a San Gallo e Porta a Faenza erano infatti munite all'esterno di un ponte per scavalcarne la corrente (ARPAT, 2007). Nell'area occupata dalle suddette porte nel 1534 si iniziò a costruire la fortezza da Basso ed il corso del Mugnone venne nuovamente deviato fino al suo congiungimento col Terzolle, che fino ad allora sfociava direttamente in Arno. Da allora lungo questo tracciato si sono succeduti



numerosi interventi antropici per aumentare la sicurezza delle aree urbane che progressivamente si sono sviluppate tutto intorno, perdendo nel contempo qualsiasi connotazione di naturalità. Le opere realizzate consistono principalmente in modificazioni della sezione (allargamento/restringimento dell'alveo), costruzione di argini cementificati e successivi rinforzi, opere trasversali e difese spondali costituite per lo più da muri in pietrame di diverse altezze e pesanti rivestimenti in calcestruzzo. La presenza costante di argini di cemento, insieme alle frequenti pulizie fluviali, non permettono l'instaurarsi di una fascia di vegetazione perifluviale, e spesso neanche di un sottile tappeto erboso sulle sponde. Nell'area cittadina il fondo si presenta spesso impermeabilizzato o profondamente alterato, anche a causa delle numerose traverse che bloccano il sedimento, ridotto quindi a sabbia e limo, incapace di trattenere la sostanza organica (ARPAT, 2007).

Il percorso cittadino del Mugnone è stato condizionato a tal punto che il torrente si riduce ad una lamina d'acqua più o meno omogenea dove meandri, raschi e pozze sono del tutto assenti. In queste condizioni viene a mancare anche l'eterogeneità ambientale indispensabile per la comunità acquatica, che necessita di microhabitat di diverso tipo per poter svolgere le varie funzioni vitali. Alcuni tratti sono stati trasformati in canali trapezoidali di cemento, dove nelle stagioni estive le acque diventano stagnanti, povere di ossigeno e maleodoranti. La vegetazione fluviale sia riparia che acquatica è stata oggetto negli anni di tagli indiscriminati, in quanto considerata come un fattore di rischio per l'erosione, per l'aumento della scabrezza dell'alveo e delle aree golenali e per la possibile ostruzione di ponti in caso di piene.



Fig. 3.9 - Il torrente Mugnone

Il torrente Terzolle (Fig 3.10) è stato rilevato risalendo il corso dalla foce per 1.5 km all'interno della città di Firenze e attualmente è il principale affluente del torrente Mugnone, nel quale confluisce in destra idrografica in corrispondenza del Ponte di San Donato. Il suo nome deriva da una pietra sulla via Cassia Nuova, che segnava il terzo miglio da "Florentia", ma anticamente ricevette l'appellativo di Rivus frigidus (Rio freddo) a causa delle sue fredde acque durante tutto l'anno, dal quale è poi derivato il nome del quartiere di Rifredi. Dopo aver superato il Ponte di Mezzo attraverso una soglia che rende il fondo stabile il Terzolle si unisce al Mugnone, all'altezza del Ponte di San Donato. Il corso d'acqua che ne deriva prosegue mantenendo il nome di Mugnone fino alla confluenza con il fiume Arno. In origine il Terzolle aveva un percorso diverso poiché arrivava a sfociare in Arno all'altezza di Ponte alle Mosse. Con la costruzione della Fortezza da Basso nel 1535 il ramo dell'Arno in cui si immetteva il Terzolle fu prosciugato, il torrente fu forzato a piegare verso l'attuale foce e contemporaneamente il Mugnone venne deviato fino ad incrociare il Terzolle al Ponte di San Donato (ARPAT, 2007).



Fig. 3.10 - Il torrente Terzolle

Il Vingone (Fig. 3.11) infine, affluente sinistro del fiume Arno, è stato rilevato per 7 km interamente nella pianura di Scandicci dalla foce fino alla località Ponte a Vingone. Esso incrocia, lungo il suo percorso, importanti vie di comunicazione (l'Autostrada A1 e la Strada di Grande Comunicazione FiPiLi) e da il nome ad un popoloso quartiere della periferia di Scandicci. Per lunghi tratti è un torrente pensile con argini in gran parte cementificati e rettificati, come del resto lo sono quasi tutti i torrenti analizzati. Al di sopra dei suoi argini

cementificati non cresce nessun tipo di vegetazione ripariale che possa consentire un minimo di autodepurazione dell'acqua che per gran parte dell'anno è maleodorante.



Fig. 3.11- Il torrente Vingone

## 4. MAPPATURA DI DETTAGLIO

### 4.1 INTRODUZIONE

#### 4.1.1 INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA

Le metodologie operative per realizzare un monitoraggio geomorfologico di dettaglio in estese fasce perfluviali che sia rappresentativo della reale componente ecologica e del rapido sviluppo urbanistico, devono mantenere caratteristiche di rapidità operativa sia sul campo sia in fase di post elaborazione. Esse devono altresì far uso di una strumentazione che riesca ad determinare con precisione gli oggetti, ma al contempo è necessario che essi mantengano caratteristiche di versatilità d'impiego poiché le unità da rilevare hanno di volta in volta una geometria, una densità distributiva ed una integrazione diversa nel territorio.

Per quanto riguarda la parte descrittiva degli oggetti sono state create delle apposite schede monografiche che fossero adatte a classificare l'ambiente geomorfologico in questione e le cui informazioni fossero facilmente convertibili in ambiente GIS. Per quanto riguarda invece la georeferenziazione degli elementi si è presentato il problema di individuare lo strumento più idoneo alle nostre finalità e che oltretutto fosse in grado di restituire prodotti finali compatibili con i dati ancillari a disposizione (foto aeree, carte tecniche regionali, carte topografiche di base, carte tematiche).

#### 4.1.2 INDIVIDUAZIONE DELLE METODOLOGIE: TEST DI PROVA

La ricerca di tecniche analitiche che fossero in grado di effettuare rilievi geomorfologici secondo le modalità sopra descritte ha portato a selezionare due tipi di strumentazioni, entrambe utilizzabili direttamente da terra: Laser scanner 3D (Heritage & Hetherington, 2005, 2007; Seed *et al.*, 2005; Milan *et al.*, 2007; Nasermoaddeli & Pasche, 2008) ed un sistema di posizionamento globale (GPS) di tipo geodetico (Peyret *et al.*, 2000; Campana, 2006a; Xiao *et al.*, 2006; Kinzel, 2008). Per scegliere quale dei due apparecchi fosse più indicato è stato effettuato con entrambi un test di prova in un settore di sponda sul corso dell'Arno. L'area analizzata è situata sulla destra idrografica nel tratto compreso tra ponte San Niccolò e ponte Giovanni da Verrazzano per un'estensione di circa 850 m (Fig. 4.1).





Fig. 4.1 - Area di test

Il rilievo laser scanner è stato effettuato con unica scansione da un punto centrale situato sulla riva opposta (Fig. 4.1 e 4.2) in modo tale che fosse possibile comprendere con un'unica scansione tutta l'area di test. La mappatura GPS invece è stata invece eseguita direttamente sul luogo di indagine (Fig. 4.1 e 4.3) a distanza di pochi minuti dalla prova precedente. Lo strumento è stato utilizzato in modalità differenziale in tempo reale.



Fig. 4.2 - Sito da cui è stata effettuata la scansione con il Laser Scanner (strumento utilizzato Riegl LMS-Z420i)



Fig. 4.3 - Porzione orientale dell'area di test. In primo piano uno dei riflettori utilizzati per la scansione con il Laser Scanner

In entrambi i casi gli strumenti hanno evidenziato buoni risultati, dimostrandosi in grado di fornire abbastanza rapidamente i dati base necessari per ricostruire un accurato modello digitale delle aree osservate (Fig. 4.4 e 4.5).

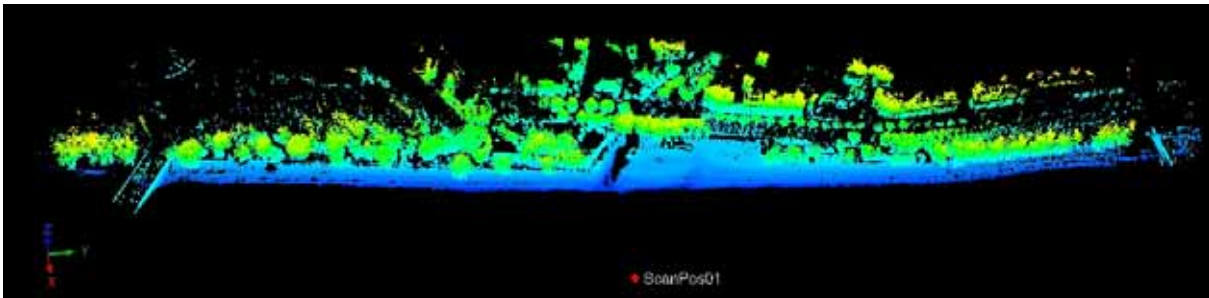


Figura 4.4 – Nuvola di punti ottenuta dalla scansione laser ed elaborata con il software RISCANPRO. La loro densità dei punti è maggiore al centro perché più vicina al punto di emissione del fascio laser ed inferiore alle estremità.



Fig 4.5 – punti rilevati con strumentazione GPS direttamente sugli oggetti di interesse selezionati al momento della misurazione.

Tuttavia poiché il Laser Scanner è utilizzato dall'operatore da una certa distanza non è sempre possibile di discriminare immediatamente, e talvolta neanche in fase di elaborazione, ogni oggetto presente sulla sponda a causa della sua posizione od orientazione. Infatti non sempre il segnale emesso dallo strumento riesce a raggiungere ogni parte dell'area indagata, creando delle zone d'ombra che non possono essere eliminate se non effettuando una nuova scansione da una posizione più favorevole ed integrandola con la precedente (Fig. 4.6 e 4.7). Questa soluzione però non è sempre applicabile ad un ambiente fluviale a causa del suo sviluppo geometrico lineare, dei suoi profili trasversali e della vegetazione riparia talvolta presente. Oltretutto il crescere del numero delle operazioni di scansione rallenta il tempo di avanzamento del rilievo totale. Infine le misure devono subire un ulteriore processamento legato alla georeferenziazione della nuvola di punti scansionati e solo a tal punto si può passare alla discriminazione degli elementi di interesse.

Al contrario l'operatore GPS ottiene immediatamente punti di coordinate noti e, trovandosi fisicamente sugli oggetti che egli stesso sta rilevando, riesce in poco tempo a caratterizzarli, sintetizzandone da subito gli elementi morfologici principali (linea del ciglio di sponda, contorno di un'opera idraulica, ecc.) (Fig 4.8). Nell'evenienza colui che utilizza lo strumento

GPS è anche in grado di rintracciare gli oggetti che sono occultati da piccoli movimenti di terreno o nascosti dalla vegetazione. Per di più esso è in grado di riempire immediatamente le schede monografiche risparmiando molto tempo nelle successive fasi di post elaborazione, che quindi si riducono soltanto a una restituzione grafica del dato.

Pertanto, se da un lato il Laser Scanner riesce a fornire un modello tridimensionale veramente di alto dettaglio, dall'altro, a causa della sua ridotta versatilità, necessita di tempi maggiori per rilevare tutta l'area di indagine e di una post elaborazione abbastanza complessa soprattutto in fase di caratterizzazione degli elementi di interesse. Dunque il laser scanner sembra più adatto alla localizzazione delle deformazioni degli argini e quindi allo studio della loro stabilità e non ad effettuare la definizione geomorfologica richiesta in questo progetto, come è invece in grado di fare la strumentazione GPS. Nel paragrafo successivo approfondiremo gli aspetti tecnici principali relativi a questa strumentazione.



Fig 4.6 – Ingrandimento della nuvola di punti nella porzione centrale. L'immagine è colorata in valori RGB tramite una macchina fotografica digitale appositamente calibrata e installata in testa allo strumento



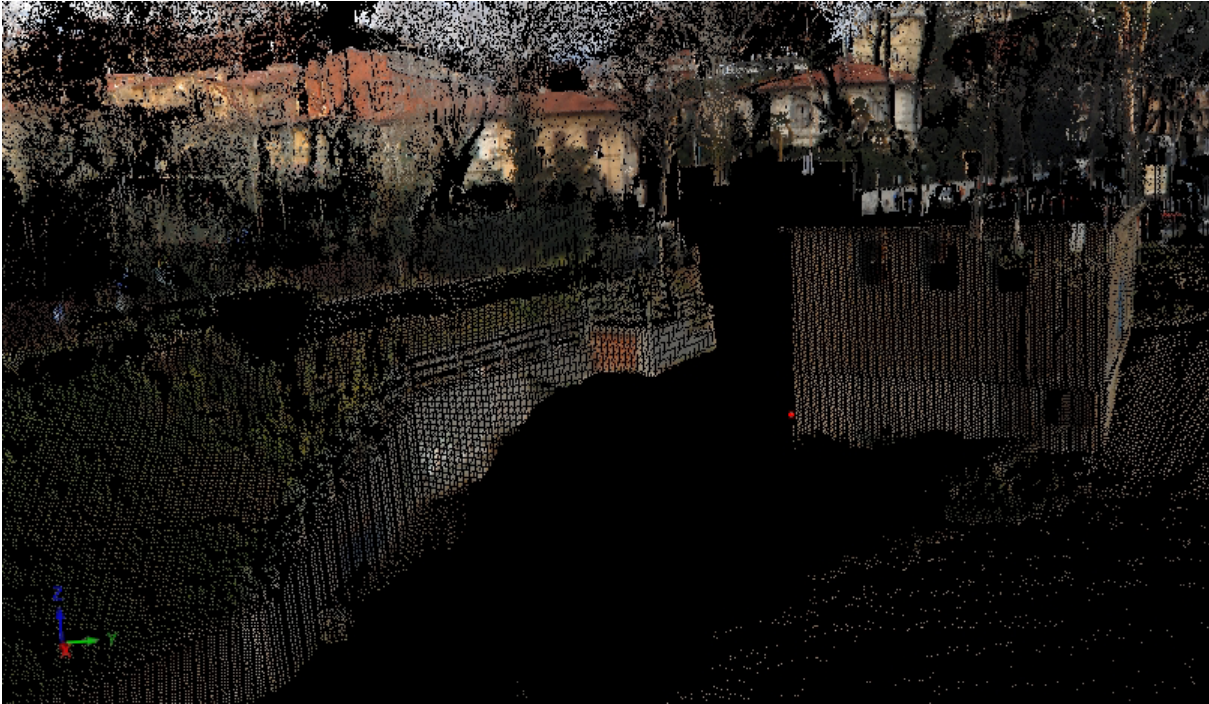


Fig 4.7 – Immagine di dettaglio nella zona d’ombra della porzione centrale

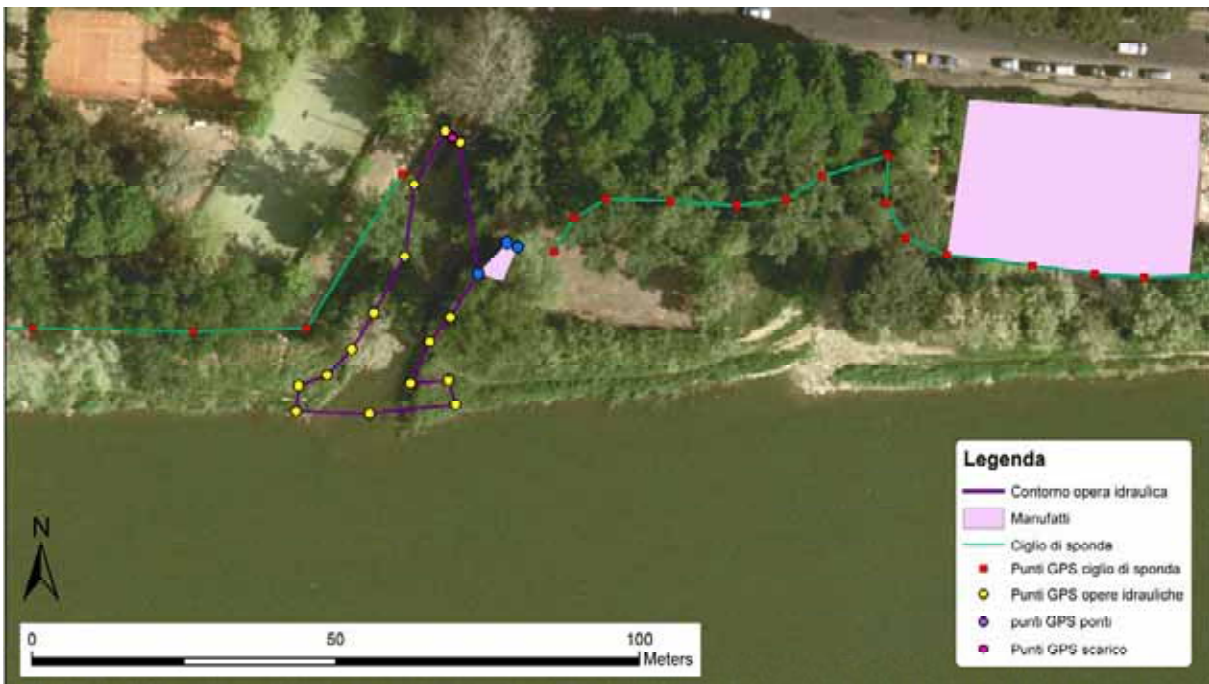


Fig. 4.8 - Caratterizzazione degli elementi morfologici principali attraverso la registrazione dei punti significativi con strumentazione GPS.



## 4.2 COMPOSIZIONE DEL SISTEMA GPS

IL GPS (Global Positioning System) a sua volta abbreviazione di NAVSTAR GPS, acronimo di NAVigation System Time And Ranging Global Positioning System, è un sistema di posizionamento su base satellitare, a copertura globale e continua, attualmente gestito dal dipartimento della difesa statunitense. Il suo funzionamento è essenzialmente legato alla attività di tre principali segmenti così articolati:

- Space segment: i satelliti in orbita attorno alla Terra,
- Control segment: le stazioni di monitoraggio sulla Terra,
- User segment: le riceventi GPS sulla Terra.

### 4.2.1 SPACE SEGMENT: I SATELLITI

Il segmento riguardante lo spazio è composto da una costellazione di 31 satelliti orbitanti posti su 6 orbite circolari e parallele inclinate di  $55^\circ$  rispetto al piano equatoriale (Fig. 4.9) (<http://tycho.usno.navy.mil>). I satelliti orbitano ad un'altezza operativa che varia da 18000 a 22000 Km e compiono due rotazioni del pianeta al giorno con un periodo di rivoluzione è di 11 ore e 58 minuti ad una velocità di 11.250 km/h circa. Ciò significa che, ogni giorno, ad una determinata ora, in un determinato punto della Terra, non saranno visibili sempre gli stessi satelliti, con la stessa disposizione nello spazio. Le orbite dei satelliti sono state comunque studiate in modo che in ogni momento ogni punto della terra venga visto da almeno 4 satelliti contemporaneamente per la durata di 5 ore consecutive (Fig. 4.10).



Fig. 4.9 - Costellazione Navstar



Fig. 4.10 - Immagine tratta da Google Earth © di una possibile distribuzione dei satelliti in orbita rispetto ad una stazione a terra.

Il sistema GPS è diventato completamente operativo nel 1994, quando sono diventati funzionanti i 24 satelliti previsti dalle specifiche di sistema che prevede tre strumenti sempre attivi e uno di riserva su ogni piano orbitale. Esso viene mantenuto in massima efficienza con il lancio di nuovi satelliti che sostituiscono i vecchi, guasti od obsoleti. I satelliti, almeno quelli delle prime generazioni, sono stati concepiti per avere una vita operativa di 7 anni, ma a oltre 20 anni dai primi lanci sono ancora operativi alcuni vecchi satelliti, spiegando il così alto numero di apparecchi utilizzabili. Considerando tutti i satelliti che sono stati finora in orbita, possiamo distinguere cinque tipi di satelliti: Block I, Block II, Block IIA, Block IIR e Block IIR-M. Attualmente siamo arrivati alla terza generazione di strumentazione (Block III).

Ogni satellite porta a bordo:

- Un orologio atomico di estrema precisione (che è alla base del sistema).
- Un computer di controllo.
- Un sistema di trasmissione radio ad onde ultracorte.
- Un sistema di controllo di assetto.

#### 4.2.2 CONTROL SEGMENT: STAZIONI DI MONITORAGGIO

Il segmento di controllo è formato da cinque stazioni di monitoraggio a terra gestite dalla U.S. Army. La stazione di controllo/monitoraggio principale si trova alla Schriever Air Force Base (AFB), Colorado Springs, USA, mentre le altre si trovano sulle Hawaii, sulle isole Ascension, su Diego Gracia e su Kwajalein e di esse si conosce con grande precisione la loro posizione. L'isole di Ascension, Diego Garcia e Kwajalein sono inoltre dotate di tre antenne terrestri, mentre a Colorado Springs si trova una stazione master. A partire dal mese di settembre del 2005 sono entrate in funzione altre sei stazioni di monitoraggio, gestite dalla NGA (National Geospatial-Intelligence Agency - Agenzia Nazionale di Intelligenza Geospaziale). Le posizioni di queste undici stazioni di monitoraggio sono raffigurate nella figura 4.11.



Fig. 4.11 – Dislocazione del segmento di controllo a terra

Attualmente, ogni satellite può essere visto contemporaneamente da almeno due stazioni di monitoraggio, permettendo di verificare lo stato dei satelliti (guasti o malfunzionamenti), controllare la sincronizzazione dei loro orologi atomici e calcolare la loro posizione orbitale con estrema precisione. In un prossimo futuro si vogliono aggiungere cinque nuove stazioni, in modo che ogni satellite possa essere visto contemporaneamente da almeno tre stazioni, permettendo un monitoraggio ancor più accurato.

Tutte le stazioni di monitoraggio eccetto quella principale a Colorado Springs sono passive, e consistono semplicemente in ricevitori statiche che ascoltano il segnale L1 dei satelliti visibili. I dati raccolti vengono poi mandati alla MCS (Master Control Station) di Schriever AFB per essere analizzati e processati. Le stazioni sulle isole Ascension, Diego Garcia e Kwajalein, oltre a ricevere dati, sono pure in grado di trasmettere dati di correzione ai satelliti via il segnale TT&C (Telemetry, Tracking and Commanding).

La Stazione di controllo/monitoraggio principale processa continuamente i dati ricevuti dalle stazioni di monitoraggio per ottenere tutte le informazioni riguardanti la traiettoria e il funzionamento dei satelliti. Per i satelliti precedenti a quelli Block IIR, essa aveva pure il compito di generare i dati di navigazione, mentre al giorno d'oggi, grazie al sistema AUTONAV, `e sufficiente sorvegliare ed eventualmente correggere i parametri. Inoltre, se un satellite `e fuori orbita oppure malfunzionante, è possibile disattivarlo temporaneamente finché il problema è stato risolto. I parametri di correzione vengono solitamente inviati giornalmente ai satelliti tramite il link TT&C dalle stazioni di monitoraggio delle isole Ascension, Diego Garcia o Kwajalein (Dana, 1997). Una lista di tutti i compiti svolti dalla Master Control Station sono elencati nella figura 4.12

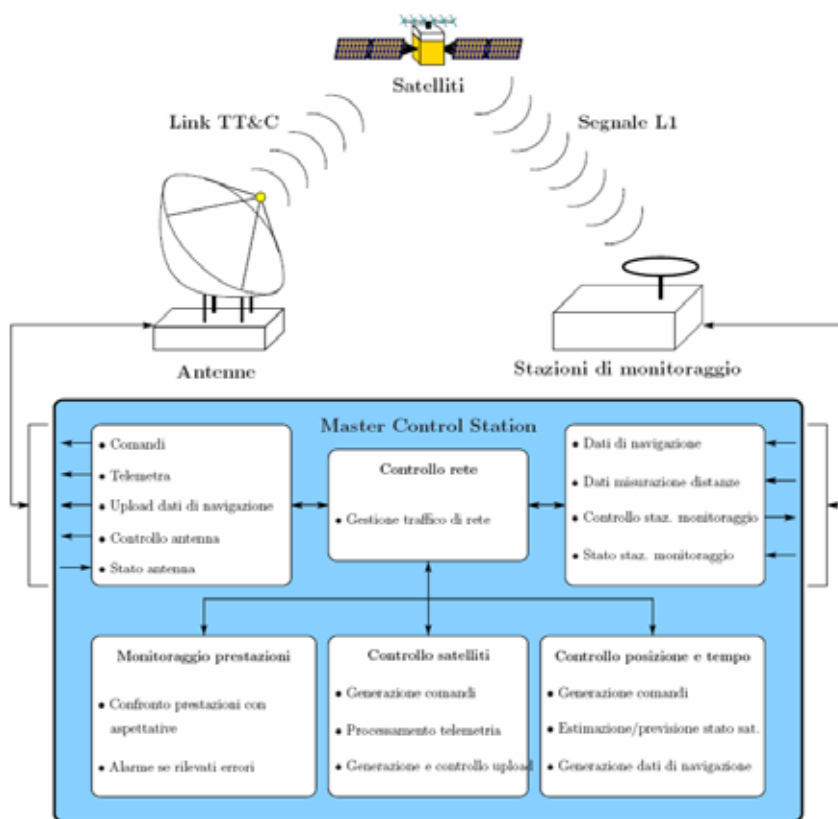


Fig. 4.12: Compiti svolti dalla MCS

Senza queste stazioni terrestri che operano costantemente il sistema non sarebbe in grado di funzionare.

#### 4.2.3 USER SEGMENT: RICEVENTI GPS

Le riceventi GPS consistono semplicemente in un'antenna e di un circuito elettronico, in grado di ricevere e interpretare i segnali mandati dai satelliti, e di un comune orologio a quarzo, che viene costantemente sincronizzato con gli orologi atomici dei satelliti. Oggigiorno, perfino le riceventi più semplici sono in grado di ricevere e processare i segnali di 12 satelliti parallelamente.

L'aspetto centrale delle riceventi consiste determinare la posizione planimetrica ed altimetrica di un qualunque punto sulla superficie del pianeta sia immobile che in movimento attraverso l'uso di sofisticati algoritmi. Infatti, di tutte le correzioni che è necessario apportare ai parametri necessari per calcolare la posizione, la maggior parte non sono costanti, e dunque devono essere calcolate dalle riceventi.

I sintesi tale strumento esegue le seguenti operazioni:

- Localizza 4 o più satelliti
- Calcola la distanza da ognuno dei satelliti
- Usa i dati ricevuti per calcolare la propria posizione.

#### 4.3 DETERMINAZIONE DELLA POSIZIONE

Il metodo usato per il calcolo effettivo della posizione è la trilaterazione basata su uno spazio tridimensionale: si realizza sostanzialmente un' intersezione in avanti da punti noti dello spazio (i satelliti). In questo modo però oltre che la distanza tra il punto da determinare e ciascuno dei satelliti utilizzati a tale scopo deve essere quindi nota la posizione nello spazio di ciascuno di tali satelliti al momento della misurazione. La loro orbita è difatti matematicamente definita e costantemente controllata dalle stazioni di monitoraggio a terra e quindi la posizione di ciascun satellite lungo la rispettiva orbita viene ricavata con precisione istante per istante (AAVV, 2005).

Il GPS receiver utilizzato dall'utente durante i rilievi riesce a comunicare con i satelliti analizzando le alte frequenze con cui essi trasmettono segnali a terra (le bande usate sono 1575.42 Mhz e 1227.60 Mhz). Per capire la distanza tra il receiver ed il satellite viene misurato il tempo che un segnale impiega per arrivare a terra. In pratica quando si impartisce allo strumento l'ordine di rilevare la posizione di un punto il GPS genera un codice (detto pseudo random code) che è identico a quello che costantemente genera il satellite ed invia sulla terra. Il GPS è in grado di riconoscere questi segnali ed individua quello partito alla stessa ora in cui lui stesso ha prodotto il codice. Con questi elementi il receiver è così in grado di misurare quanto tempo ha impiegato il segnale emesso dal satellite per arrivare e lo dobbiamo sapere con una precisione estrema visto che un solo millesimo di secondo di differenza potrebbe penalizzare la rilevazione con un errore nell'ordine dei 300 Km. Moltiplicando poi il tempo per la velocità della luce (300.000 km/s), alla quale viaggiano le onde radio, otteniamo la distanza tra il satellite ed il receiver GPS (AAVV, 2005).

Combinando misure di ritardo relative a più satelliti, il ricevitore determina la distanza (denominata pseudorange) tra sé e ciascun satellite ricevuto e quindi la propria posizione.

Conoscendo infatti la posizione nello spazio di un satellite, e la distanza a cui si trova il receiver, si può dedurre che la posizione dello strumento si colloca sulla superficie di una sfera

che ha come centro il satellite in questione, e raggio pari alla distanza da quel satellite. Ovviamente non è ancora possibile sapere su quale particolare punto della sfera esso si trovi. Per determinarlo, si può fare lo stesso ragionamento con un altro satellite e trovando un'altra sfera. Poiché la posizione del receiver è sia su una sfera che sull'altra, esso non potrà che trovarsi sulla circonferenza di comune intersezione tra le due sfere. Ancora però non è possibile determinare il punto: serve un terzo satellite e quindi un'altra sfera. Quest'ultima va ad intersecare la circonferenza prima individuata in soli due punti: uno è quello giusto, e l'altro è una "falsa soluzione". Il sistema GPS utilizza varie tecniche per individuare quale dei punti suddetti è quello corretto: ad esempio valutando la congruenza tra più calcoli ripetuti nel tempo in modo tale che la soluzione giusta resta coerente, mentre l'altra segue andamenti improbabili e quindi può essere scartata. Tuttavia quello che in questo modo si riesce a determinare è soltanto una posizione bidimensionale (latitudine e longitudine). Per accrescere la precisione della misura e determinare la relativa altezza sul livello del mare si deve far ricorso ad un quarto satellite che, oltre a determinare univocamente la posizione del GPS su uno dei due punti individuati, servirà a correggere la sincronia dell'orologio del ricevitore (meno preciso di quello dei satelliti) diminuendo notevolmente l'errore sulla misura del tempo (Cabrucci, 1996). Poiché la misura della distanza avviene tramite la misura del tempo, tutti gli orologi dovrebbero essere sincronizzati perfettamente, ma mentre gli orologi dei satelliti possono essere ritenuti sincronizzati, ciò non è possibile per i ricevitori, quindi si deve introdurre come ulteriore incognita lo sfasamento dei tempi tra le scale dei due orologi. In definitiva il sistema di equazione necessario per determinare un punto è composto da quattro equazioni in quattro incognite (X,Y,Z,t) che richiede la presenza di almeno quattro satelliti

$$\begin{cases} \rho_1 = \sqrt{(x_{s_1} - x_u)^2 + (y_{s_1} - y_u)^2 + (z_{s_1} - z_u)^2} + c \cdot t_u \\ \rho_2 = \sqrt{(x_{s_2} - x_u)^2 + (y_{s_2} - y_u)^2 + (z_{s_2} - z_u)^2} + c \cdot t_u \\ \rho_3 = \sqrt{(x_{s_3} - x_u)^2 + (y_{s_3} - y_u)^2 + (z_{s_3} - z_u)^2} + c \cdot t_u \\ \rho_4 = \sqrt{(x_{s_4} - x_u)^2 + (y_{s_4} - y_u)^2 + (z_{s_4} - z_u)^2} + c \cdot t_u \end{cases}$$

Agli inizi dell'impiego in ambito civile il margine di errore sul calcolo delle posizioni fu volutamente mantenuto, per ragioni di sicurezza, attorno ai 100 metri (disponibilità differenziata). Oggigiorno i comuni ricevitori GPS hanno un margine di errore di 10-20 metri, mentre quelli più recenti e accurati hanno un margine ancora più basso (pochi metri).

I motivi che determinano un tale errore in un sistema così sofisticato e preciso sono molteplici e possono anche sommarsi tra loro (Tranquilla, 1986; Kaplan, 2005):

**errori orbitali:** i satelliti potrebbero essere leggermente fuori rotta. Le principali cause di perturbazione delle orbite sono la Disomogeneità della Terra, Attrazione Lunare, Altri termini di campo gravitazionale, Attrazione Solare, Pressione di radiazione diretta, Effetti di maree.

**ritardo atmosferico:** il segnale dei satelliti rallenta attraversando l'atmosfera. Nella Ionosfera si hanno diffusi fenomeni di riflessione che portano il segnale a seguire un percorso che è leggermente più lungo rispetto ad una linea retta. Questo comporta un errore che va dai 2 ai 10m. Nella troposfera invece è presente una forte rifrazione del segnale che induce un errore persino più alto (20-50m). Il sistema viene corretto con un calcolo di ritardo medio, che quindi non è preciso.

**orologio del ricevitore/satellite:** l'orario del ricevitore GPS potrebbe non essere perfettamente sincronizzato con l'orologio atomico. Per ottenere una precisione molto elevata, ogni satellite imbarca costosissimi orologi atomici, che sfruttano le oscillazioni degli atomi di cesio e rubidio e che garantiscono uno standard di precisione assoluto. E' ovvio che in un sistema così preciso anche il receiver deve avere degli standard di un certo livello. Considerando che un ricevitore non può montare orologi atomici dello stesso tipo, si è pensato di usare orologi capaci di mantenere un estrema precisione per brevi periodi che però nel tempo vanno spesso corretti sfruttando direttamente i segnali dei satelliti.

**errori dovuti agli algoritmi impiegati per il calcolo della posizione:** L'enorme massa di dati ricevuti dai satelliti viene elaborata a terra per la previsione dell'orbita. Considerato che il calcolo è effettuato da stazioni che fanno capo a diversi consorzi e che hanno diverse modalità di calcolo si possono originare previsioni leggermente diverse. I ricevitori sul mercato possono inoltre operare con algoritmi diversi giungendo anche in questo caso a risultati diversi.

**errori dovuti alla posizione del ricevitore:** i segnali GPS possono venire riflessi da alti edifici o da montagne prima di raggiungere il ricevitore. In presenza di superfici riflettenti l'onda elettromagnetica può generare un percorso maggiore del segnale (multipath) inducendo in una stima della distanza del satellite maggiore di quella reale. Inoltre la presenza di forti interferenze elettromagnetiche può limitare l'orizzonte radio del ricevitore ed oscurare il segnale. Tutto questo fa sì che il sistema si adatti malamente a misure in luoghi particolari come ad esempio l'interno di una città.

**geometria satellitare:** più i satelliti cui si è collegati sono distanti tra loro, maggiore è l'accuratezza delle misurazioni. Viceversa, più sono raggruppati, minore potrebbe risultare la precisione. La geometria assunta dai satelliti influenza la misura sia a causa degli angoli descritti dai segmenti percorsi idealmente dai segnali che congiungono i satelliti al ricevitore (minore sarà l'angolo tra i segnali maggiore sarà l'errore di misura) sia a causa delle perturbazioni (riflessione e assorbimento) generate sulla trasmissione dalla ionosfera e dalla troposfera. In quest'ultimo caso maggiore sarà l'angolo di ingresso del segnale nell'atmosfera (relativamente all'orizzonte) minore sarà l'errore introdotto. La migliore geometria di ricezione è comunque costituita da un satellite posizionato allo zenit dell'osservatore e dagli altri tre posizionati con un angolo di  $120^\circ$  tra di loro.

**numero dei satelliti visibili:** più sono i satelliti "in vista" del ricevitore GPS, maggiore sarà la precisione di posizionamento. Edifici, montagne, interferenze elettromagnetiche e anche il denso fogliame degli alberi possono bloccare la ricezione del segnale provocando un errore di posizionamento o addirittura il mancato posizionamento.

**errori generati dall'operatore:** sono in genere dovuti a una cattiva valutazione del luogo di ricezione, a una errata impostazione del GPS come ad esempio l'utilizzo di un Datum non ideale per il luogo di rilevamento e alla sensibilità dell'operatore stesso. Nel caso di interruzione del segnale occorre attendere un certo periodo di tempo per consentire allo strumento di ricaricare i dati orbitali dei satelliti ed ottenere nuovamente dati sufficientemente precisi, un'eccessiva oscillazione dei dati (ad esempio sul decimo di secondo di grado) dovrebbe consigliare di attendere la loro stabilizzazione compatibilmente con le possibilità dello strumento.



Negli ultimi anni le nuove tecnologie hanno tuttavia permesso di costruire antenne sempre più sensibili e dotate di processori in grado di correggere molti degli eventuali errori. Tuttavia non riuscendo a compensare completamente gli errori indotti dai fenomeni fisici naturali le misure GPS sono sistematicamente affette da errore. Attualmente l'errore sulla posizione che si può ottenere può essere anche inferiore ai due metri. Per aumentare ulteriormente la precisione del sistema è stato creato negli USA un sistema di GPS differenziale (DGPS) basato su stazioni terrestri che a loro volta ricevono i segnali GPS, e conoscendo con grande precisione la loro posizione correggono gli errori dovuti soprattutto alla ionosfera e trasmettono le correzioni.

Infatti se due ricevitori sono ragionevolmente vicini sulla terra (ad una distanza che non superi i 200 Km), il segnale che entrambi ricevono viaggiando nell'atmosfera avrà virtualmente lo stesso errore. Pertanto la stazione invece di utilizzare il segnale per calcolare la posizione, utilizza la conoscenza della sua posizione per calcolare l'errore nel tempo. Calcola quale dovrebbe essere il ritardo del segnale e lo confronta con quello del segnale ricevuto. La differenza costituisce il fattore di correzione per gli errori sistematici che la stazione trasmette al ricevitore (Calzolaio, 2006).

#### 4.4 PROCEDURE OPERATIVE DI RILEVAMENTO

Le procedure operative utilizzabili nell'ambito delle applicazioni geo-topografiche del DGPS si distinguono in *statiche* e *dinamiche*. Mentre le procedure statiche prevedono che durante le osservazioni i due ricevitori rimangano fermi sugli estremi della base per tutto il tempo necessario all'acquisizione dei dati, le procedure dinamiche presuppongono l'effettuazione di spostamenti di ricevitori durante la sessione di acquisizione dei dati, allo scopo di determinare un numero maggiore di punti o basi in tempi più brevi (AAVV, 2005). Vediamo dunque in dettaglio le caratteristiche principali

##### **Modalità statiche:**

*1. Modalità statica.* Questa procedura operativa, che ha continuato ad essere per molti anni la principale modalità operativa GPS in campo geo-topografico, prevede l'esecuzione contemporanea delle osservazioni su due stazioni su cui i ricevitori restano fissi per tutta la durata della sessione. Le due stazioni costituiscono gli estremi della base o vettore, che viene determinata attraverso tali osservazioni. Questa procedura è quella che consente di ottenere la massima precisione ed è pertanto quella che, di norma, viene tuttora utilizzata per la

determinazione di punti destinati alla costituzione di una rete di inquadramento, al raffittimento di una rete esistente, e simili. Una sessione di osservazioni richiede in questo caso un tempo sensibilmente più lungo di quello richiesto dalle altre procedure operative. Per basi lunghe oltre 15 km il tempo di osservazione è normalmente di circa 5/6 ore secondo lo standard utilizzato dall'IGMI. Un rilevamento con procedura statica può essere eseguito sia utilizzando ricevitori a singola frequenza che ricevitori a doppia frequenza.

*2. Modalità statica veloce.* Questa procedura si utilizza solitamente per basi inferiori a 20km e dal punto di vista operativo è molto simile alla procedura statica, ma in questo caso il tempo di occupazione della stazione è sensibilmente più breve. In generale, per determinare le componenti della base (cioè i valori di AX, AY, AZ) il tempo di occupazione delle stazioni da parte dei ricevitori è di soli 5-20 minuti circa. Il tempo effettivamente necessario dipende dalla lunghezza della base e dalla configurazione dei satelliti e dal tipo di ricevitore (LI o L1+L2). Il vantaggio principale di questa tecnica è appunto la capacità di determinare una base con buona precisione in un periodo di tempo assai breve, senza che sia necessario mantenere agganciate le osservazioni ad un numero predeterminato di satelliti. In confronto con il rilevamento statico, questa procedura consente quindi una maggiore produttività, anche se, in termini di puro e semplice numero di basi che si possono determinare in uguale periodo di tempo, non raggiunge la produttività della procedura cinematica che viene descritta nel seguito. Essa però non presenta le restrizioni che, come vedremo, quest'ultima procedura comporta. La procedura statica veloce può essere utilizzata da sola, come la procedura statica, per il rilevamento di punti di inquadramento, od essere usata in combinazione con il rilevamento cinematico per fornire rapidamente, come si vedrà più avanti, un efficace mezzo per effettuare la reinizializzazione delle osservazioni durante il lavoro di campagna.

### **Modalità dinamiche:**

Tutte le procedure dinamiche consentono di muoversi durante la sessione del rilievo per raccogliere dati relativi a più punti o basi. Ciascuna delle modalità operative che rientrano in questa categoria si caratterizza per la maggiore o minore rapidità con cui il movimento da punto a punto può essere attuato e per la precisione raggiungibile.

*1. Modalità pseudo statica.* Questa procedura operativa richiede la effettuazione di separati interventi su ciascuna stazione. Ciascuno di questi due interventi deve avere la durata di

almeno 10 minuti e fra i due interventi deve intercorrere un intervallo di tempo di almeno un'ora e, comunque, non superiore a 4 ore.

In termini di produttività la procedura di rilevamento pseudo statica, detta anche pseudo cinematica, occupa una posizione intermedia fra le procedure statiche e cinematiche. Nei confronti della procedura statica, la pseudo statica consente una maggiore rapidità di esecuzione ma non consente di realizzare la stessa precisione. Essa è inoltre meno veloce della statica veloce e meno precisa di essa. In confronto alla procedura cinematica, invece, la procedura pseudo statica presenta una maggiore flessibilità perché non rende necessario rimanere costantemente in contatto con i satelliti durante gli spostamenti di un ricevitore da un punto ad un altro. Essa non è però altrettanto veloce. Questa procedura può, per esempio, essere usata in luogo della cinematica se l'uso di quest'ultima procedura è reso impossibile dalla presenza di ostruzioni lungo l'itinerario del ricevitore mobile, oppure essere usata in luogo della procedura statica veloce se non sono disponibili ricevitori adatti all'uso di tale modalità operativa. In generale è possibile usare tecniche di rilevamento pseudo statico da sole od in combinazione con procedure cinematiche per realizzare una maggiore produttività.

2. *Modalità cinematica.* In confronto alle precedenti procedure, il rilevamento cinematico riduce notevolmente i tempi necessari per determinare un vettore GPS. Un ricevitore viene collocato su un punto (per esempio un punto noto) e resta fermo su di esso mentre un ricevitore itinerante o mobile si porta sui vari punti da determinare fermandosi su ciascuno di essi il tempo necessario ad eseguire le osservazioni. In fase di elaborazione dei dati si può determinare una serie di vettori che vanno dal ricevitore di riferimento a ciascuno dei punti su cui è stato collocato il ricevitore mobile. Nel corso della sessione si devono seguire costantemente almeno quattro satelliti. L'aggancio a tali satelliti deve essere assicurato non solo in corrispondenza del ricevitore fisso ma anche lungo tutto l'itinerario del ricevitore mobile. La presenza di ostruzioni deve essere quindi tenuta nella massima considerazione nel programmare l'itinerario di questo ricevitore. Per questa ragione sono generalmente più adatte a questo tipo di rilevamento aree relativamente aperte. Come si vedrà più avanti, il rilevamento cinematico può essere attuato secondo differenti modalità le quali, pur essendo tutte basate sul principio sopra detto, differiscono fra loro per il modo in cui i ricevitori vengono utilizzati nell'ambito del rilievo.

Riassumendo l'adozione dell'una o dell'altra procedura operativa dipende essenzialmente dal tipo di rilevamento da eseguire. Nella tabella 4.1 sono indicati i principali settori di utilizzazione di ciascuna di tali procedure.

Modalità statiche		Modalità dinamiche	
Statica	Statica veloce	Pseudo statica	Cinematica
Determinazione di punti di rete, sottorete o raffittimento, determinazione di punti di appoggio per fotogrammetria	Determinazione di punti di raffittimento, determinazione di punti di appoggio per fotogrammetria, ecc.	Determinazione di punti di raffittimento, di punti di appoggio per fotogrammetria, ecc.	Rilevamenti di dettaglio, rilevamenti di modelli digitali del terreno, di profili, sezioni, ecc. Nella versione aeroportata è utilizzabile per la guida del volo di ripresa e la determinazione dei centri di proiezione delle aereo fotografie per il controllo di triangolazione aerea

Tabella 4.1 – sintesi delle procedure di rilevamento

#### 4.5 PRINCIPALI PROCEDURE OPERATIVE DI RILEVAMENTO CINEMATICO

Molti sono i modi per eseguire un rilevamento cinematica (AAVV, 2005):

**1. Stop and go.** Questa procedura viene portata avanti con un ricevitore mobile ed un ricevitore di riferimento. Quest'ultimo rimane fermo durante l'intero rilievo mentre il ricevitore mobile si porta, volta per volta, sui punti da determinare. Si possono anche usare più ricevitori, sia come ricevitori di riferimento che come ricevitori mobili ma, in ogni caso, nel rilevamento stop and go i ricevitori di riferimento vengono mantenuti sempre fermi.

**2. Leapfrog.** Secondo questa procedura, che letteralmente si traduce come il “salto della rana”, anche il ricevitore di riferimento si sposta ed il rilievo utilizza in tal modo multiple stazioni di controllo invece di consistere in un puro e semplice rilevamento per irradiazione da una stazione fissa come nel caso precedente. Anche in questo caso si ha un ricevitore che viene detto di riferimento ed un ricevitore mobile. Il rilievo inizia osservando una o più basi in una configurazione analoga a quella della procedura stop and go. Dopo che sono stati osservati alcuni vettori, il ricevitore mobile rimane fermo mentre il cosiddetto ricevitore di riferimento si porta sul prossimo punto. In questa procedura non si ha quindi un vero e proprio ricevitore di riferimento ed un ricevitore mobile ma si hanno in sostanza due ricevitori che si spostano in

modo analogo sull'area da rilevare. I ricevitori comunque non possono mai muoversi allo stesso tempo. Se questo avviene, le osservazioni devono essere nuovamente inizializzate.

**3. Continuo.** Nel rilevamento cinematico continuo la posizione del ricevitore mobile viene continuamente determinata mentre esso si muove. Si può usare la procedura cinematica continua anche per determinare la posizione di veicoli in moto, purché i ricevitori seguano costantemente quattro satelliti e venga mantenuta costante l'altezza dell'antenna. Il rilevamento cinematico continuo può essere utilizzato in combinazione con le procedure stop and go o leapfrog. Questa procedura è molto utile, per esempio, per il rilevamento di profili, sezioni, modelli digitali del terreno, ecc.

**4. In tempo reale (RTK).** Questa tecnica di rilevamento, relativamente recente, è frutto della costante evoluzione della tecnologia GPS sia nel settore della strumentazione che dei programmi di elaborazione dei dati. Mentre le procedure di rilevamento cinematico prima accennate prevedono che la elaborazione dei dati per la determinazione finale delle posizioni dei punti rilevati sia effettuata in ufficio, dopo le operazioni sul terreno, in questo caso la determinazione della posizione di ciascun punto rilevato viene effettuata direttamente in campagna in tempo reale, cioè al momento stesso in cui il punto da determinare viene occupato dal ricevitore mobile. Questa procedura di rilevamento è comunemente designata con l'acronimo RTKS (Real Time Kinematic Survey, cioè rilevamento cinematico in tempo reale) o, più semplicemente, RTK (Real Time Kinematic, cioè cinematico in tempo reale).

Il metodo prevede la utilizzazione di ricevitori a doppia frequenza, collegati fra loro via radio, o altro mezzo di comunicazione (ad esempio via GSM), e di registratore di dati dotato di appropriato software. Il ricevitore fisso (di norma collocato su un punto di posizione nota) comunica la sua posizione ed i dati satellitari al ricevitore mobile, che, in base ai dati suddetti, calcola in tempo reale la sua posizione rispetto al ricevitore fisso. Lo scambio dei dati fra la stazione fissa ed il ricevitore mobile viene effettuato in un appropriato formato. Questa tecnica di rilevamento, risulta particolarmente interessante per la esecuzione di operazioni topografiche di picchettamento, tracciamento e simili, per le quali i tempi di esecuzione vengono abbreviati in maniera considerevole. In questo tipo di rilevamenti risulta particolarmente interessante la disponibilità di ricevitori dotati dell'opzione OTF (On The Fly), che consente la inizializzazione automatica durante gli spostamenti.

#### 4.6 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Gli strumenti GPS utilizzati durante le campagne di misurazione sono due apparecchi Leica di tipo geodetico (DGPS modello SR530 e 1200), ricevitori a 24 canali doppia frequenza e con RTK integrato, che costituiscono le risorse tecniche di base per le operazioni di campagna in dotazione al Dipartimento di Scienze della Terra (Fig. 4.13 e 4.14).



Fig. 4.13 – strumentazione GPS Leica SR530



Fig. 4.14 – strumentazione Leica 1200



Essi sono entrambi caratterizzati da antenne a doppia frequenza dalla capacità di tracciamento indipendente di codice e fase L1/L2, che hanno consentito il rilievo degli elementi di interesse con un errore di localizzazione inferiore ai 5 cm sia in quota che nel posizionamento planimetrico. Tali imprecisioni si riferiscono ovviamente al sistema di coordinate nel quale lavorano gli strumenti (WGS84 basato sull'ellissoide geocentrico GRS80) e quindi nel momento in cui si proietta il dato dall'ellissoide al geoide si deve tenere conto che una certa quantità di errori si possono ulteriormente sommare nelle quote (Higgins, 1999).

Le misurazioni GPS sono state eseguite mediante integrazione di due modalità: i) modalità statica e ii) modalità cinematica differenziale in tempo reale (RTK). Con la prima modalità sono state eseguite delle basi su dei punti di riferimento individuati all'interno delle aree di studio e materializzati mediante capisaldi e/o l'impianto di picchetti. La precisione di lavoro di questa modalità è stata da millimetrica a centimetrica. Con la seconda modalità invece è stato eseguito un rilievo cinematico in tempo reale degli elementi ricercati agganciandosi ai suddetti punti di riferimento locali e acquisendo così una nuvola di punti atta all'integrazione della topografia esistente per le aree studiate. L'accuratezza di lavoro di questa seconda modalità è stata centimetrica; solitamente dai 2 cm ai 5 cm. I valori più alti sono stati determinati dal disturbo provocato dalla presenza della vegetazione, dagli effetti di riflesso del segnale su oggetti vicini (multipath) e da locali interferenze relative alle onde radio ed elettromagnetiche.

Attraverso il dispositivo SR530 abbiamo adoperato contemporaneamente entrambe le modalità di misurazione in quanto tale apparecchiatura risulta dotata di una doppia stazione : Master (utilizzata in modalità statica) e Rover (utilizzata in modalità RTK). Durante le fasi di acquisizione che prevedevano lo stazionamento fisso per qualche ora della Master sopra un punto materializzato e contemporaneamente la registrazione con il Rover dei vari punti di interesse, attraverso uno stazionamento di pochi secondi (Scrinzi *et al.*, 2000; Piras, 2006), i due strumenti comunicavano tra loro attraverso un radio modem, vincolando di fatto l'area di attività giornaliera alla portata di questi dispositivi. L'operatività di ogni campagna di misurazione era limitata in pratica ad una distanza di 4 km dalla Master.

Data la ovvia mancanza di un'alta precisione nelle coordinate misurate con la master abbiamo effettuato un post-processing per correggere le misure ottenute. A tale scopo sono stati utilizzati i dati forniti dalla Stazione di Riferimento Permanente della Provincia di Firenze (Fig. 4.15) e resi disponibili on-line attraverso il proprio sito internet (<http://www.provincia.fi.it>). Tale stazione (installata nel 2001 a Firenze, georeferenziata ed inserita nella rete IGM 95 dell'Istituto Geografico militare) ha le seguenti caratteristiche tecniche:



- GPS Antenna per ricezione dati da satellite tipo TRM29659.00 TRIMBLE L1 / L2  
Choke Ring Antenna anti-multipath in doppia frequenza L1/L2;
- Receiver tipo TRIMBLE 4700 CORS dotato di cavo per collegamento al Pc;
- Software TRS per Base Station GPS TRIMBLE Reference Station, per Windows2000/XP

I parametri della Stazione sono i seguenti:

Sistema di Riferimento	Coordinate geografiche	Coordinate geografiche	
<b>WGS84</b> (ell.) = 108.271 m	43° 47' 5.37157" N 11° 13' 36.59495" E	UTM (fuso 32) <b>N = 4850384.307 m</b> <b>E = 679180.218 m</b>	Q
<b>ED50</b>	43° 47' 08.8742" N 11° 13' 40.0469" E	UTM (fuso 32) <b>N= 4850583.002 m</b> <b>E= 679262.737 m</b>	
<b>Roma 40</b> (geo.) = 62.995 m	43° 47' 03.0248" N -01° 13' 30.8968" E	GAUSS-BOAGA (fuso 1) <b>N= 4850401.002 m</b> <b>E= 1679210.737 m</b>	Q
<b>Elevation Mask: 10°</b>			

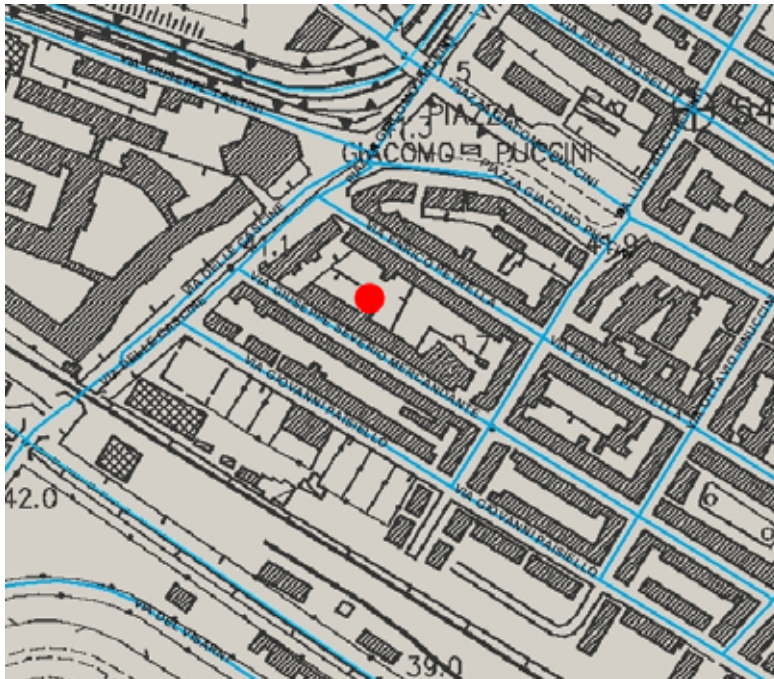


Fig. 4.15 - Localizzazione in mappa della stazione di Riferimento Permanente della Provincia, installata sul tetto del fabbricato della sede di via G. S. Mercadante 42 (<http://www.provincia.fi.it>).



Il dispositivo Leica 1200 invece essendo dotato di una sola antenna è stato utilizzato in modalità cinematica differenziale in tempo reale allo stesso modo della strumentazione Rover del tipo SR530. In questo caso abbiamo utilizzato come master alcune stazioni permanenti sparse sul territorio che riescono ad inviare allo strumento le correzioni in tempo reale attraverso un sistema GPRS (Internet) integrato a distanze anche di diversi chilometri. La rete di stazioni permanenti utilizzata per questo progetto è quella denominata Leica SmartNet ItalPoS ed essa costituisce la prima rete di stazioni permanenti GNSS a copertura nazionale sviluppata grazie alla collaborazione di numerose università, enti pubblici e privati, che hanno collaborato alla realizzazione e alla divulgazione della rete stessa. Tali rete, che utilizza sempre i punti appartenenti alla rete nazionale IGM95, viene gestita nell'area di studio dal "Comitato Toscano Geometri" in collaborazione con la società Leica Geosystems la quale fornisce il necessario supporto tecnico e scientifico per il corretto funzionamento.

Sfruttando questi dispositivi, che non vengono mai spenti se non per manutenzione o aggiornamenti dei software, il nostro apparecchio è riuscito a utilizzare le correzioni in tempo reale provenienti dalla stazione di riferimento più vicina, con il vantaggio di non essere più vincolato a restare nelle pressi di una propria base a causa della limitata portata del sistema radio. L'unico problema di tale sistema resta comunque legato alla copertura della rete cellulare relativa all'operatore che si utilizza per trasmettere i dati, ma nell'area di studio questa è quasi sempre stata presente.

#### 4.7 IL RILIEVO

Il rilievo di dettaglio è stato effettuato con la suddetta strumentazione nelle zone di pertinenza fluviale, includendo le rive dei corsi d'acqua, la zona di golena e gli argini ove presenti ed estendendosi fino ad una distanza pari a 10 metri dal piede esterno dell'argine o in mancanza di esso dal ciglio di sponda. Tale distanza corrisponde alla zona definita di "assoluta protezione" del corso d'acqua come stabilito nell'articolo n°75 *del Piano d'indirizzo territoriale* della regione Toscana (PIT) (L.R: 12/2000) e costituisce il territorio contermini ai fiumi maggiormente soggetto a fenomeni di dinamica fluviale. Dunque sono stati mappati tutti gli elementi che costituiscono la difesa idraulica attiva e passiva delle aree esterne a questa fascia (principalmente argini) e quelle opere invece che all'interno hanno la funzione di rendere stabili i pendii naturali, i rilevati e i manufatti o che hanno il compito di regimare i flussi sia in condizioni di regime ordinario che straordinario (piene) (Apat, 2004). A queste si aggiungono i rilievi dei manufatti di pubblica utilità o delle abitazioni private che ricadono totalmente o

parzialmente nella zona di assoluta protezione. Inoltre sono stati censiti tutti i possibili restringimenti nelle sezioni deflusso e ogni scarico e sbocco di acque artificiali nel fiume, sia che essi fossero attivi o inattivi al momento del rilievo. Infine anche ogni elemento morfologico relativo alla sicurezza idraulica dell'area di studio è stato incluso nei rilievi.

Particolare attenzione è stata dunque riservata al rilievo del "ciglio di sponda" e "argini", distinguendo in questi ultimi la parte sommitale, il piede esterno ed interno ed eventualmente i banchi secondari e le rampe di accesso (Marzolo, 1989). Il passo massimo fra i punti di acquisizione è stato solitamente di 25m avendo cura di mantenere sempre un errore di localizzazione (sia in quota sia nel posizionamento planimetrico) inferiore ai 5cm. Il passo è stato ridotto per quelle zone morfologicamente più irregolari in modo da descrivere al meglio la geometria dell'oggetto. La stessa modalità è stata ripetuta anche per tutte le altre strutture antropiche o elementi naturali di particolare interesse che presentavano un elevato sviluppo spaziale. Per oggetti di dimensioni ridotte sono stati acquisiti invece un numero di punti tali da caratterizzare al meglio il loro sviluppo areale e volumetrico ed ottenere così una rappresentazione cartografica significativa e di dettaglio. In particolare abbiamo utilizzato un solo punto per quelle opere che occupano una superficie estremamente ridotta con un incremento progressivo del numero e della loro distanza reciproca mano a mano che esse crescevano di dimensioni, fino ad ottenere le distanze massime precedentemente descritte. La fase del rilievo in campagna è stata integrata con la compilazione sul posto di apposite schede monografiche nelle quali sono state annotate informazioni generali riguardanti le operazioni di rilievo e la zona rilevata e dati più specifici relativi alla categoria dell'elemento in questione. In particolare le schede utilizzate sono quattro (A,B,C e D): la prima è relativa a manufatti ed insediamenti, la seconda ai restringimenti nelle sezioni di deflusso, la terza alle opere idrauliche e l'ultima agli scarichi. Tutti gli altri oggetti non ricadenti in queste tipologie sono stati descritti nel quaderno di campagna.

In particolare nella scheda di tipo A (Fig. 4.16) è stata riportata essenzialmente la tipologia dell'oggetto e la posizione planimetrica rispetto all'alveo, l'argine o il ciglio di sponda.

**A) Scheda manufatti e insediamenti**

**1) Rilevamento dei manufatti e degli insediamenti presenti in alveo e nelle relative pertinenze**

Bacino idrografico (L. 183/89 - L.R. 91/98) \_\_\_\_\_  
 Compartimento di bonifica (L.R. 34/94) \_\_\_\_\_  
 Ente Rilevatore \_\_\_\_\_  
 Cognome e nome rilevatore \_\_\_\_\_  
 Codice corso d'acqua (D.C.R. 12/2000) P.I.T. \_\_\_\_\_  
 Nome corso d'acqua \_\_\_\_\_  
 Provincia \_\_\_\_\_ Comune \_\_\_\_\_  
 Località \_\_\_\_\_  
 Sezione 1/10.000 (C.T.R.) \_\_\_\_\_  
 Foglio 1/2.000 (C.T.R.) \_\_\_\_\_  
 Note storiche di situazioni di pericolo o danni prodotti  
 SI NO SCONOSCIUTE  
 Data sopralluogo \_\_\_\_\_

Note: \_\_\_\_\_

**2) Localizzazione all'interno della fascia di 10 metri della linea d'argine e tipologia degli edifici**

Documentazione fotografica: \_\_\_\_\_

Fig. 4.16 - Scheda di tipo A (fronte e retro)

Nella scheda di tipo B (Fig. 4.17) si definisce la collocazione delle diverse tipologie di opere che riducono il perimetro bagnato del corso d'acqua (attraversamento, guado, tombamento o semplice restringimento artificiale), specificando in ogni caso la percentuale di perdita di sezione di deflusso e gli eventuali interventi di manutenzione più urgenti al momento del sopralluogo. Per gli alvei naturali è stato segnalato inoltre lo stato di attività del fiume in quel punto: erosione, equilibrio o deposito.

**B) Scheda restringimenti nelle sezioni di deflusso**

**1) Rilevamento di restringimenti nelle sezioni di deflusso prodotti dagli attraversamenti o da altre opere esistenti**

Bacino idrografico (L. 183/89 - L.R. 91/98) \_\_\_\_\_  
 Compartimento di bonifica (L.R. 34/94) \_\_\_\_\_  
 Ente Rilevatore \_\_\_\_\_  
 Cognome e nome rilevatore \_\_\_\_\_  
 Codice corso d'acqua (D.C.R. 12/2000) P.I.T. \_\_\_\_\_  
 Nome corso d'acqua \_\_\_\_\_  
 Provincia \_\_\_\_\_ Comune \_\_\_\_\_  
 Località \_\_\_\_\_  
 Sezione 1/10.000 (C.T.R.) \_\_\_\_\_  
 Foglio 1/2.000 (C.T.R.) \_\_\_\_\_  
 Note storiche di situazioni di pericolo o danni prodotti  
 SI NO SCONOSCIUTE  
 Data sopralluogo \_\_\_\_\_

Note: \_\_\_\_\_

**2) Descrizione delle opere che determinano il restringimento nelle sezioni di deflusso**

**ATTRAVVERSAMENTI**

Fig. 1 - Riduzione sezione %  >=50  <50

Fig. 2 - Riduzione sezione %  >=50  <50

Fig. 3 - Riduzione sezione %  >=50  <50

Alveo in erosione  Alveo in equilibrio  Alveo in deposito  Non rilevabile

**DESCRIZIONE STRADA**  Asf.  S.P.  Stato:  Buono  Medio  Pessimo  Altro

**DESCRIZIONE FERROVIA**  S.R.  Altro

Nota: strada e ferrovia \_\_\_\_\_

**RESTRINGIMENTI NATURALI**

Fig. 4 - Riduzione sezione %  >=50  <50

**PRESENZA DI:**  Cani e cani  Scorie  Opere di terra  Altro \_\_\_\_\_

**GUADI**

Fig. 5 - Riduzione sezione %  >=50  <50

**TOMBAMENTI**

Fig. 6 - Riduzione sezione %  >=50  <50

Longilinea tombamento su \_\_\_\_\_

**L'OPERA SI TROVA ALL'INTERNO DI UN'AREA URBANIZZATA**  SI  NO

**NOTE SU INTERVENTI DI MANUTENZIONE PIÙ URGENTI O ALTRIO** \_\_\_\_\_

Documentazione fotografica: \_\_\_\_\_

Fig. 4.17 - Scheda di tipo B (fronte e retro)

Per quanto riguarda invece la scheda di tipo C (Fig. 4.18) è stata rilevata la posizione specifica di quelle che sono definite opere idrauliche estese, longitudinali e trasversali rispetto al corso dell'acqua, specificando di volta in volta il tipo (argine, rivestimento, gabbionata, cateratte, traverse, ecc...), lo stato di conservazione e, nei casi particolari, la geometria e il materiale con cui è stato realizzato.

Fig. 4.18 - Scheda di tipo C (fronte e retro)

Infine nella scheda di tipo D (Fig. 4.19) è stato indicato essenzialmente il punto in cui gli scarichi compaiono, segnalando anche la forma, le dimensioni, il materiale costruttivo, lo stato di manutenzione, l'eventuale presenza di vegetazione e il tipo di flusso (se presente).

Fig. 4.19 - Scheda di tipo D

Per quanto riguarda infine gli elementi morfologici di un certo interesse (sponda in arretramento attivo, nicchie di frana, barre fluviali, ecc..) si è evidenziata la loro distribuzione rispetto agli elementi limitrofi, indicando il loro stato di attività ed eventualmente la necessità di intervenire per stabilizzarli o mettere in sicurezza l'area. In fine ogni elemento mappato è stato corredato da una dettagliata documentazione fotografica, il cui riferimento è sempre riportato in scheda o in mancanza di essa negli appunti. Quest'ultime, oltre a completare il quadro informativo, hanno avuto il compito di facilitare il corretto riconoscimento e la corretta attribuzione dei punti GPS alla categoria stabilita durante la successiva fase di interpretazione in ambiente GIS.

#### 4.8 RISOLUZIONI DEI PROBLEMI LEGATI AL RILIEVO

Per gran parte della campagna di mappatura è stato possibile ottenere per ogni oggetto rilevato la densità di punti GPS concordata all'inizio di questo progetto. Tuttavia due principali problemi sono stati incontrati durante questa fase. In primo luogo non tutte le località sono state fisicamente accessibili per ottenere anche una sola misurazione. Infatti ci siamo imbattuti in estesi tratti di ciglio di sponda completamente coperto da una densa vegetazione arbustiva e talvolta arborea che non permetteva di raggiungere le aree di interesse. Anche gli argini, al contrario di quanto si possa pensare, hanno mostrato in alcuni casi difficoltà simili (Fig. 4.20). Ad esempio nei tratti in cui essi si identificano con il rilevato ferroviario è molto facile trovare su entrambi i fianchi una vegetazione costituita prevalentemente da arbusti spinosi, rovi e canne. La presenza di queste piante sembra essere stata incoraggiata in tempi passati dagli stessi gestori del tracciato ferroviario come difesa naturale contro il continuo e pericoloso attraversamento delle persone, ma tuttora estesi settori hanno le stesse caratteristiche. In secondo luogo poiché il ricevitore GPS lavora in base ad una chiara ricezione di segnali radio esso non ha funzionato in modo appropriato nelle zone in cui la ricezione è stata molto bassa o bloccata da ostacoli. Questo si è verificato ad esempio lungo il ciglio di sponda o gli argini suddetti qualora fosse stato comunque possibile penetrare la vegetazione e raggiungere in mezzo ad essa il punto di interesse. Altri casi del genere si sono verificati nelle strette valli nei pressi di Incisa Valdarno, Rignano, Pontassieve e nella Stretta della Gonfolina e nei tratti cittadini specialmente nelle aree con grossi edifici a ridosso dell'Alveo. E' questo il caso Rignano, Firenze, Signa, Ponte a Signa, ecc. Casi particolari sono rappresentati da interferenze momentanee nelle qualità dei segnali di cui non è stato possibile risalire all'origine. Soltanto in

prossimità di ripetitori o tralicci della distribuzione elettrica ad altissima tensione abbiamo potuto associare con certezza l'origine di tali disturbi ad interferenze elettromagnetiche.



Fig. 4.20 - Fianco arginale interno ricoperto da fitta vegetazione di canne (a valle di Signa) (A), vegetazione ad alto fusto a ridosso del rilevato arginale (pressi di Ponte di Varlungo) (B)

Per ovviare al problema di trovarsi alla fine con una mappatura incompleta abbiamo proceduto nel seguente modo. Per quanto riguarda le aree in cui c'è stata una inspiegabile bassa qualità del segnale tale da indurre un errore troppo alto nella misura siamo tornati, anche più volte, a cercare di ottenere dei valori di misurazione accettabili. Nel caso di persistenza del problema abbiamo dovuto risolvere con gli stessi procedimenti utilizzati per quelle aree in cui non è possibile conseguire mai un'adeguata copertura satellitare. In queste circostanze abbiamo ritenuto opportuno suddividere in due parti il problema, trattando separatamente la risoluzione delle coordinate a terra e dell'incognita quota. Nel primo caso abbiamo semplicemente determinato i punti di interesse attraverso l'individuazione dell'oggetto su ortofoto in scala 1:2000 adeguatamente georiferite e leggendo direttamente i valori di x e y sul display di un software GIS. Nel secondo caso invece un primo passo è stato sovrapporre alle ortofoto sopraindicate i rilievi GPS già eseguiti e le CTR, anch'esse in scala 1:2000, ed individuare i punti di interesse. Utilizzando poi le quote presenti sulle CTR sono state determinate le quote dei nostri punti attraverso una procedura di interpolazione. Determinando quindi l'offset verticale medio delle misure di quota tra quelle rilevate con precisione durante la campagna e quelle ricavate dalla CTR su un campione numericamente rappresentativo di punti e per settori diversi adiacenti alle aree caratterizzate da mancanza di dati è stato possibile ricalibrare le quote dei nuovi punti disegnati sulle misurazioni GPS. Tale calcoli sono sicuramente effetti da errori, ma rappresentano comunque dati più realistici rispetto a quelli che si possono ottenere leggendo le semplici carte topografiche. Inoltre le quote dei punti così ottenute si riferiscono

esclusivamente ad oggetti di cui la conoscenza di una misura verticale estremamente precisa non costituisce un fattore determinante come nel caso degli argini. La distanza tra questi punti è stata comunque realizzata non secondo il passo utilizzato durante le misurazioni, ma in modo tale che fosse comunque rappresentativa dell'area in questione.



## 5 ELABORAZIONE E SINTESI DEI DATI

### 5.1 PREDISPOSIZIONE ED ORGANIZZAZIONE DEGLI ELEMENTI MAPPATI

Tutti i dati acquisiti mediante rilevamento in campagna o estratti dai supporti ottici e digitali con apposita calibrazione (cartografia ed ortofoto), nel caso di assenza dati GPS, sono stati organizzati all'interno di un SIT, costituito da un geodatabase realizzato tramite applicativi del pacchetto ArcGis™ 9.0 della Esri® ed organizzato in più Feature Datasets (Fig. 5.1).

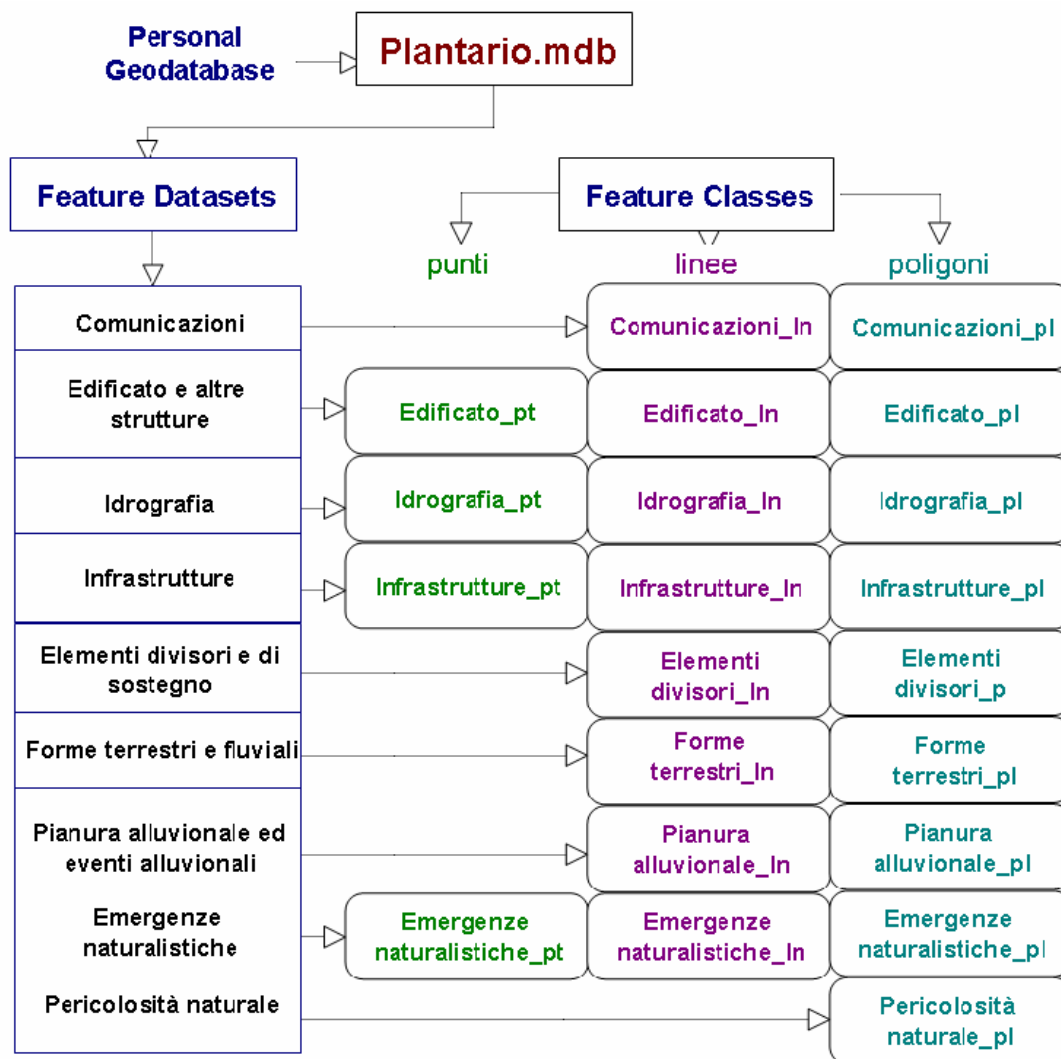


Fig. 5.1 Strutturazione del geodatabase, dove sono confluiti i rilievi GPS, opportunamente separati nelle corrispettive categorie di appartenenza (feature dataset) e a loro volta digitalizzati come punti, linee o poligoni a seconda dell'evenienza (feature classes).

