

## RICOSTRUZIONE DEL PALEOALVEO DEL FIUME SERCHIO (LUCCA, ITALIA) TRAMITE RILIEVI LIDAR, FOTO AEREE ED IMMAGINI QUICK BIRD

R. Salvini <sup>1</sup>, E. Guastaldi <sup>1</sup>, N. Coscini <sup>2</sup>, N. Del Seppia <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro di GeoTecnologie, Università degli Studi di Siena – salvinir@unisi.it

<sup>2</sup> Autorità di Bacino del Fiume Serchio, Lucca

RIASSUNTO: R. Salvini, E. Guastaldi, N. Coscini, N. Del Seppia, *Ricostruzione del paleoalveo del fiume Serchio (Lucca, Italia) tramite rilievi Lidar, foto aeree ed immagini Quick Bird*. (IT ISSN 0394-3356, 2007).

In questo lavoro è stata effettuata un'analisi paleomorfologica dell'alveo del Fiume Serchio partendo da evidenze geomorfologiche attuali e dati storici. A tal fine sono state utilizzate foto aeree di epoche diverse, ortofoto, immagini satellitari *Quick Bird* integrate con dati storici biblio-cartografici. L'ortocorrezione geometrica di tutte le immagini è stata effettuata grazie ad un modello digitale del terreno elaborato dalla topografia alla scala 1:10000, dai rilievi topografici disponibili (livellazioni e DGPS, ovvero *Differential Global Positioning System*) e dal rilievo LIDAR (*Light Detection And Ranging*) effettuato nel Febbraio/Marzo 2005. Attraverso l'interpretazione di tutti i dati, sono stati ricostruiti a grande scala gli antichi percorsi fluviali nell'area della pianura lucchese. Il lavoro è stato condotto in ambiente GIS (*Geographic Information System*) allo scopo di integrare le informazioni deducibili da dati diversi e rendere evidenti le variazioni spaziali e temporali dell'alveo, con la produzione di una cartografia tematica dedicata. Il rilievo aereo LIDAR ha permesso di generare un DDTM (*Digital Dense Terrain Model*) con passo 1m con il quale sono state effettuate elaborazioni tridimensionali che hanno permesso di evidenziare le aree depresse della pianura lucchese, coincidenti con i vecchi tratti fluviali e con i meandri abbandonati del Fiume Serchio.

ABSTRACT: R. Salvini, E. Guastaldi, N. Coscini, N. Del Seppia, Lidar survey, aerial photos and Quick Bird satellite images for the palaeodrainage reconstruction of Serchio river (Lucca, Italy). (IT ISSN 0394-3356, 2007).

*In this work the palaeodrainage reconstruction of Serchio River has been performed, starting from present and historical geomorphological evidences. For this, aerial photos, orthophotos, Quick Bird satellite imageries, integrated with historical references have been utilized.*

*The orthorectification of all the imageries have been performed by utilizing a DEM (Digital Elevation Model) resulting from the elaboration of numeric topography at a scale of 1:10,000, topographic surveys (DGPS and levelling), and LIDAR aerial survey done in February and March 2005.*

*By the remote sensing data interpretation, the palaeodrainage channels of Serchio River have been reconstructed at a large scale for the whole area of Lucca plain. Through a GIS the whole dataset have been managed as geo-database, in order to highlight the spatial and temporal variations of palaeodrainage of Serchio River, producing thematic cartography.*

*LIDAR survey allowed us to generate a DDTM, 1m of spatial resolution, which has been utilized for three-dimensional elaborations, carried out in order to highlight the lowered areas in the Lucca plain, which correspond to the palaeodrainage of Serchio River.*

Parole chiave: Telerilevamento, fotointerpretazione, paleodrenaggio, GIS.

Keywords: .....

### 1 - AREA DI STUDIO

Il Bacino del Fiume Serchio con una superficie di 1626 km<sup>2</sup> è compreso nelle province di Lucca, Pisa e Pistoia (Fig. 1). Localizzato tra le Alpi Apuane ed i Monti Pisani interessa gran parte della piana lucchese e pisana, con una densità di drenaggio di 20.8 km<sup>-1</sup>, uno sviluppo totale di circa 2194.8 km, con la sola asta principale di lunghezza pari a 105.1 km.

Le principali caratteristiche morfologiche della piana lucchese unite all'abbondante presenza di acqua sia superficiale che sotterranea e all'intensa azione antropica, hanno contribuito nel tempo alle numerose divagazioni dell'alveo fluviale. Al fine di eseguire un'analisi paleomorfologica dell'alveo del fiume, partendo da evidenze geomorfologiche attuali e dati storici, è importante ricostruire le tappe fondamentali dell'evoluzione paleo-geografica dell'area.

Dopo l'Eocene caratterizzato dall'orogenesi

appenninica, nel periodo miocenico i fenomeni distensivi hanno determinato una serie di *horst* e *graben*, allungati in direzione NW-SE, che hanno generato una serie di bacini intermontani tra i quali la depressione tettonica denominata Graben del Serchio (TREVISAN *et al.*, 1971). In tale depressione si è sviluppata una serie di bacini lacustri (Alta Valle del Serchio, Media Valle del Serchio e Piana di Lucca) all'interno dei quali, nel Villafranchiano, è cominciata una fase di sedimentazione e colmata. Nei bacini dell'alta e media valle, questa fase si è conclusa a causa della modesta entità degli stessi, mentre il vasto lago che occupava la piana di Lucca e che si spingeva fino alle pendici del Monte Albano ha avuto un'evoluzione più complessa (NARDI *et al.*, 1987; DALLAN, 1988).

A partire dal Pliocene Inferiore (Ruscignano), l'attuale pianura fu occupata da un vasto bacino lacustre di origine tettonica (*semi-graben*) formatosi a causa del sollevamento della regione orientale della catena del

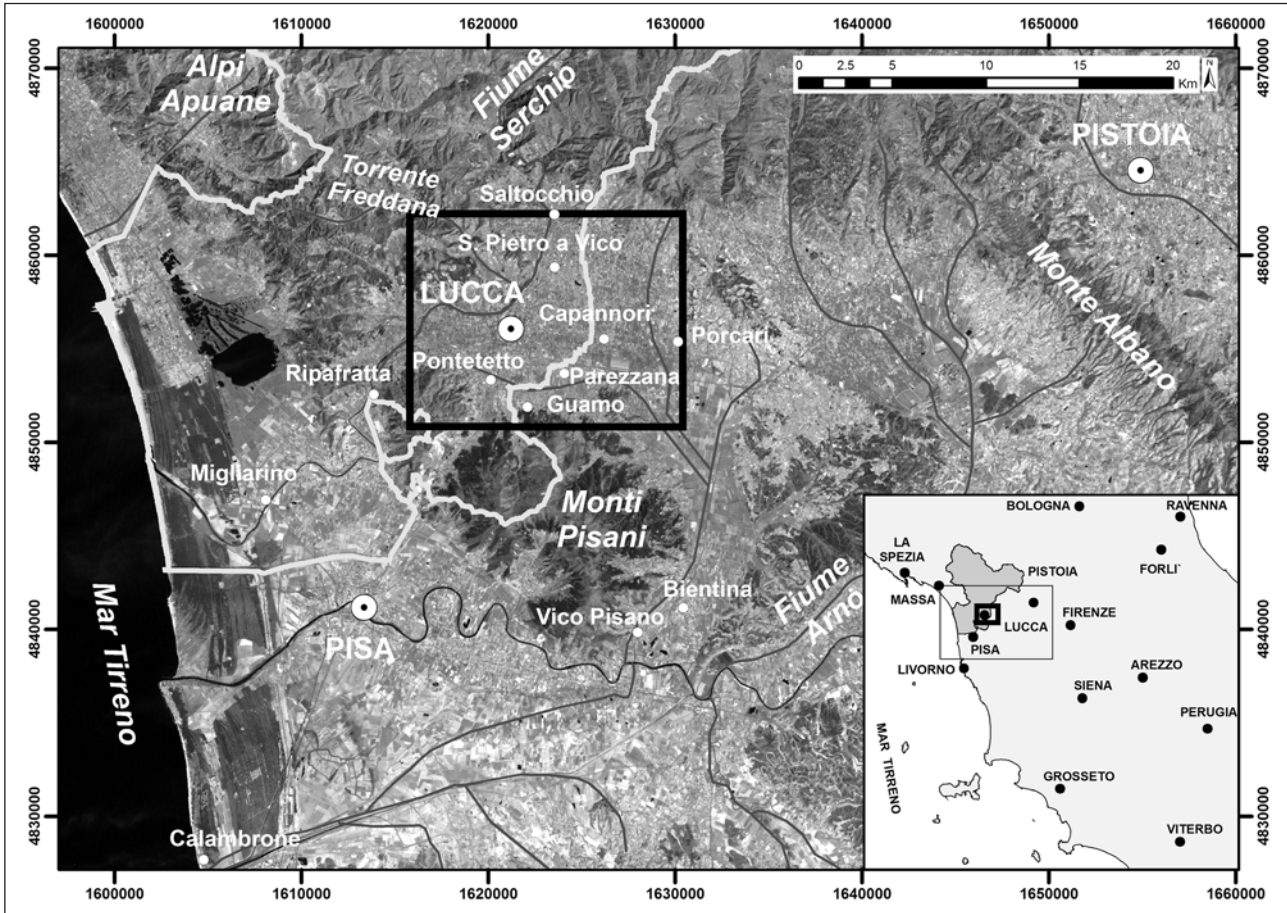


Fig. 1 - Ubicazione dell'area di studio (rettangolo nero) su scena Landsat5 TM (banda 5): in grigio è visualizzata l'area di competenza dell'Autorità di Bacino del Fiume Serchio.