Quest'ultimi costituiscono le diverse categorie in cui sono stati ripartiti tutti gli oggetti mappati e classificati, definiti come elementi puntuali, lineari o poligonali a seconda dell'estensione areale dell'oggetto in questione. L'inserimento dei dati acquisiti tramite il rilievo GPS ha richiesto la loro trasformazione dal formato originario in RAW DATA a quello RINEX FILE (di scambio), successivamente portato in ASCII e convertito in file numerico con software dedicato. L'applicativo Verto ha consentito il passaggio da coordinate WGS84 geografiche a coordinate piane Gauss Boaga fuso Ovest (ancora utilizzate dalla maggior parte delle amministrazioni pubbliche) e le relative quote ellissoidiche sono state trasformate in geoidiche (reali) attraverso la creazione di un geoide locale, le cui spiegazioni sono riportate nel paragrafo successivo. Il formato finale .dbf ha reso possibile l'importazione in ambiente ArcGIS, dove è stata eseguita anche una verifica del corretto posizionamento dei punti tramite confronto con dati ancillari di tipo cartografico, raster, vettoriale e foto aeree (Fig. 5.2).



Fig. 5.2 - Esempio di sovrapposizione in ambiente GIS dei punti GPS ricalcolati relativi ai Comuni di Lastra a Signa e Signa (in rosso il confine comunale) con foto aeree in scala 1:10.000. La diversa simbologia di rappresentazione dei punti indica l'appartenenza a rilievi eseguiti in differenti giornate

L'importazione in ambiente ArcGis di tutti i punti battuti ha permesso la loro ripartizione all'interno degli appropriati feature dataset del geodatabase (Fig. 5.3, 5.4). Gli elementi puntuali (come ad esempio gli scarichi) sono semplicemente rappresentati dal punto GPS, mentre gli elementi estesi sono rappresentati da linee o poligoni realizzati utilizzando i punti GPS come nodi (Fig. 5.5). Ogni feature class è contraddistinta da una specifica tabella di attributi in cui sono state inserite le informazioni contenute nelle schede monografiche

compilate in campagna (Fig. 5.6). Per rendere più completo possibile il SIT e per consentire una scrupolosa digitalizzazione degli elementi estesi, oltre a tutti i punti mappati in campagna durante il rilievo GPS, altri sono stati acquisiti dalle foto aeree 1:2.000 e 1:10.000 (tramite ricalco a video) o sono stati estratti dalle Carte Tecniche Regionali 1:2.000, ove presenti, altrimenti in scala 1:10.000, consultando caso per caso l'archivio fotografico creato in concomitanza ai rilievi sul campo (Fig. 5.7). Il ricorso ai dati di tipo ancillare si è reso necessario in particolare per tutti quegli oggetti di cui non è stato possibile acquisire l'esatta posizione tramite GPS per l'inaccessibilità al luogo o per problemi legati alla qualità segnale. Tuttavia quest'ultimi rappresentano generalmente elementi di cui la precisione della quota non costituisce un elemento fondamentale al contrario del caso degli argini.



Fig. 5.3 - Esempio di ripartizione dei punti GPS alle diverse categorie: muri arginali in rosso e scarichi in giallo sovrapposti a cartografia digitale 1:2000 e foto aeree (centro di Firenze, Lungarno Cellini).





Fig. 5.4 - Esempio di ripartizione dei punti GPS alle diverse categorie: manufatti in rosso, scarichi in giallo, argini in verde, opere idrauliche in rosa (zona di confine comunale tra Signa, Lastra a Signa e Scandicci).



Fig. 5.5 Esempio di digitalizzazione eseguita nel Comune di Signa relativa agli argini (linee marroni, sponda sinistra) e al ciglio di sponda (linea gialla, sponda destra) lungo la confluenza del fiume Bisenzio con l'Arno.



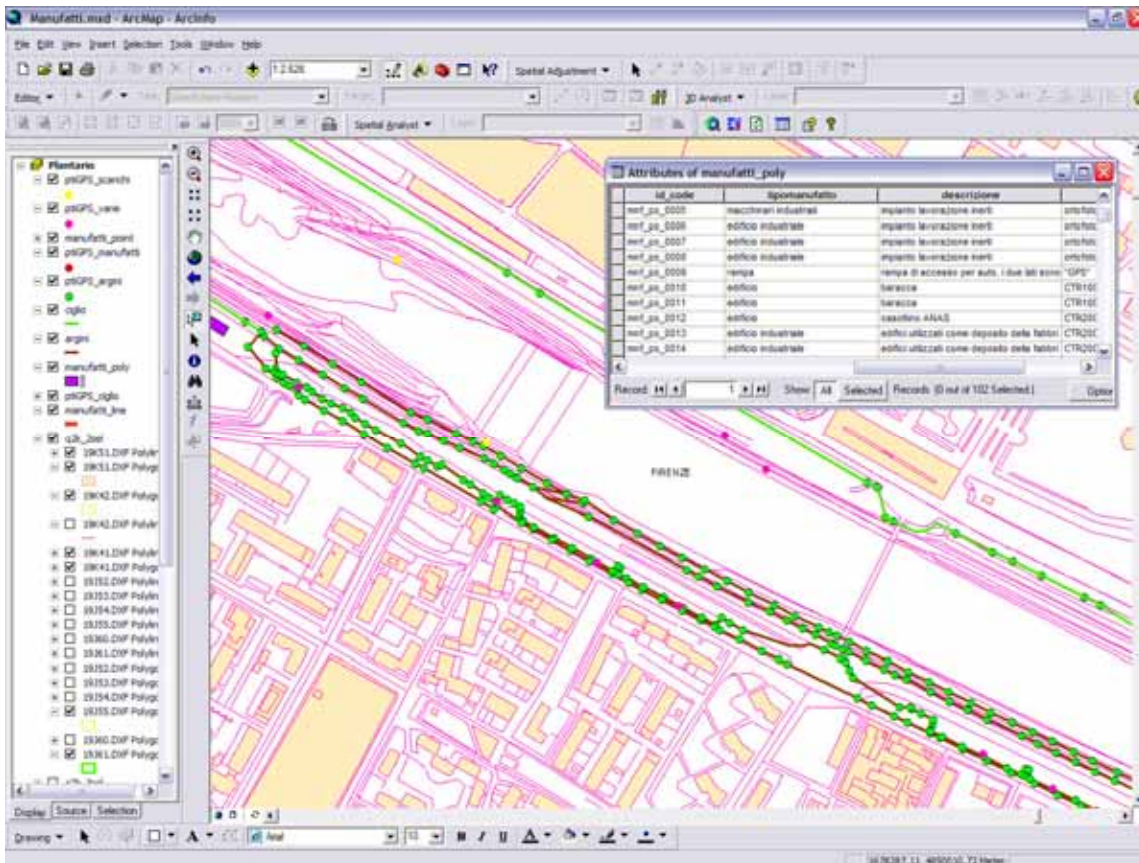


Fig. 5.6: Elaborazione in ambiente GIS dei punti GPS; in figura viene mostrata la sovrapposizione dei dati ancillari (CRT 10000) con i punti GPS relativi agli argini e la loro digitalizzazione per il centro di Firenze.

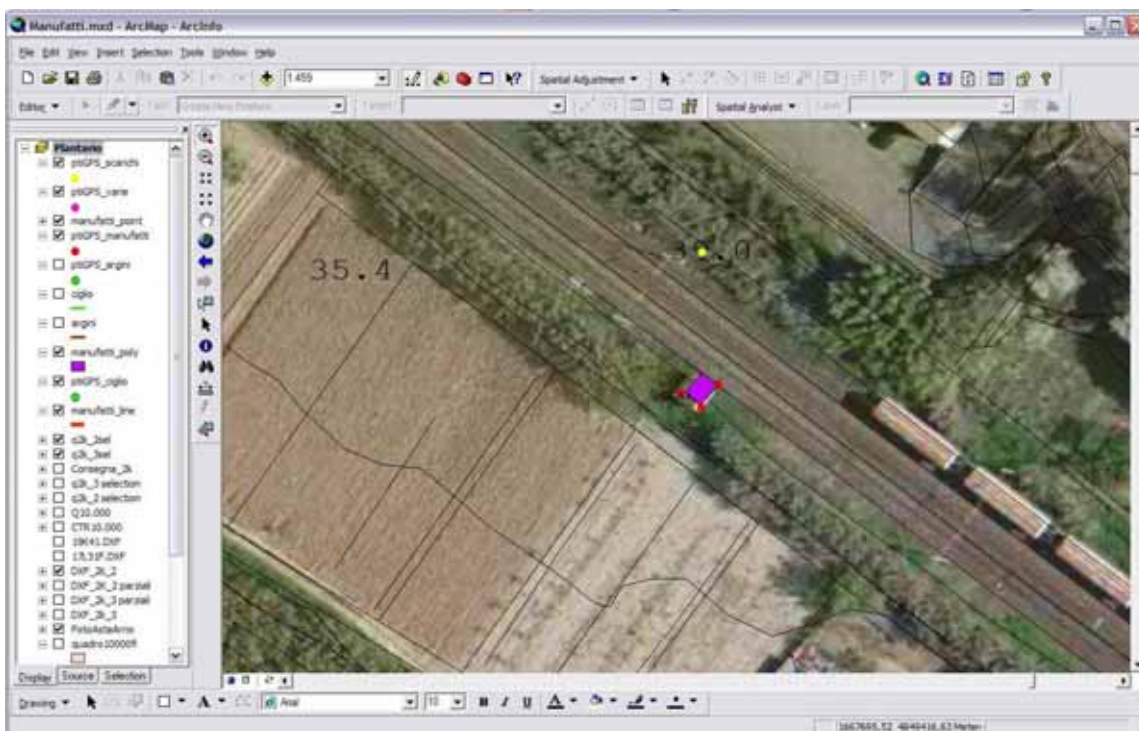


Fig. 5.7 - Esempio di integrazione in ambiente GIS di dati cartografici digitali, foto aeree e rilievi GPS in relazione all'estrazione di manufatti lungo le sponde dell'Arno (1) (comune di Signa)

Infine il contenuto del geodatabase è stato ulteriormente riorganizzato e rielaborato per la pubblicazione dei risultati su piattaforma **WebGis**. L'intenzione è stata quella di produrre una tipologia di dato che, previa integrazione con altri database esistenti, sia pubblicabile via internet da qualsiasi ente interessato al rischio idraulico e idrogeologico. Quest'ultimo passaggio è possibile semplicemente attraverso la messa a punto di un adeguato sistema di front-end, un'interfaccia di rete sulle quali gli utenti interessati possono visualizzare i vari scenari di pericolosità nell'area di interesse. GoogleMaps è stato utilizzato come Server map per la prova di visualizzazione del dato, mentre UMN Mapserver è stato il sistema di front-end impiegato per risolvere i problemi legati alla semplificazione del dato visualizzabile.

## 5.2 LA CORREZIONE DELLE QUOTE: DA ELLISSOIDE A GEOIDE LOCALE

### 5.2.1 INQUADRAMENTO DELLA PROBLEMATICIA

I rilievi eseguiti all'interno del progetto di ricerca, come già detto, avvengono tramite strumentazione GPS e le coordinate geografiche ( $\varphi$ ,  $\lambda$ ) assieme alle quote ellissoidiche ( $h$ ) dei punti acquisiti sono quindi espresse nel sistema mondiale geocentrico WGS84 (Maseroli, 1995). La realizzazione italiana di tale sistema prende il nome di ETRS89 al quale viene stato associato l'ellissoide geocentrico GRS80.

Mentre le coordinate planimetriche che si ricavano da quelle geografiche ( $\varphi$ ,  $\lambda$ ) sono subito utilizzabili e presentano precisioni centimetriche, le quote acquisite ellissoidiche hanno sempre bisogno di essere riferite alla superficie del geoide. L'ellissoide infatti, funzionale alla descrizione della componente planimetriche, è meno sfruttabile come superficie di riferimento per quella altimetrica in quanto non possiede nessun significato fisico (difetto noto come "Problema Altimetrico") (Radicioni & Sguerso, 1992).

Per come è stato definito, il geoide rappresenta una superficie di riferimento strettamente legata alla gravità, il suo scostamento rispetto all'ellissoide è rappresentato nella seguente formula:

$$h = H + N$$

dove  $h$  è l'altezza ellissoidica,  $H$  è la quota ortometrica rispetto al geoide e  $N$  l'ondulazione del geoide calcolata da dati di gravità (Fig. 5.8).

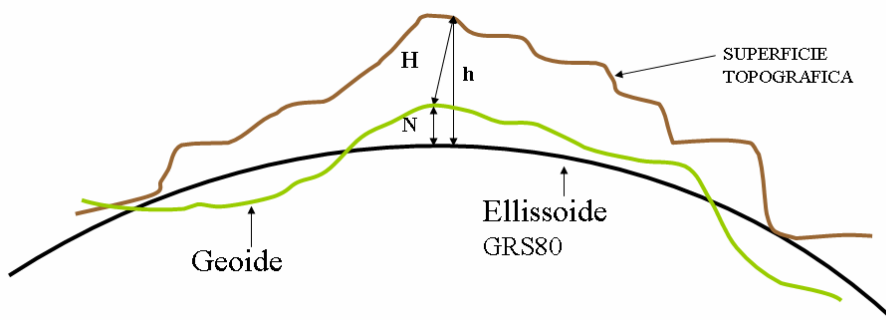


Fig. 5.8 - Schema esemplificativo dell'andamento del Geoide rispetto all'Ellissoide

Nel 1999 è stata eseguita dal DIAR del Politecnico di Milano, tramite misure gravimetriche, una “stima dell’ondulazione del geoide” a livello nazionale che ha portato allo sviluppo di un modello del geoide denominato ITALGEO99 (Barzagli *et al.*, 2002) caratterizzato da una precisione assoluta di tipo decimetrico. Nel 2003 l’Istituto Geografico Militare ha implementato, all’interno del software “VERTO”, il modello di ondulazione del geoide ITALGEO99 per la preparazione dei grigliati impiegati per il passaggio da coordinate ellissoidiche ad ortometriche per tutto il territorio nazionale. Tale modello di geoide è caratterizzato da uno scarto quadratico medio rispetto alla rete GEOTRAV (punti GPS-IGM95 collegati a caposaldi di livellazione), di:

- $\pm 0.15$  m per il continente (riferito al mareografo di Genova)
- $\pm 0.04$  m per la Sicilia (riferito al mareografo di Catania)
- $\pm 0.07$  m per la Sardegna (riferito al mareografo di Cagliari) L’e.q.m. di maggiore entità risulta di circa 0.30 m.

Successivamente, nel 2005 è stato realizzato un nuovo modello di Geoide denominato ITALGEO2005, sempre sviluppato in collaborazione con il Politecnico di Milano, e caratterizzato da un scarto quadratico medio rispetto alla rete di livellazione di alta precisione di  $\pm 0.035$  m per tutto il territorio nazionale. L’e.q.m. di maggiore entità risulta inferiore a 0.10 m.

Per i modelli di geoide sono stati utilizzati dati eterogenei:

Misure di gravità (4624 nuove misurazioni)

GEOTRAV (Capisaldi di livellazione - Misure GPS) 583 punti

DTM (alta precisione -  $7.5'' \times 10''$ )

Modelli geopotenziali (EGM96 - GPM98CR)

## 5.2.2 APPLICAZIONE DEL GEOIDE NAZIONALE ITALGEO99 E ITALGEO2005

I due geoidi nazionali (ITALGEO99 e ITALGEO2005) sono stati utilizzati su un numero di punti limitati a quota doppia (ellissoidica e geoidica) scelti come set di controllo, precisamente su 19 caposaldi della linea B. Questi punti fanno parte della rete di inquadramento plano-altimetrica effettuata dal comune di Campi Bisenzio. I caposaldi in questione sono stati trattati prima tramite il modello di geoidi ITALGEO99 e poi tramite ITALGEO2005 al fine di ottenere le quote ortometriche da quelle ellissoidiche ed eseguirne un confronto. I risultati ottenuti mostrano che le differenze tra le quote ortometriche misurate e le quote calcolate dal geoidi nazionale, sono mediamente 0.19 m per il modello ITALGEO99 e 0.10 m per il modello ITALGEO2005, valori che in entrambi i casi risultano essere troppo alti rispetto alle precisione richiesta. Per questo motivo si è scelto di operare i passi necessari alla definizione di un geoidi locale relativo al territorio indagato.

## 5.2.3 CAMPAGNA DI CONTROLLO

In conseguenza di quanto espresso sopra e prima di creare un geoidi locale che riduca l'errore in quota, si è voluto predisporre una test di verifica sulla precisione della componente altimetrica rilevata durante le campagne GPS. Le fasi e i risultati di questa verifica sono illustrati di seguito.

E' stata eseguita una campagna di controllo nel comune di Campi Bisenzio.

La prima verifica è stata effettuata sul caposaldo B09 situato in località San Piero a Ponti, sulla spalletta di valle del ponte sul fiume Bisenzio, che collega la via 13 Martiri con la via San Cresci. Da questo caposaldo è stato effettuato un riattacco altimetrico, in andata e in ritorno, con livello ottico WILD N3 e stadia Invar di 2 metri con gradazione al centimetro, sul caposaldo IGM n. 15 della linea n. 5, situato a San Piero a Ponti sul lato sinistro della Caserma dei Carabinieri (Fig. 5.9). Il dislivello misurato tra i due caposaldi, pari a 5.72251 m, ha confermato che la quota del caposaldo B09 è stata in passato collegata al caposaldo IGM suddetto. La differenza tra la quota monografica del caposaldo B09 e la quota monografica del caposaldo IGM è di 5.72310 m. Infine il Delta quota tra i due dislivelli ( $5.72310 - 5.72251 = 0.00059$  m) conferma la precisione sub-millimetrica della quota ortometrica presente sulla monografia.

Tra le altre operazioni di campagna eseguite al fine di controllare la precisione dei dati GPS acquisiti sui 19 caposaldi della linea B, sono state riacquisite le coordinate geografiche  $\varphi$ ,  $\lambda$  e



l'altezza ellissoidica  $h$  (tramite GPS geodetico) solo di 12 dei 19 caposaldi in oggetto (Fig. 5.10). Gli errori riscontrati sono pari al centesimo di secondo sessagesimale, quindi entro l'errore di misura confermato dalla Commissione Geodetica Italiana. Una volta appurata la precisione delle misure si è voluto eseguire una localizzazione del modello geoidico per il territorio provinciale fiorentino in modo da abbassare quanto più possibile l'errore altimetrico dei punti GPS rilevati, che ad oggi sono affetti da un errore pari a  $\pm 0.15$  m con l'applicazione di ITALGEO99 e  $\pm 0.10$  m con ITALGEO2005.



Fig. 5.9 - Posizione della linea di livellazione (A) ed esecuzione della verifica di campagna (B).



COMUNE DI CAMPI BIENZIO	
Rete di inquadramento piano-altimetrico	
Numero: B 12	Categoria: CAPOSALDO
Provincia di Firenze Data: Marzo 2006	Descrizione: centrino in acciaio inox posto sulla passerella pedonale in c.a., riva sinistra del Bisenzio vicino ai giardini.
	Coordinate:
	Geografiche (WGS84_ETRF89) Lat. 43°49' 00.2989" Long. 11°07' 57.8938" Quota ell. 86.805
	Cassini-Soldner Y= -16046.18 X = 55402.76
	Gauss-Boaga E= 1671548.47 N= 4853747.49 Quota I.G.M. = 41.7303
	

Fig. 5.10 – Esempio della fase di controllo della precisione dei dati GPS sui 19 caposaldi. Riacquisizione delle coordinate geografiche  $\phi$ ,  $\lambda$  e dell'altezza ellissoidica  $h$  sul caposaldo B12.

## 5.2.4 CREAZIONE DI UN GEOIDE LOCALE

Per localizzazione si intende l'adattamento del modello di ondulazione geoidica, che viene calcolato per il territorio nazionale, a una regione o territorio limitato, come ad esempio la Provincia di Firenze. Nella sperimentazione condotta nella zona di Campi Bisenzio, per la creazione del geoide locale è stato utilizzato il programma VERTO 3.0.

Sono stati presi in considerazione tre caposaldi della rete GEOTRAV (punti GPS-IGM95 collegati a caposaldi di livellazione) e dodici caposaldi della linea B, che posseggono sia la quota da livellazione che la quota ellissoidica, precisamente i punti: B02, B03, B05, B06, B09, B10, B11, B12, B14, B16, B17, B18. Su questi, tramite il software suddetto, che utilizza la trasformazione conforme di Helmert, è stato calcolato un modello di geoide a 7 parametri intorno agli assi X,Y e Z (3 traslazioni, 3 rotazioni, 1 fattore di scala) (Fig. 5.11). Di seguito, sempre con VERTO 3.0, questi 7 parametri sono stati applicati a 7 caposaldi della linea B (B01, B04, B07, B08, B13, B15, B19) con quota ellissoidica e quota ortometrica note. Stavolta però la quota ortometrica è servita solo come verifica della quota ortometrica calcolata sul modello di geoide creato. La differenza tra la quota ortometrica misurata e la quota ortometrica calcolata sul modello di geoide locale creato, è stata mediamente di 0.03 m con una precisione che rientra in quella richiesta.

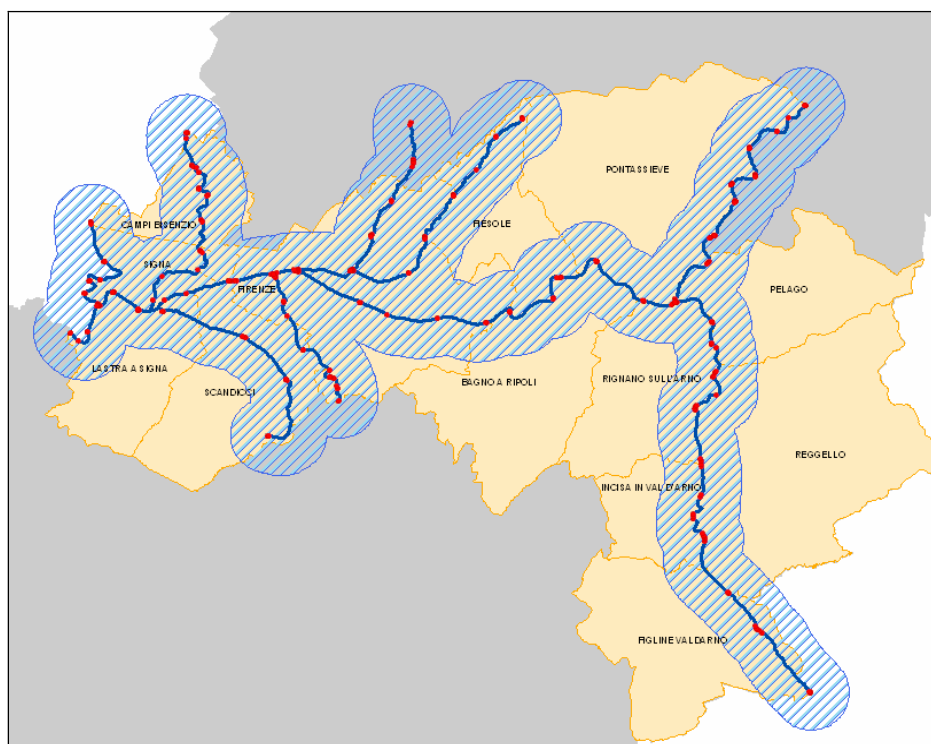


Fig. 5.11 – Area di copertura del nuovo geoide. In rosso sono visualizzati i punti sulla base dei quali è stata calcolata l'area minima convessa per la localizzazione del nuovo geoide. L'area in tratteggio, infine, è il buffer di circa 2 km applicato ai corsi fluviali che fornisce una prima identificazione dell'area di validità del nuovo geoide.

## 5.2.5 CONCLUSIONI

Sulla base di quanto evidenziato in precedenza quindi la creazione di un geoide locale esteso all'intera area di studio (utilizzando i caposaldi della provincia e i Geotrav-IGM), permette una volta applicato su tutti i punti rilevati, di raggiungere una precisione altimetrica dell'ordine di  $\pm 0.03$  m.

In sintesi per la localizzazione del geoide si è proceduto secondo le seguenti fasi:

1. raccolta di tutte le monografie disponibili presso le Amministrazioni locali relative alle linee di livellazioni di alta precisione con errore altimetrico  $\pm 0.01$ m;
2. raccolta delle monografie IGM relative alle linee di livellazione della rete nazione;
3. creazione dei 7 parametri per il nuovo geoide locale tramite software specifico;
4. ricalcolo della quota dei punti acquisiti secondo il nuovo geoide creato (Fig. 5.12);

APPLICAZIONE DEI PARAMETRI SPAZIALI					
Parameters	7				
Tx	-4.673052623	m			
Ty	5.123338949	m			
Tz	3.794748852	m			
Rx	- 0° 00' 00.0978"				
Ry	- 0° 00' 00.1918"				
Rz	- 0° 00' 00.1385"				
S	- 0.002230078	ppm			
Ellipsoid:	GRS80		a 6378137	1/f 298.2572221	
Points	Latitude	Longitude	height (input)	height (output)	Delta height
625SX	43.45538694	11.19288000	54.492	54.502	-0.010
635SX	43.46006745	11.20386000	66.664	66.676	-0.012
648SX	43.46494992	11.21446000	77.305	77.319	-0.014
683DX	43.46096631	11.25530000	80.873	80.892	-0.019
686DX	43.46103871	11.26120000	83.753	83.772	-0.019
723DX	43.43194687	11.27391000	117.825	117.840	-0.015
738SX	43.42046179	11.26561000	111.934	111.940	-0.006
790DX	43.39195373	11.27255000	121.513	121.523	-0.010
840SX	43.34307669	11.31341000	131.854	131.862	-0.008
841SX	43.34244230	11.31413000	131.193	131.201	-0.008
844SX	43.34118306	11.31553000	136.263	136.271	-0.008
843SX	43.34066304	11.31591000	135.636	135.644	-0.008
478SX	43.46234975	11.03468000	39.781	39.772	0.009
493SX	43.46501811	11.04254000	39.896	39.889	0.007
513SX	43.46186081	11.06076000	39.447	39.441	0.006
536SX	43.47094289	11.11143000	41.181	41.183	-0.002
546SX	43.46393475	11.13214000	42.878	42.882	-0.004
564SX	43.46161887	11.14339000	45.962	45.967	-0.005

Fig. 5.12 – Esempio del risultato dell'applicazione dei sette parametri del nuovo geoide ad alcuni punti GPS.

### 5.3 SINTESI DELLE OPERE DI IMPORTANZA IDRAULICA CLASSIFICATE LUNGO L'ARNO

Dopo l'inserimento dei punti GPS all'interno del geodatabase (per un totale di 18179 punti), come detto sopra, si è proceduto alla loro ripartizione nelle principali categorie create, ossia di "ciglio" (3329 punti), di "argine" (10218 punti), di "manufatti" (459 punti), di "opere idrauliche" (3276 punti), di "scarichi" (310 punti) e di "restringimenti" (250 punti), di geomorfologia (159 punti) e di interesse vario (linea sotterranea metanodotto, rilevati, pozzi, fossi, tombini particolari ecc.) (178 punti).

Il numero delle suddette misurazioni risulta integrato con quello estrapolato dalla cartografia di dettaglio esistente. In particolare la categoria "manufatti", sia relativa ai punti e quindi alle linee e ai poligoni, è scaturita in gran parte dall'integrazione dei dati rilevati con l'estrazione diretta degli edifici dalla CTR 2.000 per conferire una veste di senso compiuto a questa parte della banca dati. Difatti la categoria in questione è stata la più difficile da rilevare per via dell'interruzione del collegamento satellitare nel punto di stazionamento o, nel caso meno sfavorevole, per la perdita di qualità del segnale, che ha permesso di effettuare solo una parte delle misurazioni necessarie a definire la geometria degli oggetti.

Il rilevamento su entrambe le rive dell'Arno è stato effettuato per una lunghezza complessiva di 125.7 km ed ha evidenziato un ciglio di sponda che si sviluppa per 86.5 km mentre i restanti 39.2 km sono caratterizzati da arginature di vario tipo (Fig. 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18). Per disegnare in maniera accurata lo sviluppo di ogni elemento morfologico di queste opere idrauliche (rampe di accesso, fianchi e sommità) sono stati digitalizzate linee per una lunghezza totale di 198.52 km. I dati ricavati dimostrano pertanto che il 31.2 % delle aree contermini al corso d'acqua risultano protette da difese arginali, mentre il 68.8 % del tratto analizzato è presente il ciglio di sponda. Quest'ultimo ha evidentemente una diffusione doppia rispetto alle arginature, ma se si considera che in quasi tutti i tratti di pianura il ciglio è stato più volte rimaneggiato per favorire un miglior scorrimento dell'acqua o una migliore fruibilità agli abitanti si capisce quando l'antropizzazione sia stata intensa in questi luoghi.



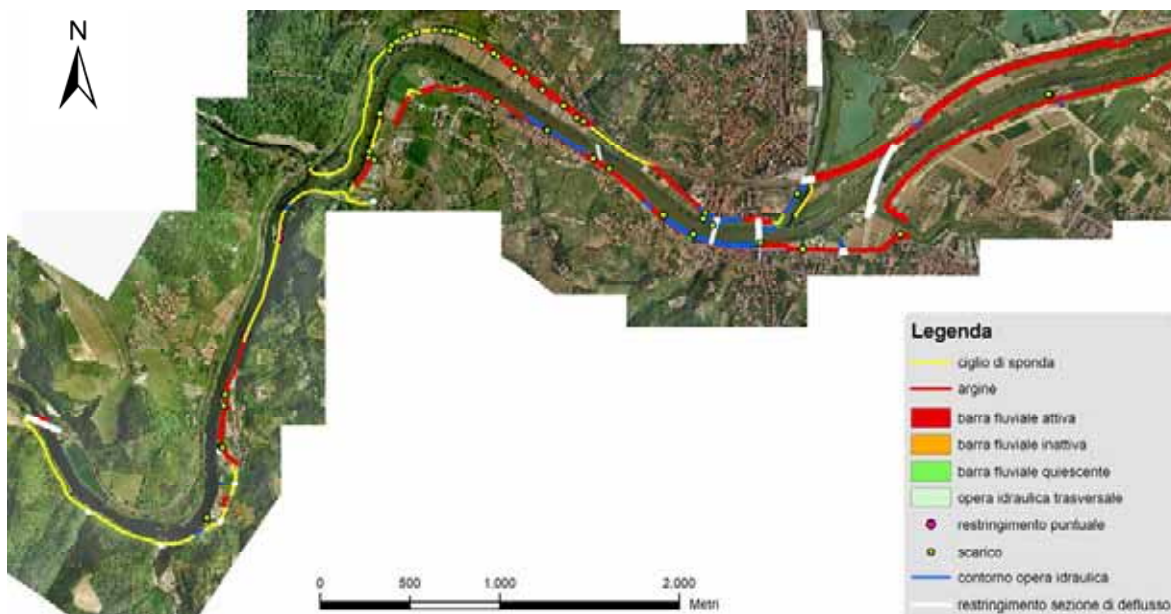


Fig. 5.13 - Principali elementi rilevati nel tratto da Camaioni a Signa.



Fig. 5.14 - Principali elementi rilevati nel tratto da Signa a Firenze Cascine.

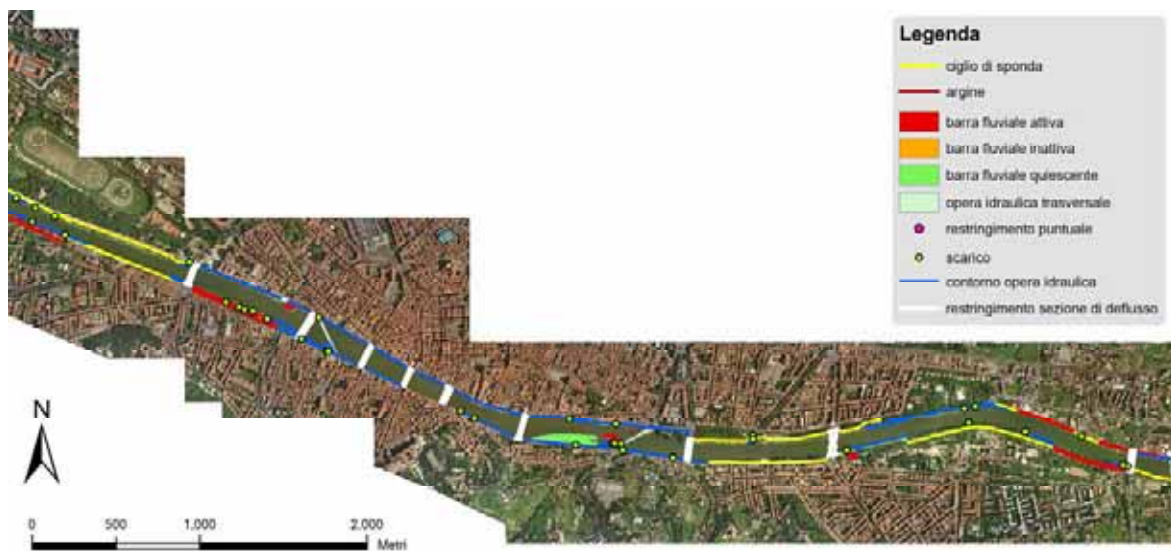


Fig. 5.15- Principali elementi rilevati nel tratto cittadino di Firenze



Fig.5.16 - Principali elementi rilevati nel tratto da Firenze a Pontassieve



Fig. 5.17. Principali elementi rilevati nel tratto da Pontassieve ad Incisa

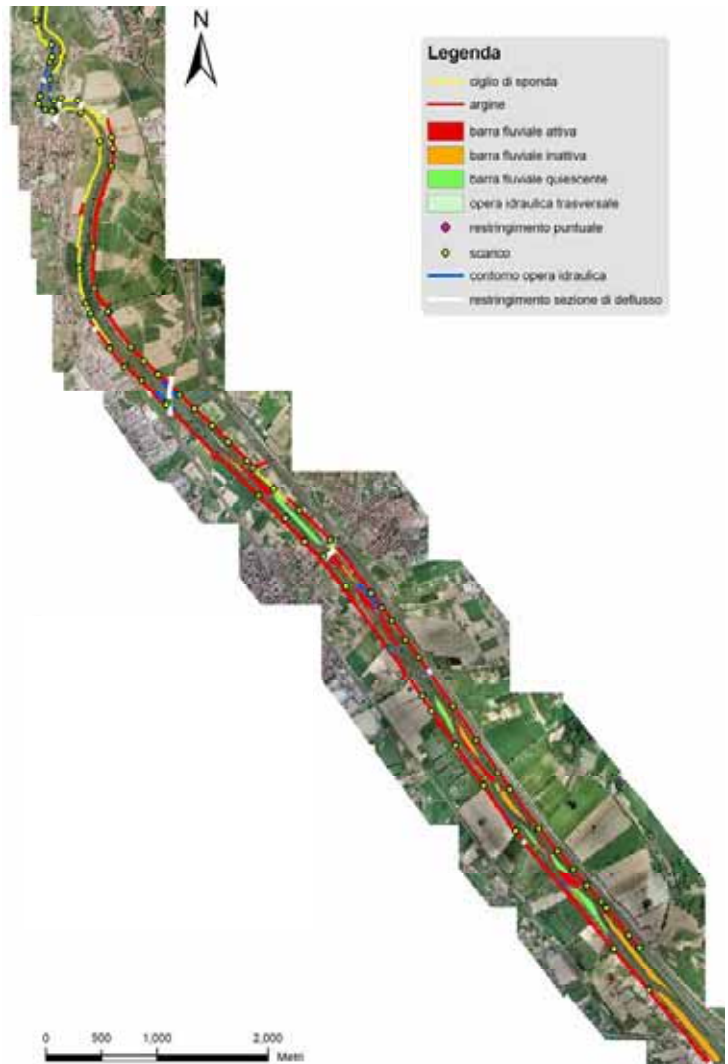


Fig. 5.18 Principali elementi rilevati nel tratto da Incisa a Porcellino (Figline Valdarno)

Gli argini, che sono stati gli elementi maggiormente mappati, risultano essere stati costruiti secondo tre principali metodologie: in terra, in muratura o con tecniche miste. Quelli in muratura si ritrovano di solito nei centri storici delle città che, avendo un'economia strettamente dipendente dal fiume Arno, sono sorte in prossimità dell'alveo. E' il caso del centro storico di Firenze (Fig. 5.22, 5.23, 5.24), ma anche di Incisa, Ponte a Signa (Fig. 5.19, 5.20), Porto di Mezzo (Fig. 5.21) e Brucianesi. Laddove questa esigenza di spazio a ridosso del letto del fiume non era così esasperata la costruzione di argini è avvenuta generalmente in terra realizzando geometrie più ampie che vanno dal semplice trapezio a forme più complesse comprendenti un numero variabile di banchi di sostegno ed opere accessorie (Fig. 5.25, 5.26, 5.27, 5.28, 5.29, 5.30, 5.31, 5.32). Anche in questi casi comunque il successivo sviluppo urbanistico spesso ha comportato la necessità di contendere al fiume superficie edificabile e di concentrare in pochi metri abitazioni e difese idrauliche, per cui queste ultime sono state spesso ritoccate associando ai classici rilevati in terra, eventualmente degli elementi in muratura come sostegno e rinforzo (Fig. 5.33, 5.34, 5.35). Un caso del genere è ben rappresentato a Signa in prossimità del ponte pedonale (Fig. 5.36). Attualmente solo il 18% degli argini sono costruiti completamente in muratura ed i rilevati in terra o con materiali misti sono prevalenti. Essi costituiscono la principale opera di difesa contro le piene dell'Arno sia per le aree urbanizzate che per quelle agricole e generalmente sono strutture molto antiche di cui si è persa qualsiasi informazione sulle modalità di fabbricazione e sui materiali utilizzati. Inoltre i vari agricoltori per proteggere i propri campi hanno più volte rinforzato gli argini, alzato il loro livello e ricostruito i loro cedimenti con materiali trovati sul posto, conferendo ai rilevati arginali una complessa disomogeneità strutturale. A fronte di tali osservazioni ottenere un quadro conoscitivo della capacità di tenuta di queste strutture risulta quanto mai necessario per la gestione del rischio idraulico.



Fig. 5.19 – Muro d'argine e rivestimento in zona di golena Fig. 5.20 – Camminamento sul lato esterno del muro d'argine





Fig. 5.21 – Muro d'argine a protezione dell'abitato



Fig. 5.22 – muro d'argine in lungarno Torrigiani (Firenze)



Fig. 5.23 – muro d'argine in lungarno Serristori (Firenze)



Fig. 5.24 – muro d'argine in lungarno generale Armando Diaz (destra) e in Lungarno Torrigiani (sinistra) (Firenze)



Fig. 5.25 - Argine in terra con telo di rivestimento



Fig. 5.26 - Argine in terra con manufatto





Fig. 5.27 - Argine in terra a protezione di un sottopasso



Fig. 5.28 - Argine in terra rinforzato con gabbioni



Fig. 5.29 - Argine in terra in zona di campagna



Fig. 5.30 - Argine in terra rivestito sui due fianchi



Fig. 5.31 - Argine in terra percorso da strada asfaltata



Fig. 5.32 - zona di contatto tra argine in terra e muratura



Fig. 5.33 - argine misto terra-muratura in zona di scarichi



Fig. 5.34 - argine in terra accorciato e rinforzato con muratura



Fig. 5.35 – argine misto terra-muratura in zona ferroviaria Fig. 5.36 – argine misto terra-muratura

Sono state inoltre mappate altre 228 opere idrauliche di minore estensione (120 poligonali, 106 lineari e 2 puntuali) che sono principalmente rivestimenti con materiali inerti (calcestruzzo e pietrame vario) (Fig. 5.37, 5.38), murature di vario tipo (in pietrame a secco, in pietrame con malta idraulica, in mattoni, in calcestruzzo\cemento armato gettato in opera o in blocchi prefabbricati montati a secco ed incastrati tra loro) (Fig. 5.39, 5.40), gabbioni a scatola (Fig. 5.47) e traverse (Fig. 5.45), unica tipologia di opera trasversale presente in Arno. In misura ridotta troviamo rivestimenti con materassi tipo Reno in rete metallica a doppia torsione e maglie esagonali, cateratte singole, chiaviche (Fig. 5.47), idrovore (Fig. 5.43, 5.44), briglie negli impluvi immissari (Fig. 5.46), scogliere con blocchi non posizionati regolarmente (Fig. 5.41) e massi ciclopici adagiati sulle sponde talora sciolti e talora cementati (Fig. 5.42).

Questi ultimi due, assieme ai muri e ai gabbioni sono quelli che costituiscono principalmente gli elementi lineari mappati. In due soli caso abbiamo associato un'opera idraulica ad un punto ed è relativa alla posizione in cui si trova l'apertura di un tubo proveniente da un vicino impianto idrovoro. Tali strutture sono adagate sulla sommità di muri arginali rispettivamente in località Ponte a Signa e Porto di Mezzo (sponda sinistra) entrambi nel comune di Lastra A Signa. E' stato deciso di metterli in evidenza come elementi singoli perché in primo luogo essi costituiscono le parti terminali di un importante sistema di regimazione delle acque in condizioni di emergenza nelle aree urbane adiacenti ed inoltre poiché essi fanno parte di un complesso sistema opera di difesa/manufatto che era importante segnalare nonostante che le modalità del rilievo le ponessero genericamente ed in maniera indistinta sotto la voce "tessuto urbano". Difatti ogni qualvolta ci trovavamo in area abitate edificate direttamente in prossimità delle sponde dell'Arno non era previsto il riconoscimento di ogni singolo edificio, salvo casi speciali in cui però era necessario trovare dei metodi idonei di segnalazione come nel caso suddetto.



Infine nessuna significativa opera a basso impatto ambientale (eseguite con tecniche di ingegneria naturalistica) di recente realizzazione è stata individuata durante i rilievi. Esse piuttosto sembrano legate a piccoli interventi per la risoluzione di problemi locali (Fig. 5.48, 5.49), mentre per il controllo delle dinamica fluviale prevalgono le classiche opere di ingegneria idraulica, molte delle quali costituiscono una pesante eredità del passato.



Fig. 5.37 – Rivestimento di sponda in muratura



Fig. 5.38 – Rivestimento di sponda in calcestruzzo



Fig. 5.39 – Muro di sponda in blocchi di cemento



Fig. 5.40 – Muro di sponda in cemento gettato in opera



Fig. 5.41 – Scogliera



Fig. 5.42 – Scogliera cementata



Fig. 5.43 – Tubazione uscente da un impianto idrovoro



Fig. 5.44 – Impianto idrovoro in prossimità di una cateratta



Fig. 5.45 – Pescaia di Santa Rosa



Fig. 5.46 – Briglia di un fosso secondario in zona di sponda



Fig. 5.47 – Gabbioni in doppia fila (a), gabbioni in fila singola (b), massi ciclopici e gabbioni posti a terrazzo (c), chiavica (d)



Fig. 5.48 – intervento di ingegneria naturalistica



Fig. 5.49 – cartello relativo all'intervento dell'immagine 5.48



Tra gli elementi che riducono la sezione di deflusso sono stati individuati 56 restringimenti di cui 32 attraversamenti dell'Arno (30 strade e ferrovie, 2 passaggi pedonali), 17 attraversamenti su impluvi o affluenti in prossimità della foce, 5 tombamenti ed 1 guado entrambi relativi a fossi in area di golena e direttamente afferenti in Arno. Un Gasdotto distante soltanto 100 metri ponte autostradale (A1) è stato segnalato in questa categoria benché si sviluppi ben al di sopra dei rilevati arginali e la riduzione di sezione consista soltanto di due piloni non molto grandi costruiti in zona golenale.

E' importante sottolineare che solo i ponti più antichi riducono la sezione idraulica più del 50%: Ponte Vecchio (Firenze) e il ponte D'Annibale (Bruscheto, Reggello) che possono causare effetti sbarramento in caso di piena. Tuttavia solo nel caso del Ponte Vecchio (Fig. 5.50) siamo di fronte ad un vero e proprio rischio poiché si tratta di un antico ponte al centro della città di Firenze, che presenta aree di deflusso piuttosto ristrette nonostante nel 1980 siano state abbassate le sue platee di fondazione. Di fatto tali lavori, associati all'innalzamento dei muri di sponda e all'abbassamento delle platee del ponte Santa Trinita, immediatamente a valle, hanno aumentato la portata da 2.500 a 3.500 m<sup>3</sup>/s riducendo di un terzo il volume di inondazione a Firenze per eventi comparabili a quelli del 1966 (Fig. 5.51). Dunque questi interventi consentono il transito di portate maggiori ma non sufficienti a contenere eventi con tempi di ritorno duecentennali (<http://www.adbarno.it>; <http://www.provincia.fi.it>).



Fig. 5.50 – Ponte Vecchio (Firenze)



Fig. 5.51 - Ponte Vecchio dopo l'alluvione del 1966

Il Ponte di Annibale invece anche se costituito da un attraversamento medievale molto basso sul livello del fiume, si trova in aperta campagna, in una zona di forte degrado ambientale a causa degli stravolgimenti seguiti alla costruzione di grosse infrastrutture ferroviarie e stradali nelle immediate vicinanze, che lo tagliano fuori da qualsiasi possibilità di utilizzo (Fig. 5.52a). Inoltre esso è stato parzialmente lesionato dalla piena del 1966 che ha distrutto l'arcata principale e che non è stata più ricostruita (Fig. 5.53). Pertanto il rischio di occlusione delle

luci del ponte si riduce soltanto alla probabilità di perdita definitiva di un'opera architettonica di importanza storica, estendibile semmai al danneggiamento di un adiacente mulino, anch'esso di rilevanza culturale e attualmente a rischio di crollo (Fig. 5.52b) e non alla probabilità di perdita di attività socio-economiche o, peggio ancora, di vita umana.



Fig. 5.52 – Foto aerea dell'area di imposta del Ponte di Annibale (a), ponte di Annibale e Mulino visto dal fiume (b)



Fig. 5.53 - Ponte di Annibale visto dalla sponda sinistra

Tutti gli altri ponti storici furono distrutti dai bombardamenti alleati o dalle mine dei Tedeschi in ritirata, fra il finire del 1943 e l'estate del 1944 e solo dopo qualche decennio furono ricostruiti ripristinando l'attraversabilità dell'Arno ai livelli dell'anteguerra. Per questo motivo essi hanno ridotti problemi di restringimento di sezione, presentando semmai, insieme a quelli costruiti i tempi più recenti (Autostrada A1, direttissima Firenze – Roma, Ponte di Pian dell'Isola, ecc.) problemi di stabilità per erosione di materiale attorno ai piloni di fondazione (Fig. 5.54).



Fig. 5.54 – Ponte stradale in località Figline Valdarno.: fu ricostruito nel dopoguerra e consolidato nel 1962

Infine sono stati rilevati 310 punti GPS associati a scarichi, ai quali vanno sommati quelli fisicamente non raggiungibili dallo strumento per un totale di circa 365 sbocchi diretti in Arno (Fig. 5.55). Principalmente si tratta della parte terminale un sistema di drenaggio sotterraneo attraverso le quali smaltire le acque superficiali (meteoriche, di lavaggio, ecc.) lontano da insediamenti civili e/o produttivi e le acque reflue derivanti dalle attività umane in generale. Le prime hanno una concentrazione che è strettamente connessa alle condizioni meteorologiche e alla frequenza di utilizzo di acque per scopi particolari come i lavaggi delle strade o il raffreddamento di certe attività industriali e pertanto posso raggiungere anche picchi di flussi molto intensi. Le seconde invece hanno solitamente un flusso intermittente in relazione all'estensione dell'area di raccolta, dall'andamento delle attività presenti ed in generale dal numero di utilizzatori del sistema. Ovviamente per grossi centri urbani infatti il flusso può diventare continuo, anche se con portate estremamente ridotte, specialmente per le acque nere,



saponose o di origine particolare provenienti dalle abitazioni private e dalle attività lavorative. Inoltre capita di trovare che il flusso registrato allo sbocco non coincide con quello realmente in movimento nei condotti a causa di perdite nel sistema ed è anche difficile accorgersi che ciò si sta verificando fintanto il flusso non riemerge altrove in maniera anomala (Fig 5.56a-b). La forma di tali sbocchi varia da tonda, ovale, rettangolare o con geometrie particolari (ad esempio trapezoidale con archi in calotta) e tale distinzione non sembra seguire criteri di funzionalità, che semmai si riflettono nel dimensionamento, ma piuttosto l'epoca costruttiva ed il materiale costruttivo a disposizione dell'ente commitente. Quest'ultimo comprende il cemento, la muratura e il metallo per quanto riguarda per le fognature di acque reflue alle quali afferiscono numerosi utenti (e quindi le più grandi) e per il convogliamento in Arno di flussi derivanti dalla regimazione acque superficiali. I singoli edifici possono essere dotati di sbocchi fognari costruiti con gli stessi materiali, ma non è raro imbattersi in tubi di plastica di dimensioni più contenute (diametro medio 15 cm). La plastica è altresì largamente utilizzata per immettere in Arno acque meteoriche provenienti da piccole aree (fossi laterali ad orti, campi coltivati, strade comunali secondarie o vicinali ecc.). Infine è importante sottolineare che la stragrande maggioranza degli scarichi, escluso quasi tutti i piccoli tubi in plastica, sono dotati di portelli di vario tipo (mannaia, ventola) per evitare in caso di piena rigurgito di acqua fluviale nel sistema fognario. Nel caso degli sbocchi con portelli a mannaia è quasi sempre prevista la presenza di un operatore per le operazioni di chiusura, che quindi può intervenire con tempi più lunghi rispetto al passaggio di una eventuale piena, mentre nel caso di sbocchi con portelli a ventola è il peso dell'acqua stessa sulla struttura che una mantiene chiuso il sistema finché il livello del fiume non scende ad una quota inferiore. Una particolare categoria di sbocchi rilevati sono i fossi/torrenti tombati nei centri cittadini, che tuttavia hanno assunto nel tempo principalmente la valenza di scarichi. Alcuni di essi nella città di Firenze vengono praticamente definiti "fognoni" dalla stessa popolazione, che hanno ormai dimenticato l'origine di tali condotte. Queste hanno una grandezza di qualche metro e sono quasi sempre sprovvisti di portelli (Fig. 5.56c-d) come nel caso degli scarichi fognari più piccoli o tubazioni per scopi speciali (ad esempio negli impianti idrovori di Signa, nelle zone di rilascio acqua presso l'acquedotto di Mantignano, ecc.). Gli scarichi di recente costruzione, che non emettono direttamente i fluidi in Arno sono solitamente dotati di canali di scolo che indirizzano i flussi in un punto preciso della corrente. Essi sono rivestiti in cemento oppure in pietrame ed aiutano a preservare la stabilità della zona di golena attraversata. Dove essi non sono stati previsti si può verificare un ruscellamento concentrato che porta a solchi di incisione anche profondi, che per erosione regressiva minacciano la stabilità delle sponde e degli argini ove presenti (Fig. 5.56e).





Fig. 5.55 – Mosaico di immagini relativo alle principali categorie di scarichi presenti



Fig. 5.56 – Fogna con liquami (a) e relativa perdita attraverso il rivestimento circostante (b). Sbocco di torrenti tombati in Firenze (c, d). Erosione concentrata allo sbocco di un sistema fognario (e)



Per quanto riguarda i principali elementi geomorfologici abbiamo individuato alcuni fronti di arretramento attivo di sponda che minacciano attività agricole retrostanti (i 4 esempi più evidenti si trovano nel Comune di Signa e Lastra a Signa) e 159 barre fluviali. Quest'ultime non essendo accessibili nella maggior parte dei casi, sono state digitalizzate a video utilizzando foto aeree a colori in scala 1:2000 scattate da voli effettuati nell'area nell'estate del 2002. Attraverso interpretazioni geomorfologiche e considerazioni sulla tipologia di vegetazione sono state suddivise in attive (93), quiescenti (21) ed inattive (45). Successivamente una fase di controllo diretto in campagna ha permesso di verificarne i risultati e correggere eventuali incongruenze (Fig. 5.57, 5.58).



Fig. 5.57 – Barre Fluviali a monte di Figline Valdarno

Fig. 5.58 – Barre Fluviali presso il ponte di Figline Valdarno

## 5.4 SINTESI DELLE OPERE DI IMPORTANZA IDRAULICA CLASSIFICATE LUNGO GLI AFFLUENTI

Anche nel caso degli affluenti dopo l’inserimento dei punti GPS all’interno del geodatabase (per un totale di 18316 punti), si è proceduto alla loro ripartizione nelle principali categorie create con le stesse modalità e gli stessi supporti prima descritti per l’Arno. In particolare abbiamo “ciglio” (542 punti), di “argine” (12744 punti), di “manufatti” (59), di “opere idrauliche” (3758 punti), di “scarichi” (103 punti), di “restringimenti” (298 punti) e di “significato vario” (geomorfologia ed altro) (89 punti) (Fig. 5.59).

E’ necessario ricordare che la maggior parte dei tratti analizzati ha un tracciato planetricamente fissato, una sezione idraulica ridotta e talvolta non esistono nemmeno aree golenali in quanto gli argini e le opere poste a difesa della pianura adiacente sono realizzate a ridosso del fiume. Pertanto molte delle opere idrauliche non sono state strutturate per la regimazione di flussi, ma piuttosto per conservare la stabilità delle difese spondali. Di conseguenza sono strettamente interconnesse con i rilevati arginali od altre strutture e le loro linee di definizione coincidono per lunghi tratti. In questo caso i punti GPS sono stati marcati una sola volta e in fase di elaborazione sono stati adeguatamente sdoppiati, ripartendoli nei vari campi di definizione. Si spiega così il numero apparentemente elevato di punti per definire ogni elemento rispetto al computo totale di punti effettivamente presi in campagna.

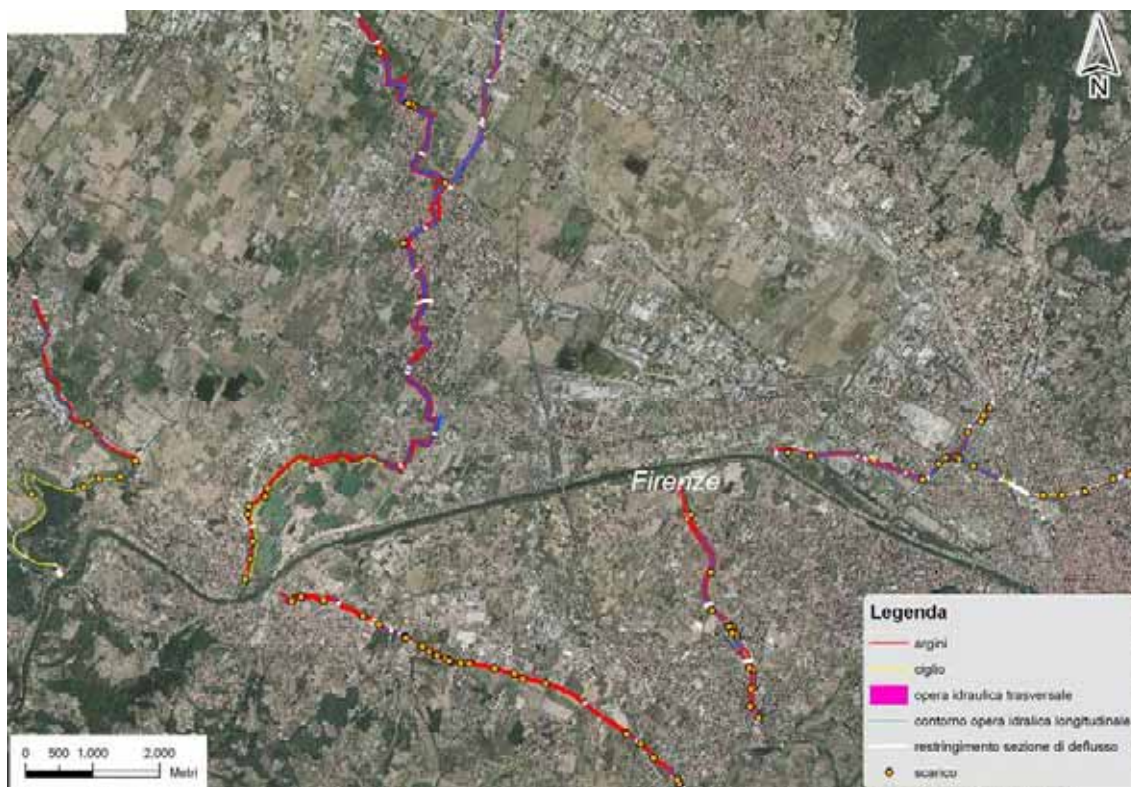


Fig. 5.59 – Principali elementi rilevati negli affluenti



Per quanto riguarda il **Bisenzio** 14 giornate di campagna hanno portato ad acquisire un numero complessivo, e rappresentativo del tratto analizzato, di 7513 punti GPS (Fig. 5.60, 5.61), di cui 151 appartenenti alla classe “ciglio di sponda” e 5194 ad “argine”. 1191 sono stati necessari invece per definire le opere idrauliche, 81 per i restringimenti, 20 per gli scarichi, 20 per i manufatti ed infine 38 di interesse vario (caposaldi, passaggi nei muri arginali, problemi di conservazione delle opere idrauliche, ecc.)

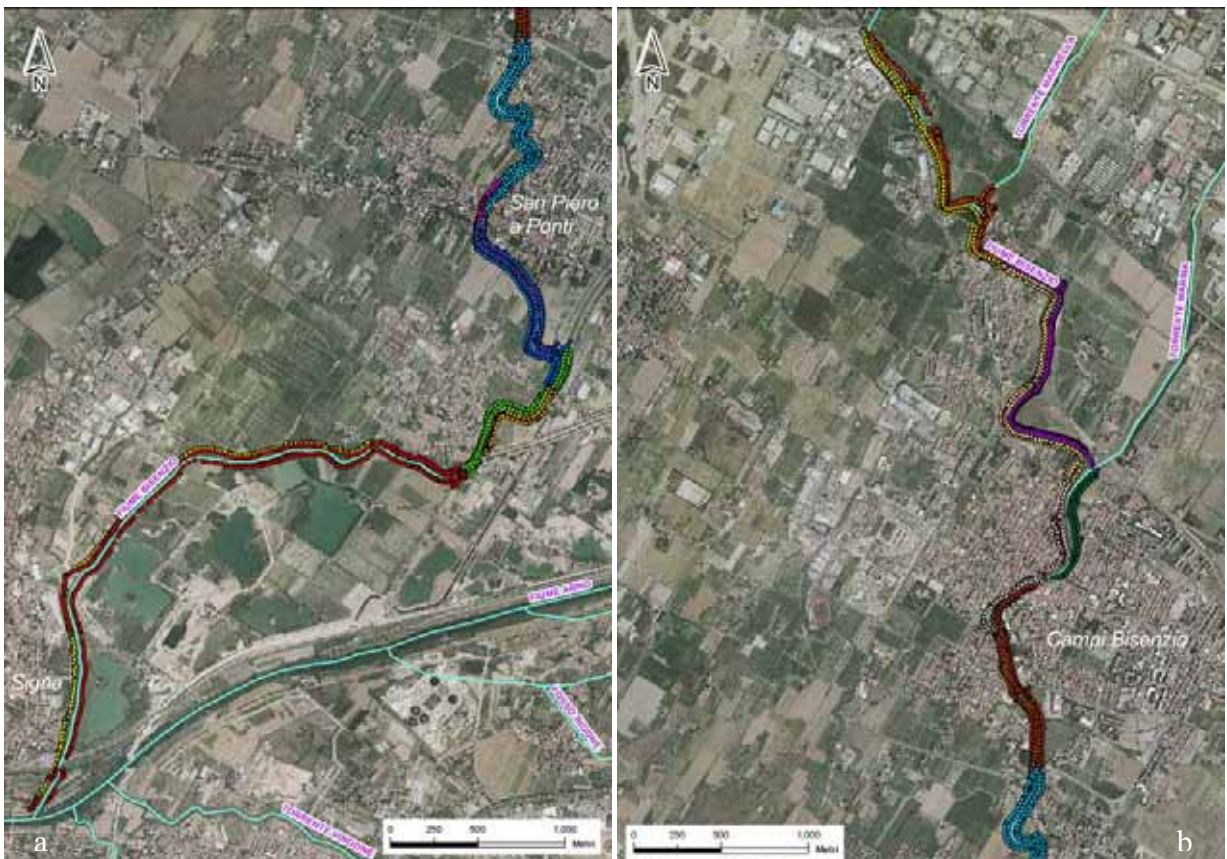


Fig. 5.60 – Punti GPS suddivisi per ogni giornata di lavoro nel tratto dalla foce a San Piero a Ponti (a) e da San Piero a Ponti fino al confine provinciale (b)

Il rilevamento su entrambe le sponde del Bisenzio è stato effettuato per una lunghezza complessiva di 26 km, dei quali solo 2.9 km con ciglio di sponda naturale o seminaturale (Fig. 5.61) e i restanti 23.1 caratterizzati dalla presenza di argini. Dunque per l' 88 % il Bisenzio si dimostra costretto tra difese arginali che sono sempre costituiti da rilevati in terra ad esclusione del centro abitato di Campi Bisenzio (tratto di 788 m) (Fig 5.62, 5.63, 5.64, 5.65, 5.66, 5.67, 5.68, 5.69, 5.70, 5.71) dove troviamo mura alte fino a 4.80 metri. Il ciglio si sviluppa nel tratto terminale ed è costituito comunque da una sponda fluviale, la cui evoluzione in passato è stata influenzata dalle adiacenti attività economiche (escavazione di inerti dai Renai, Agricoltura). Tuttavia esso presenta ancora caratteri di naturalità in quanto nessuna opera di protezione spondale legata alle tradizionali o moderne tecniche di ingegneria è stata realizzata.





Fig. 5.61 - Ciglio di sponda in prossimità dei Renai (Signa) (a) e arretramento attivo in prossimità della foce (b)

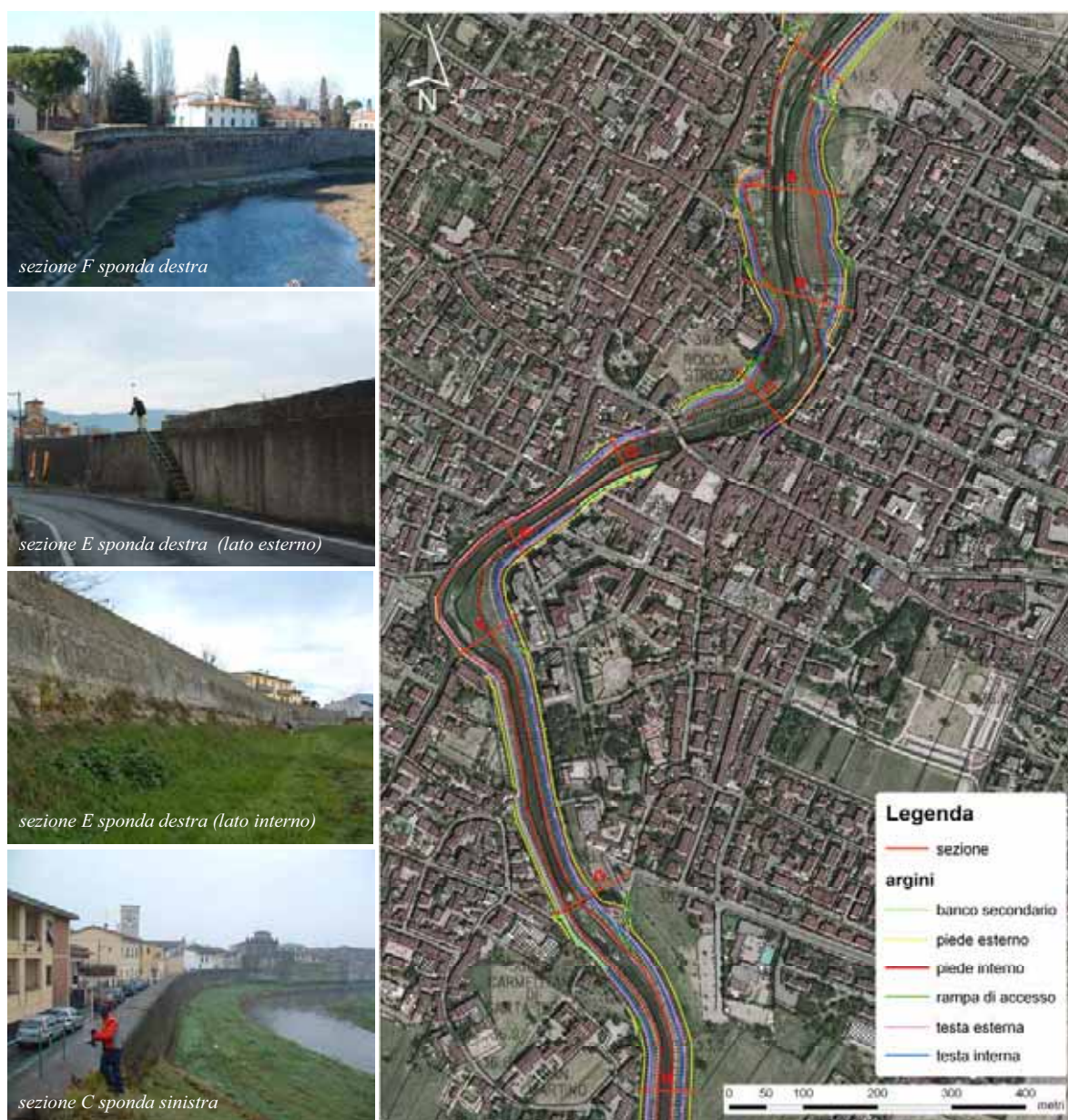


Fig 5.62 - Sezioni eseguite in località Campi Bisenzio ed immagini rappresentative degli argini intercettati dalle sezioni

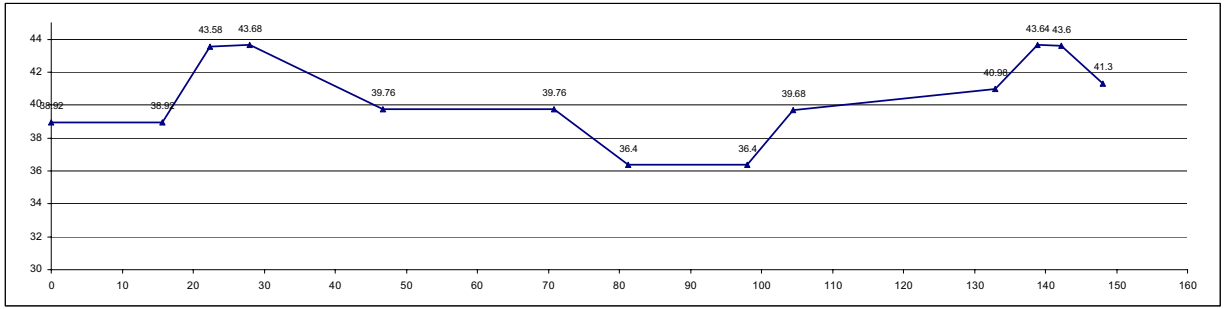


Fig. 5.63 – sezione A. Esagerazione verticale di 2.3.

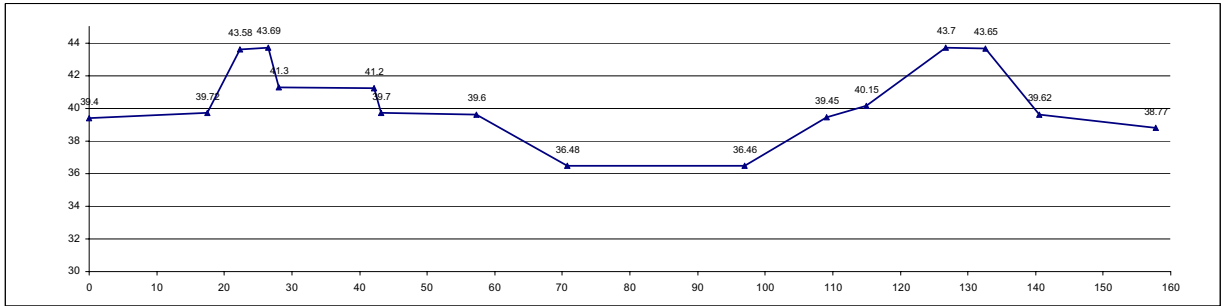


Fig. 5.64 – sezione B. Esagerazione verticale di 2.3.

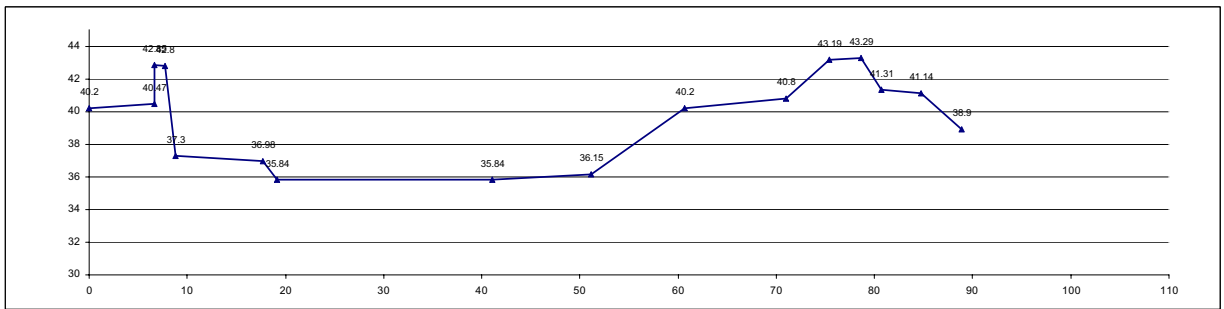


Fig. 5.65 – sezione C. Esagerazione verticale di 1.6.

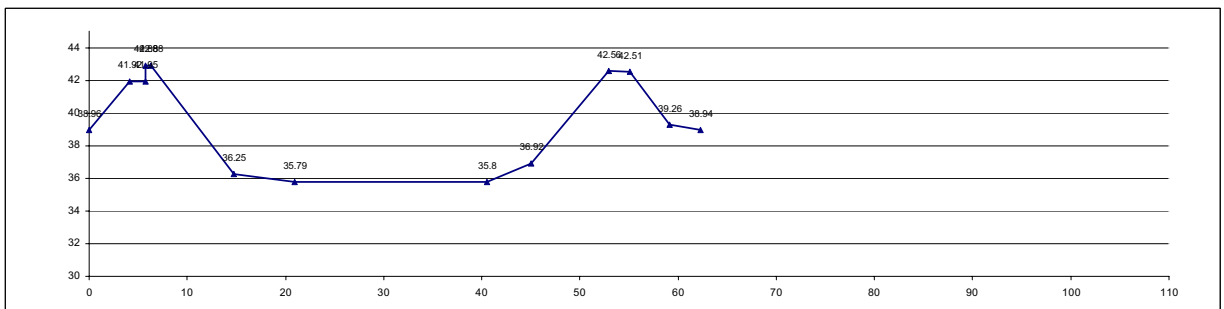


Fig. 5.66 – sezione D. Esagerazione verticale di 1.6.

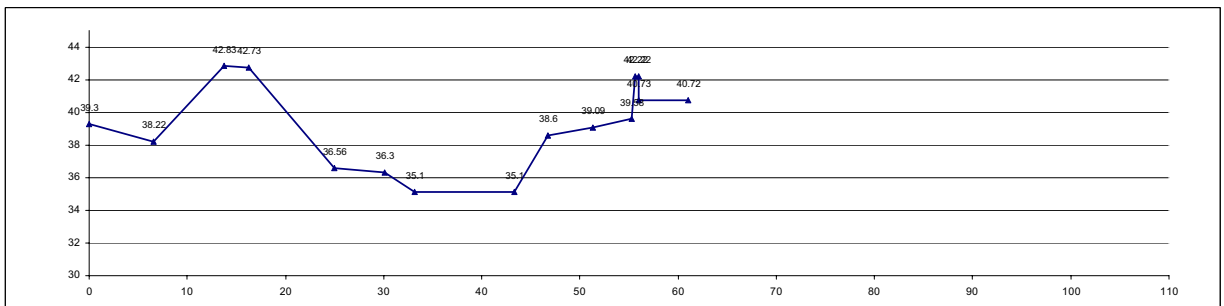


Fig. 5.67 – sezione E. Esagerazione verticale di 1.6.

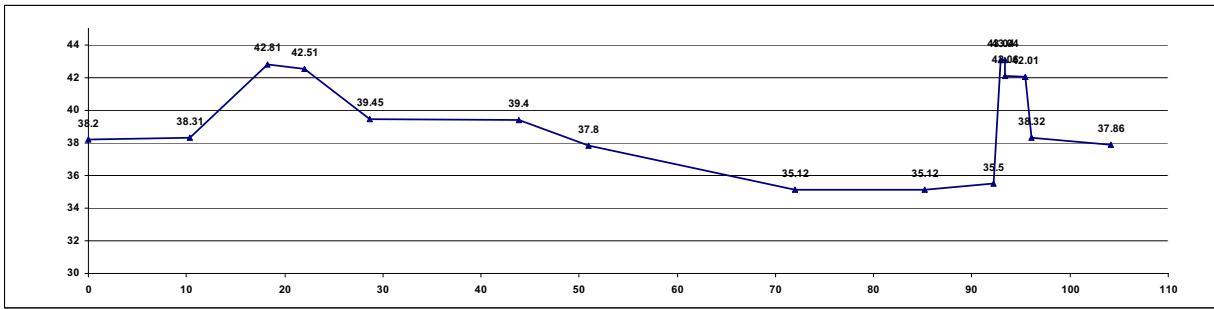


Fig. 5.68 – sezione F. Esagerazione verticale di 1.6.

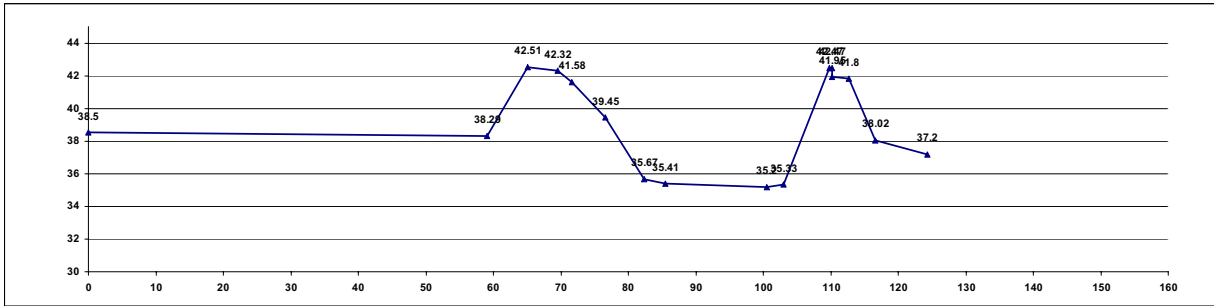


Fig. 5.69 – sezione G. Esagerazione verticale di 2.3.

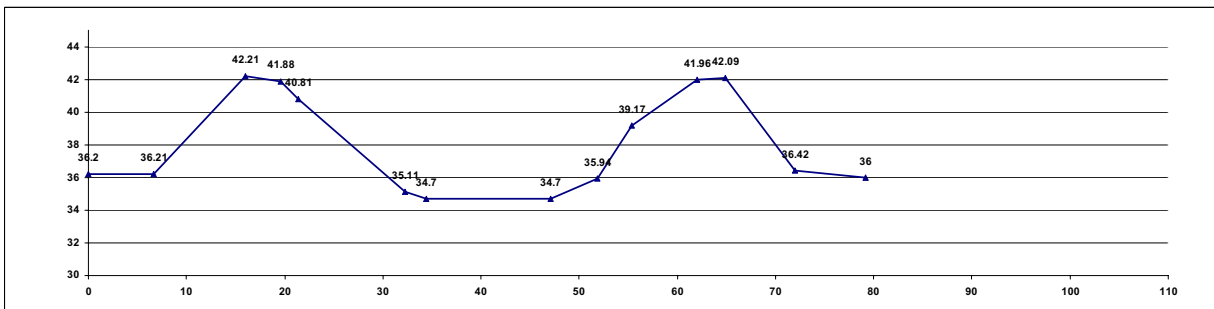


Fig. 5.70 – sezione H. Esagerazione verticale di 1.6.

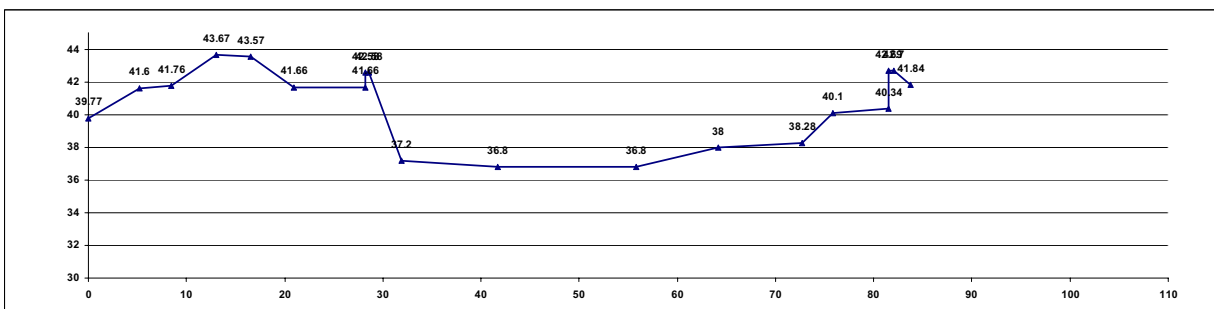


Fig. 5.71 – sezione I. Esagerazione verticale di 1.6.

La tipologia di argine in terra presente lungo questo torrente è trapezoidale semplice oppure di forma complessa con banco secondario sul fianco esterno (Fig. 5.75, 5.76). Quello interno invece è posizionato sovente in froldo o a pochi metri dall'alveo in una sorta di fascia golenale che nella maggior parte dei casi ha senz'altro un'origine di tipo antropica. Per disegnare in maniera accurata lo sviluppo di ogni elemento morfologico di queste opere idrauliche (rampe di accesso, fianchi e sommità) sono stati digitalizzate linee per una lunghezza totale di 98.8 km.



Per quasi tutto il corso del Bisenzio i fianchi interni degli argini sono rivestiti da estese protezioni in cemento o muratura e talvolta rinforzati al piede da scogliere di massi sciolti, lastre o muri in calcestruzzo (Fig. 5.77, 5.78), eccetto i tre chilometri di argine sulla sponda sinistra in prossimità della foce ed altri tratti più piccoli in cui la corrente non costruisce un pericolo idraulico particolare.

Sono state inoltre mappate altre 91 opere idrauliche a sviluppo longitudinale per difesa della stabilità di sponda e sono principalmente costituite da rivestimento in calcestruzzo gettato in opera o in muratura con impiego di materiale lapideo, ma vi si trovano anche scogliere, muri ed in quantità ridotta gabbioni e massi ciclopici. Soltanto 6 opere idrauliche sono trasversali e sono rappresentate da cateratte/idrovore, briglie/traverse o semplicemente scogliere poste in loco per dissipare la turbolenza dei flussi (Fig. 5.79, 5.80, 5.81, 5.82).

Tra gli elementi che riducono la sezione di deflusso sono stati individuati 12 restringimenti di cui 9 attraversamenti stradali (Fig. 5.83), 2 attraversamenti pedonali (Campi Bisenzio, San Piero a Ponti), 1 attraversamento ferroviario (Signa). Inoltre alla categoria in oggetto è stato associato anche 1 attraversamento di tubazione in località Confini (Campi Bisenzio) il cui disturbo alla sezione idraulica è indotto soltanto da un pilone di sostegno realizzato nella zona di golena su sponda destra che copre un'area non più grande di un metro quadrato.

Infine sono stati rilevati 17 scarichi associati a fognature urbane (Fig. 5.84), immissione di fluidi da canali che regimano le acque di pianura (impianti idrovori/chiviche) o il sistema di acque alte (impianto di paratoie). Osservando il numero degli scarichi in relazione alla lunghezza complessiva rilevata, si nota che essi sono in numero abbastanza ridotto se paragonati alla densità attualmente esistente in torrenti simili. Tuttavia essi sono caratterizzati da una elevata diversificazione tipologica in relazione alla funzionalità e di conseguenza alla modalità costruttiva, che comunque resta sempre legata alle tre categorie sopra menzionate. È altresì interessante notare che la distribuzione degli scarichi rilevati non è omogenea sul territorio, ma è concentrata nelle località di Signa-Renai (9), di Campi Bisenzio (2) e di Capalle (5). Solo un vecchio scarico di metallo non più attivo e dal cattivo stato di conservazione è stato segnalato in maniera isolata in località Confini (Campi Bisenzio). Infine nonostante la quantità dei fluidi immessa nel Bisenzio da parte degli scarichi fognari ordinari sia piuttosto ridotta la qualità delle acque fluenti in alveo è sempre di qualità scadente tale da non creare mai condizioni sufficienti per lo sviluppo di una significativa biodiversità fluviale. Per concludere tra gli impianti tecnologici principali per la sicurezza idraulica e la tutela dell'ambiente afferenti al Bisenzio segnaliamo i seguenti allestimenti:

### ***Impianto idrovoro “F.so di Piano” (Fig. 5.72)***

*Anno realizzazione:* 2002

*località:* San Mauro a Signa (Signa)

*Consorzio di bonifica:* Area Fiorentina

*portata max:* 5.25 m<sup>3</sup>/sec (3+1 elettropompe)

*sistema idraulico:* Acque Basse del sistema Piano-Monaca

*funzioni:* difesa dalle alluvioni sui territori dei Comuni di Campi Bisenzio e Signa

*(<http://www.consorziobonificaareafiorentina.it>)*



Fig. 5.72 – Particolare dell'impianto di *Fosso di piano*

### ***Impianto idrovoro “Crucignano” (Fig. 5.73)***

*Anno realizzazione:* 1999

*località:* Fornello (Campi Bisenzio)

*Consorzio di bonifica:* Area Fiorentina

*portata max:* 7 m<sup>3</sup>/sec (2+1 elettropompe)

*sistema idraulico:* Acque Basse di Crucignano

*funzioni:* difesa dalle alluvioni sui territori dei Comuni di Campi Bisenzio Calenzano e Prato

*(<http://www.consorziobonificaareafiorentina.it>)*



Fig. 5.73 Particolare dell'impianto di *Crucignano*

### ***Paratoie “Acque Alte” (Fig. 5.74)***

*Anno realizzazione:* 2000

*località:* S. Donnino (Campi Bisenzio / Signa)

*Consorzio di bonifica:* Area Fiorentina

*portata max:* 219 m<sup>3</sup>/sec (con Tr=100 anni)

*sistema idraulico:* Acque Alte del Fosso Reale

*funzioni:* difesa dalle alluvioni sui territori dei Comuni di Campi Bisenzio, Sesto Fiorentino, Calenzano e Firenze

(<http://www.consorziobonificaareafiorentina.it>)



Fig. 5.74 - Particolare del manufatto relativo alle paratoie *Acque Alte*

Estratto di immagini del rilevamento:



Fig. 5.75 – Argine in terra con banco secondario esterno



Fig. 5.76 – Argine in terra a forma trapezia semplice



Fig. 5.77 – Argine in terra e rivestimento di sponda



Fig. 5.78 – Argine in terra rivestito ed innalzato con muretto





Fig. 5.79 – Gabbioni come difesa spondale



Fig. 5.80 – Scogliere e rivestimento di sponda con pietrame



Fig. 5.81 – Scogliera cementata



Fig. 5.82 – Soglia



Fig. 5.83 – Ponte storico nel centro di Campi Bisenzio



Fig. 5.84 – Scarico con portello a ventola

Per quanto riguarda il **Marina** le acquisizioni di punti GPS (eseguite in 5 giornate di campagna) hanno portato a coprire l'area di rilievo con un numero corrispondente di 1836 punti GPS (Fig. 5.85), di cui 1175 ad "argine". Nessun punto invece è stato associato alla classe "ciglio di sponda" in quanto il tratto terminale del Marina è completamente arginato. 701 sono stati necessari invece per definire le opere idrauliche, 22 per i restringimenti e 2 per i manufatti. Infine 3 punti sono di interesse vario e si tratta rispettivamente di una tana di roditori nel fianco arginale, un caposaldo (M10) della rete di inquadramento plano-altimetrica della

Provincia di Firenze e di un collasso sul fianco arginale di dimensioni ridotte (larghezza massima 2 metri). Nessuno scarico è stato rilevato nell'intero settore considerato.

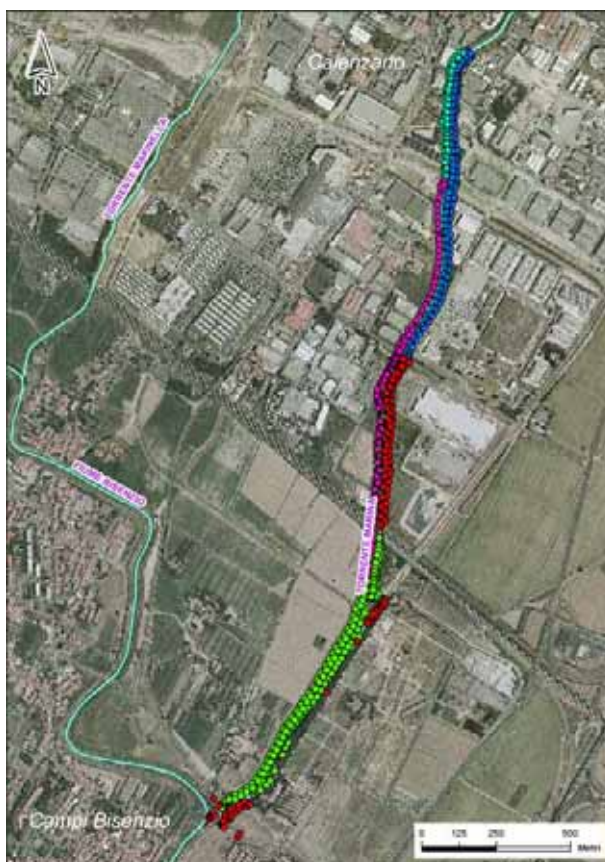


Fig. 5.85 - Punti GPS suddivisi per ogni giornata di lavoro

Gli argini presenti lungo il torrente Marina sono principalmente in terra, irrobustiti al piede interno con un muretto e, sempre a lato fiume, rivestiti per lunghi tratti da lastre in calcestruzzo nella parte più bassa del fianco arginale (52.5%) (Fig. 5.86). Poco inferiori per estensione (46.5%) troviamo argini realizzati con tecniche miste (terra e muratura) caratterizzati da muri in pietrame e talora di cemento a formare la parte interna della difesa arginale, mentre più esternamente vi è addossato un grosso rilevato di terra (Fig. 5.87). Questi muri solitamente raggiungono le massime altezze arginali e poggiano le proprie basi direttamente in alveo tanto che sono costantemente bagnati dalle acque quando esse sono presenti. Proprio per questo motivo troviamo spesso al piede dei muri lunghi tratti di scogliere che hanno essenzialmente il compito di difendere la loro stabilità. Infine per soltanto il 2% il Marina è dotato di vero e proprio muro d'argine ed esso si trova a protezione dell'antica Villa Montalvo (Campi Bisenzio) (Fig. 5.88). Tra tutte le opere suddette soltanto l'argine in terra che si estende in destra idrografica dalla confluenza con il Garille Nuovo fino all'impianto idrovoro di



Crucignano in prossimità del Bisenzio (800m) è dotato di una sottile fascia golendale. Per rappresentare al meglio lo sviluppo di ogni elemento morfologico delle difese arginali presenti (fianchi, sommità, banchi secondari e rampe di accesso) è stato necessario digitalizzare linee per una lunghezza totale di 25.7 km nonostante il tratto fosse soltanto di circa 3 km.

Sono state inoltre mappate 3 opere idrauliche trasversali costituite da soglie che mantengono fisso il fondo dell'alveo (Fig. 5.89) e 42 opere idrauliche a sviluppo longitudinale realizzate essenzialmente per la protezione degli argini in terra o misto muratura-terra. Tra queste troviamo lunghi rivestimenti in calcestruzzo e a tratti in muratura, scogliere, muri di vario genere e gabbioni in piccole quantità (Fig. 5.90, 5.91). Infine gli attraversamenti del torrente sono risultati soltanto 5 di cui 4 moderni ed importanti ponti stradali come ad esempio quello dell'autostrada A11 (Fig. 5.92) e quello di collegamento tra la zona industriale di Calenzano e Prato. Tutti questi utilizzano i rilevati arginali come basamento di sostegno per l'opera stessa, magari elevandosi qualche decimetro dal piano sommitale con adeguati piloni in cemento armato. Il restante elemento associato a questa categoria è un gasdotto che ha un'altezza sufficientemente alta rispetto alle quote arginali, ma il pilone di sostegno posto in sinistra idrografica è stato edificato al piede esterno dell'argine, mentre quello in destra è direttamente impiantato sul rilevato (Fig. 5.93).



Fig. 5.86 – Argine in terra con rivestimento interno



Fig. 5.87 – Argine misto con terra e muratura



Fig. 5.88 – Muro d'argine sul lato esterno



Fig. 5.89 – Soglia in calcestruzzo





Fig. 5.90 – Rivestimento di sponda ed argine



Fig. 5.91 – Scogliere a protezione del piede dell'argine misto



Fig. 5.92 – Ponte autostrada A11



Fig. 5.93 – Gasdotto con pilone innestato nell'argine

Per quanto riguarda la **Greve** sono stati acquisiti un totale di 2.029 punti GPS (in 5 giornate di campagna) sia per la sponda destra che sinistra (Fig. 5.94) di cui solo 43 corrispondenti alla classe “ciglio di sponda” e 1469 ad “argine”. Per contraddistinguere le opere idrauliche invece sono stati necessari 466 punti GPS, mentre per i restringimenti ne sono bastati appena 32. Infine 16 punti rappresentano gli scarichi, 5 i manufatti, 3 le zone di interesse geomorfologico (zone con arretramento di sponda attivo) e 3 le zone di interesse vario (particolare rivestimento attorno ad uno scarico e cateratta dismessa).

Il rilevamento su entrambe le sponde della Greve è stato effettuato per una lunghezza complessiva di circa 8 km, dei quali appena 650 m dotati di ciglio di sponda (Fig. 5.95) e i restanti 7.35 km caratterizzati dalla presenza di argini che corrono paralleli al corso d'acqua a pochi metri dall'alveo di magra.



Fig 5.94 - Punti GPS suddivisi per ogni giornata di lavoro

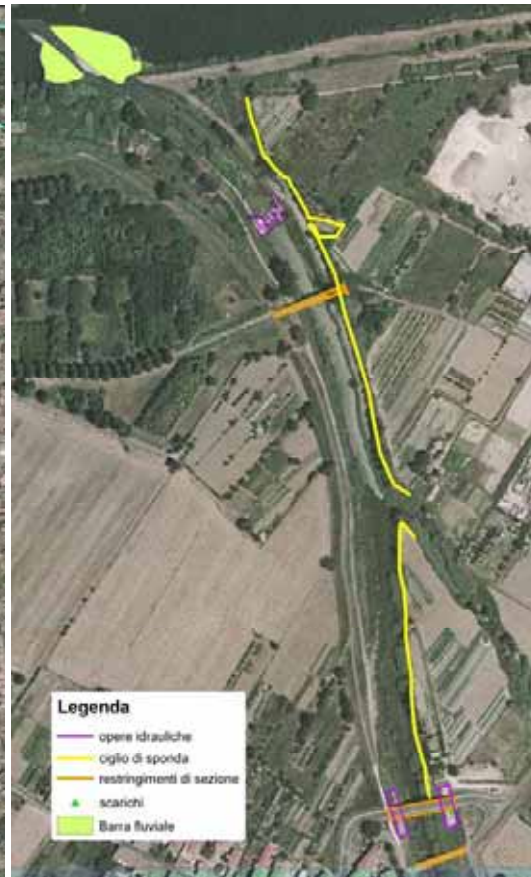


Fig. 5.95 - Ciglio di sponda in prossimità della foce

Dunque per l' 83.8 % la Greve risulta dotata da difese arginali che sono ininterrottamente costituiti da rilevati in terra a forma trapezoidale semplice (Fig. 5.96) ad esclusione del centro abitato di Ponte a Greve (62m) e Scandicci (150m) dove troviamo muri d'argine a difesa di antiche abitazioni costruite molto a ridosso del torrente (Fig. 5.97). Il piccolo tratto di ciglio invece si trova in condizioni seminaturali nel tratto terminale della Greve (destra idrografica) ed è caratterizzato da diffuse zone di arretramento attivo, delle quali sono state segnalate attraverso la strumentazione GPS quelle più prossime agli elementi a rischio (Fig. 5.98). Per tracciare in maniera accurata lo sviluppo di ogni elemento morfologico delle difese arginali presenti (fianchi e sommità) è bastato digitalizzare quattro linee che sommate a quelle raffiguranti le rampe di accesso hanno prodotto una lunghezza totale di 29.9 km.

Sono state inoltre individuate e mappate 39 opere idrauliche a sviluppo longitudinale: principalmente rivestimenti in calcestruzzo alternati a muratura, ma anche muri, scogliere, gabbioni, materassi tipo Reno e massi ciclopici (Fig. 5.99). Tutte queste opere contribuiscono a mantenere stabili le sponde stesse dell'alveo di magra e nelle sezioni idrauliche più piccole i fianchi interni degli argini che durante le piene possono venire a contatto con le correnti della Greve. Quattro sono invece le opere idrauliche trasversali e tutte risultano associate a traverse.

Le due più a monte sono senz'altro le più antiche, viste i materiali impiegati per realizzarli (lapidei, lignei, cementizi e metallici) e la connessione con antichi manufatti, costruiti in modo tale da sfruttare la derivazione delle acque del bacino retrostante lo sbarramento ed il salto idraulico che esso genera (Fig. 5.100). Tra gli elementi che riducono la sezione di deflusso sono stati individuati 9 restringimenti di cui 6 ponti stradali, 2 attraversamenti pedonali ed una passerella strutturata come un ponte vero e proprio, ma impiegata esclusivamente per lo scavalco di grosse tubazioni proveniente dall'impianto acquedottistico di Mantignano (Fig. 5.101). Quest'ultimo data la sua vicinanza alla foce e quindi in stretta correlazione anche con la dinamica d'alveo dell'Arno presenta problemi di forte erosione attorno alle fondazioni, specie nel pilone posto al centro dell'alveo (Fig. 5.101). Altro restringimento da segnalare è quello che costituisce l'attraversamento di Via Pisana in località San Lorenzo a Greve, meglio conosciuta come Ponte a Greve. Esso è il più antico del tratto analizzato e il suo stile costruttivo risalente al 1398 (Repetti, 1841) occupa buona parte della sezione idraulica, costituendo un pericolo durante gli eventi di piena (Fig. 5.102). Infine sono stati rilevati 16 scarichi associati ad acque reflue domestiche/urbane o connesse a particolari sistemi di controllo delle acque superficiali in zone residenziali (Fig. 5.103). Più della metà pur conservando integra la propria struttura (tubazione, portello ed opere accessorie) hanno uno stato di conservazione abbastanza degradato e sembrano essere utilizzati saltuariamente o addirittura dimessi da tempo. I problemi principali che affliggono questo tipo di scarichi è l'interramento, la crescita di vegetazione e la realizzazione di profondi solchi dallo sbocco fino al torrente qualora le acque di precipitazione si concentrano nei canali di scorrimento già esistenti. Nel caso degli scarichi utilizzati saltuariamente e senza nessun opera di controllo dei flussi in prossimità dello sbocco possono formarsi allo stesso modo incisioni per ruscellamento concentrato.



Fig. 5.96 – Argine in terra e passerella in lontananza



Fig. 5.97 – Muro d'argine





Fig. 5.98 – Ciglio di sponda con tratti in arretramento



Fig. 5.99 – Materasso tipo Reno e massi ciclopici attorno



Fig. 5.100 – Pescaia e mulino



Fig. 5.101 – Attraversamento di tubazioni a mezzo ponte



Fig. 5.102 – Ponte di via Pisana



Fig. 103 – Scarico con serie di portelli (mannaia e ventola)

Per quanto riguarda il tratto dell’**Ombrone** sono stati acquisiti 1.162 punti GPS (in 4 giornate in campagna) soltanto per la sponda sinistra dalla confluenza in Arno fino alla località Ponte all’Asse (Fig. 5.104), di cui 170 appartenenti alla classe “ciglio di sponda” e 779 ad “argine”. Per contraddistinguere le opere idrauliche invece sono stati necessari 175 punti GPS, mentre per i restringimenti ne sono bastati solamente 32 e per gli scarichi 10. Infine 4 punti GPS rappresentano i manufatti rilevabili, 3 le zone di interesse geomorfologico (ad esempio zone con arretramento di sponda attivo) e 2 le zone di interesse vario (pozzo e caposaldo IGM).

Il rilevamento è stato effettuato per una lunghezza complessiva di 7.5 km, dei quali 3.3 km caratterizzati dalla presenza di argini e 4.2 km con ciglio di sponda che è veramente naturale nei tratti collinari e seminaturale nelle zone pianeggianti a causa della pressione antropica esercitata dalle attività agricole e dagli esercizi turistico alberghieri sulla naturale evoluzione geomorfologica (Fig. 5.105). Tuttavia soltanto in presenza della seconda attività troviamo un ciglio regolarizzato e controllato da importanti opere idrauliche: rivestimento con pietre di dimensioni decimetriche non cementate (Fig. 5.109).



Fig 5.104 - Punti GPS suddivisi per ogni giornata di lavoro

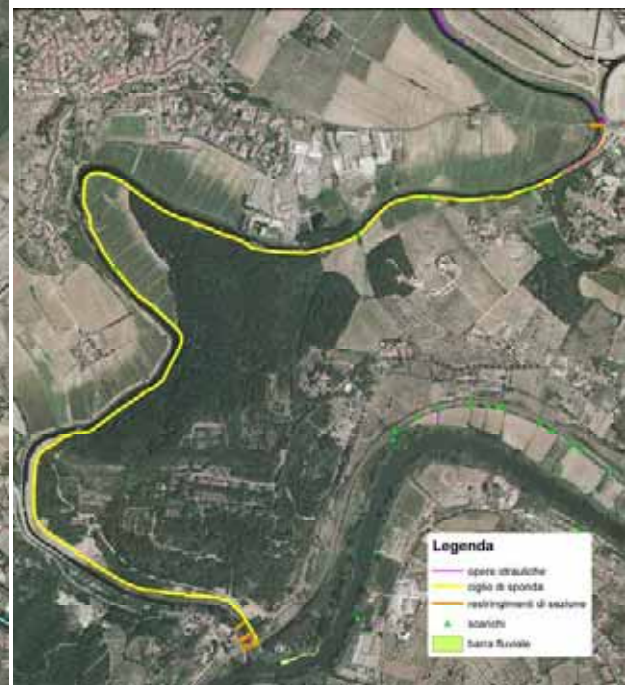


Fig. 105 - Ciglio di sponda in prossimità della foce

Dunque in questo caso solo il 44% del tratto analizzato è dotato di difese arginali per metà circa costituite da rilevati trapezoidali semplici e per l'altra metà dotati di un banco intermedio sul fianco esterno (Fig. 5.106). Soltanto in prossimità di Ponte all'Asse per difendere un'abitazione posta all'angolo con la SR66 e prospiciente ad un ponte stradale l'argine in terra si trasforma in vero e proprio muro d'argine (27 m). Per disegnare in maniera accurata lo sviluppo di ogni elemento morfologico di queste opere idrauliche (rampe di accesso, fianchi, sommità e banchi secondari) sono stati digitalizzate linee per una lunghezza totale di 16.2 km.



Sono state inoltre mappate altre 18 opere idrauliche a sviluppo longitudinale e sono principalmente costituite da rivestimento in calcestruzzo gettato in opera al fine di creare una efficace difesa spondale necessaria per preservare l'integrità degli argini posti alle proprie spalle. Vi si trova inoltre un rivestimento in pietra a ridosso del solo ciglio di sponda, come precedentemente specificato, una scogliera in prossimità della foce, ed alcuni muri, due dei quali posti rinforzo del fianco esterno dell'argine in terra per la presenza di abitazioni che probabilmente sono state costruite molto vicino al torrente precedentemente alla realizzazione degli argini così come li vediamo oggi (Fig. 5.107). Tra gli elementi che riducono la sezione di deflusso sono stati individuati 6 restringimenti di cui 3 attraversamenti stradali, 2 ponti ferroviari, ed infine un piccolo ponticello pedonale dotato nel luogo medesimo di paratoie che servono per regolare le acque di alcuni fossi, uno dei quali derivante proprio da un'area di laminazione adiacente al corso dell'Ombrone (opera di bonifica idraulica di proprietà della regione Toscana). Il ponte stradale in località Castelletti risulta il più basso tra quelli analizzati e quindi connesso ai maggiori rischi durante gli eventi alluvionali, benché non sia dotato di piloni costruiti direttamente in alveo (Fig. 5.108). Per quanto riguarda invece il secondo ponte ferroviario a partire dalla confluenza in Arno si ritiene opportuno segnalare il suo cattivo stato di conservazione dovuto ad un abbandono che dura ormai da decine d'anni. Infine sono stati rilevati appena 7 scarichi associati ad acque di raccolta provenienti dei campi adiacenti (fossi), acque reflue domestiche e da due sistemi di chiuse. Di una si è parlato precedentemente in relazione ad un ponticello che sovrasta le paratoie, mentre l'altra costituisce la parte terminale di un impianto idrovoro a servizio di un sistema di casse di espansione, che tuttavia al momento del rilievo non era ancora terminato ed entrato in funzione (Fig. 5.110).



Fig. 5.106 – Argine in terra (sullo sfondo banco secondario) Fig. 5.107 – Restringimento del rilevato arginale



Fig. 5.108 – Ponte stradale



Fig. 5.109 – Rivestimento di sponda in pietrame



Fig. 5.110 – Impianto idrovoro di Castelletti (a), paratoie esistenti già prima della realizzazione del retrostante manufatto (b) e foto aerea dell'impianto (Google ©) (c)

Per quanto riguarda il tratto del **Vingone** in 7 giornate di campagna sono stati acquisiti complessivamente 2.996 punti GPS (Fig. 5.111) di cui 2539 appartenenti alla classe “argine” e soltanto 20 al “ciglio di sponda”. 302 punti sono stati necessari invece per definire le opere idrauliche, 49 per i restringimenti, 33 per gli scarichi, 24 per i manufatti ed infine 17 di

interesse vario (particolari problemi strutturali come escavazione di tane di roditori o localizzati cedimenti, siti speciali, caposaldi, ecc.).

Il rilevamento su entrambe le sponde del Vingone è stato effettuato per una lunghezza complessiva di 14 km e quasi per l'intero tratto troviamo rilevati arginali. Soltanto in quattro piccoli siti sulla sponda sinistra abbiamo ciglio di sponda per una lunghezza totale di appena 339 m di cui più di 1/3 completamente artificiale perché rimodellato dall'espansione urbanistica o immobilizzato da pesanti opere in cemento (Fig. 5.112).



Fig. 5.111 - Punti GPS suddivisi per ogni giornata di lavoro



Fig. 5.112 - Cigli di sponda

Dunque il 97.6 % del tratto analizzato scorre tra difese arginali realizzati quasi esclusivamente in terra ad eccezione di piccoli tratti di muro d'argine a difesa di manufatti costruiti in prossimità dell'alveo (complessivamente 323 m). Gli argini in terra dalla foce fino al ponte di via Livornese presentano le volumetrie e le altezze maggiori lungo tutto torrente raggiungendo



dislivelli maggiori anche di 5 m tra la sommità arginale e la quota del terreno d'imposta (Fig. 5.113). Per garantire la loro stabilità alcuni tratti dei fianchi interni sono addirittura rivestiti da una maglia metallica esagonale con filo a doppia torsione, fissata a terra con malta cementizia. I restanti rilevati presentano invece dimensioni più modeste, a tratti mescolandosi confusamente con le morfologie circostanti (Fig. 5.114). Le difese arginali in terra sono solitamente strutturate con una forma trapezoidale semplice e solo per brevi tratti con un banco secondario sul fianco esterno. Per tracciare in maniera accurata il loro sviluppo è stato sufficiente digitalizzare linee (due per la testa, due per il piede e due per il banco secondario) che sommate alle rampe di accesso e ai segmenti di definizione dei muri d'argine hanno prodotto una lunghezza totale di 52.9 km.

Sono state inoltre mappate 51 opere idrauliche a sviluppo longitudinale per la difesa degli argini e delle sponde (muri, gabbioni, rivestimenti in calcestruzzo e in pietra) dislocate un po' su tutto il tratto anche se non in maniera continua (Fig. 5.115) e soltanto 4 trasversali ai flussi del Vingone (briglie per dissipare la turbolenza delle acque nel tratto finale e soglia in pietrame con funzione di guado) (Fig. 5.116). Tra gli elementi che riducono la sezione di deflusso sono stati individuati 13 restringimenti di cui soltanto in un caso associato ad una tubazione metallica con piloncini di sostegno posti sui fianchi interni degli argini, mentre in tutti gli altri casi abbiamo ponti stradali di categorie differenti. Tra questi abbiamo un ponte storico che è impostato direttamente sulle sponde e sugli argini raggiungendo una quota pari a quella massima del rilevato sul quale si appoggia, uno stile costruttivo resistente alle correnti, ma che riduce la sezione idraulica più del 50%. Inoltre è da segnalare proprio su uno dei muri di sostegno di questo ponte la presenza di una frattura larga alcuni centimetri che minacciano la stabilità della struttura stessa (Fig. 5.117). Infine sono stati rilevati 29 scarichi associati a fognature urbane, immissione di fluidi dai fossi collettori nei campi adiacenti (Fig. 5.118) e strutture che regimano le acque in eccesso nelle contigue aree pianeggianti (impianti di pompaggio/cateratte). La collocazione dei loro sbocchi è posizionata sia al piede dell'argine, ed in questo caso gli scarichi più grandi sono dotati di portello a ventola metallico, sia sul fianco arginale. Nel primo caso alcuni scarichi sono addirittura associati tubazioni che seguono il profilo argine, salendo per buona parte sul paramento esterno e ridiscendendo poi lungo quello interno.





Fig. 5.113 – Rilevati arginali prossimi alla foce



Fig. 5.114 – Argini di altezza modesta lontano dalla foce



Fig. 5.115 – Rivestimento in pietrame



Fig. 5.116 – Briglia



Fig. 5.117 – Ponte stradale e scarico adiacente



Fig. 5.118 – Scarico con ripartitore di flusso

Sette giornate di campagna hanno consentito invece il rilievo completo del tratto cittadino del **Mugnone** dalla confluenza in Arno fino alle cure (Fig. 5.119). È da tenere presente che, al momento delle misurazioni, il tratto a valle dell'attraversamento ferroviario (opera pertinente alla stazione centrale SMN) era stato cantierizzato da operai specializzati al fine di operare un adeguamento idraulico del torrente; facevano eccetto l'area contigua alla foce e la sponda sinistra in località le Cascine. Nei giorni dei sopralluoghi soltanto 160 metri del tratto più a monte erano in fase di piena attività e non è stato possibile accedervi. Dunque saltando

quest'ultimo settore abbiamo ritenuto ugualmente imprescindibile rilevare il Mugnone, ben consci che la morfologia dei luoghi sarebbe cambiata da lì a poco. Dunque sono stati marcati complessivamente 2360 punti GPS, di cui 1353 appartenenti alla classe “argine” e soltanto 149 al “ciglio di sponda”. Per definire invece le opere idrauliche sono stati necessari 748 punti, per i restringimenti 73, per gli scarichi 17, per i manufatti 4 ed infine un tale di 16 punti per gli oggetti di vario interesse (caposaldi e aperture tra muro d'argine e zone di imposta di un attraversamento pedonale).

Il rilevamento su entrambe le sponde del Mugnone è stato effettuato per una lunghezza complessiva di circa 12 km, dei quali appena 3.43 km dotati di ciglio di sponda diviso in più segmenti (Fig. 5.120) e i restanti 8.57 km caratterizzati dalla presenza di argini che corrono paralleli al corso d'acqua a pochi metri dall'alveo e talvolta direttamente in frodo.



Fig. 5.119 - Punti GPS suddivisi per ogni giornata di lavoro



Fig. 5.120 - Ciglio di sponda

Dunque per il 71.4 % il Mugnone risulta dotato da difese arginali che sono costituiti da rilevati in terra a forma trapezoidale semplice alternati a forme più complesse (sviluppo di banchi sui fianchi esterni) nel tratto che va approssimativamente da Piazza Puccini fino alle Cascine (Fig.

5.121) e nella porzione centrale di viale Redi. Nelle restanti zone dotate di protezione idraulica abbiamo opere miste terra-muratura (Fig. 5.122) e muri d'argine a differente altezza con rivestimenti in pietra serena nelle zone più centrali (Fig. 5.123). Per disegnare in maniera accurata lo sviluppo di ogni elemento morfologico di queste opere sono state digitalizzate linee per una lunghezza totale di 33.6 km. Il ciglio di sponda invece, trattandosi di un torrente il cui corso è stato più volte deviato e risentendo fortemente dell'intensa urbanizzazione, non può essere in nessun caso considerato naturale o seminaturale.

Sono state inoltre mappate altre 57 opere idrauliche, a sviluppo longitudinale e con estensione più contenuta, poste a difesa delle sponde e dei manufatti su di esse realizzati. Essi sono principalmente muri (Fig. 5.123) e rivestimenti in calcestruzzo alternati a coperture in materiale lapideo che testimoniano il forte controllo antropico sull'andamento del torrente. Anche laddove non vi sono evidenti difese verticali troviamo tuttavia una fissazione del fondo operata attraverso una diffusa cementificazione che in certi casi diventa una vera e propria canalizzazione dell'alveo. Soltanto 7 sono le opere trasversali presenti e si tratta di due pennelli (lunghi non più tre metri) posti in alveo presso l'ansa che il Mugnone esegue in piazza Puccini, una botte a sifone nel punto in cui il torrente incrocia il canale del fosso Macinante (zona Cascine) e 4 strutture che fissano il fondo dell'alveo associabili alla categoria soglie/traverse (Fig. 5.124). Tra gli elementi che riducono la sezione di deflusso sono stati individuati 19 restringimenti di cui 11 attraversamenti stradali, 5 passaggi pedonali (Cascine e quartiere 5) e 3 ponti ferroviari tra i quali quello in correlazione con la stazione di Santa Maria Novella, la cui estensione (300m) è al limite dal far considerare l'opera come un vero e proprio tombamento. Questo manufatto assieme agli attraversamenti cittadini di antica concezione come il ponte all'Asse (Fig. 5.125), il ponte Rosso o quello di via Baracca costituiscono le zone di maggior influenza sulle correnti di piena del Mugnone. Infine una particolarità da segnalare è che il ponte di San Donato, sotto la propria campata, vede unirsi le acque del Terzolle a quelle del Mugnone. Per concludere sono stati rilevati 18 scarichi associati al sistema di drenaggio urbano che raccoglie e smaltisce le acque superficiali (es. meteoriche intercettate dalla caditoie) e quelle reflue provenienti dalle attività umane in generale. Nel primo caso abbiamo quasi sempre piccoli tubi senza chiusura posti poco al di sotto del piano strada, mentre nel secondo caso, che è molto più diffuso, gli sbocchi arrivano fino al diametro di diversi decimetri e sono generalmente protetti da portelli a ventola. Essi vengono meno per tubazioni più vecchie o per casi particolari come ad esempio la serie di 6 tubi adagiati sulla sponda destra (piazza Puccini) con lo sbocco parallelo ad essa e protetti da una copertura in cemento armato (Fig. 5.126). La predominanza di scarichi appartenente al secondo gruppo è probabilmente dovuta al



fatto che nel percorso alcuni sistemi fognari raccolgono anche le acque superficiali prima di gettarsi nel Mugnone.



Fig. 5.121 – Rilevato arginale in zona cascine



Fig. 5.122 – Argine misto con terra e cemento con strada



Fig. 5.123 – Muro d'argine che si estende in alveo



Fig. 5.124 – traversa



Fig. 5.125 – Ponte all'Asse durante la cantierizzazione



Fig. 5.126 – Scarico dotato di tubazione multipla

Per quanto riguarda invece il **Terzolle** con 2 uscite giornate di campagna è stata coperta l'area di interesse e sono stati acquisiti complessivamente 420 punti GPS sia per la sponda destra che sinistra (Fig. 5.127). Di questi 235 appartengono alla classe "argine" e soltanto 9 al "ciglio di sponda". Per definire invece le opere idrauliche sono stati necessari 175 punti, mentre per i



restringimenti 9 e per gli scarichi 7. Nessun punto associato a manufatti o a elementi di vario interesse è stato invece marcato in questo contesto.

Il rilevamento è stato eseguito per una lunghezza complessiva di 3 km, dei quali solo 165 m sono rappresentati da un ciglio di sponda completamente artificiale (Fig. 5.128) mentre nei restanti 2.84 km vi troviamo difese arginali.



Fig. 5.127 - Punti GPS suddivisi per ogni giornata di lavoro Fig. 5.128 - Ciglio di sponda

Dunque per quasi la totalità del tratto analizzato (94.5%) il Terzolle è imbrigliato tra argini in terra a forma trapezia (Fig. 5.129), muri d'argine fondati direttamente in alveo (Fig. 5.130) e opere miste nella zona di passaggio da una tipologia all'altra (44m). Il ciglio è presente in sponda sinistra poco prima della confluenza con il Mugnone in corrispondenza di un lembo di terra che separa i due torrenti facendoli scorrere paralleli prima della congiunzione. Entrambi sono sempre associati ad altre opere idrauliche longitudinali con funzione di protezione. In fase di digitalizzazione per tracciare in maniera accurata lo sviluppo di ogni elemento morfologico delle difese arginali presenti (fianchi e sommità) è bastato digitalizzare quattro linee che sommate a quelle riproducenti le rampe di accesso ed il banco secondario hanno prodotto una lunghezza totale di 8.76 km.

Sono state inoltre mappate altre 18 opere idrauliche delle quali 17 a sviluppo longitudinale per difesa della stabilità di sponda e degli argini laddove essi sono stati realizzati dirimpetto al letto del Terzolle. Tali manufatti sono principalmente costituiti dai classici rivestimenti in calcestruzzo e pietra alternati a muri. In prossimità del ponte di Mezzo troviamo invece un'opera trasversale associata a soglia (Fig. 5.131) che costituisce la parte terminale di un tratto di alveo fortemente cementificato e dotato di un collettore centrale che garantisce sempre lo scorrimento dell'acqua, anche in esigue quantità (Fig. 5.132). Nella porzione di torrente presa

in considerazione troviamo soltanto 3 elementi che riducono la sezione di deflusso, nonostante il Terzolle attraversi un tratto cittadino densamente abitato: 1 ponte stradale, 1 passaggio pedonale ed 1 attraversamento ferroviario (Fig. 5.133). Tra questi quello a maggior impatto sull'idrologia del corso d'acqua e senz'altro il restringimento percorso dalle linee ferroviarie ed inoltre si segnala che l'attraversamento pedonale poco più a valle è affiancato da numerose tubazioni che devono essere monitorate in caso di piena. Infine sono stati rilevati 5 scarichi associati ad acque reflue urbane (Fig. 5.134) e soltanto in un caso direttamente ad acque meteoriche di dilavamento (derivazione dal marciapiede), ma corredati comunque tutti quanti di sbocco con portelli metallici a ventola. Le loro dimensioni raggiungono anche due metri di apertura massima e sono posizionati un po' a tutte le quote; dal piano strada fino al letto cementificato del Terzolle.



Fig. 5.129 – Argine in terra con muro al piede interno



Fig. 5.130 – Muro d'argine che si estende in alveo



Fig. 5.131 – Soglia sotto il ponte di Mezzo



Fig. 5.132 – Muro e rivestimento in cemento dell'alveo



Fig. 5.133 – Ponte Ferroviario



Fig. 5.134 – Scarico con portello a ventola



## 5.5 STATO DI CONSERVAZIONE DELLE OPERE DI IMPORTANZA IDRAULICA CLASSIFICATE LUNGO L'ARNO

Le più estese e diffuse opere idrauliche insistenti lungo il corso dell'Arno sono senza dubbio gli argini differenziati principalmente secondo le normali tecniche di realizzazione (materiale terrigeno, muratura o soluzioni miste).

Lo stato di conservazione degli argini in terra è complessivamente buono, ma tuttavia sussistono peculiarità più o meno estese che possono influire diversamente sul loro tempo di vita, esistono alcune situazioni critiche che è importante conoscere in caso di piena ed infine vi sono alcuni danni localizzati che minacciano la stabilità di queste opere idrauliche.

Innanzitutto dobbiamo prendere atto che talvolta la loro funzione va oltre la semplice difesa idraulica ed assumono caratteristiche infrastrutturali di importanza anche regionale. Difatti i rilevati sono percorsi per tratti più o meno lunghi da superfici carrozzabili di vario tipo (strade sterrate o asfaltate e piste pedo-ciclabili) o da tracciati ferroviari con uno o più binari. L'esempio più significativo di quest'ultima situazione si trova in corrispondenza dell'argine che sulla sponda destra si estende da Firenze a Signa (circa 8 km). Alcuni lavori di ammodernamento della suddetta linea ferroviaria hanno prodotto, durante i nostri sopralluoghi, degli scavi nel corpo centrale che ci hanno permesso di osservare la stratigrafia dell'argine nei primi metri dalla sommità (Fig. 5.135).



Fig. 5.135- Sezione del rilevato arginale



Fig. 5.136 – superficie ferroviaria sul banco intermedio

L'aspetto interessante che emerge da un'attenta osservazione del sito è che il piano di percorrenza dei treni una volta era più basso ed è stato successivamente rialzato (nel caso specifico di oltre 1.5m). Questo spiegherebbe anche il fatto che in questo punto i binari si trovano sulla sommità, mentre in altre zone si trovano sul banco secondario esterno, che probabilmente in passato è stato la parte più elevata dell'argine ed un sovrainnalzamento relativo soltanto al fianco interno lo ha lasciato ad una quota inferiore (Fig. 5.136).

Per quanto riguarda le situazioni potenzialmente critiche si segnalano invece i rivestimenti degli argini in terra operati con cemento armato o con materassi tipo Reno in prossimità di ponti importanti. I rilevati in queste zone sono dunque maggiormente protetti per almeno tutta la larghezza del ponte e di conseguenza l'eventuale criticità non sta esattamente nell'area che esso sottende, ma piuttosto nelle zone di transizione dal normale argine a quello rinforzato. Un esempio tipico è il ponte autostradale A1 in località San Donnino ed Ugnano (Fig. 5.137) oppure il ponte ferroviario relativo alla linea diretta Firenze Roma in località Lagaccioni (Fig. 5.138). In questo caso uno dei piloni poggia direttamente sull'argine che tutto attorno è rivestito di cemento. Nel caso però di piloni impiantati sull'argine senza nessuna protezione c'è invece il rischio che movimenti di terreno, anche superficiali, provochino lo scalzamento delle fondamenta come già verificatosi per il gasdotto di San Donnino (Fig. 5.139).

Una ulteriore criticità, abbastanza diffusa e spesso trascurata, è determinata dalla crescita di vegetazione arborea ed arbustiva sui fianchi arginali, che se non ben gestita può creare delle zone di debolezza inducenti al collasso e al sifonamento (principalmente in località Ripalta, Restone, Argingrosso e Figline) (Fig. 5.140).



Fig. 5.137 – Argine rivestito sotto l'autostrada A1



Fig. 5.138 – argine rivestito con addossamento di pilone





Fig. 5.139 – Scalzamento delle fondamenta di un gasdotto Fig. 5.140 – crescita di vegetazione sui fianchi arginali

Infine si evidenzia che i rilevati in terra, sebbene costituiscano una importante difesa idraulica per le aree contermini, rappresentano anche uno sbarramento per l'accesso della popolazione alle rive dell'Arno. Per questo motivo nei casi ove non è stato possibile realizzare alcun tipo di rampe si è proceduto a realizzare dei sottopassi che potessero essere attraversati anche da mezzi meccanici. Questo in genere si è verificato nei luoghi in cui l'argine coincide con il tracciato ferroviario e principalmente lo si riscontra nel tratto da Firenze fino alla confluenza con l'Ombrone. Questi sottopassi raggiungono quote anche inferiori a quelle del piano di appoggio dei rilevati ed è opportuno che siano ben protetti al fine di evitare deflussi indesiderati verso l'esterno durante le piene. Purtroppo non tutti sono dotati di adeguati argini di protezione ed anzi a volte essi sono del tutto assenti (Fig. 5.141), vanificando la funzionalità delle restanti difese. I rilevati ferroviari finora descritti hanno però anche un'altra caratteristica e cioè costituiscono un ostacolo alla circolazione delle acque superficiali. Molto spesso le acque raccolte nei rigagnoli o nei fossi delle campagne esterne vengono convogliate in canali più grandi che però in determinati punti passano attraverso il rilevato per mezzo di cunicoli perennemente aperti. Altrove (es. Figline su entrambe le sponde) gli argini sono dotati di cunicoli grandi alcuni metri con la possibilità di chiusura tramite un sistema di portelli a mannaia, ma in questo caso la maggior parte delle strutture sono abbandonate, sfasciate ed inglobate dalla vegetazione. Sussiste dunque per esse la stessa pericolosità delle aperture presenti nelle zone ferroviarie prima citate.

Per concludere l'analisi sullo stato di conservazione degli argini in terra parliamo ora dei deterioramenti riscontrati sulle strutture durante le fasi del rilievo. Il danno senza dubbio più diffuso, ma comunque ancora rimediabile, si segnala in località Mantignano, zona acquedotto. Qui un lungo tratto di argine è contraddistinto dalla presenza di tane circolari larghe fino ad un massimo di 35-40 cm (Fig. 5.142).



Fig. 5.141 – Sottopasso sotto rilevato arginale/ferroviario Fig. 5.142 – Tana di animale

Il peggiore stato di conservazione si riscontra però in due brevi settori arginali siti uno ad Incisa e l'altro alla Lisca. Entrambi sono in uno stato di abbandono piuttosto avanzato con evidenti segni di degrado. L'argine di Incisa è deformato, irregolare nella quota, estremamente vegetato con arbusti ed alberi, cedimenti sulle sponde e tane di animali un po' ovunque. Probabilmente in corrispondenza al cambiamento delle politiche di sviluppo che comprendono le aree retrostanti si è differenziata anche la sua funzionalità idraulica ed è quindi stato sprovvisto di manutenzione ed abbandonato. Ciò nonostante poiché costituisce a tutti gli effetti un rilevato in continuità geometrica con il ciglio di sponda si è ritenuto opportuno cartografarlo. L'argine della lisca si presenta invece in condizioni relativamente migliori in quanto non è ricoperto da piante ad alto fusto o vegetazione arbustiva e non presenta evidenti segni di collasso; tuttavia la forma è irregolare, mostra deformazioni continue e probabilmente non è stato risagomato da un po' di tempo. Si tratta in entrambi i casi di settori isolati dal contesto generale delle protezioni idrauliche che poco servono al contenimento globale delle piene dato che l'acqua può comunque entrare a monte ed uscire a valle. Tuttavia essi possono sempre incidere sulla circolazione dei flussi durante le piene causando importanti effetti locali per la popolazione (protezione di capannoni, orti ed attività dall'impatto diretto della corrente). Altri danni più circoscritti sono stati invece trovati in più siti e vengono riassunti nella tabella 5.1 così come annotati nelle relative monografie.

DESCRIZIONE	GIORNATA DI CAMPAGNA	FOTO
deformazioni sul fianco interno con assunzione di forma irregolare	uscita 2	26, 27
strappi su rivestimento con telone di plastica	uscita 6	408
piccolo franamento in terra	uscita 9	683, 684
concavità nel fianco esterno	uscita 16	980, 981
erosione selettiva attorno a fondamenti di un pilone sul fianco esterno	uscita 16	958, 959
piccolo franamento ciglio esterno dell'argine	uscita 22	1471, 1472, 1473
lesioni	uscita 23	no foto

tabella 5.1 – Danni circoscritti sugli argini in terra

Lo stato di conservazione degli argini in muratura e con materiali misti è sicuramente buono e migliore di quelli realizzati in terra. Non vi sono mai casi in cui si segnalano preoccupanti deterioramenti nel sistema arginale tuttora in funzione e solo parte degli elementi decorativi presentano delle problematiche. Tuttavia anche per questa tipologia di opere idrauliche si segnala un piccolo tratto isolato, degradato e abbandonato nella sua funzionalità originaria. Esso si trova in località Pontassieve e, come i corrispettivi rilevati in terra prima illustrati, è stato ugualmente mappato perchè il suo volume costituisce una difesa diretta dalla acque di esondazione, benché alcune pietre siano già crollate, vi sia nata una folta vegetazione erbacea e tutta la struttura soffra di un generale degrado. I danni più significativi di tipo strutturale ed ornamentale sugli argini in muratura vengono riassunti nella tabella 5.2.

DESCRIZIONE	GIORNATA DI CAMPAGNA	FOTO
<a href="#">rottura di scalette per scendere a fiume rotte (Ponte a Signa)</a>	uscita 8	no foto
<a href="#">danneggiamento dei soli rivestimenti delle spallette in centro Firenze (lastre di pietra serena alterate per esfoliazione, rotte e staccate dal basamento)</a>	uscita 33	2155
<a href="#">danneggiamento dei soli rivestimenti delle spallette in centro Firenze (lastre di pietra serena staccate e disallineate)</a>	uscita 33	2191, 2248, 2250
<a href="#">crepe profonde sui muri dell'ex acquedotto (Firenze)</a>	uscita 34	2324, 2325, 2332

tabella 5.2 – Danni circoscritti sugli argini in muratura e con materiali misti

Per quanto riguarda le opere idrauliche di minore estensione rispetto agli argini e a sviluppo longitudinale la stato di conservazione presenta caratteristiche eterogenee che variano in funzione del tipo di opera in questione, del materiale costitutivo, della sua posizione rispetto alveo e della manutenzione a cui è stata sottoposta nel tempo. In ogni caso le problematiche riscontrate sono così contestualizzate ai connotati del sito che è impossibile trarre delle considerazioni d'insieme persino nell'ambito della stessa opera. Per questo motivo abbiamo riepilogato le situazioni più rilevanti in tabella 5.3.

DESCRIZIONE	GIORNATA DI CAMPAGNA	FOTO
<a href="#">lesione in rivestimento di calcestruzzo in prossimità dell'alveo</a>	uscita 8	627
<a href="#">frattura su rivestimento di sponda in calcestruzzo con emergenza di acqua dello stesso tipo di una fogna posta poco lontano (Signa)</a>	uscita 9	648 -650
<a href="#">fessuramento del Rivestimento in cemento del canale che costituisce la derivazione del Mugnone in prossimità del ponte all'indiano (crepe fino a 12 cm)</a>	uscita 18	1083, 1089 - 1091
<a href="#">degradazione e rottura del rivestimento di sponda in cemento</a>	uscita 19	1236, 1237
<a href="#">crollo di vecchi muri a rinforzo del ciglio</a>	uscita 29	1893, 1894
<a href="#">crollo di un muro, non più ricostruito, ma sostituito da gabbioni</a>	uscita 30	1998
<a href="#">lesione su muro che sorregge la sponda (estesa diversi centimetri)</a>	uscita 32	2110, 2111
<a href="#">scalzamento di un rivestimento in prossimità dell'alveo</a>	uscita 36	2422
<a href="#">lesione e crollo di vecchi muretti sulla sponda</a>	uscita 38	2605, 2607, 2610
<a href="#">alterazione (proprietà del materiale molto scadente) e sgretolamento di un muro</a>	uscita 45	3170 - 3172
<a href="#">crescita di erba tra le fessure degli elementi del rivestimento in calcestruzzo</a>	uscita 47	3257 - 3262
<a href="#">crollo e distruzione parziale di gabbionate in prossimità dell'alveo</a>	uscita 48	16 - 19
<a href="#">lacerazione di biostuoie poste come rivestimento di sponda</a>	uscita 49	3358
<a href="#">strappo in gabbioni metallici posti a muretto</a>	uscita 101	568, 569
<a href="#">degenerazione nello stato di conservazione di una scogliera</a>	uscita 101	628

tabella 5.3 – Danni circoscritti sulle opere idrauliche di minore estensione

Un discorso a parte deve essere fatto invece per quanto riguarda lo stato di conservazione delle pescaie/traverse che costituiscono le uniche opere in alveo tuttora esistenti e derivanti da un passato piuttosto importante per quanto riguarda la vita delle località antistanti all'Arno. Esse hanno subito nel tempo danneggiamenti più o meno sostanziali ad opera delle correnti che però sono riconducibili quasi sempre alle modalità classicamente riscontrate per queste opere idrauliche:

- Scalzamento di blocchi/lastre di pietra
- crolli
- Sifonamento
- creazione di lesioni
- apertura di fratture
- interramento
- rottura dovuta a pressione delle radici delle piante

A queste si aggiungono inopportuni danneggiamenti antropici che hanno più o meno accelerato i suddetti effetti.

Poiché gli sbarramenti più antichi costituiscono una eredità giunta a noi quasi immutata nei materiali e nelle geometrie, per comprendere al meglio la resistenza ai flussi dell'Arno e dunque il loro stato di conservazione è bene ricordare brevemente quali sono state le modalità costruttive che le hanno caratterizzate. Ebbene, le pescaie/traverse più antiche sono state costruite su un'armatura fatta di grossi pali di legno duro, stagionato e trattato con sostanze impermeabilizzanti (es. bollitura all'interno di olio) ed infine infissi a percussione nel letto dell'Arno (Fig. 5.143, 5.144). Originariamente gli spazi fra i pali venivano riempiti con fascine miste a ciottoli e ghiaia e la parte superficiale più esterna, denominata petto, soglia, scarpa e controscarpa, nell'ordine in cui l'acqua la percorre, veniva rivestita di robusti tavoloni o grandi lastre di pietra (Baggi, 1921) (Fig. 5.145). Molti sbarramenti conservano ancora le strutture originarie sopraindicate poiché gli unici interventi effettuati nel corso dei secoli hanno avuto la finalità di migliorarne la conservazione e la funzionalità senza mai modificare profondamente gli impianti esistenti.



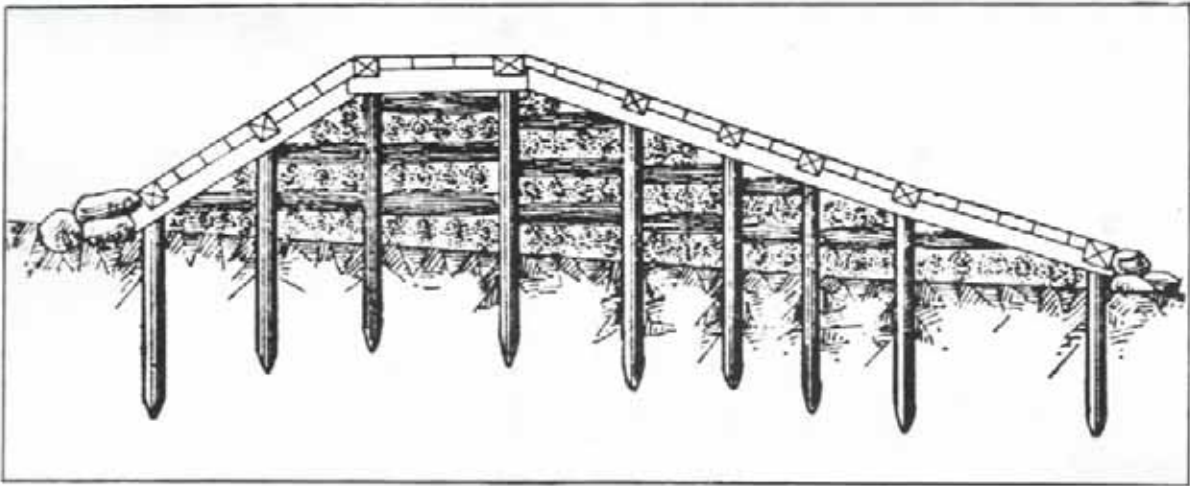


Fig 5.143 – Sezione di una “pescaia” costruita secondo i metodi classici (Baggi, 1921)



Fig. 5.144 - Palo di legno della originaria armatura (pescaia di S. Andrea a Rovezzano)



Fig. 5.145 - Lastre di pietra come rivestimento esterno del lato a valle (pescaia di S. Andrea a Rovezzano)

Le principali ripercussioni strutturali cagionate dall'abbandono sono lo “scalzamento di blocchi” e “crolli” (Riscaggio, Mulino d'Orlando e Massini), il “sifonamento” (Sieci, Rignano e Rovezzano), le “lesioni” e “fratture” (Mulino Nuovo e Isolotto) e l'interramento con crescita localizzata di vegetazione (Sant'Andrea a Rovezzano e Girone) talmente spinto a volte da far assumere alla struttura le sembianze di soglie (Porto di Mezzo e Girone) (Fig. 5.146). Inoltre laddove il degrado ha privato tali strutture della funzione di regimazione si sono verificati inopportuni effetti locali per quanto riguarda la stabilità delle infrastrutture annesse ed in certi casi la possibilità di recupero.

Un caso a parte è la pescaia di S. Andrea a Rovezzano che, oltre a subire alcuni dei danni precedentemente descritti, negli anni '80 fu parzialmente distrutta di proposito per abbassare il livello idrometrico a monte e agevolare così la costruzione di un ponte ferroviario. Il danneggiamento subito e l'accumulo in alveo di alcuni resti di un ponte di servizio lasciate irresponsabilmente in loco ha provocato l'accentramento della corrente nella zona di rottura.

Ciò ha favorito l'escavazione di una enorme fossa ai piedi dell'opera (profonda una decina di metri) e contemporaneamente la deposizione del materiale in prossimità delle spalle, un interrimento talmente spinto da ostruire completamente l'impianto di captazione delle acque di un antico mulino sulla sponda destra e la nascita di vegetazione erbacea, arbustiva e persino arborea su quella sinistra.

La pescaia di Rignano risulta invece interessata dal fenomeno sifonamento (piping). In passato sono stati effettuati interventi di protezione al piede con scogliere cementate che però non hanno risolto il problema. Se la filtrazione non sarà arrestata per mezzo di un provvedimento efficace e dovesse così continuare ad evolvere, il livello dell'acqua calerebbe sensibilmente ed in corrispondenza del ponte più a monte la maggiore intensità della corrente potrebbe dar luogo nel lungo termine a fenomeni di scalzamento dei piloni. Già durante la nostra campagna di misurazione (estate 2008) sono state riscontrate gravi lesioni nella struttura sospesa del ponte che sono state prontamente monitorate dai tecnici di competenza tramite l'utilizzo della tecnologia laser scanner ed il posizionamento di spie per il controllo dei movimenti. La comprensione di tale fenomeno deve tuttavia essere ancora compresa nel dettaglio ed auspichiamo che ciò venga fatto considerando l'evoluzione geomorfologica al contorno ed i problemi di stabilità delle opere circostanti.

Lo stesso fenomeno del sifonamento, accompagnato da un distacco di blocchi dalla struttura, si è manifestato nella pescaia delle Sieci. Il peggioramento di tale fenomeno non minaccia direttamente un ponte, ma piuttosto le abitazioni poste sull'ansa dell'Arno, pochi metri più a valle. Il maggiore potere erosivo che la corrente idraulica potrebbe assumere se la pescaia venisse meno avrebbe la capacità prima di asportare il materiale di una barra fluviale ed eventualmente minare la stabilità della sponda stessa. Inoltre l'abbassamento dei livelli potrebbe essere negativo anche per la funzionalità della gora che inizia dalla pescaia in direzione delle Gualchiere di Remole. La situazione specifica è comunque già oggetto di attenzione da parte degli uffici provinciali competenti. Altri contesti critici sono ad esempio l'inizio del sifonamento sulla pescaia di Rovezzano, un'opera recentemente ristrutturata e già con problemi incipienti, e le spaccature individuate sulla pescaia di Mulino nuovo e dell'Isolotto, le quali in entrambi i casi sono ampie fino a diversi centimetri e consentono sia l'infiltrazione di acqua sia l'incipienza di crolli. Se il degrado andasse avanti e si verificasse il crollo della struttura come nel caso di Riscaggio, Massini e Mulino d'Orlando potremmo registrare rapidamente un abbassamento del fondo con conseguenze piuttosto rilevanti sul livello delle falde sottese dallo sbarramento, ma soprattutto sulla stabilità di sponda e dei manufatti su di essa costruiti.

Infine un fastidioso e limitato effetto locale, ma comunque da tener sempre sotto controllo, si è manifestato più volte in prossimità della pescaia di Santa Rosa. In questo ambito risulta fondamentale mantenere completamente funzionale la platea in cemento realizzata al piede dell'opera in corrispondenza dell'innesto della stessa alla sponda sinistra. Tale piattaforma ha lo scopo di proteggere questo lato della pescaia da eventuali fenomeni di scalzamento e di conseguenza anche il muro che sorregge il lungarno Soderini. Purtroppo, vista la concentrazione della corrente in quel punto durante le piena, essa ha la tendenza a deteriorarsi presto nel tempo ed indispensabile attuare manutenzioni regolari e strutturalmente ben progettate affinché l'opera svolga appieno la propria funzione senza dover intervenire ripetutamente.



Fig 5.146 – Interramento, crescita di piante e crolli (Pescaia S.Andrea a Rovezzano) (a), Scalzamento di blocchi e sifonamento (Pescaia delle Sieci) (b), Lesioni e fratture (pescaia Mulino Nuovo) (c)

## 5.6 STATO DI CONSERVAZIONE DELLE OPERE DI IMPORTANZA IDRAULICA CLASSIFICATE LUNGO GLI AFFLUENTI

Le opere di importanza idraulica maggiormente diffuse negli affluenti presi in considerazione sono senza dubbio gli argini, seguiti da i rivestimenti di sponda e degli stessi fianchi arginali. Tuttavia le realtà disfunzionali e i danneggiamenti riscontrati lungo queste opere hanno caratteristiche spazialmente contenute, così come in tutte le altre opere, che è difficile riportare una casistica sintetica del dissesto in atto e tanto meno individuare settori con peculiarità omogenee e distintive. L'unica cosa che accomuna gli argini è la presenza di rivestimenti importanti in prossimità dei ponti di recente costruzione che procurano, se non adeguatamente monitorati, zone di criticità nel contatto tra cemento (o altro) e terra. Ciò nonostante i danni più eloquenti rilevati durante le campagne vengono riportati torrente per torrente nelle tabelle 5.4,

5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10. In figura 5.147, 5.148, 5.149, 5.150, 5.151 e 5.152 vengono invece mostrati alcuni tra i più significativi settori danneggiati.

DESCRIZIONE BISENZIO	GIORNATA DI CAMPAGNA	FOTO
tana di animale sul fianco esterno dell'argine	uscita 57	no foto
zona di debolezza per asporto di terra dal fianco esterno dell'argine (ampio ~ 3m)	uscita 58	676
tana di animale sul fianco interno dell'argine	uscita 59	748
frattura su muro di rinforzo sul lato esterno di un rilevato in terra (argine misto)	uscita 59	776
strappo su biostuoie a rinforzo di argine in terra (paramento interno)	uscita 59	801, 802
scalzamento al piede del rivestimento in calcestruzzo	uscita 60	856, 857
indebolimento del paramento esterno argine per presenza di tronchi di alberi inglobati, segati al pari del pendio e marciti	uscita 60	907
movimentazione terra da partev di animali sul basamento dove poggia il piede interno dell'argine in terra	uscita 60	883, 884, 905
piccole tane fatte da animali di piccola taglia su argine in terra (apertura 2-3 cm)	uscita 60	858 - 863
tana di animale sul basamento in cui poggia il piede interno dell'argine	uscita 62	154, 155
lesione nel muro in argine misto	uscita 63	no foto
disgregazione del rivestimento in calcestruzzo presso il piede esterno dell'argine in terra (è presente anche l'inerbimento)	uscita 63	1194, 1195
rotture in gabbioni, reti metalliche e geostuoie poste a rinforzo interno dell' argine	uscita 63	1199 - 1201
sgretolamento del rivestimento in calcestruzzo posto sul fianco interno dell'argine	uscita 63	1147
fratture in muro d'argine (due grosse)	uscita 64	no foto
sgretolamento della protezione basale del muro d'argine	uscita 64	1228, 1229
rottura alla base di un rivestimento in calcestruzzo con tratti in erosione	uscita 64	1220, 1221
cedimento e crollo su se stesso del rivestimento in calcestruzzo (pochi metri)	uscita 66	1400
tane di animali su argine	uscita 66	1394
lacerazione di gabbioni a maglia esagonale con terra a coprire	uscita 66	1368-1369
cunicolo parzialmente interrato e abbandonato a metà del fianco interno	uscita 68	1623
lesioni e forti alterazioni del muro esterno in argine misto	uscita 68	1607 - 1609

tabella 5.4 – Danni riscontrati lungo il Bisenzio

DESCRIZIONE MARINA	GIORNATA DI CAMPAGNA	FOTO
crollo parziale della parte sommitale dei muri in argine misto terra-muratura e forte degrado tale da rendere difficile la determinazione della massima quota arginale	uscita 75	2193, 2197
	uscita 76	2241, 2246, 2266, 2276
	uscita 77	2295, 2306
deformazione/abbassamento del fianco esterno di un argine misto terra-muratura	uscita 76	2285 - 2287
degradazione e collasso verso l'interno della parte sommitale dei muri in argine misto terra-muratura	uscita 76	2243, 2268, 2271
Forte e generale degrado sul paramento interno della sponda arginale destra caratterizzata da muri in pietrame	uscita 78	2351, 2352, 2354
Tana di animale in argine in terra su sponda destra	uscita 78	2235, 2236

tabella 5.5 – Danni riscontrati lungo il Marina

DESCRIZIONE GREVE	GIORNATA DI CAMPAGNA	FOTO
danneggiamento su entrambe le zone di imposta di una traversa: Rivestimento in lastre di calcestruzzo crollato sulla riva sinistra	uscita 20	1292
Sottoescavazione dalla corrente ma non ancora rotta sulla riva destra	uscita 54	3452
sganciamento e rottura in più punti della rete di gabbioni posti sul fianco interno dell'argine (i Ciottoli che erano contenuti in essi sono sparsi)	uscita 55	3519 – 3521
alterazione del rivestimento in calcestruzzo (la vegetazione che lo ricopre ne accelera la degradazione)	uscita 55	3523, 3524
apertura e rottura di gabbioni sul fianco interno dell'argine (ciottoli sono sparsi)	uscita 55	3530 – 3533
alterazione di un muro in pietrame con evidenti segni di crolli sulla sommità	uscita 71	1705, 1706
sifonamento presso la zona di imposta di una traversa e scalzamento al piede	uscita 72	1990, 1991

tabella 5.6 – Danni riscontrati lungo la Greve

DESCRIZIONE OMBRONE	GIORNATA DI CAMPAGNA	FOTO
crollo parziale della testa di un muro che è in parte ricoperto di vegetazione	uscita 90	2913 – 2915
tracce di attività animale	uscita 90	2788, 2789

tabella 5.7 – Danni riscontrati lungo l'Ombrone



DESCRIZIONE VINGONE	GIORNATA DI CAMPAGNA	FOTO
rottura di gabbioni in prossimità di un ponte (lunghezza pochi metri)	uscita 79	2399, 2400
crollo di un muro che riveste gabbionate a valle di una soglia	uscita 79	2433, 2434
tane di animale in argine	uscita 80	2499, 2500
crollo di un muro di protezione del fianco interno dell'argine (in frodo) e relativo franamento del fianco	uscita 80	2479
spaccature nella testa dell'argine e cedimento del fianco, tratto interessato esteso circa 10 m	uscita 81	45 - 47
tane di animale in argine (2 grandi)	uscita 81	no foto
collasso di un rivestimento in pietra di un canale di scolo proveniente da scarico e che protegge la zona golenale. Il collasso avviene per erosione concentrata attorno alle pietre che lo compongono	uscita 86	25, 26
locali subsidenze e crepe sulla testa dell'Argine	uscita 88	2851, 2871
rottura parziale di reti metalliche sul fianco esterno dell'argine	uscita 88	no foto

tabella 5.8 – Danni riscontrati lungo il Vingone

DESCRIZIONE MUGNONE	GIORNATA DI CAMPAGNA	FOTO
<b>parte in cantiere</b>		
franamento del muro spondale	uscita 82	2533
strappi su biostuoia degradata	uscita 82	2645
pesanti lavori su argine e sondaggi per la ricerca ordigni esplosivi profondi oltre 2m	uscita 82	2503, 2505 -2507, 2510 - 2512, 2514, 2541, 2547, 2549, 2595
breccia nella parte sommitale di un muro posto in in testa d'argine	uscita 93	3167 - 3169
sgretolamento del cemento di un rivestimento con fuoriuscita di ferri	uscita 93	3179, 3188, 3190
muro in cattive condizioni strutturali	uscita 93	3225-3226
crollo delle pietre di un rivestimento	uscita 94	3267, 3269
scalzamento di pietre su soglia e normale fondo d'alveo pavimentato	uscita 94	3266-3268
<b>parte senza cantiere</b>		
sifonamento di traversa	uscita 17	1052, 1054, 1055, 1058
alterazione del rivestimento ornamentale (pietra serena) di un muretto d'argine	uscita 95	3317
alterazione del rivestimento ornamentale (pietra serena) di un muretto d'argine	uscita 96	3344, 3345

tabella 5.9 – Danni riscontrati lungo il Mugnone

DESCRIZIONE TERZOLLE	GIORNATA DI CAMPAGNA	FOTO
rottura della parte sommitale di un muro arginale in continuità col muro di sponda	uscita 98	3430 - 3432

tabella 5.10 – Danni riscontrati lungo il Bisenzio



Fig. 5.147 - Crollo di un muro di protezione (Vingone)



Fig. 5.148 - Tane di animali in argine (Vingone)



Fig. 5.149 - Reti metalliche di gabbioni divelte (Greve)



Fig. 5.150 - Bioreti in fibre di iuta strappate (Bisenzio)



Fig. 5.151 - Cedimento di un fianco dell'argine (Vingone)



Fig. 5.152 - Collasso del muro d'ala di una pescaia (Greve)

## 5.7 APPROFONDIMENTO DI INDAGINE RELATIVO ALLE OPERE IDRAULICHE TRASVERSALI DELL'ARNO IN FUNZIONE DI UN POSSIBILE RECUPERO

### 5.7.1 TERMINOLOGIA

Le opere idrauliche collocate in zone a bassa pendenza che costituiscono uno sbarramento trasversale alla corrente (perpendicolari od inclinate) e sono di modesta altezza rispetto al fondo dell'alveo ( $h < 10\text{m}$ ) prendono il nome tecnico di "traverse" (Apat, 2004). Tuttavia tale denominazione rimane un termine scientifico che gli stessi cittadini, amministratori e mezzi di comunicazione sostituiscono sempre più spesso ed in maniera impropria con il termine arcaico "pescaie". Dunque in questo paragrafo si utilizzano entrambi i termini distinguendo concettualmente le traverse dalle pescaie.