Location of study area (black box) on Landsat5 TM scene (band 5): the grey area represents the Serchio River Basin Authority.

Monte Albano. Il bacino intermontano è stato poi oggetto di un'intensa sedimentazione, rappresentata per lo più da depositi di tipo lacustre, fluviale ed alluviale, che è continuata fino ai tempi storici favorita anche ad una subsidenza tettonica. In questa fase e fino al Pleistocene superiore, il sollevamento che si registra ad oriente e i continui episodi di alluvionamento ed impaludamento della pianura dovuti all'innalzamento del letto dell'Arno (PIAZZINI 1850), permettono al fiume di bi-partirsi: il bacino viene alluvionato e modellato dal paleoalveo del fiume *Auser* (nome antico del Fiume Serchio) che, solo tramite il lago di Bientina, confluisce nell'Arno all'altezza di Vico Pisano, mentre più ad occidente trova sbocco indipendente un ramo minore, denominato *Auserculus*, che scorre a N di Lucca e prosegue verso Pisa passando da Ripafratta (PADERI, 1932).

Tra il XII e l'VIII secolo a.C., il bacino lacustre formatosi nella depressione di Bientina raggiunge la quota di 15m s.l.m. lambendo i paesi di Capannori, S. Filippo e la stessa città di Lucca (PADERI, 1932) mentre il Fiume Serchio è ancora bipartito: un ramo, da Saltocchio, passa per Lammari, Lunata e sfocia nella depressione di Bientina, mentre l'altro ramo procede verso S, passa ad E di Lucca ricevendo le acque della Freddana attraverso un collettore a N di M. S. Quirico, e scende per la valle di Ripafratta (DONATI, 1784). Gli Etruschi (V secolo

a.C.) incanalano il ramo occidentale del Serchio in 2 alvei all'altezza di S. Pietro a Vico, circondando la città di Lucca per scopi difensivi, per poi farli ricongiungere ad occidente, nei pressi di Montuolo, e sfociare nell'Arno (BARSOCCINI, 1853). In questo periodo, grazie alla sistemazione dei terreni operata da questa civiltà ed all'efficace ruolo drenante svolto più a S dal Fiume Arno, il livello del Lago di Bientina diminuisce (circa 6m s.l.m.; PADERI, 1932).

In epoca pre-Romana, sotto la dominazione ligure, a causa dell'abbandono delle opere etrusche e della non curanza del territorio, si ha un impaludamento generale della pianura ad E di Lucca e si registrano numerose divagazioni del Serchio (BARSOCCINI, 1853).

In epoca Romana (I secolo a.C. ÷ IV secolo d.C.) vengono ripristinati gli argini artificiali dei 2 rami occidentali del corso del Fiume Serchio che confluisce nell'Arno provocando all'incrocio con questo un evidente fenomeno di "innalzamento" delle acque testimoniato da Strabone nel I sec. d.C. (MASINI, 1956). La pianura ad E di Lucca viene bonificata ed i terreni liberati dalle acque della palude vengono centuriati secondo una maglia rettangolare orientata circa NNE-SSW. Il Serchio non alimenta più il Lago di Bientina, il cui livello torna alla quota di circa 6m s.l.m (PADERI, 1932). Dopo la caduta dell'Impero Romano, nel V secolo d.C., il parzia-

le abbandono delle pratiche agricole ed il degrado dei campi innescano nuovi fenomeni di impaludamento e divagazione del fiume verso E (MASINI, 1956). Il Serchio, nel nuovo corso principale ormai ad E (BARSOCCINI, 1853) alimenta nuovamente il Lago di Bientina che risale di livello anche per il contemporaneo aumento di portata delle acque dell'Arno (PADERI, 1932). Dal ramo orientale si dipartono varie divagazioni tra cui una passante per Lunata (nome derivante dall'ansa molto pronunciata che il fiume faceva in questa zona), Mugnano e Parezzana per poi immettersi nel Lago di Bientina (BARSOCCINI, 1853). Il ramo occidentale lambisce a N Lucca: fonti storiche testimoniano la distruzione dell'anfiteatro di epoca romana non ancora protetto dalle antiche mura della città risalenti al periodo medioevale (PADERI, 1932). Testimone dell'impaludamento della pianura e delle divagazioni del fiume è Rutilio Numanziano che non riesce ad oltrepassare la depressione ad E di Lucca per raggiungere da Roma la Gallia sua patria, né è testimone del fenomeno di "innalzamento" delle acque citato da Strabone all'incontro del Serchio con l'Arno perchè l'acqua non è più convogliata tutta per la stretta di Ripafratta, ma tracima in gran parte verso oriente e quindi nel Lago di Bientina per poi defluire nell'Arno a Vico Pisano (BARSOCCINI, 1853).

Nel VI secolo d.C., S. Frediano vescovo di Lucca, ordina la regimazione del Serchio presso S. Pietro a Vico: la massa principale dell'acqua passa nel ramo occidentale a N di Lucca, mentre una parte delle acque viene deviata verso E, a formare l'*Ausere* (antico nome dell'attuale Ozzeri). Questo alveo orientale, all'altezza di Antraccoli (dal Latino *inter aquas*) forma un isolotto passando, in parte ad occidente nell'attuale corso del canale Ozzeretto fino a Pontetetto, e in parte ad oriente dove all'altezza di Pieve S. Paolo si divide ulteriormente in un ramo secondario che si riversa nel Lago di Bientina. In seguito, nel VIII secolo d.C., il ramo occidentale dell'Isolotto di Antraccoli volta ad occidente per formare l'*Ausere* e confluisce a Montuolo nell'attuale canale Ozzeri proveniente più a S da Pieve San Paolo e Pontetetto (PADERI, 1932). Nel IX secolo d.C. non si hanno più testimonianze dell'*Ausere* (*Ausere morto*); l'Ozzeretto confluisce direttamente nell'Ozzeri all'altezza di Pontetetto e rimane la deviazione nel Lago di Bientina all'altezza di Pieve S. Paolo. Il Serchio in quest'epoca è tripartito nel seguente modo: un ramo segue circa il corso attuale, un secondo ramo si diparte da S. Pietro a Vico e lambisce a N le mura medioevali di Lucca formando un'isola rispetto al ramo precedente, mentre il terzo ramo, più orientale, nasce a N di S. Pietro a Vico, passa per Lammari, Lunata e Antraccoli e poi si riversa nell'Ozzeri proseguendo verso Montuolo. Quest'ultimo ramo, all'altezza di Pieve S. Paolo, si divide ulteriormente poiché è documentata la presenza di un immissario del Lago di Bientina (MASINI, 1956). L'idrografia dell'area si mantiene tale fino a tutto il X secolo d.C.. Il lago ha una quota minima (circa 7m s.l.m.) e l'opera di S. Frediano ha quindi ancora effetto. Dagli inizi dell'XI secolo d.C. l'assetto idrologico peggiora rapidamente con nuove divagazioni del fiume ed impaludamenti della pianura a causa delle lotte tra i lucchesi ed i fiorentini. Queste condizioni sfavorevoli si protraggono fino al XIV secolo, quando i lucchesi cominciano ad intraprendere opere di nuova canalizzazione per limitare le esondazioni nella pianura ad E di