Si utilizza quindi l'espressione *traversa* per gli sbarramenti artificiali che svolgono esclusivamente un controllo del livello delle acque. La necessità di mantenere certi livelli può avere differenti motivazioni (evitare una eccessiva erosione del fondo dell'alveo al fine di scongiurare lo scalzamento dei piloni dei ponti o altre infrastrutture impostate lungo il corso,

rimpinguare le falde adiacenti al fiume, ecc..), ma sono comunque soltanto legate alla necessità di regimare il flusso delle acque.

Il termine *pescaia*, si adotta invece per le traverse che sono nate o sono state modificate per avere una derivazione a servizio di un impianto (mulino, gualchiera ed opifici vari). L'etimologia<sup>1</sup> stessa della parola implica infatti una sfruttamento "diretto" da parte dell'uomo dello specchio d'acqua retrostante lo sbarramento.

### 5.7.2 IL SIGNIFICATO DELLE PESCAIE/TRAVERSE

L'esistenza dei manufatti fluviali in questione è ipotizzabile da epoche remote e probabilmente è tanto antica quanto la frequentazione umana dei fiumi: le comunità umane conquistarono il fiume anche grazie a siffatti ostacoli rudimentali, realizzati con materiali vegetali e pietre, che permisero di passare a guado e di pescare più agevolmente, ma anche di deviare le acque fluviali per drenare e irrigare i terreni. La costruzione di strutture in muratura si attestò invece a partire dall'alto medioevo e con esse si iniziò a trasformare profondamente l'assetto micromorfologico del fiume inducendo a moltiplicare gli interventi idraulici atti a controllare la dinamicità locale del fiume, a proteggere le sue adiacenze insediative e a favorire il mantenimento delle loro pertinenze in alveo (strutture portuali ecc.). Le crescita delle attività economiche sub-industriali legate al fiume andarono di pari passo con la proliferazione e lo sviluppo di interventi idraulici sempre più articolati.

Una volta introdotta questa tipologia di costruzione e sviluppate le tecniche adeguate per intervenire con efficacia nel controllo del fiume il motivo che ha spinto a preferire definitivamente le opere in muratura ad altre soluzioni tecnologiche è stato presto evidente agli occhi di tutti. Tali infrastrutture erano caratterizzate da polifunzionalità gerarchica di utilizzazione (manufatto idraulico posto all'inizio del ciclo di produzione di energia idraulica e funzionale all'irrigazione, opera muraria di regimazione, spazio guadabile, conserva d'acqua per la pesca, infrastruttura per le economie di sussistenza e luogo per il tempo libero) e soppiantava nettamente la necessità di un alveo completamente libero alla navigazione. La perizia raggiunta poi nelle conoscenze teoriche e l'acume costruttivo nella loro realizzazione ha permesso il loro definitivo diffondersi per tutto il corso dell'Arno ed anche oltre.

L'alluvione del 4 novembre 1966 fu un evento epocale per quanto riguarda il rapporto tra l'uomo e l'Arno e tale data fa da spartiacque tra il tempo in cui, le popolazioni rivierasche

---

<sup>1</sup> **Pescaia** *prov.pescaja*: dal *bass lat* PISCÀRIA, che significò pure luogo dove si vende il pesce, oggi detto Pescheria. Chiusa di sassi o d'altro in un fiume per pigliar pesci; per *similit.* Riparo per volgere o trattenere l'acqua di un fiume e dicesi anche per Peschièra. Cfr. *Pescheria; Peschièra; Pescina*. (<http://www.etimo.it>)

vivevano sull'Arno e grazie all'Arno e lo sviluppo di un degrado, che, a seguito della definitiva cessazione delle tradizionali attività connesse al fiume, ha imposto sempre più la propria supremazia con il susseguente deterioramento, alterazione, distruzione e cancellazione del patrimonio culturale.

Pertanto oggi, non essendosi verificata per le pescaie/traverse la trasformazione funzionale che ha interessato invece mulini e gualchiere negli ultimi 40 anni, esse conservano soltanto l'originaria funzione di sbarramento fluviale il cui fine di regimazione risulta depotenziato perché non servono più gli opifici andanti ad acqua ed in parte sono addirittura andate distrutte sia dall'incuria che dalle funeste piene dell'Arno.

Tuttavia politici, amministratori, tecnici e cittadini stanno cominciando a prendere coscienza che il fiume e il territorio di riferimento non è un nemico da temere, ma costituisce un bene estremamente prezioso, vulnerabile e che si va rapidamente riducendo per l'espandersi delle attività umane. Ci troviamo dunque in un momento storico caratterizzato dal crescente interesse, multidisciplinare, verso l'Arno redivivo in occasione degli anniversari dell'alluvione e della progettazione del parco fluviale promosso dalla Provincia di Firenze. Nasce così il concetto di recupero come operazione volta a coniugare tutela, valorizzazione, fruizione e sfruttamento economico, ovvero proporre una corretta fruizione del bene culturale partecipando al miglioramento della qualità della vita dei cittadini e dei turisti e alla costruzione di un presente e di un futuro sostenibili (Caldo & Guardasi, 1994). In questo contesto culturale ha dunque origine l'idea di effettuare un approfondimento d'indagine relativo alle pescaie/traverse, utilizzando i nuovi rilievi effettuati lungo l'Arno come quadro conoscitivo di base.

### 5.7.3 ANALISI DELLE PESCAIE/TRAVERSE

Dal momento che le pescaie/traverse hanno una rapida e comprovata efficacia per quanto riguarda i problemi legati alla stabilizzazione verticale di un tratto d'alveo (Biggi, 2006) e che se ben gestite sono in grado di creare nelle aree a monte dei piccoli invasi sfruttabili a fini idropotabili, agricoli o per la produzione di energia idroelettrica (centrali mini-hydro), un'energia pulita e completamente rinnovabile, abbiamo pensato di intraprendere una indagine conoscitiva più approfondita sugli sbarramenti e sugli edifici storici annessi, ove presenti, finalizzata al recupero delle suddette funzioni. Un'azione questa che ci sembra particolarmente importante se si considera il fatto che le pescaie/traverse godono di uno stato di salute alquanto precario e che ulteriori danni a quello che resta di queste opere potrebbe indurre l'Arno a



modificare ancora il proprio profilo di equilibrio. Infine progettare una eventuale ristrutturazione con fini “produttivi” e quindi di “ritorno economico” potrebbe anche giustificare l’ingente investimento da impegnare per il recupero di queste opere idrauliche.

Una volta così individuata la tipologia di approfondimento più utile per le pescaie\traverse, l’indagine è iniziata incrociando i dati informativi riportati nel database con le carte tecniche regionali e le ortofotocarte entrambe in scala 1:2000 (Fig. 5.153). Dopo un’attenta lettura è emersa la presenza di ben 20 siti in cui vi sono opere idrauliche trasversali di diverso tipo con finalità di sbarramento.

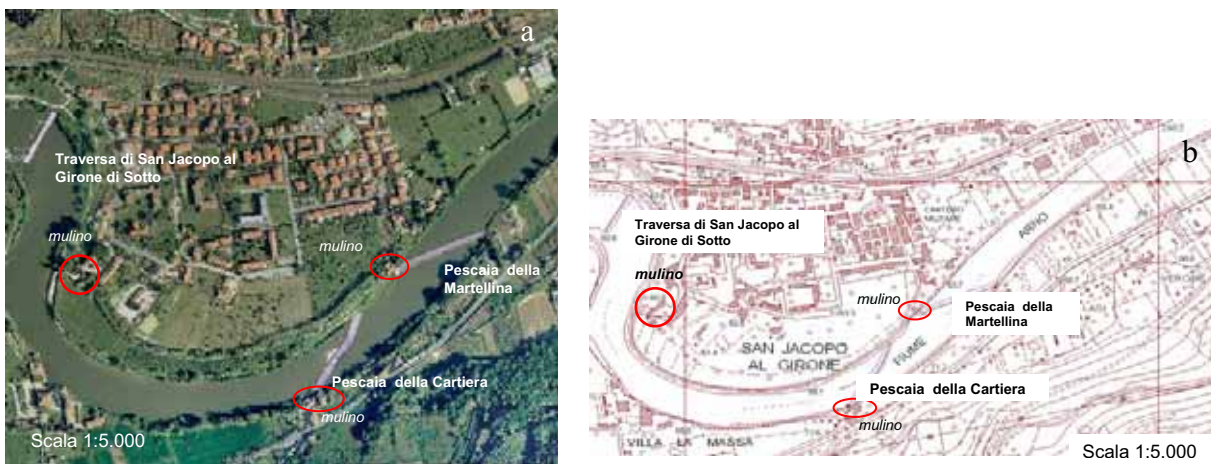


Fig. 5.153 - Ortofotocarta (a) e Carta Tecnica Regionale (b) visualizzate in scala 1:5000 per evidenziare alcune pescaie e mulini connessi a tali manufatti

A questo punto sono stati effettuati nuovi sopralluoghi nelle zone individuate raccogliendo informazioni specifiche per quanto riguarda le pescaie, gli edifici annessi e i loro apparati di collegamento. In questa sede abbiamo verificato dunque la presenza o meno di un edificio correlato allo sbarramento e nel caso che ve ne fosse traccia abbiamo evidenziato il suo stato di conservazione in base alla funzione originaria (mulino, gualchiera o altri opifici) e il livello di deterioramento degli elementi di collegamento alle pertinenze. È stata stimata la possibilità di installare nuovi impianti idroelettrici sui manufatti esistenti considerando semplicemente la fattibilità tecnica nel contesto geomorfologico e urbanistico/naturalistico d’insieme. Infine sempre nell’ottica di sfruttare il salto idraulico ci siamo preoccupati di verificare sul posto i dislivelli creati dalle pescaie e confrontarli con quelli ricavati in ufficio durante le prime fasi di elaborazione dati. Questo dato risulterà quanto mai importante nel momento in cui si dovrà avere una valutazione orientativa del quantitativo di energia idroelettrica producibile.

Successivamente le informazioni riportate nelle schede di campagna sono state integrate con i risultati di una ricerca catastale, volta ad individuare tutti i riferimenti necessari per la

caratterizzazione degli immobili di interesse e dei terreni relativi (visure). In particolare dagli estratti di mappa abbiamo controllato se l'annesso è di uno o più proprietari, se essi poi sono semplici cittadini, società private o pubbliche amministrazioni o se parallelamente vi sono anche delle entità usufruttuarie (<http://sister.agenziaterritorio.it>). I dati catastali ricavati dagli estratti di mappa (foglio, particella e subalterno) sono in questa fase risultati particolarmente utili per identificare quei mulini o gualchiere che in un primo momento sembravano avere tutt'altra funzione. Ciò perché a volte ci sono state conversioni d'uso che hanno modificato parte della struttura rendendola irriconoscibile dall'alto, mentre in altri casi non restano che ruderi indistinti ai lati delle pescaie. In alcuni luoghi tali edifici sono stati addirittura realizzati abbastanza lontano dalle pescaie e collegati ad esse attraverso lunghe gore.

Per avere infine quadro completo della situazione è stata effettuata una ricerca storico-bibliografica sulle costruzioni in questione aggiungendo anche tutte le testimonianze relative al passato che ci sono state tramandate dagli abitanti del luogo. Ciò ci ha permesso di capire molto di più sulle architetture residue e sulla loro differente rilevanza storico-architettonica.

#### 5.7.4 NOTAZIONI CONCLUSIVE

I risultati di queste indagini hanno portato a verificare che dei 20 siti presenti nell'area di studio 16 sono pescaie ed hanno svolto in passato la duplice funzione di servire uno o più annessi e regolare al tempo stesso la funzione idraulica (mulino del Borgo, mulino delle Coste, mulino Nuovo, Bruschetto, Rignano, Riscaggio, mulino d'Orlando, Sieci, Ellera, Compiobbi, Martellina, Cartiera o Candeli, S. Andrea a Rovezzano, Rovezzano, S. Niccolò e S. Rosa), mentre soltanto 4 sono associabili a traverse anche se talvolta realizzate negli stessi luoghi di antiche pescaie che sono andate distrutte (Porto di Mezzo, Isolotto, Massini e San Jacopo al Girone di Sotto) (Fig. 5.154, 5.155, 5.156). In ogni caso al giorno d'oggi a causa del degrado di cui abbiamo ampiamente discusso nel paragrafo 5.5 la loro funzione idraulica risulta in gran parte ridotta e alle volte del tutto compromessa.

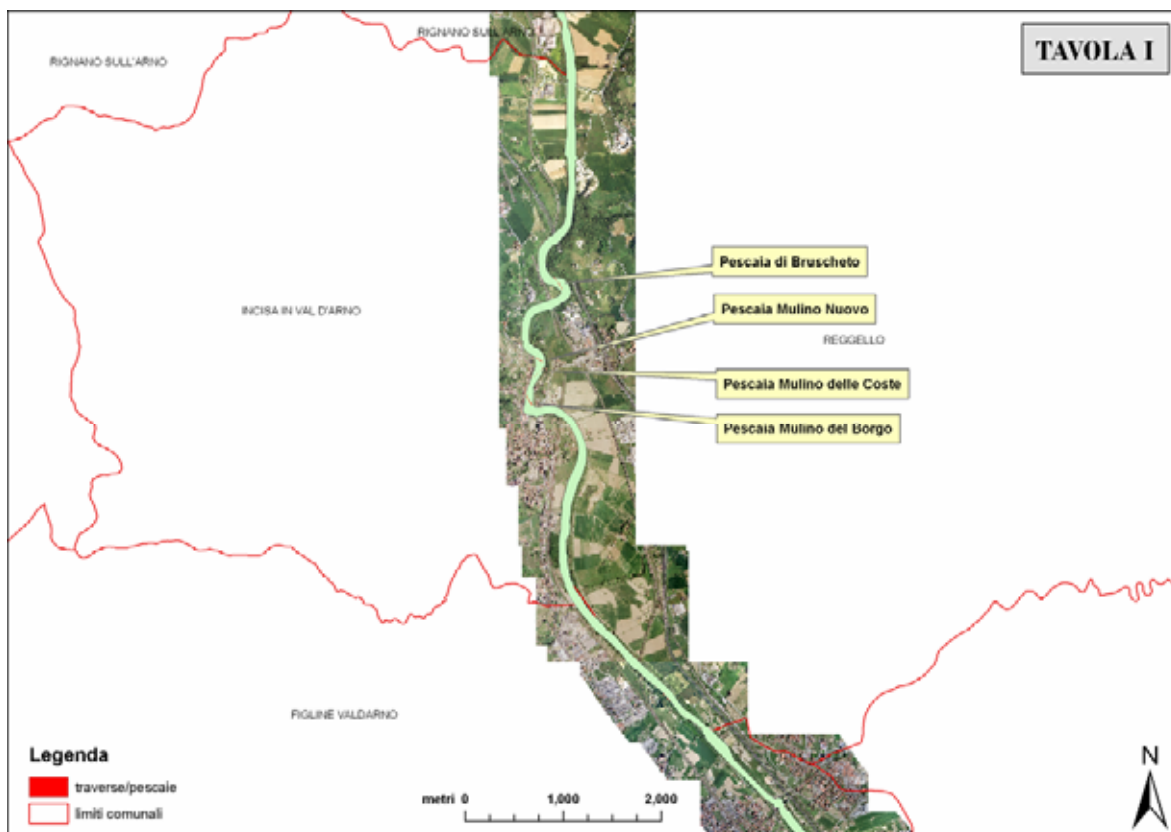


Fig. 5.154 - Pescaie e traverse lungo il corso dell'Arno dal comune di Figline Valdarno al comune di Incisa in Valdarno.

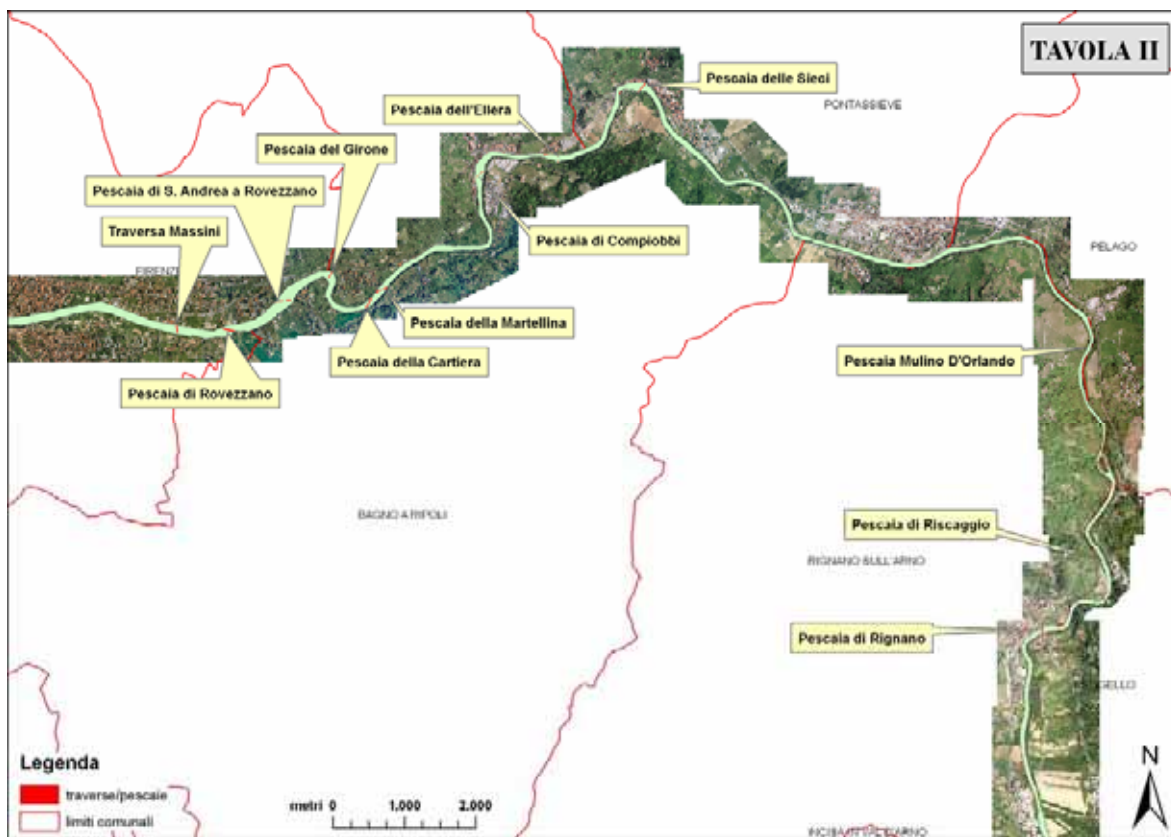


Fig. 5.155 - Pescaie e traverse lungo il corso dell'Arno dal comune di Rignano sull'Arno al comune di Firenze

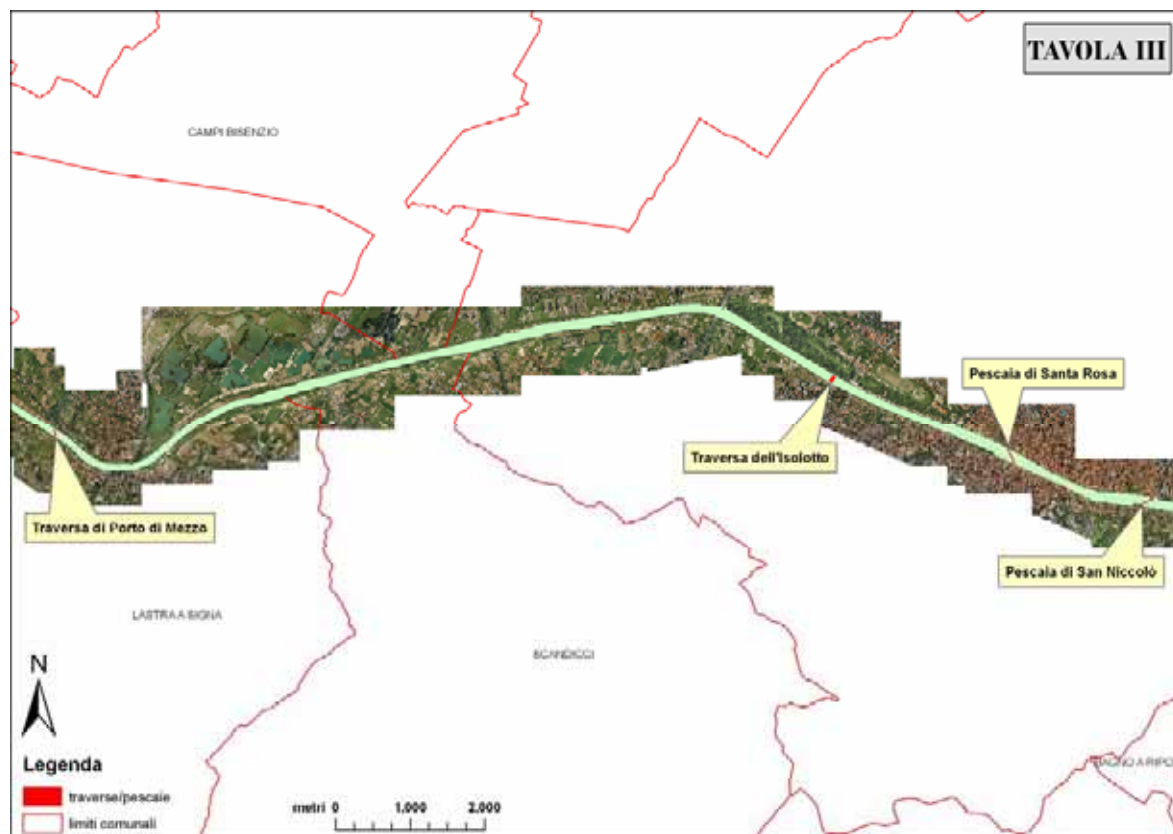


Fig. 5.156 - Pescaie e traverse lungo il corso dell'Arno dal comune di Firenze al comune di Lastra a Signa

Il quadro globale invece che risulta dalla sintesi delle indagini effettuate sulle pescaie/traverse e pertinenze è riassunta nella tabella 5.11. I dati riportati permettono di comparare rapidamente i vari siti analizzati ed esprimere infine un giudizio di *fattibilità* per il recupero di ogni pescaia, traversa e pertinenza

Tale giudizio è stato formulato assegnando un punteggio quantitativo a varie voci (conservazione dell'opera idraulica trasversale e dell'annesso e loro rilevanza storico-economica) che sommati indicano a seconda del valore raggiunto la presenza o l'assenza di requisiti tecnici per il loro riutilizzo.

In particolare la fattibilità tecnica in senso stretto viene valutata considerando lo *stato di conservazione* della pescaia/traversa e della relativa pertinenza. Il punteggio per queste voci è inversamente proporzionale all'entità (e quindi al costo) dei lavori necessari per un eventuale recupero. Inoltre, visto che alcuni siti particolarmente interessanti da un punto di vista storico, artistico e paesaggistico potrebbero giustificare interventi di recupero più costosi o addirittura attirare investimenti privati, è stato attribuito un punteggio anche alla loro *rilevanza*.

Un altro aspetto essenziale da prendere in considerazione per un recupero che viene evidenziato in tabella riguarda la *proprietà delle pertinenze*. Ad esempio laddove l'intestatario della particella catastale risulta essere un ente pubblico, il riutilizzo dell'immobile potrebbe



essere meno complicato. E ancora la situazione di una pertinenza con un unico proprietario, anche se privato, è sicuramente preferibile a quella di una frammentazione in più particelle ognuna con un diverso intestatario. La proprietà dell'annesso può quindi influenzare pesantemente la realizzazione di un progetto, ma ancora di più lo fa la destinazione d'uso attuale dell'immobile ed i progetti futuri dei proprietari. Pertinenze di un solo proprietario ma adibite a ville residenziali difficilmente saranno oggetto di recupero, mentre in caso di strutture alberghiere si potrebbe tentare un coinvolgimento mirato all'aumento del "richiamo turistico" della struttura. Visto che testare la disponibilità dei proprietari delle pertinenze ad essere coinvolti in un progetto di recupero esula dai nostri scopi, abbiamo preferito inserire in tabella un'indicazione (non quantitativa) sul tipo di proprietario, annotando se l'intestatario delle particelle catastali in cui è diviso l'annesso è un ente pubblico o se è uno o più privati.

#### 5.7.4.1 CRITERI PER L'ASSEGNAZIONE DEL PUNTEGGIO

##### *Conservazione dell'opera idraulica trasversale:*

è stato seguito lo stesso criterio usato durante il rilevamento dell'efficienza delle opere idrauliche esistenti e del loro stato di conservazione: 1 corrisponde a "scadente"; 3 a "mediocre"; 5 a "buono". I punteggi 2 e 4 sono assegnati per situazioni intermedie ed è previsto punteggio 0 se non è presente nessun resto della pescaia.

##### *Conservazione annesso:*

0 = non è presente nessun resto dell'annesso;

1 = l'annesso attualmente non è altro che un rudere;

2 = pessime condizioni che per il ripristino richiederebbero una pesante ristrutturazione;

3 = condizioni strutturali buone (ma sarebbe necessario un piccolo restauro);

4 = condizioni ottime (possibili solo nel caso in cui l'annesso sia tuttora sfruttato, ad esempio come struttura alberghiera).

Nei casi in cui durante un sopralluogo è stato possibile accertare di persona la presenza di strutture e macchinari originali per lo sfruttamento della corrente è stata prevista l'assegnazione di un valore aggiuntivo, cosicché il punteggio complessivo per questa voce può raggiungere al massimo 5.

##### *Rilevanza:*

in scala da 1 a 5 esprime (secondo un giudizio soggettivo del rilevatore) l'importanza dal punto di vista storico ed economico della pescaia e dell'annesso, l'eventuale inserimento nei circuiti turistici e nelle attività folcloristiche, l'accessibilità e, in un'ottica di recupero del patrimonio territoriale ed ambientale del Valdarno, anche la bellezza della cornice paesaggistica ed il pregio architettonico.

*Proprietà annesso:*

a questa voce non è stato attribuito nessun punteggio, ma si è semplicemente riportato se la proprietà è di un privato, di più privati, o di un ente pubblico.

Tabella comparativa di fattibilità con punteggi da 1 a 5

N° scheda (da monte verso valle)	Nome sbarramento	Annesso storico	Nome pertinenza (ove noto)	Proprietà pertinenze	Conservaz. pescaia	Conservaz. annesso	Rilevanza	TOT.
1	P. del Mulino del Borgo	Si		Privato	3	0	1	4
2	P. del Mulino delle Coste	Si		Privato	3	4	1	8
3	P. del Mulino Nuovo	Si		Privati	1	3	1	5
4	P. di Bruschetto	Si	Mulino di Bruschetto	Privato	4	1	4	9
5	P. di Rignano	Si	Mulino di Rignano	Privati	1	4	3	8
6	P. di Riscaggio	Si	Molino del Lungani	Pubblico	0	0	1	1
7	P. delle Sieci	Si	Gualchiere di Remole	Pubblico	1*	3	4	8*
8	P. dell'Ellera	Si	Molino di Fantappiè	Privati\pubblico	4	5	4	13
9	P. di Compiobbi	Si		Privato	4	2	2	8
10	P. della Martellina	Si (dx)	La Martellina	Pubblico\privato	5	4	3	12
		Si (dx)		Pubblico	5	3	3	11
11	P. della Cartiera (o Candeli)	Si	Mulino di Candeli	Privato	3	3	3	9
12	Traversa del Girone	No	-	\	2	\	1	3
13	P. di S. Andrea a Rovezzano	Si	Mulino di S.Andrea	Privati	1	3	3	7
14	P. di Rovezzano	Si (sx)	Mulino Guasti	Privato	5	3	2	10
		Si (dx)	Molino della Nave	Privato	5	3	2	10
15	Traversa Massini	No	-	\	1	\	1	2
16	P. di S. Niccolò	Si		Pubblico	3	1	4	8
17	P. di Santa Rosa	Si		\	4	0	4	8
18	Traversa dell'Isolotto	No	-	\	1	\	2	3
19	Traversa di Porto di mezzo	No	-	\	4	\	1	5
20	P. d'Orlando	Si	Molino d'Orlando	Privato	0	1	1	2

\*= progetto di manutenzione straordinaria già avviato durante i rilievi. Il punteggio raggiungerà quindi valori molto maggiori

tabella 5.11 – tabella di fattibilità per il recupero di ogni pescaia, traversa e relativa pertinenza.

#### 5.7.4.2 CONSIDERAZIONI RELATIVE AL RECUPERO DELLE PESCAIE

Dalla comparazione dei punteggi assegnati in tabella di fattibilità risulta che i siti maggiormente indicati per il recupero sono:

##### Pescaia dell'Ellera e Mulino di Fantappiè (13 punti)

Il recupero del mulino è già stato eseguito ad opera del proprietario, che lo ha mantenuto in eccellenti condizioni e reso perfettamente funzionante. L'unico miglioramento potrebbe essere apportato ai locali seminterrati a livello dell'acqua, che adesso sono difficilmente raggiungibili e leggermente deteriorati. La spesa per un intervento del genere sarebbe bassa se confrontata ai restauri di cui necessita la maggior parte delle pertinenze analizzate in questa ricerca.

Il proprietario ha allestito un museo all'interno del mulino e si offre come cicerone per visite guidate (attualmente ospita soprattutto scolaresche). Egli sembra inoltre disponibile a progetti riguardante le tradizioni locali in generale ed il suo mulino in particolare; già in passato ha dato la sua disponibilità ed il suo aiuto per rievocazioni storiche, pubblicazioni, tesi di laurea, ricerche storiche e scientifiche.

Inoltre presso il mulino sono ancora attivi dei renaioli, che mettendo a disposizione le loro barche per gite sul fiume mantengono in vita un'antica tradizione fiorentina. Il mulino meriterebbe di essere inserito in circuiti turistici e didattici più ampi.

##### Pescaia della Martellina (11 e 12 punti)

Questa pescaia, in ottime condizioni, serve due annessi.

Nel primo è già attivo un agriturismo, quindi il recupero di alcuni stabili a mulino ci sembra di difficile attuazione; tuttavia il gestore potrebbe essere coinvolto in un recupero per una valorizzazione dell'area e della pescaia.

Nel secondo, di proprietà del comune di Firenze, ci sono ampi margini di intervento per operare un recupero. Gli stabili sono adesso abitati, ma i locali del mulino dove si trovano le macine sono semplicemente adibiti a rimessa. Gli abitanti del luogo hanno chiesto ripetutamente un intervento per la pulizia della gora, che sarebbe comunque necessario per il ripristino della pertinenza.

##### Pescaia delle Sieci e Gualchiere di Remole

La pescaia è in pessime condizioni, ma è già stato approvato un progetto per la sua riparazione. Una volta recuperata la pescaia è senz'altro da prendere in considerazione l'eventualità di



recuperare anche le Gualchiere di Remole, struttura di notevole rilevanza storica ed esteticamente pregevole.

Le gualchiere sono adesso di proprietà del comune di Firenze, che le ha messe in vendita.

#### 5.7.4.3 CONSIDERAZIONI RELATIVE AL RECUPERO DELLE TRAVERSE

I punteggi assegnati nella tabella 5.11 indicano quali opere idrauliche trasversali potrebbero essere riconvertite con minori sforzi operativi. Tuttavia alcune considerazioni possono essere fatte anche per quanto riguarda le traverse. Gli studi di dettaglio hanno evidenziato infatti che le due opere più a valle (isolotto e porto di mezzo) hanno una strutturazione tale che considerando contemporaneamente la loro posizione, lo stato di conservazione e il salto idraulico generato potrebbero essere riutilizzate con costi abbastanza contenuti secondo la polifunzionalità ipotizzata nel paragrafo 5.3.3. In particolare dopo alcuni interventi di ristrutturazione (ricostituzione del paramento di monte, consolidamento del nucleo del corpo briglia esistente, ripristino del rivestimento superficiale in pietrame degradato, consolidamento del piede di valle con scogliera di pietrame e realizzazione di micropali di sottofondazione) potrebbero essere facilmente attrezzate di manufatti atti a produrre energia idroelettrica pulita. Ovviamente si parla di mini centrali con potenza dell'ordine dei 400 – 1.000 kW, del tipo ad “acqua fluente e bassa caduta”, senza capacità di regolazione e con portate funzione del regime idrologico del corso d'acqua. Tali centrali non richiedono grandi opere e possono essere ubicate in adiacenza al corpo della traversa. Le fatiche maggiori sono semmai determinate dalla realizzazione di opere provvisoriale in alveo (es. confinamento della struttura mediante diaframmatura) necessarie per il ripristino e la realizzazione di opere accessorie agli impianti.

Di seguito sono riassunte nel dettaglio le principali caratteristiche delle due suddette traverse e delle possibili centrali.

Traversa dell'Isolotto:

L'opera è costituita da un corpo principale lungo circa 90 m e da una controbriglia a valle. Il salto idraulico lordo che viene generato è pari a 7,65 m.

Il corpo principale è in pessime condizioni dovute a sifonamenti diffusi e ad evidenti cedimenti con conseguente spaccatura suborizzontale dell'intero corpo. La controbriglia si

presenta invece in buono stato di conservazione. Recentemente, sui due lati del corpo principale, sono state riattivate le due finestre di fondo con paratoie che potrebbero essere utili per la parzializzazione del flusso durante i lavori di ristrutturazione (demolizione parziale del corpo centrale, relativa ricostruzione e sottofondazione con pali di piccolo diametro dell'intero sbarramento).

La centrale con le annesse opere di presa e di restituzione potrebbe essere allocata sia in destra che in sinistra idraulica, con soluzione interrata e bocche di presa per l'aerazione e la ventilazione delle componenti elettriche (Fig. 5.157). La soluzione ottimale sembra essere quella in destra al di sotto del parco esistente. In tale ipotesi occorrerà ripristinare parte del rivestimento con paramento in pietrame della sponda.

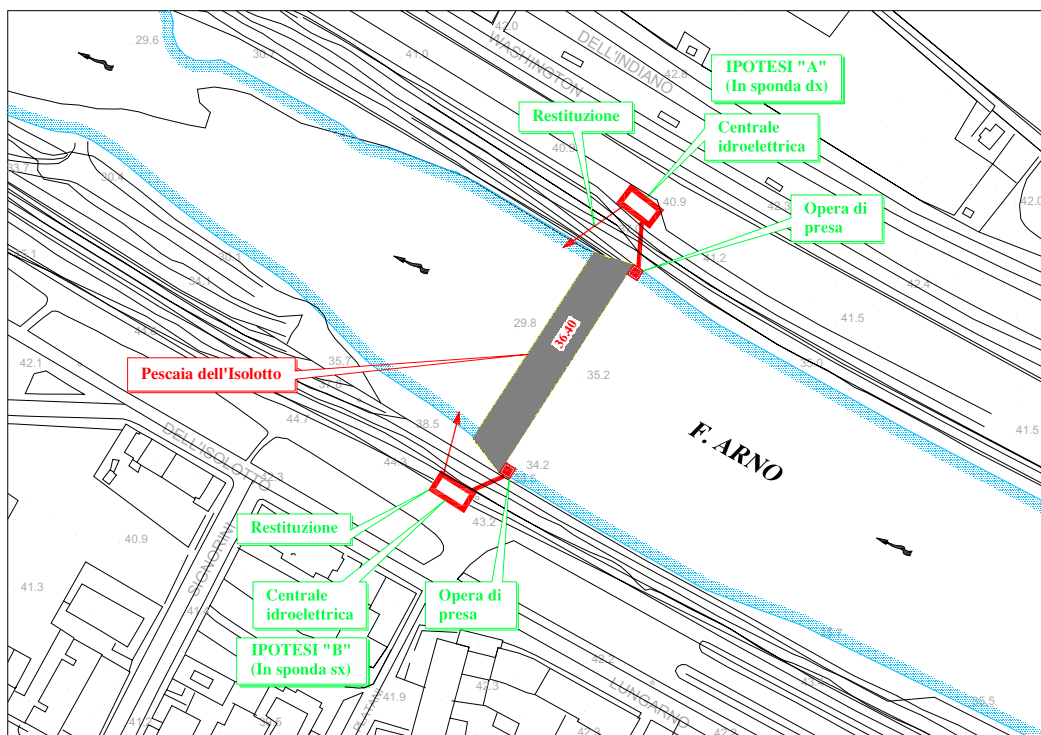


Fig. 5.157 – Schema planimetrico della traversa dell'Isolotto e delle possibili centrali (Casagli *et al.*, 2007).

Traversa di porto di mezzo:

Il corpo della traversa (lungo circa 90 m) è articolato in tre modesti salti in cascata con un salto globale di 1,60 m. Essa è in buono stato di conservazione e necessita soltanto di ripristini della scogliera al piede di valle.

La centrale potrebbe essere alloggiata sulla sponda destra al di sotto del pianoro esistente in adiacenza e a debita distanza dal rilevato ferroviario, che di fatto costituisce l'argine destro del fiume Arno (Fig. 5.158). La centrale andrebbe interrata, ma dovrebbero essere realizzati dei

camini di aerazione necessari per la ventilazione delle apparecchiature elettriche. Gli accessi risulterebbero in alveo e pertanto dovrebbero essere realizzati a tenuta idraulica.

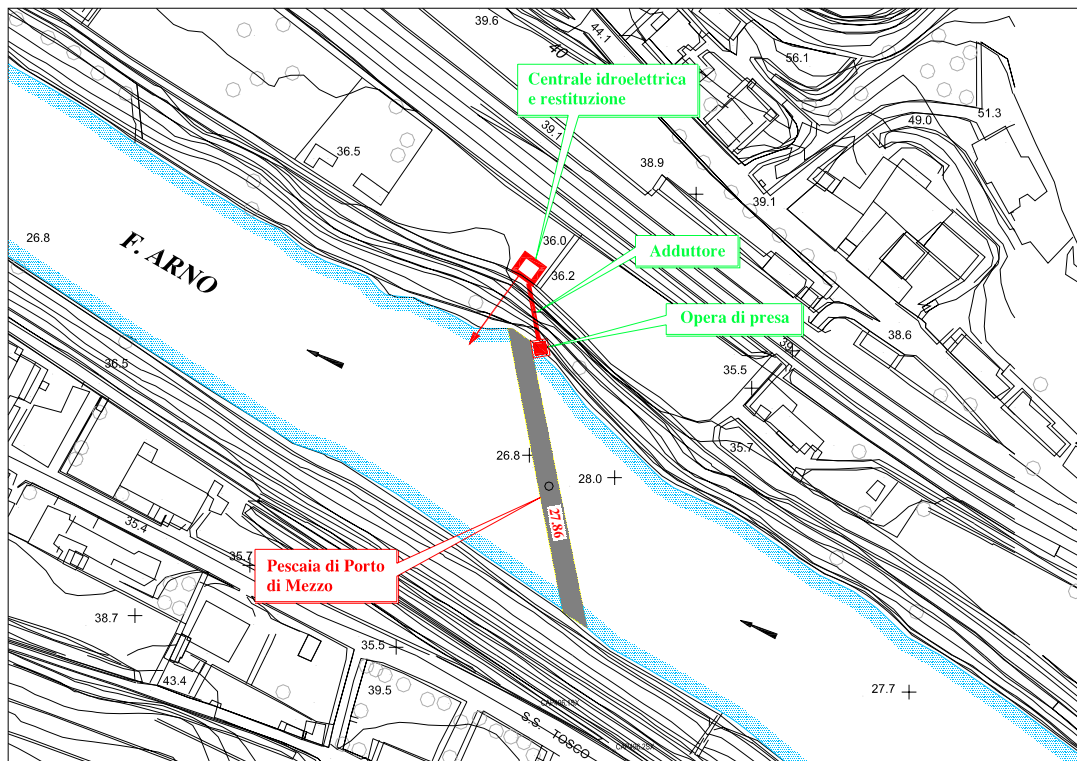


Fig. 5.158 - Schema planimetrico della traversa di Porto di Mezzo e della possibile centrale (Casagli *et al.*, 2007).

## 6 APPLICAZIONE DEI DATI AL RISCHIO IDRAULICO

### 6.1 PERIMETRAZIONE DELLE AREE ARGINALI A RISCHIO TRACIMAZIONE

#### 6.1.1 INTRODUZIONE

In questo paragrafo vengono riportate le considerazioni derivanti dal confronto delle quote arginali precedentemente misurate con i battenti relativi alle sezioni idrauliche (Fig. 6.1) forniti dal modello idraulico SIMI (SIT - Modellazione Idraulica) messo a punto dalla Autorità di Bacino del fiume Arno per la redazione del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI). In effetti il posizionamento dei battenti idrici concorrono, unitamente ad altri elementi di carattere conoscitivo, alla perimetrazione in scala 1:10.000 delle aree a pericolosità idraulica.

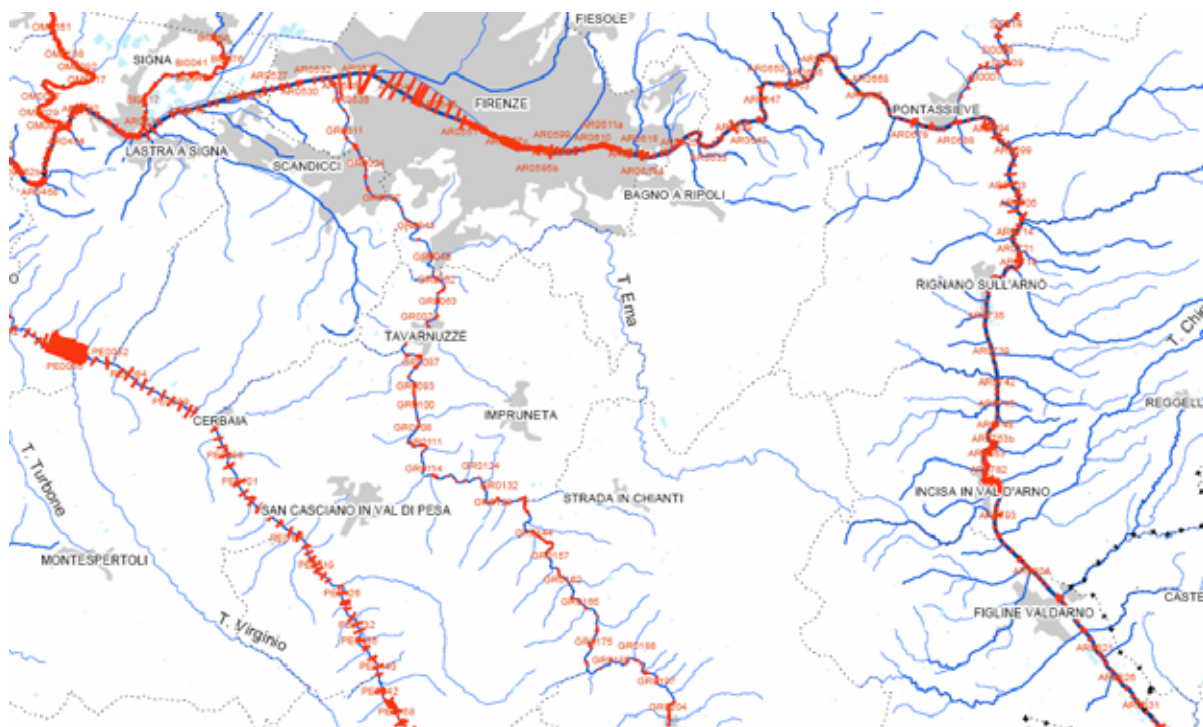


Fig. 6.1 – Distribuzione nell'area di studio delle sezioni idrauliche utilizzate dall'autorità di Bacino (<http://www.adbarno.it>)

Le informazioni relative alla modellazione SIMI è pubblicata dalla autorità di bacino sul proprio sito web e riporta sinteticamente, tronco per tronco dell'intera asta del Fiume Arno (tabella 6.1), *il codice della sezione trasversale, i battenti e le portate per i tempi di ritorno 30, 100, 200 e 500 anni, oltre che una localizzazione indicativa in coordinate Gauss-Boaga*. Una più corretta identificazione delle sezioni può essere ottenuta facendo riferimento alla planimetria dell'impianto delle sezioni trasversali del Fiume Arno, visualizzabile nell'apposita sezione del GeoDataServer (Fig. 6.2).



Id	Nome	Descrizione
1	casentin	Casentino
2	lapenna	Diga di La Penna
3	levane	Diga di Levane
4	v1	Valdarno Superiore (1) tratto Montevarchi - Incisa
5	v2	Valdarno Superiore (2) tratto Incisa - Pontassieve
6	v3	Valdarno Superiore (3) tratto Pontassieve - Firenze
7	fi	Tratto fiorentino
8	vf1	Valdarno inferiore (1) Firenze Cascine - immissione Greve
9	vf2	Valdarno inferiore (2) immissione Greve - immissione Bisenzio
10	vf3	Valdarno inferiore (3) immissione Bisenzio - immissione Ombrone
11	vf4_m	Valdarno inferiore (4 monte) immissione Ombrone - Brucianesi
12	vf4_v	Valdarno inferiore (4 valle) Brucianesi - Montelupo
13	vf5	Valdarno inferiore (5) Montelupo - Marcignana
14	vf6	Valdarno inferiore (5) Marcignana - Pontedera
15	vf7	Valdarno inferiore (6) Pontedera - Foce

tabella 6.1 - Elenco dei tronchi in cui sono state effettuate le simulazioni dalla Autorità di Bacino; in giallo i settori considerati.

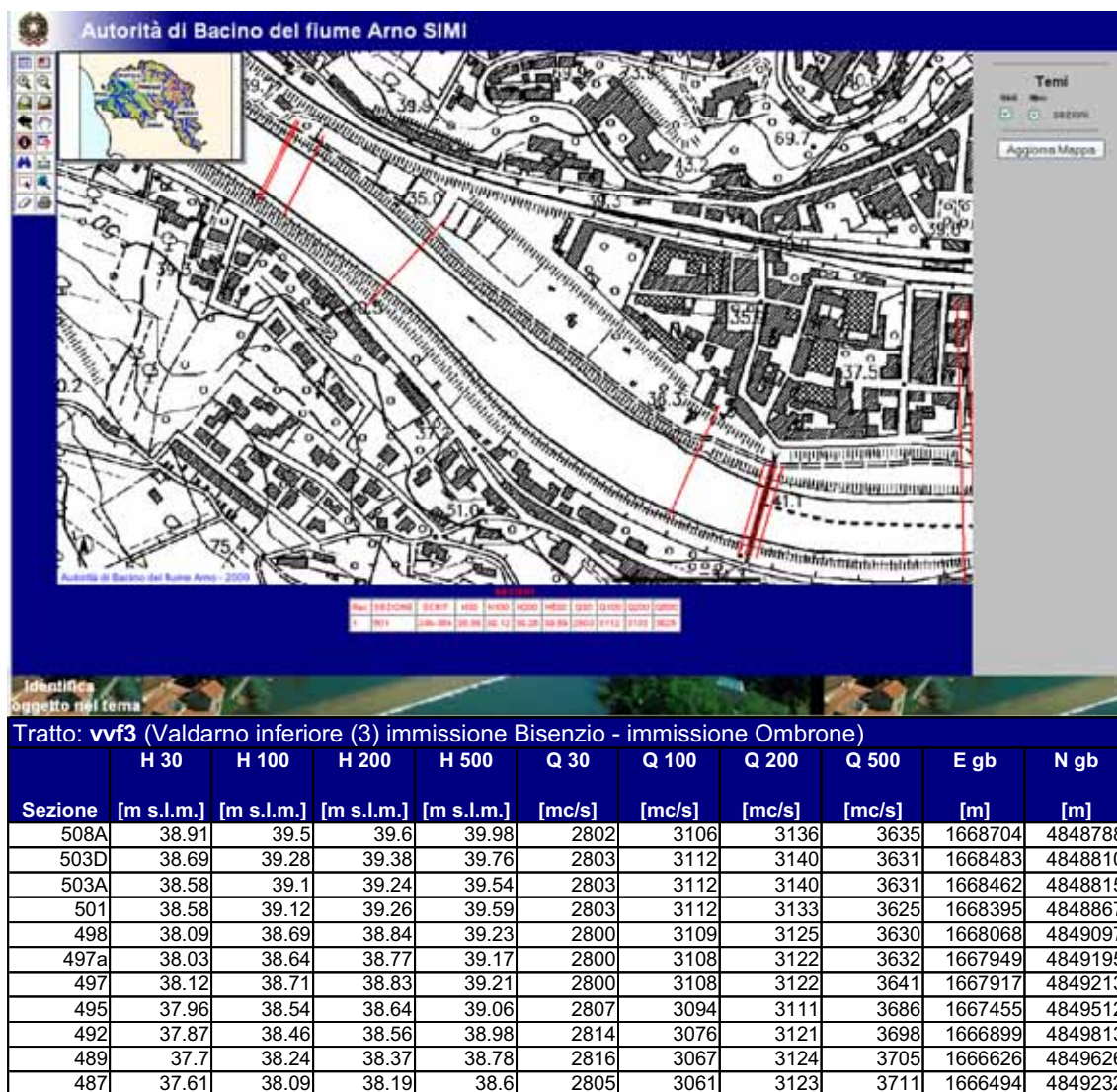


Fig. 6.2 – GeoDataServer relativo allesezioni trasversali del Fiume Arno. I suffissi 'a' o 'd' ssociati al numero di sezione indicano eventuali sezioni, generalmente ricostruite, a monte o a valle di ponti o opere trasversali. Le coordinate sono riferite indicativamente al thalweg della sezione.

### 6.1.2 ANALISI DELLA SITUAZIONE ATTUALE

Confrontando dunque le quote raggiunte dall'acqua durante le ipotetiche piene con le nostre aggiornate ed accurate misurazioni relative agli argini (terra, muratura o combinati) abbiamo quindi potuto verificare se i livelli degli eventi ritenuti sicuri con la modellazione sono veramente tali oppure al contrario il sistema Arno abbia zone critiche in cui l'acqua riesce a defluire all'esterno. Tale necessità nasce dal fatto che la cartografia numerica prodotta nel tempo dai vari enti descrive compiutamente la morfologia fluviale, ma con variazioni piuttosto significative per quanto riguarda i punti quotati (utilizzo di tecniche differenti e strumentazioni con precisione diversa). L'utilizzo quindi di dati input non sempre precisi può avere fatto sottovalutare alcuni aspetti a favore di altri che in realtà hanno un valore diverso.

Dunque per quanto riguarda tempi di ritorno di 30 anni (T30) le zone che risultano a rischio tracimazione si concentrano in poche aree, individuabili principalmente nella pianura di Incisa-Figline (Fig. 6.3) e su entrambe le sponde della pianura fiorentina a valle della confluenza con la Greve (Fig. 6.7a). Considerando l'estensione delle aree a rischio in entrambi i settori possiamo effettuare un distinguo piuttosto sostanziale. In pratica le aree arginate di Incisa-Figline che sono soggette a sormonto per gli eventi ipotizzati hanno in ogni caso una ampiezza di pochi metri e sono abbastanza distanti tra loro. Solo un tratto è più largo ed arriva ad una estensione massima di 150 metri. In ogni caso sottendono soltanto ampie aree coltivate determinando quindi un basso rischio in caso di alluvione. Al contrario le aree della pianura fiorentina sono più estese, continue e ravvicinate ed in conseguenza della tipologie arginali e delle aree da esse sottese provocano diversi tipi di criticità. Il rischio minore è senza dubbio nel tratto che costeggia la zona dei Renai nonostante vi siano alcuni sottopassi di cui addirittura uno non protetto che mette in comunicazione diretta l'area di golena con l'esterno; qui vi sono una serie di laghi di cava in parte riconvertiti ad attività ludico-ricreative (parco "Stato Libero dei Renai"). La zona a rischio intermedio si trova invece nelle fasce contermini in sponda sinistra nel comune di Scandicci e di Lastra a Signa (dirimpetto ai Renai) ed in sponda destra nel comune di Campi Bisenzio con sconfinamento per brevi tratti nel comune di Firenze. In queste zone gli argini proteggono principalmente aree coltivate, ma vi si trovano anche talune attività commerciali o di servizio ed alcuni nuclei abitativi (Stagno, San Colombano, Badia a Settimo, ecc.) la cui recente espansione urbanistica si è evoluta sempre più verso il fiume. A questa categoria appartiene anche un tratto di circa 240 m sulla sponda destra a valle di Signa. La vicinanza delle abitazioni agli argini potrebbe far ricadere il tratto esterno tra le zone maggiormente a repentaglio, ma tuttavia essendo esse edificate sui primi versanti di una zona

collinare si trovano ad una quota piuttosto elevata e protetta dal contatto diretto con le acque di esondazione e ciò ci permette di classificare l'area a rischio intermedio. Infine la zona a criticità maggiore risulta senza dubbio una frazione dell'argine che costeggia "via di Sotto" in località Lastra a Signa. L'elevata rischiosità è in questo caso da mettere in relazione sia alla prospicenza di un ampio nucleo insediativo, sia al passaggio di un'importante snodo viario, ma soprattutto al fatto che a poche decine di metri si trova la confluenza del Bisenzio con l'Arno, la cui interconnessione durante le fasi di picco delle piene ha storicamente prodotto ripetuti alluvionamenti nelle aree circostanti. Infine anche i tre settori arginali isolati ed abbandonati nella loro funzionalità idraulica (Lisca, Pontassieve e Incisa), che sono stati trattati nel paragrafo 5.5, hanno la loro sommità a quote inferiori a quelle che raggiungono le acque di piena con tempi di ritorno trentennali e pertanto costituiscono una difesa diretta solo per eventi ciclicamente più ricorrenti. Questo è vero se si verifica la conservazione delle proprie strutture e non si realizza, già per basse portate, effetti di sifonamento o collassi, che sono peraltro probabili visto il pessimo stato di conservazione.

Passando ad analizzare le quote arginali per tempi di ritorno maggiori è ovvio che le zone caratterizzate da sormonto precedentemente discusse continuano ad avere la stessa criticità che in certi casi può anche aumentare in conseguenza dell'allargamento delle aree sommergibili. A queste se ne aggiungono via via di nuove sottoponendo a rischio settori arginali prima considerati sicuri.

Per quanto riguarda le aree arginali a rischio tracimazione per tempi di ritorno di 100 anni le zone a rischio salgono a tre con l'ingresso in questa categoria di un breve settore nel centro di Firenze (lungarno delle Grazie) (Fig. 6.9a). Infatti nel tratto dal ponte omonimo fino all'altezza della Biblioteca Nazionale il modello proposto dall'Autorità di Bacino prevede la fuoriuscita dell'acqua già per portate inferiori a quelle associabili alla piena del 1966 (evento duecentennale). Tuttavia l'altezza prevista del pelo libero è di pochi centimetri al di sopra della quota massima arginale, con valori che vanno da 10 cm presso il ponte a 30 cm nel punto opposto, tanto che basterebbero piccoli lavori di adeguamento per evitare il sormonto e l'allagamento dell'area contigua. Le altre due zone a rischio sono sempre quelle corrispondenti al tratto Incisa-Figline (Fig. 6.4) e alla pianura Fiorentina comprendente i comuni di Scandicci, Signa e Lastra a Signa con l'aggiunta di Campi Bisenzio e Firenze (Fig. 6.7b). In entrambi i casi ai settori arginali già a rischio per piene con tempo di ritorno trentennale si aggiungono ampie porzioni creando nuovi e significativi scenari di pericolosità. Per quanto riguarda il primo dei due casi gli argini in sponda destra che per T30 risultavano a rischio solo in limitati settori diventano ora interamente tracimabili. Il rischio legato ad un tale evento è tuttavia

contenuto quasi ovunque poichè a tergo dei rilevati si presentano di solito estesi campi coltivati che terminano a ridosso dell'autostrada o del tracciato ferroviario. La criticità maggiore è semmai riscontrabile nella presenza dell'area industriale di Lagaccioni che è stata fatta sorgere lungo la ferrovia a breve distanza dell'Arno. Dunque in sponda sinistra si presenta per la prima volta un esteso settore ad alto rischio che continua poi in maniera meno critica fin quasi alle porte di Figline Valdarno. Le aree retrostanti a questo settore presentano infatti una vocazione prettamente agricola che tuttavia risultano sempre più minacciate dai nuovi progetti di espansione urbanistica messa in atto dall'amministrazione locale. Attualmente l'area in questione presenta solo alcune pertinenze o abitazioni private, che ad ogni modo devono essere considerate a rischio al pari degli insediamenti abitativi poco distanti.

Anche nel caso della porzione terminale della piana fiorentina si evidenzia sia l'allargamento dei settori arginali inondabili che danno origine ad estese ed ininterrotte aree a rischio, sia la comparsa di nuovi settori potenzialmente soggetti a straripamento. I tratti arginali a monte della confluenza con il Bisenzio (sponda destra) e del Vingone (sponda sinistra) appartengono senza dubbio al tratto ampliato, fatta eccezione di piccoli settori prospicienti al quartiere delle piagge (Brozzi, Firenze). I rilevati arginali, ma soprattutto le opere di difesa in muratura realizzate di fronte ai centri abitati di Lastra a Signa, Signa, Ponte Signa e Porto di mezzo fanno invece parte delle nuove aree a rischio. Questi settori in relazione alla presenza e all'estensione dell'area abitativa inondabile per eventi con tempi di ritorno centenari, unitamente alla presenza della foce del Vingone e del Bisenzio presentano senza dubbio la criticità maggiore. Il rischio minore è invece sempre legato agli argini antistanti i Renai per le stesse motivazioni addotte precedentemente, mentre le restanti difese idrauliche presentano una criticità intermedia nonostante l'allargamento delle aree di interesse. Ciò deriva sostanzialmente dal fatto che le entità vulnerabili potenzialmente a rischio sono distanti dal piede esterno dell'argine e tuttavia variamente distribuite nel territorio che presenta ancora estese aree agricole o comunque non del tutto urbanizzate.

Per quanto concerne il rischio di tracimazione per eventi con tempi di ritorno di 200 anni le zone stavolta potenzialmente soggette ad esondazione diventano quattro con l'aggiunta alle tre precedenti dell'intero settore arginale a protezione dell'abitato di Brucianesi (Fig. 6.8a). In questo caso infatti si prevede che sia i rilevati in terra che i muri arginali lungo tutto l'abitato non siano in grado di contenere in nessun caso la portata di piena prevista. In riferimento alle altre tre zone in oggetto abbiamo invece che nel tratto arginato finale della piana fiorentina che va ininterrottamente dalla stretta della Gonfolina fino alla confluenza con la Greve in sponda destra e Brozzi in sponda sinistra le aree con probabilità di esondazione rimangono



sostanzialmente le stesse degli eventi centenari (Fig. 6.8a). Di fatto la comparsa di nuovi settori a rischio si riduce a pochi metri, mantenendo invariate le aree esterne soggette ad un eventuale impatto diretto delle acque di esondazione. Tuttavia è bene ricordare che le masse di fluidi in gioco sono maggiori ed i danni potrebbero essere proporzionalmente più rilevanti. Anche l'estensione delle aree soggette ad essere scavalcate dall'onda di piena nel tratto precedentemente identificato da Figline ad Incisa non subiscono sostanziali modifiche (Fig. 6.5). Si registra comunque lo sviluppo di una certa pericolosità lungo il rilevato arginale che è sovrastato dalla strada via "Argini Arno" nel tratto dal torrente Ponterosso per 1150 metri in direzione del ponte di Figline. Fortunatamente per l'agglomerato urbano prossimo all'attraversamento non si presentano settori a rischio di tracimazione i quali tuttavia fanno una limitata comparsa (pochi metri ciascuno) nel tratto più a sud, in corrispondenza delle rampe di accesso alla sommità arginale, che anche in questo caso è rappresentata da una strada asfaltata, continuazione della via "Argini Arno" precedentemente illustrata. Sempre rimanendo nel comprensorio di Figline Valdarno nuovi ed estesi settori ad alto rischio di straripamento si mostrano invece a monte del torrente Cesto in sponda sinistra e del torrente Resco in sponda destra fino all'altezza della frazione di Carresi. Infine lo studio relativo alla città di Firenze mostra che eventi con tempi di ritorno duecentennali provocano innanzitutto l'ampliamento dei settori arginali critici prospicienti al centro storico; dal lungarno delle Grazie, pericoloso per portate anche minori, la probabilità di esondazione si estende fino a gran parte del lungarno generale Armano Diaz (Fig. 6.9b). Inoltre si presenta un nuovo settore critico in corrispondenza della terrazza antistante alla piazza Giuseppe Poggi, proprio nel tratto in cui l'Arno subisce un considerevole restringimento di sezione. L'area urbana fiorentina presenta tuttavia altri due punti in cui l'acqua con le portate supposte dal modello SIMI potrebbe fuoriuscire; uno è collocato in prossimità del ponte di Varlungo (subito a monte e a valle) (Fig. 6.10a), mentre l'altro si trova nel quartiere dell'Isolotto all'altezza del lungarno dei Pioppi (Fig. 6.11). In entrambi i casi i settori sono discontinui, abbastanza ravvicinati ed interposti tra estesi tratti di sponda privi di qualsiasi difesa e soggetti ad allagamenti diffusi in relazione alle portate previste (es. tratto da ponte San Niccolò a Varlungo su entrambe le sponde). Alcuni di questi settori sprovvisti di argini risultano già inondabili anche per eventi ciclicamente inferiori, ma, considerate le quote raggiunte dai livelli di piena e la morfologia delle sponde, la diffusione areale delle acque di esondazione rimane tuttavia contenuta. Al contrario la fuoriuscita dell'Arno durante le portate duecentennali sembra invece destinata a subire un maggiore impatto nel territorio limitrofo. Il parco delle cascate in quanto zona a verde esterna all'area urbana e volutamente considerata come area inondabile non viene incluso nelle

considerazioni affrontate in questo capitolo. Volendo a questo punto differenziare in maniera generale le aree arginali a rischio per portate con T200 possiamo quindi affermare che gli insediamenti urbani caratterizzati da protezioni arginali non in grado di proteggerli dalla piena supposta costituiscono senza dubbio le aree maggiormente a rischio (Firenze, Brucianesi, Signa, Lagaccioni, ecc.). Alcune di esse presentano poi anche delle criticità locali che lo rendono sicuramente più alto (ad es. Ponte Vecchio, confluenza con il Bisenzio e con il Vingone, strozzatura morfologica della Gonfolina, ecc). Al contrario le aree a minor rischio si trovano in corrispondenza di quei settori arginali che sottendono aree in cui l'attività umana è minima (Renai, tratti a monte di Incisa, ecc.) o nelle aree in cui vi sono manufatti paralleli all'Arno che costituiscono un'ulteriore funzione difensiva in virtù del loro sviluppo verticale oltre che longitudinale (tratti costeggiati da autostrada o ferrovia). Tutto il resto presenta un valore intermedio in relazione alla diversificazione dell'uso del territorio maturato dalle innumerevoli pianificazioni territoriali e alla tipologia di pressione antropica insistente nelle fasce perfluviali.

Per completare la discussione relativa alle aree arginali a rischio tracimazione passiamo ora ad analizzare la situazione relativa ad eventi con tempi di ritorno di 500 anni. In questo caso per i due tratti più valle (Brucianesi e settore terminale della piana fiorentina) non si registra nessun aumento sostanziale delle aree inondabili in quanto esse risultano ampiamente sommerse già per portate duecentennali (Fig. 6.8b). La situazione cambia un po' invece nel tratto che va da Figline ad Incisa (Fig. 6.6). Innanzitutto si presentano per la prima volta piccoli tratti a rischio nell'abitato di Incisa, nonostante l'alveo sia abbastanza scavato ed il paese edificato ad una certa quota dal fiume. Il tratto compreso tra le due cittadine si mantiene invece critico come per gli eventi ciclicamente più frequenti e per la prima volta si riscontra una certa pericolosità proprio nella zona urbanizzata di fronte al ponte che unisce Figline al Matassino. Infine la zona più a monte è caratterizzata da una criticità continua che è il risultato dell'allargamento delle aree tracimabili individuate per T200. Il tratto si estende al massimo fino all'altezza della località Restone lungo la sponda destra. Per quanto riguarda il tratto urbano di Firenze abbiamo un significativo ampliamento delle tre aree esondabili già precedentemente individuate. Nell'area del ponte del Varlungo l'area critica corrisponde quindi ai rilevati arginali situati sulla riva destra e per la prima volta compare un intero settore tracimabile sulla sponda sinistra (Fig 6.10b). Viste poi le quote raggiunte dalla piena i tratti di sponda privi di difesa dal ponte in oggetto fino a quello di San Niccolò vengono sommersi tutti indistintamente dalle acque dell'Arno. Nell'area dell'Isolotto i settori tracimabili si estendono ora per tutto il lungarno dei Pioppi e per parte di via Baccio Bandinelli (Fig. 6.12). Anche qui le sponde non arginate

adiacenti ai rilevati risultano completamente sommergibili. Infine, in relazione alla portate previste, il centro cittadino presenta uno straripamento diffuso lungo i muri d'argine che vanno ininterrottamente dal Lungarno Generale Armando Diaz al lungarno della zecca Vecchia sulla sponda destra e dal lungarno Serristori a parte del lungarno Benvenuto Cellini in sponda sinistra (Fig. 6.9c). In pratica si verifica un ampliamento verso monte delle aree critiche precedentemente individuate in sponda destra e la formazione di nuovi ed estesi settori a rischio sulla sponda opposta. Come per portate con tempi di ritorno duecentannali le aree maggiormente a rischio adiacenti alle difese arginali sono sempre le superfici urbane edificate a ridosso dei settori tracimabili ed in particolar modo in corrispondenza delle criticità locali. In questo caso si evidenzia la riduzione di sezione in prossimità della pescaia di San Niccolò, come precedentemente spiegato, e la presenza della foce del torrente Resco congiuntamente al ponte con i piloni in erosione presso Figline. Le aree a rischio intermedio e minimo corrispondono grossomodo alle stesse elencate per gli eventi più ricorrenti con l'aggiunta dei nuovi settori allargati.



Fig. 6.3 – Zone arginali in località Incisa dove si ipotizza lo sfioramento per *tempi di ritorno trentennali*. I punti rossi rappresentano l'intersezione tra sezione idraulica ed argine nella quale le misurazioni GPS presentano una quota arginale inferiore a quella dell'onda di piena relativa al tempo di ritorno considerato. Le linee gialle sono l'estensione del dato puntuale alle aree adiacenti.



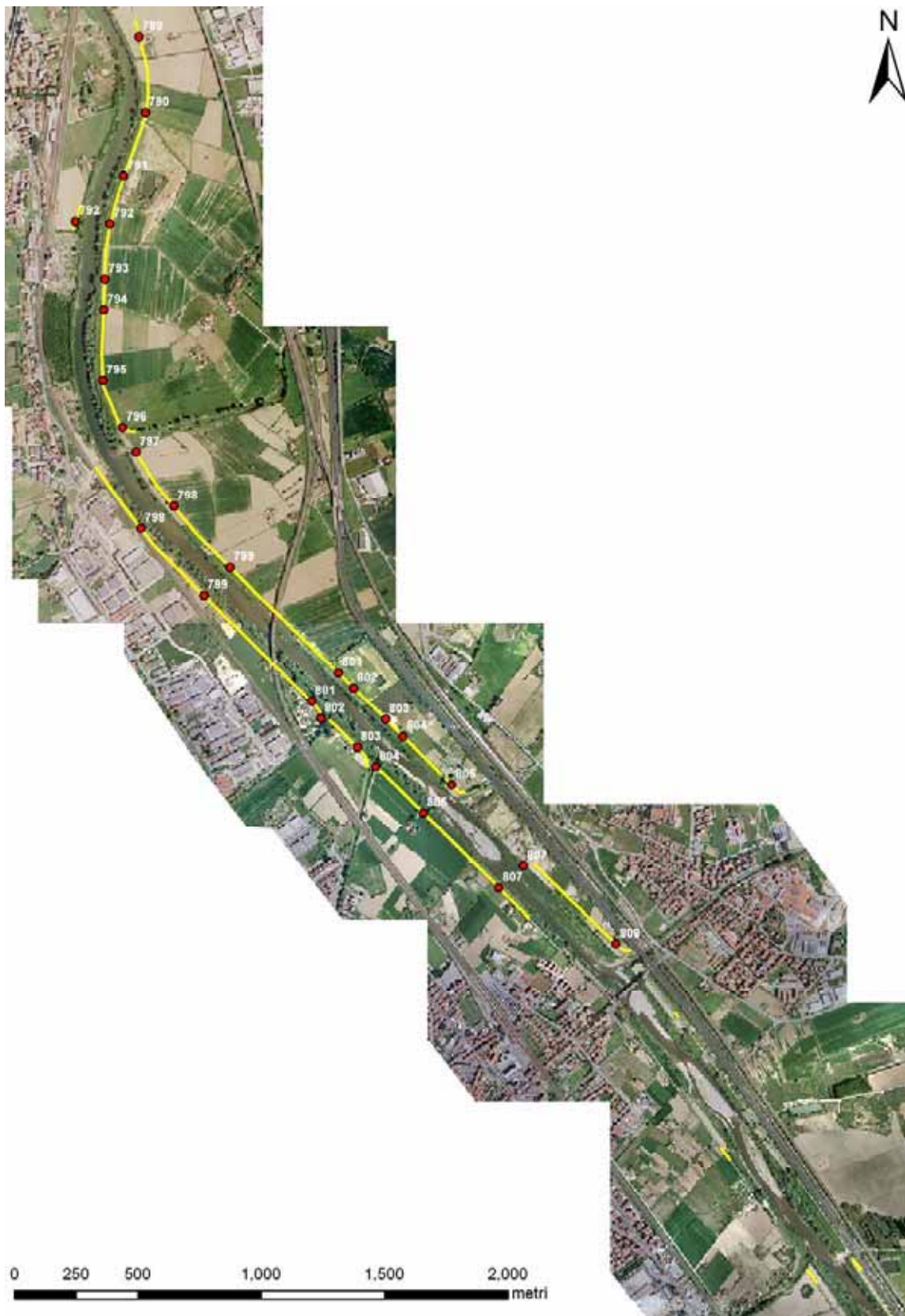


Fig. 6.4 – zone arginali in località Incisa dove si ipotizza lo sfioramento per *tempi di ritorno centennali*. I punti rossi rappresentano l'intersezione tra sezione idraulica ed argine nella quale le misurazioni GPS presentano una quota arginale inferiore a quella dell'onda di piena relativa al tempo di ritorno considerato. Le linee gialle sono l'estensione del dato puntuale alle aree adiacenti.



Fig. 6.5 – zone arginali in località Incisa dove si ipotizza lo sfioramento per *tempi di ritorno duecentennali*. I punti rossi rappresentano l'intersezione tra sezione idraulica ed argine nella quale le misurazioni GPS presentano una quota arginale inferiore a quella dell'onda di piena relativa al tempo di ritorno considerato. Le linee gialle sono l'estensione del dato puntuale alle aree adiacenti.



Fig. 6.6 – zone arginali in località Incisa dove si ipotizza lo sfioramento per *tempi di ritorno cinquecentennali*. I punti rossi rappresentano l'intersezione tra sezione idraulica ed argine nella quale le misurazioni GPS presentano una quota arginale inferiore a quella dell'onda di piena relativa al tempo di ritorno considerato. Le linee gialle sono l'estensione del dato puntuale alle aree adiacenti.



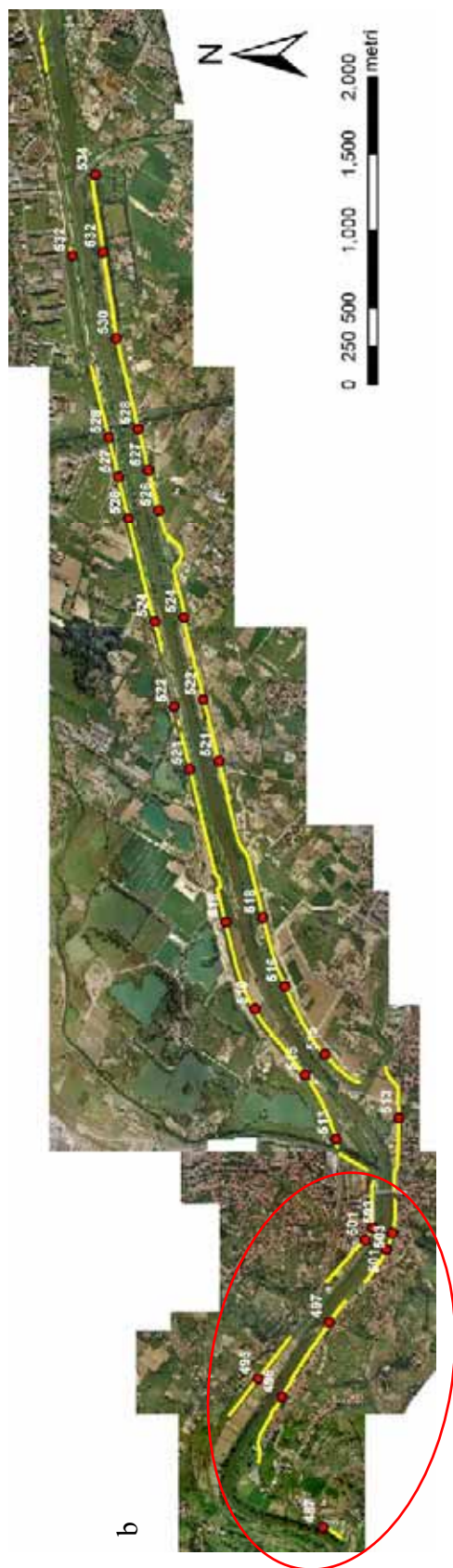


Fig. 6.7 – zone arginali in località Lastra a Signa dove si ipotizza lo sfioramento per *tempi di ritorno trentennali* (a) e *centennali* (b). I punti rossi rappresentano l'intersezione tra sezione idraulica ed argine nella quale le misurazioni GPS presentano una quota arginale inferiore a quella dell'onda di piena relativa al tempo di ritorno considerato. Le linee gialle sono l'estensione del dato puntuale alle aree adiacenti





Fig. 6.8 – zone arginali in località Lastra a Sigra dove si ipotizza lo sfioramento per *tempi di ritorno duecentennali* (a) e *cinquecentennali* (b). I punti rossi rappresentano l'intersezione tra sezione idraulica ed argine nella quale le misurazioni GPS presentano una quota arginale inferiore a quella dell'onda di piena relativa al tempo di ritorno considerato. Le linee gialle sono l'estensione del dato puntuale alle aree adiacenti



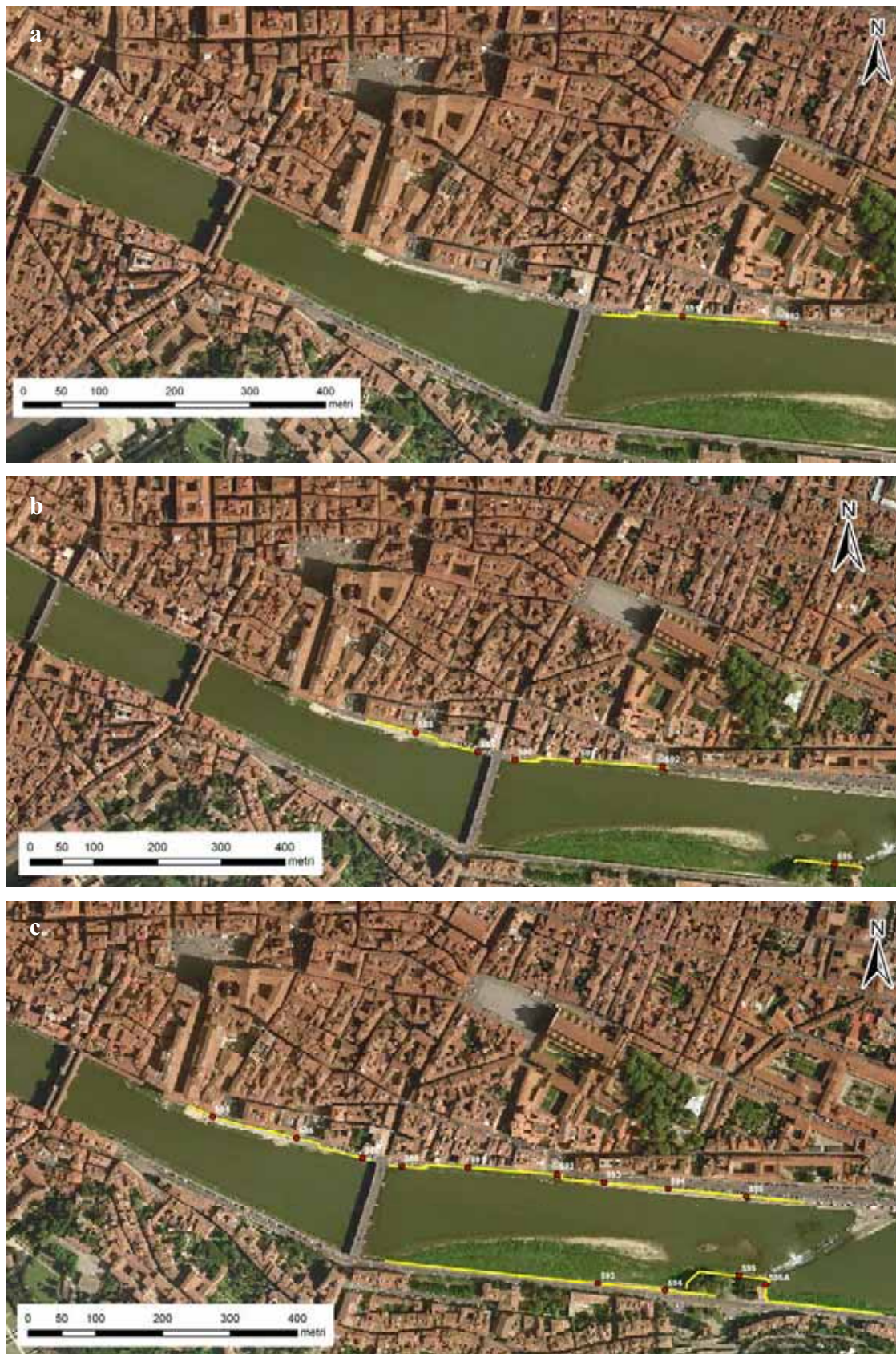


Fig. 6.9 – zone arginali in Firenze dove si ipotizza lo sfioramento per *tempi di ritorno centennali* (a), *duecentennali* (b) e *cinquecentennali* (c). I punti rossi rappresentano l'intersezione tra sezione idraulica ed argine nella quale le misurazioni GPS presentano una quota arginale inferiore a quella dell'onda di piena relativa al tempo di ritorno considerato. Le linee gialle sono l'estensione del dato puntuale alle aree adiacenti.





Fig. 6.10 – zone arginali in Firenze dove si ipotizza lo sfioramento *per tempi di ritorno duecentennali* (a) e *cinquecentennali* (b). I punti rossi rappresentano l'intersezione tra sezione idraulica ed argine nella quale le misurazioni GPS presentano una quota arginale inferiore a quella dell'onda di piena relativa al tempo di ritorno considerato. Le linee gialle sono l'estensione del dato puntuale alle aree adiacenti.



Fig. 6.11 – zone arginali in Firenze dove si ipotizza lo sfioramento *per tempi di ritorno duecentennali*. I punti rossi rappresentano l'intersezione tra sezione idraulica ed argine nella quale le misurazioni GPS presentano una quota arginale inferiore a quella dell'onda di piena relativa al tempo di ritorno considerato. Le linee gialle sono l'estensione del dato puntuale alle aree adiacenti





Fig. 6.12 – zone arginali in Firenze dove si ipotizza lo sfioramento per *tempi di ritorno cinquecentennali* (b). I punti rossi rappresentano l'intersezione tra sezione idraulica ed argine nella quale le misurazioni GPS presentano una quota arginale inferiore a quella dell'onda di piena relativa al tempo di ritorno considerato. Le linee gialle sono l'estensione del dato puntuale alle aree adiacenti.

### 6.1.3 ANALISI DEL FRANCO DI SICUREZZA

L'altezza degli argini di un corso d'acqua è dimensionata in base all'entità degli eventi di piena previsti in un arco di tempo pluriennale (definito "tempo di ritorno"). In particolare la quota di sommità arginale viene determinata integrando il livello raggiunto dalle acque durante un certo evento, di un ulteriore margine di sicurezza detto *franco arginale*. Esso ha entità variabile, tanto maggiore quanto più elevato è il grado di pericolosità idraulica del corso d'acqua e del suo contesto territoriale. Di norma, per corsi d'acqua primari come l'Arno, si adotta un franco di 1.00 m sulla piena con tempo di ritorno duecentennale. Tale dislivello non è determinato da convenzioni legislative, ma è largamente diffuso in ambito idraulico poiché risulta sufficientemente cautelativo in caso di portate eccezionali (Da Deppo, 2006). Si ricorda infatti che il franco idraulico rappresenta il coefficiente di sicurezza che assicura il corretto funzionamento delle opere realizzate, tenendo conto di tutte le incertezze legate alla modellazione idrologico-idraulica e ai diversi fenomeni che possono occorrere durante l'evento di piena, dei quali la modellazione non tiene solitamente conto (ADB Magra, 2006). Dunque, in relazione a quanto suddetto, anche per il tratto di Arno studiato viene preso in considerazione il franco idraulico di 1 m riferito a portate duecentennali, anche se la tipologia di dati elaborati in questo progetto permette di adottare qualsiasi dislivello.



Attualmente molti tratti arginati dell'Arno, che sono stati ritenuti sicuri per tempi di ritorno centennali, risultano deficitari del franco arginale per eventi duecentennali a tal punto che o vengono sommerse dalle acque di esondazione o raggiungono un franco di pochi centimetri che con tempi di ritorno maggiori (es. cinquecentennali) possono poi essere completamente coperti dall'acqua. Queste aree corrispondono principalmente ai settori immediatamente adiacenti a quelli che sono già stati considerati esondabili per eventi con tempi di ritorno centennali. Soltanto nel caso di Brucianesi l'intero tratto arginale, che è giudicato interamente sicuro per eventi ricorrenti ogni cento anni, viene completamente sormontato dalle acque di esondazione nell'eventualità di una piena duecentennale senza mai presentare un minimo franco di sicurezza. Ciò sottolinea l'esistenza di un considerevole sottodimensionamento della sezione di alveo nel tratto in questione, che comporta tra l'altro un rischio notevole per l'area urbana attigua.

Analizzando invece tutti gli altri settori arginali dotati di un franco idraulico inferiore al metro si nota che tutti in maniera più meno continua vengono sommersi dalle piene cinquecentennali (Fig. 6.13, 6.14, 6.15, 6.16) ad eccezione del tratto cittadino fiorentino compreso tra il Ponte alla Vittoria al ponte alle Grazie (Fig. 6.17). In particolare il lungarno Amerigo Vespucci presenta un dislivello crescente tra la massima quota arginale ed il livello di piena mano a mano che ci si sposta in direzione del centro storico. Si passa infatti da un valore di 0.52 m ad un valore di 0.93 m in corrispondenza delle sezioni idrauliche finora considerate. Anche lungo via Giovanni Antonio Sogliano, il lungarno di Santa Rosa e parte del lungarno Soderini, sulla sponda opposta, si riscontra la stessa tendenza. In questo caso la variazione dei dislivelli è leggermente maggiore (da 0.44 m a 0.93 m) tanto che si passa da un punto inondabile per T500 in prossimità del ponte alla Vittoria a valori molti prossimi al franco di sicurezza di 1 metro nella sezione più a monte (n.560). Per tutto il Lungarno Corsini e la parte iniziale di Lungarno degli Acciaiuoli (~ 30m) il franco di sicurezza si mantiene intorno ai 0.60 m, mentre sulla sponda opposta chiamata lungarno Guicciardini il franco inferiore ad un metro si presenta soltanto nel punto intermedio, laddove le quote arginali sono in assoluto le più basse dell'intero settore. In pratica l'argine assume una forma concava che nel punto più avvallato ha un franco di sicurezza di 0.91m. Per quanto riguarda invece tutto il lungarno Acciaoli, compreso il valore prima discusso, notiamo che il franco diminuisce andando verso il punto più centrale (0.33 m) per aumentare poi in maniera notevole mano a mano che ci sia avvicina al ponte Vecchio (0.95 m). Infine il Lungarno Torrigiani, di fronte a tratti inondabili per T200 e T500, presenta un franco che va da 0.80 m a meno di 1m spostandosi in direzione del ponte alle Grazie.

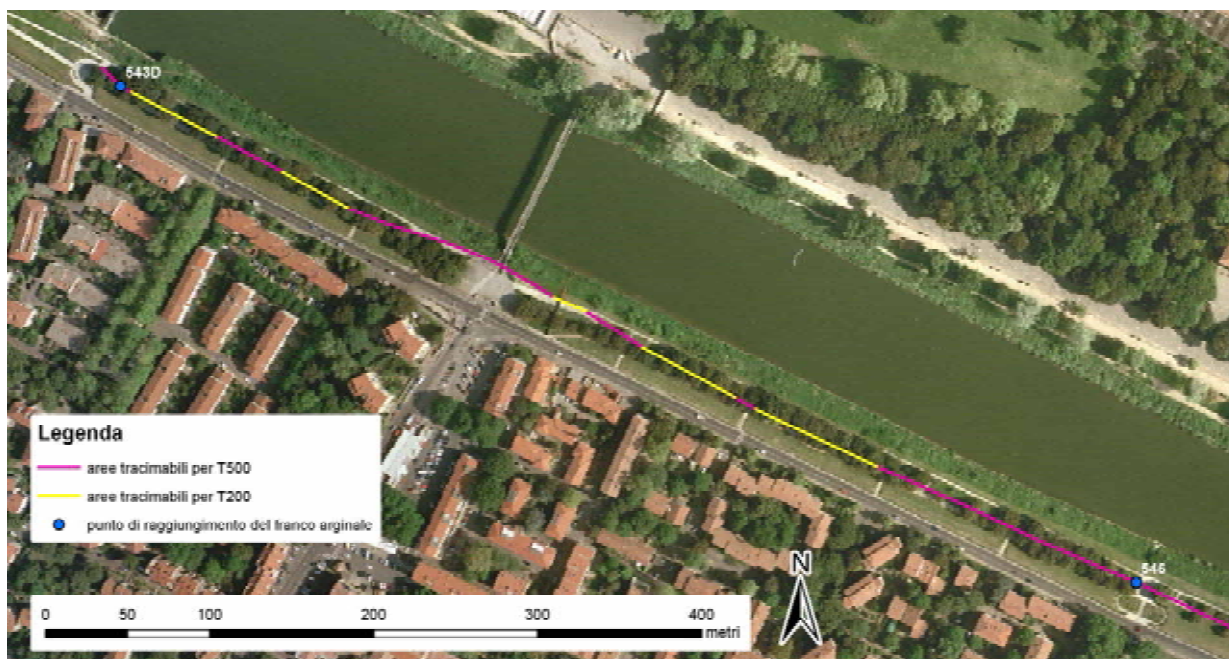


Fig. 6.13 - Settori arginali dotati di un franco idraulico inferiore al metro e aree traccimabili nel quartiere dell'Isolotto (FI)



Fig. 6.14 - Settori arginali dotati di un franco idraulico inferiore al metro e aree traccimabili presso il ponte di Varlungo (FI)



Fig. 6.15 - Settori arginali dotati di un franco idraulico inferiore al metro e aree traccimabili in prossimità della confluenza con la Greve





Fig. 6.16 – Settori arginali dotati di un franco idraulico inferiore al metro e aree tracciabili comprese tra Figline Valdarno e la frazione di Ripalta.

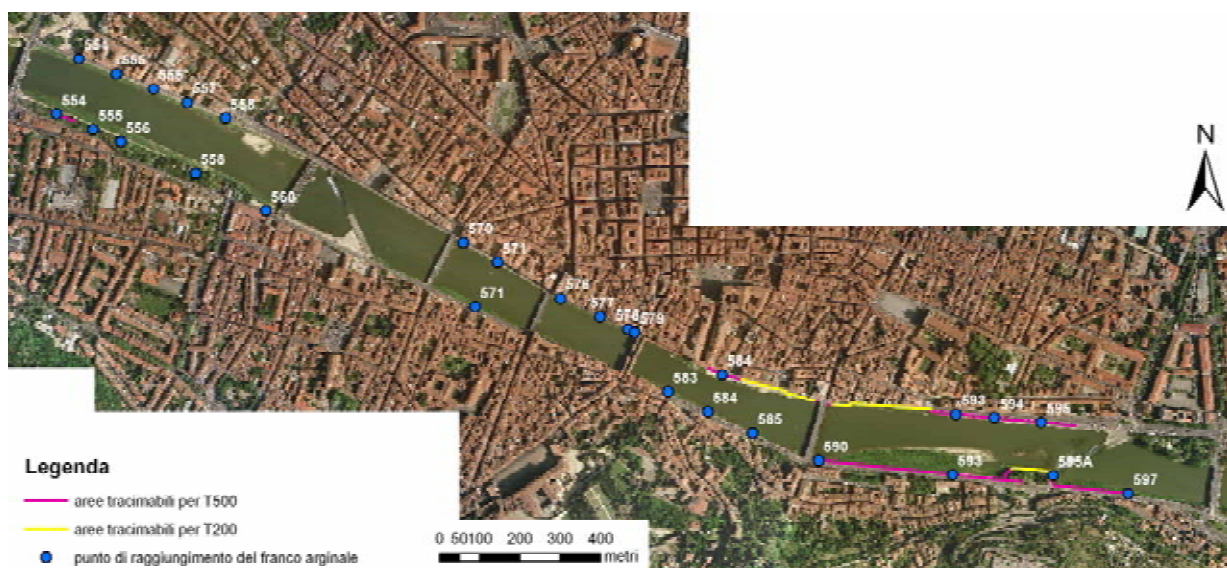


Fig. 6.17 – Settori arginali dotati di un franco idraulico inferiore al metro e aree tracciabili nel centro urbano di Firenze

## 6.2 MODELLO DEI FLUSSI IDRICI SUPERFICIALI NELL'AGGLOMERATO URBANO FIORENTINO

### 6.2.1 INTRODUZIONE

Per la valutazione analitica della pericolosità idraulica del territorio si fa di norma ricorso a modelli idrologici e idraulici in grado di simulare i processi di formazione e propagazione delle onde di piena in alveo e nelle fasce di pertinenza fluviale. Conoscere adeguatamente la topografia dei corsi d'acqua e delle aree da essi potenzialmente inondabili è un punto di partenza fondamentale per garantire l'affidabilità dei risultati ottenuti con tali approcci modellistici.

Per questo motivo l'amministrazione comunale ha deciso di dotarsi di dati topografici di elevato dettaglio nei territori di propria competenza; cosa che per realizzarsi compiutamente ha però un costo decisamente elevato sia in termini economici che di tempo di acquisizione se eseguito con tecniche tradizionali. Il recente sviluppo della tecnologia di rilievo laser-scan da piattaforma aerea permette di disporre, in breve tempo e sottoforma di dati immediatamente utilizzabili (modelli digitali del terreno), di dati topografici di elevato dettaglio a costi che, a parità di scala di restituzione, sono notevolmente inferiori rispetto a quelli ottenuti con tecniche di rilievo topografico tradizionale "a terra" (Nardi *et al.*, 2008). Proprio basandosi su queste considerazioni il comune di Firenze nel 2007 ha commissionato alla Compagnia Generale Ripreseeree di Parma un rilievo con tecnologia LiDAR (Light Detection and Ranging) da piattaforma aerea sull'intera area comunale. Il LiDAR, o laserscanning, è una tecnica di acquisizione topografica ormai utilizzata in diversi contesti (architettura, topografia, silvicoltura) che è in grado di rilevare a distanza la forma e la posizione di un oggetto attraverso una sequenza di impulsi laser diversamente orientati. In ambito topografico il rilievo è in genere condotto montando su un aeromobile la strumentazione costituita da un telemetro laser (che emette gli impulsi e misura le distanze assolute che, istante per istante, lo separano dai punti rilevati a terra), da un sistema di rilevamento GPS differenziale (che fornisce la posizione assoluta dell'emettitore, appoggiandosi ad una stazione GPS master fissa, posizionata su punti noti a terra) e da un sistema di rilevatori inerziali (giroscopi, accelerometri) che tengono conto dell'inclinazione dell'aeromobile e di altri parametri per valutare correttamente la direzione di emissione dei singoli impulsi. Il risultato del rilievo è fornito, a partire dalla nuvola di punti acquisita, in forma di modello digitale del terreno (DTM), tramite appositi algoritmi di calcolo.



Nel caso del lavoro condotto nel comune di Firenze sono stati richiesti modelli digitali del terreno con maglia 1 metro, restituiti nel sistema di riferimento ROMA40-Gauss Boaga. Il sensore utilizzato è in grado di registrare contemporaneamente due risposte per ogni impulso emesso con il relativo valore di intensità del segnale: il primo impulso fornisce informazioni sulle parti sommitali degli oggetti mentre l'ultimo fornisce dati sul terreno anche in presenza di copertura vegetale. Tale potenzialità ha permesso di ottenere due prodotti distinti: DSM (Modello Digitale delle Superfici), DTM (Modello Digitale del Terreno). Il DSM contiene l'informazione completa relativa al primo impulso (comprensiva della vegetazione e dell'ingombro dei fabbricati e delle altre infrastrutture in elevazione), mentre il DTM, attraverso algoritmi di filtraggio dei dati controllati dall'operatore, restituisce il modello del solo terreno

I dati LiDAR così ottenuti sono stati quindi usati per estendere le considerazioni della pericolosità idraulica effettuate limitatamente agli argini nel paragrafo precedente al centro della città di Firenze. La finalità è ottenere un quadro conoscitivo dettagliato della geomorfologia urbana in modo tale che si possa valutare metro per metro ogni significativa variazione delle linee di deflusso superficiali da mettere poi in relazione alle criticità individuate durante i rilievi e durante la fase di perimetrazione delle aree a rischio tracimazione. Si intende quindi capire lo sviluppo della superficie urbana in risposta ad una circolazione idrica senza tener conto delle dinamiche dei flussi in ambiente urbano come ad esempio l'interazione con gli edifici o l'accumulo di volumi d'acqua in determinate zone.

### 6.2.2 ANALISI IN AMBIENTE GIS

In sede di analisi attraverso gli applicativi del pacchetto ArcGis™ 9.0 abbiamo innanzitutto operato direttamente sui dati originali delle pubbliche amministrazioni (DSM, DTM e CTR) al fine di ottenere dati topografici di input idonei ad effettuare l'analisi idrologica. Il primo passo è stato quello di ricavare il DTMI (Modello Digitale del Terreno Idraulico), un prodotto intermedio tra il DSM ed il DTM, nel quale oltre alla topografia compaiono soltanto i fabbricati e non la vegetazione (Fig. 6.18). Ciò è stato effettuato essenzialmente sovrapponendo le CTR in scala 1:2000 al DSM originario e discriminando tutti gli elementi di interesse urbano capaci di influenzare le linee deflusso. Si è passati quindi alla loro estrazione e attraverso una serie di elaborazioni con l'applicativo ArcMap sono stati integrati con il DTM relativo soltanto alle zone in cui l'acqua è destinata e transitare (strade, piazze, giardini, ecc.). L'operazione è stata ripetuta per ben tre volte producendo il DTMI relativo a tre situazioni

possibili lungo l'Arno: il fiume che fluisce regolarmente, il fiume che trova uno sbarramento in prossimità dei ponti e il fiume che non è in grado di ricevere più nessun quantitativo d'acqua ed in maniera indifferenziata lascia fuoriuscire l'acqua in eccesso. I passaggi successivi relativi all'analisi idrologica vera e propria sono stati applicati ai tre casi presi in esame, facendo uso di alcune funzioni specifiche di geoprocessing presenti nella applicazione ArcToolbox di ArcGIS Desktop. Come primo passo sono state rimosse dall'immagine raster tutte le possibili imperfezioni nel dato prodotto con la creazione del DTMI (buchi, mancanza di dato, valori fuori range, ...). La funzione che ha permesso di rendere continuo il dato spaziale in modo tale che il flusso dell'acqua non subisca interruzioni irreali nel passare da una cella all'altra è definita "Fill". Successivamente attraverso il comando "Flow Direction" abbiamo elaborato la carta delle direzioni di deflusso. Essa viene determinata essenzialmente in base ai valori d'altezza di ogni pixel con i pixel direttamente adiacenti. Il flusso dell'acqua si dirige da un pixel all'altro (per ogni pixel 8 possibilità di direzioni perché 8 pixel adiacenti) quando la differenza d'altezza è maggiore; a seconda della direzione il pixel prende un valore convenzionale di 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 o 128. Il passo successivo è stato quello di inserire il dato calcolato con il passaggio precedente all'interno del comando "Flow Accumulation" al fine di elaborare la carta delle accumulazioni di flusso. Nel Flow Accumulation sono ben visibili i percorsi preferenziali di scorrimento dell'acqua determinati dalla tessitura urbana; laddove i valori dei pixel sono molto alti l'acqua converge in modo massiccio (in questi tracciati i valori sono tanto più alti quanto più si va verso valle). A questo punto abbiamo proceduto a mettere in evidenza le principali direzioni di deflusso, proprio come si trattasse di un reticolo fluviale vero e proprio, caratterizzato da tutta una serie di linee di scorrimento di ordine e grandezza diversa. Per prima cosa abbiamo applicato numerose operazioni di "map algebra" all'immagine raster calcolata attraverso il flow accumulation in modo tale da individuare l'espressione più appropriata a creare una rappresentazione realistica e significativa del reticolo idraulico nell'area di studio ( $flow\_acc > 3000$ ). Le linee che emergono nell'immagine raster sono state trasformate poi in linee di shapefile attraverso la funzione "convert raster to features" contenuta nel tool "3D Analyst" di ArcMap. Volendo a questo punto fare alcune considerazioni più approfondite sul reticolo abbiamo creato un'immagine raster che delinea tutti i bacini di drenaggio. Il dato di input è la carta delle direzioni di flusso relativa alla funzione "flow direction". È stato quindi assegnato un'ordine numerico ai segmenti del reticolo idraulico urbano inserendo nel comando "stream order" le immagini raster relative al reticolo idraulico e alla direzione dei flussi. L'organizzazione gerarchica adottata segue il metodo proposto da Strahler (1952). Infine per ognuno dei suddetti segmenti

di deflusso sono stati calcolati i bacini imbriferi; in pratica le aree attigue alle linee di deflusso in grado di veicolare l'acqua verso la zona di scorrimento principale. La funzione che ci ha permesso di ottenere questi risultati si chiama "watershed" nella quale sono stati inserite tutte le informazioni relative alla direzione dei flussi e alla loro suddivisione gerarchica.

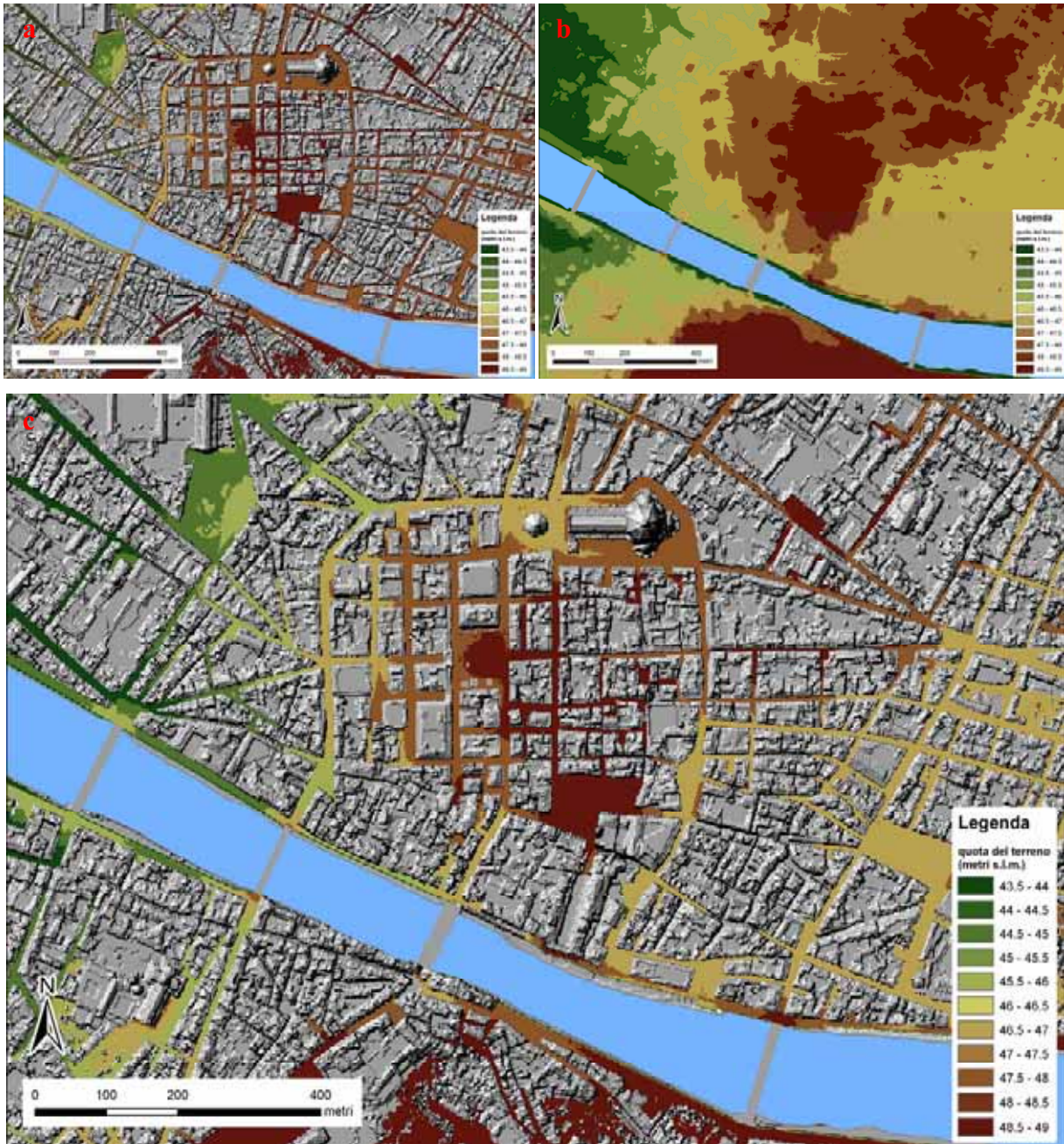


Fig. 6.18 – Tipologie di modelli digitali del terreno relativo al centro di Firenze: DSM (a), DTM (b) e DTMI (c)

### 6.2.3 FLUSSI IDRICI IN CONDIZIONI DI NORMALE SCORRIMENTO DELL'ARNO

In questo paragrafo vengono illustrati i risultati derivanti dall'analisi del reticolo superficiale urbano nel caso che l'Arno mantenga le proprie funzionalità idrodinamiche, compresa quella di

fungere da collettore delle acque superficiali di pioggia che non finiscono nel sistema fognario e delle eventuali acque di esondazione che si possono rovesciare nell'area a causa di una rotta arginale. La distribuzione delle linee di deflusso, che deriva dall'analisi idrologica, evidenzia innanzitutto la presenza di diversi bacini diversamente distribuiti nell'area urbana. In particolare possiamo notare che ve ne sono due abbastanza grandi nella parte più a monte della città e che per la loro ampiezza costituiscono aree piuttosto importanti per quanto riguarda la quantità di acqua potenzialmente raccolta e scaricata in Arno (Fig. 6.19). La sezione di chiusura del bacino situato in sinistra idrografica si trova a ridosso del ponte Giovanni da Verrazzano, pochi metri a monte del suo innesto con la sponda ed ha una zona di alimentazione prevalentemente collinare. Nel bacino situato invece in sponda destra la zona di convergenza di tutte le sue acque si trova sul lungarno generale Armando Diaz, all'altezza di piazza Mentana. Questa sezione di chiusura si trova dunque a poco a monte del centro storico, ed in particolare del Ponte Vecchio, che, per le sue caratteristiche, abbiamo già definito come l'attraversamento più pericoloso di tutto il settore di Arno preso in considerazione. L'area di alimentazione è in questo caso prevalentemente piana e corrispondente ad una grande porzione dell'area urbanizzata fiorentina. Un'altra peculiarità di questo bacino è che esso risulta separato dall'attuale alveo dell'Arno da una serie di microbacini che per la loro conformazione geomorfologica costituiscono una sorta di barriera naturale contro le tracimazioni associabili a piene non troppo elevate. Difatti laddove l'area è più estesa non è stato nemmeno necessario realizzare un qualche tipo di difesa arginale.

Per comprendere quindi più a fondo l'esistenza di questa esteso lembo di terreno abbiamo preso in considerazione l'andamento del letto dell'Arno a partire dalla nascita della città di Firenze ed abbiamo riscontrato che l'insieme degli attuali microbacini è il frutto della azione congiunta tra la dinamica d'alveo in quella direzione e l'azione antropica di confinamento, che si è dimostrata particolarmente incisiva negli ultimi secoli. In particolare possiamo notare che esistono due allineamenti principali; il più esterno che corrisponde all'estensione dell'alveo nel XI° secolo, e che è rimasto grossomodo tale fin dal periodo romano, mentre il secondo, più vicino all'alveo attuale, che corrisponde alla massima estensione laterale dell'Arno durante il periodo rinascimentale (Fig. 6.20). Dunque in questo bacino la lunga interazione tra la naturale tendenza evolutiva dell'Arno, le sistemazioni idrauliche e l'evoluzione urbanistica nelle zone contermini ha portato all'attuale conformazione del reticolo urbano di scorrimento.

Focalizzandoci poi sulla ripartizione in ordine gerarchico delle linee di deflusso nel bacino in questione (Fig. 6.21) possiamo fare alcune considerazioni sulla distribuzione dei fluidi e quindi sui percorsi stradali cittadini che risultano maggiormente impattati. Il tratto di ordine maggiore,



e dunque quello preposto a ricevere i maggiori volumi di acqua corrisponde alla linea di scorrimento che passa per via Aretina, via Gioberti, entra in Borgo la Croce, piega progressivamente verso piazza Santa Croce, e passando per via dei Benci arriva a congiungersi con l'Arno, che secondo l'ipotesi iniziale è completamente ricevente e con piena funzionalità idraulica (Fig. 6.22). La linea di deflusso che costituisce invece il maggior apporto di liquidi nel tratto prima descritto è senza dubbio quella corrispondente al tracciato stradale che inizia in prossimità degli impianti sportivi di Campo Marte, prosegue per via Mazzini scavalcando il tracciato ferroviario con un'ampia curva all'altezza di Via Nardi, la percorre e attraversa quindi il viale Antonio Gramsci, infine attraverso via della Mattonaia arriva ad intercettare il flusso principale. I restanti percorsi cittadini contribuiscono in maniera differente ad alimentare le principali linee deflusso. Tutti insieme rappresentano comunque l'area di scorrimento delle acque di pioggia che durante eventuali piene non riescono più ad essere smaltite dal sistema fognario o peggio ancora in caso di alluvionamento dovuto a fuoriuscita di acqua a monte della sezione di chiusura del bacino. In ogni caso il fatto importante è che la morfologia urbana sembra essere efficace (escludendo interferenze antropiche) a smaltire tutte le acque presenti nell'area a monte senza che venga coinvolto il centro storico.

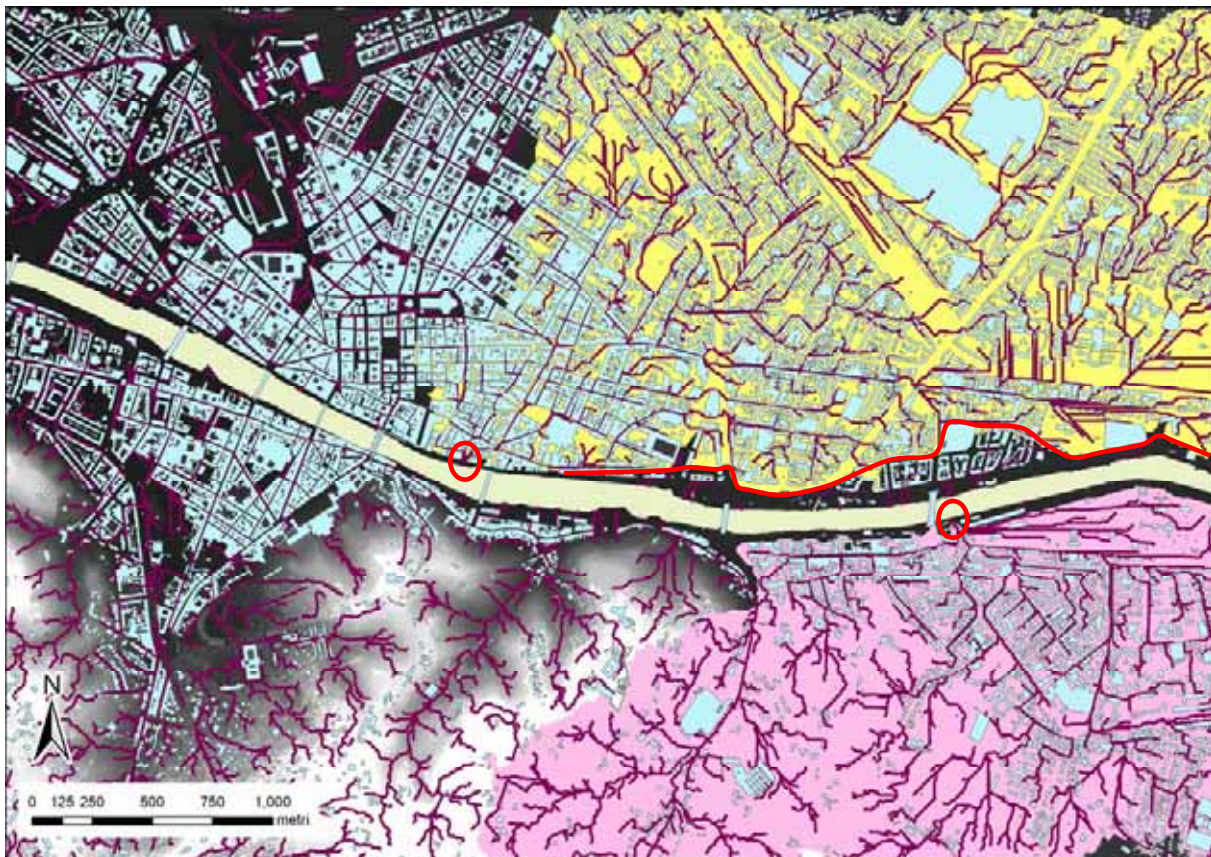


Fig. 6.19 – Distribuzione delle linee di deflusso superficiali a Firenze nel caso di normale scorrimento dell'Arno. La linea rossa rappresenta lo spartiacque con i microbacini collegati direttamente all'Arno, mentre i cerchietti rossi indicano la sezione di chiusura dei due bacini più grandi (giallo in destra e rosa in sinistra).



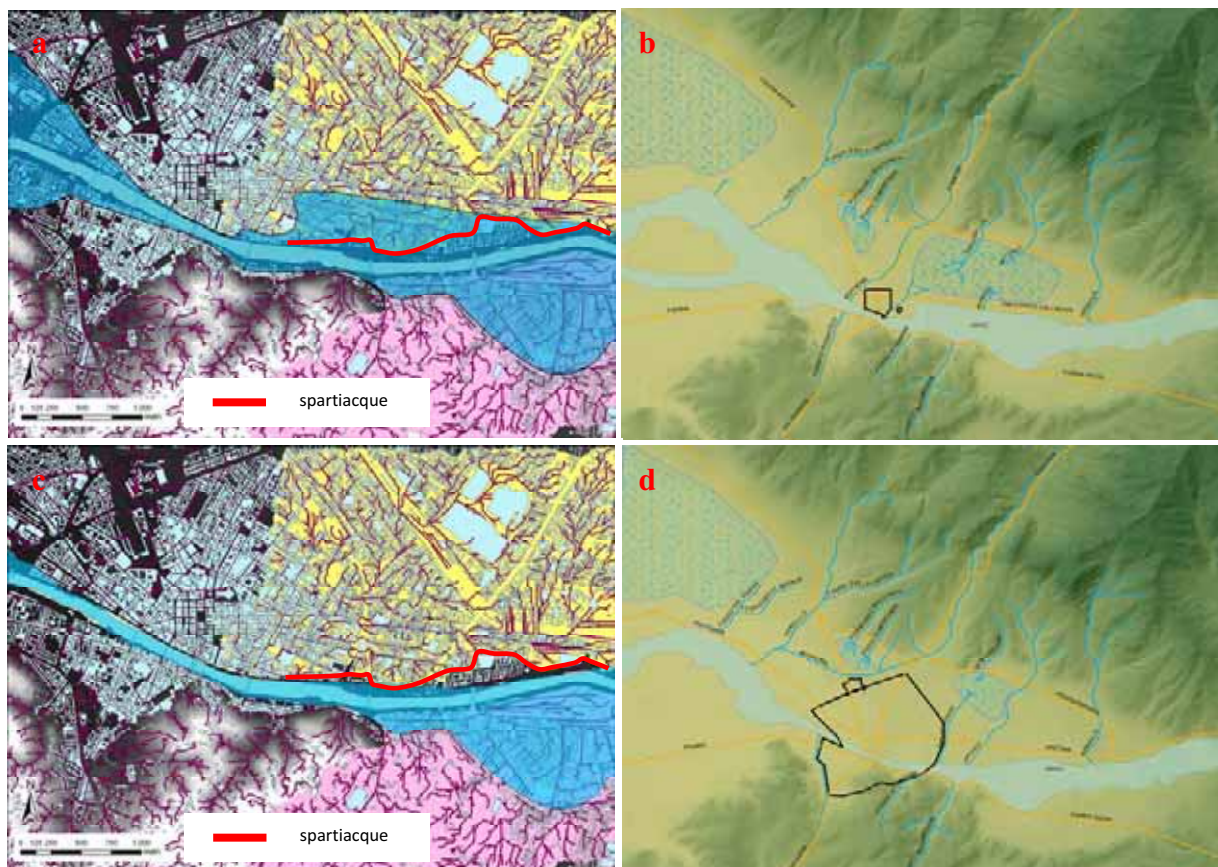


Fig. 6.20 - Distribuzione delle linee di deflusso nell'area urbana fiorentina in relazione all'alveo in tempi storici: Arno nel XI° secolo (a, b), Arno nel Rinascimento (c,d) (Coli *et al.*, 2004).

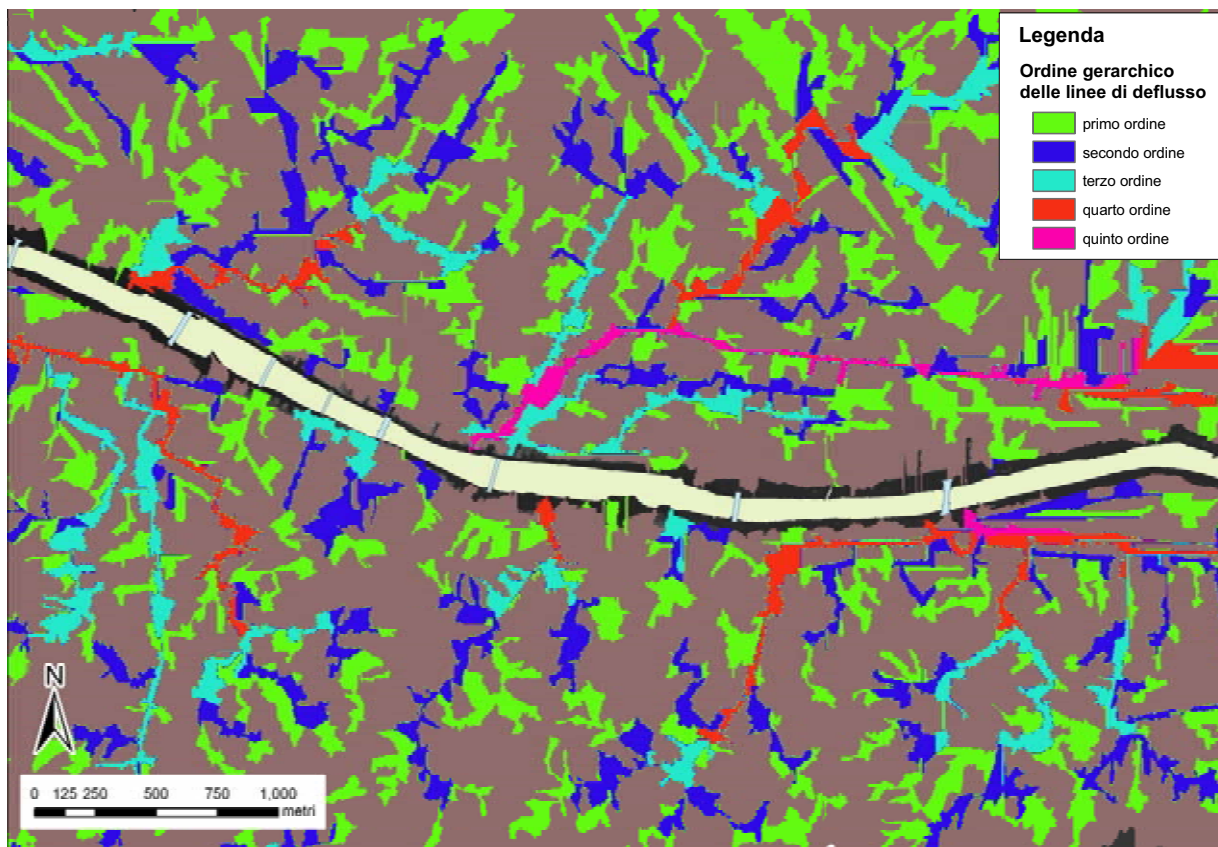


Fig. 6.21 – Ripartizione in ordine gerarchico delle linee di deflusso urbano.



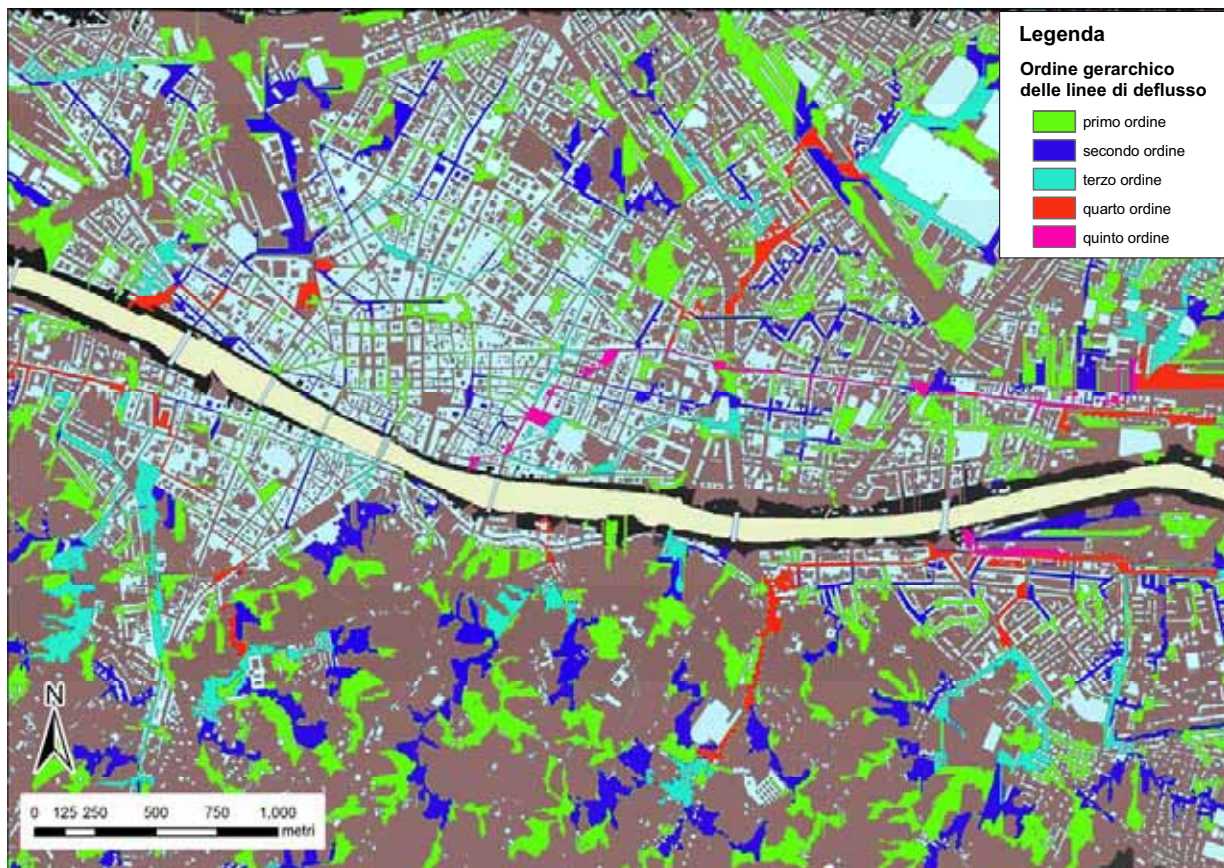


Fig. 6.22 - Ripartizione in ordine gerarchico delle linee di deflusso in relazione al tessuto urbano

#### 6.2.4 FLUSSI IDRICI IN CASO DI SBARRAMENTO DEI PONTI DELL'ARNO

Passiamo adesso ad illustrare i risultati derivanti dall'analisi del reticolo superficiale urbano nel caso che l'Arno rappresenti sempre il collettore principale delle acque di superficie, ma nella situazione in cui in prossimità dei ponti vi si crei improvvisamente uno sbarramento alla normale corrente fluviale. In questa situazione tutte le linee di deflusso appartenenti al reticolo in sinistra idrografica, individuato e descritto nel capitolo precedente, tendono ad indirizzare, com'è ovvio, le proprie acque verso l'Arno in quanto è ancora la zona morfologicamente più bassa. Esso però trovando degli impedimenti in corrispondenza degli attraversamenti è costretto a cedere parte del proprio carico liquido nel bacino adiacente. I flussi in eccesso passano dunque nell'area di pianura in destra idrografica andando a generare un unico grande bacino (Fig. 6.23). Le acque uscenti dalla sezione di chiusura del vecchio bacino di sinistra, trovandosi il ponte sbarrato, tendono a confluire direttamente verso la sponda opposta, mentre in prossimità della sezione di chiusura del vecchio bacino di destra si realizza l'inversione di direzione dei flussi che tendono ad orientarsi verso il centro storico e la stazione di Santa Maria Novella. L'inversione comprende tutto il tratto dallo sbocco in Arno fino a via Borgo alla

Croce. Infine altre zone di rilascio di acqua in sponda destra si vengono a creare in conseguenza dei vari sbarramenti.

Probabilmente l'ipotesi dell'occlusione simultanea di ogni ponte è difficilmente destinata a realizzarsi, mentre è assolutamente ragionevole pensare che si possa concretizzare presso il Ponte Vecchio; numerosi racconti storici confermano che più volte si è verificato un problema simile durante la storia della città (Nencini, 1966) e, come già spiegato, gli interventi strutturali realizzati nel tempo non hanno mai risolto il problema dei deflussi. Pensare soltanto ad un evento del genere non cambia comunque il fatto che l'acqua proveniente dalle aree in sinistra idrografica venga comunque deviata sulla sponda opposta e che tutte le linee di deflusso in quella direzione costituiscano comunque vie preferenziali di fuoriuscita. La differenza sta casomai nel fattore tempo e nella quantità di acqua destinata ad esondare nelle varie zone. In pratica col solo sbarramento presso il Ponte Vecchio si ipotizza che l'acqua fuoriesca prima in prossimità dell'ostacolo e solo se essa continua a giungere copiosa allora si può anche pensare che vengano progressivamente coinvolte anche le altre vie di deflusso. Dunque in questo caso un maggior quantitativo d'acqua si trova a passare nell'area cittadina a monte del ponte Vecchio con un rischio di danno maggiore per il centro storico e le aree limitrofe.

Questa criticità è chiaramente messa in evidenza anche dalla ripartizione in ordine gerarchico delle linee di deflusso (Fig. 6.24). Nell'ipotesi degli sbarramenti vediamo infatti che il tratto di ordine maggiore corrisponde sempre alla linea di scorrimento che proviene da via Aretina fino all'altezza di via Pietrapiana a partire dalla quale i flussi sono costretti a puntare dritti verso il duomo, la stazione ferroviaria di Santa Maria Novella e quindi le Cascine (Fig. 6.25). Nel caso dell'occlusione del solo Ponte Vecchio si può supporre che tale linea di deflusso pieghi nuovamente verso l'Arno a partire dalla stazione centrale con il ricongiungimento al fiume a valle del ponte Amerigo Vespucci. I maggiori tracciati che alimentano la principale via di scorrimento sono sostanzialmente tre. Innanzitutto abbiamo ancora quello proveniente da Campo Marte attraverso il Viale Antonio Gramsci, come nella situazione descritta in caso di condizioni idrodinamiche perfette, poi troviamo quello proveniente dalla ex sezione di chiusura del bacino di sinistra ed infine quello proveniente dalla biblioteca nazionale, che passando per piazza santa Croce si congiunge alla linea di deflusso principale proprio a ridosso del duomo. Quest'ultima sembra essere collegata ad un importante zona di alimentazione situata sulle colline di San Miniato.



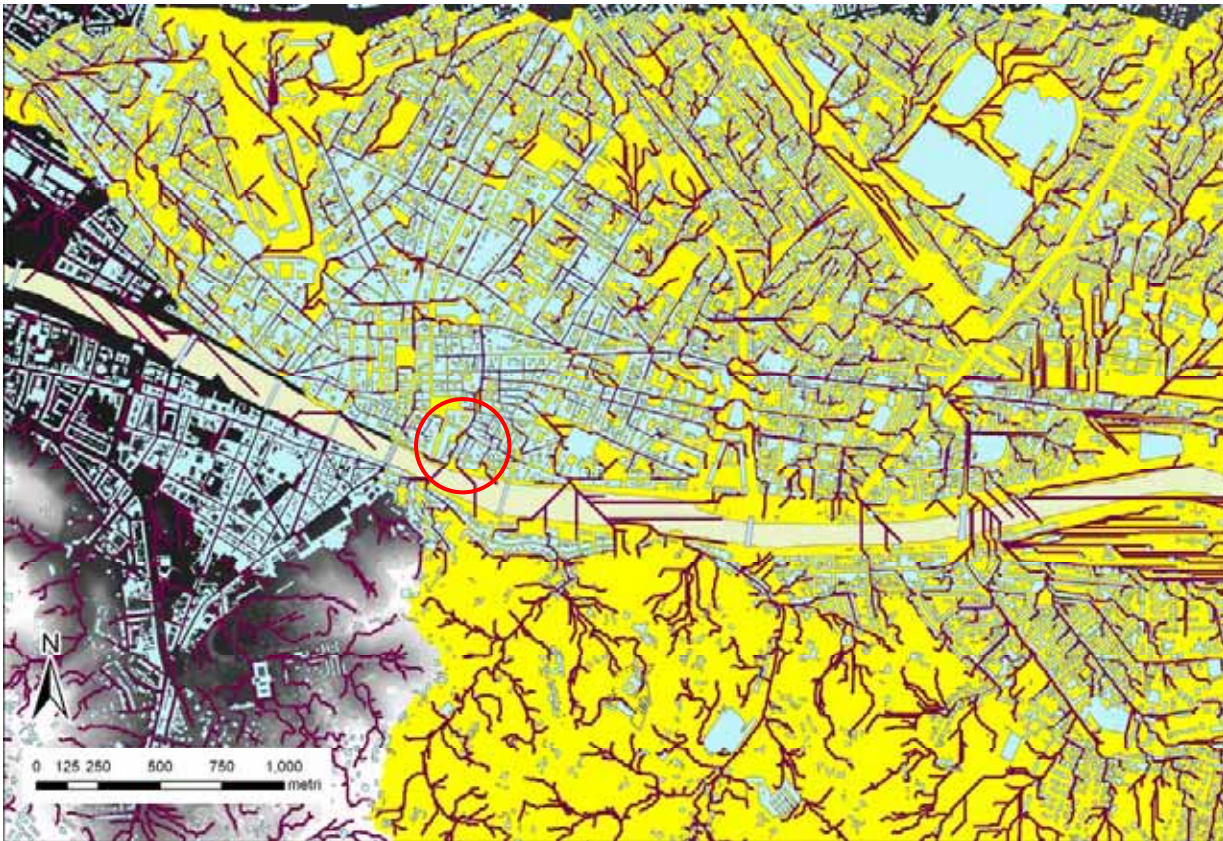


Fig. 6.23 - Distribuzione delle linee di deflusso superficiali a Firenze nel caso di sbarramento dei ponti dell'Arno: nel cerchietto rosso la zona di inversione dei deflussi. In giallo il grande bacino che si forma in conseguenza dello sbarramento.

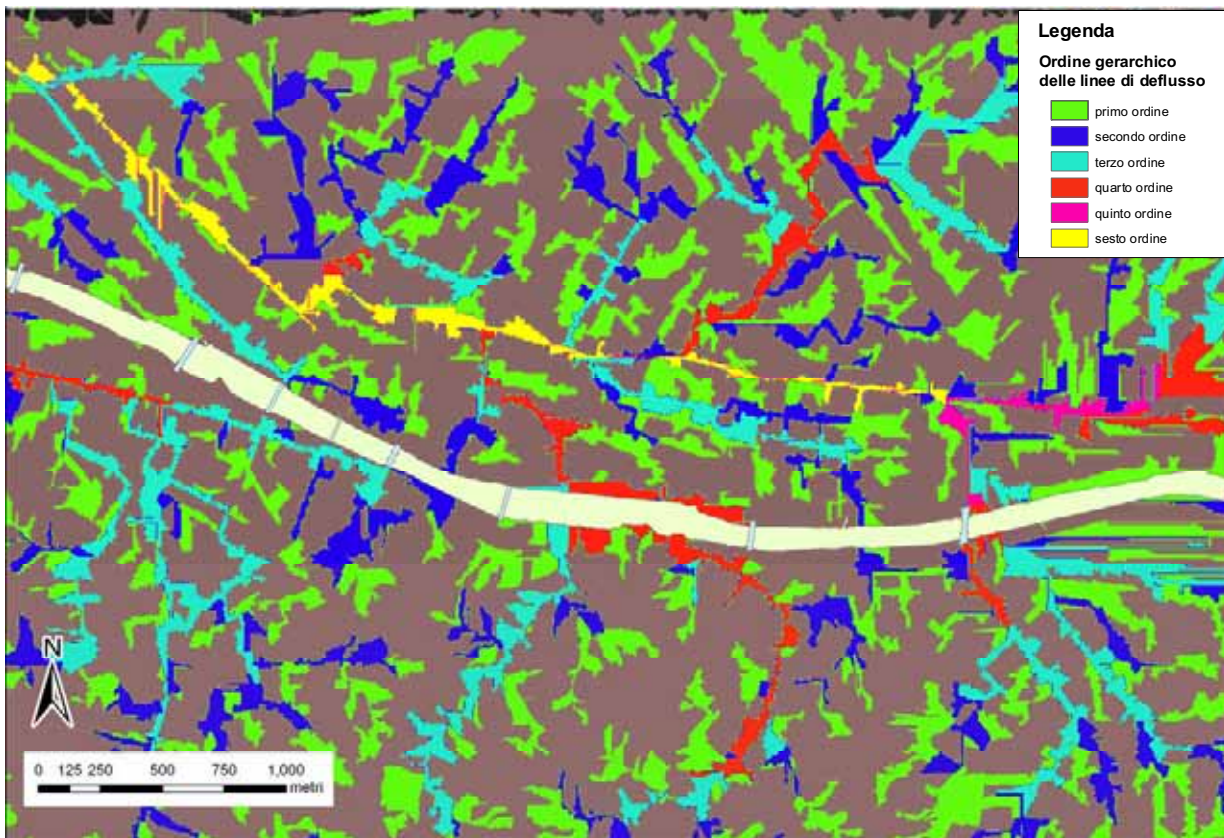


Fig. 6.24 - Ripartizione in ordine gerarchico delle linee di deflusso urbano



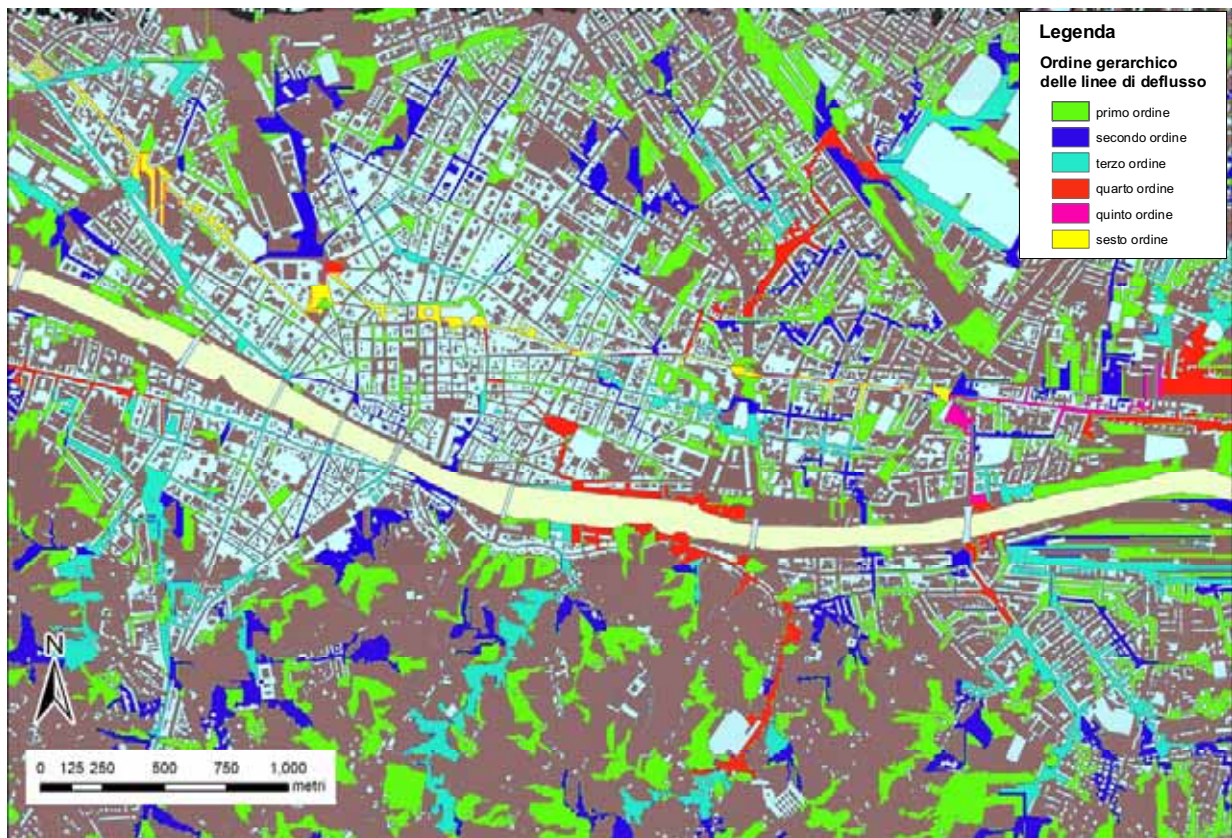


Fig. 6.25 - Ripartizione in ordine gerarchico delle linee di deflusso in relazione al tessuto urbano

### 6.2.5 FLUSSI IDRICI IN CASO DI FUORIUSCITA INDIFFERENZIATA DELL'ARNO

Vediamo adesso cosa accade nelle aree finora analizzate in caso che l'Arno sia talmente gonfio di acqua che sia costretto a cedere in maniera indifferenziata gran parte del proprio carico idraulico. Questa corrisponde all'ipotesi in cui si genera un incontrollato alluvionamento della città con momentaneo ristagno delle acque di esondazione. Per quanto concerne il bacino posto in sinistra idrografica vediamo che da un lato i flussi idrici scendono dalle colline verso l'Arno e dall'altro il fiume stesso spinge le proprie acque a congiungersi con esse. Il risultato è che l'unico spazio pianeggiante (quartiere di Gavinana) costituisce l'area di ricezione di due apporti idrici, tra quali il maggiore risulta senza dubbio quello dell'Arno. Dunque il mancato deflusso verso valle di entrambi i quantitativi di acqua viene a creare un generale alluvionamento delle aree topograficamente meno elevate. Esse corrispondono in pratica all'antico alveo dell'Arno e pertanto le acque di esondazione tendono a rioccupare le naturali aree di espansione del fiume che nel tempo sono state progressivamente ridotte.

La portata dell'evento supposto separa fisicamente il bacino di sinistra da quello di destra (Fig. 6.26). Quest'ultimo avendo a disposizione un area pianeggiante più estesa le acque di

esondazione hanno più possibilità di diffondersi lontano dall'alveo. Le linee di deflusso che esse seguono sono le stesse descritte nel caso dell'ostruzione dei ponti e in questo caso non si verificano mai modifiche sostanziali come sulla sponda opposta. L'estensione del bacino verso valle arriva a comprendere la stazione di Santa Maria Novella e a chiudersi verso il ponte alla Vittoria con una sottile striscia che comprende parte della sponda delle Cascine. Questa estensione corrisponde tra l'altro al caso in cui si realizza lo sbarramento presso il Ponte Vecchio. Anche l'assegnazione delle classi in ordine gerarchico alle linee di deflusso sono praticamente le stesse viste in quel caso (Fig. 6.27); il tratto di principale proveniente da via Aretina punta dritto verso l'area del Duomo passando per piazza Beccaria e ricevendo i deflussi provenienti da campo Marte (Fig. 6.28). In prossimità di piazza Santa Maria Novella esso tende a piegare verso l'Arno accostandosi ad esso a valle di ponte alla Vittoria. Nel bacino in sponda sinistra le linee di maggiori deflusso risultano invece influenzate dalla situazione precedentemente descritta e tendono perciò a costeggiare le aree alluvionate riavvicinandosi all'alveo soltanto in prossimità del lungarno Benvenuto Cellini.

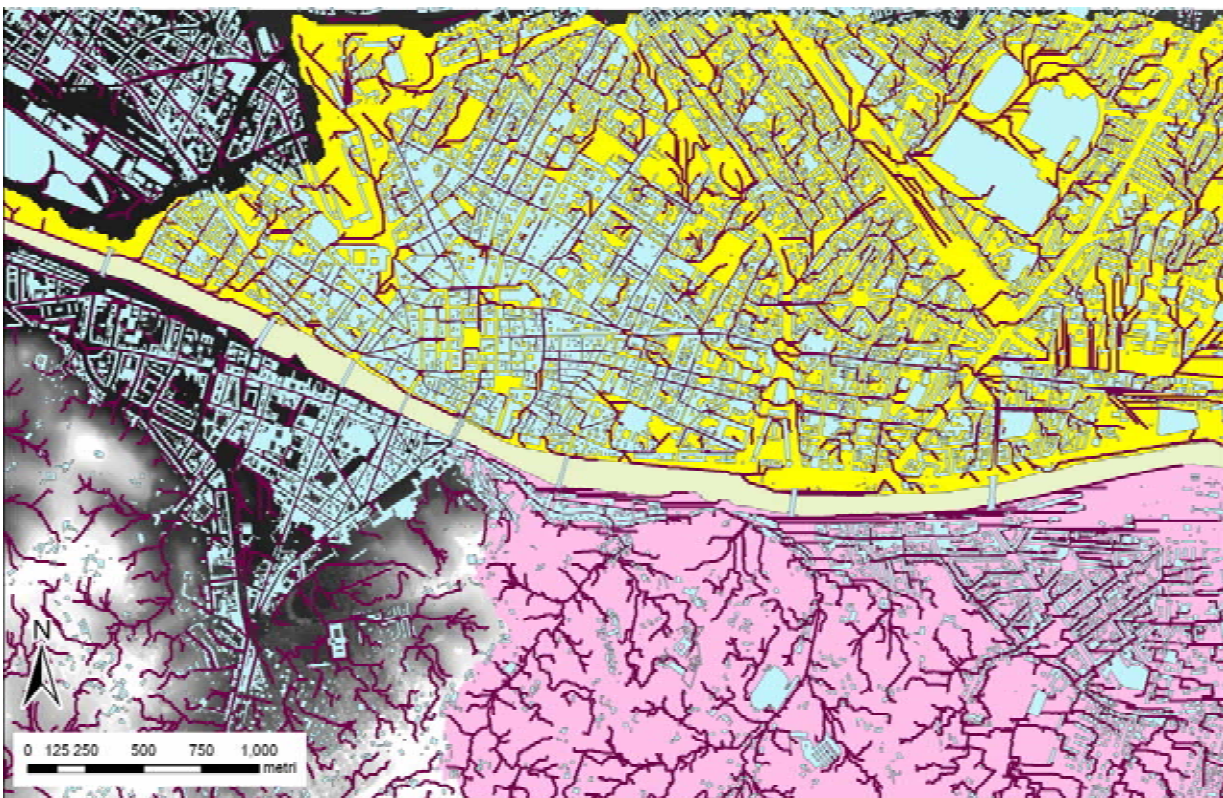


Fig. 6.26 - Distribuzione delle linee di deflusso superficiali a Firenze nel caso di fuoriuscita indifferenziata dell'Arno. In giallo il bacino di destra e in rosa il bacino di sinistra.