Lucca e convogliare la maggior parte dell'acqua del Serchio verso O. Nel XV secolo d.C. il livello del lago è più basso (circa 10m s.l.m.) poiché il Serchio, in parte regimato con successo, apporta una quantità di acqua inferiore. Finalmente nel 1538 i lucchesi riescono a controllare l'andamento del Fiume Serchio che non defluisce più nel Lago di Bientina, ma, grazie ad una serie di interventi idraulici, ne viene regimato il corso in modo da scorrere attraverso un alveo arginato e pensile sulla pianura lucchese e su quella pisana fino alla foce presso Migliarino (MANCINI, 1950). Il Lago di Bientina, per le continue lotte tra lucchesi e fiorentini, per tutto il periodo che va dal XVI al XIX secolo, subisce numerosi innalzamenti di livello che determinano inevitabili impaludamenti della pianura. A N di Vico Pisano le lotte riguardano l'apertura di chiuse e cataratte per lo scolo delle acque: nel 1646 le continue diatribe consentono al livello lacustre di raggiungere le porte della città di Lucca e Capannori. In quest'epoca, durante i periodi di piena, il Serchio riesce ancora a rompere gli argini ed a riversarsi nell'Ozzeri; contemporaneamente l'acqua del Lago di Bientina è in grado di tracimare nel canale Rogio e quindi procedere anch'essa nell'Ozzeri, in senso opposto al Serchio, con il risultante impaludamento di tutta l'area a S-SE di Lucca. La bibliografia testimonia di continue opere di regimazione nel tentativo di limitare le esondazioni del Serchio verso E. Fonti storiche documentano che il 6 Novembre 1623 il fiume rompe gli argini da poco costruiti fra Saltocchio e Lucca, si rovescia nelle campagne e riprende il naturale corso orientale arrivando a devastare Bientina e Vicopisano; il 18 Novembre 1750 il Serchio in piena rompe l'argine sinistro nei pressi di S. Anna e un ramo del fiume esce allagando tutta la campagna fino a scaricarsi nel lago di Bientina. Notizie storiche narrano che gli abitanti di queste zone fuggono terrorizzati verso la città e per dar loro asilo vengono aperte eccezionalmente le porte in mezzo alla notte.

Nel 1665 viene costruita la Nuova Serezza, un canale artificiale nella pianura ad E di Lucca, realizzato con l'obiettivo di drenare il Lago di Bientina verso Vico Pisano; l'opera di per se da buoni risultati, anche se registra alcuni insuccessi relazionati al contemporaneo innalzamento del livello di base del Fiume Arno dovuto alle grandi quantità di sedimenti depositati ed alle ingenti torbe provenienti dalla Val d'Era (REPETTI, 1846). Per ordine di Leopoldo II Granduca di Toscana, nel 1859 viene inaugurata la "botte" sotto il letto dell'Arno, un canale artificiale costruito per far defluire l'acqua della Serezza nell'emissario verso il mare all'altezza del Calambrone. I risultati non sono però del tutto positivi in quanto vaste plaghe di terreno rimangono paludose: i possessori di una parte del terreno da bonificare, unitisi in consorzio verso il 1907, provvedono successivamente all'istallazione di idrovore per il risanamento idraulico dei terreni mediante il sollevamento meccanico delle acque (BRACALONI, 1977).

## 2 - ANALISI

Per lo studio del paleodrenaggio del Fiume Serchio sono state utilizzate in maniera integrata varie fonti:

- Modello Digitale delle Superfici (DSM) e Modello

- Digitale del Terreno (DTM), con passo uguale a 1m, derivanti da ripresa LIDAR effettuata ad una quota media di volo di 1500m nel Febbraio/Marzo 2005 con Laser Scanner Altimetrico (Sensore Digitale OPTECH ALTM 3033) di proprietà della CGR (Compagnia Generale Riprese Aeree) di Parma;
- foto aeree a colori naturali, alla scala nominale 1:7000, riprese nel Febbraio/Marzo 2005 dalla CGR, realizzate ad una quota media di volo di 4500m (scansione a 1200 dpi, risoluzione 0.15m al suolo);
  - ortofoto a colori naturali in scala 1:10000 relative al volo *Italy2000* (sezioni n°261110, 261140, 261150, 273020 e 273030);
  - immagine satellitare *Quick Bird* datata 18 Marzo 2003 (tipo *Standard*, Pancromatica e Multispettrale con risoluzione spaziale rispettivamente di 0.61m e 2.44m);
  - Cartografia Tecnica Regionale in formato vettoriale alla scala 1:10.000.
  - Per i dati storici è stato fatto riferimento all'Archivio di Stato della città di Lucca, alla Biblioteca Storica della Certosa di Calci (PI) ed alle numerose pubblicazioni presenti in letteratura.

Il lavoro è stato condotto in ambiente GIS, mediante il software ESRI ArcMAP™, allo scopo di integrare le informazioni deducibili da dati diversi e rendere evidenti le variazioni spaziali e temporali dell'alveo, con la produzione di una cartografia tematica dedicata. All'interno del geodatabase creato, ogni elemento spaziale relativo ai paleoalvei è stato completato da informazioni morfologiche, evolutive e storiche basandosi anche su fonti bibliografiche passate (BARSOCCHINI, 1853; PADERI, 1932; MASINI, 1956; AMBROSI, 1967; MAZZANTI & PASQUINUCCI, 1983, NARDI et al., 1987).

Le foto aeree, in formato digitale, sono state orientate secondo tecniche fotogrammetriche (KRAUS, 1994) mediante il software ERDAS IMAGINE™, utilizzando i dati relativi al volo (certificato di calibrazione della camera Wild RC30) ed i GCP (*Ground Control Point*) rilevati con strumentazione GPS in modalità differenziale statica. Le foto aeree, orientate con un'accuratezza posizionale di 0.20m e altimetrica di 0.40m, sono state interpretate mediante filtri polarizzanti permettendo così l'osservazione stereoscopica dei paleoalvei e dell'intera piana di Lucca.

Per quanto riguarda l'elaborazione dell'immagine QuickBird, essa è stata ortorettificata al fine di eliminare le distorsioni geometriche derivanti dall'orografia della zona e dalla modalità di acquisizione del dato, secondo scansione *pushbroom*. Per questo sono stati utilizzati GCP derivanti dai rilievi DGPS integrati al modello digitale del terreno elaborato dalla topografia alla scala 1:10000 e integrato con il rilievo LIDAR.

Trattandosi di un prodotto *Standard*, vale a dire non soltanto corretto radiometricamente ma anche geometricamente impiegando informazioni desunte unicamente dalla telemetria ed utilizzando un modello digitale del terreno a bassa risoluzione, l'immagine QuickBird è stata fornita già proiettata secondo il sistema UTM, Datum WGS84, con un'accuratezza dichiarata in termini CE 90% migliore di 23m, escludendo spostamenti legati alla topografia ed all'angolo di vista *off-nadir*. L'ortocorrezione è stata quindi effettuata mediante una procedura razionale "non-rigorosa" (TOUTIN & CHENG, 2002) basata sulla correzione polinomiale a par-

tire dai coefficienti disponibili nel file RPC (*Rational Polynomial Coefficient*), successivamente raffinati con i GCP derivanti dai rilievi DGPS. Essendo gran parte dell'area di lavoro di tipo pianeggiante, le correzioni geometriche apportate con il procedimento illustrato sono risultate soddisfacenti; tuttavia, a causa della scarsa accuratezza (alcuni metri) riscontrata nelle zone montuose, si è preferito ricorrere alla utilizzazione di una ulteriore correzione geometrica secondo il metodo cosiddetto *Rubber Sheeting* (SAALFELD, 1985; WHITE & GRIFFIN, 1985; BUITEN, 1993). Peculiarità del metodo è quella di non restituire scarti quadratici medi dell'operazione di correzione, pertanto la verifica dell'accuratezza è stata effettuata mediante *Check Points* ed a posteriori sovrapponendo alle immagini pancromatica e multispettrale corrette, i punti rilevati con strumentazione GPS. In queste zone l'errore medio di posizionamento è risultato pari a 1.5m.

Infine, avendo a disposizione separatamente l'immagine pancromatica e quella multispettrale geometricamente corrette e co-registrate, al fine di incrementare la risoluzione spaziale di quest'ultima mantenendo la multispettralità, sono state effettuate operazioni di fusione secondo il metodo di *Resolution Merge* a mezzo delle Componenti Principali (CHAVEZ et al., 1991). L'immagine multispettrale QuickBird di elevata risoluzione è stata utilizzata in visione monoscopica per l'identificazione dei paleoalvei sfuggiti allo studio delle foto aeree grazie alla disponibilità della banda 4 relativa all'infrarosso vicino (*range* spettrale 0.76÷0.9 micron).

L'identificazione dei paleoalvei è stata effettuata anche grazie alla accurata morfologia prodotta dalle riprese effettuate con il Laser Scanner Altimetrico OPTECH ALTM 3033 di proprietà della CGR. Lo strumento utilizzato, potendo registrare simultaneamente oltre all'intensità del segnale di ritorno le riflessioni "primo impulso" e "ultimo impulso", quando il laser incontra un ostacolo (es. foglie, fili sospesi, cornicioni) viene diviso in più componenti che vengono riflesse verso l'alto in tempi diversi (KRAUS & PFEIEFER, 1998; KRAUS, 2002). Questo consente di separare ciò che è al di sopra del terreno (DSM) da ciò che giace su di esso (DTM). Le riprese sono state estese ad un'area di circa 2600ha a sud della città di Lucca. L'attività di rilievo LIDAR si è articolata nelle fasi seguenti: pianificazione del volo, esecuzione del rilievo, elaborazione dei dati, controllo di qualità e creazione dei prodotti finali. In sede di collaudo è stata verificata la precisione di misura dei prodotti forniti dalla CGR in rapporto a quella richiesta nel disciplinare tecnico predisposto dall'Autorità di Bacino (A.d.B.) del Fiume Serchio ed è stata valutata l'accuratezza degli stessi prodotti, tramite il confronto con dati a terra rilevati con tecnica topografica tradizionale.

I prodotti soggetti al collaudo sono stati il DSM e il DTM riferiti al sistema di Nazionale Gauss-Boaga con quote ortometriche.

Le attività svolte per il collaudo sono state, nell'ordine, le seguenti:

- Esecuzione di un rilievo topografico con GPS e strumentazione tradizionale, su alcune aree-campione interne all'area oggetto del lavoro (Fig. 2), da parte di uno studio tecnico-topografico incaricato dalla stessa A.d.B.. Il rilievo di verifica ha previsto la predisposizione di una rete di inquadramento dell'area di rilievo

realizzata con tecnica GPS-statica raffinata con operazioni di *post-processing* rispetto alla stazione GPS permanente allestita dalla Provincia di Lucca di coordinate ellissoidiche note (HOFMANN-WELLENHOF *et al.*, 1997; CINA, 2000). La rete è stata ricondotta alla quota ortometrica grazie a due capisaldi di livellazione dei quali sono note sia la quota ortometrica che quella ellissoidica. Sono stati inoltre rilevati (con tecnica GPS-cinematica a partire dai capisaldi di inquadramento) i piani quotati di cinque piazzali dislocati all'interno dell'area oggetto delle riprese LIDAR, scelti in corrispondenza di superfici topografiche regolari e in assenza di interferenze aeree (che sono fonte di possibili disturbi locali del segnale LIDAR e che per questo avrebbero potuto falsare il collaudo - Fig. 2). Considerando i valori di accuratezza altimetrica richiesti nel disciplinare tecnico del lavoro (nell'ordine di 20cm) e la regolarità delle superfici dei piazzali, i punti sono stati battuti con una distanza reciproca media nell'ordine di 5m.: la compensazione dei rilievi

è avvenuta vincolando le coordinate geoidiche note dei capisaldi di inquadramento;

- generazione di un DTM e di un DSM di verifica, con passo uguale a quello prodotto nell'ambito del lavoro da collaudare (1m), sulla base dei dati del rilievo topografico di verifica. A partire dai piani quotati rilevati a terra sono stato generati, con due diverse metodologie, i dati necessari per il confronto con i prodotti da collaudare. In particolare, tramite il software ESRI ArcINFO®, sono stati ricavati modelli digitali raster formato GRID con dimensioni della cella pari a 1m e modelli triangolari delle superfici TIN (*Triangular Irregular Network*). Il limite esterno delle aree su cui sono stati ricostruiti i modelli digitali è stato mantenuto almeno 1m all'interno del limite geometrico dei piazzali stessi: questo, sia per evitare di confrontare i dati in prossimità di discontinuità altimetriche localizzate come muri perimetrali, scalini o soglie, dove, per sua natura, il dato altimetrico del LIDAR (che è mediato all'interno della superficie proiettata sul terreno dal

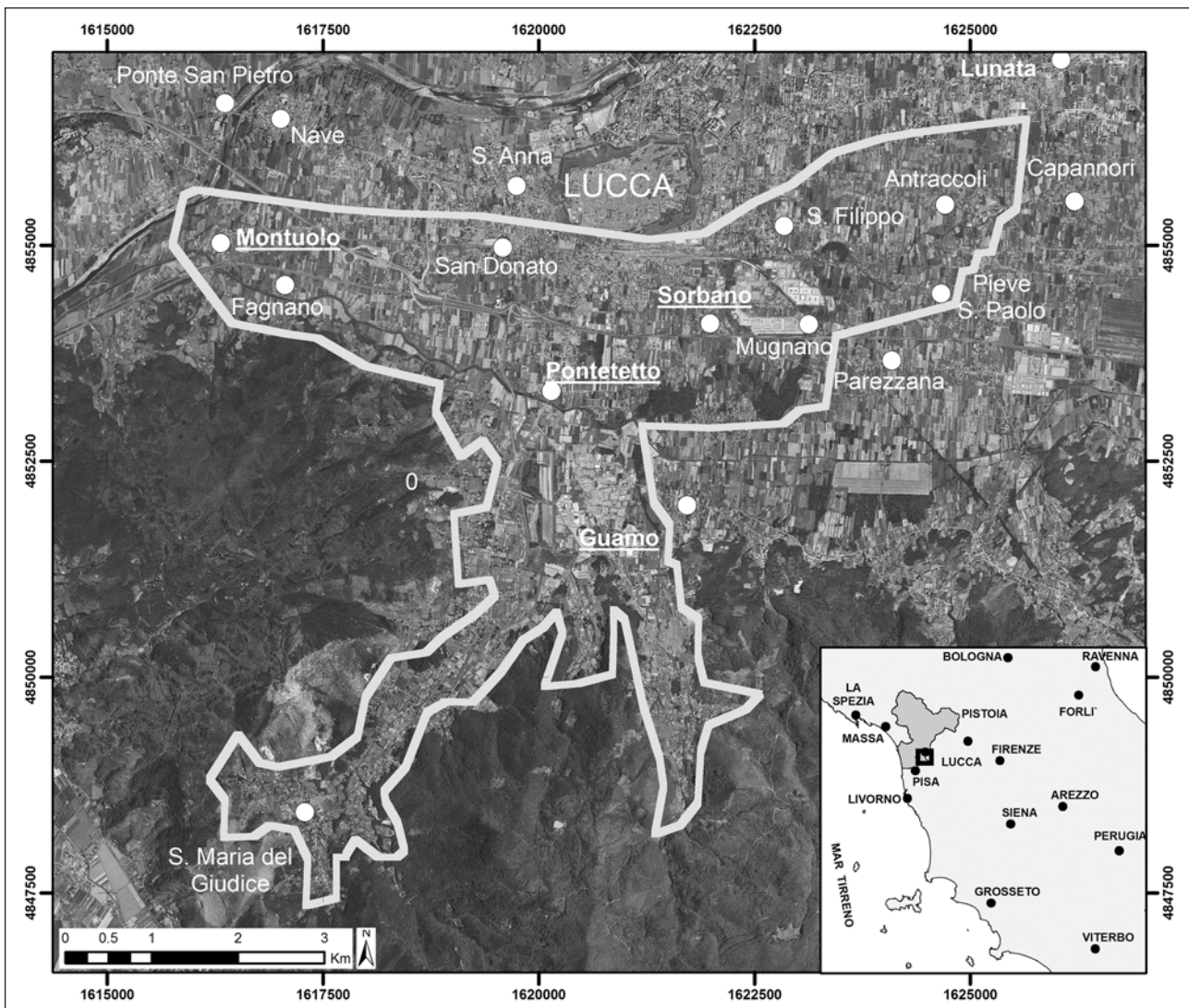


Fig. 2 - Area del rilievo LIDAR e ubicazione dei rilievi topografici di verifica (toponimi sottolineati).  
LIDAR survey area and location of topographic check points (bold underlined place-names).

raggio laser) può perdere localmente di precisione, sia per ovviare alle inevitabili imprecisioni dell'algoritmo di calcolo in prossimità dei bordi. La Fig. 3 mostra l'area collaudata presso il piazzale Guamo (superficie 2120mq);

- confronto statistico tra il DTM e il DSM forniti dalla CGR e quelli di verifica generati per il collaudo. I confronti sono stati effettuati secondo tre metodi differenti: con modelli digitali generati a maglia regolare nel formato raster, nel formato triangolare TIN e con singoli punti rilevati a terra. Sono stati elaborati statisticamente gli scarti altimetrici (intesi come differenza tra il valore di quota ottenuto per interpolazione dei dati GPS e quello planimetricamente corrispondente ottenuto con il rilievo LIDAR) tra i modelli digitali del terreno di verifica e quelli forniti dalla CGR, ottenendo, per ciascuno dei cinque piazzali, i valori di media e deviazione standard degli scarti stessi. Il confronto è stato effettuato nel sistema di riferimento ROMA40, in quote geoidiche. A tale proposito si evidenzia come la conversione dei dati originali del rilievo LIDAR (espressi in coordinate WGS84 e in quote ellissoidiche) sia stata effettuata dalla CGR sulla base di parametri di adattamento locale del geode ricavati per conto dell'A.d.B. dall'Istituto Geografico Militare a partire da 44 vertici a quota ortometrica nota.