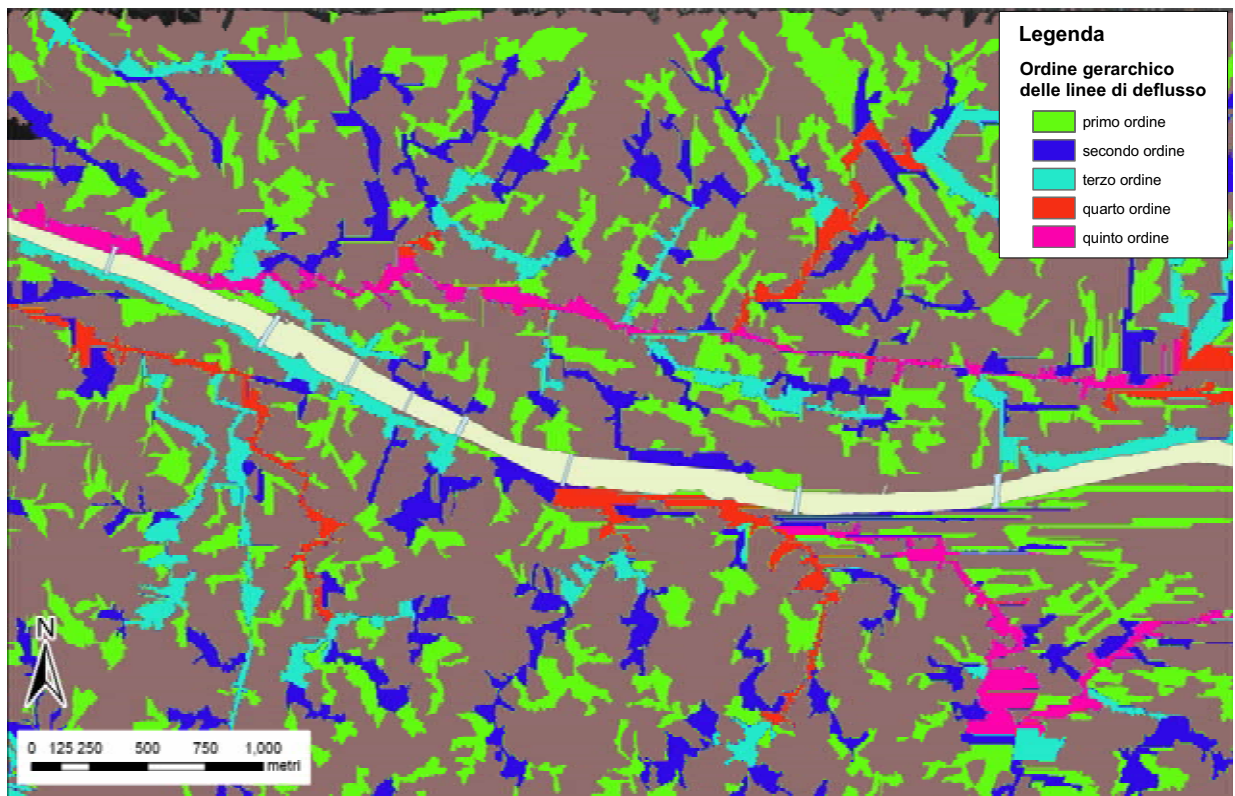


Fig. 6.27 - Ripartizione in ordine gerarchico delle linee di deflusso urbano

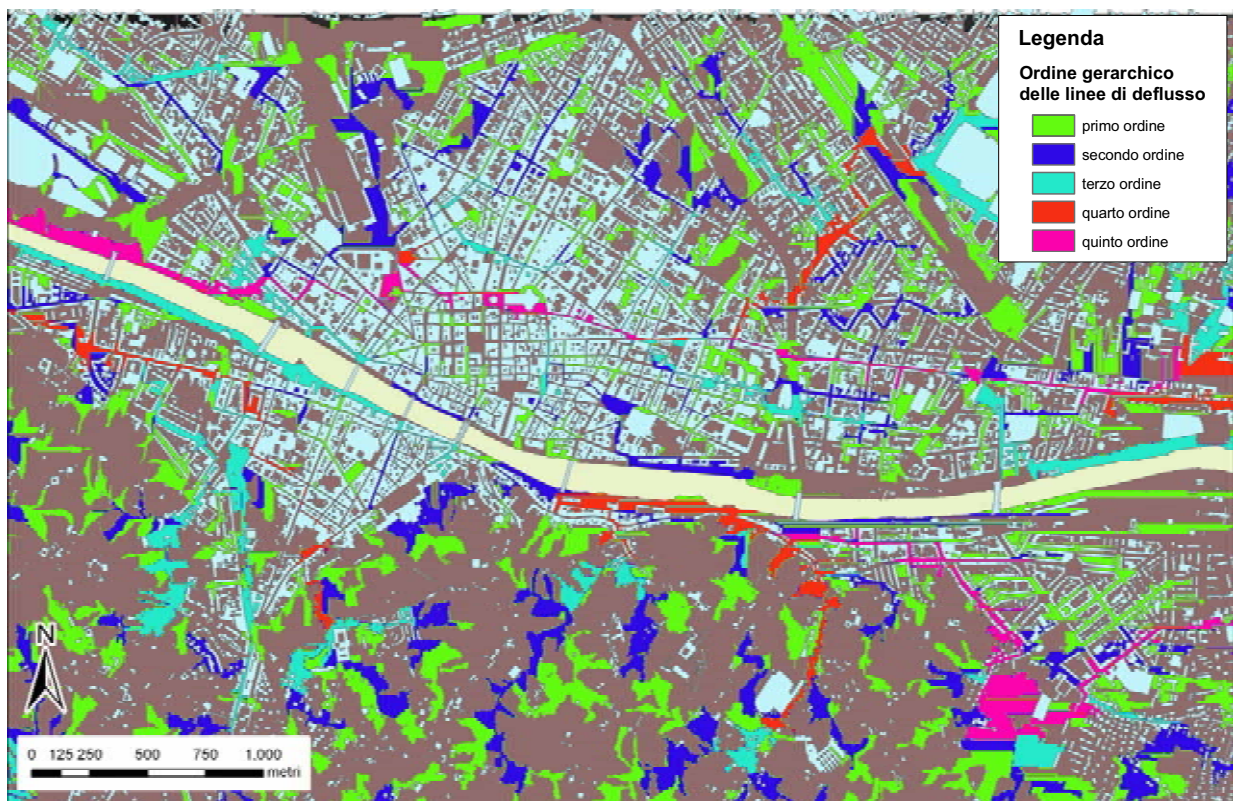


Fig. 6.28 - Ripartizione in ordine gerarchico delle linee di deflusso in relazione al tessuto urbano



## 6.2.6 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Come abbiamo visto le linee di deflusso nella zona urbana di Firenze a monte del ponte Vecchio si modificano al variare delle condizioni idrodinamiche dell'Arno e soprattutto dei deflussi di piena nella sua sezione più critica (Ponte Vecchio). Ciò comporta una variazione sostanziale dei bacini urbani in cui circolano le acque superficiali non recepite dalla fognatura. Tra queste abbiamo anzitutto i flussi di esondazione che costituiscono il maggiore elemento di pericolosità per l'area cittadina prossima al fiume. Il bacino situato in destra idrografica è senza dubbio quello che risente maggiormente di questa evoluzione dinamica dell'Arno. Difatti la nostra analisi dimostra che se in esso si verifica una piena eccezionale senza sbarramento le acque in eccesso dilagano per la città e tendono a rientrare in alveo a monte del Ponte Vecchio. Finché esso permette il passaggio regolare della corrente si salvaguarda dunque tutto il centro storico corrispondente all'antica città romana. Nel caso che le luci del ponte si occludano i deflussi nel tratto terminale non riescono a seguire il normale percorso e si espandono nell'area adiacente che comprende il centro storico e tutte le aree circostanti. La situazione peggiora se a questo evento fa seguito l'intasamento anche degli altri ponti posti più in alto.

L'ipotesi che il tessuto urbano reagisca ad eventi alluvionali nel modo proposto dalla nostra modellazione è tuttavia confermato da numerose testimonianze storiche. Di fatto ogniqualvolta si è verificato a Firenze un alluvionamento le acque hanno seguito il percorso del bacino più piccolo se il Ponte Vecchio non ha fatto da ostacolo alla corrente. Ciò, secondo le cronache, si è verificato ad esempio nel 1589, 1740 e 1844 (Fig. 6.29a). Durante le piene in cui il corso dell'Arno ha invece trovato un ostacolo nel Ponte Vecchio (es. 1133, 1966) l'area di espansione delle acque corrisponde grossomodo al bacino da noi identificato (Fig. 6.29b).

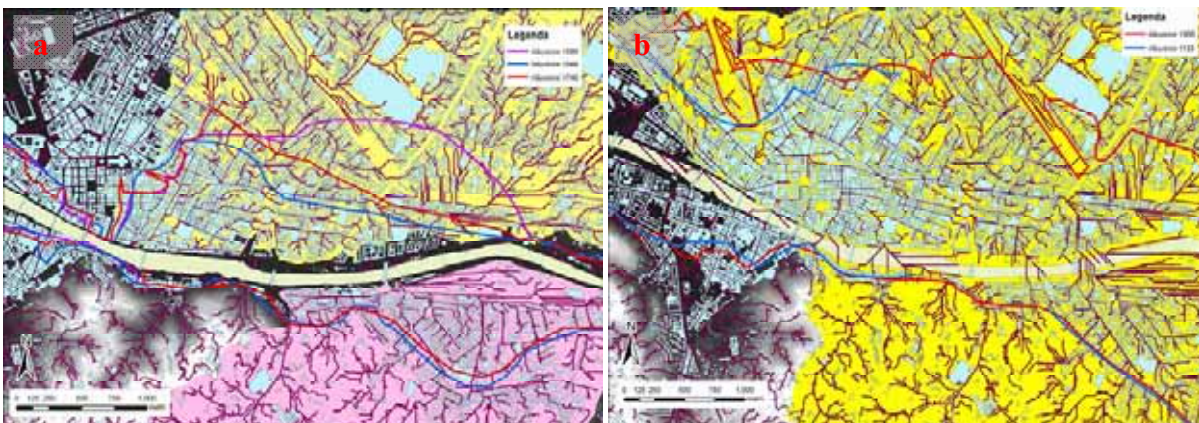


Fig. 6.29 – Estensione delle aree esondate durante alcune alluvioni storiche in relazione ai reticoli idraulici superficiali nelle situazioni dinamiche di normale deflusso dell'Arno e in caso di sbarramento dei ponti a monte di Ponte Vecchio

Troviamo quindi una perfetta corrispondenza tra casi reali del passato e le ipotesi da noi proposte per eventuali situazioni calamitose del prossimo futuro. L'unica differenza con il passato sta nel fatto che le aree residenziali e le infrastrutture annesse sono aumentate, determinando in certi casi l'espansione dell'aree interessate dallo straripamento e un incremento esponenziale del rischio per la popolazione. Infine è opportuno ricordare che nel nostro modello consideriamo la direzione dei flussi in assenza della cittadinanza che con i propri mezzi e soprattutto le proprie azioni possono indurre effetti quanto mai imprevedibili al naturale svolgimento degli eventi alluvionali.

### 6.3 INTEGRAZIONE DELLE CRITICITÀ RILEVATE AI MODELLI PROPOSTI

Per completare la discussione relativa al rischio idraulico nella città di Firenze possiamo integrare le considerazioni relative alle linee di deflusso nei casi proposti con le criticità rilevate nella zona di interesse.

Innanzitutto bisogna considerare che il tratto cittadino risulta arginato a partire dal Ponte di San Niccolò in direzione del centro urbano. Le difese sono costituite da muri diversamente elevati, e quasi mai tali da ostruire la vista al fiume alla popolazione (Fig. 6.30). Due sono gli elementi più critici da considerare in questo settore: la profonda lesione sul muro nella terrazza prospiciente a piazza Poggi (sponda sinistra) e la presenza di una balaustra in pietra al posto della spalletta di fronte alla galleria degli uffizi. Nel primo caso il rischio è connesso ad una rotta arginale che può mettere a repentaglio l'integrità della sottile striscia di pianura compresa tra ponte San Niccolò e Ponte Vecchio. Nel secondo il pericolo è connesso ad una tracimazione inaspettata attraverso i balaustrini con portate inferiori a quelle critiche per il tipo di sito in questione. Le aree impattate da un evento del genere risultano principalmente le quelle prossime al centro storico, corrispondenti alla zona di inversione dei flussi nel passaggio da normale dinamica d'alveo a deviazione dei fluidi per ostruzione del ponte.

Il tratto a monte è invece caratterizzato da solo ciglio di sponda che in riva destra sottende dei piccoli bacini come specificato nel paragrafo 6.2.3 e al contrario in riva sinistra è invece direttamente a contatto con il bacino principale di cui è già stato ampiamente discusso (Fig. 6.30).

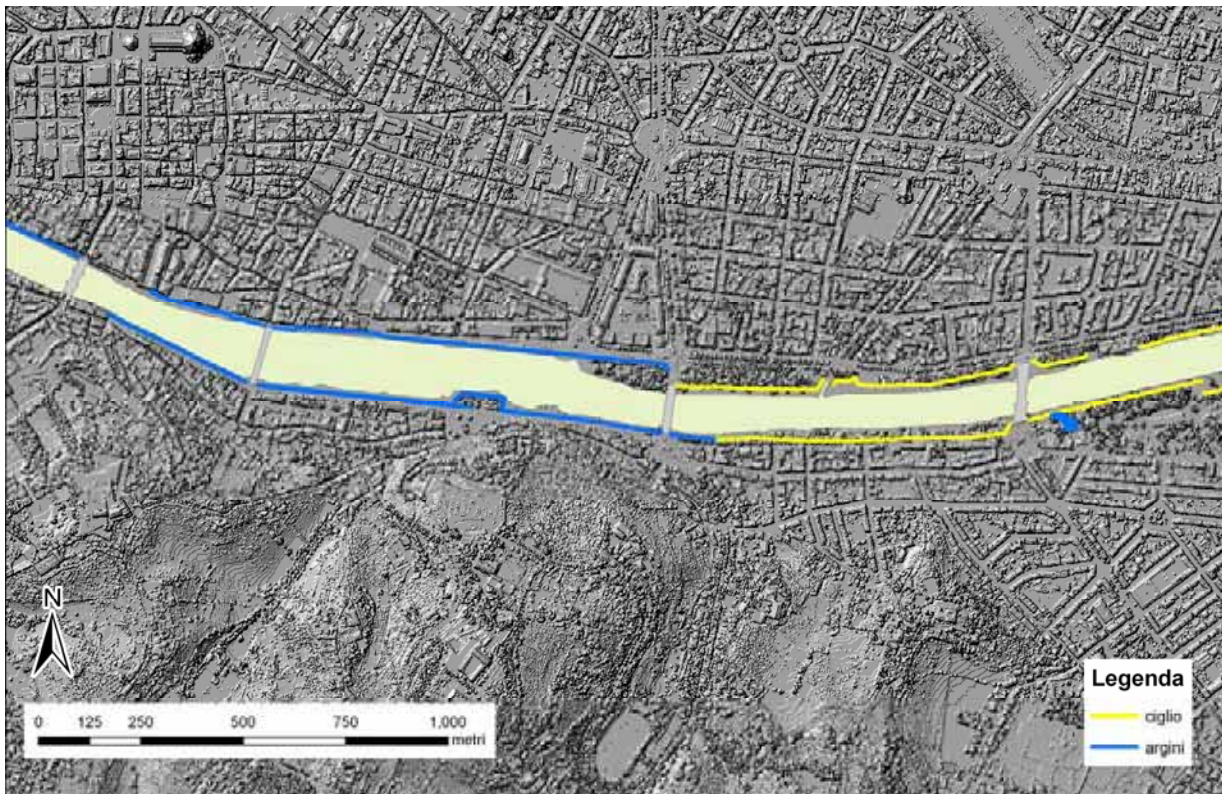


Fig. 6.30 – Sovrapposizione dei principali elementi mappati ad una elaborazione 3D del DSM.

Le criticità finora messe in relazione derivano da osservazioni relative allo stato di conservazione degli elementi mappati; vediamo adesso quale correlazione possiamo individuare tra le linee di deflusso e le aree esondabili nel caso dell'Arno completamente ricevente e dell'Arno con ponti occlusi.

Nel caso che l'Arno mantenga le proprie funzionalità idrodinamiche (Fig. 6.31) vediamo che l'argine inizia ad essere esondabile a partire da eventi che hanno un tempo di ritorno di 100 anni. Quest'area si trova in sponda destra a monte di Ponte alle Grazie e pertanto i fluidi di tracimazione sono destinati a volgere quasi subito verso l'Arno come suggerito dal reticolo dei deflussi. La situazione peggiora per T200 poiché si presentano argini a rischio sormonto anche a valle di Ponte alle Grazie. Ciò si realizza in prossimità della chiusura di sezione del bacino di destra e pertanto l'eventuale fuoriuscita di acqua in quel settore potrebbe creare dei problemi piuttosto grossi. Innanzitutto si ostacolerebbe l'immissione in Arno dei fluidi in circolazione nel bacino, poi, se l'evento continuasse, si potrebbe verificare un ristagno momentaneo di acqua fino a giungere ad una vera e propria inversione dei flussi con allargamento progressivo del bacino verso ovest. Nell'ipotesi di un tale evento assisteremmo ad una inondazione della zona ritenuta sicura ancor prima di un eventuale sbarramento della corrente dell'Arno. Ad ogni modo le quote raggiunte dal massimo di livello di piena non sono molto più basse di quelle delle spallette del Ponte Vecchio e quindi non è da escludere che al persistere dell'evento

sopravvenga anche un'occlusione, se pure parziale, della sezione idraulica. In caso di piena con tempi di ritorno di 500 anni le aree a rischio tracimazione aumentano in sponda destra, principalmente in direzione della pescaia di san Niccolò, ma soprattutto si presenta come rischiosa una lunga fascia sulla riva opposta presso la quale si trova anche la profonda lesione arginale di cui è stato accennato precedentemente. Per quanto riguarda il settore dotato di solo ciglio di sponda abbiamo tutta una serie di punti con probabilità di straripamento che per la loro posizione geomorfologica non determinano particolari situazioni critiche per eventi associabili a tempi di ritorno moderati (T30, T100). La situazione diventa più sfavorevole per esondazioni associate a portate maggiori (T200 e T500) poiché si presenta un forte rischio laddove l'urbanizzazione si è spinta a ridosso dell'alveo (lungarno Ferrucci in sponda sinistra e piccoli tratti in sponda destra) ed in particolare nel punto in cui il torrente Africo si immette in Arno. Questo corso d'acqua tributario è praticamente interrato e la forza della corrente di piena potrebbe arrivare a generare un incontrollato rigurgito con ripercussioni anche sul sistema fognario. Tutti gli altri sbocchi minori non dotati di portelli protettivi potrebbero inoltre subire la stessa sorte.

Per concludere nel caso che l'Arno presenti l'occlusione dei ponti (Fig. 6.32) vediamo che le aree tracimabili sia relative all'argine che al ciglio di sponda alimentano il grande bacino che si viene a specificare in questo frangente. Le aree di tracimazione arginale in sponda destra che progressivamente si delineano al crescere della tipologia dell'evento sono posizionate in modo tale da alimentare una delle principali linee di deflusso; quella che una volta ricevute le acque provenienti dalle colline di san Miniato inizia in prossimità della Biblioteca Nazionale e passando per piazza Santa Croce si congiunge alla linea di deflusso principale in prossimità del duomo. Anche le aree di tracimazione relative al ciglio in sponda destra contribuiscono, a partire da eventi centennali, ad alimentare un'altra importante linea di deflusso. Essa parte dal ponte Giovanni da Verrazzano e si congiunge al tracciato principale (via Aretina) dopo un breve tratto rettilineo. Infine, in tutte le aree tracimabili poste in sinistra idrografica i sormonti risultano attenuati dai flussi che quella parte del bacino scarica verso di essi in direzione della sponda opposta. Per quanto riguarda invece gli scarichi, allo stesso modo del caso dell'Arno ricevente, quelli non dotati di adeguata protezione sono destinati a subire importanti effetti di rigurgito, così come il tombamento del torrente Affrico.



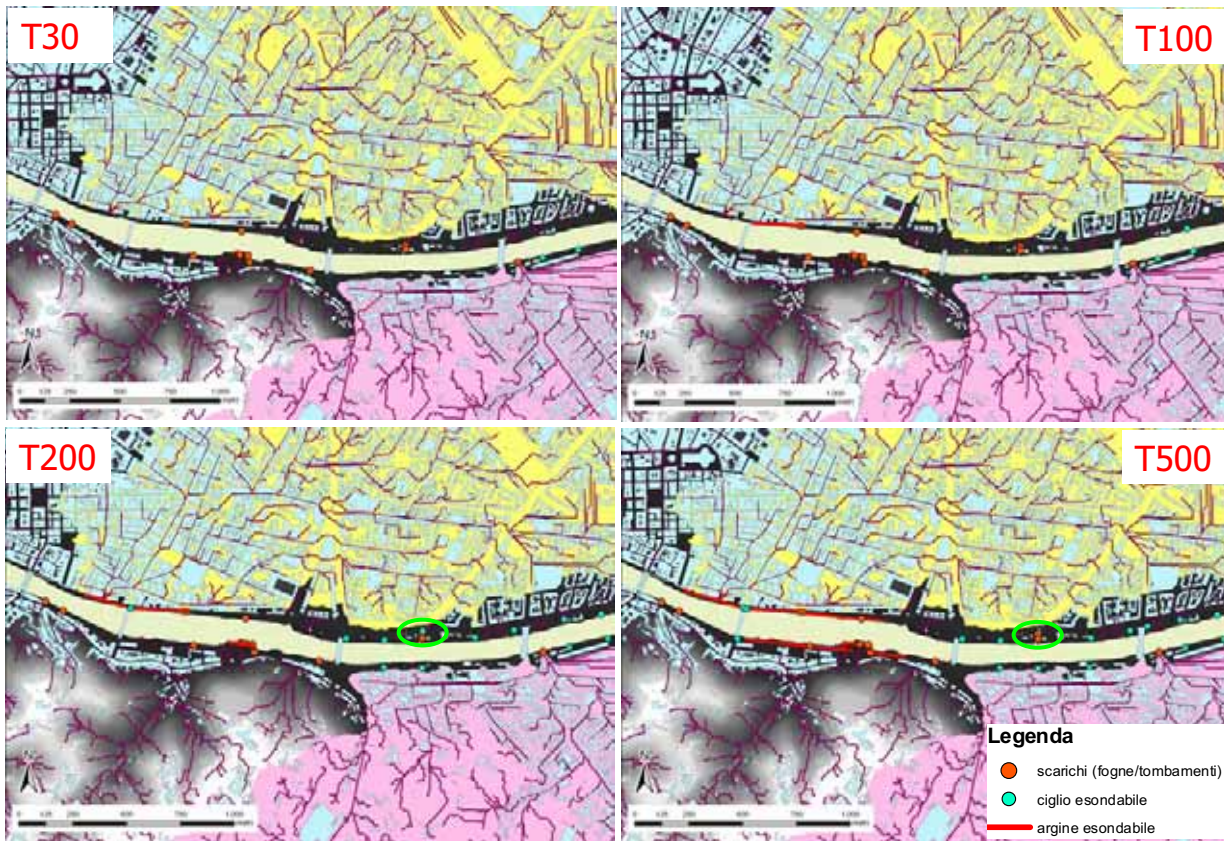


Fig. 6.31 - Sovrapposizione delle aree a rischio tracimazione nei vari tempi di ritorno e degli elementi di criticità, quali gli scarichi, al reticolo idraulico superficiale in caso che l'Arno defluisca normalmente verso valle.

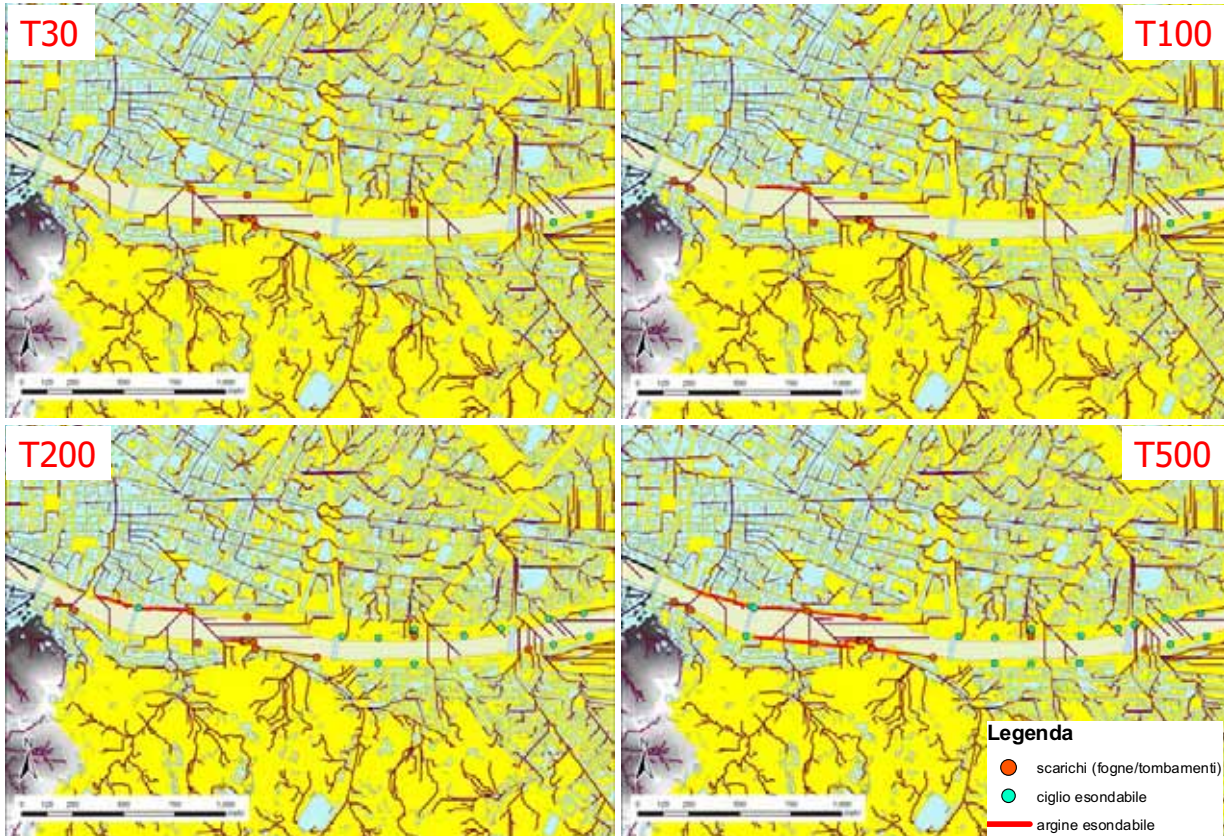


Fig. 6.32 - Sovrapposizione delle aree a rischio tracimazione nei vari tempi di ritorno e degli elementi di criticità, quali gli scarichi, al reticolo idraulico superficiale in caso che il deflusso dell'Arno sia ostacolato dall'ostruzione dei ponti.



## 7 APPLICAZIONE DEI DATI ALLA VERIFICA DI STABILITÀ ARGINALE

### 7.1. INTRODUZIONE

Alcune informazioni relative al rilievo di dettaglio effettuato in questa tesi è stato impiegato per avviare anche uno studio di stabilità degli argini in terra in un'area pilota del Valdarno Superiore. In particolare il tratto arginale preso in considerazione corrisponde al rilevato, in sponda sinistra, compreso fra il comune di Figline V.no e il confine tra la Provincia di Firenze e la Provincia di Arezzo, per una lunghezza complessiva di 5,5 km (Fig. 7.1).

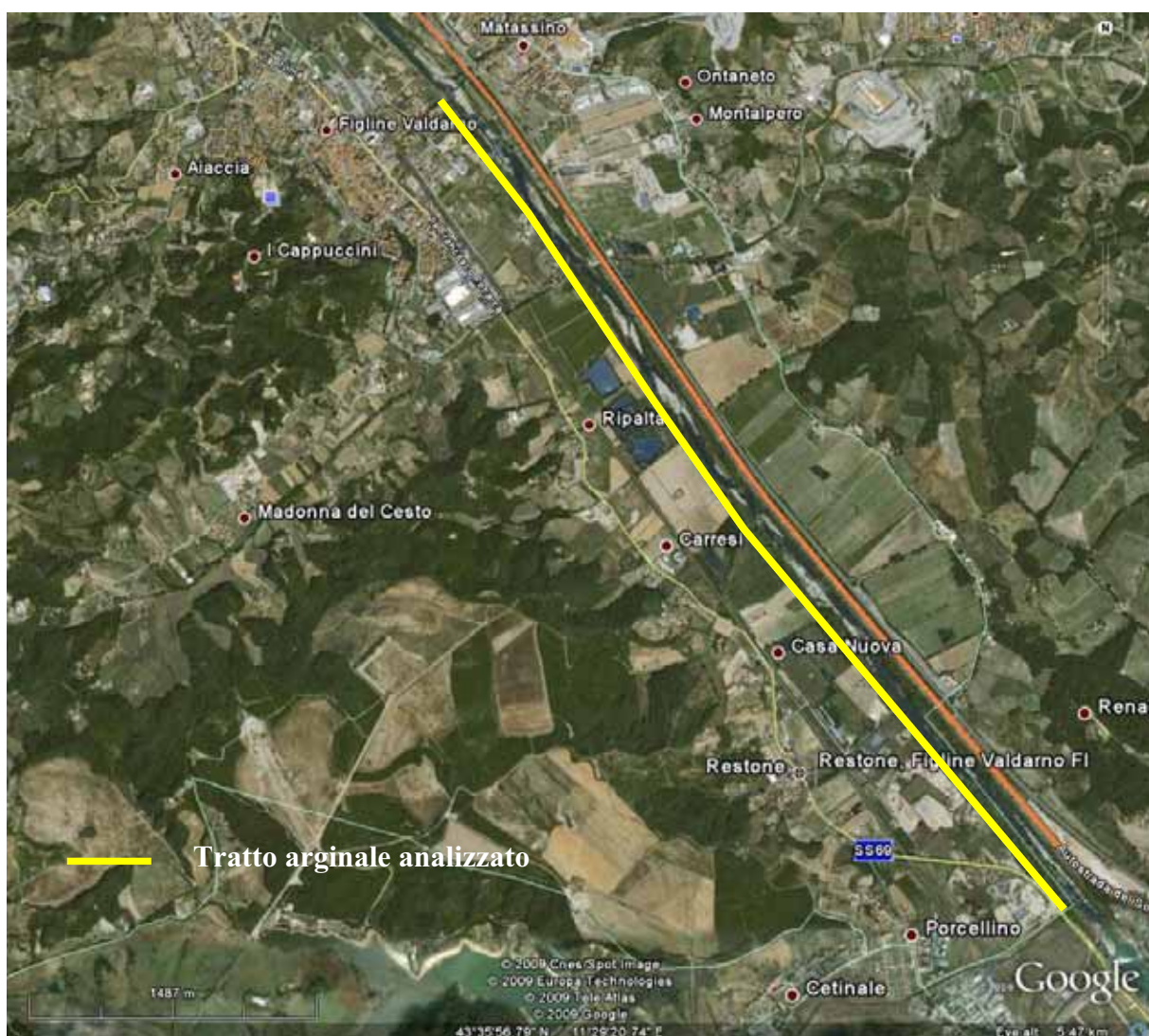


Fig. 7.1 - Area di indagine (Google©)

Lo scopo dell'analisi effettuata in questo lavoro è quello di proporre una metodologia ed un criterio per una migliore e più realistica valutazione del rischio idraulico (esondazioni dell'Arno) in seguito al verificarsi di particolari scenari critici, considerando gli argini quali

opere più o meno stabili in relazione alle modalità di costruzione e al materiale che li costituisce. Tale tipo di problema, spesso, non viene trattato con la dovuta importanza e di fatto tutti i piani di emergenza relativi al rischio di esondazione dell'Arno postulano che gli argini mantengano pienamente la loro integrità e la loro funzionalità in qualsiasi condizione (ADB Arno, 2002). Le situazioni più critiche, invece, si verificano proprio quando le opere di difesa cedono e questa eventualità, per quanto riguarda gli argini, può verificarsi a seguito di diversi meccanismi (Marzolo, 1989) (Fig. 7.2):

- **Sormonto** (tracimazione causata dall'altezza insufficiente dell'opera di contenimento ed evitabile costruendo presso il ciglio un piccolo argine in terra battuta o disponendovi adeguatamente sacchi di terra. La tracimazione avvia un processo erosivo e di asporto del materiale terroso di cui è composto l'argine stesso);
- **Sfiancamento** (cedimento dovuto a troppa imbibizione per perdurare di piene o piogge intense che portano a una diminuzione dell'attrito delle terre);
- **Corrosione** (processo di erosione del petto che compromette la tenuta strutturale dell'argine alla spinta dell'acqua. Ciò può portare ad instabilità anche dopo il ritiro di una piena);
- **Filtrazione** (l'acqua filtra all'interno dei cunicoli dell'argine causati da gallerie animali, vegetali o di altra natura. In essi i fluidi circolanti producono l'asporto del materiale terroso con complessivo indebolimento dell'argine sino al suo franamento. Quando tali fenomeni erosivi si verificano nascono dei fontanazzi a poca distanza dal piede esterno che in fase di piena divengono vere e proprie condotte d'acqua.

Ognuno dei dissesti descritti, evolvendosi e aggravandosi, può generare la rotta dell'argine con conseguenze anche gravissime.

Di conseguenza, una seria e realistica trattazione del rischio idraulico deve includere anche un'analisi di stabilità degli argini, che deve essere basata su un'adeguata caratterizzazione geotecnica degli stessi e da un'efficace modellizzazione delle condizioni al contorno presupposte in base agli scenari di rischio attesi.

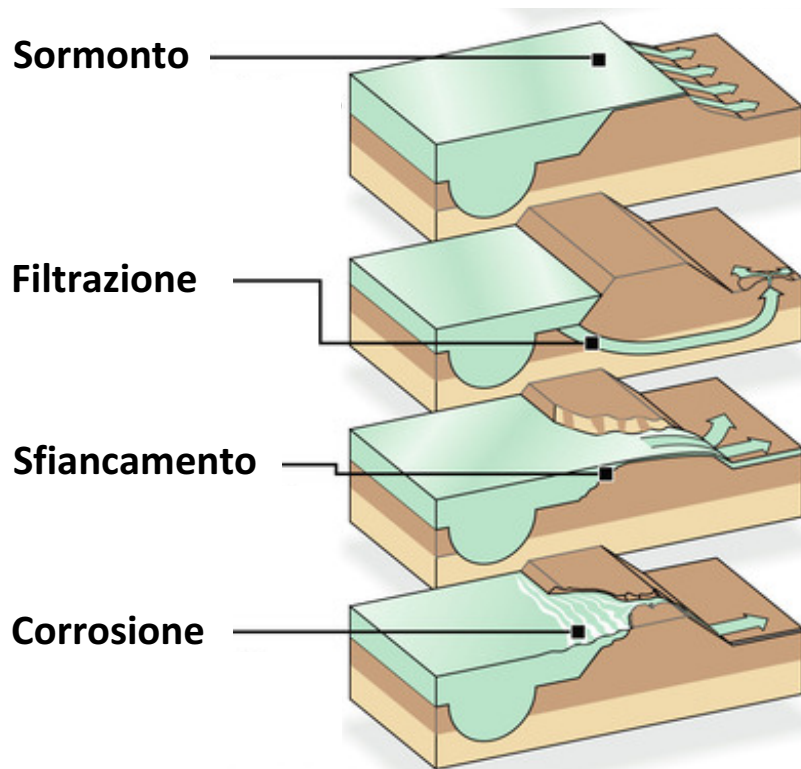


Fig. 7.2 – Meccanismi di rottura arginale (U.S. Geological Survey 2008 modificato)

## 7.2 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEGLI ARGINI

Al fine di effettuare una corretta e realistica analisi di stabilità degli argini dell'Arno, è necessario innanzitutto caratterizzare i materiali di cui sono composti tali opere idrauliche, con lo scopo di impostare correttamente un modello in base agli scenari di rischio ipotizzati.

Visto che non è stato possibile reperire alcuna informazione sulle modalità costruttive e tantomeno sulle proprietà dei terreni utilizzati per la realizzazione dei rilevati arginali nell'area d'indagine, per determinare le principali caratteristiche geotecniche sono state effettuate prove in laboratorio (analisi granulometriche e determinazione dei rapporti tra le fasi e dei limiti di Atterberg) e prove in situ (Borehole Shear Test, misure tensiometriche e Amoozemeter test). Queste ultime sono state realizzate attraverso l'utilizzo di strumentazione tecnica mobile solo per il tempo necessario alla acquisizione dei dati (poche ore) arrecando il minor disturbo possibile al rilevato arginale (Fig. 7.3).

Poiché la tecnica solitamente utilizzata per la costruzione degli argini segue le *norme geotecniche* (DM LL PP 11-3-1988) e quelle sulle dighe in materiali sciolti (DM LLPP 24-3-1982), che prevedono l'utilizzo di materiali diversi disposti secondo particolari geometrie (AAVV, 2003), il corpo arginale è stato ritenuto eterogeneo ed anisotropo e quindi esaminato



di conseguenza. L'indagine ha interessato dunque il materiale presente all'interno dell'argine a varie profondità dal coronamento ed in prossimità sia del ciglio interno che del ciglio esterno. Tutte le prove hanno riguardato vari punti dell'argine accuratamente distanziati l'uno dall'altro; in particolare, in un primo sito sia sulla parte esterna che sulla parte interna della corona dell'argine (Fig. 7.4a) e in un secondo sito, distanziato dal primo di circa 1 km, solo sulla parte interna della corona (Fig. 7.4b).



Fig. 7.3 Indagini geologiche in situ

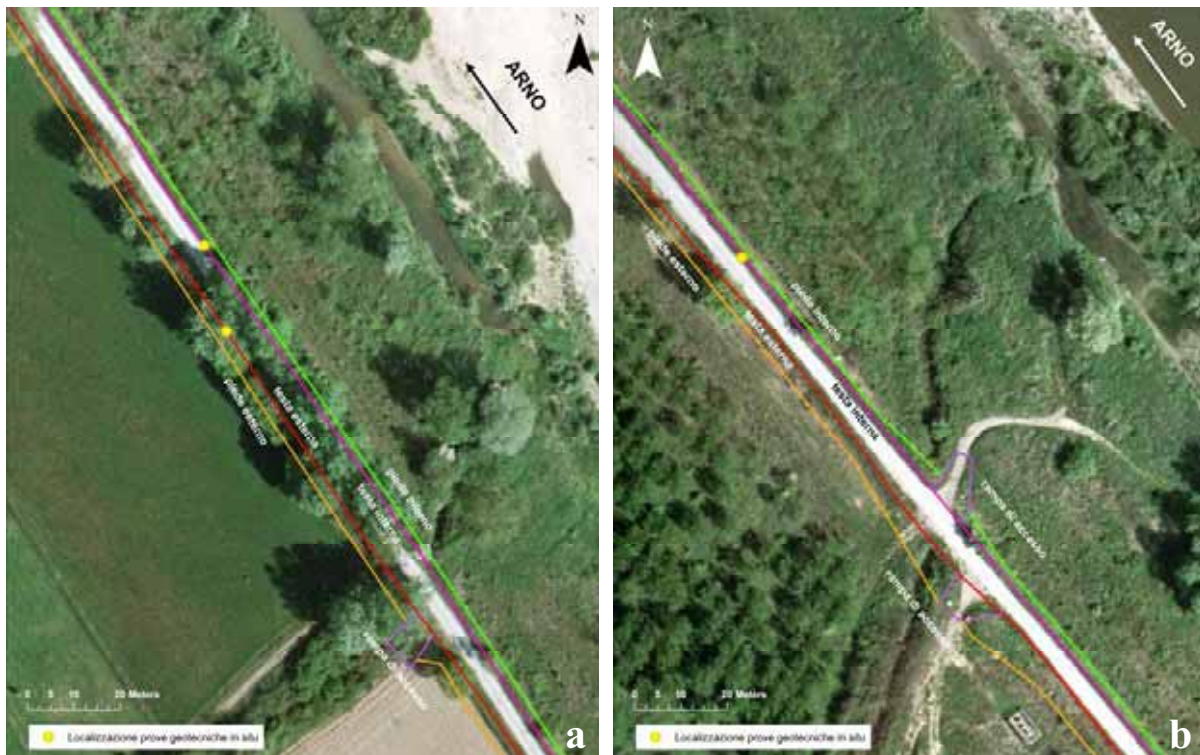


Fig. 7.4 - Localizzazione delle prove geotecniche (a, b)

### 7.2.1 ANALISI GRANULOMETRICA

L'analisi granulometrica è stata effettuata su campioni estratti a una profondità variabile tra gli 0,3 m e gli 0,7 m dalla sommità dell'argine (Fig. 7.5). La procedura utilizzata è costituita dalla vagliatura per mezzo di una serie di setacci sovrapposti e di apertura progressivamente decrescente in modo tale da separare i granuli di dimensioni diverse. In questo caso la preparazione dei campioni è avvenuta con il lavaggio dei materiali sotto un getto continuo di acqua (preparazione per via umida). Inoltre, siccome il passante al setaccio 200 costituiva circa il 50% del campione, la distribuzione granulometrica della porzione di terreno con diametro inferiore a 0,075 mm è stata determinata mediante metodi indiretti basati sui tempi di sedimentazione delle particelle in acqua distillata (metodo del densimetro) (Raviolo, 1993).

In riferimento agli intervalli fra le classi granulometriche risulta quindi che la percentuale media di ghiaia (GF) è dell'1,2%, quella di sabbia (SF) è del 52%, quella di limo (MF) è del 44%, mentre quella di argilla (CF) è del 2,9%. Secondo comunque le singole percentuali di ogni terreno analizzato, tutti quanti i materiali sono classificabili come "sabbie con limo". Infine dalle curve granulometriche (Fig. 7.6) sono stati desunti anche i coefficienti di uniformità (U) (Fabbri *et al.*, 2007), che in media risulta di 9,2.



Fig. 7.5 - Esecuzione del foro e campionamento di terreno in argine.

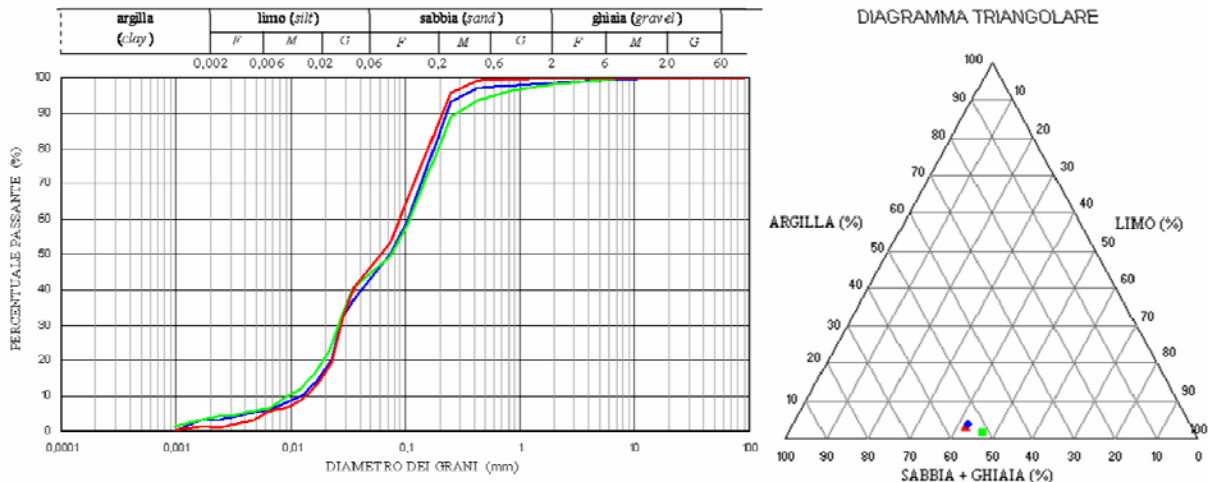


Fig. 7.6 - Sovrapposizione dei risultati delle prove granulometriche ottenute tramite prove di setacciatura e di sedimentazione. Ogni colore corrisponde ad un campione diverso (rosso campione 1, blu campione 2, verde campione 3).

Alla luce dei risultati ottenuti si nota come, nonostante le tre analisi siano state effettuate in punti diversi, la composizione granulometrica media sia abbastanza simile in tutti i campioni. Da ciò si può quindi ricavare che gli argini nella zona di Figline in sponda sinistra, siano indicativamente costituiti da materiale omogeneo e che tale composizione sia estendibile all'intero tratto.

### 7.2.2 ANALISI DEI RAPPORTI TRA LE FASI E LIMITI DI ATTERBERG

Attraverso la raccolta di ulteriori campioni, stavolta indisturbati, e apposite misurazioni in laboratorio è stato possibile determinare il peso di volume. Il campionamento è avvenuto ad una profondità di circa 0,5 m all'interno del corpo arginale attraverso l'utilizzo di fustelle metalliche cilindriche lunghe 5 cm e con un diametro di circa 5 cm. Il peso di volume totale ( $\gamma$ ) medio risulta di  $13,17 \text{ g/cm}^3$ , il peso di volume del terreno secco ( $\gamma_d$ ) è mediamente di  $12,33 \text{ g/cm}^3$ , mentre il peso di volume del terreno saturo ( $\gamma_{\text{sat}}$ ) è di  $17,53 \text{ g/cm}^3$ . Assegnando poi al peso specifico dei grani (Gs) il valore di 2,67, tipico di un sedimento sabbioso (Lancellotta, 1993), è stato possibile calcolare l'indice dei vuoti ( $e_0$ ) e la porosità ( $n$ ) del materiale. Il primo risulta avere un valore medio di 1,13 mentre il secondo ha una porosità media di 52,9%.

I limiti di Atterberg sono stati invece definiti sulla porzione granulometrica inferiore a 0.425 mm (passante al setaccio n.40) selezionando un campione sufficientemente rappresentativo del terreno in esame (circa 250 gr). Il limite plastico (PL) è stato determinato misurando il contenuto d'acqua in corrispondenza del quale alcuni bastoncini di terreno, formati



manualmente su una lastra porosa fino ad avere un diametro di tre millimetri, iniziano a fessurarsi. Il limite liquido (LL) è stato determinato invece con il metodo del cono penetrometrico (Raviolo, 1993). Due campioni ricadono nel campo delle argille inorganiche di bassa plasticità mentre il terzo rientra nel campo della sabbia argillosa. Le differenze nei valori del limite liquido e nell'indice di plasticità dei tre campioni, risultano comunque sempre molto lievi (Fig. 7.7).

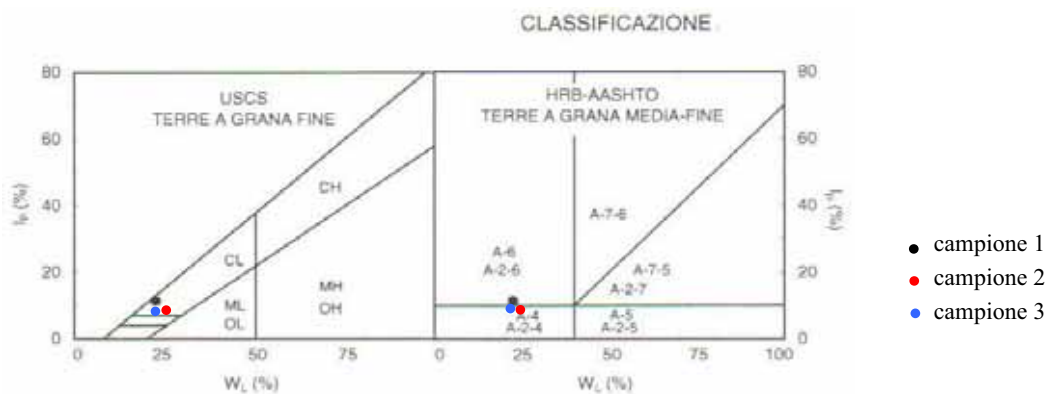


Fig. 7.7 - Classificazione risultante delle analisi sui limiti di Atterberg.

### 7.2.3 DETERMINAZIONE DELLE MISURE TENSIOMETRICHE

Il tensiometro (Fig. 7.8) è lo strumento usato per misurare direttamente la pressione interstiziale del terreno. Poiché la suzione è data dalla differenza tra pressione atmosferica, che per convenzione assunta pari a zero, e pressione interstiziale misurata in pratica il lettore di tale strumento visualizza direttamente i valori di suzione. Ogni prova con il Borehole Shear Test è associata a una misura di suzione effettuata con il tensiometro.

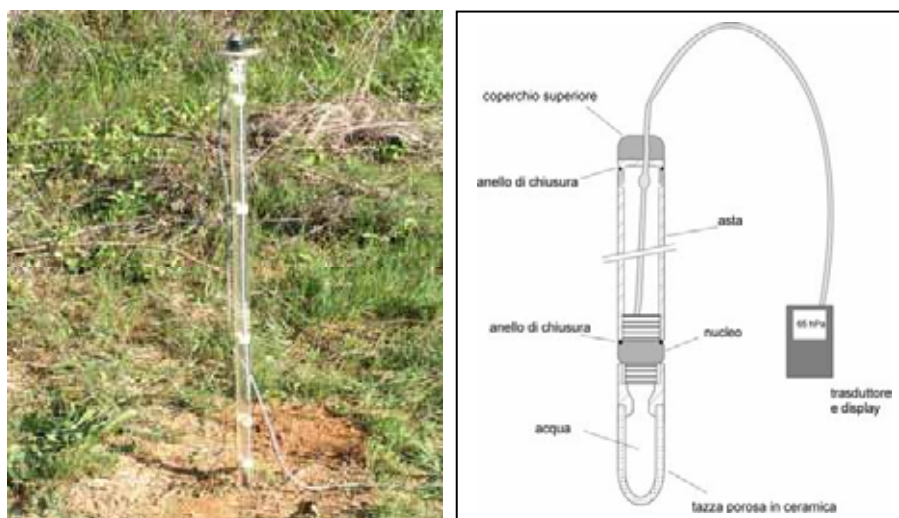


Fig. 7.8 - Tensiometro (a) e schema dell'apparecchiatura (b). (Dapporto *et al.*, 2000)



### 7.2.3.1 LA SUZIONE

La suzione totale è definita come lo stato d'energia libera dell'acqua nel suolo (Fredlund & Rahardjo, 1993). Essa è legata alla pressione parziale di vapore dell'acqua nei pori del terreno ( $u_v$ ) e quindi all'umidità relativa  $u_v/u_{v0}$ , dove  $u_{v0}$  rappresenta la pressione di vapore acqueo a saturazione sopra una superficie piana di acqua pura. Nei suoli al di sopra della tavola d'acqua (zona di risalita capillare) la pressione neutra ( $u_w$ ) ha valori negativi, in quanto inferiore alla pressione atmosferica ( $u_a$ ) uguale a zero. In queste condizioni, la superficie dell'acqua forma un cosiddetto menisco tra i granuli del terreno, con una pressione parziale di vapore sopra questa superficie curva, inferiore a quella che si avrebbe se la superficie fosse piana. La diminuzione di pressione di vapore e, quindi, di umidità relativa, è proporzionale alla diminuzione del raggio di curvatura del menisco, che a sua volta, è legato al valore della quantità ( $u_a - u_w$ ), detta suzione di matrice, dalla relazione:

$$(u_a - u_w) = 2T_s/R_s \text{ (Fredlund \& Rahardjo, 1993)}$$

dove  $T_s$  è la tensione superficiale dell'acqua e  $R_s$  è il raggio di curvatura del menisco.

La suzione di matrice, determinando una riduzione di  $R_s$ , provoca anche una diminuzione della pressione di vapore ed è perciò una componente della suzione totale.

L'altra componente, denominata suzione osmotica ( $\pi$ ), è data dalla diminuzione di umidità relativa che si ha con l'aumento della concentrazione salina nell'acqua del suolo.

Pertanto la suzione totale ( $\Psi$ ) è espressa come somma della suzione di matrice e della suzione osmotica:

$$\Psi = (u_a - u_w) + \pi$$

Il valore della suzione osmotica resta più o meno costante al variare del contenuto d'acqua (Fredlund & Rahardjo, 1993), quindi la variazione di suzione totale è assimilabile alla variazione di suzione di matrice e, in molti problemi geotecnici, i due termini si possono considerare equivalenti.

### 7.2.3.2 DESCRIZIONE DELLO STRUMENTO E DELLA PROVA

Il tensiometro usato per questo lavoro è dotato di una tazza porosa, collegata ad un sistema per la misura della pressione neutra rappresentato da un trasduttore di pressione (Anderson & Kneale, 1987). Tale strumento, in particolare, è costituito da una tazza porosa in ceramica contenente acqua distillata e disaerata, un nucleo con all'interno il trasduttore di pressione e

un'asta di plastica lunga 2 metri; la lettura della pressione si effettua tramite un lettore, che si collega al cavo in uscita dal tensiometro (Fig. 7.8b). L'esecuzione della prova inizia con la perforazione del terreno tramite un'apposita trivella manuale ottenendo un diametro del foro uguale al diametro del tensiometro (2,5 cm). Una volta raggiunta la profondità voluta, si è inserisce lo strumento. La tazza porosa, perfettamente a contatto col terreno, agisce da interfaccia tra l'umidità relativa del suolo e l'acqua che contiene all'interno.

Essendo satura, la tensione superficiale dell'acqua impedisce l'ingresso dell'aria, consentendo così la diminuzione della pressione neutra all'interno della tazza o, in altre parole, l'aumento della tensione, che si andrà ad equilibrare al valore della tensione nel terreno. Nel trasduttore di pressione vi è un chip di silicio, sensibile alla variazione di pressione, che si deforma modificando la sua resistenza specifica. Il valore della tensione viene convertito in impulso elettrico e il segnale arriva infine al display, munito di un trasduttore che converte a sua volta l'unità elettrica in unità di pressione.

Al termine della prova, dopo aver estratto il tensiometro dal terreno, la tazza porosa viene coperta con un apposito cappuccio di plastica parzialmente riempito di acqua distillata e disaerata, che satura lo strumento e lo mantiene ad una pressione prossima agli 0 hPa.

La pressione massima tollerata dal trasduttore del tensiometro è di  $\pm 3000$  hPa ma in ogni caso, oltre una tensione di 900 hPa, lo strumento entra in cavitazione: l'acqua raggiunge una pressione vicina al valore della pressione di vapore a temperatura ambiente e le molecole d'aria possono così entrare

all'interno della tazza porosa, eliminando il vuoto presente, condizione indispensabile per il corretto funzionamento dello strumento.

### 7.2.3.3 ANALISI DEI RISULTATI

Le prove sono state effettuate nell'area di studio seguendo i procedimenti e gli accorgimenti descritti nel paragrafo precedente. Nelle misure effettuate, il tempo di risposta medio è stato di 60 – 80 min ed essendo il terreno in condizioni estremamente asciutte, i valori registrati risentivano di lievi effetti di cavitazione, portando la tensione finale ad un valore medio di 841 hPa, molto prossima al limite dei 900 hPa.

Tali misure derivano dunque dal fatto che la prova è stata effettuata nel settembre 2007 dopo una estate di intensa siccità. Le caratteristiche del materiale indagato (terreno prevalentemente sabbioso) hanno invece fatto sì che la tensione misurata crescesse bruscamente all'inizio della prova, per poi rallentare fino a raggiungere asintoticamente il valore finale. Ciò è dovuto al

fatto che le condizioni al contorno delle pareti del foro di un terreno sabbioso si perturbano molto durante lo scavo. La perforazione innesca infatti un flusso idrico dalle zone esterne verso il foro con un conseguente rapido innalzamento della tensione che, una volta inserito lo strumento e lasciato riposare, ritorna al valore effettivo nel giro di alcune decine di minuti. Tale valore verrà comunque preso in considerazione nel corso della prova BST.

#### 7.2.4 BOREHOLE SHEAR TEST

Il Borehole Shear Test (o BST), è uno strumento che misura in situ i parametri di resistenza al taglio del terreno (Fig. 7.9). Per l'Italia risulta essere una prova relativamente nuova (Rinaldi, 1995; Dapporto, 2003) e presenta tutti i vantaggi tipici delle prove in situ rispetto alle prove di laboratorio:

- velocità della prova;
- lo strumento può essere trasportato facilmente e richiede un solo operatore (economicità);
- possibilità di investigare un volume maggiore di terreno a profondità diverse;
- possibilità di indagare sulle proprietà meccaniche del terreno sotto condizioni al contorno esistenti in situ, evitando il disturbo provocato dal campionamento;
- misurazione separata della coesione e angolo d'attrito interno (Thorne *et al.*, 1981; Lutenegger & Halberg, 1981);
- valutazione immediata dei risultati con possibilità di ripetere la prova in caso di dati non ragionevoli (Thorne *et al.*, 1981; Lutenegger & Halberg, 1981).



Fig. 7.9 - Congegno d'estrazione e pompa d'aria in campagna.

### 7.2.4.1 DESCRIZIONE DELLO STRUMENTO

Lo strumento può essere suddiviso in tre componenti principali (Fig. 7.10):

- 1) la testa di taglio, composto da un pistone mosso da aria in pressione e da due piastre di taglio dentate, curve, che sviluppano un'area di contatto di  $32,3 \text{ cm}^2$ ; i denti sono 25 per piastra, spaziati fra loro di 2,5 mm, con bordi inclinati di  $60^\circ$ ; il diametro complessivo della testa di taglio non espansa è di 7,5 cm (Fig. 7.10b);
- 2) il congegno di estrazione, montato su una piastra a base quadrata di 31 cm di lato, formato da una manovella connessa ad una serie di aste filettate e ruote dentate necessarie all'estrazione della testa di taglio, e da un sistema per la misura della resistenza del terreno, costituito da due cilindri idraulici con relativi pistoni e da un misuratore di pressione; l'attrezzatura è completata da 6 aste di connessione lunghe 50 cm ciascuna e da un congegno per il bloccaggio dell'asta;
- 3) la pompa manuale ad aria compressa per l'applicazione della pressione normale, da collegare al cavo in uscita dalla testa di taglio; la casa costruttrice assicura la piena operatività fino ad una pressione massima di 350 kPa.

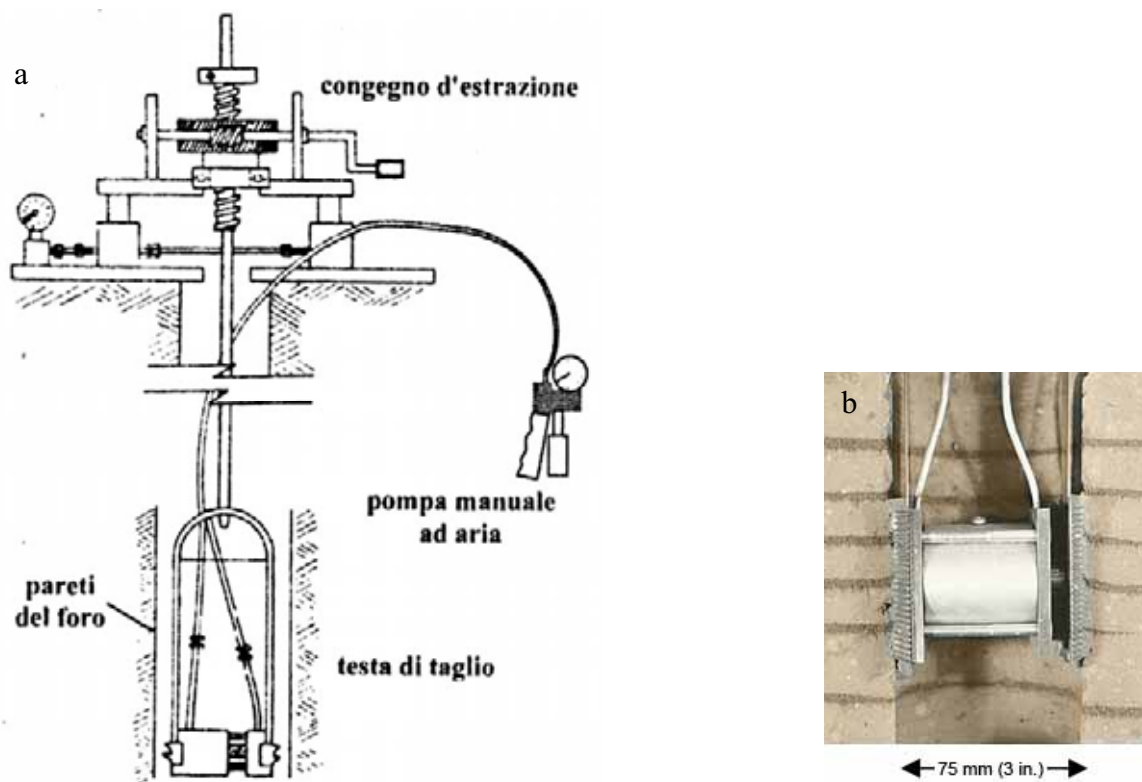


Fig. 7.10 - Schema dell'apparecchiatura BST (Thorne *et al.*, 1981, mod.) (a) e Testa di taglio (b) (<http://www.handygeotech.com>)



#### 7.2.4.2 DESCRIZIONE DELLA PROVA

Il primo passo consiste nello scavo del foro di sondaggio tramite un'apposita trivella manuale, fino ad una profondità leggermente superiore a quella richiesta per la prova. Successivamente, dopo aver montato un numero sufficiente di aste di connessione, si introduce nel foro la testa di taglio, collegata alla pompa per la pressione normale. Durante l'operazione bisogna fare attenzione a non urtare le pareti del foro con le piastre di taglio, per non accumulare materiale tra i denti delle stesse.

Giunti alla profondità desiderata, si applica tramite la pompa manuale la pressione normale di partenza che, per terreni sabbioso – limosi a densità media, si aggira sui 20 kPa; il pistone, allargando le piastre dentate, blocca la testa di taglio e trasferisce questa pressione alle pareti del foro. A questo punto, mentre il materiale in prossimità delle pareti inizia a consolidarsi, si può sistemare il congegno di estrazione: lo si abbassa sul terreno facendo passare l'asta di connessione all'interno della ruota dentata e lo si posa sulla superficie; di fondamentale importanza è la preparazione di un piano d'appoggio il più possibile orizzontale, al fine di eliminare ogni attrito tra asta di connessione verticale e congegno d'estrazione; in questo modo, la resistenza esercitata dal materiale durante la prova verrà trasmessa senza perdite ai cilindri idraulici e da qui al misuratore di pressione. L'ultima operazione consiste nel montare l'apposito bloccaggio che unisce l'asta di connessione (e quindi la testa di taglio) al congegno d'estrazione.

Il tempo necessario per la consolidazione è variabile, comunque non inferiore ai 10 minuti (Thorne *et al.*, 1981; Lutenecker & Tierney, 1986), passato il quale si procede alla rottura del materiale: ruotando la manovella in senso orario a velocità costante si sposta verso l'alto la testa dello strumento. Il terreno opporrà una resistenza crescente fino ad un massimo corrispondente al raggiungimento delle condizioni di rottura. A questo punto, si abbassa la testa dello strumento ruotando la manovella al contrario fino ad annullare quasi completamente lo sforzo di taglio letto sul manometro e si aumenta la pressione normale; l'incremento di pressione da adottare è variabile in quanto legato alla consistenza del terreno ed è generalmente compreso tra i 10 e i 20 kPa. Terminata la consolidazione si procederà nuovamente alla misura della resistenza al taglio. La sequenza viene ripetuta più volte, così da ottenere una serie di coppie  $\sigma$ - $\tau$  (pressione normale-resistenza al taglio) che, riportate in un grafico dopo aver effettuato le necessarie correzioni in base

alle equazioni di calibrazione fornite dalla ditta costruttrice dello strumento, definiscono l'involuppo a rottura di Mohr-Coulomb.

La procedura appena descritta è chiamata ad una fase (stage test), in quanto la testa di taglio viene lasciata in posto durante tutta la prova; alternativamente, dopo ogni incremento di  $\sigma$  e relativa misura di  $\tau$ , lo strumento può essere estratto dal foro, pulito e reinserto a una profondità leggermente superiore. La prova ad una fase è più semplice, veloce e precisa, in quanto l'involuppo a rottura è calcolato sul materiale alla stessa profondità (Lutenegger *et al.*, 1978; Thorne *et al.*, 1981; Handy, 1986); richiede però la condizione necessaria che gli sforzi e le deformazioni accumulati durante ogni stadio non influenzino i risultati dello stadio successivo. Tutto ciò non costituisce un problema in materiali a densità medio-bassa e grado di sovraconsolidazione non elevato (Handy *et al.*, 1986), in cui la superficie tagliata si riconsolida e assume una resistenza maggiore del terreno adiacente, spostando ogni volta più all'esterno il piano di taglio.

Un altro aspetto controverso riguarda le condizioni di drenaggio: durante l'applicazione della pressione normale e nella successiva fase di taglio, si sviluppa un eccesso di pressione neutra; un tempo di 10 minuti per la consolidazione iniziale e di 5 minuti per gli stadi successivi consente un drenaggio completo in sabbie e limi parzialmente saturi e un drenaggio solo parziale in argille sature (Thorne *et al.*, 1981; Lutenegger & Halberg, 1981).

#### 7.2.4.3 CRITERIO PER L'INTERPRETAZIONE DELLA PROVA

Per interpretare correttamente i risultati della prove BST, bisogna adottare un criterio che tenga conto delle condizioni di parziale saturazione del terreno.

Nel caso di un materiale saturo, la resistenza al taglio è descritta dal criterio di Mohr-Coulomb, inglobante il principio degli sforzi efficaci di Terzaghi:

$$\tau = c' + (\sigma - u_w) \operatorname{tg} \varphi'$$

Per i terreni sottosaturi, Fredlund (1986) ha proposto una nuova equazione per la resistenza al taglio:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \operatorname{tg} \varphi' + (u_a - u_w) \operatorname{tg} \varphi^b$$

dove  $\varphi^b$  definisce l'incremento di resistenza in funzione della suzione ( $u_a - u_w$ ), il cui contributo è separato dal contributo fornito dalla pressione normale ( $\sigma - u_a$ ).

Le due variabili sono indipendenti tra loro e possono essere diagrammate in un grafico insieme alla resistenza al taglio sull'asse delle ordinate (Fig. 7.11).

Si ottiene così un involuppo a rottura tridimensionale che forma un angolo pari a  $\varphi'$  con l'asse ( $\sigma - u_a$ ) e un angolo pari a  $\varphi^b$  con l'asse ( $u_a - u_w$ ). Proiettando l'involuppo esteso orizzontalmente

sul piano  $\tau-(\sigma-u_a)$ , otteniamo una sua rappresentazione bidimensionale (Fig. 7.12), la cui intercetta sull'asse delle ordinate è data da:

$$c_a = c' + (u_a - u_w) \operatorname{tg} \phi^b$$

$c_a$  è definita come la coesione apparente poiché è somma della coesione efficace e del contributo della suzione, che è temporaneo: man mano che il terreno si satura,  $u_w$  si avvicina al valore di  $u_a$  riducendo la coesione apparente fino a quando, in condizioni di completa saturazione, non rimane che la coesione efficace.

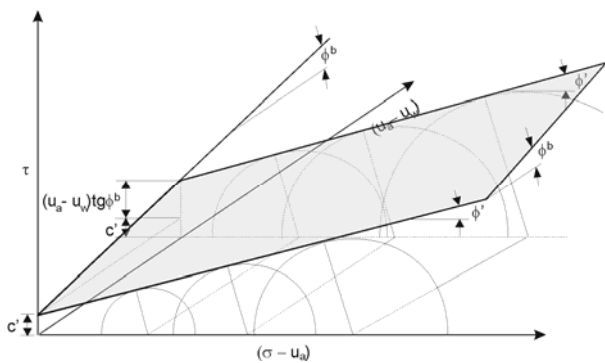


Fig. 7.11: Inviluppo a rottura di Mohr-Coulomb esteso ai terreni sottosaturi (Dapporto, 2003).

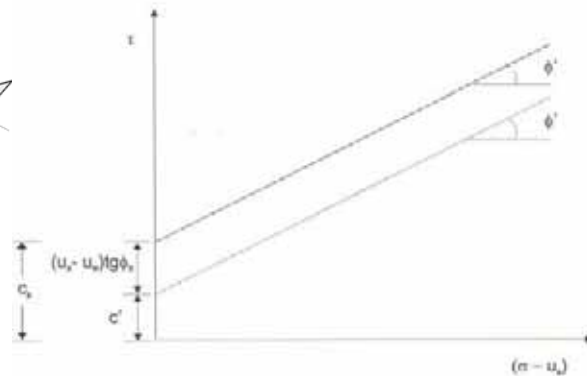


Fig. 7.12: Proiezione in due dimensioni dell'inviluppo a rottura per terreni sottosaturi (Dapporto, 1999).

Il criterio di rottura può essere quindi espresso nella forma:

$$\tau = c_a + (\sigma - u_a) \operatorname{tg} \phi^b$$

Il valore di  $\phi^b$ , per bassi valori di suzione e con i pori del terreno ancora interamente riempiti d'acqua, è circa uguale a  $\phi'$ ; se la suzione aumenta, il grado di saturazione diminuisce: l'acqua occupa solo una parte degli interstizi e quindi il contributo della suzione sarà meno determinante nell'incrementare la resistenza al taglio e  $\phi^b$  diventa perciò minore. La diminuzione comincia quando la suzione supera il valore di ingresso dell'aria nel terreno, legato alla distribuzione granulometrica.

#### 7.2.4.4 ANALISI DEI RISULTATI

Viste le proprietà fisiche del terreno (densità medio-bassa e grado di sovraconsolidazione non elevato) si è deciso di eseguire la prova adottando la procedura ad una fase.

Il tempo di consolidazione iniziale è stato di 10 minuti e di almeno 8 minuti per gli stadi successivi. Tali tempi sono stati considerati necessari per consentire un drenaggio completo dei materiali che, come abbiamo detto, hanno una percentuale di argilla molto bassa e si trovano in condizioni sottosature. In ogni caso essi risultano uguali o superiori a quelli raccomandati per questi terreni.

Per quanto riguarda la misura di resistenza al taglio la prova ha fornito subito una serie di valori attendibili di  $\sigma$ - $\tau$  la cui rette di regressione lineare hanno individuato l'involuppo a rottura del materiale. Come è noto la pendenza di tali rette è pari all'angolo di attrito ( $\phi'$ ) del terreno, mentre l'intercetta con le ordinate fornisce il valore della coesione apparente ( $c_a$ ) (Fig. 7.12)

Dal momento però che il valore della coesione apparente risultava essere prossimo a zero e la coesione efficace per un terreno granulare è essenzialmente pari a zero, il valore di suzione misurato con il tensiometro risultava troppo alto e di conseguenza inattendibile. Pertanto tale valore è stato trascurato e non è stato possibile ricavare il valore dell'incremento della resistenza al taglio in funzione della suzione di matrice ( $\phi^b$ ). La coesione misurata è stata in conclusione considerata corrispondente alla coesione efficace e dunque i parametri medi risultanti dalle prove BST sono i seguenti: angolo di attrito  $\phi' = 38,9^\circ$ ; coesione apparente  $c_a=0$  kPa.

#### 7.2.5 AMOOZEMETER TEST

L'Amoozometer è un permeometro compatto a carico costante, strumento che consente di effettuare misure in situ di conducibilità idraulica satura ( $K_{sat}$ ) ad una determinata profondità dal piano di campagna mediante la predisposizione e il riempimento con acqua di un foro di piccolo diametro.

La misura che si ottiene è una combinazione della conducibilità verticale ed orizzontale della superficie bagnata del foro.

##### 7.2.5.1 DESCRIZIONE DELLO STRUMENTO

L'Amoozometer è una singola unità costituita da 5 componenti fondamentali (Amoozegar 1989, 1992) (Fig. 7.13):



1. Quattro tubi a carico costante : la loro funzione è di mantenere la pressione dell'acqua nel fondo del foro costante durante tutto l'arco della prova. All'interno di ogni tubo sono presenti due ulteriori

tubicini d'aria di piccolo diametro. Quest'ultimi, sono tutti fissati ad una certa profondità che non può essere modificata eccetto che in determinate situazioni nel primo tubo a carico costante. In esso infatti, uno dei due tubicini può essere alzato o abbassato manualmente per consentire di variare il carico da impartire all'acqua nel foro scavato nel terreno.

2. Un serbatoio d'acqua: esso è posto nella parte centrale dello strumento per mantenere il centro di gravità al centro dell'unità e contiene fino a quattro litri di acqua. Può essere ricaricato anche nel corso della prova, senza modificarne il risultato.

3. Un serbatoio per la misura del flusso : questo tubo della capacità di circa un litro, consente l'osservazione delle variazioni del livello d'acqua nel foro e quindi del tasso di assorbimento del terreno tramite una scala numerica di misura in mm posta di lato al cilindro.

4. Unità di dissipazione dell'acqua : questa unità consente una distribuzione uniforme del flusso d'acqua all'interno del foro, causando pertanto un disturbo irrilevante alle pareti. Il collegamento di questa unità è assicurato sia con il serbatoio principale, sia con il tubo per la misura del flusso e anche con una speciale valvola a tre vie.

5. Valvola a tre vie : presenta appunto tre differenti posizioni. Tramite esse, può essere interrotto il flusso d'acqua all'unità di dissipazione, può essere aperto il collegamento sia del serbatoio principale sia del tubo per la misurazione del flusso oppure può essere aperto unicamente il collegamento di quest'ultimo. Le tre posizioni sono denominate rispettivamente "OFF", "2-ON" o "1-ON". La posizione "1-ON" si utilizza preferibilmente in terreni a bassa permeabilità come argille o limi mentre, per terreni sabbioso-limosi, è più opportuna la soluzione "2-ON" a causa del maggiore quantitativo d'acqua necessario per l'esecuzione della prova.