### 3 - RISULTATI

L'interpretazione stereoscopica digitale delle foto aeree, lo studio monoscopico multispettrale dell'immagine QuickBird e quelle delle ortofoto, insieme alle informazioni di quota deducibili dal DTM hanno permesso la ricostruzione a grande scala degli antichi percorsi fluviali del Fiume Serchio.

Sulla base delle informazioni storiche disponibili e dei rapporti tra gli alvei riconosciuti la ricostruzione della sequenza, dai più antichi ai più recenti, è stata effettuata secondo i seguenti intervalli temporali:

- Epoca pre-Romana: intervallo comprensivo di tutte le informazioni riferibili al Neogene, all'Età del Ferro (XII÷VIII a.C.), all'Epoca Etrusca (VIII÷IV secolo a.C.) ed alla successiva dominazione ligure (IV÷III a.C.).
- Epoca Romana (I÷IV secolo d.C.): i terreni della pianura ad E di Lucca, una volta liberati dalle acque della palude, vengono centuriati con una maglia rettangolare orientata circa NNE-SSW.
- V secolo d.C.: periodo post-imperiale di impaludamento e divagazione verso E del fiume dovuti al parziale abbandono delle pratiche agricole e di difesa territoriale.

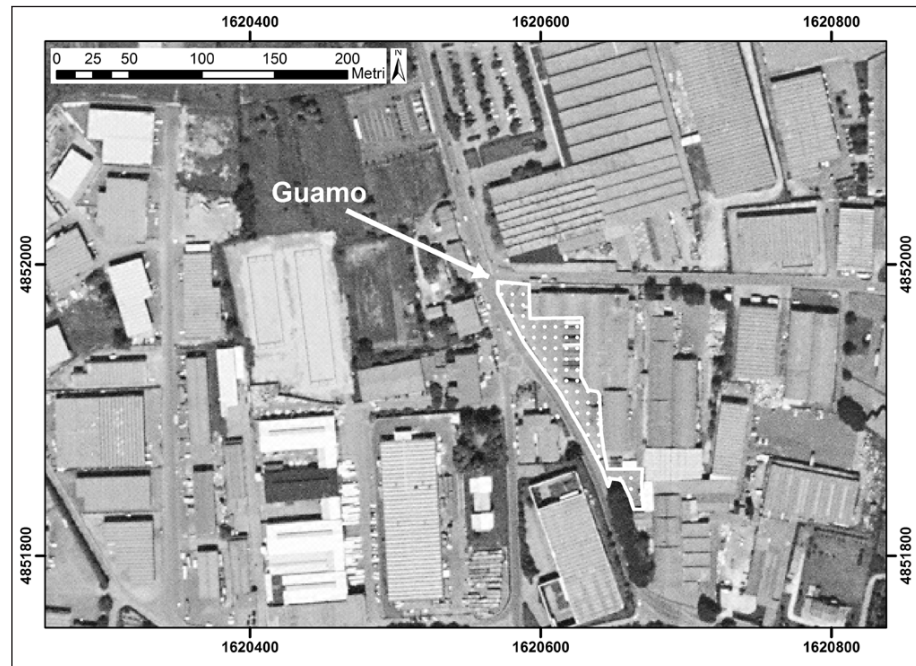


Fig. 3 - Piazzale Guamo rilevato nella zona puntinata con tecnica GPS-cinematica a partire dai caposaldi di inquadramento.

*GUAMO square: the dotted area represents the GPS-kinematics survey related to reference benchmarks.*

- VII÷VIII secolo d.C.: periodo di interventi idraulici e controllo delle corso delle acque in seguito alle disposizioni di S. Frediano Vescovo di Lucca.
- IX secolo d.C.: periodo del Serchio "tripartito" e dell'*Ausere morto*.
- X÷XIV secolo d.C.: intervallo temporale di nuovo impaludamento e divagazione verso E del fiume come conseguenza della lotta tra Lucca e Firenze.
- XIV÷XVI secolo d.C.: periodo di nuovi interventi idraulici e di parziale controllo del corso delle acque verso O.
- XVI÷XIX secolo d.C.: periodo successivo al 1538, quando i Lucchesi riescono a regimare il Serchio che non defluisce più nel Lago di Bientina. Tale intervallo di tempo è comunque caratterizzato da insuccessi, esondazioni ed impaludamenti della pianura che, comunque, riguardano esclusivamente la parte più meridionale. Termina con il 1859 quando viene inaugurata la botte sotto l'Arno.

L'interpretazione si è estesa a tutta la pianura ad E di Lucca anche in aree esterne al DTM prodotto dal rilievo LIDAR, comunque analizzabili con i dati telerilevati (Fig. 4). La Fig. 5 mostra alcuni dettagli dell'interpretazione effettuata sovrapposti all'ortofoto n° 261110.

Nella zona corrispondente al canale Ozzeretto, i dati altimetrici ricavabili dal DTM prodotto dal rilievo LIDAR hanno consentito un'interpretazione di maggiore dettaglio, poiché alle osservazioni telerilevate si sono accostate informazioni di quota di elevata precisione. Il DTM (Fig. 6) ha, infatti, permesso di evidenziare le aree depresse di questa zona della pianura lucchese coincidenti per lo più con i vecchi tratti fluviali e con i meandri abbandonati del ramo orientale del Fiume Serchio.

Il dettaglio del DTM prodotto dalla CGR, oltre a consentire l'interpretazione dei paleoalvei presentata in

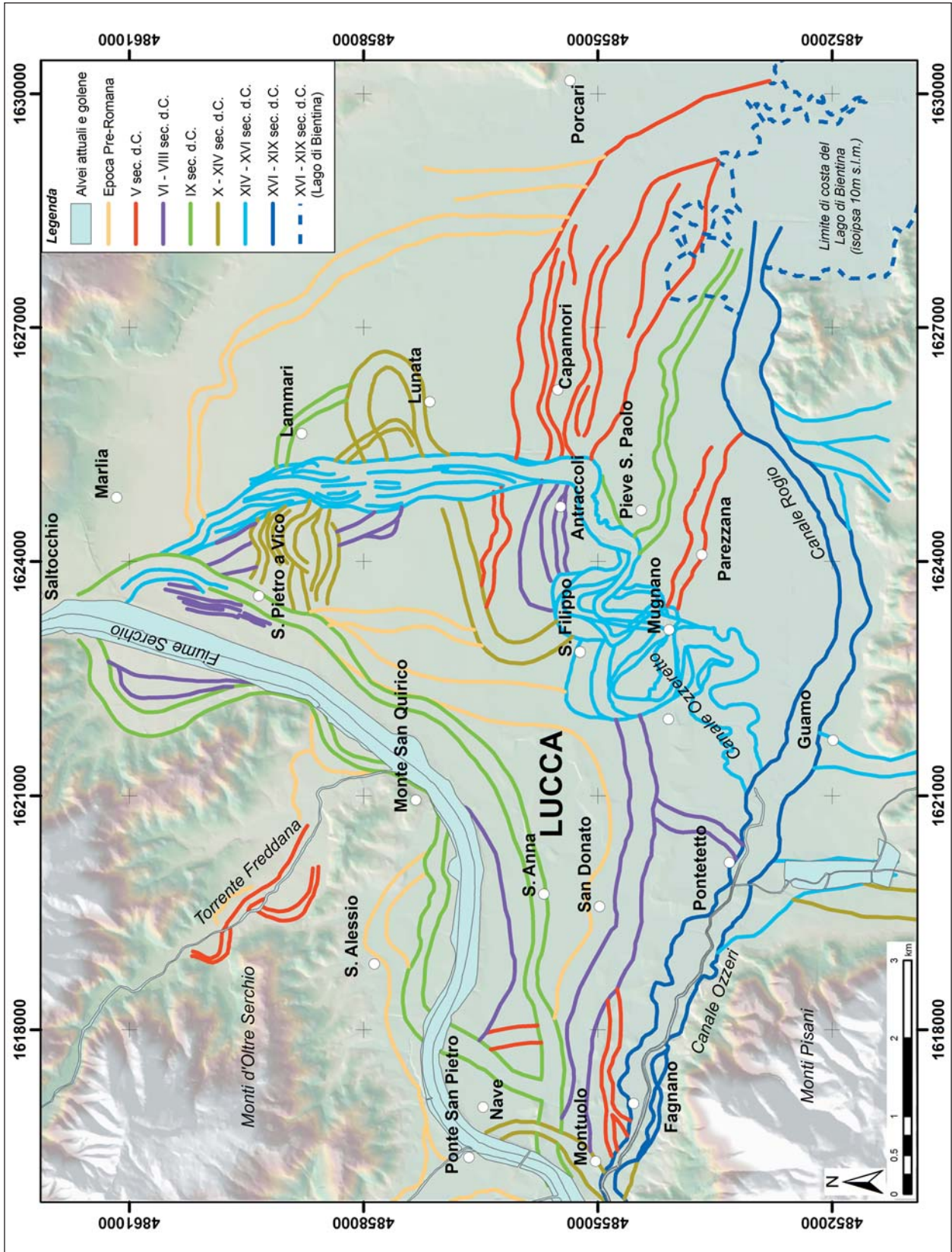


Fig. 4 – Fotointerpretazione dei paleoalvei del Fiume Serchio, sovrapposta al DTM. DTM overlaid by the photointerpretation of Serchio River palaeodrainage.

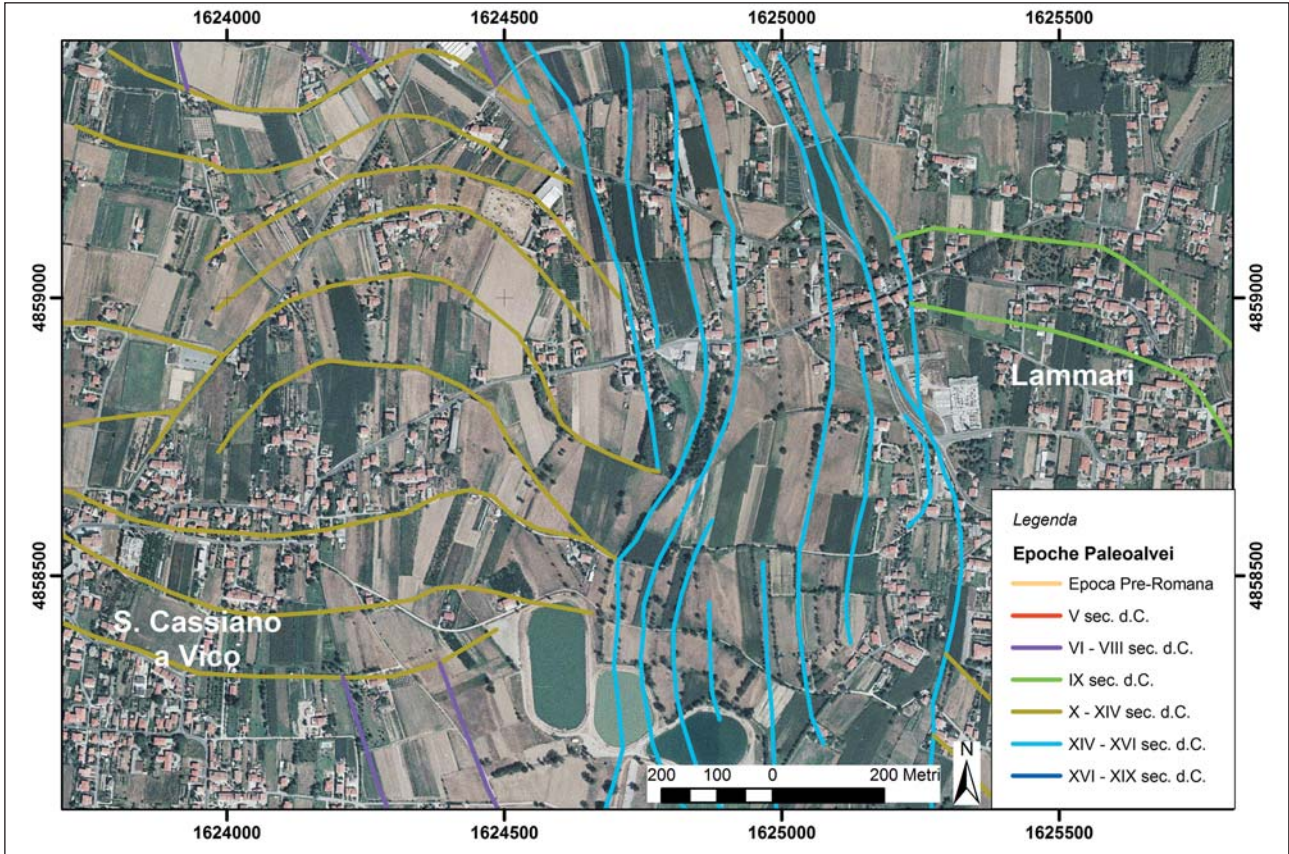


Fig. 5 - Paleoalvei del Fiume Serchio sovrapposti all'ortofoto 261110. Orthophoto 261110 overlaid by the palaeodrainage of Serchio River.