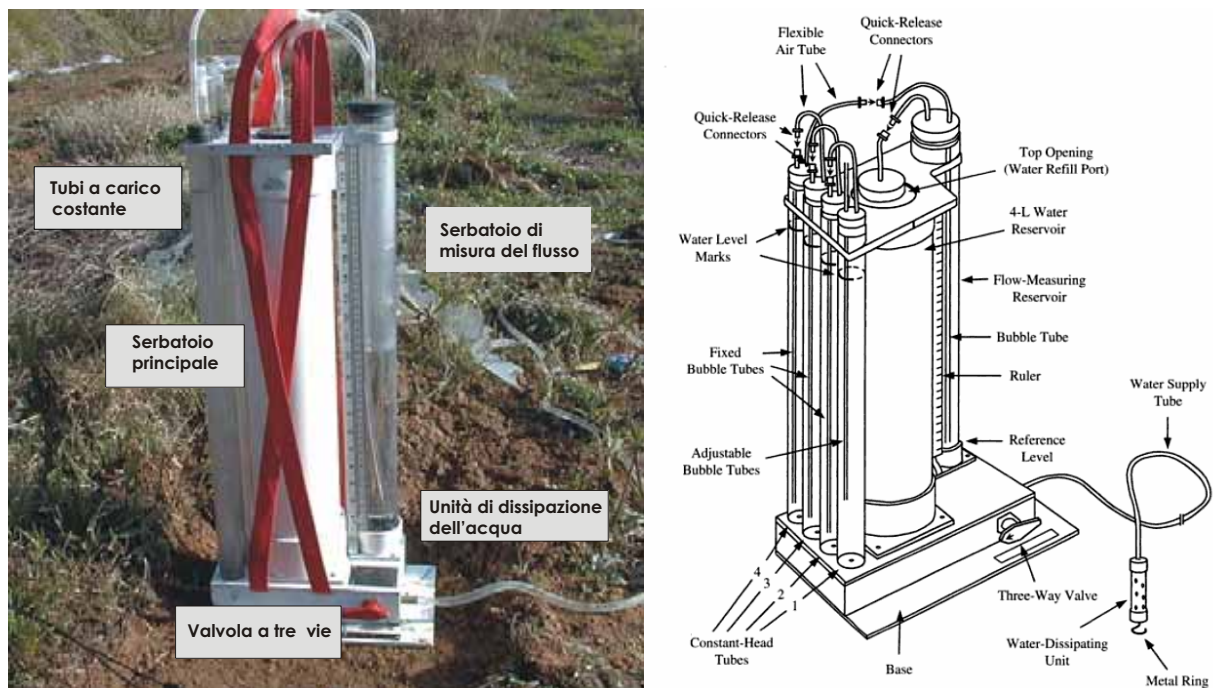


Fig. 7.13 - Foto (Tofani, 2003) e diagramma schematico (AAVV, 2006) del permeametro a carico costante Amoozemeter.

#### 7.2.5.2 DESCRIZIONE DELLA PROVA

Il primo passo per realizzare questa prova consiste nel realizzare un foro fino alla profondità alla quale si vuole misurare la permeabilità saturata, avendo cura in fase scavo di liberare la zona adiacente da qualsiasi tipo di materiale che potrebbe cadere all'interno. Una certa cura deve essere riservata anche alla pulizia della parte terminale del foro per evitare che durante la prova frammenti di terreno cadano sul fondo. A questo punto è necessario misurare con precisione la profondità ed il diametro dello scavo realizzato. Quest'ultimo solitamente viene ricavato con una dimensione che varia tra i 5-6 cm. Una volta effettuate ed annotate queste misurazioni si può decidere il volume d'acqua desiderata nel foro. Nella maggior parte dei casi, una quantità di acqua con una altezza di 15 cm risulta essere la scelta migliore per fori di diametro di 6 cm circa.

A questo punto è possibile riempire i tubi a carico costante fino al livello indicato; il numero di tubi da riempire per effettuare la prova varia in base all'altezza tra il livello di riferimento (corrispondente allo zero indicato nella scala di misura graduata presente sul tubo per la misura del flusso) e il tetto dell'acqua nel foro:

1. Tra 0 e 50 cm dovrà essere riempito solo il primo tubo.
2. Tra 50 e 100 cm dovranno essere riempiti i primi due tubi.

3. Tre 100 e 150 cm saranno necessari tre tubi.
4. Tra 150 e 200 cm di profondità saranno necessari tutti i tubi a carico costante.

La valvola, durante le operazioni di riempimento, dovrà essere posizionata su OFF.

L'ultima operazione prima iniziare le misurazioni vere e proprie prevede l'eliminazione dell'aria intrappolata nel sistema e ciò avviene posizionando a terra l'unità di dissipazione lontano dal foro in cui verrà inserita, aprendo la valvola sulla posizione "2-ON" e facendo scorrere l'acqua attraverso i tubi. Quando tutta l'aria è rimossa bisogna chiudere rapidamente la valvola (posizione OFF).

L'unità di dissipazione verrà così inserita nel fondo del foro e la valvola sarà spostata nuovamente nella posizione "2-ON" permettendo all'acqua di fuoriuscire. Inizialmente numerose bolle si formeranno nel serbatoio di misura del flusso a causa del rapido passaggio di acqua dal permeametro al foro, finché ad un certo punto il flusso di bolle d'aria diverrà uniforme. Ciò corrisponde al momento in cui si raggiunge l'altezza desiderata. A questo punto, si misurerà l'altezza precisa di acqua stabilitasi nel foro (se risulterà maggiore o minore di quella voluta, potrà essere variata alzando o abbassando il tubicino d'aria nel primo tubo a carico costante) e si potranno iniziare ad acquisire le misure dal tubo per la misura del flusso. La corretta esecuzione della prova richiede il rilievo del tasso d'infiltrazione nel tempo fino al raggiungimento di un regime stazionario, rappresentato da un abbassamento della colonna d'acqua a velocità costante per un minimo di tre intervalli di tempo. A questo punto la prova può essere dichiarata conclusa.

Per una situazione ideale (materiale omogeneo ed isotropo non soggetto a cambiamento delle caratteristiche con il tempo), la velocità di flusso nella zona insatura sotto un carico costante decresce gradualmente con il tempo fino ad arrivare ad un valore costante chiamato velocità di flusso stazionario. Da quest'ultimo valore, per mezzo dell'equazione di Glover, si ricava il valore di permeabilità satura  $K_{sat}$ .

La soluzione di Glover è:

$$K_{sat} = \{ \sinh^{-1}(H/r) - [(H/r)^2 + 1]^{1/2} + r/H \} / (2\pi H)^2 * Q$$

Dove H = altezza acqua in foro

r = raggio del foro

Q = velocità di flusso stazionario.

L'equazione di Glover è raccomandata quando la distanza fra il fondo del foro e un possibile strato impermeabile sottostante è maggiore di  $2H$ . È necessario inoltre che il livello  $H$  si mantenga costante durante la prova.

### 7.2.5.3 ANALISI DEI RISULTATI

Le misure di conducibilità idraulica satura sono state effettuate nei tre siti di indagine seguendo le procedure precedentemente descritte e misurando l'altezza d'acqua nel serbatoio inizialmente per intervalli di 2,5 minuti e successivamente di 5 minuti.

Due delle tre prove, effettuate a una distanza di circa 1 km tra loro in prossimità della testa interna, hanno portato a dei risultati molto simili tra loro. La terza prova (Fig. 7.14), effettuata invece sulla testa esterna dell'argine, presenta al contrario un risultato diverso. Considerando però che, nei pressi di quest'ultima prova erano presenti alcuni alberi e durante l'esecuzione del foro sono stati trovati nel terreno estratto alcuni frammenti di radici, essa è stata considerata scarsamente attendibile. Pertanto, il valore medio di permeabilità satura ottenuto è stato di  $8,17 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ .



Fig. 7.14 - Due fasi della prova con Amoozometer in campagna, installazione dello strumento nel foro (a), lettura dei valori sulla scala graduata (b)

### 7.2.6 SINTESI DEI RISULTATI

Ogni prova eseguita sia in laboratorio che in situ ha ottenuto una scarsa eterogeneità dei risultati e quindi essi sono stati mediati ottenendo un unico valore rappresentativo di tutto



l'argine (tabella 7.1). Considerare questa opera idraulica omogenea è sicuramente un'approssimazione (anche se giustificata dall'omogeneità dei risultati fin qui visti), ma è comunque un primo passo verso una corretta caratterizzazione geotecnica dello stesso, visto che, ad oggi, si è persa qualsiasi informazione sulla modalità costruttiva adottata e sui materiali impiegati per la realizzazione.

Peso di volume totale	Peso di volume del terreno secco	Peso di volume del terreno saturo	Conducibilità idraulica satura	Angolo di resistenza al taglio efficace	Coesione apparente
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$k_s$ (m/s)	$\phi'$ (°)	$c_a$ (kPa)
13,2	12,3	17,53	$8,17 \cdot 10^{-6}$	38,9	0
Limite liquido	Limite plastico	Indice di plasticità	Indice di consistenza	Indice di liquidità	Indice di attività
$W_L$ (%)	$W_P$ (%)	$I_P$ (-)	$I_C$ (-)	$I_L$ (-)	$A$ (-)
23,7	14,3	10	2,1	-1,1	3,6
Coefficiente di uniformità	Indice di compressione	Contenuto d'acqua	Indice dei vuoti	Grado di saturazione	Porosità
$U$ (-)	$C_c$ (-)	$w$ (%)	$e$ (-)	$S$ (%)	$n$ (%)
9,2	0,6	6,75	1,13	16,2	52,9

Tabella 7.1- Parametri per la caratterizzazione geotecnica degli argini nel sito pilota

### 7.3. ANALISI DI STABILITÀ

Il software utilizzato per l'analisi di stabilità è costituito da un pacchetto prodotto dalla Geo-Slope International che permette di accoppiare un modello di flusso idrico sotterraneo (SEEP/W; Krahn, 2004a) con un modello di stabilità all'equilibrio limite (SLOPE/W; Krahn, 2004b).

#### 7.3.1 MODELLO DI DISTRIBUZIONE DELLE PRESSIONI INTERSTIZIALI

Il software utilizzato per l'analisi di filtrazione è il SEEP/W v.5, un codice di calcolo agli elementi finiti che ricostruisce l'andamento delle pressioni interstiziali positive e negative in condizioni stazionarie o transitorie. Esso risulta costituito da tre moduli: DEFINE, SOLVE e CONTOUR.

Il primo modulo permette la definizione del problema attraverso i seguenti punti:

1. Definizione della geometria del problema;
2. Assegnazione delle proprietà del materiale;
3. Scelta del tipo di problema e assegnazione delle condizioni al contorno.

Il secondo consente la risoluzione del problema e il calcolo della filtrazione dell'acqua nel terreno, mentre il terzo permette la visualizzazione dei risultati.

### 7.3.1.1 GEOMETRIA DEL PROBLEMA

Al fine di disegnare la geometria dell'argine e l'altezza della sponda, si è fatto uso di dati provenienti da due fonti diverse: bibliografia e rilevamento GPS.

Per quanto riguarda la sponda, la sua altezza media rispetto all'alveo è stata ricavata attraverso l'analisi di alcune sezioni idrauliche relative alla zona interessata (Agnelli *et al.*, 1998). Da esse dunque è stato possibile osservare una elevazione media di circa 6 m che rimane costante fino al piede interno dell'argine. Tale valore rappresenta sicuramente una approssimazione, ma del tutto accettabile in quanto la morfologia di questa zona non incide significativamente sulle analisi di stabilità che sono relative esclusivamente agli argini. Tale valore è stato quindi utilizzato per tutte le geometrie disegnate.

La geometria dell'argine invece è stata disegnata con estrema precisione, avendo a disposizione i dati ottenuti con il rilevamento GPS, caratterizzato da un errore massimo di localizzazione sia in quota che in planimetria di 5 cm. Sono state così individuate, lungo il tratto interessato, varie sezioni arginali differenziate esclusivamente in base alla forma in modo tale che ciascuna, fosse rappresentativa di un singolo tratto con geometria omogenea.

Ogni sezione, dopo essere stata disegnata nel programma SEEP, è stata quindi suddivisa in numerosi elementi quadrilateri, di dimensioni simili tra loro. Tale suddivisione, deve portare ad ottenere degli elementi aventi una forma il più omogenea possibile in quanto il programma esegue i

calcoli e le elaborazioni richieste singolarmente per ogni elemento. Tali operazioni poi, unite tra loro, portano al risultato finale ed è quindi necessario che ogni elaborazione effettuata su un elemento, dia dei risultati che possano essere congruenti con quelli degli elementi adiacenti.

### 7.3.1.2 PROPRIETÀ DEL MATERIALE

Per poter funzionare, il modello richiede l'inserimento di numerosi dati: in particolare, la curva caratteristica del terreno e la curva di permeabilità (curve  $k$ ) che mettono rispettivamente in relazione la variazione della suzione di matrice con la variazione del contenuto volumetrico d'acqua e della conduttività idraulica.

Essendo entrambe le curve molto difficili da ottenere sperimentalmente, nel caso degli argini è stata utilizzata la libreria presente nel programma, congiuntamente ai dati geotecnici posseduti.

Inserendo infatti la curva granulometrica e i valori di porosità del terreno, ottenuti in sede di caratterizzazione geotecnica, all'interno delle equazioni di Arya & Paris (1981), il SEEP/W ha

consentito la determinazione della curva caratteristica. La sua definizione risulta indispensabile per ottenere la curva di permeabilità, poiché gli algoritmi di Green & Corey (1971) presenti nella libreria del programma necessitano come dati di input proprio la curva caratteristica assieme alla permeabilità satura del terreno. Quest'ultimo dato è noto grazie alle prove geotecniche precedentemente effettuate in situ tramite il permeometro compatto a carico costante.

Per quanto riguarda invece la sponda tali curve sono state determinate utilizzando la libreria del programma congiuntamente ai dati presenti in Dapporto (2003), i quali indicano come la sabbia con limo sia la granulometria maggiormente presente nella zona considerata.

È comunque importante sottolineare che la caratterizzazione geotecnica di questa zona non costituisce un dato fondamentale per il risultato finale poiché il ciglio di sponda si trova sempre a distanze di alcune decine di metri dagli argini e pertanto, una sua eventuale instabilità, non influisce mai sulla quella arginale. Di conseguenza l'approssimazione fatta nell'assegnazione delle proprietà dei materiali risulta quantomeno accettabile.

### 7.3.1.3 CONDIZIONI AL CONTORNO

L'analisi di stabilità effettuata prevede un problema di tipo dinamico e quindi la definizione di varie condizioni in rapporto al tempo.

Le condizioni al contorno sono state inserite nella modellazione ipotizzando una rapida risalita della falda in occasione di un importante evento di piena che raggiungesse il ciglio dell'argine. In base alla forma degli idrogrammi di piena (curva di concentrazione e curva di decrescita) registrati in occasione dell'alluvione del 1966 (M.LL.PP., 1951-1973) (Fig. 7.15) è stato ipotizzato un evento di piena con durata complessiva di 50 ore in cui la portata al colmo viene raggiunta in 15 ore e con una curva di decrescita e di esaurimento che raggiunge gradualmente il livello di base in 35 ore. L'evento così articolato è stato suddiviso in 25 intervalli temporali (step) di due ore ciascuno.

La superficie freatica all'interno del terreno è stata costruita in maniera tale da essere in equilibrio con il livello del fiume prima dell'inizio dell'evento, mentre per quanto riguarda la pressione dell'acqua nei pori essa varia con la distanza al di sopra della tavola d'acqua con un limite massimo imposto di  $-9,8\text{kPa}$ , corrispondente ad un carico di  $-1\text{m}$  (Dapporto, 2003). L'unica semplificazione apportata alla realizzazione di questo modello è stata l'esclusione dell'effetto delle precipitazioni collegate all'evento ipotizzato.

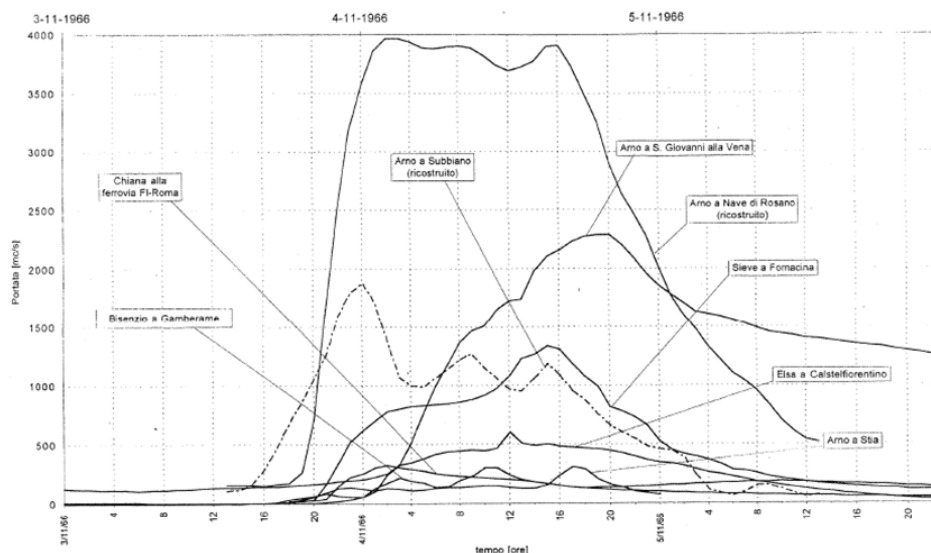


Fig. 7.15 - Idrogrammi dell'Arno e degli affluenti relativi all'alluvione del novembre 1966 (<http://www.adbarno.it>).

### 7.3.2 MODELLO PER LA STABILITÀ DEGLI ARGINI

La stabilità degli argini viene modellata tramite il software SLOPE/W, nel quale è stato possibile importare i dati del modello costruito con SEEP/W poiché dotato di un'interfaccia simile. Grazie alla loro interconnessione è possibile associare ad ogni step temporale dell'analisi una diversa distribuzione delle pressioni interstiziali all'interno della sezione. Ciò rende possibile formulare una analisi di stabilità nel transitorio e permette di ottenere la variazione del fattore di sicurezza nel tempo.

Il software è composto dagli stessi moduli presenti nel SEEP/W: DEFINE, SOLVE e CONTOUR. Il primo di essi consente in questo caso la definizione del problema attraverso i seguenti punti:

1. Definizione della geometria del problema
2. Definizione della superficie di scivolamento
3. Assegnazioni delle proprietà geotecniche dei materiali
4. Scelta del metodo di calcolo del fattore di sicurezza

Il secondo permette la risoluzione del problema e il calcolo del fattore di sicurezza, mentre il terzo consente la visualizzazione dei risultati.

#### 7.3.2.1 GEOMETRIA DEL PROBLEMA

Per quanto riguarda la geometria dell'argine e della sponda essa è stata importata direttamente dal SEEP/W grazie all'utilizzo della stessa interfaccia grafica. Le stesse relazioni



morfometriche sono mantenute e pertanto si rimanda al paragrafo 7.3.1.1 per le considerazioni sulla sua definizione.

### 7.3.2.2 SUPERFICIE DI SCIVOLAMENTO

Il software consente di individuare la superficie di scivolamento in due differenti modi: specificando una griglia dei centri di scivolamento e una serie di segmenti rappresentanti linee di tangenza, lasciando al programma il calcolo, per ogni passo temporale, della superficie con fattore di sicurezza minimo, oppure specificando il centro di rotazione e la forma della superficie di scivolamento. In quest'ultimo caso la superficie viene mantenuta fissa e il fattore di sicurezza è calcolato unicamente per tale configurazione. Non potendo, nel nostro caso, conoscere a priori la geometria e la posizione della superficie di scivolamento, è stato utilizzato il primo metodo relativamente al solo paramento a diretto contatto con l'acqua di piena.

### 7.3.2.3 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI MATERIALI

Durante questa fase, vengono assegnati i parametri geotecnici ai terreni costituenti sia la sponda che l'argine necessari per i criteri di rottura utilizzati.

Il programma, in condizioni sature, adotta il criterio di rottura di MOHR-COULOMB in termini di sforzi efficaci:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u) \tan \varphi'$$

dove:

$\tau$  = resistenza del materiale;

$c'$  = coesione efficace;

$\varphi'$  = angolo di resistenza al taglio in termini di tensioni efficaci;

$\sigma_n$  = tensione normale;

$u$  = pressione dell'acqua nei pori

In condizioni sottosature, viene invece utilizzato il criterio di rottura di FREDLUND *et al.* (1978):

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \operatorname{tg} \varphi' + (u_a - u_w) \operatorname{tg} \varphi^b$$

dove:

$u_a$  = pressione dell'aria nei pori; ( $=0$ );

$\varphi^b$  = incremento di resistenza al taglio in funzione della suzione;

$(u_a - u_w)$  = suzione di matrice, che in condizioni di parziale saturazione è positiva.

I parametri geotecnici occorrenti sono stati ricavati dalle prove in laboratorio ed in situ già descritte nel paragrafo 7.2. Riassumendo, attraverso la prova BST abbiamo ottenuto l'angolo di attrito in termini di tensioni efficaci ( $\phi'$ ) mentre con il permeametro a carico costante Amoozometer abbiamo ricavato la permeabilità satura ( $k_s$ ). I pesi di volume ( $\gamma$  e  $\gamma_{sat}$ ) e la porosità ( $n$ ) sono stati invece ottenuti tramite prove di laboratorio (Tabella 7.2). D'altra parte come già accennato non è stato possibile determinare l'incremento della resistenza al taglio in funzione della suzione di matrice ( $\phi^b$ ) e si è quindi dovuto procedere nell'analisi senza tenerne conto. E' bene tuttavia sottolineare che, in tal modo, non viene considerato l'effetto positivo che si ha sulla stabilità di un terreno a causa della coesione apparente in condizioni sottosature. In aggiunta a quanto detto finora anche il valore della coesione totale merita un discorso alquanto ampio. Infatti il valore che il programma utilizza non è pari a zero in quanto, inserendo un valore nullo di coesione, esso non tiene in considerazione l'altezza dell'argine nelle sue valutazioni. Tale assunzione risulterebbe irrealistica data l'importanza che essa riveste in relazione alla stabilità di queste opere. Pertanto non è stato inserito un valore  $c_a=0$  come emerso in prima approssimazione dalle indagini di campagna, ma piuttosto un valore minimo che permette di tener conto anche di tale parametro (Tabella 7.2).

Per quanto riguarda invece i parametri geotecnici assegnati al materiale costituente la sponda, essi sono stati comunque inseriti anche se non hanno una importanza rilevante ai fini dell'analisi di stabilità. Questi valori sono stati ricavati in maniera attendibile dalla letteratura relativa alla zona considerata (Dapporto, 2003) (Tabella 7.2).

	Peso di volume	Porosità	Permeabilità satura	Angolo di attrito	Coesione apparente	Peso di volume saturo
<b>Argine</b>	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	n (%)	$k_s$ (m <sup>3</sup> /s)	$\phi'$ (°)	$c_a$ (kPa)	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )
	13,2	52,9	$8,17 \cdot 10^{-6}$	38,9	0,5	17,53
<b>Sponda</b>	-	-	-	35,5	7,1	17

tabella 7.2 - Parametri geotecnici utilizzati nell'analisi di stabilità

Tutti i parametri geotecnici utilizzati sono stati considerati costanti in tutto il tratto analizzato. Questa approssimazione consente di effettuare l'analisi di stabilità esclusivamente in base alla geometria dell'argine rilevata nella campagna GPS ed è basata sulla evidenza sperimentale che, in tutte le prove effettuate in un tratto di lunghezza di circa 1 km, i valori ottenuti risultano molto simili tra loro sia per quanto riguarda la granulometria (Fig. 7.6), sia la permeabilità.

#### 7.3.2.4 SOLUZIONE DEL PROBLEMA

Il software SLOPE/W può calcolare il fattore di sicurezza tramite diversi metodi ma, nella presente ricerca è stato utilizzato il metodo rigoroso dell'equilibrio limite di Morgenstern – Price che verifica l'equilibrio sia delle forze che dei momenti (Tofani, 2003). Il metodo suddivide, per mezzo di segmenti verticali, la porzione di terreno sottesa dalla superficie di scivolamento in zone dette conci. Per ognuno di essi il programma restituisce lo stato tensionale al fine di calcolare il valore di resistenza limite dell'intera area coinvolta nell'analisi (Fig. 7.16).

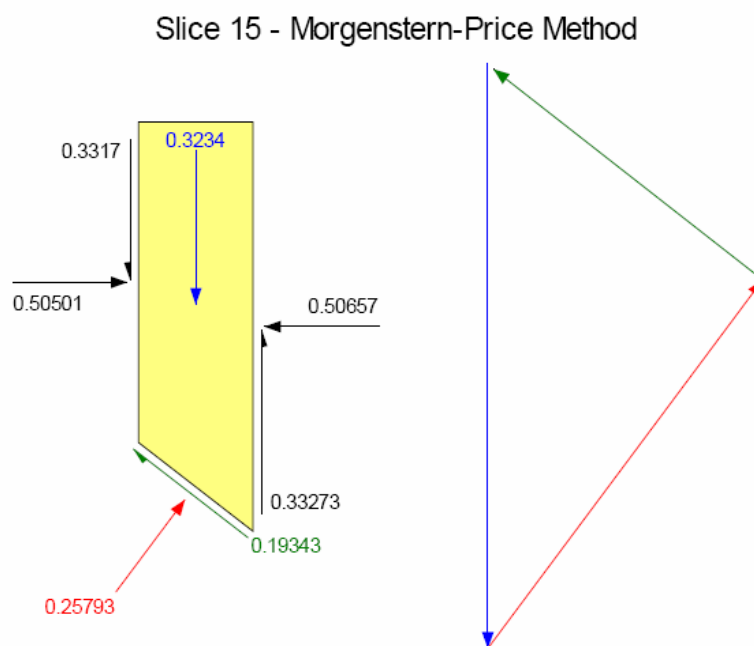


Fig. 7.16 - Disposizione delle forze agenti su di un concio di materiale.

Una volta definito il metodo di calcolo, è necessario scegliere la funzione delle forze di interazione fra conci che però, nell'ipotesi di una superficie di scivolamento circolare, influenza solo in minima parte il valore del fattore di sicurezza. Alla luce di questo si è scelto una funzione costante, in modo tale che le forze di interazione fra conci risultino costanti lungo tutta la superficie di scivolamento. Il programma, così impostato, fornisce il valore del fattore di sicurezza per tutte le superfici di scivolamento ritenute teoricamente possibili in base alle impostazioni geometriche di partenza. Esso è definito come il fattore che deve essere applicato alla resistenza al taglio del terreno per portare la massa del terreno stesso all'equilibrio limite lungo la superficie di scivolamento scelta (se  $F > 1$  il pendio è stabile, se  $F < 1$  il pendio è instabile, se  $F = 1$  il pendio è in condizioni di equilibrio limite). Grazie alla funzione DEFINE, il programma consente la visualizzazione della superficie di scivolamento contraddistinta dal

fattore di sicurezza minore per ogni timestep in cui è stato suddiviso evento di piena impattante l'argine.

#### 7.4. RISULTATI DELL'ANALISI

Analizzando in ambiente ArcGis i dati ottenuti tramite la campagna GPS, è stato possibile individuare nel tratto interessato sei sezioni arginali (Fig. 7.25) corrispondenti a sei zone aventi geometrie diverse tra loro. Le procedure precedentemente descritte, sono state quindi applicate a ciascuna delle sei sezioni prescelte. In ognuna di esse il fattore di sicurezza rimane costante finché l'acqua dell'Arno non invade la zona golenale e lambisce il piede interno dell'argine.

Da questo momento in poi, il valore del fattore di sicurezza tende ad aumentare per effetto della pressione di confinamento esercitata dall'acqua sul petto dell'argine. In tutti i casi analizzati, il valore del fattore di sicurezza più alto viene raggiunto in corrispondenza della quota massima raggiunta dal livello dell'acqua, per poi diminuire durante la discesa di tale livello, rimanendo ad un valore maggiore di uno (condizione di stabilità) solo per due sezioni su sei. Nelle restanti quattro sezioni, il fattore di sicurezza assume valori negativi (condizione di instabilità) quando il livello dell'acqua è calato fino a raggiungere il piede dell'argine ed il valore minimo si riscontra in corrispondenza di questo step temporale o di quello immediatamente successivo (Fig. 7.17). In tutti e quattro i casi di instabilità la rottura avviene nella parte basale del fianco interno dell'argine per scivolamento rotazionale. Lo scivolamento simulato non ha dimensioni estese ma è comunque associabile ad un rischio idraulico che meriterebbe indagini più sofisticate, in quanto il programma non tiene in considerazione gli effetti destabilizzanti che un tale fenomeno potrebbe nel corpo arginale durante gli intervalli temporali successivi.

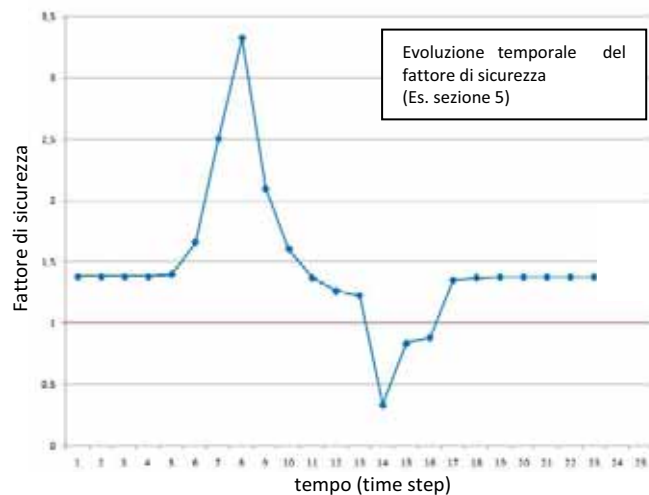


Fig. 7.17 Esempio del fattore di sicurezza in funzione del tempo. Quando la curva scende al sotto di 1 si ha instabilità.



Di seguito vengono mostrati i risultati ottenuti con i due programmi nel “time step” in cui il fattore di sicurezza raggiunge il valore minore (fig. 7.18, 7.19, 7.20, 7.21, 7.22, 7.23).

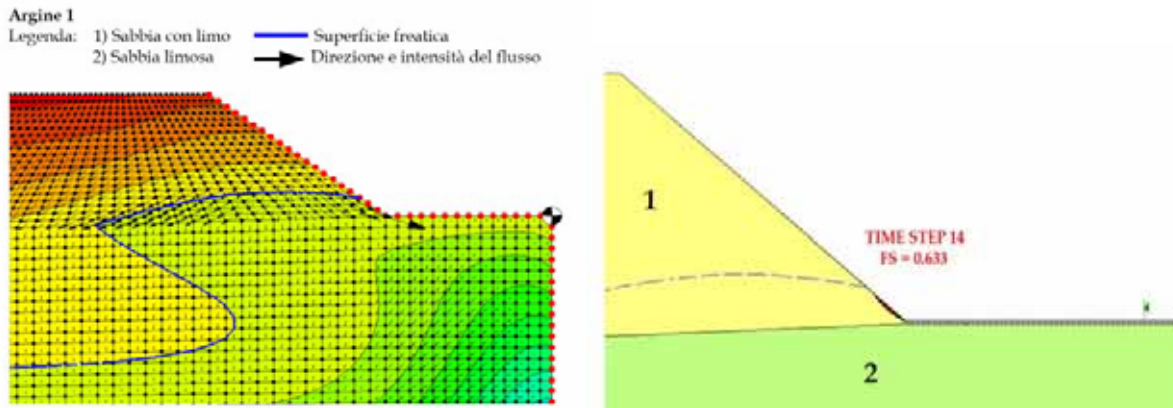


Fig. 7.18 - Risultati della modellazione con il software SEEP (sinistra), dove si può notare l'andamento delle pressioni interstiziali da valori maggiori (colore verde - blu) a minori (colore rosso) e il software SLOPE (destra).

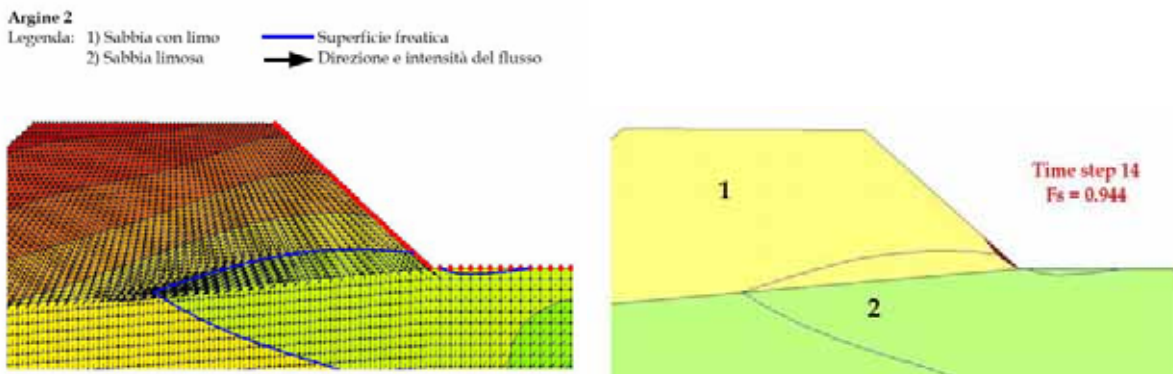


Fig. 7.19 - Risultati della modellazione con il software SEEP (sinistra), dove si può notare l'andamento delle pressioni interstiziali da valori maggiori (colore verde - blu) a minori (colore rosso) e il software SLOPE (destra).

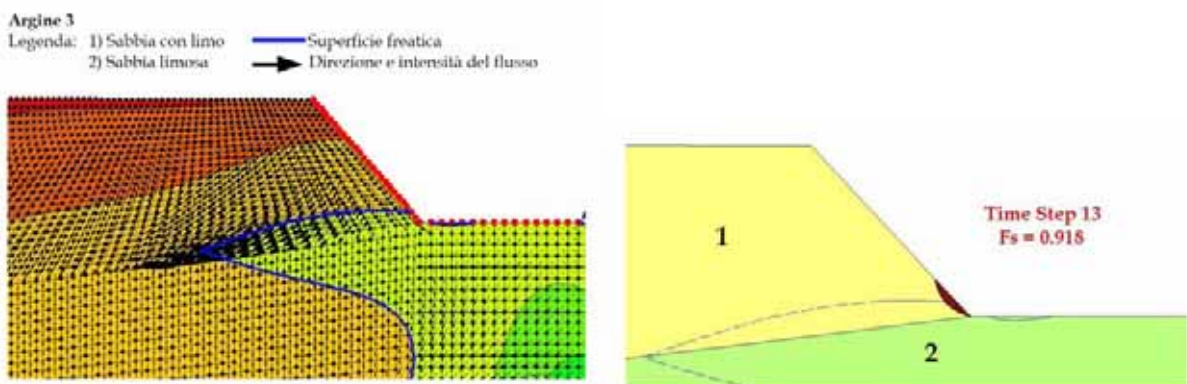


Fig. 7.20 - Risultati della modellazione con il software SEEP (sinistra), dove si può notare l'andamento delle pressioni interstiziali da valori maggiori (colore verde - blu) a minori (colore rosso) e il software SLOPE (destra).

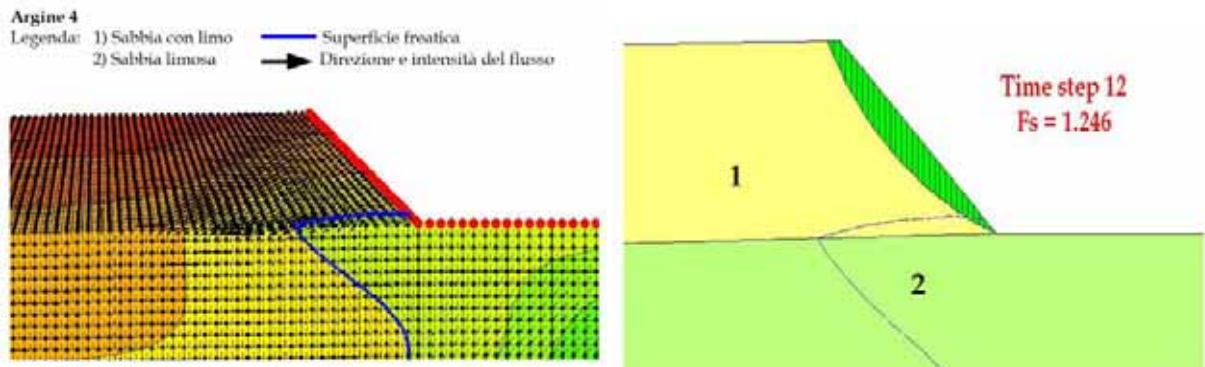


Fig. 7.21 - Risultati della modellazione con il software SEEP (sinistra), dove si può notare l'andamento delle pressioni interstiziali da valori maggiori (colore verde - blu) a minori (colore rosso) e il software SLOPE (destra).

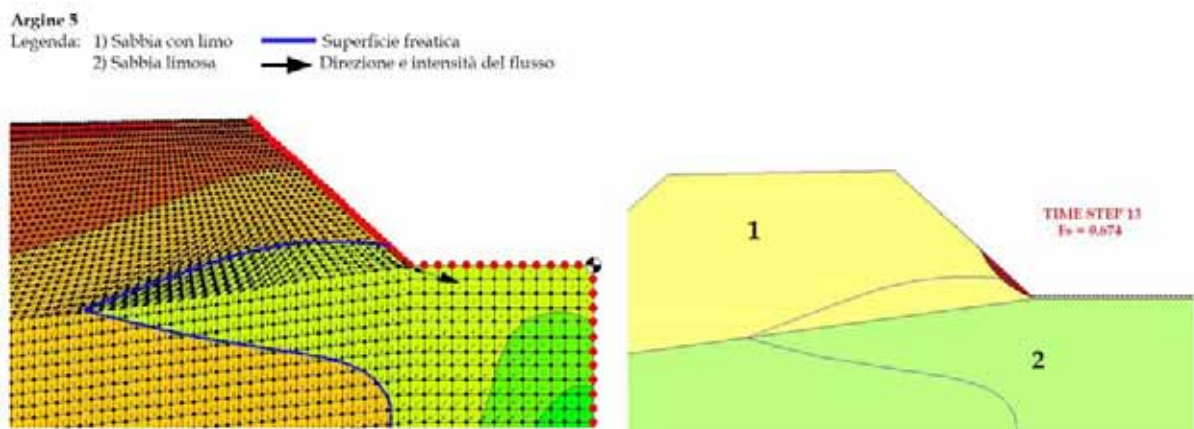


Fig. 7.22 - Risultati della modellazione con il software SEEP (sinistra), dove si può notare l'andamento delle pressioni interstiziali da valori maggiori (colore verde - blu) a minori (colore rosso) e il software SLOPE (destra).

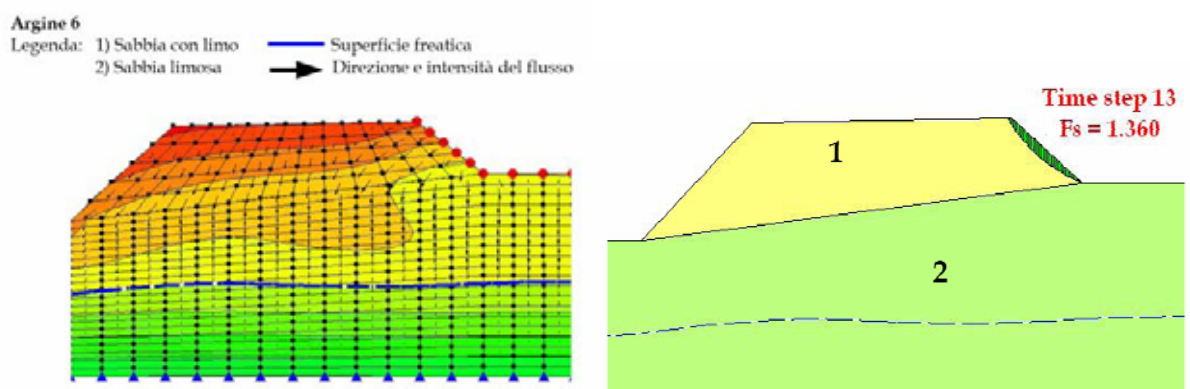


Fig. 7.23 - Risultati della modellazione con il software SEEP (sinistra), dove si può notare l'andamento delle pressioni interstiziali da valori maggiori (colore verde - blu) a minori (colore rosso) e il software SLOPE (destra).

A completamento del lavoro svolto, una volta effettuata la modellazione per ciascuna sezione arginale, l'analisi di stabilità è stata estesa a tutta la zona d'indagine. Per fare ciò è stato estrapolato un criterio morfometrico partendo dall'analisi delle sezioni utilizzate durante la

modellazione e assumendo sempre una omogeneità strutturale. Infatti, osservando esclusivamente la forma degli argini è stato notato che quelli che hanno contemporaneamente una larghezza della testa minore ed un dislivello maggiore tra la quota della testa e quella del piede interno sono associati a sezioni instabili. Al contrario gli argini più larghi e più bassi sul fianco interno sono risultati stabili per le simulazioni effettuate (Fig. 7.24). In particolare le 4 sezioni risultate instabili hanno il dislivello tra la quota testa e quella del piede interno maggiore di 2 m, mentre la larghezza della testa è inferiore a 5 m. Le 2 sezioni risultate stabili hanno invece un dislivello tra la quota della testa e quella del piede interno inferiore a 2 m e la larghezza testa maggiore di 5 m. Il numero ridotto di sezioni indagate non ci permette invece di trarre conclusioni relativamente al rapporto pendenza del fianco interno - instabilità, mentre un numero maggiore di dati e di relative simulazioni potrebbero essere utili per indagare ulteriormente questo aspetto.

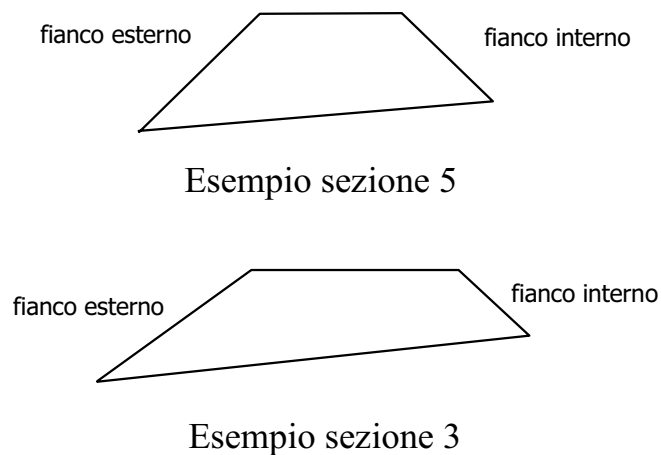


Fig. 7.24 - Confronto fra sezione instabile (sopra) e sezione stabile (sotto)

Pertanto secondo le considerazioni suddette è stato possibile estendere la valutazione di stabilità ricavata con le singole simulazioni alle aree adiacenti che possedevano caratteristiche geometriche simili. L'intero tratto oggetto di studio è stato quindi suddiviso distinguendo zone instabili e zone stabili ad eventi di piena del tipo preso in considerazione (Fig. 7.25). Nel primo caso ricade il settore prospiciente all'abitato di Figline (circa 600m) e il tratto compreso tra la località Casa Nuova ed il limite provinciale (circa 1500m), mentre nel secondo la restante parte.



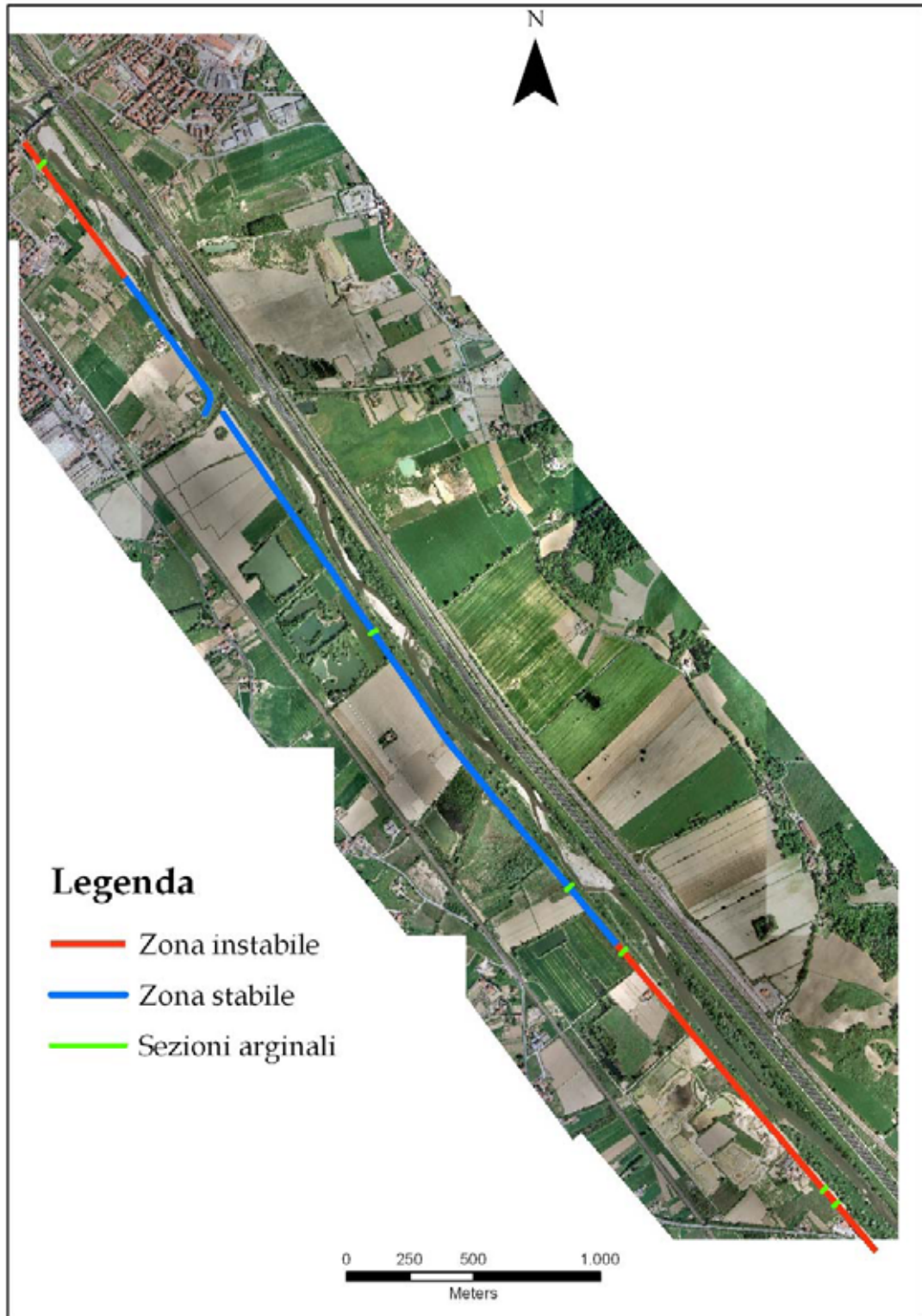


Fig. 7.25 - Estensione delle singole analisi di stabilità all'intero tratto considerato.



## 8 CONCLUSIONI

Il lavoro ha esaminato il tema della caratterizzazione della pericolosità idraulica di alcuni fiumi toscani applicando i dati derivanti da un rilievo ad alta risoluzione a vari aspetti del problema.

La revisione preliminare delle tecniche di mappatura in ambito fluviale ha permesso l'individuazione di metodiche appropriate per la caratterizzazione rapida, di dettaglio e con elevata precisione di ampie fasce perifluviali. Riguardo alla strumentazione l'apparecchio principale è risultato il sistema di georeferenziazione satellitare (GPS) che ha permesso di ottenere immediatamente le informazioni necessarie senza alcuna elaborazione aggiuntiva nella fase di restituzione dei dati. Accanto a questo, è emersa l'importanza di una appropriata annotazione, tramite schedatura monografica, di tutti gli elementi di interesse. In generale i rilievi strumentali hanno descritto contemporaneamente la geometria degli elementi naturali (ciglio di sponda, barre fluviali, zone in frana) e dei manufatti antropici (argini, opere idrauliche, insediamenti, restringimenti di sezione e scarichi) sia da un punto di vista planimetrico che altimetrico, mentre la schedatura ha evidenziato i principali aspetti di interesse idraulico.

La mappatura dettagliata delle aree di influenza idraulica ha portato alla definizione delle sponde dell'Arno del Valdarno Medio e di parte del Valdarno Superiore. A queste si aggiungono i tratti terminali degli affluenti che hanno almeno un tratto classificato in seconda categoria: Ombrone, Bisenzio, Marina, Vingone, Greve, Mugnone e Terzolle. Tale operazione, suddivisa in diverse fasi di lavoro, è stata comunque portata avanti tenendo conto delle diversità intrinseche dei corsi d'acqua presi come oggetto di studio.

La strumentazione ha permesso di marcare rapidamente 18179 punti sull'Arno e 18316 punti sugli affluenti per un totale di 125.7 km di sponda mappata nel primo caso e 73.5 km nel secondo. Le difficoltà derivanti dalle limitazioni strumentali del sistema GPS, sono stati superati integrando i rilievi geodetici con le informazioni derivanti da una cartografia di dettaglio (CTR e ortofoto, in scala 1:2000 ove presente). Per quanto riguarda il tratto dell'Arno preso in considerazione le zone arginate hanno una estensione nettamente inferiore ai settori dotati di solo ciglio di sponda (rispettivamente 39.2 km e 86.5 km), mentre la situazione si inverte nel computo totale degli affluenti analizzati (rispettivamente 61.8 km e 11.7 km). Le opere idrauliche identificate nelle fasce perifluviali sono complessivamente 228 per l'Arno e 340 per i suoi tributari con una diversificazione maggiore per quanto riguarda gli interventi effettuati in alveo. In entrambi i casi i rilievi sembrano confermare l'artificialità di gran parte

dei segmenti esaminati, specialmente degli affluenti dell'Arno, che per il 95 % attraversano zone pianeggianti a differente pressione antropica.

Osservando inoltre lo stato di conservazione dei manufatti di maggiore rilevanza idraulica descritti durante la prima fase del lavoro (argini, ponti, opere idrauliche) si sono evidenziate tutte le principali criticità da mettere in correlazione con la dinamica fluviale ordinaria e straordinaria. Si sono così segnalate le situazioni da tenere sotto controllo e quelle in cui, in linea teorica, sarebbe possibile intervenire preventivamente. Tra gli elementi di importanza idraulica maggiormente danneggiati risultano senza dubbio le pescaie/traverse dell'Arno, opere trasversali alla corrente che sono notoriamente in grado di influenzare il trasporto solido del corso d'acqua in oggetto. In relazione al loro stato di conservazione e all'impatto che hanno sulla dinamica d'alveo è stato effettuato un approfondimento d'indagine su tutti gli sbarramenti ancora presenti nel letto dell'Arno. Nello scegliere le modalità operative la ricerca è stata orientata non soltanto al recupero delle funzionalità idrauliche, ma anche all'eventuale riconversione delle strutture alla produzione di energia elettrica pulita, seguendo l'attuale sensibilità in materia delle istituzioni toscane. Le nuove analisi hanno portato a determinare per le opere trasversali alla corrente dotate di annesso un differente grado di fattibilità secondo i due obiettivi proposti, individuando nella pescaia delle Sieci, dell'Ellera e della Martellina i siti maggiormente adatti per un rapido intervento di recupero. Per quanto riguarda invece le opere non dotate di annessi sono state indicate quelle dell'Isolotto e di Porto di Mezzo come le più idonee, previo adeguato risanamento strutturale, in cui realizzare ex novo mini centrali idroelettriche.

La seconda parte del progetto di ricerca ha riguardato l'applicazione dei dati al controllo della sicurezza lungo l'Arno in relazione al problema della tracimazione e della rotta arginale.

Dal confronto tra le quote arginali inizialmente acquisite lungo l'Arno con i risultati derivanti dalle modellazioni idrauliche di piena effettuate dall'autorità di Bacino è derivata la perimetrazione delle aree a rischio tracimazione per vari tempi di ritorno (T30, T100, T200, T500). A queste sono state poi aggiunte le considerazioni derivanti dall'analisi del franco di sicurezza nelle medesime situazioni al contorno.

I risultati mostrano che già per gli eventi più ricorrenti (T30) la zona compresa tra la confluenza della Greve e del Bisenzio è destinata a soccombere alle acque di esondazione, così come in aree molto ristrette in prossimità di Incisa.

Per eventi con tempi di ritorno centennali la situazione diventa maggiormente critica nel primo dei luoghi suddetti poiché i settori coinvolti aumentano notevolmente e per la prima volta soggiacciono allo straripamento anche i centri abitati di Signa, Lastra a Signa, Ponte Signa e

Porto di Mezzo. In pratica tutta la parte terminale del Valdarno medio (confluenza Greve – confluenza ombrone) è dotata di argini tracimabili per T100. Nel tratto invece tra Incisa e Figline sono esposti a sormonto tutti i settori arginali compresi tra le due cittadine ad esclusione del settore adiacente al ponte di collegamento con l’abitato del Matassino. Con le portate ipotizzate in questo caso compare per la prima volta nel centro di Firenze un piccolo tratto a rischio in corrispondenza del Lungarno delle Grazie.

Per quanto concerne le aree potenzialmente soggette ad esondazione per eventi con tempi di ritorno di 200 anni alle tre fasce finora citate si aggiunge l’intero settore arginale a protezione dell’abitato di Brucianesi. La sicurezza delle fasce perifluviali del tratto terminale del Valdarno Medio risulta già completamente compromessa per T100 così come i territori compresi tra Incisa e Figline. Eventi duecentennali producono semmai estese aree tracimabili a Monte di Figline, il quale risulta ancora pressoché sicuro dalla tracimazione diretta. Nella città di Firenze si registra l’ampliamento dei settori arginali critici prospicienti al centro storico (dal lungarno delle Grazie, al lungarno generale Armando Diaz) e sulla sponda opposta si presenta un nuovo settore critico in corrispondenza della terrazza antistante alla piazza Giuseppe Poggi. L’area urbana fiorentina presenta tuttavia altri due settori in cui l’acqua con le portate supposte dal modello idraulico potrebbe fuoriuscire; uno è collocato in prossimità del ponte di Varlungo (subito a monte e a valle), mentre l’altro si trova nel quartiere dell’Isolotto all’altezza del lungarno dei Pioppi.

Infine per eventi con tempi di ritorno di 500 anni per i due tratti più valle (Brucianesi e settore terminale del Valdarno Medio) e quello compreso tra Incisa e Figline non si registra nessun aumento sostanziale delle aree inondabili in quanto esse risultano ampiamente sommerse già per portate inferiori. Si presentano però per la prima volta piccoli tratti a rischio nell’abitato di Incisa e nella zona di fronte al ponte che unisce Figline al Matassino. Infine la zona più a monte è caratterizzata da una criticità continua che è il risultato dell’allargamento delle aree tracimabili individuate per T200 fino all’altezza della località Restone lungo la sponda destra. Per quanto riguarda infine il tratto fiorentino abbiamo un significativo ampliamento delle tre aree esondabili già descritte. La situazione ovviamente più critica si evidenzia nel centro cittadino dove si ipotizza un ampliamento verso monte delle aree critiche precedentemente individuate lungo la sponda destra (dal Lungarno Generale Armando Diaz al lungarno della zecca Vecchia) e la formazione di nuovi ed estesi settori a rischio sulla sponda opposta (dal lungarno Serristori a parte del lungarno Benvenuto Cellini).

In aggiunta alle suddette considerazioni le portate previste dalla modellazione dell’ADB sono state messe in relazione al franco di sicurezza usualmente adoperato in idraulica fluviale per i

corsi d'acqua primari (1.00 m. sulla piena con tempo di ritorno duecentennale). Il quadro che ne risulta è piuttosto delicato: attualmente molti tratti arginati, che sono stati ritenuti sicuri per tempi di ritorno centennali, risultano deficitari del franco arginale. Queste aree corrispondono generalmente ai settori immediatamente adiacenti a quelli che sono già stati considerati esondabili per eventi con tempi di ritorno centennali e tutti in maniera più o meno continua vengono sommersi dalle piene cinquecentennali ad eccezione del tratto cittadino fiorentino compreso tra il Ponte alla Vittoria al ponte alle Grazie che rimane sempre protetto dalla tracimazione diretta. Tutto questo sottolinea l'esistenza di un considerevole sottodimensionamento della sezione di alveo per gran parte dei tratti arginati dell'Arno, che sembrano essere più o meno efficaci a contrastare il sormonto, ma geometricamente inadeguati per far fronte ai meccanismi predisponenti alla rottura quali la spinta e la pressione dell'acqua. Tuttavia alcuni argini sottoposti ai suddetti scenari di pericolosità, specialmente nei tratti cittadini, hanno grandezze tali che basterebbero ridotti interventi di adeguamento per ridurre sensibilmente la pericolosità delle aree sottese.

Nell'ambito di una analisi più approfondita della pericolosità idraulica in ambito urbano fiorentino un modello dei flussi idrici superficiali relativi al centro storico e alla sua sponda opposta ha fornito un quadro complessivo della probabile risposta della città alla comparsa di flussi idrici superficiali, sia dovuti ad fuoriuscita dell'Arno che di provenienza diversa. Un contributo fondamentale alla realizzazione dei vari scenari possibili è stato fornito dalle recenti immagini LiDAR che il comune di Firenze ha messo a disposizione. Tecniche di analisi in ambiente GIS hanno dunque permesso di individuare per la prima volta con estrema precisione i flussi idrici cittadini in condizioni di normale scorrimento dell'Arno, in caso di sbarramento dei ponti e in caso di fuoriuscita indifferenziata del fiume.

Nel primo caso si evidenziano due principali bacini su entrambe le sponde che si chiudono in Arno nel tratto urbano più a monte e risultando per questo in grado di influenzare i deflussi del fiume nella sua zona più critica: l'area di Ponte Vecchio. Particolarmente importante è però il bacino situato in destra idrografica che comprende un'ampia area di pianura completamente urbanizzata e la cui forma risulta influenzata dall'evoluzione morfologica dell'area nei secoli passati. Le sue linee di deflusso permettono ad eventuali acque di scorrimento (pioggia non recepita dalle fognature, fluidi da tubazioni danneggiate o alluvioni) una defluizione regolare in Arno immediatamente prima del Ponte Vecchio, secondo uno schema idrico caratterizzato da tracciati di rilevanza diversa in cui quello avente un ordine maggiore arriva a sfiorare il centro storico senza però mai invaderlo. Tale distribuzione dei fluidi corrisponde perfettamente alla



diffusione delle acque durante gli eventi alluvionali in tempi storici che si sono verificati senza lo sbarramento di alcun ponte, proprio come ipotizzato nella nostra simulazione.

Il secondo caso rappresenta l'eventualità che si verifichi l'occlusione dei ponti in occasione di piene eccezionali con la conseguenza che le acque invadono le vie della città. In questa ipotesi la circolazione dei fluidi di esondazione in destra idrografica crea un bacino urbano che rispetto alle situazioni di normalità si amplia e arriva a comprendere tutti i settori più ad ovest, centro storico compreso, fino all'area di Porta al Prato. Inoltre ad esso si unisce il bacino della sponda opposta poiché i fluidi di questa area non trovando un normale deflusso verso valle sono costretti ad immettersi forzatamente nell'area scorrimento più vicina, oltrepassando anche le piccole barriere naturali e seminaturali che separano l'alveo dal bacino di destra. Anche in considerazione di un solo, e più probabile, sbarramento in prossimità del ponte Vecchio si ipotizza lo stesso sviluppo dei bacini con la differenza che una maggiore quantità di acqua è destinata a fuoriuscire subito a monte del ponte anziché distribuirsi nell'area da più punti critici. In questa eventualità le acque in circolazione nel tessuto urbano tendono a rientrare in Arno in prossimità del ponte alla Vittoria. I risultati di quest'ultima modellazione sono infine stati confermati dalle indagini sulle aree raggiunte dalle alluvioni storiche a seguito dello sbarramento del Ponte Vecchio.

L'ultima condizione analizzata è quella della fuoriuscita indifferenziata del fiume. In questo caso il bacino di sinistra non si unisce mai a quello di destra creando tra le colline limitrofe ed il corso dell'Arno una zona ristagnante di acqua che non riesce a defluire da nessuna parte. Essa corrisponde tra l'altro ad una porzione dell'antico alveo. Il bacino sulla sponda opposta mantiene grossomodo la stessa estensione raggiunta durante la precedente ipotesi di sbarramento dei ponti fintanto non si conclude l'evento calamitoso.

Le tre simulazioni, definite in base ad analisi esclusivamente geomorfologiche, forniscono dei probabili scenari nell'area urbana fiorentina che possono tuttavia essere integrati con informazioni di vario tipo per la definizione di problematiche specifiche. In questo lavoro, ad esempio, nell'ottica di una migliore definizione del grado di sicurezza nelle fasce perfluviali urbane derivante finora soltanto dalla sommaria conoscenza delle difese idrauliche sono stati integrati ai tre modelli suddetti tutti gli elementi critici mappati durante la prima fase del progetto discretizzando le aree maggiormente a rischio durante il verificarsi degli eventi di piena importanti. Ciò che anzitutto si evidenzia è che le zone arginate di criticità maggiore sono correlate principalmente alla presenza di scarichi fognari non protetti o allo sbocco di torrenti tombati. Dal confronto poi con i risultati delle aree potenzialmente esondabili nei vari tempi di ritorno è invece emerso che verificandosi un sormonto a monte del Ponte Vecchio

ancora prima di avere portate tali da provocare uno sbarramento si può supporre una inondazione del centro storico un po' prima di quanto le modellazioni possono far credere. A tal proposito dunque ulteriori indagini dell'area in questione, come ad esempio l'implementazione dei dati proposti con le informazioni relative alla distribuzione del reticolo fognario sotterraneo, potrebbero specificare meglio gli effetti di un alluvionamento da un punto di vista spaziale.

In conclusione l'ultima parte della ricerca ha riguardato la verifica dell'efficacia degli elementi di contenimento delle piene in considerazione del fatto che una seria e realistica trattazione del rischio idraulico deve includere l'ipotesi che gli argini possano cedere durante l'asservimento delle loro funzioni.

Quindi è stata effettuata una analisi di stabilità arginale di tipo speditiva, ma comunque basata su una adeguata caratterizzazione geotecnica dei rilevati in terra e da un'efficace modellizzazione delle condizioni al contorno presupposte in base agli scenari di rischio attesi. Il quadro conoscitivo acquisito nella prima fase del lavoro ha permesso di effettuare una simulazione preliminare di stabilità nel sito pilota di Restone (Figline Valdarno). In questo luogo prove in situ di tipo Borehole Shear Test e Amoozometer hanno determinato la caratterizzazione geotecnica dei terreni, mentre prove di laboratorio hanno fornito informazioni riguardanti la granulometria e le proprietà indice dei materiali. Poiché le proprietà geotecniche hanno presentato una variabilità spaziale minima il materiale che costituisce il rilevato è stato considerato omogeneo. Nonostante tale assunzione rappresenti un'approssimazione costituisce comunque una prima importante innovazione rispetto alla consuetudine di considerare gli argini infinitamente resistenti. La geometria degli argini è stata inserita nella modellizzazione utilizzando i dati provenienti dal rilevamento GPS.

L'analisi di stabilità degli argini è stata eseguita in cinque sezioni differenti utilizzando i codici di calcolo SEEP/W e SLOPE/W. Attraverso il programma SEEP/W v.5.1 è stato possibile modellare l'evoluzione spaziale e temporale delle pressioni interstiziali nell'argine in funzione dei processi di filtrazione determinati da un evento di piena. Le condizioni al contorno inserite nella modellizzazione ipotizzano una rapida risalita della falda in occasione di un importante crescita dei livelli che raggiungono il ciglio dell'argine. L'alluvione del 1966 costituisce l'episodio di riferimento in base al quale è stata articolata l'analisi: 50 ore complessive in cui la portata al colmo viene raggiunta in 15 ore e con una curva di decrescita e di esaurimento che raggiunge gradualmente il livello di base nelle successive 35 ore. La superficie freatica all'interno del terreno è stata costruita in maniera tale da essere in equilibrio con il livello del fiume prima dell'inizio dell'evento, mentre per quanto riguarda la pressione dell'acqua nei pori

essa varia con la distanza al di sopra della tavola d'acqua con un limite massimo imposto di -9,8kPa, corrispondente ad un carico di -1m. È opportuno ricordare che in questa analisi, essendo un'elaborazione preliminare e quindi in parte semplificata, non è stato tenuto in considerazione l'effetto delle precipitazioni collegate all'evento ipotizzato. Dopo queste fasi preparatorie, il software SEEP ha permesso di simulare l'evoluzione temporale dell'evento di piena e di calcolare la distribuzione delle pressioni interstiziali nell'argine e nella sponda distintamente per ogni intervallo temporale.

I risultati sono stati importati nel programma SLOPE\W, assieme ad altri parametri geotecnici, ed esso ha calcolato per ogni intervallo di tempo il fattore di sicurezza in maniera distribuita su tutta la sezione indagata. Tale analisi è stata attuata con il metodo dell'equilibrio limite di Morgenstern-Price che fornisce il valore del fattore di sicurezza (FS) per tutte le superfici di scivolamento ritenute teoricamente possibili (nel nostro caso circa 26.000) in base alle impostazioni geometriche di partenza. Per ogni spazio temporale il programma visualizza la superficie di scivolamento contraddistinta dal fattore di sicurezza minore. Queste procedure sono state ripetute per ognuna delle cinque sezioni arginali prese in considerazione. In ogni sezione il fattore di sicurezza rimane costante finché l'acqua dell'Arno non invade la zona golenale e lambisce il piede interno dell'argine. Da questo momento in poi il valore del fattore di sicurezza tende ad aumentare per effetto della pressione di confinamento esercitata dall'acqua sul petto dell'argine. In tutti i casi analizzati il valore di FS più alto viene raggiunto in corrispondenza della quota massima del livello dell'acqua, per poi diminuire durante la discesa di tale livello, rimanendo comunque ad un valore maggiore di uno (condizione di stabilità) per tre sezioni su cinque. Nelle restanti due sezioni il fattore di sicurezza assume valori negativi (condizione di instabilità) quando il livello dell'acqua è calato fino a raggiungere il piede dell'argine ed il valore minimo si riscontra in corrispondenza dello step temporale immediatamente successivo. In entrambi i casi la rottura avviene al piede interno dell'argine per scivolamento rotazionale, che non ha mai dimensioni estese ma è comunque indice di una situazione preoccupante perché il programma non tiene in considerazione gli effetti destabilizzanti che un tale fenomeno potrebbe avere negli intervalli temporali successivi. Una volta effettuata la modellazione per ciascuna sezione arginale, il confronto tra la loro geometria e la loro condizione di stabilità ha permesso di estrapolare un criterio morfometrico con il quale estendere a tutta la zona di indagine le considerazioni derivanti dalle singole analisi. Di fatto osservando le dimensioni dei principali elementi degli argini è stato riscontrato che i rilevati con una larghezza della testa minore e contemporaneamente un dislivello maggiore tra la quota della testa e quella del piede interno sono associati a sezioni instabili. Al

contrario gli argini più larghi e più bassi sul fianco interno sono risultati stabili per le simulazioni effettuate. Nessuna conclusione relativa al rapporto pendenza dei fianchi e instabilità è stata nel contempo individuata con i dati a disposizione. Pertanto, in relazione alle considerazioni suddette, l'intero sito è stato adeguatamente suddiviso distinguendo zone instabili e zone stabili ad eventi di piena associabili a quella del 1966. In particolare il tratto prospiciente l'abitato di Figline (circa 600m) e quello compreso tra la località Casa Nuova ed il limite provinciale (circa 1500m) sono caratterizzati da instabilità e dunque da tenere maggiormente sotto controllo.

La possibilità di simulare in maniera più complessa l'evento di piena ed aggiungere alla stessa sia differenze strutturali minori (strade asfaltate sulla sommità, vegetazione arborea sui fianchi, ecc.) che la presenza di influenze esterne (piogge, attività antropica, ecc.) in futuro potranno senz'altro discriminare più dettagliatamente le aree arginali stabili da quelle instabili.





## 9 BIBLIOGRAFIA

- AAVV (2003). *Prontuario dell'ingegnere, nuova edizione riveduta e aggiornata*. A cura di Guadagni Andrea, Hoepli Editore. Pagine XXII-970.
- AAVV (2005). *GPS: Guida all'uso del GPS per il rilevamento del territorio e l'aggiornamento cartografico*. Maggioli Editore, pp. 321
- AAVV (2006). *Encyclopedia of soil science*, Edition: 2. R. Lal editor.
- ADB ARNO (1996). *Piano di bacino del fiume Arno: Rischio idraulico. Sintesi del progetto di piano stralcio. Quaderno n°5*, pp. 250.
- ADB ARNO (2002). *Progetto di Piano stralcio per l'assetto idrogeologico (PAI)*.
- ADB MAGRA (2006). *Piano Stralcio - Assetto idrogeologico del Bacino del Fiume magra e del Torrente Parmignola*.
- AGNELLI A., BILLI P., CANUTI P. & RINALDI M. (1998). *Dinamica morfologica recente dell'alveo del fiume Arno*. Pubblicazione CNR-GNDICI n. 1739, Pacini Editore, pp.191.
- AMOOZEGAR A. (1989). *Compact constant head permeameter for measuring saturated hydraulic conductivity of the vadose zone*. Soil Sci Soc Am J 53:1356–1361
- AMOOZEGAR A. (1992). *Compact constant head permeameter: a convenient device for measuring hydraulic conductivity*. In: C.G. Topp, Editor, *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory Into Practice*, Special Publication vol. 30, Soil Science Society of America, Madison, WI, USA (1992), pp. 31–42.
- ANDERSON M.G. & KNEALE P.E. (1987). *Instrumentation of pore pressure and soil water suction*. Anderson M.G. e Richards K.S. (eds.), "slope stability", Wiley and sons Ltd.
- APAT (2004). *Atlante delle opere di sistemazione fluviale. Manuali e linee guida*. Dipartimento Difesa del Suolo, Roma.
- ARPAT (2007). *Mugnone e Terzolle: due torrenti storici da salvaguardare e riqualificare*. Coordinamento editoriale: Silvia Angiolucci, ARPAT. Redazione: Gabriele Rossi, ARPAT. Cd-rom gratuito.
- ARYA L.M. & PARIS J.F. (1981). *A physico-empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data*. Soil Sci. Soc. Am. J. 45, 1023-1030.
- BAGGI V. (1921). *Costruzioni idrauliche*. Ed. Utet, Milano.
- BARZAGHI R., BETTI B., BORGHI A., SONA G. & TORNATORE V. (2002). *The Italian quasi-geoid ITALGEO99*. Bollettino di Geodesia e Scienze Affini - LXI N°1.