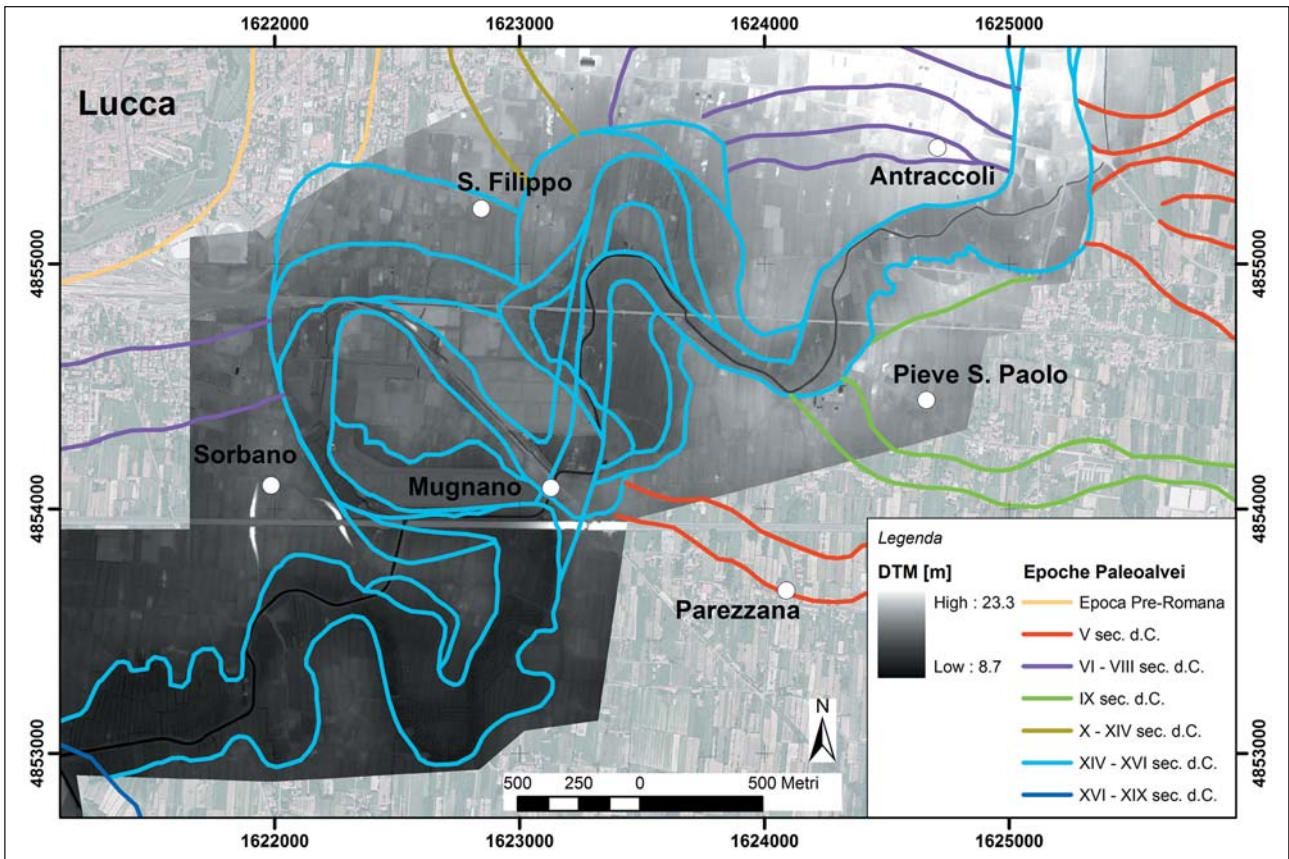


Fig. 6 - DTM generato dal rilievo aereo LIDAR con sovrapposizione dei paleoalvei del Fiume Serchio. DTM from the LIDAR aerial survey, overlaid by the palaeodrainage of Serchio River.



questo lavoro, ha permesso all'A.d.B di individuare e perimetrare le aree a rischio idrogeologico per problemi di stabilità dei versanti secondo quanto previsto dal D.L. 11/6/98, N.180. Il collaudo del DTM ha infatti dimostrato l'idoneità del dato disponibile. Il disciplinare tecnico dei rilievi con sensore LIDAR prevede un'accuratezza altimetrica statistica delle misure, corrispondente al valore di deviazione standard campionaria (1dev.st.), variabile in funzione della quota di volo dell'aeromobile. Alla quota di volo di 1500m (quota media tenuta in occasione del presente rilievo) tale accuratezza corri-

sponde a un valore di  $\pm 20$ cm. Considerando anche le ulteriori fonti di errore, non precisamente quantificabili, introdotte nelle fasi di inquadramento e rilievo GPS di verifica, conversione dei sistemi di coordinate sia per i dati LIDAR che per quelli di verifica, il dato altimetrico relativo ai piazzali per i quali il valore medio dello scarto si mantiene all'interno della fascia di  $\pm 30$ cm, è stato comunque considerato idoneo alle prescrizioni tecniche di capitolato dettate dall'A.d.B.. I risultati dei confronti della coordinata altimetrica in corrispondenza dei cinque piazzali sono riportati nelle tabelle riassuntive 1 e 2.

Tab. 1 - Risultati del confronto tra il DSM della CGR e i dati di verifica.

*Results of comparison between CGR DSM and check data.*

Rilievi topografici di verifica	DSM (CGR) – DSM GRID		DSM (CGR) – DSM TIN		DSM (CGR) - Grid ricavato dai soli punti topografici	
	Guamo	punti di verifica	2128	punti di verifica	2126	punti di verifica
	media [m]	-0.46	media [m]	-0.47	media [m]	0.46
	dev.st. [m]	0.28	dev.st. [m]	0.28	dev.st. [m]	0.14
Montuolo 1	punti di verifica	578	punti di verifica	577	punti di verifica	21
	media [m]	-0.17	media [m]	-0.13	media [m]	0.14
	dev.st. [m]	0.09	dev.st. [m]	0.18	dev.st. [m]	0.05
Montuolo 2	punti di verifica	326	punti di verifica	326	punti di verifica	30
	media [m]	-0.10	media [m]	-0.10	media [m]	0.01
	dev.st. [m]	0.20	dev.st. [m]	0.20	dev.st. [m]	0.52
Pontetetto	punti di verifica	10507	punti di verifica	10502	punti di verifica	0
	media [m]	0.10	media [m]	0.60	media [m]	0.19
	dev.st. [m]	1.00	dev.st. [m]	1.02	dev.st. [m]	0.16
Sorbano	punti di verifica	758	punti di verifica	758	punti di verifica	24
	media [m]	-0.18	media [m]	-0.19	media [m]	0.06
	dev.st. [m]	0.29	dev.st. [m]	0.29	dev.st. [m]	0.57

Tab. 2 - Risultati del confronto tra il DTM della CGR e i dati di verifica.

*Results of comparison between CGR DTM and check data.*

Rilievi topografici di verifica	DTM (CGR) – DTM GRID		DTM (CGR) – DTM TIN		DTM (CGR) - Grid ricavato dai soli punti topografici	
	Guamo	punti di verifica	2128	punti di verifica	2126	punti di verifica
	media [m]	-0.50	media [m]	-0.51	media [m]	0.50
	dev.st. [m]	0.04	dev.st. [m]	0.04	dev.st. [m]	0.04
Montuolo 1	punti di verifica	578	punti di verifica	577	punti di verifica	21
	media [m]	-0.17	media [m]	-0.19	media [m]	0.16
	dev.st. [m]	0.09	dev.st. [m]	0.09	dev.st. [m]	0.06
Montuolo 2	punti di verifica	326	punti di verifica	326	punti di verifica	30
	media [m]	-0.16	media [m]	-0.17	media [m]	0.16
	dev.st. [m]	0.04	dev.st. [m]	0.04	dev.st. [m]	0.04
Pontetetto	punti di verifica	10507	punti di verifica	10502	punti di verifica	87
	media [m]	0.20	media [m]	0.20	media [m]	0.26
	dev.st. [m]	0.10	dev.st. [m]	0.12	dev.st. [m]	0.16
Sorbano	punti di verifica	758	punti di verifica	758	punti di verifica	24
	media [m]	-0.24	media [m]	-0.24	media [m]	0.24
	dev.st. [m]	0.04	dev.st. [m]	0.04	dev.st. [m]	0.04

Nei Piazzali Montuolo 1 e 2, e Sorbano la precisione di capitolato (1 dev.st.) è rispettata sia nel confronto con il DTM che con il DSM; l'accuratezza delle misure è quindi molto elevata. Nel Piazzale Pontetetto i dati di confronto con il DSM (modello che non è privato della vegetazione) evidenziano una prevedibile diminuzione di accuratezza e precisione (std. dev. intorno a 1m – Tab. 1); il fenomeno peraltro non si riscontra nel confronto con i singoli punti misurati a terra. L'algoritmo di generazione del DTM riporta il dato entro le tolleranze richieste e assicura anche una buona accuratezza (Tab. 2). Per il Piazzale Guamo la precisione richiesta è rispettata in entrambi i confronti, anche se l'accuratezza della misura è inferiore a quella degli altri piazzali e supera i 30cm, evidenziando uno scostamento sistematico dal dato a terra.

Considerata l'accuratezza del modello digitale disponibile, si è deciso allora di effettuare un calcolo della profondità delle aree occupate dai vecchi tratti fluviali e dai meandri abbandonati del Fiume Serchio. La distribuzione di frequenza delle differenze di quota rispetto alla pianura circostante ha evidenziato come le aree sopraelevate, essenzialmente legate a cause antropiche, hanno una quota ortometrica mediamente maggiore di 2.5 m, mentre le aree depresse, riferibili ai canali del paleodrenaggio, sono situate a quote ortometriche mediamente inferiori di 3m (Fig. 7).

#### 4 - CONCLUSIONI

L'interpretazione di tutti i dati telerilevati ha permesso la ricostruzione a grande scala degli antichi percorsi fluviali del Fiume Serchio. I dati storici utilizzati si sono dimostrati di fondamentale aiuto nell'attribuire le corrette collocazioni temporali ai vari tratti del paleodre-

naggio del fiume; la trama di divagazioni presenti su tutta la zona intorno Lucca, ed in particolare nella pianura ad E della città, è talmente fitta e complessa che sarebbe stato impossibile risalire agli antichi corsi ed alle loro successioni senza un supporto di tipo storico. Con questo lavoro si è cercato, infatti, di attribuire ai tratti del paleodrenaggio ancora evidenti una collocazione storica conforme con le notizie bibliografiche disponibili.

I dati telerilevati utilizzati si sono dimostrati validi sia in termini di risoluzione spaziale sia di accuratezza posizionale. L'integrazione delle informazioni deducibili da dati diversi ha reso evidenti le variazioni spaziali e temporali dell'alveo, ricostruendo la sequenza temporale evolutiva del percorso dell'antico Serchio. La gestione in ambiente GIS dei dati fotointerpretati si è rivelata fondamentale per il buon esito del lavoro: la sovrapposibilità delle interpretazioni, la possibilità di assegnare ai vari tratti restituiti degli attributi relativi al tempo, all'evidenza e alla fonte storica di riferimento non sono che alcuni dei grandi vantaggi offerti da un database geografico per un lavoro di questo tipo. Lo studio mostra come le moderne tecnologie di telerilevamento quali la fotogrammetria digitale ed il rilievo LIDAR consentono accurate analisi geomorfologiche, utilizzabili qualitativamente e soprattutto quantitativamente sia per scopi cartografici sia per applicazioni di pianificazione territoriale. L'A.d.B. ha recentemente acquisito nuove foto aeree a colori di elevata risoluzione spaziale ed un rilievo LIDAR di più grande estensione, relativo a zone fotointerpretate in questo lavoro, che, dopo gli orientamenti ed il collaudo, verranno utilizzati per individuare e perimetrare le aree a rischio idrogeologico e per approfondire le conoscenze morfo-metriche della zona riconducendo la morfologia attuale ai fenomeni idrogeologici che l'hanno determinata.

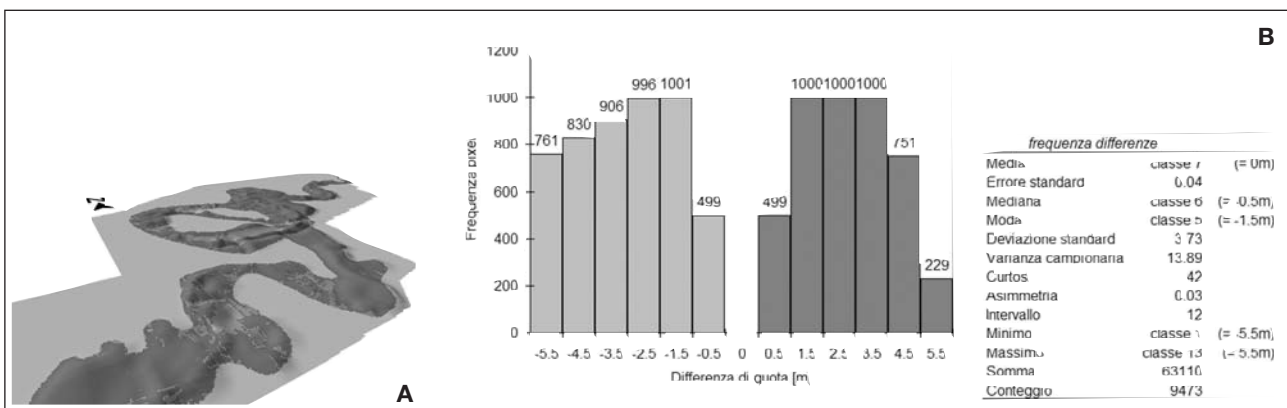


Fig. 7 - Calcolo della profondità delle aree occupate dai vecchi tratti fluviali e dai meandri abbandonati del Fiume Serchio: A - vista prospettica delle differenze di quota di una porzione del paleoalveo; B - distribuzione di frequenza delle differenze di quota rispetto alla pianura circostante (in grigio scuro: valori positivi corrispondenti alla diminuzione della quota ortometrica) e statistica descrittiva della distribuzione delle differenze.

*Depth of the areas been part of the palaeodrainage of the Serchio River: A - three-dimensional view of the height differences within a part of the palaeodrainage of Serchio River; B - histogram of height differences in respect to the surrounding flatland (the dark grey bars represent positive values corresponding to orthometric elevation decrease) and statistics of the height differences.*

## Bibliografia

- AMBROSI A. (1967) - *Giornale Storico della Lunigiana*. vol. **18**.
- BARSOCCINI O. (1853) - *Sull'antico corso del Serchio*. Atti della Reale Accademia Lucchese, Lucca, vol. **14**.
- BRACALONI C. (1977) - *Indagini sulle zone umide della Toscana: Il padule di Bientina, situazione ambientale e relativi problemi di gestione*. Tesi di Laurea in Scienze Agrarie - Università degli Studi di Pisa.
- BUITEN H.J. (1993) - *Geometrical and Mapping Aspects of Remote Sensing*. In: Buiten, H. G. and J.G.P.W. Clevers (Eds.), *Land Observation by Remote Sensing – Theory and Applications*. Gordon and Breach Science Publishers. 297-321.
- CHAVEZ P.S. Jr., SIDES S.C. e ANDERSON J.A. (1991) - *Comparison of three different methods to merge multi-resolution and multi-sectoral data: Landsat TM and SPOT Panchromatic*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **57**(3): 295-303.
- CINA A. (2000) - *GPS - Principi, modalità e tecniche di posizionamento*. Celid Editore, Torino, **ISBN 88-7661-417-6**, 40-81.
- DALLAN L. (1988) - *Inquadramento geografico e geologico della regione Montecarlo Altopascio-Cerbaie* – in: Ritrovamento di *Alephis lyrix* nelle argille della serie lacustre di Montecarlo (Lucca) e considerazioni stratigrafiche sui depositi continentali dell'area tra il Monte Albano e il Monte Pisano. *Atti Soc. Tosc. Sci. Nat. - Mem. - Serie A*, **95**, 203 – 219.
- DONATI S. (1784) - *Notizie storiche del Serchio suoi antichi nomi e differente corso: col ragionamento sopra l'antica situazione della città di Pisa*, In Lucca: presso Francesco Bonsignori, **6**, 55, Biblioteca Universitaria di Pisa Fabroni Misc. 208.3
- HOFMANN-WELLENHOF B., LICHTENEGGER H. e COLLINS J. (1997) - *GPS – Theory and Practice*. Springer Editore, **ISBN 3-211-82839-7**, 131-305.
- KRAUS K. & PFEIEFER N. (1998) - *Determination of Terrain Model in Area with Airborne laser Scanner data*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **53** (4). 193-203.
- KRAUS K. (1994) - *Fotogrammetria – Vol 1 Teoria e applicazioni*. Edizioni Levrotto & Bella, Torino.
- KRAUS K. (2002) - *Principles of Airborne Laser Scanning*. *Journal of the Swedish Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, Nr. 2002:1/Stockholm (2002), **ISSN 1104-5825**; 53 – 56.
- MANCINI A. (1950) - *Storia di Lucca*. Sansoni, Firenze, 358 pp.
- MASINI R. (1956) - *L'Idrografia del Serchio nell'epoca preistorica e storica*. Baroni, Lucca.
- MAZZANTI R. & PASQUINUCCI M. (1983) - *L'evoluzione del litorale lunense – pisano fino alla metà del XIX secolo*. *Boll. Soc. Geogr. It.*, **10-12**.
- NARDI R., NOLLEDI G., e ROSSI F. (1987) - *Geologia e idrogeologia della pianura di Lucca*. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, vol. **10**.
- PADERI E. (1932) - *Variazioni fisiografiche del bacino di Bientina e della pianura lucchese durante i periodi storici*. *Mem. della R. Soc. Geogr. Ital.*, Roma, vol. **7-17**.
- PIAZZINI F. (1850) - *Memoria intorno ai diversi progetti concernenti la depressione delle acque del lago di Sesto, ossia di Bientina e la diversione del fiume Serchio*. Pisa, Nistri.
- REPETTI E. (1846) - *Dizionario geografico, fisico, storico della Toscana, contenente la descrizione di tutti i luoghi del Granducato, Ducato di Lucca, Garfagnana e Lunigiana*, Firenze, Tofani editore.
- SAALFELD A. (1985) - *A fast rubber-sheeting transformation using simplicial coordinates*. *The American Cartographer*, **12**(2):169-173.
- TOUTIN T. & CHENG P. (2002) - *Quickbird – a milestone for high resolution Mapping*. *Earth Observation Magazine*, **11**(4): 14-18.
- TREVISAN L., BRANDI G.P., DALLAN L., NARDI R., RAGGI G., RAU A., SQUARCI P., TAFFI L. e TONGIORGI M. (1971) - *Foglio 105, Lucca*. Note 111. *Carta Geol. d'It.*, *Arti grafiche Di Mauro, Cava dei Tirreni*, 52 pp.
- WHITE M.S. & GRIFFIN P. (1985) - *Piecewise linear rubbersheet map transformations*. *The American Cartographer*, **12**(2), 123-131.

Ms. ricevuto il 20 febbraio 2006

Testo definitivo ricevuto il 31 ottobre 2006

Ms. received: February 20, 2006

Final text received: October 31, 2006