- BECCHI I. & PARIS E. (1989). *Il corso dell'Arno e la sua evoluzione storica*. *Acqua Aria* 6, 64-652.
- BECCHI I., CAPORALI E., CASTELLANI L., PALMISANO E. & CASTELLI F. (1995). *Hydrological control of flooding: Tuscany, October 1992*. *Surveys in Geophysics* 16, 227:252.
- BENINI G. (1990). *Sistemazioni idraulico-forestali*, Ed. UTET.
- BIGGI I. (2006). *Comportamento delle rampe in massi in presenza di trasporto solido*. Tesi di laurea, università di Pisa.
- BILLI P. & RINALDI M. (1997). *Human impact on sediment yield and channel dynamics in the Arno River basin (central Italy)*. In: WALLING, D.E., PROBST, J.L. (Eds.): "Human impact on erosion and sedimentation", IAHS Publications No. 245, pp. 301-311.
- BOCCALETTI M., COLI M., DECANDIA F.A., GIANNINI E. & LAZZAROTTO A. (1980). *Evoluzione dell'Appennino Settentrionale secondo un nuovo modello strutturale*. In *Mem. Soc Geol. It.*, 21, 359-373.
- BORTOLOTTI V. (1992). *Appennino Tosco-Emiliano. Guide Geologiche Regionali*. Società Geologica Italiana, BE-MA editrice.
- CABRUCCI A. (1996). *GPS Guida introduttiva all'uso del GPS in geodesia e topografia*. Nikon Instruments S.p.A. Firenze.
- CALDO C. & GUARRASI V. (1994). *Beni culturali e geografia*, Bologna, Patron.
- CALZOLAIO R. (2006). *Caratteristiche di una stazione GPS differenziale ed analisi dei dati*. Tesi di Laurea. Università degli Studi di Roma Tor Vergata.
- CAMPANA S. (2006a). *DGPS e mobile GIS per l'archeologia dei paesaggi*. In *Laser scanner e GPS: paesaggi archeologici e tecnologie digitali 1*, atti del workshop, 3 marzo 2005 Grosseto. Edizioni all'Insegna del Giglio. Florencia: 201-225.
- CANUTI P., CENCETTI C., RINALDI M. & TACCONI P. (1994). *The fluvial dynamics of the Arno River: 2. Historical evolution of the Arno River bed*. *Memorie Società Geologica Italiana* 48, pp. 851-864.
- CANUTI P., CASAGLI N., FARINA P., FERRETTI A., MARKS F. & MENDUNI G. (2006). *Analisi dei fenomeni di subsidenza nel bacino del fiume Arno mediante interferometria radar*. *Giornale di Geologia Applicata* 4 pp. 131-136
- CAPORALI E., RINALDI M. & CASAGLI N. (2005). *The Arno River floods*. *Giornale di Geologia Applicata*, 1, 177-192.
- CASAGLI N., MORETTI S., CATANI F., CAROLI G., MORELLI S. & SEGONI S. (2007). *Approfondimento e completamento dello studio relativo alle pescaie/traverse del corso dell'Arno e degli edifici annessi per lo sfruttamento dell'acqua come forza motrice, nel*

- tratto compreso tra i comuni di Figline Valdarno e Signa - Lastra a Signa. Rapporto finale del contratto di ricerca tra Amministrazione Provinciale di Firenze e Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Firenze, Settembre 2007.*
- CASTIGLIONI G.B. (1991). *Geomorfologia*. Ed. UTET, Seconda Edizione, pp. 436.
- CATANI F., CASAGLI N., ERMINI L., RIGHINI G. & MENDUNI G. (2005). *Landslide hazard and risk mapping at catchment scale in the Arno River Basin*. *Landslides* 2, 329-342.
- CENCETTI C. & TACCONI P. (2004). *The Fluvial Dynamics of the Arno River*. *Giornale di Geologia Applicata* I, pp. 193-202.
- COLI M., AGILI F., PINI G. & COLI N. (2004). *Firenze: il suo impatto sull'evoluzione geomorfica dell'area*. *Il Quaternario, Italian Journal of Quaternary Sciences*, 17 (2/1), 195-211.
- DA DEPPO L. (2006). *Difese arginali dei territori di pianura. In Tecniche per la Difesa dall'Inquinamento*. Atti 26° Corso di aggiornamento, 22-25 Giugno 2006.
- DANA P.H. (1997). *Global Positioning System (GPS) Time Dissemination for Real-Time Applications*. *Real-Time Systems* 12 (1), pp. 9-40.
- DAPPORTO S. (1999). *Processi di erosione e meccanismi di instabilità delle sponde del fiume Arno*. Tesi di Laurea, Università degli Studi di Firenze, 298 pp.
- DAPPORTO S., FOCARDI P. & VANNOCCI P. (2000). *La parametrizzazione geotecnica di un materiale non saturo mediante prove in sito*. *Geologia Tecnica e Ambientale*, 3, 5-11.
- DAPPORTO S. (2003). *Processi di erosione e meccanismi di instabilità di sponde fluviali: monitoraggio, modellazione e analisi*. Tesi di dottorato, Università degli Studi di Firenze.
- DONATI L., GRANATIERO G. & BOLOGNESI M. (2008). *Acque e territorio. Progetti e regole per la qualità dell'abitare*. pp. 144, editore Firenze University Press.
- ERCOLINI M. (2006). *Dalle esigenze alle opportunità. La difesa idraulica fluviale occasione per un progetto di "paesaggio terzo"*. Tesi Dottorato di Ricerca in Progettazione Paesistica.
- FABBRI M., GARBIN F., LANZINI M. & SCARAPAZZI M. (2007). *Interpretazione dei parametri geotecnici di laboratorio*, pp. 288. Di Virgilio Editore - Collana LASINTESI
- FREDLUND D.G., MORGENSTERN N.R. & WIDGER R.A. (1978). *The shear strengths of unsaturated soil*. *Canadian Geotechnical journal*, 15.
- FREDLUND D.G. (1986). *Slope stability analysis incorporating the effect of soil suction*. Anderson M.G. e Richards K.S. (eds.), "slope stability", Wiley and sons Ltd.



- FREDLUND D.G & RAHARDJO H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soil*. Wiley and sons Ltd.
- GREEN R.E. & COREY J.C. (1971). *Calculation of hydraulic conductivity: A further evaluation of some predictive methods*, Proc. Soil Sci. Soc. Am. 35, 3-8.
- HANDY R.L. (1986). *Borehole shear test and slope stability*. Proceedings of in Situ '86, GT Div. ACSE.
- HERITAGE G.L. & HETHERINGTON D. (2005). *The use of high-resolution field laser scanning for mapping surface topography in fluvial systems*. International Association of Hydrological Scientists Red Book Publication. IAHS Publication 291, pp278-284.
- HIGGINS M.B. (1999), *Heighting with GPS: Possibilities and Limitations*. In the Proceedings of: Geodesy and Surveying in the Future: The Importance of Heights, Jubilee Seminar: 25 Year of Motorised Levelling, Sponsored by Commission 5 of the International Federation of Surveyors (FIG), Gavle, Sweden, March 15-17.
- KAPLAN E. (2005). *Understanding Gps: Principles And Applications*, Second Edition. Artech House editor, pp.644.
- KINZEL P.J. (2008). *River channel topographic surveys collected prior to and following elevated flows in the central Platte River, Nebraska, spring 2008*. U.S. Geological Survey Data Series 380, 10 p.
- KRAHN J. (2004a). *Seepage modeling with SEEP/W: An engineering methodology*. GEO-SLOPE Int. Ltd., 398 p., Calgary, AB, Canada.
- KRAHN J. (2004b). *Stability modeling with SLOPE/W: An engineering methodology*. GEO-SLOPE/W Int. Ltd., Calgary, AB, Canada.
- LANCELLOTTA R. (1993). *Geotecnica* (2° edizione). Zanichelli editore.
- LUTENEGGER A.J., REMMES B.D. & HANDY, R.L. (1978). *Borehole shear test for stiff soils*. Journal of the Geotechnical Engr. Division, ASCE, 104, 1403-1407.
- LUTENEGGER A.J. & HALLBERG G.R. (1981). *Borehole Shear Test in geotechnical investigation*, Special Technical Publ. ASTM, 740, 566-578.
- LUTENEGGER A.J. & TIERNEY K.F. (1986). *Pore pressure effects in borehole shearing testing*. Proceedings of in Situ '86, GT Div. ACSE.
- MARTINI I.P. & SAGRI M. (1993). *Tectono-sedimentary characteristic of late Miocene-Quaternary extensional basin of Northern Appennines*. Earth Science Reviews, 34, 197-233.
- MARZOLO F. (1989). *Costruzioni idrauliche*. CEDAM, Padova.

- MASEROLI R. (1995). *Il Sistema di riferimento WGS84*, Bollettino di Geodesia e Scienze Affini, n. 2 – Firenze, IGM.
- MILAN D.J., HERITAGE G.L. & HETHERINGTON D. (2007). *Application of a 3D Laser Scanner in the Assessment of Erosion and Deposition Volumes and Channel change in a Proglacial River*, Earth Surface Processes and Land Forms, Vol.32, 1657-1674.
- M.LL.PP. Ministero dei Lavori Pubblici, Servizio Idrografico Ufficio di Pisa, (1951-1973). *Annali Idrologici, parte seconda*. Istituto Poligrafico dello Stato, Roma.
- MOROZZI F. (1762). *Dello Stato antico e moderno dell'Arno e delle cause e de' rimedi delle sue inondazioni. Ragionamento storico-matematico vol.2*. Firenze-Stecchi, 79 pp.
- NARDI R., DEL SEPPIA N., SADUN S. & FALASCHI F. (2008). *Modellazione degli alvei fluviali e delle aree a rischio idraulico alla luce delle nuove tecnologie disponibili (tecniche LIDAR e River Surveyor)*. Firenze, Ordine dei Geologi della Toscana. In Simposio del territorio e delle risorse naturali in Toscana, 43 – 51.
- NASERMOADDELI M.H. & PASCHE E. (2008). *Application of terrestrial 3D laser scanner in quantification of the riverbank erosion and deposition*. In: Proceedings of Riverflow 2008, Cesme-Ismir, Turkey, Sep. 3-5, Vol (3), pp.2407-2416.
- NATONI E. (1944). *Le piene dell'Arno e i provvedimenti di difesa*. Felice Le Monnier Editore, Firenze.
- NENCINI F. (1966). *Firenze i giorni del diluvio*. Sansoni editore. 136 pp
- PAGLIARA S. (2004). *Interventi idraulici al fiume Arno nella storia, da Pontedera alla foce*. Tesi di Laurea in Ingegneria Civile, Università degli Studi di Pisa.
- PANDELI E., CORTI S., FRANCESCHELLI M. & PECCHIONI E. (2001) – *The varicoloured slates of the Grassera Unit (Central-Eastern Elba, Tuscany): petrographical-mineralogical data and comparisons with other Tuscan and Ligurian-Piedmontese units*. Ofioliti, 26 (2a), 197-206.
- PEYRET F., BETAÏLLE D. & HINTZY G. (2000). *High-precision application of GPS in the field of real-time equipment positioning*. Automation in Construction 9 (3), pp. 299–314.
- PIRAS M. (2006). *Monitoring of deformations in real time using GPS measurements: data analysis and calculus procedures*. Tesi di dottorato, Politecnico di Milano.
- PRANZINI E. (1989). *A model of cusped delta erosion*. In: Proc. 6<sup>th</sup> Symp. Coastal and Ocean Management, ASCE, July 11-14, Charleston, SC, pp. 4345-4357.
- PROVINCIA DI FIRENZE (2006). *Un parco fluviale per l'Arno*. A cura di Ermini L. e Ulivieri L., Assessorato Pianificazione Territoriale. Editore EDIFIR.

- RADICIONI F. & SGUERSO D. (1992). *L'altimetria con il GPS*. Bollettino SIFET. n.3. pp. 51-77.
- RAVAZZANI G. (2004). *Processi idrologici nella modellistica di piena: analisi di un sistema di preallerta per il bacino del fiume Arno*. Tesi di dottorato pp.176. Dipartimento IIAR, Facoltà di Ingegneria, Politecnico di Milano.
- RAVIOLO P.L. (1993). *Il laboratorio geotecnico. Procedure di prova, elaborazione, acquisizione dati*. Editrice controls, Cernusco s/N.
- REGIONE TOSCANA & ARPAT (2001). *Rapporto sullo stato delle acque dei principali fiumi in Toscana*, Centro Stampa 2P, Firenze.
- REPETTI E. (1841). *Dizionario geografico, fisico, storico della Toscana*, Vol.4, Firenze, p. 521.
- RINALDI M. & RODOLFI G. (1993). *Risultati della prima fase dello studio degli effetti della diga di Bilancino sull'alveo del Fiume Sieve e sul campo di moto delle falde acquifere adiacenti*. Quaderni di Idronomia Montana, **13**, 85-128.
- RINALDI M. (1995) - *Dinamica di un alveo fluviale antropizzato: il Fiume Sieve (Toscana)*. Tesi di Dottorato di Ricerca in Geologia Applicata, Geomorfologia ed Idrogeologia, università degli studi di Perugia, VII Ciclo, 223 pp.
- RINALDI M. & SIMON A. (1998). *Bed level adjustment in the Arno River, central Italy*. *Geomorphology*, 22 (1), pp. 57-71.
- RINALDI M. (1999). *Variazioni morfologiche e condizionamenti antropici nel sistema fluviale dell'Arno*. *Geologia dell'Ambiente*, n. 1, Sigea, Roma.
- RINALDI M. (2006). *La prospettiva geomorfologica e le applicazioni nella gestione degli alvei fluviali*. Atti Giornate di Studio "Nuovi approcci per la comprensione dei processi fluviali e la gestione dei sedimenti. Applicazioni nel bacino del Magra." Sarzana, 24-25 Ottobre 2006, Autorità di Bacino del Fiume Magra, 39-58.
- SCRINZI G., FLORIS A. & PICCI M. (2000). *GPS e inventari forestali: posizionamento e ritrovamento di precisione di punti di campionamento in bosco*. Comunicazioni di ricerca dell'ISAF 99/1, Trento.
- SEED R.B., NICHOLSON P.G., DALRYMPLE R.A., BATTJES J.A, BEA R.G., BOUTWELL G.P, BRAY J.D., COLLINS B.D., HARDER L.F., HEADLAND J.R., INAMINE M.S., KAYEN R.E., KUHR R.A., PESTANA J.M., SILVA-TULLA F., STORESUND R., TANAKA S., WARTMAN J., WOLFF T.F., WOOTEN R.L. & ZIMMIE T.F. (2005). *Preliminary Report on the Performance of the New Orleans Levee Systems in Hurricane Katrina on August 29,*

2005. Report No. UCB/CITRIS - 05/01. University of California, Berkeley and American Society of Civil Engineers.
- STRAHLER A.N. (1952). *Hypsometric (Area-Altitude) Analysis Of Erosional Topography*. Geol.Soc. Of America Bulletin, New York, Vol. 63, Pp.1117-1142
- SUKEGAWA N. (1973). *Condition for the formation of alternate bars in straight alluvial channels*. International Symposium of River Mechanics, IAHR, Bangkok, Thailand, A58, 1-11.
- TACCONI P., CANUTI P., CENCETTI C. & RINALDI M. (1994). *The fluvial dynamics of the Arno River. 3. Sedimentary characteristics of the Arno River bed*. Mem. Soc. Geol. It., **48**, 943-956.
- THORNE C.R., MURPHEY J.B. & LITTLE W.C. (1981). *Bank stability and bank material properties in the bluffline streams of northwest Mississippi*. Report to the U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg District Office, USDA-SEA sedimentation laboratory, Oxford, Mississippi.
- TOFANI V. (2003). *Analisi dei meccanismi di innesco dei fenomeni franosi franosi del novembre 2000 in provincia di Pistoia*. Tesi di Laurea in Scienze Geologiche, Università degli studi di Firenze, Dipartimento di Scienze della Terra.
- TOFANI V. (2007). *Ricerca e sperimentazione di metodologie per la valutazione del rischio da frana a scala di bacino*. tesi di dottorato inedita.
- TRANQUILLA J.M. (1986). *Multipath and imaging problems in GPS receivers antennas*. IV Int. Geodetic Symposium on Satellite Positioning, vol. 1, 557-571.
- WESTFALL R. S. (1989). *Floods along the Bisenzio: Science and Technology in the Age of Galileo*. Technology and Culture, Vol. 30, No. 4, pp. 879-907.
- XIAO B., WAN F., WU C. & ZHANG K. 2006. *River cross-section surveying using RTK Technology: the Yangtze River project case study*. Coordinates: a monthly magazine on positioning, navigation and beyond, Delhi 2 (2006) 12, pp. 12–17, 2006
- ZOLIN G. (2005) *Corsi d'acqua alpini: ecologia e paesaggio*. Atti Del XLI Corso: Conoscere il sistema fiume nell'ambiente alpino.
- ZUCCALÀ D., DE LOTTO P. & BELOTTI M. (2005). *Tecniche di integrazione di dati topografici per applicazioni di idraulica fluviale e realizzazione di un modulo software in ambiente GIS*. Rapporto relativo al Progetto Siset – Sottoprogetto SITER. CESI, Studi Territoriali ed Ambientali.



SITI WEB:

<http://sister.agenziaterritorio.it>

<http://tycho.usno.navy.mil>

<http://www.adbarno.it>

<http://www.handygeotech.com>

<http://www.etimo.it>

<http://www.provincia.fi.it>

<http://www.consorziobonificaareaflorentina.it>

## **10. ALLEGATI**

Gli allegati riguardano le schede relative alle prove geotecniche effettuate durante la verifica di stabilità arginale. L'ordine di illustrazione segue quello in cui sono state realizzate le varie fasi di indagine:

- Analisi Granulometrica
- Proprietà indici
- Limiti di Atterberg
- Borehole shear test
- Amoozemeter test

Certificato n.	<b>621</b>	Pagina	<b>1 / 2</b>	Progetto	<b>Plantario</b>	Data	<b>sett. 2007</b>
Località	<b>Figline Argine</b>			Sondaggio n.	-	Campione n.	<b>1</b>
Descrizione	<b>sabbia limoso argillosa</b>			Profondità (m)	-	Operatore	<b>PV</b>

ANALISI GRANULOMETRICA PER SETACCIATURA (Metodo a umido ASTM D2217)

Peso iniziale campione secco (g): **200.3**

Setaccio		Peso	Peso	Trattenuto	Passante
ASTM	$\phi$ (mm)	(g)	(%)	(%)	(%)
3 1/2"	90	0.00	0.00	0.00	100.00
2 1/2"	64	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/6"	30	0.00	0.00	0.00	100.00
5/8"	16	0.00	0.00	0.00	100.00
5/16"	8	0.85	0.42	0.42	99.58
No. 4	4.75	0.87	0.43	0.86	99.14
No. 10	2.000	1.38	0.69	1.55	98.45
No. 20	0.850	0.94	0.47	2.02	97.98
No. 40	0.425	1.85	0.92	2.94	97.06
No. 60	0.250	7.47	3.73	6.67	93.33
No. 140	0.106	66.34	33.12	39.79	60.21
No. 200	0.075	19.54	9.76	49.55	50.45

ANALISI GRANULOMETRICA PER SEDIMENTAZIONE (Metodo del densimetro)

Modello densimetro: ASTM 151 H N. 237

Taratura densimetro: b: -0.229 a: 9.01

Correzione al menisco: 0.5

Correzione temperatura,  $C_T$ : -L1: 0.227 -K1: -3.69

Correzione dispersivo,  $C_D$ : -5.14

Correzione densità,  $C_w$ : 0.85

Prova su passante setaccio No.: 200

Peso di volume parte solida,  $\gamma_s$  ( $g/cm^3$ ): 2.65

Peso iniziale totale,  $P$  (g): 40.29

Contenuto d'acqua iniziale,  $w$  (%): 17.9

Peso secco iniziale,  $P_s$  (g): 40

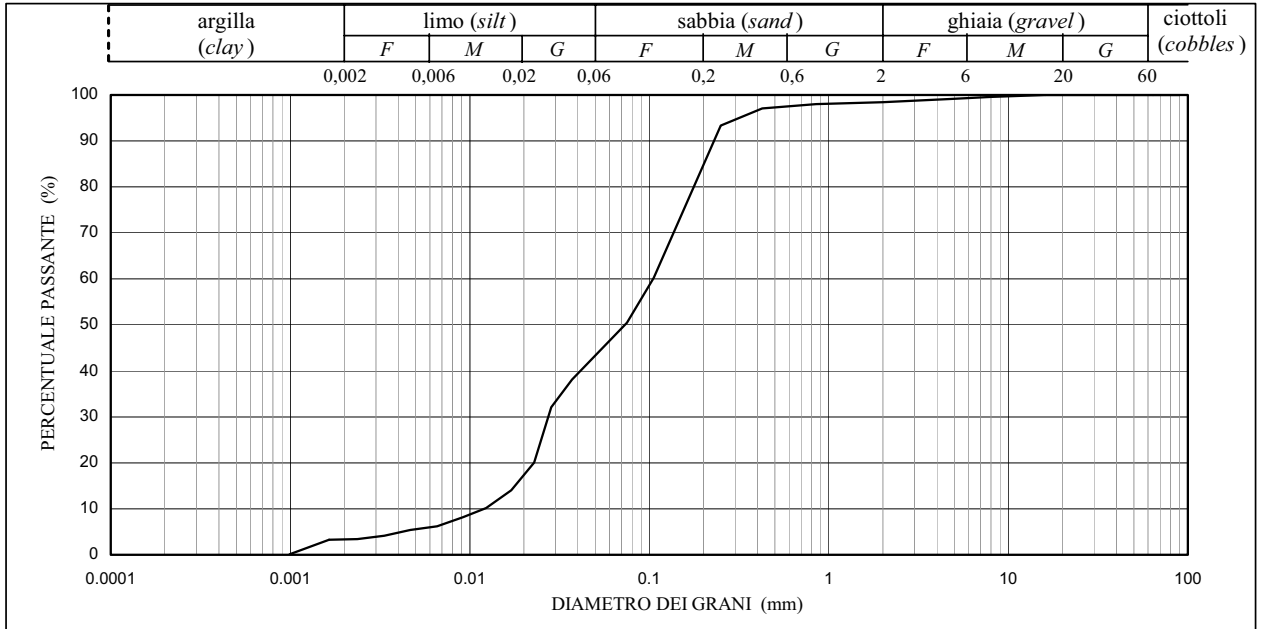
t	r	T	R'	$C_T$	$\eta_L$	$H_R$	D	%<D	%<D Tot.
(min)	(-)	(°C)	(-)	(-)	( $gs/cm^2$ )	(cm)	(mm)	(%)	(%)
0.5	1.0210	24	21.5	1.755	9.32E-06	4.086	0.037	75.590	38.14
1	1.0180	24	18.5	1.755	9.32E-06	4.773	0.028	63.631	32.10
2	1.0120	24	12.5	1.755	9.32E-06	6.148	0.023	39.713	20.04
4	1.0090	24	9.5	1.755	9.32E-06	6.835	0.017	27.755	14.00
8	1.0070	24.5	7.5	1.868	9.21E-06	7.293	0.012	20.234	10.21
15	1.0060	24.5	6.5	1.868	9.21E-06	7.522	0.009	16.248	8.20
30	1.0050	24.5	5.5	1.868	9.21E-06	7.751	0.007	12.262	6.19
60	1.0045	25	5.0	1.982	9.11E-06	7.866	0.005	10.720	5.41
120	1.0040	24.5	4.5	1.868	9.21E-06	7.981	0.003	8.275	4.18
240	1.0035	25	4.0	1.982	9.11E-06	8.095	0.002	6.734	3.40
480	1.0030	27	3.5	2.435	8.71E-06	8.210	0.002	6.549	3.30
1440	1.0020	24.5	2.5	1.868	9.21E-06	8.439	0.001	0.303	0.15



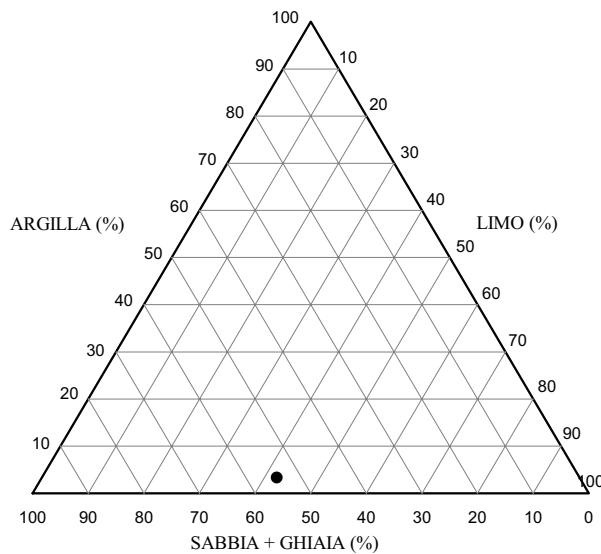
Università degli Studi di Firenze  
Dipartimento di Scienze della Terra  
via La Pira 4, 50121 Firenze

Laboratorio di Geologia Tecnica e Geomeccanica  
Tel: +39 055 2757532  
Fax: +39 055 2757489

**CURVA GRANULOMETRICA**



**DIAGRAMMA TRIANGOLARE**



**SINTESI RISULTATI**

Ciottoli (%) 0.0  
 Ghiaia (%) 1.5  
 Sabbia (%) 52.9  
 Limo (%) 42.2  
 Argilla (%) 3.4

D<sub>10</sub> (mm) 0.0120  
 D<sub>30</sub> (mm) 0.0275  
 D<sub>60</sub> (mm) 0.1053

Coefficiente di Uniformità, U: 8.8  
 Coefficiente di Curvatura, C<sub>c</sub>: 0.6

**CLASSIFICAZIONE**

Nomenclatura AGI (1977): sabbia con limo

Classificazione USCS: CL

wl (%) 23

wp (%) 11

*Il Responsabile*



Università degli Studi di Firenze  
 Dipartimento di Scienze della Terra  
 via La Pira 4, 50121 Firenze

Laboratorio di Geologia Tecnica e Geomeccanica

Tel: +39 055 2757532

Fax: +39 055 2757489



Certificato n. **622** Pagina **1 / 2** Progetto **Plantario** Data **sett. 2007**  
 Località **Figline Argine** Sondaggio n. **-** Campione n. **2**  
 Descrizione **Sabbia limosa argillosa** Profondità (m) **-** Operatore **A.C.**

ANALISI GRANULOMETRICA PER SETACCIATURA (Metodo a umido ASTM D2217)

Peso iniziale campione secco (g): **200.78**

Setaccio		Peso	Peso	Trattenuto	Passante
ASTM	$\phi$ (mm)	(g)	(%)	(%)	(%)
3 1/2"	90	0.00	0.00	0.00	100.00
2 1/2"	64	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/6"	30	0.00	0.00	0.00	100.00
5/8"	16	0.00	0.00	0.00	100.00
5/16"	8	0.00	0.00	0.00	100.00
No. 4	4.75	1.33	0.66	0.66	99.34
No. 10	2.000	2.41	1.20	1.86	98.14
No. 20	0.850	3.83	1.91	3.77	96.23
No. 40	0.425	5.34	2.66	6.43	93.57
No. 60	0.250	9.33	4.65	11.08	88.92
No. 140	0.106	60.44	30.10	41.18	58.82
No. 200	0.075	18.19	9.06	50.24	49.76

ANALISI GRANULOMETRICA PER SEDIMENTAZIONE (Metodo del densimetro)

Modello densimetro: ASTM 151 H N. 237

Taratura densimetro: b: -0.229 a: 9.01

Correzione al menisco: 0.5

Correzione temperatura,  $C_T$ : -L1: 0.227 -K1: -3.69

Correzione dispersivo,  $C_D$ : -5.14

Correzione densità,  $C_w$ : 0.85

Prova su passante setaccio No.: 200

Peso di volume parte solida,  $\gamma_s$  ( $g/cm^3$ ): 2.65

Peso iniziale totale,  $P$  (g): 40.29

Contenuto d'acqua iniziale,  $w$  (%): 17.9

Peso secco iniziale,  $P_s$  (g): 40

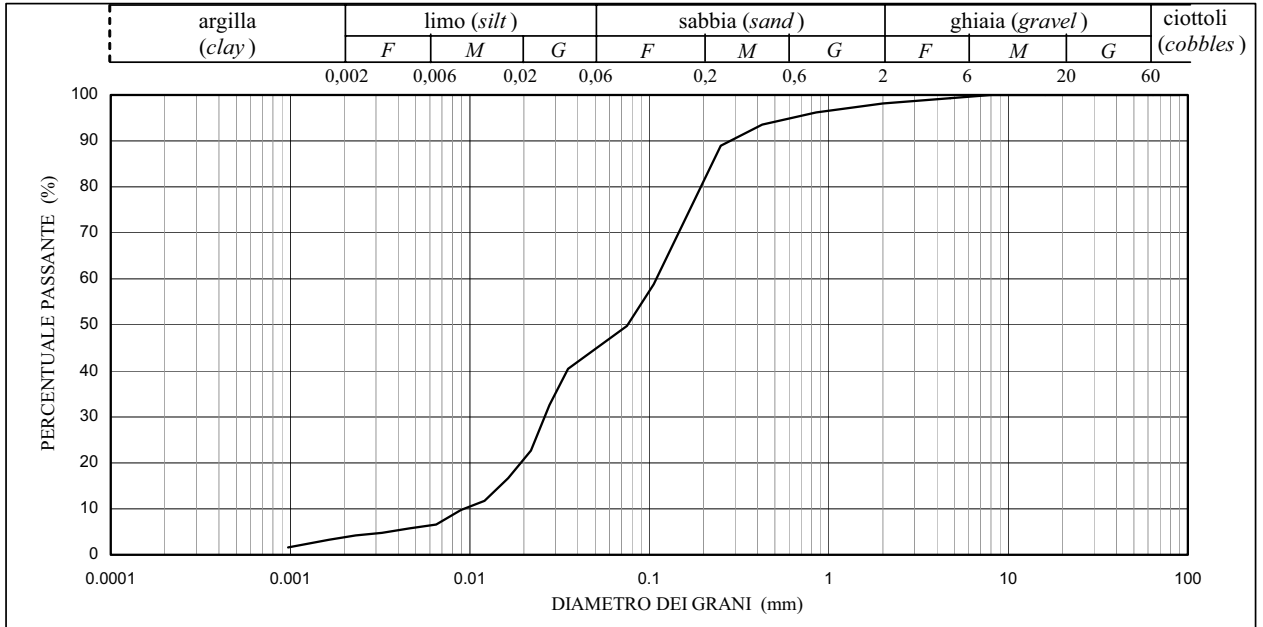
t	r	T	R'	$C_T$	$\eta_L$	$H_R$	D	%<D	%<D Tot.
(min)	(-)	(°C)	(-)	(-)	( $gs/cm^2$ )	(cm)	(mm)	(%)	(%)
0.5	1.0220	26	22.5	2.208	8.90E-06	3.857	0.035	81.384	40.50
1	1.0180	26	18.5	2.208	8.90E-06	4.773	0.028	65.439	32.56
2	1.0130	26	13.5	2.208	8.90E-06	5.919	0.022	45.508	22.65
4	1.0100	26	10.5	2.208	8.90E-06	6.606	0.016	33.549	16.69
8	1.0075	26	8.0	2.208	8.90E-06	7.179	0.012	23.583	11.74
15	1.0065	26	7.0	2.208	8.90E-06	7.408	0.009	19.597	9.75
30	1.0050	25.5	5.5	2.095	9.00E-06	7.751	0.007	13.166	6.55
60	1.0045	26	5.0	2.208	8.90E-06	7.866	0.005	11.625	5.78
123	1.0040	26	4.5	2.208	8.90E-06	7.981	0.003	9.631	4.79
240	1.0035	27	4.0	2.435	8.71E-06	8.095	0.002	8.542	4.25
480	1.0030	27	3.5	2.435	8.71E-06	8.210	0.002	6.549	3.26
1440	1.0025	25.5	3.0	2.095	9.00E-06	8.324	0.001	3.200	1.59



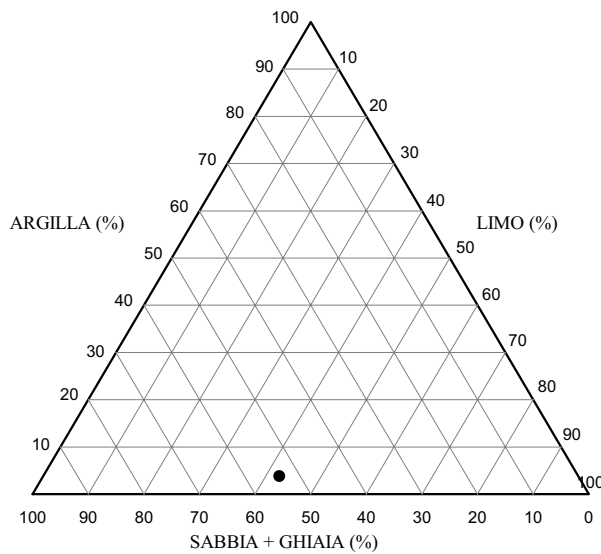
Università degli Studi di Firenze  
 Dipartimento di Scienze della Terra  
 via La Pira 4, 50121 Firenze

Laboratorio di Geologia Tecnica e Geomeccanica  
 Tel: +39 055 2757532  
 Fax: +39 055 2757489

### CURVA GRANULOMETRICA



### DIAGRAMMA TRIANGOLARE



### SINTESI RISULTATI

Ciottoli (%)	0.0
Ghiaia (%)	1.9
Sabbia (%)	51.9
Limo (%)	42.5
Argilla (%)	3.8

D <sub>10</sub> (mm)	0.0093
D <sub>30</sub> (mm)	0.0263
D <sub>60</sub> (mm)	0.1116

Coefficiente di Uniformità, U: 12.0  
 Coefficiente di Curvatura, C<sub>c</sub>: 0.7

### CLASSIFICAZIONE

Nomenclatura AGI (1977): sabbia con limo

Classificazione USCS: SC

wl (%) 25

wp (%) 17

*Il Responsabile*



Certificato n.	<b>625</b>	Pagina	<b>1 / 2</b>	Progetto	<b>Plantario</b>	Data	<b>sett 2007</b>
Località	<b>Figline Argine</b>			Sondaggio n.	-	Campione n.	<b>3</b>
Descrizione	<b>Sabbia limosa argillosa</b>			Profondità (m)	-	Operatore	<b>A.C.</b>

ANALISI GRANULOMETRICA PER SETACCIATURA (Metodo a umido ASTM D2217)

Peso iniziale campione secco (g): **200.38**

Setaccio		Peso	Peso	Trattenuto	Passante
ASTM	$\phi$ (mm)	(g)	(%)	(%)	(%)
3 1/2"	90	0.00	0.00	0.00	100.00
2 1/2"	64	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/6"	30	0.00	0.00	0.00	100.00
5/8"	16	0.00	0.00	0.00	100.00
5/16"	8	0.00	0.00	0.00	100.00
No. 4	4.75	0.00	0.00	0.00	100.00
No. 10	2.000	0.31	0.15	0.15	99.85
No. 20	0.850	0.41	0.20	0.36	99.64
No. 40	0.425	0.87	0.43	0.79	99.21
No. 60	0.250	6.83	3.41	4.20	95.80
No. 140	0.106	59.63	29.76	33.96	66.04
No. 200	0.075	25.13	12.54	46.50	53.50

ANALISI GRANULOMETRICA PER SEDIMENTAZIONE (Metodo del densimetro)

Modello densimetro: ASTM 151 H N. 237

Taratura densimetro: b: -0.229 a: 9.01

Correzione al menisco: 0.5

Correzione temperatura,  $C_T$ : -L1: 0.227 -K1: -3.69

Correzione dispersivo,  $C_D$ : -5.14

Correzione densità,  $C_w$ : 0.85

Prova su passante setaccio No.: 200

Peso di volume parte solida,  $\gamma_s$  ( $g/cm^3$ ): 2.65

Peso iniziale totale,  $P$  (g): 40.29

Contenuto d'acqua iniziale,  $w$  (%): 17.9

Peso secco iniziale,  $P_s$  (g): 40

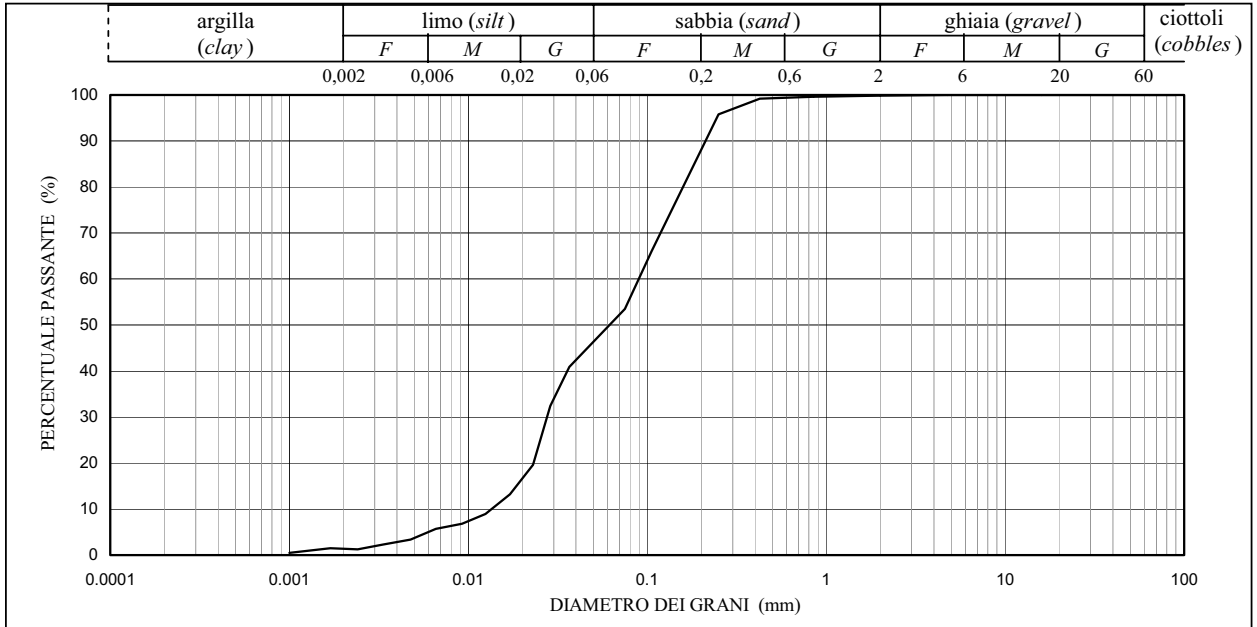
t	r	T	R'	$C_T$	$\eta_L$	$H_R$	D	%<D	%<D Tot.
(min)	(-)	(°C)	(-)	(-)	( $gs/cm^2$ )	(cm)	(mm)	(%)	(%)
0.5	1.0210	25	21.5	1.982	9.11E-06	4.086	0.037	76.494	40.92
1	1.0170	25	17.5	1.982	9.11E-06	5.002	0.029	60.549	32.39
2	1.0110	25	11.5	1.982	9.11E-06	6.377	0.023	36.631	19.60
4	1.0080	25	8.5	1.982	9.11E-06	7.064	0.017	24.672	13.20
8	1.0060	25	6.5	1.982	9.11E-06	7.522	0.012	16.700	8.93
15	1.0050	25	5.5	1.982	9.11E-06	7.751	0.009	12.714	6.80
30	1.0045	25	5.0	1.982	9.11E-06	7.866	0.007	10.720	5.74
60	1.0035	24.5	4.0	1.868	9.21E-06	8.095	0.005	6.282	3.36
123	1.0030	24.5	3.5	1.868	9.21E-06	8.210	0.003	4.289	2.29
240	1.0025	24.5	3.0	1.868	9.21E-06	8.324	0.002	2.296	1.23
480	1.0025	25	3.0	1.982	9.11E-06	8.324	0.002	2.748	1.47
1440	1.0025	23	3.0	1.528	9.53E-06	8.324	0.001	0.940	0.50



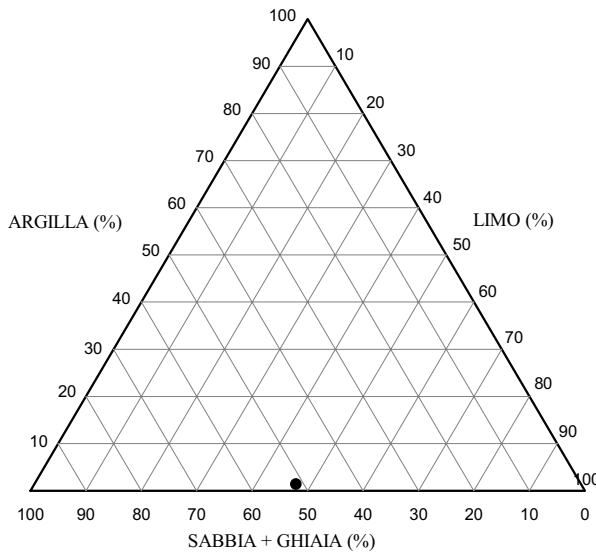
Università degli Studi di Firenze  
Dipartimento di Scienze della Terra  
via La Pira 4, 50121 Firenze

Laboratorio di Geologia Tecnica e Geomeccanica  
Tel: +39 055 2757532  
Fax: +39 055 2757489

**CURVA GRANULOMETRICA**



**DIAGRAMMA TRIANGOLARE**



**SINTESI RISULTATI**

Ciottoli (%) 0.0  
 Ghiaia (%) 0.2  
 Sabbia (%) 51.3  
 Limo (%) 47.2  
 Argilla (%) 1.4

D<sub>10</sub> (mm) 0.0136  
 D<sub>30</sub> (mm) 0.0277  
 D<sub>60</sub> (mm) 0.0911

Coefficiente di Uniformità, U: 6.7  
 Coefficiente di Curvatura, C<sub>c</sub>: 0.6

**CLASSIFICAZIONE**

Nomenclatura AGI (1977): sabbia con limo

Classificazione USCS: CL

wl (%) 23

wp (%) 11

*Il Responsabile*





PROPRIETA' INDICI

**Determinazione del contenuto naturale d'acqua**

Prova n°	1	2	3	4	5
Peso del terreno umido (g)	128.5				
Peso del terreno secco (g)	120.6				
Peso acqua (g)	7.89				
Contenuto d'acqua (%)	6.5				

**Determinazione del peso di volume**

Prova n°	1	2	3	4	5
Peso del terreno + acqua (g)	128.5				
Peso del terreno secco (g)	120.6				
Volume totale (cm <sup>3</sup> )	90.083				
Peso di volume totale (kN/m <sup>3</sup> )	13.99				
Peso di volume del terreno secco (kN/m <sup>3</sup> )	13.13				

**Determinazione del peso specifico**

Prova n°	1	2	3	4	5
Picnometro n°					
Peso del picnometro (g)					
Peso campione+picnometro (g)					
Peso campione+ picnometro +acqua (g)					
Peso Picnometro+acqua (g)					
Temperatura (°C)					
Fattore di correzione K	1	1			
Peso specifico					

**Grandezze fisiche calcolate**

Contenuto d'acqua (%)	6.5	
Peso specifico (-)	2.67	(valore assunto)
Indice dei vuoti (-)	0.99	
Porosità (%)	49.9	
Grado di saturazione (%)	17.6	
Peso di volume totale (kN/m <sup>3</sup> )	14.0	
Peso di volume del terreno secco (kN/m <sup>3</sup> )	13.13	
Peso di volume saturo (kN/m <sup>3</sup> )	18.02	

*Il Responsabile*



PROPRIETA' INDICI

**Determinazione del contenuto naturale d'acqua**

Prova n°	1	2	3	4	5
Peso del terreno umido (g)	122.1				
Peso del terreno secco (g)	114.1				
Peso acqua (g)	8.02				
Contenuto d'acqua (%)	7.0				

**Determinazione del peso di volume**

Prova n°	1	2	3	4	5
Peso del terreno + acqua (g)	122.1				
Peso del terreno secco (g)	114.1				
Volume totale (cm <sup>3</sup> )	96.952				
Peso di volume totale (kN/m <sup>3</sup> )	12.35				
Peso di volume del terreno secco (kN/m <sup>3</sup> )	11.54				

**Determinazione del peso specifico**

Prova n°	1	2	3	4	5
Picnometro n°					
Peso del picnometro (g)					
Peso campione+picnometro (g)					
Peso campione+ picnometro +acqua (g)					
Peso Picnometro+acqua (g)					
Temperatura (°C)					
Fattore di correzione K	1	1			
Peso specifico					

**Grandezze fisiche calcolate**

Contenuto d'acqua (%)	7.0	
Peso specifico (-)	2.67	(valore assunto)
Indice dei vuoti (-)	1.27	
Porosità (%)	55.9	
Grado di saturazione (%)	14.8	
Peso di volume totale (kN/m <sup>3</sup> )	12.4	
Peso di volume del terreno secco (kN/m <sup>3</sup> )	11.54	
Peso di volume saturo (kN/m <sup>3</sup> )	17.03	

*Il Responsabile*



### LIMITI DI ATTERBERG

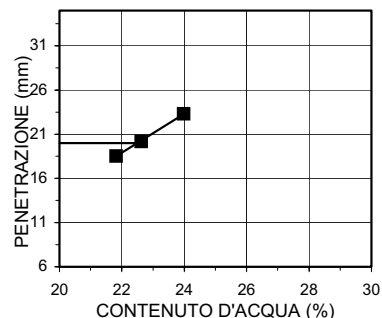
Campione: **disturbato**

Preparazione: **essiccato all'aria**

Vagliatura (setaccio No.40): **SI**

Contenuto d'acqua naturale,  $W_N$  (%): **1.9**

LIMITE LIQUIDO (BS 1377:1975)						
Prova numero:	1	2	3	4		
Penetrazione (mm):	18.5	18.6	20.4	20.0	23.1	23.5
Penetrazione media (mm):	<b>18.6</b>		<b>20.2</b>		<b>23.3</b>	
Tara (g):	22.2	28.66	29.57	22.23	22.51	22.9
Peso umido (g):	24.63	31.97	32.86	25.23	26.89	27.1
Peso secco (g):	24.20	31.37	32.26	24.67	26.04	26.29
Peso acqua (g):	0.43	0.60	0.60	0.56	0.85	0.81
Peso terra secca (g):	2.00	2.71	2.69	2.44	3.53	3.39
Contenuto d'acqua (%):	21.5	22.1	22.3	23.0	24.1	23.9
Cont. d'acqua medio (%):	<b>21.8</b>		<b>22.6</b>		<b>24.0</b>	

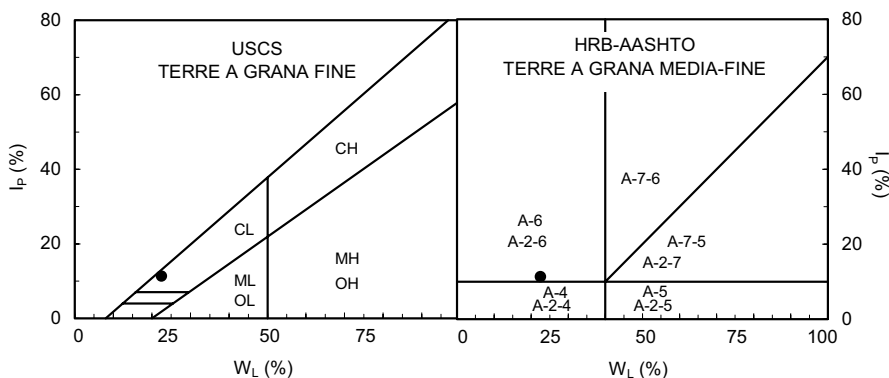


LIMITE PLASTICO (ASTM D 4318-93, CNR-UNI 10014)		
Tara (g):	22.22	22.45
Peso umido (g):	22.77	23.18
Peso secco (g):	22.72	23.10
Peso acqua (g):	0.05	0.08
Peso terra secca (g):	0.50	0.65
Contenuto d'acqua (%):	<b>10.0</b>	<b>12.3</b>

### RISULTATI

Limite liquido,  $W_L$  (%) **23**  
 Limite plastico,  $W_P$  (%) **11**  
 Indice di plasticità,  $I_P$  (%) **11**  
 Indice di consistenza,  $I_C$  (-) **1.81**  
 Indice di liquidità,  $I_L$  (-) **-0.81**  
 Indice di attività,  $A$  (-) **3.34**

### CLASSIFICAZIONE



SETACCIO	APERT. (mm)	% PASS.
No. 4	4.75	99.14
No. 10	2	98.45
No. 40	0.425	97.06
No. 200	0.075	50.45
% Argilla		3.4
Coeff. di Uniformità, U		8.8
Coeff. di Curvatura, Cc		0.6
$W_{LS}/W_L$		-

USCS: **CL**  
 argilla inorganica di bassa plasticità

HRB-AASHTO: **A-6**  
 (CNR UNI 10006)

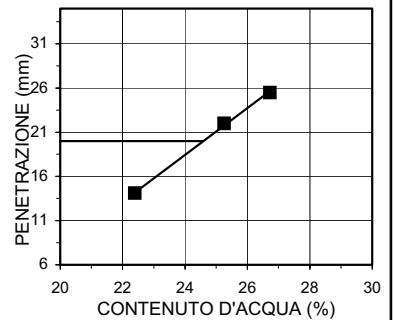
Il Responsabile



### LIMITI DI ATTERBERG

Campione: **disturbato** Preparazione: **essiccato all'aria** Vagliatura (setaccio No.40): **SI**  
 Contenuto d'acqua naturale,  $W_N$  (%): **5.6**

LIMITE LIQUIDO (BS 1377:1975)						
Prova numero:	1	2	3	4		
Penetrazione (mm):	13.9	14.3	21.9	22.1	25.5	25.5
Penetrazione media (mm):	<b>14.1</b>		<b>22.0</b>		<b>25.5</b>	
Tara (g):	22.13	22.3	22.45	22.88	29.56	22.51
Peso umido (g):	26.52	27.41	27.94	26.56	35.86	28.73
Peso secco (g):	25.73	26.46	26.83	25.82	34.51	27.44
Peso acqua (g):	0.79	0.95	1.11	0.74	1.35	1.29
Peso terra secca (g):	3.60	4.16	4.38	2.94	4.95	4.93
Contenuto d'acqua (%):	21.9	22.8	25.3	25.2	27.3	26.2
Cont. d'acqua medio (%):	<b>22.4</b>		<b>25.3</b>		<b>26.7</b>	

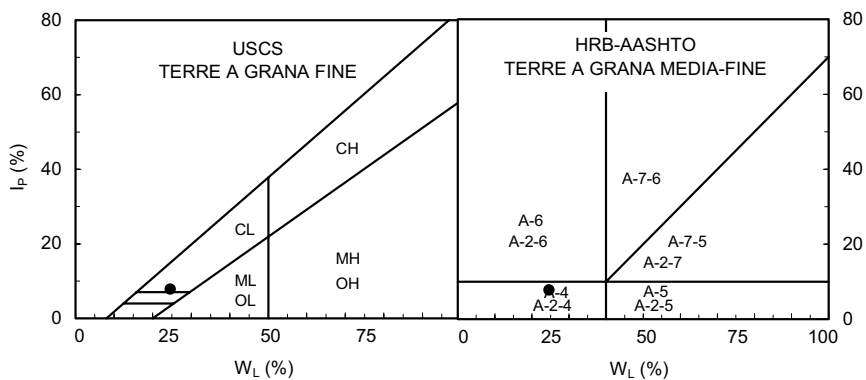


LIMITE PLASTICO (ASTM D 4318-93, CNR-UNI 10014)	
Tara (g):	22.22 22.73
Peso umido (g):	22.80 23.40
Peso secco (g):	22.72 23.30
Peso acqua (g):	0.08 0.10
Peso terra secca (g):	0.50 0.57
Contenuto d'acqua (%):	<b>16.0</b> <b>17.5</b>

### RISULTATI

Limite liquido,  $W_L$  (%) **25**  
 Limite plastico,  $W_P$  (%) **17**  
 Indice di plasticità,  $I_P$  (%) **8**  
 Indice di consistenza,  $I_C$  (-) **2.43**  
 Indice di liquidità,  $I_L$  (-) **-1.43**  
 Indice di attività,  $A$  (-) **2.06**

### CLASSIFICAZIONE



USCS: **SC**  
 sabbia argillosa

HRB-AASHTO: **A-4**  
 (CNR UNI 10006)

Il Responsabile

SETACCIO	APERT. (mm)	% PASS.
No. 4	4.75	99.34
No. 10	2	98.14
No. 40	0.425	93.57
No. 200	0.075	49.76
% Argilla		<b>3.8</b>
Coeff. di Uniformità, U		<b>12</b>
Coeff. di Curvatura, Cc		<b>0.7</b>
$W_{LS}/W_L$		-





**LIMITI DI ATTERBERG**

Campione: **disturbato** Preparazione: **essiccato all'aria** Vagliatura (setaccio No.40): **SI**  
 Contenuto d'acqua naturale,  $W_N$  (%): **6.4**

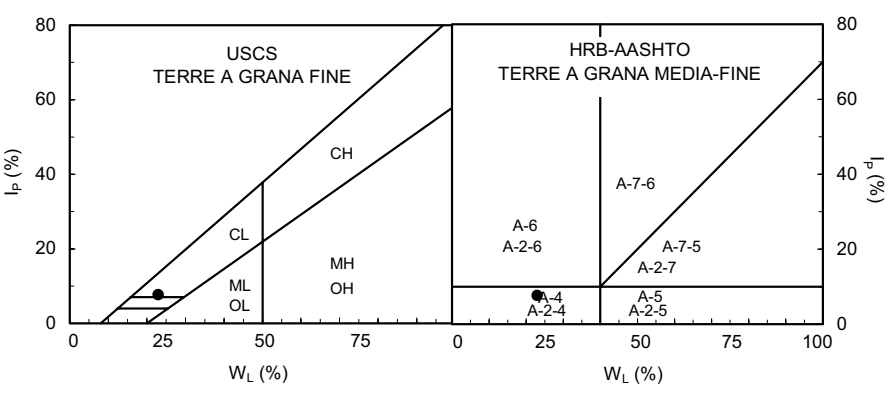
LIMITE LIQUIDO (BS 1377:1975)									
Prova numero:	1		2		3		4		
Penetrazione (mm):	12.5	13.0	19.7	19.9	22	22.4	25.8	26.1	
Penetrazione media (mm):	<b>12.8</b>		<b>19.8</b>		<b>22.2</b>		<b>26.0</b>		
Tara (g):	22.51	22.88	22.24	28.65	29.56	22.19	22.14	22.1	
Peso umido (g):	27.45	26.87	27.91	32.69	34.96	27.43	27.24	27.52	
Peso secco (g):	26.58	26.16	26.89	31.94	33.94	26.42	26.26	26.42	
Peso acqua (g):	0.87	0.71	1.02	0.75	1.02	1.01	0.98	1.10	
Peso terra secca (g):	4.07	3.28	4.65	3.29	4.38	4.23	4.12	4.32	
Contenuto d'acqua (%):	21.4	21.6	21.9	22.8	23.3	23.9	23.8	25.5	
Cont. d'acqua medio (%):	<b>21.5</b>		<b>22.4</b>		<b>23.6</b>		<b>24.6</b>		

LIMITE PLASTICO (ASTM D 4318-93, CNR-UNI 10014)		
Tara (g):	22.71	22.22
Peso umido (g):	23.30	23.04
Peso secco (g):	23.23	22.92
Peso acqua (g):	0.07	0.12
Peso terra secca (g):	0.52	0.70
Contenuto d'acqua (%):	<b>13.5</b>	<b>17.1</b>

**RISULTATI**

Limite liquido, $W_L$ (%)	<b>23</b>
Limite plastico, $W_P$ (%)	<b>15</b>
Indice di plasticità, $I_P$ (%)	<b>8</b>
Indice di consistenza, $I_C$ (-)	<b>2.16</b>
Indice di liquidità, $I_L$ (-)	<b>-1.16</b>
Indice di attività, $A$ (-)	<b>5.48</b>

**CLASSIFICAZIONE**



SETACCIO	APERT. (mm)	% PASS.
No. 4	4.75	100
No. 10	2	99.85
No. 40	0.425	99.21
No. 200	0.075	53.5
% Argilla		1.4
Coeff. di Uniformità, U		6.7
Coeff. di Curvatura, Cc		0.6
$W_{LS}/W_L$		-

USCS: **CL**  
 argilla inorganica di bassa plasticità

HRB-AASHTO: **A-4**  
 (CNR UNI 10006)

*Il Responsabile*



## Borehole Shear Test (BST)

Certificato N° **638**

N° prova: 1

Data: sett. 2007

Località: Figline

Operatore: C.S.M.

Orizzonte:

Materiale:

Foro: 1

Tensione (hPa): 822

Profondità (m): 0.36

TDR (%): 14

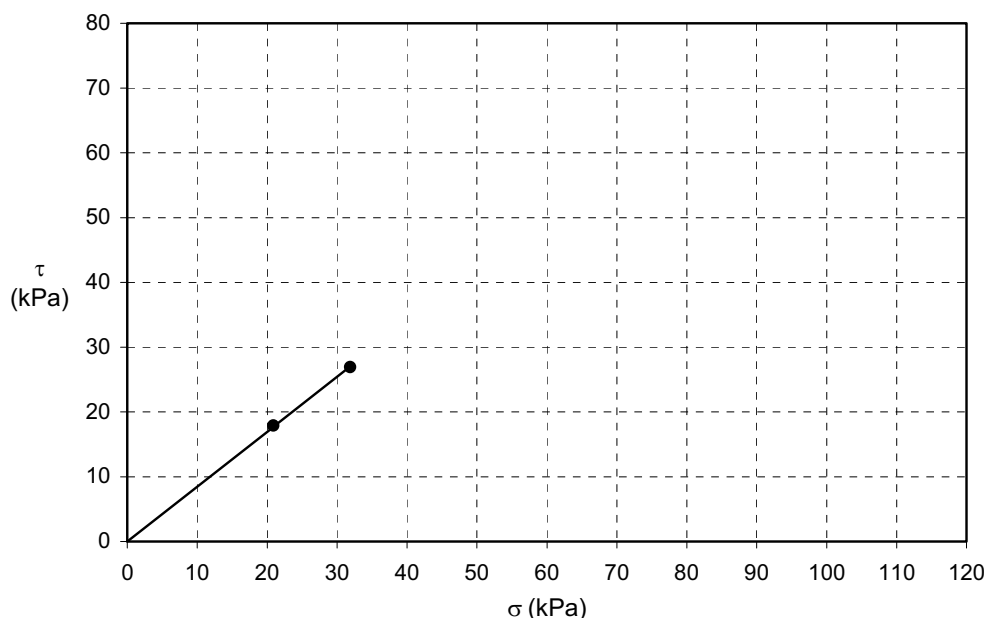
Durata consolidazione (min.):	10	8	8	8
Pressione normale:	23	34	44	
Pressione norm. corretta (kPa):	20.9	31.9	0.0	-2.1 -2.1
Sforzo di taglio:	16	25	38	
Sforzo di taglio corretto (kPa):	17.9	26.9	0	1.9 1.9

Risultati prova:  $c_a$  (kPa): **0.0**  
 $\phi'$  (°): **40.2**  
 $R^2$ : **1.000**

$$\tau = c_a + (\sigma - u_a) \operatorname{tg} \phi'$$

$$c_a = c' + (u_a - u_w) \operatorname{tg} \phi_b$$

$c'$  (kPa): **0**  
 $\phi^b$  (°): **-**



Note: -

## Borehole Shear Test (BST)

Certificato N° **639**

N° prova: 2

Data: sett. 2007

Località: Figline

Operatore: C.S.M.

Orizzonte:

Materiale:

Foro: 2

Tensione (hPa): 819

Profondità (m): 0.50

TDR (%): 14

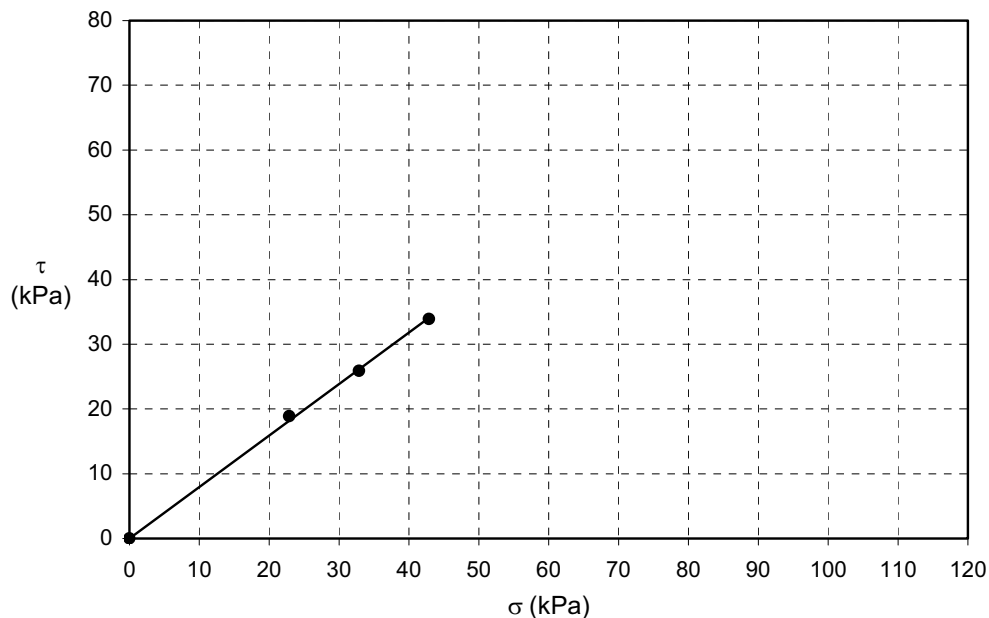
Durata consolidazione (min.):	10	8	8	8	
Pressione normale:	25	35	45	55	
Pressione norm. corretta (kPa):	22.9	32.9	42.9	0.0	-2.1
Sforzo di taglio:	17	24	32	40	
Sforzo di taglio corretto (kPa):	18.9	25.9	33.9	0	1.9

Risultati prova:  $c_a$  (kPa): **0.2**  
 $\phi'$  (°): **38.3**  
 $R^2$ : **0.999**

$$\tau = c_a + (\sigma - u_a) \operatorname{tg} \phi'$$

$$c_a = c' + (u_a - u_w) \operatorname{tg} \phi_b$$

$c'$  (kPa): **0**  
 $\phi^b$  (°): **-**



Note: -

## Borehole Shear Test (BST)

Certificato N° **640**

N° prova: 3

Data: sett. 2007

Località: Figline

Operatore: C.S.M.

Orizzonte:

Materiale:

Foro: 3

Tensione (hPa): 890

Profondità (m): 0.50

TDR (%): 14

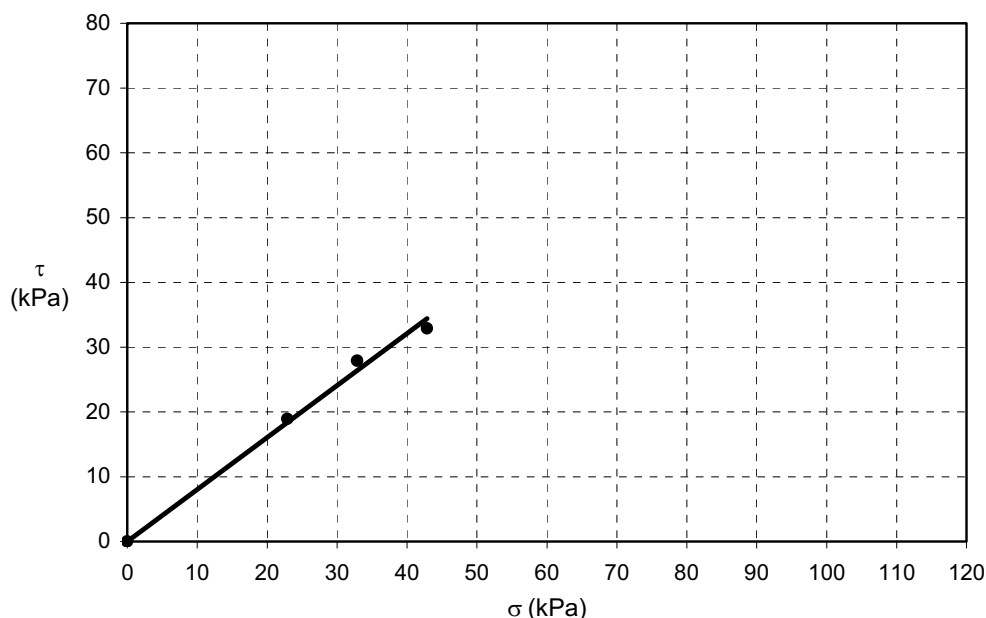
Durata consolidazione (min.):	10	8	8	8	
Pressione normale:	25	35	45	0	
Pressione norm. corretta (kPa):	22.9	32.9	42.9	0.0	-2.1
Sforzo di taglio:	17	26	31	0	
Sforzo di taglio corretto (kPa):	18.9	27.9	32.9	0	1.9

Risultati prova:  $c_a$  (kPa): **0.5**  
 $\phi'$  (°): **38.2**  
 $R^2$ : **0.993**

$$\tau = c_a + (\sigma - u_a) \operatorname{tg} \phi'$$

$$c_a = c' + (u_a - u_w) \operatorname{tg} \phi^b$$

$c'$  (kPa): **0**  
 $\phi^b$  (°): **-**



Note: -



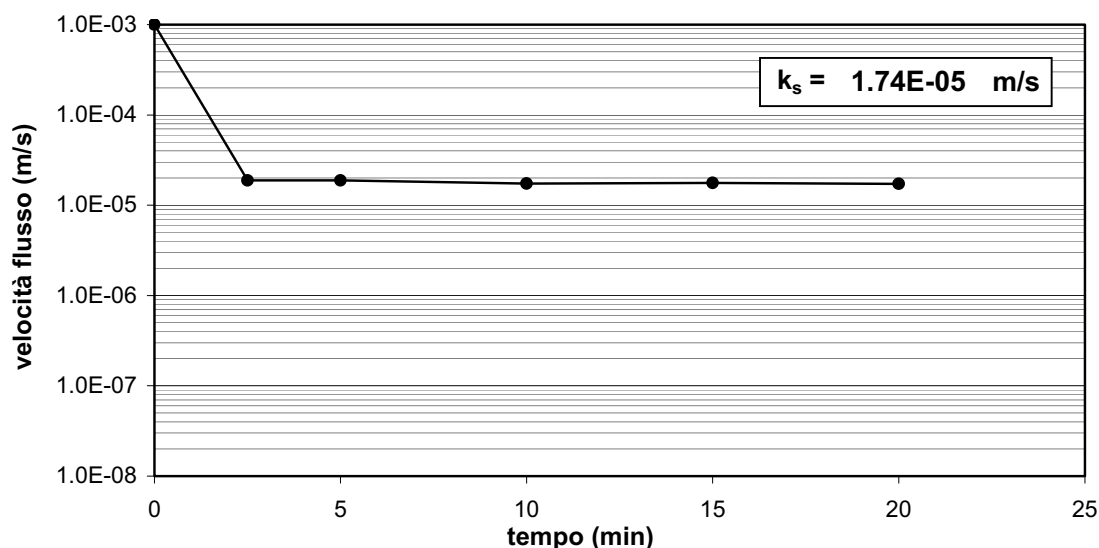
## Prova Amoozometer

Certificato n° : 617  
 N° prova: 1 Data: sett. 2007  
 Località: Restone Figline argine (pressi) Operatore: S.S.S.M. A.C  
 Orizzonte: A  
 Materiale: Riporto

profondità foro (cm): 71 misura livello iniziale (cm): 15  
 distanza fondo foro-liv. rif. (cm): 84 misura livello finale (cm): 15  
 carico acqua in foro (cm): 15 raggio foro (cm): 7.5  
 posizione valvola: 2 ON

coefficiente A: 0.000584 
 $A = (\sinh^{-1}(H/r) - ((r/H)^2 + 1)^{0.5} + r/H) / (2 * 3.14 * H^2)$

tempo (min)	tempo parziale (min)	lettura (cm)	dif. livello (cm)	vol. acqua (cm <sup>3</sup> )	portata (cm <sup>3</sup> /min)	vel. flusso (m/s)
0	0	38.1	0	0	0	1.00E-03
2.5	2.5	33.5	4.6	483	193.2	1.88E-05
5	2.5	28.9	4.6	483	193.2	1.88E-05
10	5	20.4	8.5	892.5	178.5	1.74E-05
15	5	11.8	8.6	903	180.6	1.76E-05
20	5	3.4	8.4	882	176.4	1.72E-05



Note:

## Prova Amoozometer

Certificato n° : 618

N° prova: 2 bis Data: sett. 2007

Località: Restone Figline argine (pressi) Operatore: S.S.S.M. A.C

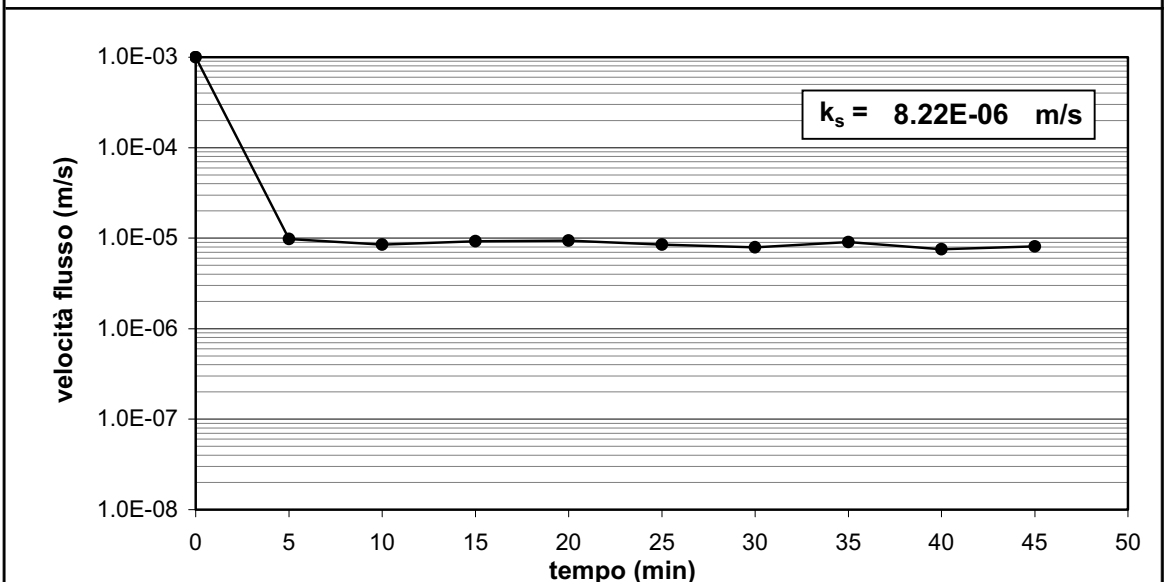
Orizzonte: A

Materiale: Riporto

profondità foro (cm): 61 misura livello iniziale (cm): 16  
 distanza fondo foro-liv. rif. (cm): 74 misura livello finale (cm): 16  
 carico acqua in foro (cm): 16 raggio foro (cm): 7.5  
 posizione valvola: 2 ON

coefficiente A: 0.000539 
 $A = (\sinh^{-1}(H/r) - ((r/H)^2 + 1)^{0.5} + r/H) / (2 * 3.14 * H^2)$

tempo (min)	tempo parziale (min)	lettura (cm)	dif. livello (cm)	vol. acqua (cm <sup>3</sup> )	portata (cm <sup>3</sup> /min)	vel. flusso (m/s)
0	0	44.6	0	0	0	1.00E-03
5	5	39.4	5.2	546	109.2	9.80E-06
10	5	34.9	4.5	472.5	94.5	8.48E-06
15	5	30	4.9	514.5	102.9	9.24E-06
20	5	25	5	525	105.0	9.43E-06
25	5	20.5	4.5	472.5	94.5	8.48E-06
30	5	16.3	4.2	441	88.2	7.92E-06
35	5	11.5	4.8	504	100.8	9.05E-06
40	5	7.5	4	420	84.0	7.54E-06
45	5	3.2	4.3	451.5	90.3	8.11E-06



Note:

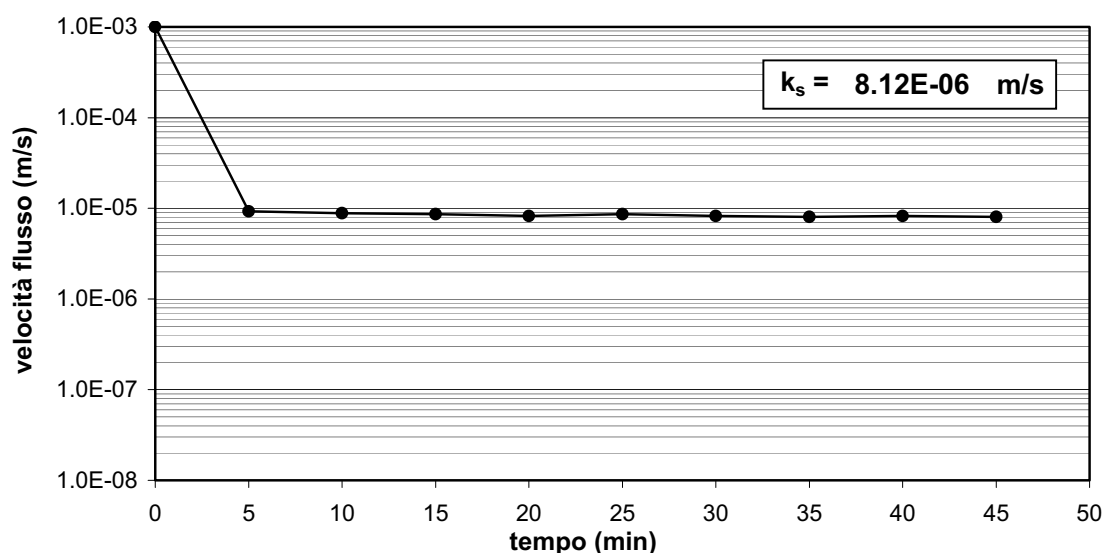
## Prova Amoozometer

Certificato n° : 620  
 N° prova: 3 Data: sett. 2007  
 Località: Restone Figline argine (pressi) Operatore: S.S.S.M. A.C  
 Orizzonte: A  
 Materiale: Riporto

profondità foro (cm): 66 misura livello iniziale (cm): 15.5  
 distanza fondo foro-liv. rif. (cm): 79 misura livello finale (cm): 16  
 carico acqua in foro (cm): 15.5 raggio foro (cm): 7.5  
 posizione valvola: 2 ON

coefficiente A: 0.000561 
 $A = (\sinh^{-1}(H/r) - ((r/H)^2 + 1)^{0.5} + r/H) / (2 * 3.14 * H^2)$

tempo (min)	tempo parziale (min)	lettura (cm)	dif. livello (cm)	vol. acqua (cm <sup>3</sup> )	portata (cm <sup>3</sup> /min)	vel. flusso (m/s)
0	0	46.4	0	0	0	1.00E-03
5	5	41.7	4.7	493.5	98.7	9.22E-06
10	5	37.2	4.5	472.5	94.5	8.83E-06
15	5	32.8	4.4	462	92.4	8.64E-06
20	5	28.6	4.2	441	88.2	8.24E-06
25	5	24.2	4.4	462	92.4	8.64E-06
30	5	20	4.2	441	88.2	8.24E-06
35	5	15.9	4.1	430.5	86.1	8.05E-06
40	5	11.7	4.2	441	88.2	8.24E-06
45	5	7.6	4.1	430.5	86.1	8.05E-06
50	5	3.5	4.1	430.5	86.1	8.05E-06



Note:



