

ALMA MATER STUDIORUM A.D. 1088  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

---

SCUOLA DI SCIENZE

Corso di Laurea Magistrale in Geologia e Territorio

Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche ed Ambientali

Tesi di Laurea Magistrale

# Analisi storica dell'evoluzione morfologica del tratto montano del Fiume Sillaro

Candidato:  
Sharon Pittau

Relatore:  
Prof. Francesco Brardinoni

---

---

Sessione Marzo 2018  
Anno Accademico 2016-2017



# INDICE

<b>RIASSUNTO .....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUZIONE .....</b>	<b>3</b>
<b>2. AREA DI STUDIO .....</b>	<b>4</b>
2.1. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO .....	5
2.2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO .....	7
2.2.1. I depositi quaternari .....	7
2.2.1.1. Depositi continentali privi di una formale connotazione stratigrafica .....	8
2.2.1.1.1. <i>Accumuli di frane (<math>a_1, a_2</math>)</i> .....	8
2.2.1.1.2. <i>Depositi di versante (<math>a_3</math>) e depositi eluvio-colluviali (<math>a_4</math>)</i> .....	8
2.2.1.1.3. <i>Detriti di falda (<math>a_6</math>)</i> .....	8
2.2.1.1.4. <i>Depositi alluvionali in evoluzione (<math>b_1</math>)</i> .....	8
2.2.1.2. Supersintema Emiliano-Romagnolo .....	8
2.2.1.2.1. <i>Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI)</i> .....	8
2.2.1.2.2. <i>Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES)</i> .....	9
2.2.2. Le unità “di catena” .....	9
2.2.2.1. Successione umbro-marchigiana romagnola .....	10
2.2.2.1.1. <i>Formazione Marnoso-Arenacea Romagnola (FMA)</i> .....	11
2.2.2.1.2. <i>Formazione dei ‘ghioli di letto’ (GHL)</i> .....	11
2.2.2.1.3. <i>Formazione Gessoso-solfifera (GES)</i> .....	11
2.2.2.1.4. <i>Formazione a Colombacci (FCO)</i> .....	11
2.2.2.1.5. <i>Argille e marne di Riolo Terme (RIL)</i> .....	11
2.2.2.1.6. <i>Sabbie di Imola (IMO)</i> .....	12
2.2.2.2. Pliocene Intrappenninico.....	12
2.2.2.2.1. <i>Formazione di Monte Adone (ADO)</i> .....	12
2.2.2.3. Successione Epiligure .....	12
2.2.2.3.1. <i>Formazione di Loiano (LOI)</i> .....	12
2.2.2.3.2. <i>Marne di Monte Piano (MMP)</i> .....	13
2.2.2.3.3. <i>Formazione di Ranzano (RAN)</i> .....	13
2.2.2.3.4. <i>Formazione di Antognola (ANT) e Breccie argillose della Val Tiepido-Canossa (MVT)</i> .....	13
2.2.2.3.5. <i>Formazione di Contignaco (CTG)</i> .....	14
2.2.2.3.6. <i>Formazione di Pantano (PAT)</i> .....	14
2.2.2.3.7. <i>Formazione di Cigarellino (CIG)</i> .....	14
2.2.2.3.8. <i>Formazione del Termina (TER)</i> .....	14
2.2.2.4. Unità Liguri .....	15
2.2.2.4.1. <i>Argille a Palombini (APA)</i> .....	15
2.2.2.4.2. <i>Argille varicolori di Grizzana Morandi (AVT)</i> .....	15
2.2.2.4.3. <i>Argille varicolori della Val Sillaro (ASL)</i> .....	15
2.2.2.4.4. <i>Formazione di Monte Venere (MOV)</i> .....	16
2.2.2.4.5. <i>Formazione di Monghidoro (MOH)</i> .....	16
2.2.2.4.6. <i>Formazione di Poggio (FPG)</i> .....	16
2.2.2.4.7. <i>Formazione di Monte Morello (MLL)</i> .....	16
2.2.2.5. Unità subliguri ed “incertae sedis” .....	17
2.2.2.5.1. <i>Argille e calcari di Canetolo (ACC)</i> .....	17
2.2.2.5.2. <i>Formazione di Sassonero (SSN)</i> .....	17

2.2.2.5.3. <i>Formazione di Cà di Lesso (LES)</i> .....	17
2.2.2.6. Olistostromi.....	17
2.2.2.6.1. <i>Olistostroma di Rio delle Pioppe (FRP)</i> .....	18
2.2.2.6.2. <i>Olistostroma del Torrente Sellustra (SLL)</i> .....	18
<b>3. METODI</b> .....	<b>19</b>
3.1. ANALISI DA REMOTO.....	19
3.1.1. Mappatura del canale attivo e calcolo della sua larghezza .....	19
3.1.2. Mappatura e classificazione delle opere.....	21
3.1.3. Definizione del grado di confinamento.....	22
3.1.4. Calcolo dell'indice di sinuosità .....	24
3.1.5. Calcolo dell'indice di intrecciamento .....	25
3.2. RACCOLTA DATI DELLE PRECIPITAZIONI.....	25
3.3. RACCOLTA DATI SULL'USO SUOLO .....	26
3.4. ANALISI DELLE INCERTEZZE ASSOCIATE ALLA MAPPATURA DA REMOTO DEL CANALE ATTIVO.....	27
<b>4. RISULTATI</b> .....	<b>28</b>
4.1. FORZANTE IDRO-METEREologica.....	28
4.2. FORZANTE ANTROPICA .....	29
4.3. ANALISI MULTITEMPORALE DELLA LARGHEZZA MEDIA DEL CANALE ATTIVO ALLA SCALA DI TRATTO .....	32
4.3.1. Variazioni della larghezza media del canale attivo: 1954-1969.....	33
4.3.2. Variazioni della larghezza media del canale attivo: 1969-1976.....	33
4.3.3. Variazioni della larghezza media del canale attivo: 1976-1996.....	34
4.3.4. Variazioni della larghezza media del canale attivo: 1996-2008.....	35
4.3.5. Variazioni della larghezza media del canale attivo: 2008-2011.....	36
4.3.6. Variazioni della larghezza media del canale attivo: 2011-2014.....	37
4.3.7. Variazioni della larghezza media del canale attivo: 2014-2016.....	38
4.3.8. Esempi rappresentativi dei trend evolutivi .....	39
4.3.8.1. Tratto 10.....	40
4.3.8.2. Tratto 3.....	42
4.3.8.3. Trattati 19 e 20 .....	44
4.3.8.4. Tratto 22.....	45
4.4. ANALISI DELLE INCERTEZZE SULLE MISURE DELLA LARGHEZZA DEL CANALE ATTIVO STIMATE DA REMOTO .....	48
4.5. INDICE DI SINUOSITÀ E DI INTRECCIAMENTO.....	54
<b>5. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI</b> .....	<b>56</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>59</b>
<b>SITOGRAFIA</b> .....	<b>59</b>
<b>APPENDICE</b> .....	<b>60</b>
<u>ALLEGATO 1</u> : variazione della larghezza media del canale attivo.....	60
<u>ALLEGATO 2</u> : esempi rappresentativi dei trend evolutivi .....	64

Tratto 10 .....	64
Tratto 3 .....	66
Tratti 19 e 20 .....	68
Tratto 22 .....	70
<u>ALLEGATO 3</u> : analisi delle incertezze associate alla mappatura da remoto del canale attivo.....	72
<u>ALLEGATO 4</u> : indice di sinuosità .....	73
<u>ALLEGATO 5</u> : indice di intrecciamento .....	78



## RIASSUNTO

Durante l'ultimo secolo i fiumi italiani hanno subito delle variazioni morfologiche molto simili; in particolare tra gli anni '50 e gli anni '80-'90, si sono registrati restringimenti, generalmente superiori al 50% e in alcuni casi anche dell'85-95%. Questo lavoro si basa sull'analisi multitemporale, a partire dagli anni '50, dei cambiamenti morfologici riguardanti la larghezza del canale attivo del Fiume Sillaro. L'alveo è stato suddiviso in tratti, sulla base della metodologia proposta da Montgomery & Buffington (1997), in maniera tale da minimizzare la variabilità morfologica interna ad ogni tratto e massimizzare la variabilità tra tratti. L'analisi è stata effettuata prevalentemente attraverso immagini telerilevate in ambiente GIS, eseguendo la mappatura del canale attivo e calcolando la larghezza media di quest'ultimo alla scala di tratto per ciascun anno analizzato; sono stati anche definiti, sempre alla scala di tratto e per ogni anno analizzato, l'indice di sinuosità e di intrecciamento. Poiché la morfodinamica di un fiume è controllata da forzanti esterne, sono stati presi in considerazione (i) precipitazioni, (ii) grado di confinamento, (iii) opere in alveo, (iv) prelievo di inerti in alveo e (v) uso del suolo. Infine, attraverso delle misure di campo, è stata eseguita l'analisi delle incertezze associate alla mappatura da remoto del canale attivo.

Il Fiume Sillaro mostra, nei primi anni dell'analisi, un diffuso restringimento del canale attivo, che raggiunge le percentuali più elevate nell'intervallo 1976-1996; tra il 2011 e il 2014 si registra invece un contenuto allargamento generale del canale attivo, che rimane stabile tra il 2014 e il 2016. Le medie di restringimento complessivo nel periodo 1954-2016 sono comprese tra il 5 e l'81% (media del 45%) nella porzione di alveo confinato, tra il 47 e il 92% (media del 76%) nella porzione di alveo semiconfinato e tra il 68 e il 91% (media dell'83%) nella porzione di alveo non confinato.

Dai dati acquisiti si può ipotizzare che i restringimenti siano principalmente correlati alla diminuzione di sedimento in alveo, dovuta sia all'estrazione di materiale in alveo che alla riduzione degli apporti di sedimento provenienti dagli affluenti principali.



## 1. INTRODUZIONE

Nell'ultimo secolo, in particolar modo a partire dagli anni cinquanta, gli alvei di molti corsi d'acqua italiani hanno subito delle profonde modifiche morfologiche. Con il passare del tempo questi cambiamenti hanno conquistato l'interesse della comunità scientifica (Surian & Rinaldi, 2008), le cui ricerche hanno mostrato processi molto simili nei fiumi italiani.

Secondo Surian et al. (2009b), le variazioni comuni agli alvei fluviali sono state un restringimento, generalmente superiore al 50% ed in alcuni casi anche dell'85-90%, ed un abbassamento del fondo dell'ordine di alcuni metri, arrivando localmente anche a 10-12 metri. Tali processi si sono manifestati in alcuni corsi d'acqua a partire dalla fine del XIX secolo, ma sono stati intensi per un periodo relativamente breve, ossia tra gli anni '50 e gli anni '80-'90 del secolo scorso. Le cause di questi cambiamenti nella morfologia fluviale sono state individuate nel prelievo di sedimenti dagli alvei, generalmente il fattore più rilevante, nella costruzione di dighe, in vari interventi di canalizzazione, in variazione di uso del suolo a scala di bacino (in particolare l'aumento della copertura boschiva) e nelle sistemazioni idraulico-forestali. A questa fase principale di modifica degli alvei è seguita una fase più recente, a partire circa dagli anni novanta, caratterizzata in vari casi da un allargamento dell'alveo e da una stabilità, o aggradazione, del fondo. Tali processi sono generalmente lontani dall'aver compensato le variazioni indotte dalla fase precedente e sono presenti tratti fluviali tuttora soggetti a restringimento e incisione.

Questo lavoro prende in considerazione un corso d'acqua appenninico, il Sillaro, e ne analizza, a partire dagli anni '50, i cambiamenti morfologici riguardanti la larghezza del canale attivo, tenendo conto dei fattori che possono aver influito sulla sua evoluzione. A differenza degli studi precedenti, è stata effettuata un'analisi alla scala di bacino, suddividendo l'alveo in tratti sulla base della metodologia proposta da Montgomery & Buffington (1997), così da ottenere risultati a maggior risoluzione spaziale, minimizzando la variabilità morfologica interna ad ogni tratto e massimizzando la variabilità tra tratti.

## 2. AREA DI STUDIO

Il Fiume Sillaro, affluente di destra del Reno, si trova nell'Appennino settentrionale; ha origine in territorio toscano, dai versanti settentrionali di Monte La Fine (993 m s.l.m.) presso Piancaldoli, si addentra in Emilia dopo Giugnola e prosegue in direzione NNE, segnando il confine geografico tra l'Emilia e la Romagna. Esce dalle colline presso Castel S. Pietro Terme, dove si chiude il bacino montano avente un'area di 137,6 km<sup>2</sup>, e da qui si dirige a nord-est fino a confluire nel Reno.

Per questo studio è stata presa in considerazione la porzione del Sillaro, situata all'interno del bacino montano, che ha inizio in località Tomba e si estende verso valle per una lunghezza di circa 27 km, fino ad arrivare a Castel S. Pietro Terme (Figura 1).

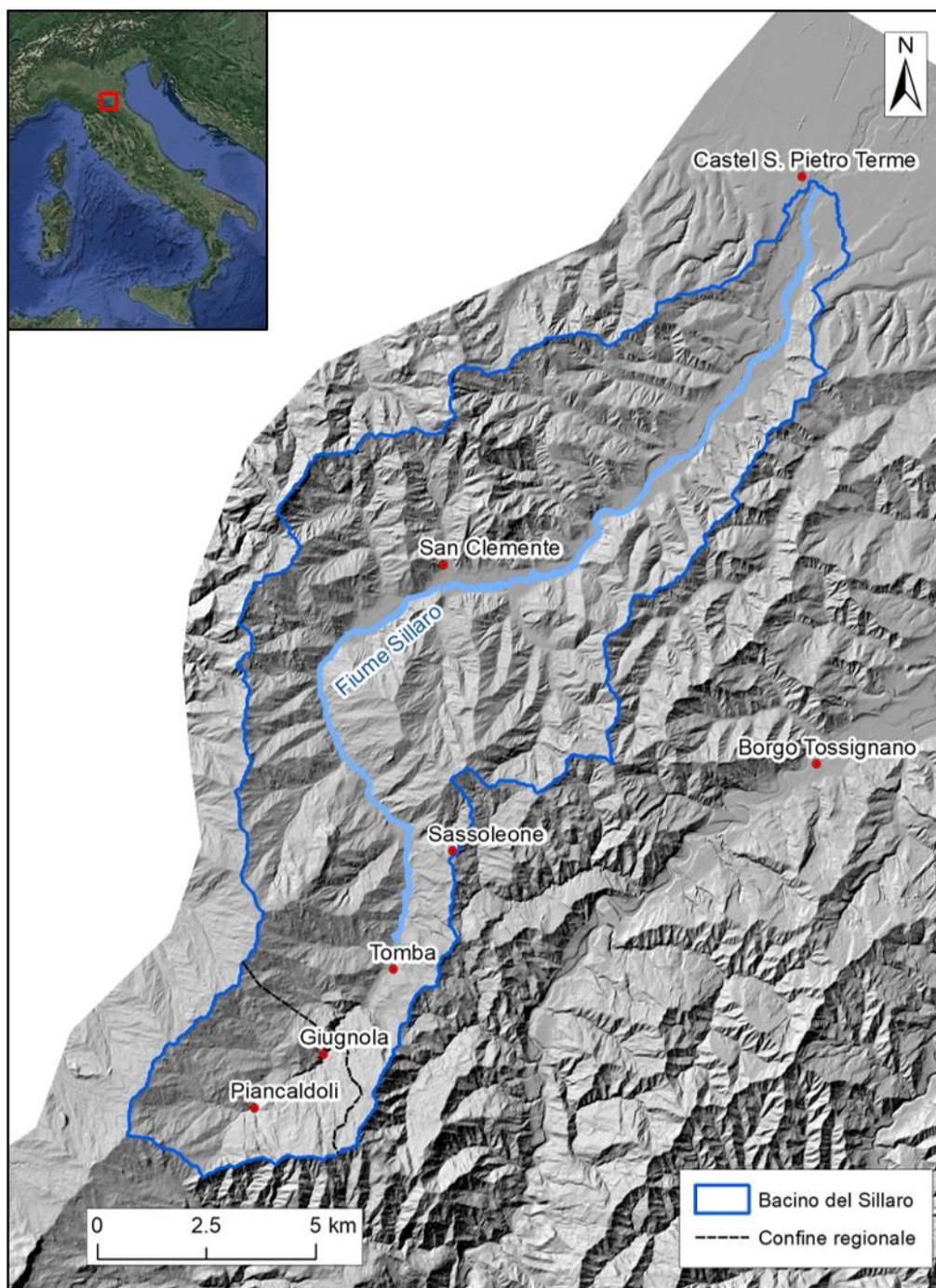


Figura 1. Localizzazione dell'area di studio.

## 2.1. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

La morfologia generale dell'area è abbastanza dolce, solo il 7,6% del bacino presenta pendenze superiori al 35%, ad eccezione del paesaggio calanchivo (Pavanelli et al., 2004); nei versanti, costituiti da materiali argillosi incoerenti, si hanno vistosi fenomeni franosi ed erosione accelerata con calanchi (Figura 2). Anche nel tratto in cui il fiume solca la marnosa arenacea più compatta sono presenti frane di crollo per scalzamento al piede delle pendici; sono frequenti le pareti argillose ove i massi e blocchi inglobati restano sospesi, dando luogo ad un paesaggio singolare e caratteristico (Ferraresi M. & Venturini L., 1983).

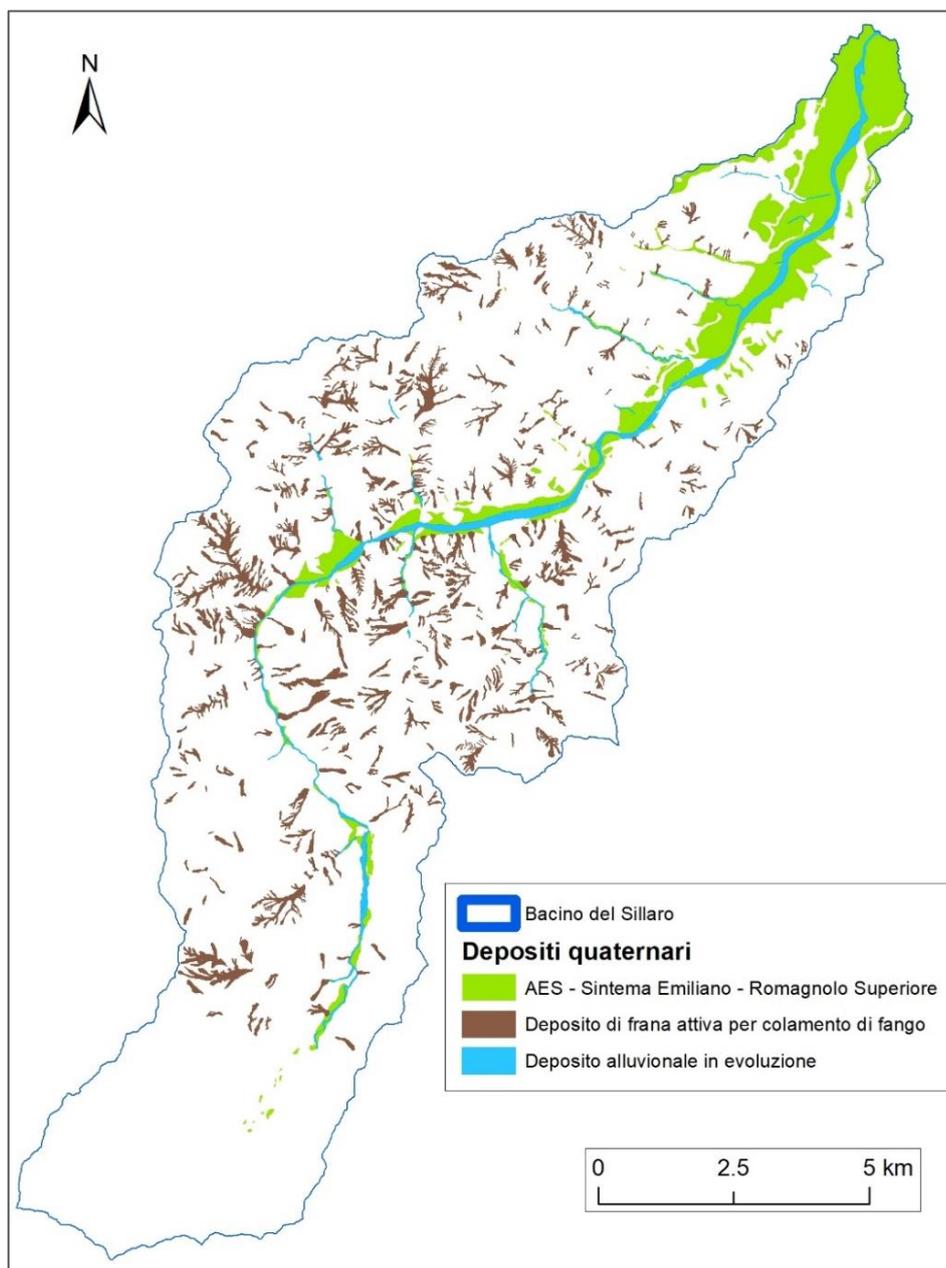


Figura 2. Localizzazione dei depositi di frana attiva per colamento di fango nel bacino del Sillaro (da geoportale Regione Emilia-Romagna, modificata).

L'idrografia del bacino presenta un'elevata densità di drenaggio con il tipico pattern dendritico caratteristico delle aree impermeabili a causa della litologia argillosa (Pavanelli et al., 2004). L'alveo che a monte si presenta confinato, si allarga in prossimità di San

Clemente, dove il fondovalle è coperto da lembi di alluvioni terrazzate (Figura 3), alternando canali singoli (*single thread*) a canali *wandering*.



Figura 3. Depositi alluvionali terrazzati in località San Clemente.

Il materiale di fondo dell'alveo (Figura 4) è costituito per lo più da massi, ciottoli grossolani, ghiaie e sabbie provenienti quasi esclusivamente dal disfacimento del caotico argilloso che rilascia clasti calcarei, calcareo marnosi, ofiolitici in esso inglobati. Le acque sono ad elevata torbidità perché sono veloci e portano in sospensione le particelle argillose erose lungo il corso (Ferraresi M. & Venturini L., 1983).



Figura 4. Veduta del materiale di fondo dell'alveo del Sillaro.

## 2.2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

La valle del Fiume Sillaro, posta nel settore centro-nord dell'Appennino settentrionale, rappresenta una zona chiave per la comprensione dell'evoluzione della catena appenninica, perché proprio qui si trova la "Linea del Sillaro", definita in letteratura come lineamento tettonico trasversale che mette a contatto le unità caotiche con la Successione Umbro-Marchigiana Romagnola; essa si risolve in un sistema di dislocazioni cartografabili tra le valli dei torrenti Sillaro e Sellustra (Benini et al., 2009).

Dal punto di vista geologico nell'area di studio sono presenti depositi quaternari e le formazioni definite come 'unità di catena'.

Le informazioni di carattere geologico, riportate nei paragrafi successivi, sono estrapolate dalle 'Note illustrative della Carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000', foglio 238 "Castel S. Pietro Terme" (Benini et al., 2009).

### 2.2.1. I depositi quaternari

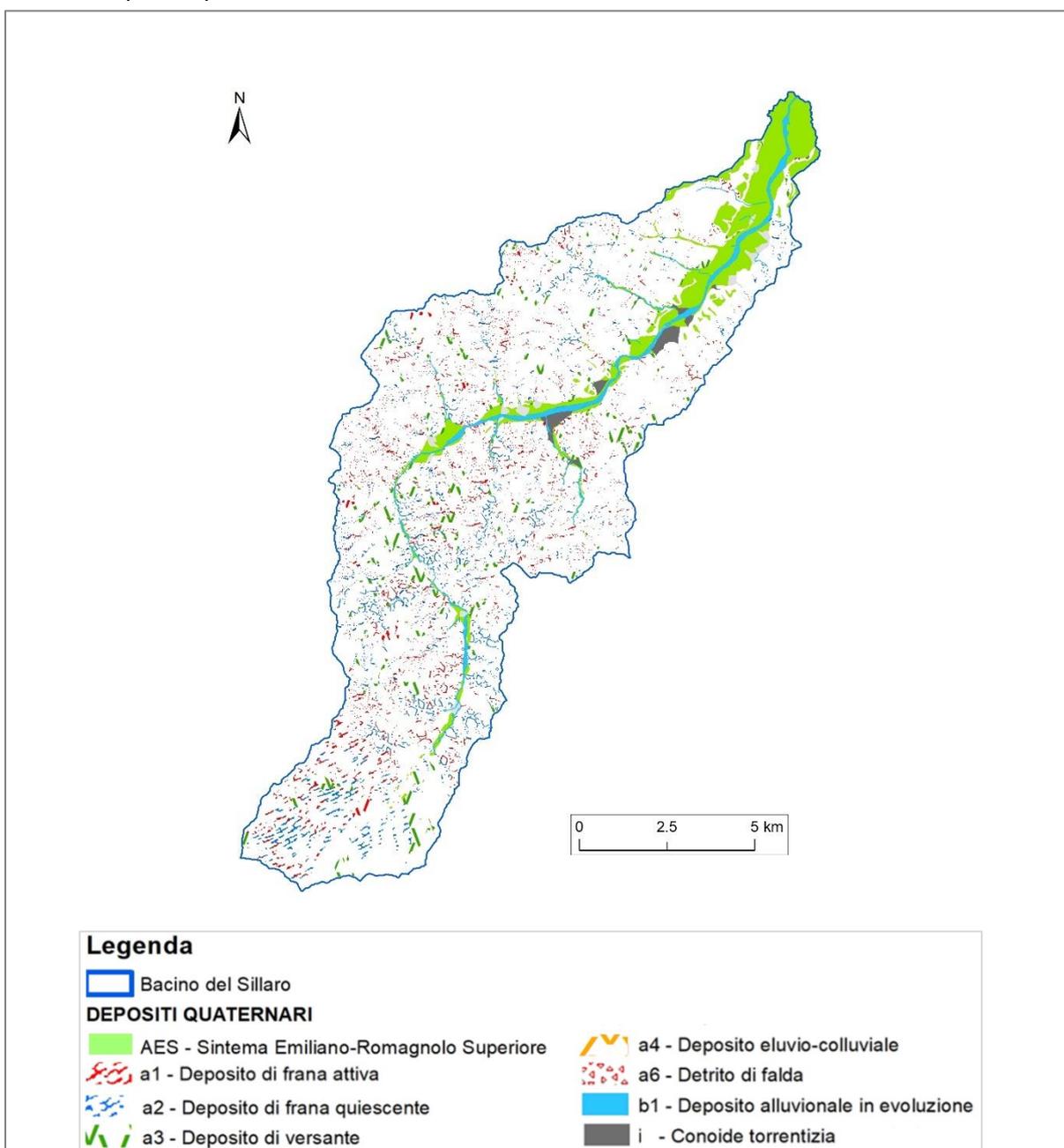


Figura 5. Depositi quaternari del bacino del Sillaro (da geoportale Regione Emilia-Romagna, modificata).

Le unità quaternarie presenti in quest'area (Figura 5) vengono suddivise in:

- depositi continentali privi di una formale connotazione stratigrafica;
- il "Supersintema Emiliano-Romagnolo".

#### 2.2.1.1. Depositi continentali privi di una formale connotazione stratigrafica

In questa categoria ricadono: accumuli di frane, depositi di versante ed eluvio-colluviali, detriti di falda e depositi alluvionali in evoluzione.

##### 2.2.1.1.1. Accumuli di frane ( $a_1$ , $a_2$ )

Si tratta di depositi caotici di litotipi eterogenei ed eterometrici, talvolta monogenici, in matrice pelitica o limoso-sabbiosa, prodotta da "creep", smottamenti e colate, frane rotazionali e crolli in roccia. Si distinguono le frane con evidenti segni di attività ( $a_1$ ) da quelle quiescenti ( $a_2$ ).

##### 2.2.1.1.2. Depositi di versante ( $a_3$ ) e depositi eluvio-colluviali ( $a_4$ )

Accumuli detritici eterogenei costituiti da una matrice fine sabbioso-limosa inglobante ciottoli o subordinati blocchi e frammenti eterometrici di strati; la matrice può apparire arrossata per pedogenizzazione. Questi depositi si sono accumulati per l'azione delle acque superficiali e/o della gravità.

Lo spessore massimo osservato è limitato, sempre inferiore a 10 metri.

##### 2.2.1.1.3. Detriti di falda ( $a_6$ )

Sono depositi localizzati per lo più ai piedi di pareti rocciose, scarpate o versanti acclivi, costituiti da blocchi, generalmente di arenarie ed in minor misura di calcari, calcareniti e gessi, di dimensioni variabili tra qualche  $dm^3$  e molte decine di  $m^3$ , immersi in matrice argillosa o pelitico-sabbiosa, più spesso a contatto tra loro.

##### 2.2.1.1.4. Depositi alluvionali in evoluzione ( $b_1$ )

Si tratta di blocchi di ghiaie, sabbie e subordinati limi argillosi deposti in alveo o comunque sempre entro argine, parzialmente vegetati. Lo spessore varia da pochi cm, dove il fiume è in erosione, ad un paio di metri lungo i tratti in cui il materasso alluvionale ricopre il substrato roccioso.

#### 2.2.1.2. Supersintema Emiliano-Romagnolo

Il Supersintema Emiliano-Romagnolo è l'unità stratigrafica che comprende l'insieme dei depositi quaternari di origine continentale affioranti al margine appenninico padano e dei sedimenti ad essi correlati nel sottosuolo della pianura emiliano-romagnola. All'interno del Supersintema Emiliano-Romagnolo è presente una superficie di discordanza angolare di pochi gradi che separa depositi prevalentemente limosi e sabbiosi di piana alluvionale (Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore, AEI) da sovrastanti ghiaie di conoide o terrazzo alluvionale (Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore, AES). Lo spessore massimo dell'unità in pianura è di un centinaio di metri. Età: Pleistocene medio – Olocene.

##### 2.2.1.2.1. Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI)

I terreni che costituiscono questa unità sono quasi sistematicamente erosi.

L'unità è costituita da limi più o meno sabbiosi, sabbie limose ed argille in genere organizzati in sequenze positive dello spessore di pochi metri, con al tetto frustoli vegetali

e gasteropodi continentali o paleosuoli ai primi stadi evolutivi. L'ambiente deposizionale è di piana alluvionale.

#### 2.2.1.2.2. *Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES)*

Si tratta di ghiaie e sabbie di canale fluviale dei terrazzi intravallivi e delle conoidi del margine appenninico che, sottocorrente, lasciano spazio ai sedimenti fini che caratterizzano la fascia di pianura. Nelle porzioni intravallive e di margine appenninico, l'unità è costituita da depositi terrazzati di piana alluvionale intravalliva che poggiano in discordanza su depositi marini più antichi. Lo spessore di AES varia da qualche decina di metri al margine appenninico fino a un massimo di 100 metri circa nel sottosuolo.

Il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore è suddiviso in alcune unità stratigrafiche di rango inferiore, definite 'subsintemi' (AES<sub>4</sub>, AES<sub>5</sub>, AES<sub>6</sub>, AES<sub>7</sub> ed AES<sub>8</sub>). Essi si distinguono tra loro per: la posizione morfologica, ovvero la quota di affioramento delle unità; la presenza tra le diverse unità di scarpate erosive prive o quasi prive di depositi alluvionali; l'assetto geometrico, ovvero una diversa inclinazione per le diverse unità; i caratteri della pedogenesi; l'età dei depositi, deducibili soprattutto sulla base dei reperti archeologici presenti, o dalle datazioni radiometriche.

I limiti basali dei diversi subsintemi sono costituiti dalle superfici erosive di base dei depositi alluvionali di terrazzo e da superfici di non deposizione evidenziate dai paleosuoli. In alcuni settori di intefluvio l'unità è indistinta, caratterizzata da depositi fini prevalentemente argillosi, al tetto si sviluppano suoli non calcarei molto evoluti (alfisuoli) di colore bruno giallastro o bruno scuro, di spessore fino a cinque-sei metri. Il loro spessore massimo è di poche decine di metri.

Il limite tra la base di AES ed AEI è eroso e pare essere leggermente discordante; il limite superiore di AES corrisponde alla superficie topografica.

#### 2.2.2. Le unità "di catena"

Le formazioni affioranti nella porzione appenninica di quest'area (Figura 6) sono in assoluta prevalenza di genesi sedimentaria, appartenenti a successioni attribuite a diversi domini stratigrafico-strutturali; in particolare sono evidenti in affioramento rapporti di sovrapposizione tettonica con le unità profonde, altrimenti documentati solo da sondaggi profondi o dall'interpretazione di linee sismiche di estensione regionale.

Seguendo l'ordine stratigrafico (dal basso verso l'alto) si distinguono:

- la successione umbro-marchigiano-romagnola;
- la successione del 'Pliocene Intrappenninico Bolognese';
- la successione epiligure, così definita solo per l'intervallo Eocene medio-Messiniano inferiore, sedimentata sulle Liguridi in traslazione;
- le Liguridi, rappresentate dalle unità originariamente appartenenti al dominio ligure, tettonizzate, traslate verso i bacini di avanfossa e marginali dal Miocene inferiore al Plio-Pleistocene;
- le unità di incerta correlazione, attribuite al dominio subligure;
- gli "olistostromi" mio-pliocenici, geometricamente sovrastanti alle formazioni della successione umbro-marchigiana-romagnola, descritti per ultimi in relazione alla presenza, sotto forma di clasti e inclusi sedimentari, di litotipi derivati dalle formazioni appartenenti ai domini stratigrafico-strutturali precedenti.

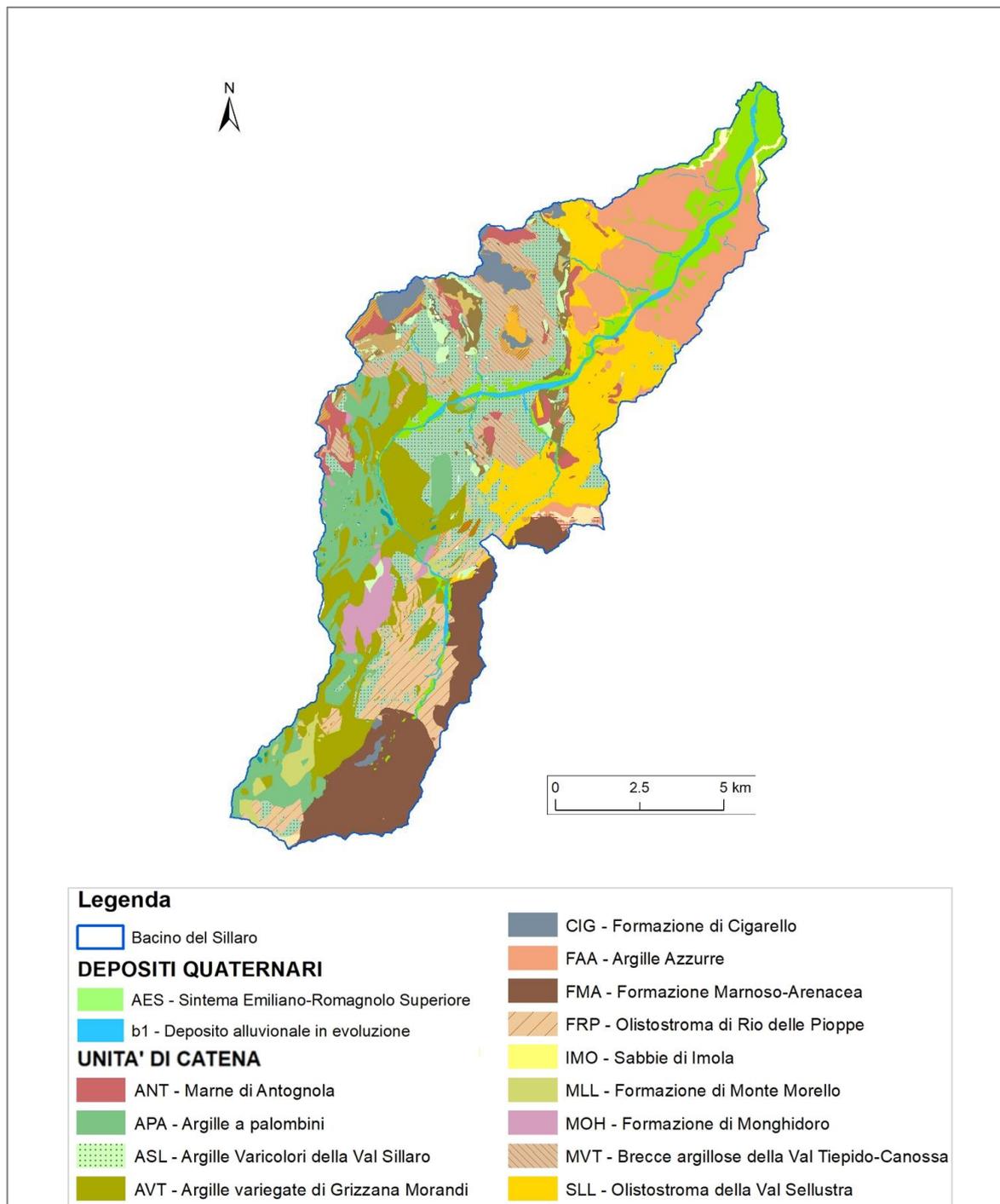


Figura 6. Unità di catena principali presenti all'interno del bacino del Sillaro (da geoportale Regione Emilia-Romagna, modificata).

#### 2.2.2.1. Successione umbro-marchigiana romagnola

La successione umbro-marchigiana romagnola nell'area di studio ha un'età compresa tra il Miocene medio (Serravalliano) ed il Pleistocene inferiore. Presso il margine appenninico bolognese questa formazione affiora anche in un contesto stratigrafico-strutturale diverso da quello che accompagna la successione umbro-marchigiana-romagnola nella sua completezza, in quanto può suturare direttamente terreni di età pliocenica inferiore o più antichi. All'interno della porzione di successione considerata si hanno due superfici di discontinuità di importanza regionale, localizzate alla base della Formazione a Colombacci e delle Sabbie di Imola.

#### 2.2.2.1.1. *Formazione Marnoso-Arenacea Romagnola (FMA)*

Rappresenta una delle unità torbiditiche più potenti ed arealmente diffuse dell'Appennino settentrionale, riempimento di un bacino di avanfossa attivo tra il Langhiano e il Tortoniano. La sedimentazione è principalmente determinata da correnti di torbida con provenienza da N-NW, alimentate da apporti clastici alpini ed incanalate verso SE, secondo l'asse di allungamento del bacino; subordinatamente gli apporti provengono da SE (con abbondanti clasti carbonatici) e da SW (alimentati da nuclei emersi della catena appenninica).

È un'unità pelitico-arenacea con rapporto arenaria/pelite e spessore degli strati variabili; è suddivisa in membri sovrapposti, parzialmente eteropici. Presenta livelli guida come lo 'strato Contessa' e le 'colombine'.

Età: Serravalliano – Tortoniano.

#### 2.2.2.1.2. *Formazione dei 'ghioli di letto' (GHL)*

Costituita da marne argillose e marne siltose grigio-scure, in strati da sottili a medi, piano paralleli, con microfossili e rari Lamellibranchi a guscio sottile, alternate a pacchi di strati sottili o sottilissimi di argille marnose e silt argillosi bituminosi e marne ocracee. Presenti sporadici strati medi di arenarie, anche grossolane. Sono frequenti gli *slumping*. Sedimentazione in ambiente di scarpata, con circolazione ristretta e locali condizioni debolmente euxiniche. Potenza variabile da alcune decine ad un centinaio di metri. Passaggio inferiore graduale sulla Formazione Marnoso-Arenacea.

Età: Miocene superiore, (parte alta del Tortoniano e parte inferiore del Messiniano).

#### 2.2.2.1.3. *Formazione Gessoso-solfifera (GES)*

Unità formatasi per sedimentazione evaporitica di ambiente lagunare, in condizioni tipo 'sabkha' stabilitesi a seguito dell'evento climatico messiniano, in contesto tettonicamente attivo, causa del franamento di blocchi e detrito gessosi. È costituita da gesso selenitico, gessoareniti-gessoruditi e subordinate peliti bituminose e calcari dolomitici. Potenza variabile da pochi metri a 150 m circa.

Passaggio inferiore graduale e rapido sulla Formazione dei 'ghioli di letto'.

Età: Messiniano.

#### 2.2.2.1.4. *Formazione a Colombacci (FCO)*

L'unità comprende argille, argille marnose e siltose grigio-verdi con rari microfossili (prevalentemente Ostracodi salmastri-dulcicoli) e resti organici carboniosi. In esse si intersecano sottili strati di sabbie medie giallastre e verdognole, bioturbate e livelli spessi da 30 a 60 cm di calcari micritici grigio-chiari, finemente laminati ("colombacci"). Sedimentazione di ambiente alluvionale, deltizio e lagunare. Potenza variabile da pochi metri a 30 m circa.

Contatto inferiore netto, erosivo e discordante sulla Formazione Gessoso-solfifera.

Età: Miocene superiore (parte alta del Messiniano).

#### 2.2.2.1.5. *Argille e marne di Riolo Terme (RIL)*

È stata così indicata l'unità corrispondente alle Argille Azzurre (FAA).

Si tratta di argille marnose grigie e grigio-azzurre, con giunti di strato poco evidenti per bioturbazione; presenti rari strati arenacei, sottili, con *ripples*. Abbondanti i microfossili, variabile la concentrazione in macrofossili (Lamellibranchi, Gasteropodi) con biosomi e bioclasti usualmente distribuiti in livelli. Alla base della formazione, presenti marne biancastre ricchissime in Foraminiferi planctonici, correlabili con l'unità delle 'marne di

Cella' (CEA), per uno spessore di qualche metro. Sedimentazione di piattaforma esterna, scarpata e bacino (dove si depositano le facies più arenacee); relativamente alla Successione Umbro-Marchigiana-Romagnola, la sedimentazione della parte alta della formazione avviene in bacini localmente euxinici.

Età: Pliocene inferiore (Zancleano) – Pleistocene inferiore (Calabriano).

#### 2.2.2.1.6. Sabbie di Imola (IMO)

L'unità affiora diffusamente nel margine appenninico della Romagna e dell'Emilia orientale, e rappresenta la più recente tra le unità marine dell'Appennino Settentrionale. Le sabbie di Imola in quest'area sono costituite da sabbie gialle fini e finissime, subordinatamente medie e grossolane in strati generalmente amalgamati, rare intercalazioni pelitiche discontinue di spessore generalmente decimetrico, che localmente costituiscono corpi lenticolari spessi sino a 3 metri. L'ambiente di sedimentazione di queste sabbie e ghiaie è deltizio. Spessore massimo di alcune decine di metri.

Il limite basale sulle argille plio-pleistoceniche è un contatto netto con discordanza angolare, che individua una superficie di discontinuità di carattere regionale. Anche il limite superiore è marcato da una discontinuità regionale che sovrappone i depositi quaternari continentali alle Sabbie di Imola.

Età: parte basale del Pleistocene medio.

#### 2.2.2.2. Pliocene Intrappenninico

Sono così indicate le unità plioceniche in posizione strutturale interna rispetto ai depositi pliocenici del margine appenninico, separate da questi ultimi attraverso una fascia di formazioni più antiche, tettonizzate.

##### 2.2.2.2.1. Formazione di Monte Adone (ADO)

Arenarie e conglomerati suddivisi in membri parzialmente eteropici. Sedimentazione di ambiente fluviale e marino marginale.

Potenza complessiva della formazione variabile da alcune decine a varie centinaia di metri.

Età: Pliocene medio-superiore (Piacenziano) - Gelasiano.

#### 2.2.2.3. Successione Epiligure

Viene così indicata la successione costituita dalle unità sedimentate in discordanza (o paraconcordanza) sulle unità liguri tettonizzate, limitata tuttavia alle formazioni sedimentarie nell'intervallo di tempo compreso tra l'Eocene medio e il Messiniano inferiore. La base stratigrafica della successione corrisponde ad una superficie di discontinuità stratigrafica di importanza regionale; all'interno della successione si rilevano ulteriori discontinuità, che registrano altrettante fasi tettoniche sindeposizionali.

Le formazioni vengono descritte in ordine di età.

##### 2.2.2.3.1. Formazione di Loiano (LOI)

Nota come Arenarie di Loiano, nella facies più comune si hanno arenarie feldspatiche biancastre scarsamente cementate o cementate in modo differenziale (a "cogoli", sovente orientati lungo fratture), la cui granulometria varia da medio-fine a grossolana.

Le arenarie si presentano in strati medi, spessi e banchi frequentemente amalgamati o separati da pochi centimetri di peliti verdastre. La geometria degli strati è piano parallela alla scala dell'affioramento.

Presenti livelli conglomeratici o microconglomeratici a *clay-chips*, localizzati in riempimenti di docce erosive alla base degli strati o comunque nella porzione basale degli stessi.

Sedimentazione di bacino torbido confinato, con locali condizioni di scarpata e piede scarpata, indicate dai depositi di *debris flow*.

Complessivamente, il contatto inferiore della Formazione di Loiano sulla Formazione di Monghidoro, con o senza l'imposizione di breccie poligeniche ed argille marnose, rappresenta una superficie di discontinuità di importanza regionale.

Età: Eocene medio, Luteziano (parte superiore) – Bartoniano.

#### 2.2.2.3.2. *Marne di Monte Piano (MMP)*

Si tratta di marne argillose rossastre e rosate, recanti rari strati sottili di arenarie feldspatiche del tutto simili a quelle della Formazione di Loiano. Sedimentazione di scarpata e bacino, con apporti torbido distali.

La potenza è estremamente variabile, da pochi metri ad alcune decine di metri.

Età: Eocene medio e superiore, Bartoniano – Priaboniano.

#### 2.2.2.3.3. *Formazione di Ranzano (RAN)*

Questa formazione si riscontra in successioni incomplete e lacunose, appartenenti ad inclusi sedimentari (olistoliti) entro le breccie argillose che compongono gli olistostromi di San Clemente e della Val Sellustra. Le arenarie hanno grana fine, e colore verdastro al taglio fresco; sono gradate e sottilmente laminate sin dalla base dello strato.

In alcune zone il contatto inferiore stratigrafico è netto sulle Marne di Monte Piano mentre superiormente il passaggio alle marne della Formazione di Antognola è graduale. Sedimentazione di bacino torbido, in condizioni distali o di alto strutturale.

Potenza estremamente variabile, da pochi metri a qualche decina di metri.

Età: Eocene terminale – Oligocene inferiore, Priaboniano (parte alta) – Rupeliano.

#### 2.2.2.3.4. *Formazione di Antognola (ANT) e Breccie argillose della Val Tiepido-Canossa (MVT)*

Queste unità vengono trattate insieme per meglio descriverne i rapporti stratigrafici, che vedono le Breccie argillose della Val Tiepido-Canossa formare lenti o interdigitarsi con le peliti della Formazione di Antognola. Si tratta infatti di un'unità litologicamente composta a scala regionale, data da peliti (ANT) in cui si intercala un corpo lenticolare di arenarie feldspatiche (Membro di Anconella) e si interdigita un'unità di breccie argillose poligeniche (Breccie argillose della Val Tiepido-Canossa).

La Formazione di Antognola è costituita prevalentemente da marne, marne siltose grigie a stratificazione poco evidente per bioturbazione, sporadicamente con intercalazioni di arenarie vulcanoclastiche. La fratturazione si sviluppa per superfici curve concentriche, recanti patine mangesifere di alterazione. Localmente, recano intercalazioni di torbiditi arenaceo-pelitici in strati medi, A/P circa uguale a 1. Alla scala del campione a mano, le arenarie (a grana media e grossolana) presentano una composizione a prevalenti clasti litici ofiolitici.

L'unità delle Breccie argillose della Val Tiepido-Canossa è costituita da breccie argillose poligeniche con clasti prevalentemente calcilitici in matrice argillosa grigia e costituisce un corpo lenticolare che si divide in lingue entro le peliti. Queste breccie sono state correlate con l'unità "Canossa" dell'area-tipo dell'Appennino reggiano in quanto presentano analogia posizione stratigrafica.

Sedimentazione di scarpata e bacino torbido confinato, accompagnata dalla messa in posto di colate di fango, detrito e blocchi mono- o pluriformazionali.

La formazione, comprensiva dell'unità Canossa", raggiunge la potenza massima di alcune centinaia di metri.

Età: Oligocene inferiore – Miocene inferiore, Rupeliano-Aquitano (con possibile estensione alla parte inferiore del Burdigaliano) per la Formazione di Antognola; Miocene inferiore, Aquitano per le Breccie argillose della Val Tiepido-Canossa.

#### 2.2.2.3.5. *Formazione di Contignaco (CTG)*

È costituita da marne, marne siltose giallastre o grigio scure al taglio fresco, con selce diffusa o in liste e noduli, in strati medi e sottili con giunti poco evidenti. La fratturazione può essere pervasiva, accompagnata da patine magnesifere di alterazione. Sedimentazione di scarpata, con depositi pelagici arricchiti in selce ed apporti torbidity, prevalentemente vulcanoclastici.

Contatto inferiore (male esposto) sulle Marne di Antognola, altrove nell'Appennino bolognese passaggio inferiore graduale per alterazione sulle peliti di ANT.

La Formazione di Contignaco è rappresentativa, entro la successione epiligure, dell'orizzonte siliceo" che ha valore di marker stratigrafico nel Miocene basale, sia per bacini di *piggy-back* che per quelli di *avanfossa*.

Età: Miocene inferiore, Aquitano – Burdigaliano.

#### 2.2.2.3.6. *Formazione di Pantano (PAT)*

Appartiene al Gruppo di Bismantova; consiste di areniti fini grigio chiare, scure al taglio fresco, fossilifere; strati medi poco percepibili per bioturbazione. La porzione basale dell'unità è localmente costituita da un corpo lenticolare di areniti (con granuli glauconitici) e biocalcareni in strati da sottili a medi, piano paralleli, ondulati con *ripples* da onda o *hummocky cross-lamination*. Sedimentazione di piattaforma interna.

Nella porzione stratigraficamente superiore dell'unità, le areniti si arricchiscono in frazione pelitica, assumendo un colore grigio-scuro; segnalati sporadici livelli di conglomerati.

Il contatto inferiore dell'unità sulla Formazione di Contignaco corrisponde ad una superficie di discontinuità di importanza regionale.

Potenza massima di 500 m circa.

Età: Miocene medio, Langhiano e dubitativamente Burdigaliano.

#### 2.2.2.3.7. *Formazione di Cigarellino (CIG)*

È costituita da marne siltose grigie, in strati medi e spessi, mal percepibili per bioturbazione, localmente ricche in macrofossili (prevalentemente gasteropodi e lamellibranchi a guscio sottile). Sedimentazione di piattaforma esterna e di scarpata, localmente in condizioni di bacino torbidity confinato, ad esempio, in solchi governati dalle principali strutture tettoniche. Il passaggio da PAT a CIG indica un approfondimento dell'intero bacino, registrato a scala regionale.

Nell'alta valle del Sillaro, all'altezza di Giugnola, si ha l'unica situazione in cui marne, recanti intercalazioni di areniti in strati medi, risedimentati, affiorano svincolate dal resto della successione epiligure. Queste ultime da un punto di vista litologico e cronostatigrafico sono affini alla Formazione di Cigarellino con cui sono state correlate e si presentano associate alle breccie argillose poligeniche dell'olistostroma del Rio delle Pioppe. I rapporti sono stati interpretati come quelli di un incluso sedimentario.

Età: Miocene medio-superiore, Langhiano – Tortoniano (parte basale).

#### 2.2.2.3.8. *Formazione del Termina (TER)*

Sono areniti fini, marne siltose grigie passanti superiormente a marne argillose grigio-scure o nerastre. Abbondanti i microfossili, talora piritizzati (Lamellibranchi, Echinidi,

Gasteropodi). Sedimentazione di piattaforma esterna e scarpata, con locali condizioni anossiche.

Contatto inferiore in discontinuità sulla formazione di Cigarellino; potenza variabile da un centinaio a 350 m.

Età: Miocene superiore, Tortonian – Messiniano?.

#### 2.2.2.4. Unità Liguri

Comprendono le unità litostratigrafiche riconducibili al dominio ligure, che costituiscono parzialmente il substrato del “Pliocene Intrappenninico” e completamente quello della successione epiligure. Nell’ambito del comune dominio stratigrafico ligure, appartenevano ad originarie successioni parzialmente conservate o ricostruibili (con un certo margine di interpretazione) in base ad analogie di facies e conoscendo l’età delle formazioni coinvolte, grazie ai dati biostratigrafici. Tale ricostruzione ha comunque valore relativo, poiché applicata a terreni dalla complessa storia deformativa sin- e post-deposizionale (di cui la “fase ligure” rappresenta solo un evento), sradicati e trasportati entro bacini progressivamente più recenti, come componenti di nuove unità sedimentarie sintettoniche.

Di seguito sono descritte le formazioni in ordine di età.

##### 2.2.2.4.1. Argille a Palombini (APA)

Rappresenta l’unità caotica ligure arealmente più diffusa. Sono argilliti grigi o a tenui focature rossastre, con clivaggio scaglioso pervasivo o talora fissili. Inglobano *boudins* di calcilutiti biancastre per alterazione, grigio-scure al taglio, a luoghi silicizzate. Subordinati i blocchi di arenarie mangesifere. Sedimentazione pelagica argillosa in bacino profondo (al di sotto della profondità di compensazione dei carbonati), con apporti di fanghi carbonatici risedimentati ed arenarie torbiditiche.

Comunemente, la formazione presenta l’aspetto caotico dovuto alla tessitura a “blocchi in matrice”, dove i blocchi calcarei sono più o meno allineati e complanari; in rari affioramenti è preservata l’originaria stratificazione “indisturbata”, con alternanze di strati medi calcarei, gradati, ed argilliti fissili. I contatti dell’unità sono ovunque tettonici o tettonizzati; la potenza originaria è stimabile in alcune centinaia di metri.

Età: Cretaceo, Aptiano – Turoniano.

##### 2.2.2.4.2. Argille varicolori di Grizzana Morandi (AVT)

Unità caotica data da prevalenti argilliti siltose rosso-mattone, fissili; argilliti bluastre e rosse. La stratificazione è localmente preservata per modesti spessori, mentre sono comuni le superfici di clivaggio scaglioso anastomosate, nonché superfici lucide e striate dotate di una maggiore continuità alla scala dell’affioramento ed associate a zone di taglio. Solo localmente la stratificazione è ancora conservata. Inglobano blocchi pluridecimetri di arenarie brune per alterazione, grigie al taglio fresco, con lamine piano parallele e ondulate. Sedimentazione pelagica argillosa, con apporti torbiditici grossolani, in bacino profondo.

Età: Cretaceo inferiore e superiore.

##### 2.2.2.4.3. Argille varicolori della Val Sillaro (ASL)

Sono argilliti nerastre, con focature rosse e verdi, pervasivamente interessate da superfici di clivaggio scistoso anastomosate. Inglobano blocchi di calcilutiti biancastre (a luoghi marnose) ed arenarie fini grigie, con laminazione ondulata o convoluta. Sedimentazione argillosa pelagica di piana sottomarina (al di sotto della CCD) o, localmente, di alto

strutturale e scarpata, con apporti torbiditici che, nel tempo, si evolvono da fanghi carbonatici a sedimenti più grossolani con apprezzabile frazione silicoclastica.

Solo per modesti spessori affioranti, è preservata l'originaria stratificazione sottile con alternanze di letti argillitici varicolorati. Contatti ovunque tettonici o tettonizzati; potenza stratigrafica originaria probabilmente di alcune centinaia di metri.

Età: Cretaceo inferiore – Eocene?.

#### 2.2.2.4.4. *Formazione di Monte Venere (MOV)*

È costituita da strati spessi e banchi torbiditici di marne calcaree grigio chiare, con base arenitica. I banchi sono separati da spessori decimetrici di siltiti grigio scure, talora fissili. La facies è quella di un *flysch* ligure, del tipo "ad Elmintoidi". Sedimentazione di bacino torbiditico profondo.

Potenza parziale stimata in alcune decine di metri.

Età: Cretaceo superiore, Campaniano (parte superiore) – Maastrichtiano.

#### 2.2.2.4.5. *Formazione di Monghidoro (MOH)*

*Flysch* dato da torbiditi in strati sottili, medi e banchi arenaceo-pelitici, A/P variabile (valore modale compreso tra 2/1 e 1/2), separati da spessori decimetrici di argilliti nerastre. Rare le intercalazioni di strati sottili calcarei o calcareo marnosi, bianchi o rosati. Le arenarie sono quarzose, da medie a grossolane, con grado di cementazione variabile. Sedimentazione di bacino torbiditico, alimentata da apporti clastici derivanti dallo smantellamento di rilievi a composizione granitica e metamorfica.

La potenza parziale dell'unità è stimata in 500-600 m.

Età: Cretaceo superiore (Maastrichtiano) – Paleocene (Thanetiano).

#### 2.2.2.4.6. *Formazione di Poggio (FPG)*

Sono argilliti ed argilliti siltose rosso-mattone e subordinatamente verdi, con "isole" verdastre subarrotondate ed ichnofossili ramificati, impregnati di ossidi di manganese. Recano blocchi budinati di arenarie feldspatiche, a laminazione obliqua e *ripples*. Localmente si interdigitano a marne rosa e verdi a stratificazione mal percepibile, affini ai litotipi che costituiscono i banchi di "marne rosate" dei *flysch* liguri paleocenico-eocenici. Il grado di deformazione è elevato, con evidenze di trasposizione tettonica a carico di un'originaria successione pelitico-arenacea, sottilmente stratificata. Sedimentazione in condizione di alto strutturale e scarpata, con apporti torbiditici arenacei in condizioni distali o localmente confinate.

Potenza originaria stimata in un centinaio di metri.

Età: Paleocene inferiore (?) – Eocene medio, Daniano – Luteziano.

#### 2.2.2.4.7. *Formazione di Monte Morello (MLL)*

Costituisce placche isolate, distribuite nella "zona a scaglie" che separa le tettoniti liguri dalla Formazione Marnoso-Arenacea Romagnola ed "olistostromi" associati. Le dimensioni delle placche aumentano procedendo da NE a SW.

Si tratta di torbiditi marnoso-calcaree in banchi e strati spessi, la cui porzione basale è data da areniti nocciola a grana medio-fine, particolarmente ricche in clasti carbonatici, con intervallo Tc di Bouma ben sviluppato, controimpronte di fondo da bioturbazione o impatto. Localmente, le marne calcaree sono rosate, con chiazze verdognole dal diametro di alcuni millimetri. Sedimentazione torbiditica in bacino profondo, su substrato probabilmente costituito da argille varicolori.

La potenza parziale massima raggiunta nelle singole placche è di 150-200 m circa. I contatti sono ovunque tettonici o tettonizzati.

Età: Eocene inferiore e medio, Ypresiano – Luteziano.

#### 2.2.2.5. Unità subliguri ed “incertae sedis”

Vengono raggruppate sotto questo titolo le formazioni, alcune delle quali informalmente definite con nomi locali, riferibili al dominio subligure sulla base della facies e delle età o addirittura di incerta attribuzione. Nella posizione attuale, queste unità appartengono alla “zona a scaglie” strutturalmente interposta tra le tettoniti liguri e la Formazione Marnoso-arenacea, con “olistostromi” serravalliani ad essa associati. Singolarmente, si presentano in genere severamente tettonizzate ed in affioramenti di modesta estensione.

##### 2.2.2.5.1. Argille e calcari di Canetolo (ACC)

Spezzoni plurimetri di successioni stratigrafiche relativamente indisturbate, appartenenti a scaglie tettoniche, sono stati correlati a questa unità del dominio subligure. Sono costituite da alternanze di siltiti argillose nerastre e strati medio-spessi gradati, di calcilutiti grigio-scure a fresco, biancastre alterate. Recano intercalazioni di siltiti marnose fissili grigio chiare e di siltiti verdognole, mangesifere. Sedimentazione pelagica argillosa intervallata da risedimentazione di fanghi carbonatici.

Contatti ovunque tettonici; potenza affiorante di poche decine di metri.

Età: Eocene inferiore – medio (Ypresiano- Luteziano).

##### 2.2.2.5.2. Formazione di Sassonero (SSN)

Formata da torbiditi in strati sottili e medi, costituiti da una porzione basale di areniti a grana medio-fine e peliti fissili, A/P circa uguale a 1/1. Presenti controimpronte di fondo da bioturbazione, con intervalli Tb-Tc di Bouma riconoscibili. Sedimentazione torbiditica.

Recano rare intercalazioni di banchi e strati spessi marnoso-calcarei. È litologicamente affine ai *flysch* liguri terziari in facies calcareo-marnosa. Contatti ovunque tettonici, potenza parziale di alcune decine di metri circa.

Età: Oligocene inferiore (Rupeliano).

##### 2.2.2.5.3. Formazione di Cà di Lesso (LES)

Unità costituita da arenarie e conglomerati affioranti in destra del Fiume Sillaro, all'altezza del mulino di Cà di Lesso.

Comprende diverse litofacies (non differenziate), i rapporti stratigrafici delle quali sono stati cancellati dalla tettonica: arenarie verdastre in strati gradati medio-sottili; microconglomerati con clasti prevalentemente quarzosi subordinatamente litici (diaspri, metamorfiti a grana fine) alternati a marne argillose grigio-brune; marne calcaree in strati medio-spessi. Contatti ovunque tettonici, potenza parziale di poche decine di metri. Sedimentazione torbiditica, localmente ad alta densità e concentrazione di frazione grossolana, in condizioni prossimali.

Età: Oligocene inferiore (?) – Miocene inferiore, Rupeliano (?) – Aquitaniano.

#### 2.2.2.6. Olistostromi

Sono unità caotiche complesse, per le quali è volumetricamente importante la componente in brecce argillose poligeniche ed alla genesi delle quali concorre buona parte delle formazioni descritte precedentemente. Per alcune particolari unità caotiche di genesi sedimentaria è stato utilizzato il termine ‘olistostroma’ in quanto meglio descrittivo degli

aspetti salienti delle unità caotiche in questione, ovvero: complessità nella composizione, data dall'associazione di breccie argillose poligeniche e lembi formazionali eterometrici di provenienza ligure ed epiligure; caratteristiche indicative di una genesi sedimentaria per processi gravitativi da frana sottomarina, riconducibili a colate di fango e detrito accompagnate da scivolamenti in massa di lembi mono- e pluriformazionali.

#### *2.2.2.6.1. Olistostroma di Rio delle Pioppe (FRP)*

L'unità è costituita da breccie poligeniche con matrice argillosa grigio scura, inglobante clasti di prevalenti calcilutiti biancastre, aventi dimensioni mediamente decimetriche o pluridecimetriche. Sedimentazione per colata di fango e detrito, accompagnate da scivolamento gravitativo di membri monoformazionali.

Il contatto inferiore di FRP è tettonico (in parte, tettonizzato?) sulla Formazione Marnoso-arenacea; superiormente FRP è sovrascorso dalle tettoniti liguri, in particolare dalle Argille a Palombini, arealmente prevalenti. Potenza geometrica dell'unità non inferiore a 300 m. La messa in posto sarebbe coeva alla sedimentazione della Marnoso-arenacea serravalliana, in condizioni di scarpata e piede-scarpata presso il margine interno del bacino di avanfossa, in prossimità del fronte di avanzamento delle Liguridi.

#### *2.2.2.6.2. Olistostroma del Torrente Sellustra (SLL)*

Si tratta di prevalenti breccie poligeniche con matrice argillosa grigia e clasti mediamente decimetrici di calcilutiti biancastre. La potenza geometrica dell'unità è di 300 metri circa. Si ipotizza che almeno una parte dell'unità possa essere di età tortoniana, mentre la sua messa in posto è avvenuta principalmente durante il Pliocene.

### 3. METODI

#### 3.1. ANALISI DA REMOTO

L'analisi storica dell'evoluzione del canale attivo del Fiume Sillaro è stata effettuata prevalentemente da remoto, utilizzando i software ArcGIS e QGIS, sulle ortofoto storiche disponibili dal 1954 al 2014; essendosi verificato il 20 settembre 2014 un evento alluvionale nell'adiacente bacino del Fiume Santerno, posto in destra idrografica, è stato preso in considerazione anche l'anno 2016, di cui sono disponibili le prime foto satellitari post alluvione, per verificare se l'evento avesse coinvolto anche il Sillaro o se fosse circoscritto alla scala di bacino.

Di seguito è riportato il materiale utilizzato come base per l'analisi storica (Tabella 1).

Tabella 1. Caratteristiche principali del materiale utilizzato come base per l'analisi storica.

Tipo di documento	Data acquisizione	Risoluzione (m)	Note
DTM	1979	5	/
Ortofoto 1954	1954	1	Bianco e nero
Ortofoto 1969	1969	0.726706	Bianco e nero
Ortofoto 1976	1976	0.924808	Colori
Ortofoto 1996	1996	1	Bianco e nero
Ortofoto 2008	Giugno – Agosto 2008	0.5	Colori
Ortofoto 2011	Maggio – Giugno 2011	0.5	Colori
Ortofoto 2014	Maggio - Agosto 2014	0.5	Colori
Foto satellitari 2016	29 Settembre 2016	0.3	Colori

L'analisi di evoluzione storica è stata effettuata, sulla base di questo materiale, in termini di variazione della larghezza del canale attivo, dell'indice di sinuosità e dell'indice di intrecciamento. Sono stati poi individuati i fattori di controllo che possono aver influito sull'evoluzione dell'alveo, quali grado di confinamento, precipitazioni e forzante antropica, che include le opere idrauliche lungo il corso d'acqua, l'estrazione di materiale in alveo e l'uso del suolo.

##### 3.1.1. Mappatura del canale attivo e calcolo della sua larghezza

La fase preliminare del lavoro ha riguardato la delimitazione del canale attivo del Sillaro per tutti gli anni presi in considerazione. Per canale attivo si intende la porzione di alveo che si estende sino all'inizio della vegetazione perenne e che comprende i singoli canali a basso flusso, le isole e le barre vegetate o scarsamente vegetate (Surian et al., 2009a). Per ciascun anno analizzato è stato inoltre tracciato l'asse mediano dell'alveo (Figura 7).



Figura 7. Esempio di mappatura del canale attivo e dell'asse mediano dell'alveo.

Per controllare le anomalie locali sulla morfologia delle unità di canale, il canale viene generalmente suddiviso in tratti; un tratto è definito come una porzione di canale, che contiene una sequenza di unità di canale, lungo la quale, a causa dell'influenza di condizioni uniformi, la morfologia del canale è relativamente omogenea (Brardinoni & Hassan, 2007). I tratti in cui viene suddiviso il canale devono essere lunghi almeno 20 volte la larghezza del canale locale, una scala utile per correlare la morfologia del flusso ai processi di canale e al potenziale di risposta (Montgomery & Buffington, 1997). In questo caso, la porzione del Fiume Sillaro presa in considerazione per l'analisi è stata suddivisa in 35 tratti (Figura 8), principalmente sulla base delle caratteristiche morfologiche dell'alveo, facendo attenzione anche alla presenza di opere antropiche e confluenze.

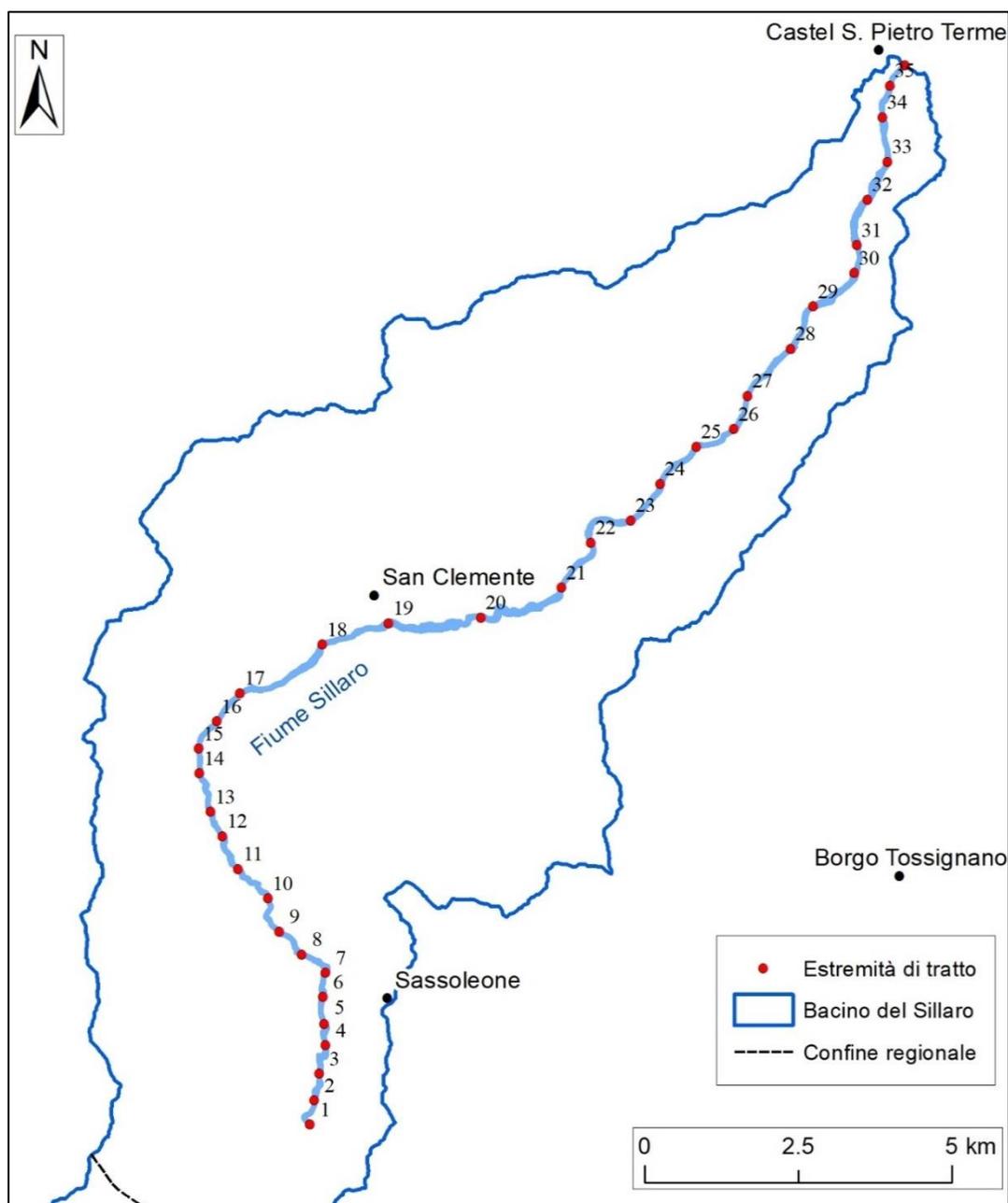


Figura 8. Tratti di studio delineati lungo il corso del Fiume Sillaro.

La larghezza media di ciascun tratto è stata ottenuta dal rapporto "area canale attivo del tratto / lunghezza asse mediano dell'alveo del tratto".

I risultati sono stati poi rappresentati attraverso un grafico a gradini.

### 3.1.2. Mappatura e classificazione delle opere

Gli elementi artificiali sono importanti all'interno dell'analisi dell'evoluzione fluviale, in quanto possono modificare i processi e la morfologia delle unità presenti.

Le opere lungo l'alveo sono state mappate e classificate secondo quanto riportato nel SUM (Rinaldi et al., 2015):

- diga (AA): opera che determina la presenza di un invaso più o meno esteso a monte e che crea un'alterazione significativa e permanente delle portate liquide e solide con totale intercettazione del trasporto solido al fondo;
- briglia (AB): in ambito montano si distinguono le briglie di trattenuta finalizzate principalmente all'intercettazione del trasporto solido, le quali se di notevole altezza (> 5-6 m) possono venire assimilate alle dighe, dalle briglie di consolidamento, finalizzate principalmente alla riduzione di pendenza e di conseguenza alla stabilizzazione del fondo (Figura 9);



Figura 9. Esempio di una briglia e un ponte sul Sillaro, nelle vicinanze di Sassoleone.

- briglia o traversa (AC): in ambito di pianura si possono distinguere briglie o traverse realizzate con scopi di consolidamento e/o intercettazione del trasporto solido, e le traverse di derivazione, realizzate con scopi di derivazione (ad es., per l'irrigazione), ma aventi effetti sul trasporto solido;
- cassa di espansione (AD): possono essere laterali (area esterna al corso d'acqua e delimitata da argini e periodicamente inondata) o in linea (opera trasversale in alveo che induce una laminazione delle portate di piena);
- diversivo o scolmatore (AE): canali di diversione in uscita e in ingresso, che cioè convogliano portate liquide da altri corsi d'acqua, e operano in tutte le condizioni di portata. Gli scolmatori sono canali diversivi specifici per la difesa idraulica che entrano in azione solo in occasione di eventi di piena;

- tombinatura (AF): si tratta di un'opera realizzata per consentire il passaggio del corso d'acqua al di sotto di infrastrutture (strade, centri abitati, ecc.);
- guado (AG): si tratta di un attraversamento del corso d'acqua non sopraelevato (come nel caso di un ponte) ma sormontabile dalla corrente in condizioni di piena;
- ponte (AH): struttura sopraelevata che consente l'attraversamento (stradale, ferroviario, pedonale) del corso d'acqua;
- rivestimento del letto (AI): comprende quelle opere che rivestono il fondo (ed eventualmente le sponde). Sono inclusi in questa categoria i cunettoni (in massi legati o in cemento armato), i rivestimenti d'alveo con materiale sciolto di pezzatura grossolana;
- soglia di fondo (AJ): opera trasversale di consolidamento dell'alveo di altezza contenuta ( $< 1\div 2$  m). È finalizzata alla stabilizzazione del fondo ed alla riduzione di fenomeni erosivi;
- rampa (AK): si tratta di un'opera trasversale di consolidamento di altezza contenuta ( $< 1\div 2$  m) costituita generalmente da massi che si estende per una certa lunghezza in senso longitudinale. È finalizzata alla stabilizzazione del fondo e alla riduzione di fenomeni erosivi;
- difesa di sponda (AL): opera realizzata con lo scopo di proteggere la sponda dai processi erosivi e/o movimenti di massa. Le tecniche adottate possono essere di tipo bio-ingegneristico (ad es., tramite l'uso di vegetazione), oppure basate sull'uso di materiali rigidi (ad es., gabbionature, massi). In alcuni casi la sponda può essere completamente rivestita e artificializzata (sponda artificiale);
- argine artificiale (AM): opera longitudinale rialzata rispetto al piano campagna, progettate per la difesa da eventi di piene le cui portate non sono contenute all'interno dell'alveo;
- sito estrattivo/rimozione di sedimento (AN): può comprendere sia siti di estrazione di sedimento alluvionale per scopi commerciali che l'attività di rimozione di sedimento finalizzata alla manutenzione dell'alveo e alla riduzione del rischio idraulico.

### 3.1.3. Definizione del grado di confinamento

La porzione di alveo presa in analisi è stata suddivisa in base al grado di confinamento. Seguendo la classificazione proposta da Brierley & Fryirs (2005), si distinguono tre categorie:

- Alveo confinato (Figura 10): pianura assente. Oltre il 90% delle sponde è direttamente in contatto con versanti, depositi di frana, conoidi di affluenti, terrazzi fluviali antichi. Eventualmente la pianura è ristretta a punti isolati (meno del 10% della lunghezza del tratto). Nel computo del confinamento vengono inclusi nei versanti di una valle anche i conoidi, sia che essi siano di origine alluvionale che derivanti da colate di fango. Infatti, i depositi dei conoidi, seppur incoerenti, si caratterizzano spesso per una granulometria più grossolana rispetto a quella del corso d'acqua principale e quindi determinano una forte azione di condizionamento laterale e altimetrica. Il confinamento può inoltre essere determinato dalla presenza di corpi di frana, falde detritiche.

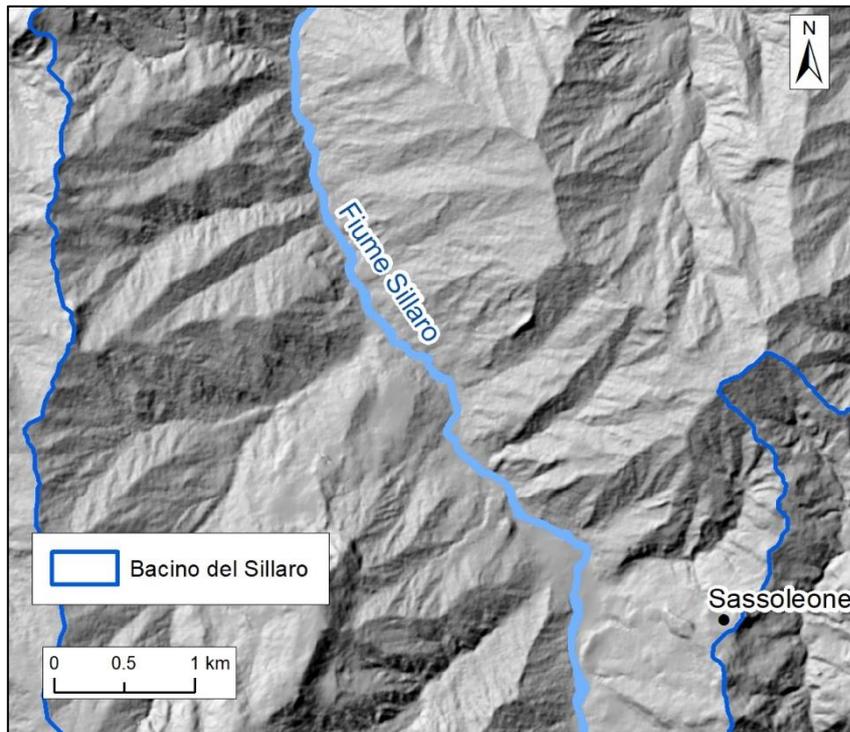


Figura 10. Esempio di porzione di alveo confinato del Sillaro.

- Alveo semiconfinato (o parzialmente confinato): pianura discontinua. Le sponde sono a contatto con la pianura alluvionale per una lunghezza compresa tra il 10 e il 90% della lunghezza del tratto. Tipico delle parti intermedie delle principali valli intermontane appenniniche (Figura 11).

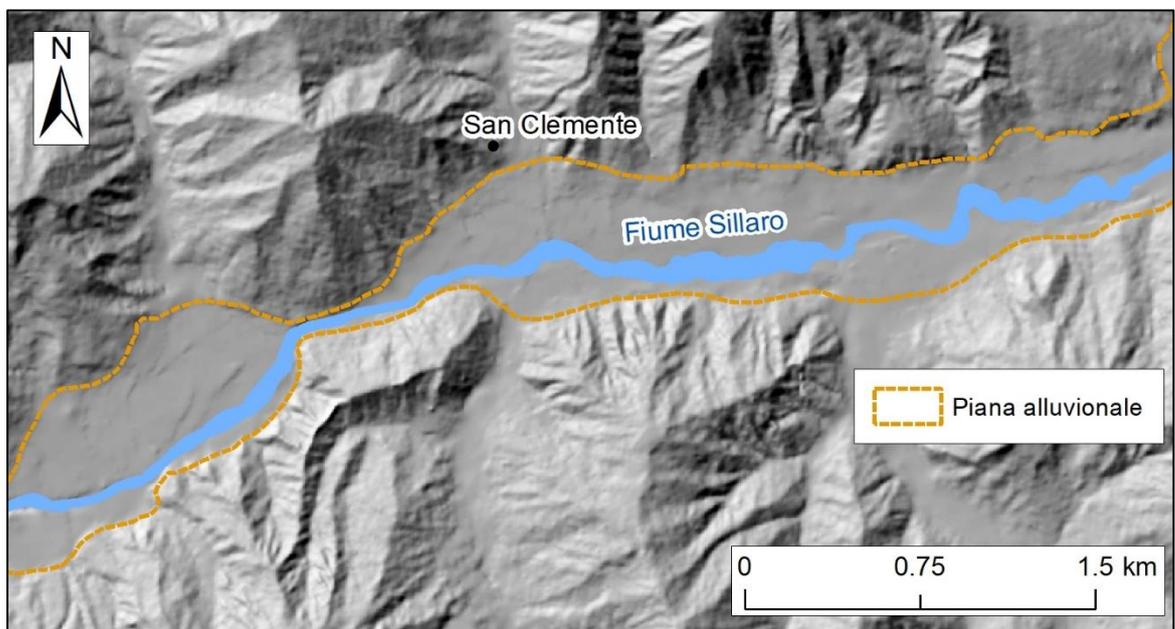


Figura 11. Esempio di porzione di alveo semiconfinato del Sillaro.

- Alveo non confinato (Figura 12): pianura continua. Meno del 10% dei margini dell'alveo sono a contatto con i versanti o terrazzi antichi. Le sponde sono quindi completamente deformabili, in modo tale che l'alveo è completamente libero di rimodellare i suoi limiti esterni. È tipico delle aree di pianura, ove l'alveo scorre in depositi alluvionali distante dai versanti. Tuttavia, anche in ambito montuoso o collinare un alveo può presentarsi non confinato.

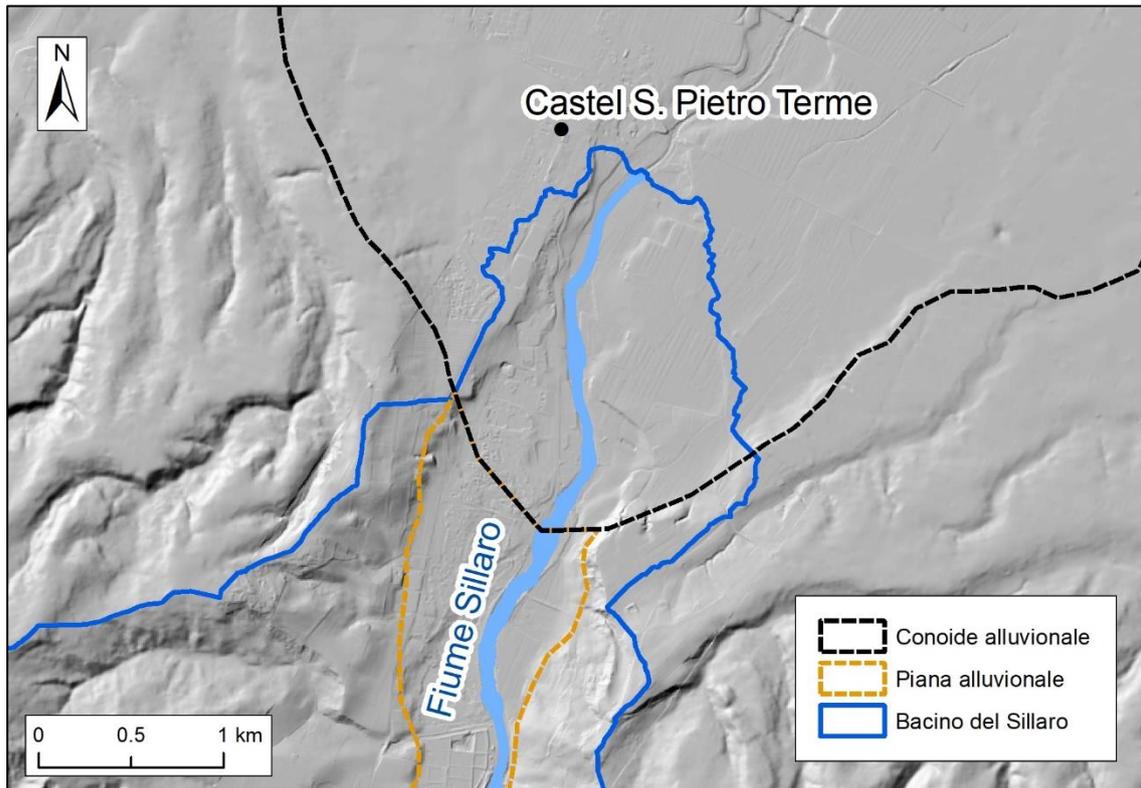


Figura 12. Chiusura del bacino montano del Sillaro e inizio della porzione di alveo non confinato.

### 3.1.4. Calcolo dell'indice di sinuosità

L'indice di sinuosità (Figura 13) è definito come il rapporto tra la lunghezza misurata lungo il corso d'acqua ( $l_a$ ) e la lunghezza misurata per lo stesso tratto seguendo la direzione del tracciato planimetrico complessivo del corso d'acqua ( $l_1 + l_2 + l_3 + ..$ ) (Rinaldi et al., 2014).

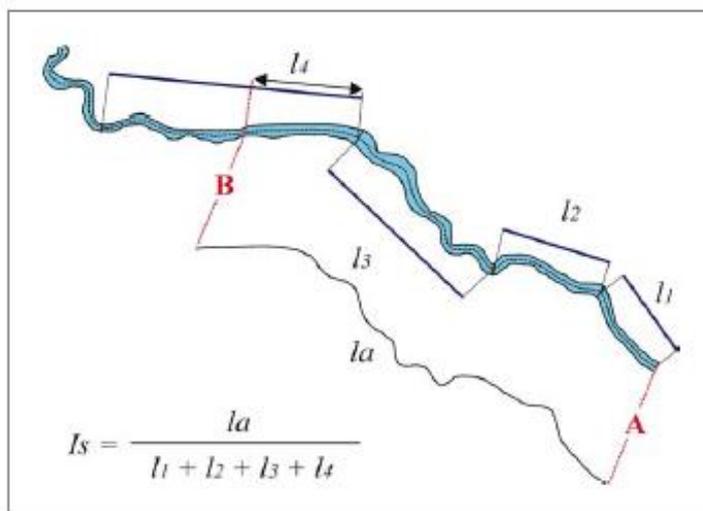


Figura 13. Misura dell'indice di sinuosità (da Rinaldi et al., 2014).

La lunghezza misurata lungo il corso d'acqua corrisponde all'asse mediano dell'alveo tracciato inizialmente, mentre enfatizzando le morfologie attraverso l'*hillshade* (modello

delle ombre), ottenuto a partire dal DTM (modello digitale del terreno), è stato possibile delineare l'asse del tracciato planimetrico.

Infine, i risultati dell'indice di sinuosità sono stati rappresentati con un grafico a gradini.

### 3.1.5 Calcolo dell'indice di intrecciamento

L'indice di intrecciamento si definisce come il numero di canali attivi separati da barre; per calcolare questo indice sono state seguite le istruzioni del manuale IDRAIM (Rinaldi et al., 2014), che utilizza il metodo proposto da Ashmore (1991):

- si stabilisce un passo spaziale lungo l'asse dell'alveo di sezioni lungo le quali vengono effettuate le misure, dell'ordine di due o più volte la larghezza media del tratto (si può ridurre l'interdistanza se il tratto è breve);
- per ogni tratto si misura il numero di canali attivi, ossia quei canali che presentano una certa continuità di flusso idrico (questa operazione può presentare un certo grado di soggettività, che dipende dall'intervallo spaziale scelto inizialmente, e può risentire soprattutto dei livelli idrometrici presenti durante la ripresa aerea);
- calcolando il valore medio delle misure effettuate nel tratto, si ottiene l'indice di intrecciamento (Figura 14).

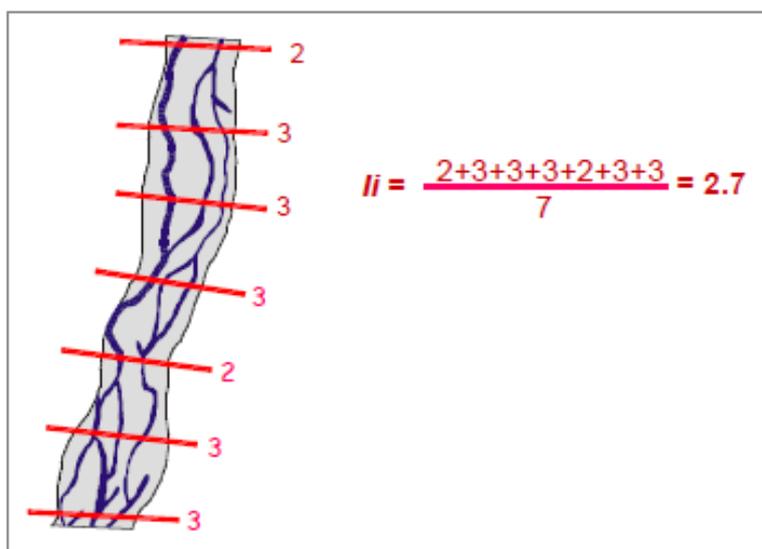


Figura 14. Misura dell'indice di intrecciamento (da Rinaldi et al., 2014).

In questo caso si è scelto di utilizzare un passo dell'ordine di circa 2 volte la larghezza media dell'alveo in ciascun tratto; i risultati dell'indice di intrecciamento sono stati poi rappresentati mediante un grafico a gradini.

### 3.2. RACCOLTA DATI DELLE PRECIPITAZIONI

I dati delle precipitazioni provengono da due stazioni pluviometriche, una posta in località San Clemente, a 166 metri s.l.m., e l'altra a Montecatone, a 211 metri s.l.m. (Figura 15); è stato necessario considerarle entrambe in quanto ciascuna stazione presentava delle interruzioni di registrazione del dato per diversi intervalli di tempo.

I dati utilizzati fanno riferimento alla stazione di Montecatone per gli anni che vanno dal 1951 al 1961 e dal 1991 al 2002, e alla stazione di San Clemente per gli anni che vanno dal 1962 al 1990 e dal 2003 al 2016.

A partire dai dati delle precipitazioni annuali, sono stati ottenuti la media mobile calcolata su intervalli di 3 anni, il valore massimo e minimo annuo e la media annua.

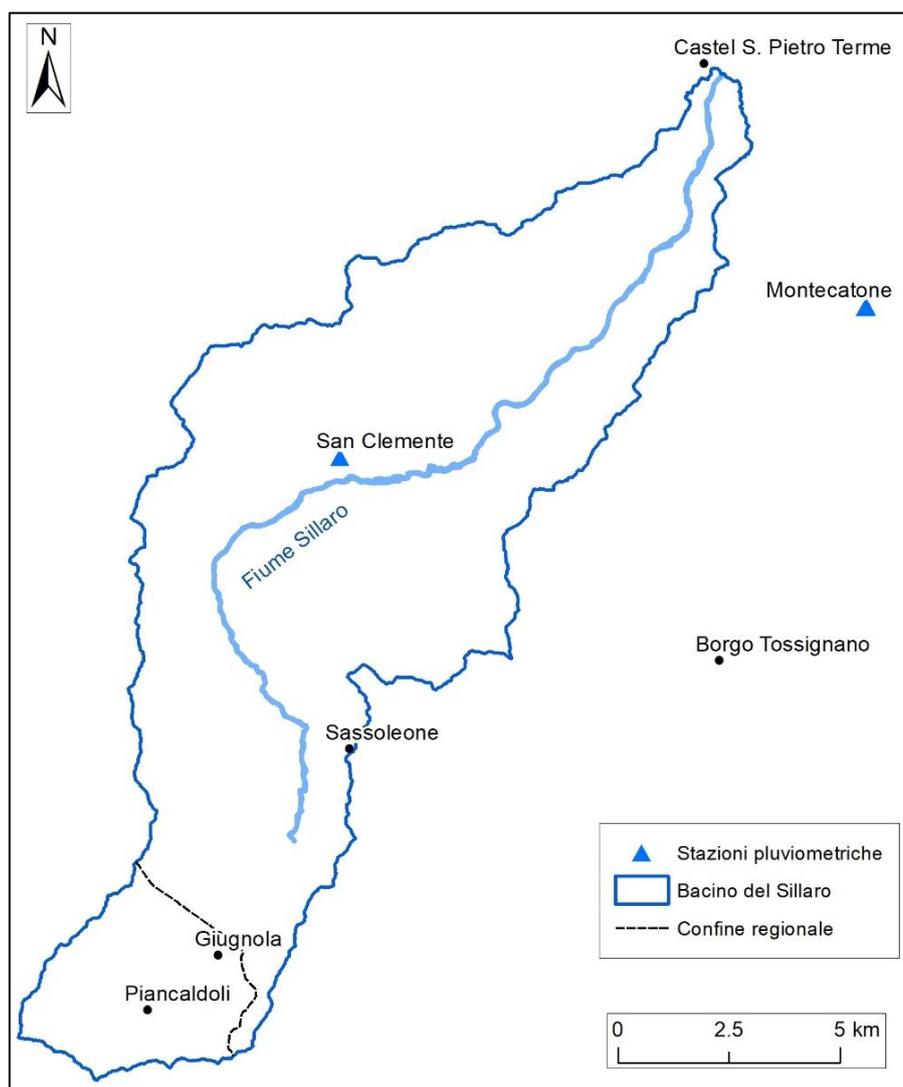


Figura 15. Localizzazione delle stazioni pluviometriche.

### 3.3. RACCOLTA DATI SULL'USO SUOLO

Per eseguire questa analisi sono stati utilizzati gli shapefile dell'uso del suolo degli anni 1954, 1976, 1994 e 2011, scaricati dal geoportale della Regione Emilia-Romagna (<https://geoportale.regione.emilia-romagna.it/it>).

Tramite il software ArcGIS è stato eseguito il clip di ciascuno shapefile sul bacino del Sillaro, delimitato precedentemente.

Le classi di uso del suolo sono poi state raggruppate in sei macrocategorie:

- aree boschive e cespuglietti;
- aree agricole comprendenti seminativi, prati ecc.;
- aree agricole comprendenti vigneti, frutteti, uliveti ecc.;
- zone a prevalente affioramento litoide e calanchive;
- zone urbanizzate;
- corpi d'acqua;
- aree estrattive.

Infine, per ogni anno considerato, è stata calcolata l'area occupata da ciascuna macrocategoria all'interno del bacino del Sillaro.

#### 3.4. ANALISI DELLE INCERTEZZE ASSOCIATE ALLA MAPPATURA DA REMOTO DEL CANALE ATTIVO

La scarsa risoluzione di alcune ortofoto, la presenza di vegetazione e di zone ombreggiate ai limiti del canale attivo possono portare a commettere degli errori nella mappatura e di conseguenza nelle misure effettuate da remoto.

Per questo motivo, sono stati scelti due tratti, con caratteristiche diverse, che sono stati suddivisi in 30 sottotratti, distanziati circa 10 metri l'uno dall'altro, nei quali, tramite un distanziometro laser, sono state misurate sul campo le larghezze reali del canale attivo.

Le larghezze di questi sottotratti sono state successivamente calcolate da remoto e confrontate con le larghezze acquisite in campo, in modo da ottenere una stima dell'errore associato alla mappatura.

Infine, per capire se la presenza di ombreggiatura nelle ortofoto influisse maggiormente sull'errore, i transetti con ombreggiatura sono stati differenziati da quelli privi di ombreggiatura e i valori residui di queste due categorie sono stati comparati tra loro.

## 4. RISULTATI

La struttura dei risultati parte dall'analisi storica delle forzanti esterne che controllano la risposta geomorfologica (morfodinamica) di un corso d'acqua. Queste includono: la forzante idro-meteorologica (sezione 4.1) e la forzante antropica (sezione 4.2). La forzante antropica viene suddivisa in diretta, dovuta alla costruzione di opere in alveo e al prelievo di inerti in alveo, ed indiretta, dovuta ai cambiamenti di uso del suolo a scala di bacino.

Nei paragrafi successivi vengono riportati i risultati di questo studio, descrivendo prima le forzanti che possono aver influito sull'evoluzione del Fiume Sillaro, e successivamente i cambiamenti osservati tramite analisi da remoto.

### 4.1. FORZANTE IDRO-METEREOLOGICA

La media delle precipitazioni annue, riguardanti il bacino del Fiume Sillaro dal 1951 al 2016, è di circa 833 mm, con un massimo di circa 1272 mm raggiunto nel 1972 e un minimo di 513 mm registrato nel 2000 (Figura 16). In generale, le precipitazioni presentano un andamento abbastanza regolare; dalla media mobile, calcolata su intervalli di 3 anni, si osserva che sino alla fine degli anni '80 i minimi relativi hanno valori maggiori rispetto a quelli degli anni successivi, mentre i massimi relativi si mantengono prevalentemente costanti.

Considerando intervalli di circa 20 anni (1954-1976-1996-2016), la media annuale delle precipitazioni diminuisce nel tempo, passando da valori medi di circa 891 mm/anno tra il 1954 e il 1976, a 810 mm/anno tra il 1976 e il 1996, per poi rimanere pressoché invariata tra il 1996 e il 2016, con valori medi di circa 816 mm/anno.

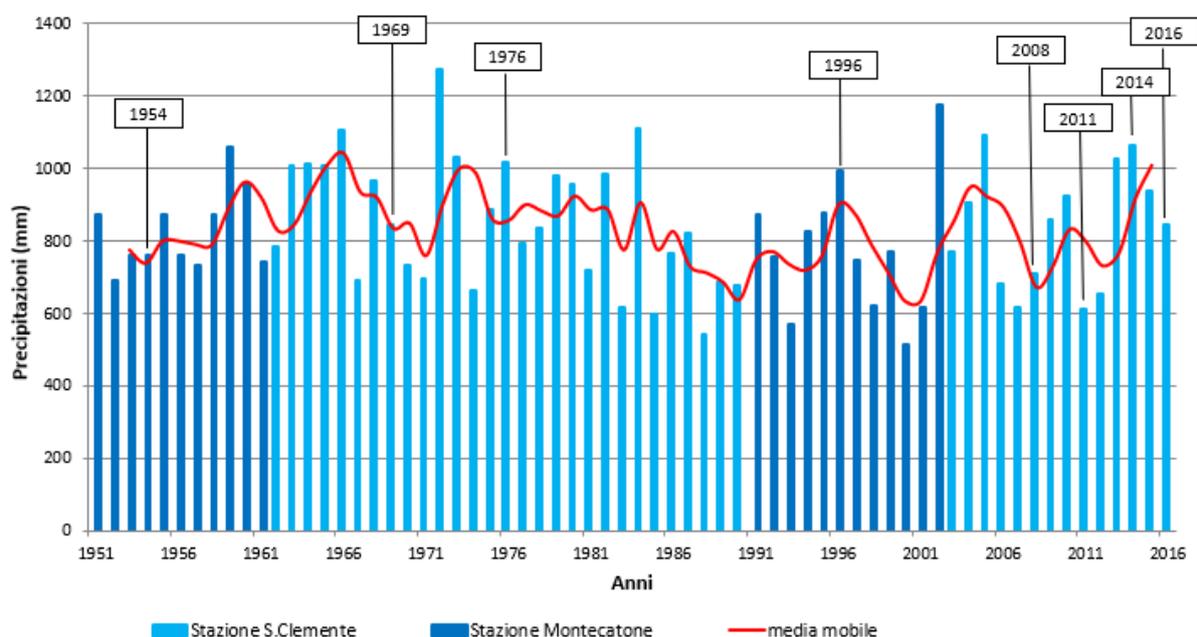


Figura 16. Precipitazioni annue nel bacino del Sillaro, dal 1951 al 2016, e relativa media mobile calcolata su intervalli di 3 anni.

## 4.2. FORZANTE ANTROPICA

Le opere antropiche individuate lungo il corso del Fiume Sillaro sono state mappate e classificate (Tabella 2) secondo lo schema illustrato nel manuale SUM (Rinaldi et al., 2015).

Tabella 2. Opere antropiche individuate lungo il corso dell'alveo (nomenclatura: ponte (AH), briglia (AB) e traversa (AC)).

Id	Tipo opera	Anno di costruzione	Id	Tipo opera	Anno di costruzione
1	AH	tra il 1976 e il 1996	17	AH	prima del 1954
2	AC	prima del 1954	18	AC	tra il 2011 e il 2014
3	AH	tra il 1954 e il 1969	19	AH	tra il 1954 e il 1969
4	AH	prima del 1954	20	AC	tra il 1976 e il 1996
5	AB	prima del 1954	21	AH	tra il 1954 e il 1969
6	AB	tra il 1976 e il 1996	22	AH	tra il 1976 e il 1996
7	AB	prima del 1954	23	AC	tra il 1996 e il 2008
8	AB	prima del 1954	24	AH	tra il 1954 e il 1969
9	AB	tra il 1969 e il 1976	25	AC	tra il 1976 e il 1996
10	AB	tra il 1954 e il 1969	26	AC	tra il 1976 e il 1996
11	AB	prima del 1954	27	AC	tra il 1996 e il 2008
12	AB	tra il 1954 e il 1969	28	AC	tra il 1954 e il 1969
13	AB	tra il 1954 e il 1969	29	AC	tra il 1954 e il 1969
14	AB	tra il 1954 e il 1969	30	AC	tra il 1976 e il 1996
15	AB	prima del 1954	31	AH	tra il 1996 e il 2008
16	AB	prima del 1954	32	AC	tra il 1996 e il 2008

Il Fiume Sillaro è stato interessato anche da estrazione di materiale in alveo.

Ferraresi & Venturini (1983), quantificano le concessioni date dal Genio Civile e la stima di quanto materiale invece è stato realmente asportato, a partire dagli anni '50 sino agli anni '80 (Figura 17).

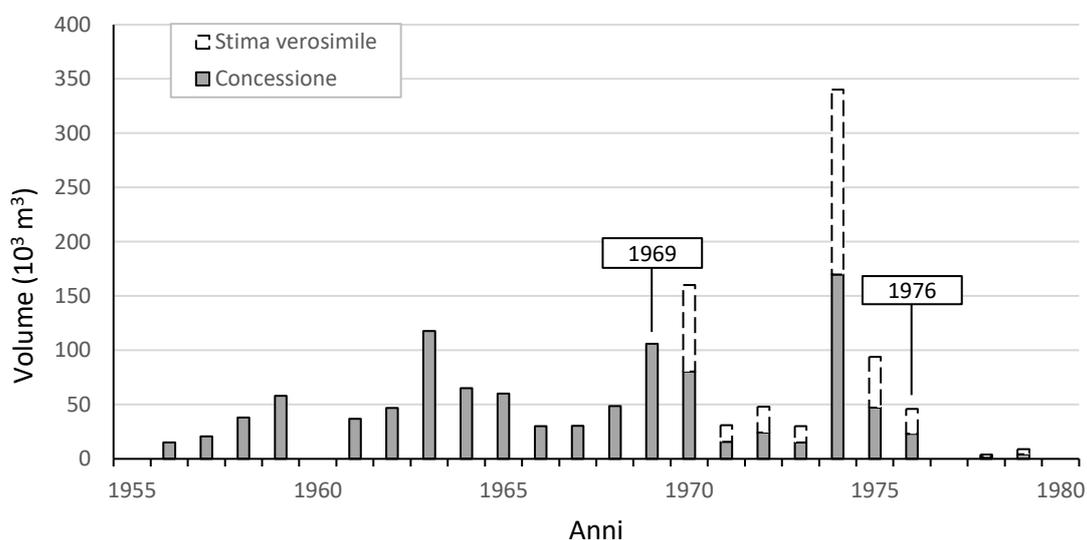


Figura 17. Quantificazione dell'estrazione di materiale dall'alveo del Sillaro (da Ferraresi & Venturini, 1983).

La Regione Emilia-Romagna, con la Deliberazione della Giunta Regionale n. 1300 del 1982, ha interdetto lo scavo di sabbia e ghiaia in alveo, al fine di migliorare il trasporto solido fluviale utile al ripascimento naturale dei litorali (Gazzolo et al., 2011); pertanto si ritiene che la maggior parte dell'attività estrattiva in alveo si sia fermata nei primi anni '80. Complessivamente nel periodo compreso tra il 1955 e il 1980 sono stati asportati  $1,4 \times 10^6$  m<sup>3</sup> di depositi alluvionali, pari ad un prelievo medio annuo di circa  $55 \times 10^3$  m<sup>3</sup>. Considerando

gli intervalli dell'analisi storica, dal 1954 al 1969 sono stati asportati mediamente circa  $42 \times 10^3 \text{ m}^3$  all'anno di materiale in alveo, per un totale di quasi  $674 \times 10^3 \text{ m}^3$ , mentre dal 1969 al 1976 l'attività estrattiva aumenta nettamente, con una media di esportazione di circa  $107 \times 10^3 \text{ m}^3$  all'anno, per un totale di quasi  $855 \times 10^3 \text{ m}^3$ .

I cambiamenti dell'uso del suolo della porzione emiliana-romagnola del bacino del Sillaro, per gli anni 1954, 1976, 1994 e 2011, sono invece visibili dalla figura 18.

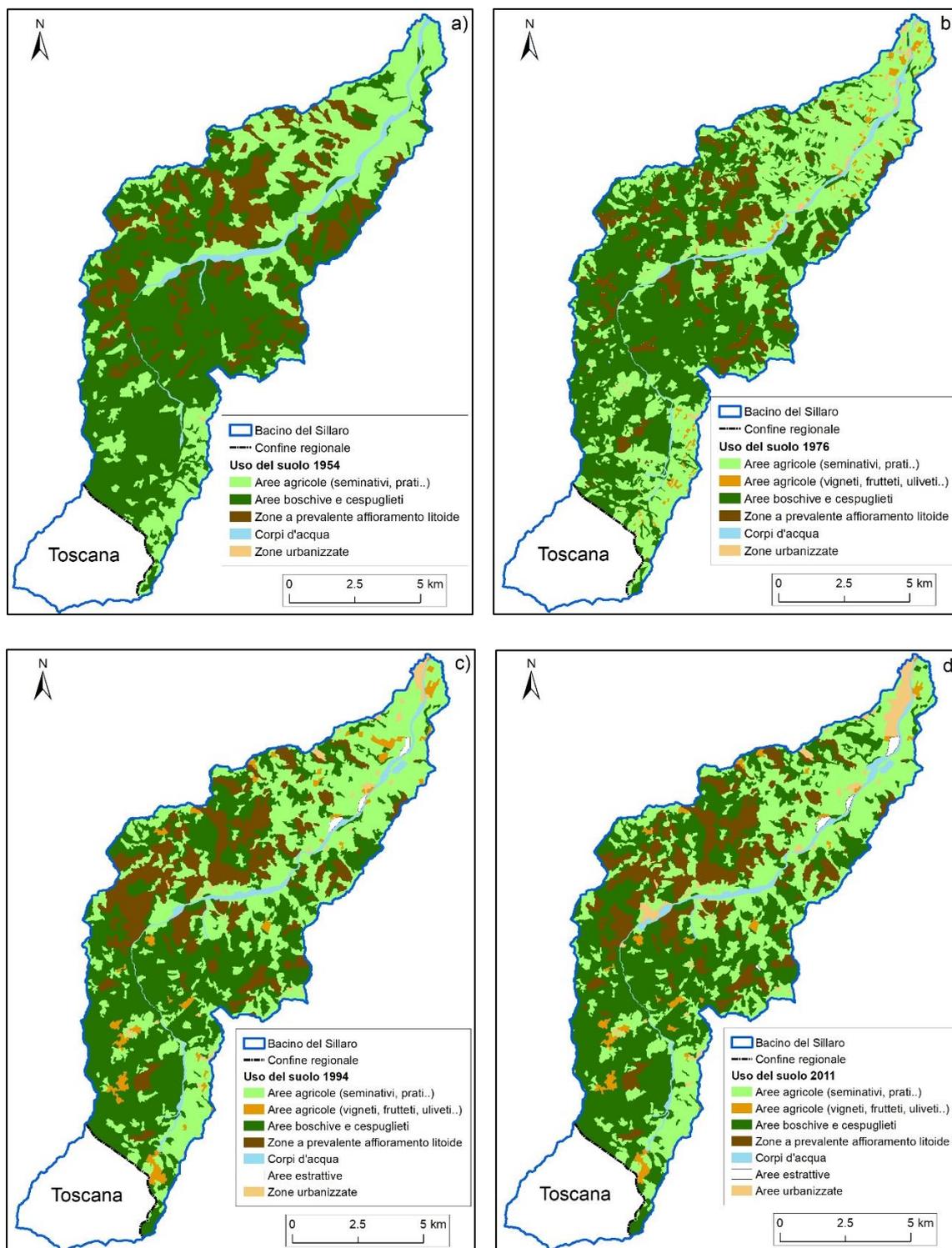


Figura 18. Variazione dell'uso areale del suolo negli anni: (a) 1954, (b) 1976, (c) 1994 e (d) 2011 (mappatura elaborata a partire dalla base dati della Regione Emilia-Romagna, <https://geoportale.regione.emilia-romagna.it/it>).

Le aree occupate da ciascuna macrocategoria nei diversi anni sono state rappresentate con un istogramma (Figura 19).

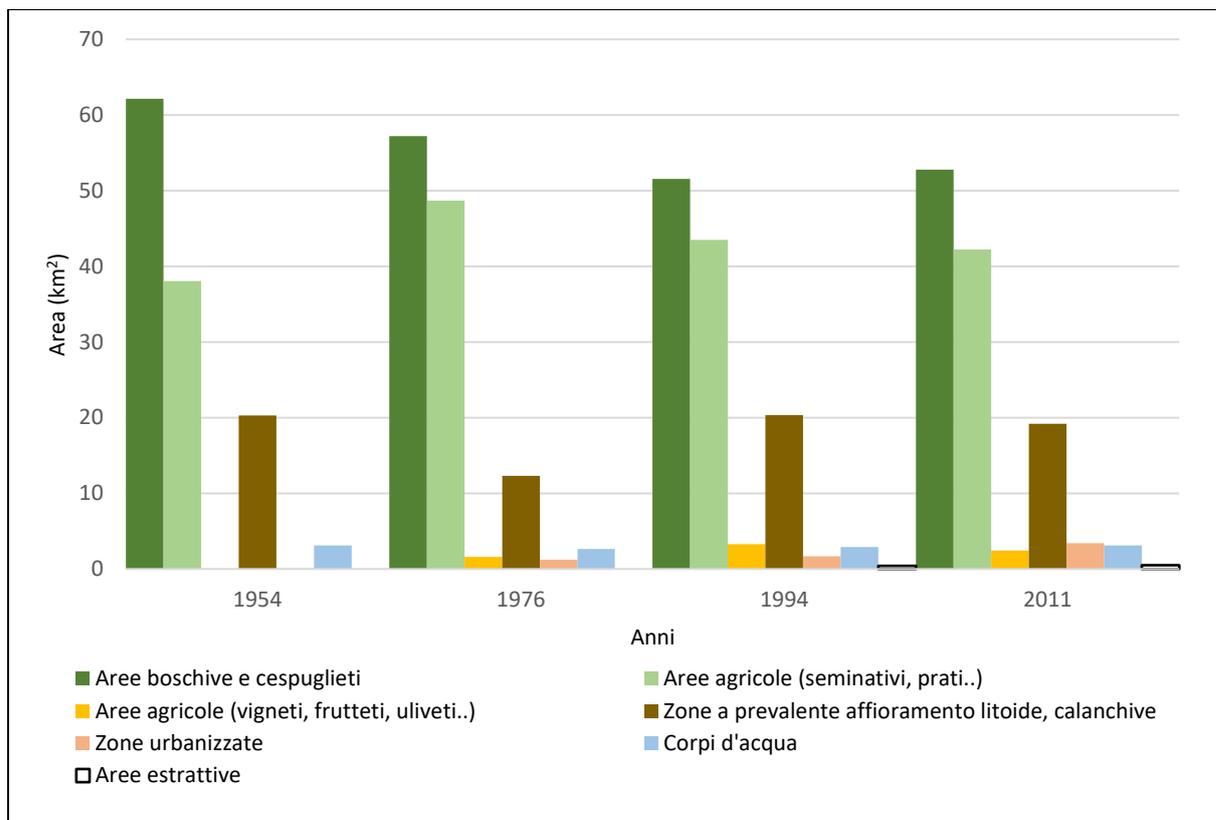


Figura 19. Aree in cui è ripartito l'uso del suolo nel 1954, 1976, 1994 e 2011.

Osservando il grafico si nota che la quantità di territorio occupata dalle aree boschive negli anni diminuisce, fa eccezione il 2011 dove si riscontra un aumento, anche se lieve; gran parte di queste aree vengono rimpiazzate da seminativi e prati. La porzione di area occupata da questi ultimi invece aumenta sino al 1976, per poi diminuire progressivamente, sostituita da zone urbanizzate e altre colture come ad esempio vigneti, frutteti e uliveti. Le zone urbanizzate si espandono sempre maggiormente con il passare del tempo, mentre le colture arboree, assenti nel 1954, compaiono nel 1976, aumentando nel 1994, per poi diminuire nuovamente nel 2011. Le aree estrattive assenti prima del 1994, vanno in crescendo, stabilendosi in prossimità del Fiume Sillaro. Le aree occupate dai corpi d'acqua invece rimangono più o meno invariate.

I risultati sono stati espressi anche in percentuale di occupazione della porzione emiliana-romagnola del bacino del Sillaro (Tabella 3).

Tabella 3. Percentuale di occupazione del bacino del Sillaro delle diverse macrocategorie di uso del suolo.

Tipo uso del suolo	1954	1976	1994	2011
Aree boschive e cespuglietti	50.2	46.3	41.8	42.9
Aree agricole (seminativi, prati ..)	30.7	39.4	35.3	34.3
Aree agricole (vigneti, frutteti, uliveti ..)	0	1.3	2.7	2
Zone a prevalente affioramento litoide / calanchive	16.4	10	16.5	15.6
Zone urbanizzate	0.1	1	1.4	2.8
Corpi d'acqua	2.5	2.1	2.4	2.5
Aree estrattive	0	0	0.3	0.4

#### 4.3. ANALISI MULTITEMPORALE DELLA LARGHEZZA MEDIA DEL CANALE ATTIVO ALLA SCALA DI TRATTO

In seguito alla mappatura del canale attivo e alla suddivisione in transetti della porzione di alveo considerata, è stata calcolata la larghezza media di ciascuno tratto, per ogni anno della serie temporale presa in esame.

I risultati sono stati rappresentati mediante un grafico a gradini (Figura 20); la distanza progressiva, espressa in metri, è intesa da monte verso valle.

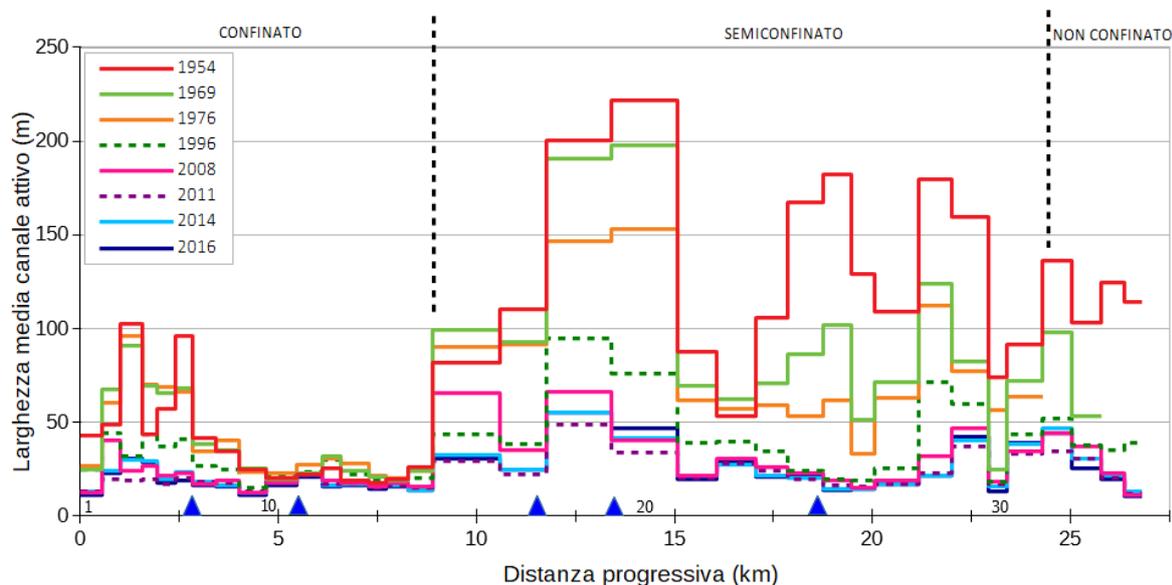


Figura 20. Rappresentazione della larghezza media del canale attivo alla scala di tratto tra il 1954 e il 2016.

Dalla figura soprastante è evidente che le variazioni maggiori riguardano la porzione di alveo semiconfinato, mentre quelle minori la parte confinata.

Per valutare l'influenza delle opere antropiche in alveo sulle dinamiche storiche del Fiume Sillaro, è stata riportata la localizzazione delle stesse (unitamente al loro periodo di costruzione) sul grafico di variazione longitudinale di ampiezza dell'alveo attivo. Sono state anche riportate le confluenze con gli affluenti principali; queste rappresentano sorgenti di sedimenti puntuali e ricorrenti che tipicamente rispondono in modo più repentino a cambiamenti di uso del suolo a scala di sottobacino, anche in funzione di eventi meteorologici estremi.

Il risultato della combinazione di questi dati è mostrato nei sottoparagrafi successivi, dove i cambiamenti del canale attivo vengono illustrati di anno in anno e confrontati tra di loro, a partire dal 1954.

A causa della mancata copertura, in alcune ortofoto, degli ultimi km del fiume, non è stato possibile quantificare le larghezze medie dell'alveo attivo nei tratti 34 e 35 (distanza progressiva compresa tra 26 e 26,8 km) per l'anno 1969 e dal tratto 32 al 35 (distanza progressiva compresa tra 24 e 26,8 km) per l'anno 1976.

In ALLEGATO 1 si possono osservare i valori delle larghezze del canale attivo e delle variazioni alla scala di tratto espresse sia in metri che in percentuale (Tabelle 10, 11 e 12), una rappresentazione della larghezza dell'alveo alla scala di tratto che comprende tutti gli anni dell'analisi multitemporale, incluse opere e confluenze (Figura 48), e una che mostra il cambiamento tra il 1954 e il 2016 (Figura 49).

#### 4.3.1. Variazioni della larghezza media del canale attivo: 1954-1969

Nel 1954 il Fiume Sillaro presenta una larghezza media minima di circa 18 metri e massima di poco più di 220 metri, in corrispondenza del tratto 20 (distanza progressiva compresa tra 13,4 e 15 km); quest'ultima rappresenta la larghezza massima raggiunta dal canale attivo durante gli anni presi in considerazione nell'analisi multitemporale.

Nel 1969 invece la larghezza media minima rimane pressoché invariata, circa 19 metri, mentre la massima diminuisce, raggiungendo circa 198 metri.

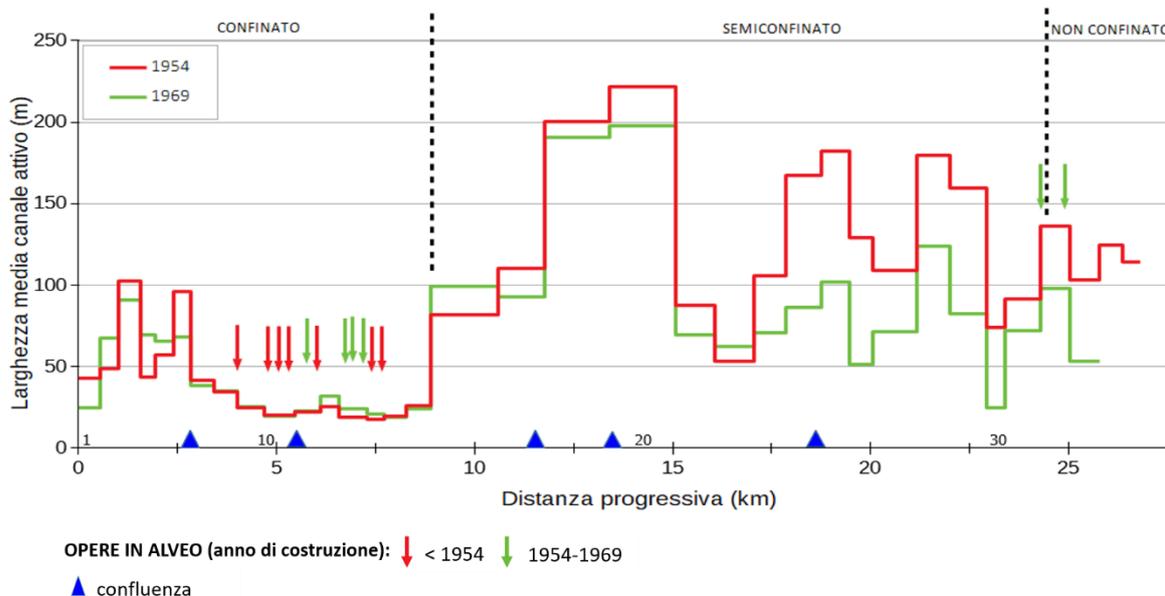


Figura 21. Larghezza media del canale attivo alla scala di tratto negli anni 1954 e 1969.

Osservando i cambiamenti della larghezza media del canale attivo tra il 1954 e il 1969 (Figura 21), si può suddividere idealmente l'alveo in 4 porzioni: (i) dal tratto 1 al tratto 6 (distanza progressiva compresa tra 0 e 3 km circa), in cui si hanno le variazioni maggiori della parte di alveo confinato, con medie di restringimento che variano da 12 a 28 metri e medie di allargamento che variano da 9 a 26 metri circa; (ii) dal tratto 7 al tratto 16 (distanza progressiva compresa tra 3 e 9 km circa), in cui la larghezza dell'alveo subisce i cambiamenti minori, con restringimenti massimi di circa 4 metri e allargamenti massimi di 6 metri; (iii) dal tratto 17 al tratto 22 (distanza progressiva compresa tra 9 e 17 km), porzione dell'alveo semiconfinato in cui si hanno variazioni moderate, con prevalenti restringimenti, le cui medie variano tra 10 e 24 metri e allargamenti di 17 metri (tratto 17, distanza progressiva compresa tra circa 9 e 10,6 km) e 9 metri (tratto 22, distanza progressiva compresa tra 16 e 17 km); (iv) dal tratto 23 al 33 (distanza progressiva compresa tra 17 e 26 km circa), in cui si registrano i cambiamenti maggiori della larghezza dell'alveo attivo, che subisce in queste zone solo restringimento con medie che variano da 19 a 81 metri.

Si nota che la presenza di opere nella zona confinata mantiene l'alveo abbastanza stabile, anche in prossimità delle principali confluenze, mentre nella zona semiconfinata i valori massimi di larghezza del canale attivo corrispondono alle confluenze principali.

#### 4.3.2. Variazioni della larghezza media del canale attivo: 1969-1976

Nel 1976, rispetto agli anni precedenti, c'è un ulteriore restringimento dei tratti più larghi del canale attivo, che raggiunge una larghezza massima di circa 153 metri, mentre la larghezza minima aumenta leggermente, fino ad arrivare a poco più di 20 metri.

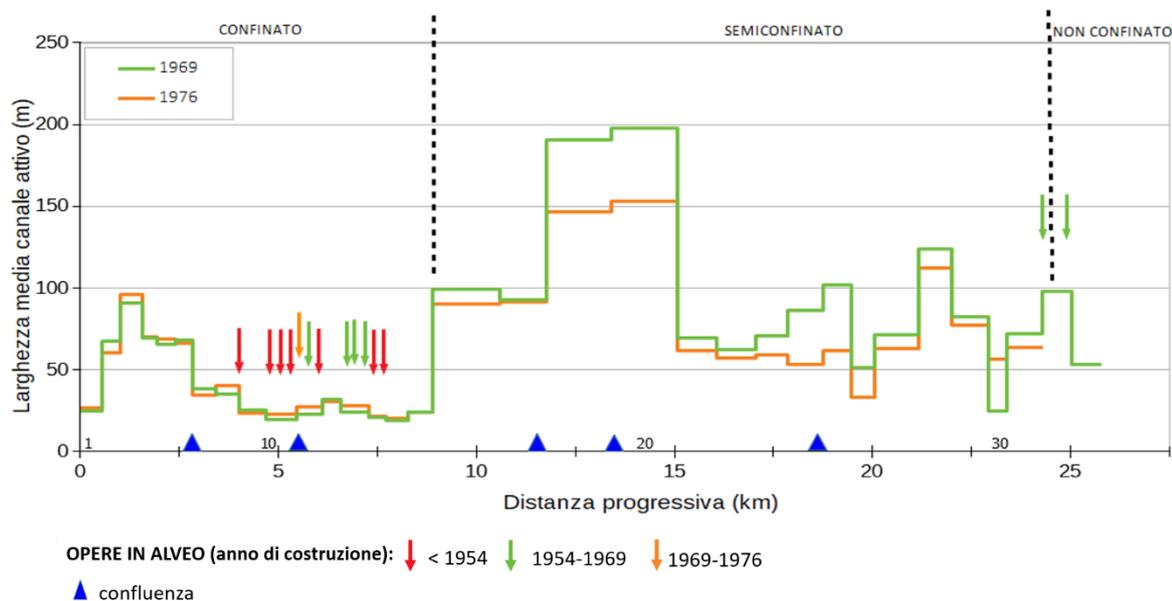


Figura 22. Larghezza media del canale attivo alla scala di tratto negli anni 1969 e 1976.

Osservando le variazioni della larghezza media dell'alveo attivo tra il 1969 e il 1976 (Figura 22) è possibile distinguere l'alveo idealmente in due porzioni: (i) dal tratto 1 al tratto 16 (distanza progressiva compresa tra 0 e circa 9 km) in cui si verificano prevalentemente allargamenti con medie che variano da 0,39 a circa 5 metri, e restringimenti medi che variano da 1 a circa 8 metri ; (ii) dal tratto 17 al 31 (distanza progressiva compresa tra 9 e 24 km), in cui si verificano i cambiamenti maggiori della larghezza media dell'alveo attivo, con medie di restringimento che variano da 1 a circa 44 metri (tratti 19 e 20, distanza progressiva compresa tra 12 e 15 km), e allargamento in corrispondenza del tratto 30 (distanza progressiva compresa tra 22,9 e 23,4 km) di 31 metri.

Nella parte confinata le opere artificiali, in aumento, consentono di mantenere il canale attivo abbastanza stabile anche in corrispondenza delle confluenze principali.

#### 4.3.3. Variazioni della larghezza media del canale attivo: 1976-1996

Nel 1996 il canale attivo presenta larghezze minime di circa 15 metri e massime di circa 95 metri, valori entrambi minori rispetto all'anno precedentemente analizzato.

Osservando la figura 23, per descrivere i cambiamenti del canale attivo tra il 1976 e il 1996, l'alveo può essere suddiviso idealmente in 3 porzioni: (i) dal tratto 1 al tratto 9 (distanza progressiva compresa tra 0 e 4,70 km circa), zona in cui la parte di alveo confinata subisce le variazioni maggiori, con medie di restringimento che variano da circa 2 metri a 64 metri (tratto 3, distanza progressiva compresa tra 1 e 1,6 km); (ii) dal tratto 10 al tratto 16 (distanza progressiva compresa tra 4,7 e 9 km circa), zona in cui l'alveo attivo subisce i cambiamenti minori, con medie di restringimento che variano da 0,4 a 4,3 metri e un piccolissimo allargamento medio di circa 30 cm nel tratto 15 (distanza progressiva compresa 7,7 a 8,3 km); (iii) dal tratto 17 al tratto 31 (distanza progressiva compresa tra 9 a 24 km) in cui si hanno medie di restringimento che variano da 14 a 77 metri.

Si nota un aumento delle infrastrutture artificiali nella parte di alveo semiconfinato.

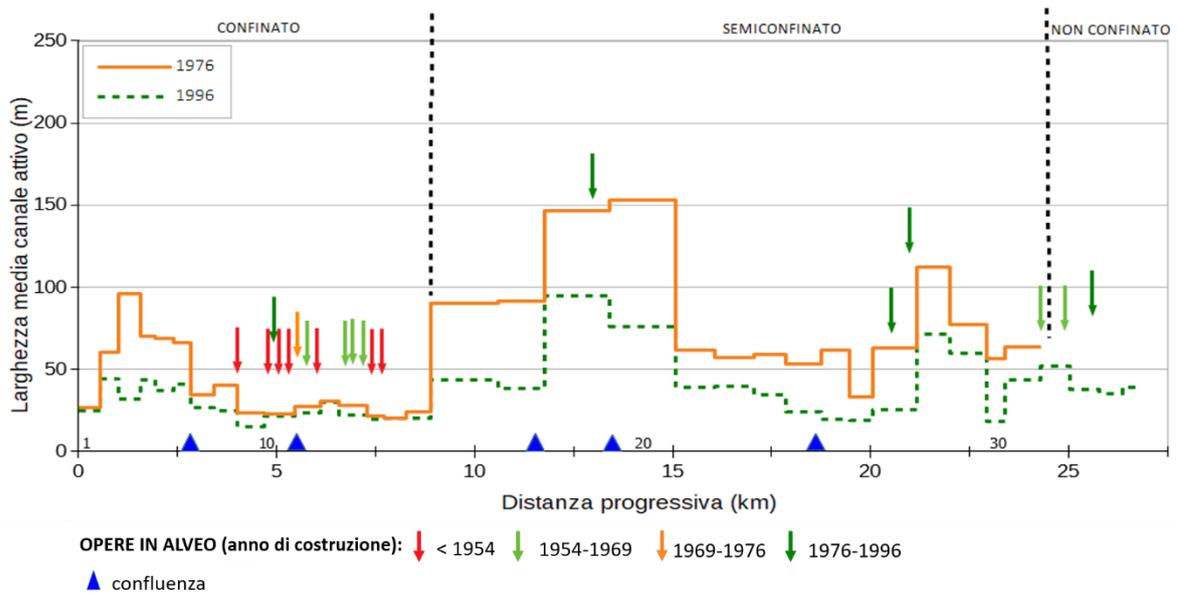


Figura 23. Larghezza media del canale attivo alla scala di tratto negli anni 1976 e 1996.

#### 4.3.4. Variazioni della larghezza media del canale attivo: 1996-2008

Nel 2008 vi è un'ulteriore diminuzione della larghezza massima, che arriva a circa 66 metri, e minima, che arriva a circa 11 metri.

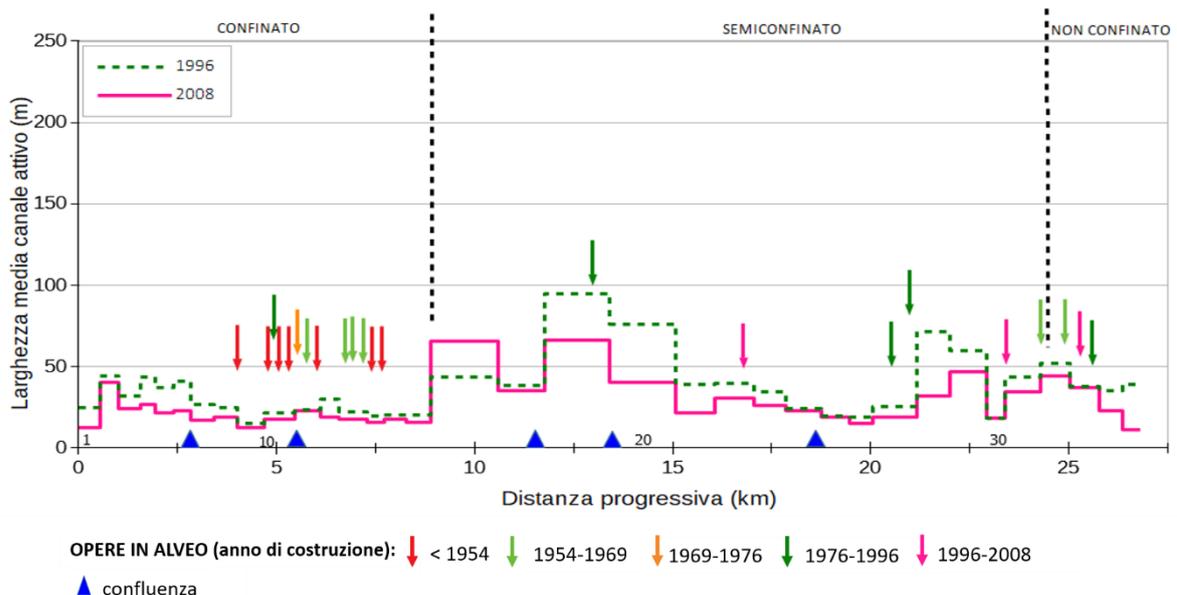


Figura 24. Larghezza media del canale attivo alla scala di tratto negli anni 1996 e 2008.

Tra il 1996 e il 2008 (Figura 24) si osserva un generale restringimento del canale attivo, idealmente l'alveo può essere suddiviso in 4 parti: (i) dal tratto 1 al tratto 8 (distanza progressiva compresa tra 0 e 4 km), porzione dell'alveo confinato che subisce i cambiamenti maggiori, con medie di restringimento che variano da 4 a 18 metri; (ii) dal tratto 9 al tratto 16 (distanza progressiva compresa tra 4 e circa 9 km), porzione dell'alveo confinato che subisce le variazioni minori, con medie di restringimento che variano da circa 0,5 a 11,5 metri; (iii) tratto 17 (distanza progressiva compresa tra 9 e 10,6 km), unica zona che subisce un allargamento medio pari a 22 metri; (iv) dal tratto 18 al tratto 35 (distanza progressiva compresa tra 10,6 e 26,8 km), in cui si alternano piccoli e grandi restringimenti,

con medie che variano tra 0,1 metri del tratto 33 (distanza progressiva compresa tra 25 e 25,8 km) e 40 metri del tratto 28 (distanza progressiva compresa tra 21 e 22 metri), in prossimità del quale sono state precedentemente costruite delle traverse (tra il 1976 e il 1996).

#### 4.3.5. Variazioni della larghezza media del canale attivo: 2008-2011

Nel 2011 il canale attivo raggiunge il valore minore di larghezza massima, poco più di 48 metri, mentre la larghezza minima rimane più o meno invariata, raggiungendo i 12 metri circa.

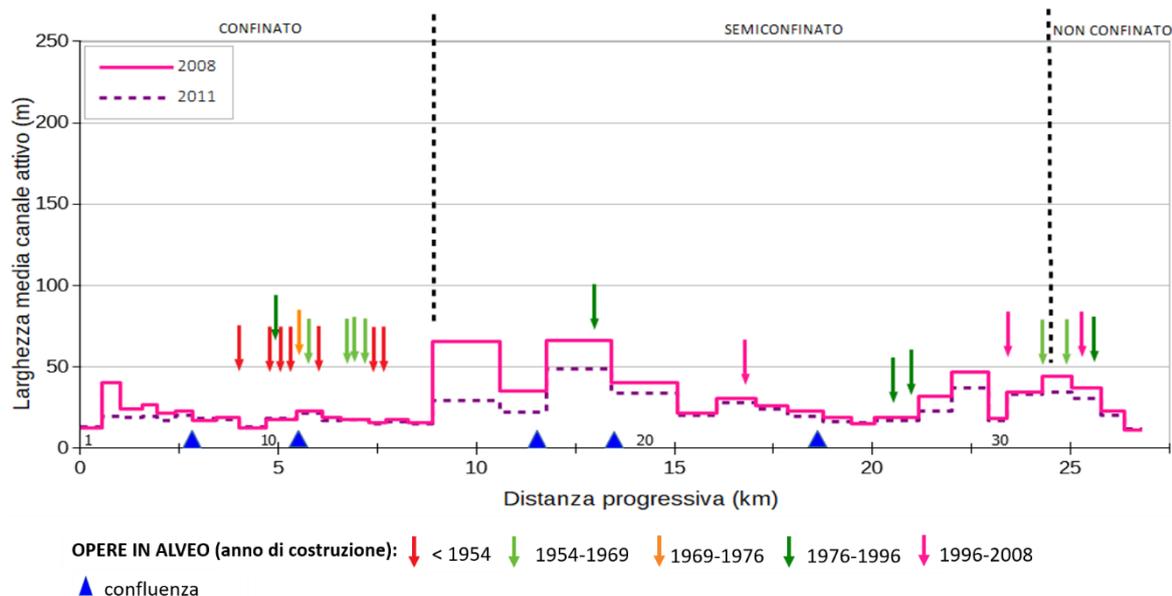


Figura 25. Larghezza media del canale attivo alla scala di tratto negli anni 2008 e 2011.

Dalla figura 25 si osserva che il canale attivo tra il 2008 e il 2011 è stato interessato da un generale restringimento, anche se in molti tratti la larghezza rimane pressoché invariata. Idealmente è possibile suddividere l'alveo in 5 porzioni: (i) dal tratto 1 al 6 (distanza progressiva compresa tra 0 e 2,8 km) in cui si hanno le variazioni maggiori della parte di canale confinato, con medie di restringimento che variano tra 2,8 e 20,5 metri ed un allargamento di 0,8 metri in corrispondenza del tratto 1 (distanza progressiva compresa tra 0 e 0,6 km); (ii) dal tratto 7 al tratto 16 (larghezza progressiva compresa tra 2,8 e 9 km) in cui si hanno le variazioni minori della porzione di alveo confinato, con medie di restringimento che variano tra 0,1 e 1,9 metri e medie di allargamento che variano tra 0,2 e 1,4 metri; (iii) dal tratto 17 al tratto 20 (distanza progressiva compresa tra 9 e 15 km), in cui si raggiungono i valori maggiori di restringimento, con medie che variano da 6 a 36 metri; (iv) dal tratto 21 al 27 (distanza progressiva compresa tra 15 e 21 km circa), in cui vi sono le variazioni minori della porzione di alveo semiconfinato, con medie di restringimento che variano tra 0,9 e 2,4 metri e allargamento di 0,5 metri in corrispondenza del tratto 26 (distanza progressiva compresa tra 19,5 e 20 km); (v) dal tratto 28 al 35 (distanza progressiva compresa tra 20 e 26,8 km) in cui vi è nuovamente un aumento dei cambiamenti della larghezza media del canale attivo, con medie di restringimento che variano da 1,3 a 9,8 metri e allargamento di circa 1 metro nel tratto 35 (distanza progressiva compresa tra 26,3 e 26,8 km).

Nella maggior parte dei tratti in cui la larghezza media del canale attivo varia di poco sono presenti briglie e traverse.

#### 4.3.6. Variazioni della larghezza media del canale attivo: 2011-2014

Il 2014, a differenza del 2011, presenta delle larghezze del canale attivo massime di circa 55 metri e minime di circa 13 metri.

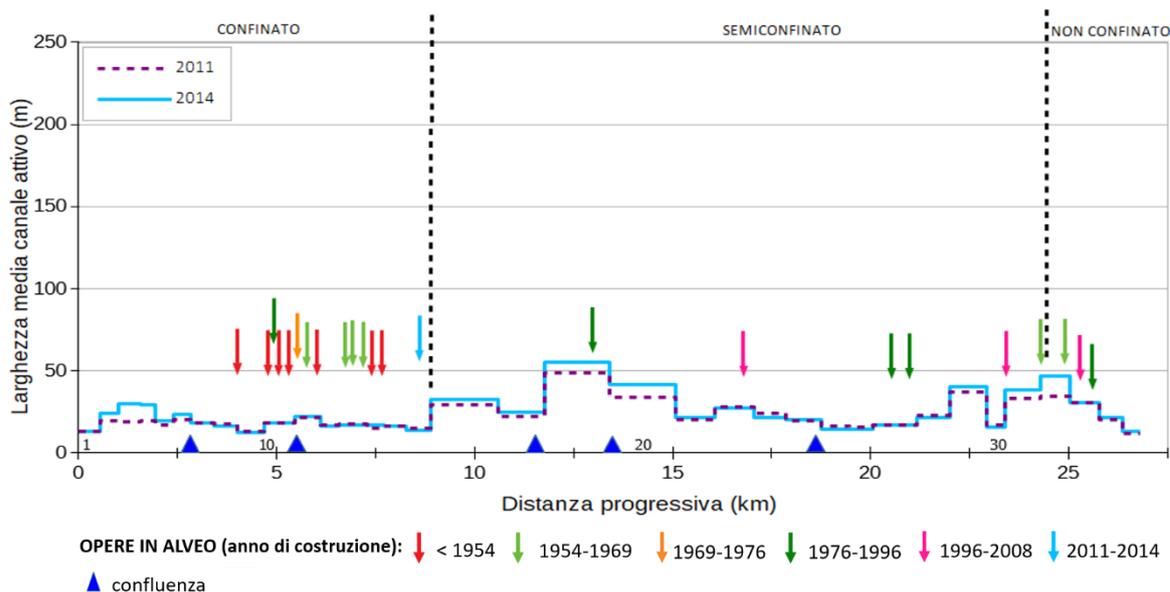


Figura 26. Larghezza media del canale attivo alla scala di tratto negli anni 2011 e 2014.

Tra il 2011 e il 2014 si osserva un generale allargamento del canale attivo (Figura 26). L'alveo può essere suddiviso idealmente in 5 porzioni: (i) dal tratto 1 al 6 (distanza progressiva compresa tra 0 e 3 km circa) in cui si registrano i cambiamenti maggiori della parte confinata, con medie di allargamento che vanno da 2,2 a 11 metri circa e restringimento medio di circa 0,20 metri in corrispondenza del tratto 1 (distanza progressiva compresa tra 0 e 0,6 km); (ii) dal tratto 7 al 18 (distanza progressiva compresa tra circa 3 e 11,8 km) in cui si registrano i cambiamenti minori della porzione di alveo confinato, con medie di allargamento che variano da 0,1 a 3,5 metri e medie di restringimento che variano da 0,1 a 1,6; (iii) dal tratto 19 al 20 (distanza progressiva compresa tra 11,8 e 15 km) in cui aumentano i valori di allargamento, con medie di circa 7 metri; (iv) dal tratto 21 al 28 (distanza progressiva compresa tra 15 e 22 km) in cui si registrano i cambiamenti minori della porzione di alveo semiconfinata, con medie di allargamento che variano da 0,4 a 0,8 metri e medie di restringimento che variano da 0,7 e 1,9 metri; (v) dal tratto 29 al 35 (distanza progressiva compresa tra 22 e 26,8 km) in cui i valori di allargamento aumentano nuovamente, con medie che variano da 1,3 a 12 metri e medie di restringimento che variano da 0,1 a 1,4 metri.

Le variazioni minori, nella maggior parte dei tratti, sono legate alla presenza di opere antropiche in alveo. Gli allargamenti possono essere ricondotti a processi di erosione spondale dovuti all'azione dell'acqua, infatti, osservando le ortofoto (Figura 27), si nota che questi cambiamenti si concentrano soprattutto dove l'alveo ha un andamento sinuoso.

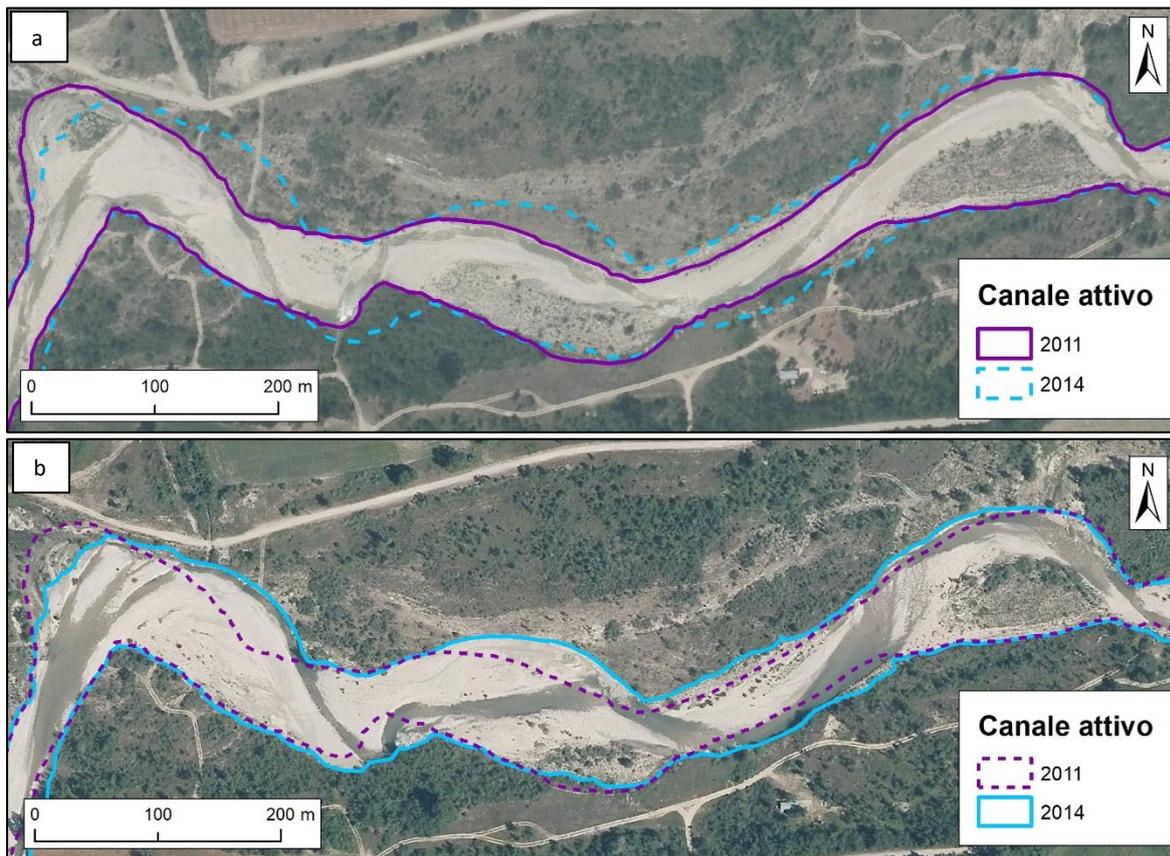


Figura 27. Confronto del canale attivo tra il 2011 e il 2014, sovrapposto all'ortofoto del 2011 (a) e del 2014 (b).

#### 4.3.7. Variazioni della larghezza media del canale attivo: 2014-2016

Nel 2016 la larghezza massima raggiunta dal canale attivo rimane invariata rispetto al 2014, circa 55 metri, mentre quella minima diminuisce, arrivando più o meno a 11 metri.

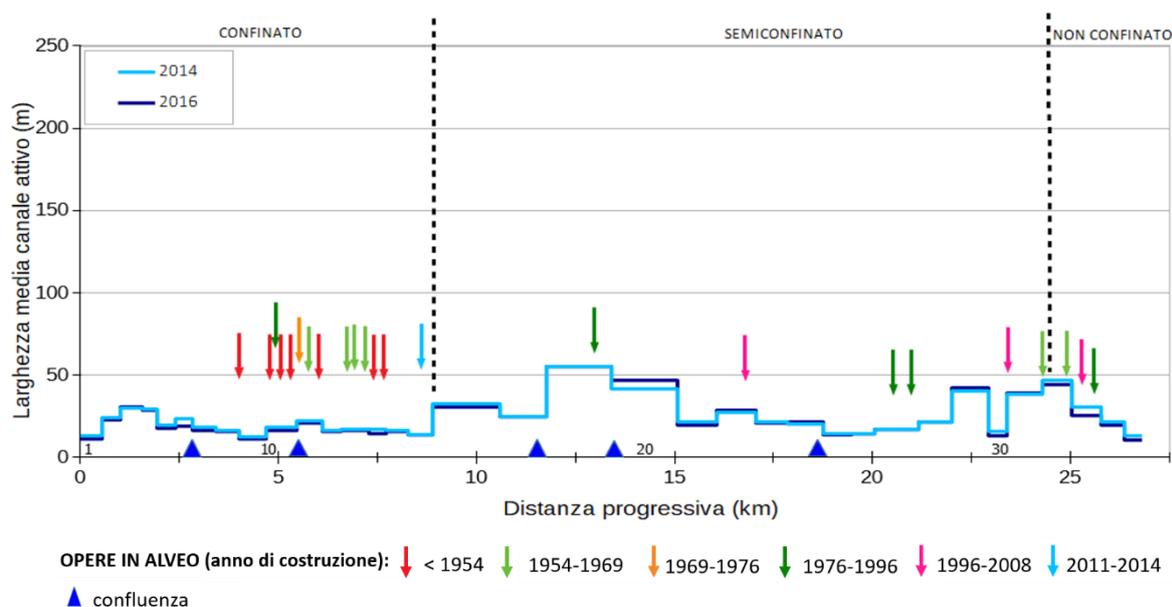


Figura 28. Larghezza media del canale attivo alla scala di tratto negli anni 2014 e 2016.

Dalla figura 28 si osserva che in generale il canale attivo non ha subito cambiamenti, solamente qualche piccolo allargamento o restringimento. L'alveo può essere suddiviso idealmente in due porzioni: (i) dal tratto 1 al 16 (distanza progressiva compresa tra 0 e 9

km circa), parte di alveo confinato, in cui le medie di restringimento variano da 0,2 a 2,4 metri e si registra un allargamento di 0,6 metri in corrispondenza del tratto 3 (distanza progressiva compresa tra 1 e 1,6 km); (ii) dal tratto 17 al tratto 35 (distanza progressiva compresa tra 9 e 26,8 km), in cui le medie di restringimento variano da 0,1 a 4,8 metri e le medie di allargamento variano da 0,1 a 5,5 metri (tratto 20, distanza progressiva compresa tra 13,4 e 15 km).

Le zone più stabili nella maggior parte dei casi coincidono con la presenza di elementi artificiali all'interno dell'alveo.

Il confronto tra questi due anni è importante in quanto il fiume Santerno, situato nella valle posta in destra idrografica del Sillaro, il 20 settembre del 2014 ha registrato un evento alluvionale, che ha modificato il suo canale attivo in termini di larghezza e affioramento di *bedrock* in alveo; al contrario il Sillaro non mostra variazioni importanti, in quanto non è stato coinvolto da queste precipitazioni intense. Quanto avvenuto testimonia che un evento può essere circoscritto alla scala di bacino.

#### 4.3.8. Esempi rappresentativi dei trend evolutivi

Sono di seguito riportati alcuni esempi di mappatura per mostrare i cambiamenti del canale attivo di alcuni tratti, selezionati tra i più significativi sulla base delle larghezze medie del canale attivo e delle loro variazioni (Figura 29); si è scelto di riportare le immagini ad intervalli di circa 20 anni, ossia considerando gli anni 1954, 1976, 1996 e 2016.

I tratti selezionati sono i seguenti:

- tratto 10: distanza progressiva compresa tra 4,7 e 5,5 km, rappresenta la zona della porzione di alveo confinato che subisce le variazioni minori della larghezza media del canale attivo, per un valore complessivo di circa 4 metri di restringimento tra il 1954 e il 2016;
- tratto 3: distanza progressiva compresa tra 1 e 1,6 km, è uno dei tratti della porzione di alveo confinato che subisce le variazioni maggiori della larghezza media del canale attivo, che varia da circa 103 metri nel 1954 a 30 metri nel 2016;
- tratti 19 e 20: distanza progressiva compresa tra 13,4 e 15 km, situati nella porzione di alveo semiconfinato, sono le zone che presentano le larghezze del canale attivo iniziali maggiori e che, insieme ai tratti 25 e 28 (distanza progressiva compresa rispettivamente tra 18,7 e 19,5 km e tra 21 e 22 km) subiscono i restringimenti maggiori tra il 1954 e il 2016;
- tratto 22: distanza progressiva compresa tra 16 e 17 km, zona della porzione di alveo semiconfinato che subisce i cambiamenti minori della larghezza media del canale attivo, con un restringimento complessivo di circa 25 metri tra il 1954 e il 2016.

La serie di immagini completa per ogni anno analizzato, per ciascun tratto preso come esempio, è visibile nell'ALLEGATO 2 (Figure 50, 51, 52 e 53).

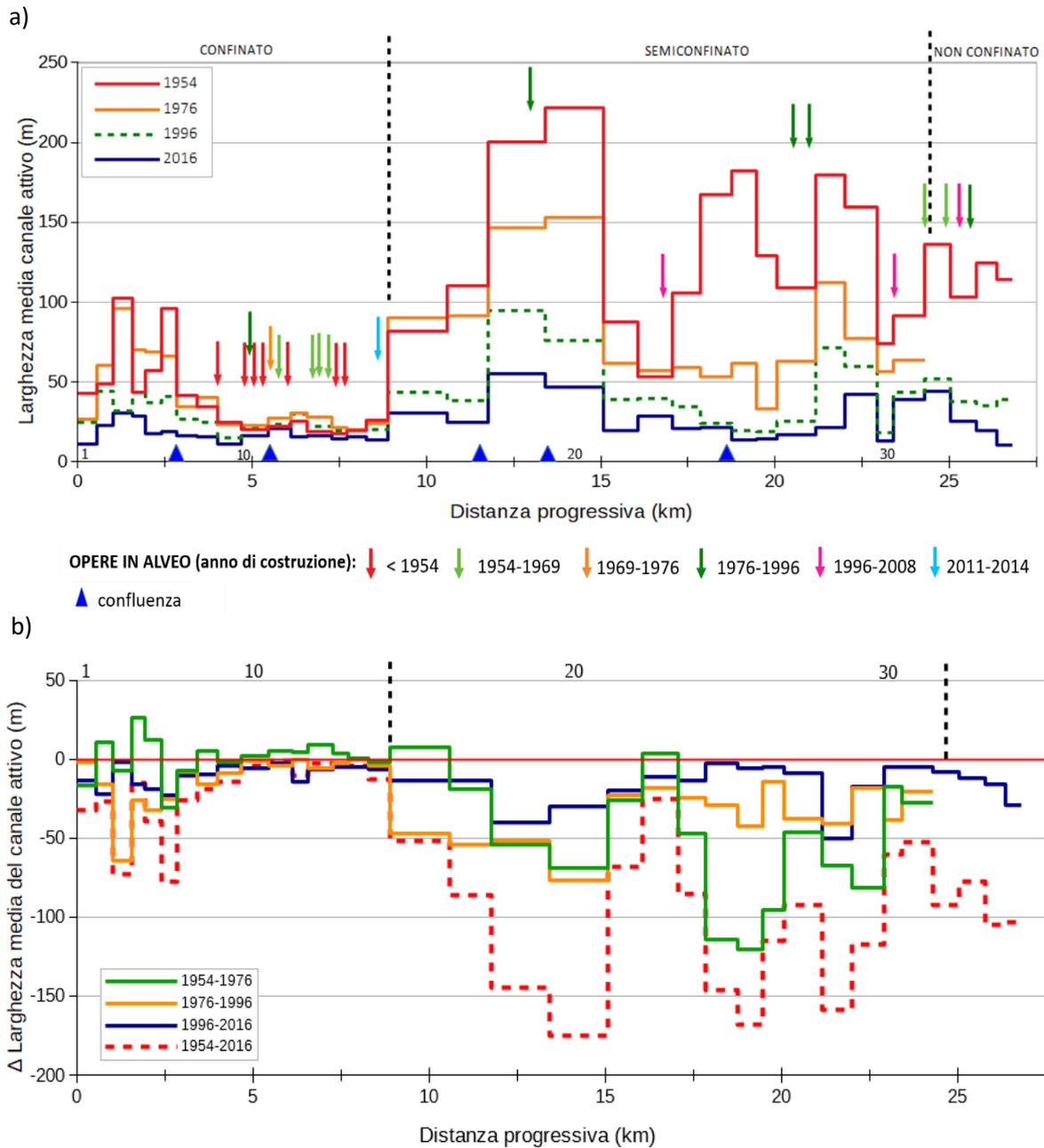


Figura 29. Larghezza media dell'alveo attivo alla scala di tratto negli anni 1954, 1976, 1996 e 2016 (a); variazione della larghezza media del canale attivo alla scala di tratto negli intervalli 1954-1976, 1976-1996, 1996-2016 e 1954-2016 (b).

#### 4.3.8.1. Tratto 10

Il tratto 10, situato nella parte di alveo confinato, è stato scelto per osservare la zona in cui il canale attivo del Fiume Sillaro è interessato dai cambiamenti minori durante il corso degli anni, rimanendo pressoché invariato.

Le variazioni della larghezza media del canale attivo di questo tratto, negli intervalli 1954-1976, 1976-1996 e 1996-2016, sono riportati nella tabella 4.

Tabella 4. Variazione della larghezza media del canale attivo nel tratto 10, negli intervalli 1954-1976, 1976-1996 e 1996-2016.

Δ larghezza 1954-1976 (m)	Δ larghezza 1976-1996 (m)	Δ larghezza 1996-2016 (m)
2.37	-1.09	-5.25

Si registra un iniziale allargamento dell'alveo attivo, seguito da un progressivo restringimento; si tratta in ogni caso di variazioni molto piccole rispetto ad altri tratti della porzione confinata.

Di seguito sono riportati i dettagli dell'evoluzione morfologica di questo tratto ad intervalli di circa 20 anni (Figura 30).

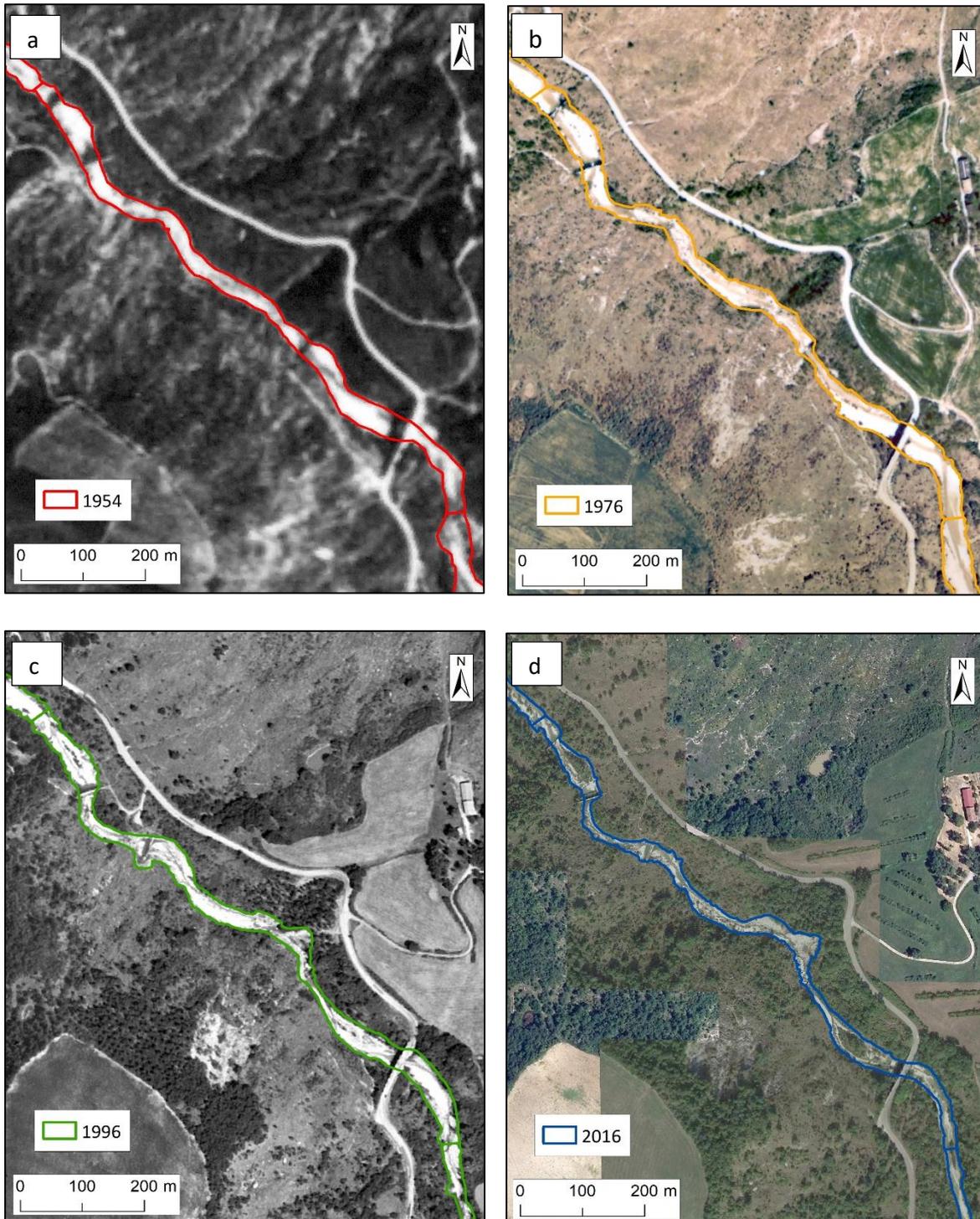


Figura 30. Canale attivo del tratto 10 nel 1954 (a), 1976 (b), 1996 (c) e 2016 (d).

Tra il 1976 e il 1996 in sinistra idrografica si nota la riattivazione di una frana che va a deformare l'alveo, mentre nel 2016 si osservano delle isole vegetate, assenti in precedenza.

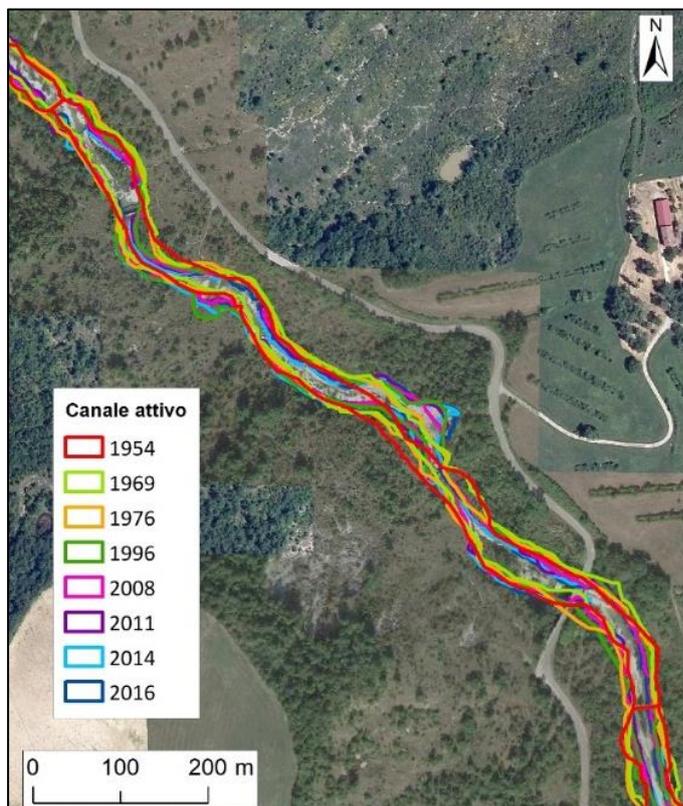


Figura 31. Variazione complessiva del canale attivo del tratto 10 tra il 1954 e il 2016.

Sovrapponendo l'evoluzione del canale attivo durante tutti gli anni considerati nell'analisi storica di questo lavoro, si osserva che l'alveo modifica principalmente il suo andamento, ma anche in questo caso si tratta di variazioni minime (Figura 31).

#### 4.3.8.2. Tratto 3

Il tratto 3 è stato scelto perché oltre a rappresentare la zona in cui l'alveo confinato presenta le larghezze medie iniziali maggiori, è anche uno dei tratti di questa porzione di alveo in cui sono state registrate le variazioni maggiori della larghezza media del canale attivo.

Nella figura 32 è rappresentato l'insieme dei cambiamenti che il Fiume Sillaro ha subito in questo tratto; si nota che le larghezze maggiori si sono registrate nei primi tre anni dell'analisi multitemporale (1954, 1969 e 1976), con concentrazione del restringimento tra il 1976 e il 1996 (Tabella 5).

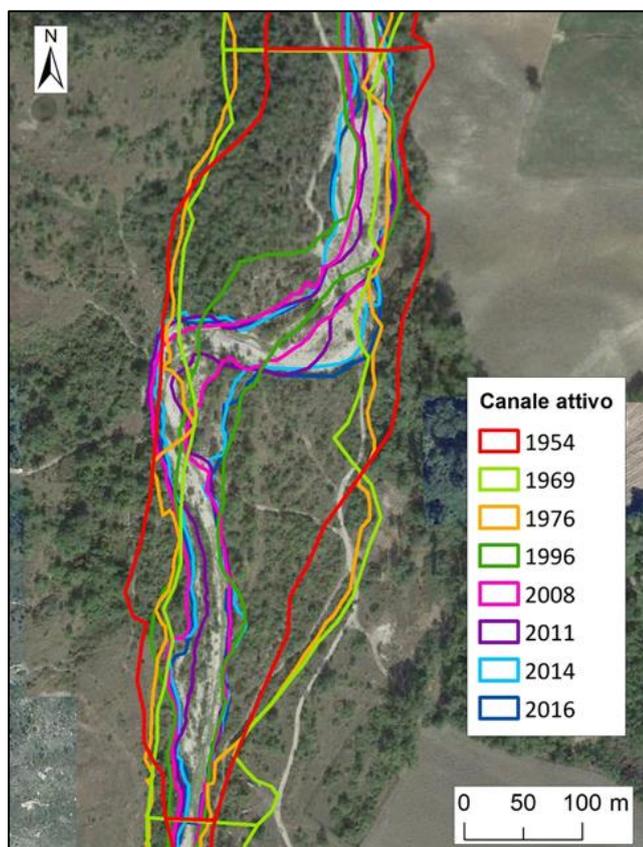


Figura 32. Variazione complessiva del canale attivo del tratto 3 tra il 1954 e il 2016.

Tabella 5. Variazione della larghezza media del canale attivo nel tratto 3, negli intervalli 1954-1976, 1976-1996 e 1996-2016.

$\Delta$ larghezza 1954-1976 (m)	$\Delta$ larghezza 1976-1996 (m)	$\Delta$ larghezza 1996-2016 (m)
-6.75	-64.22	-1.40

Di seguito sono riportati i dettagli dell'evoluzione morfologica di questo tratto ad intervalli di circa 20 anni (Figura 33).

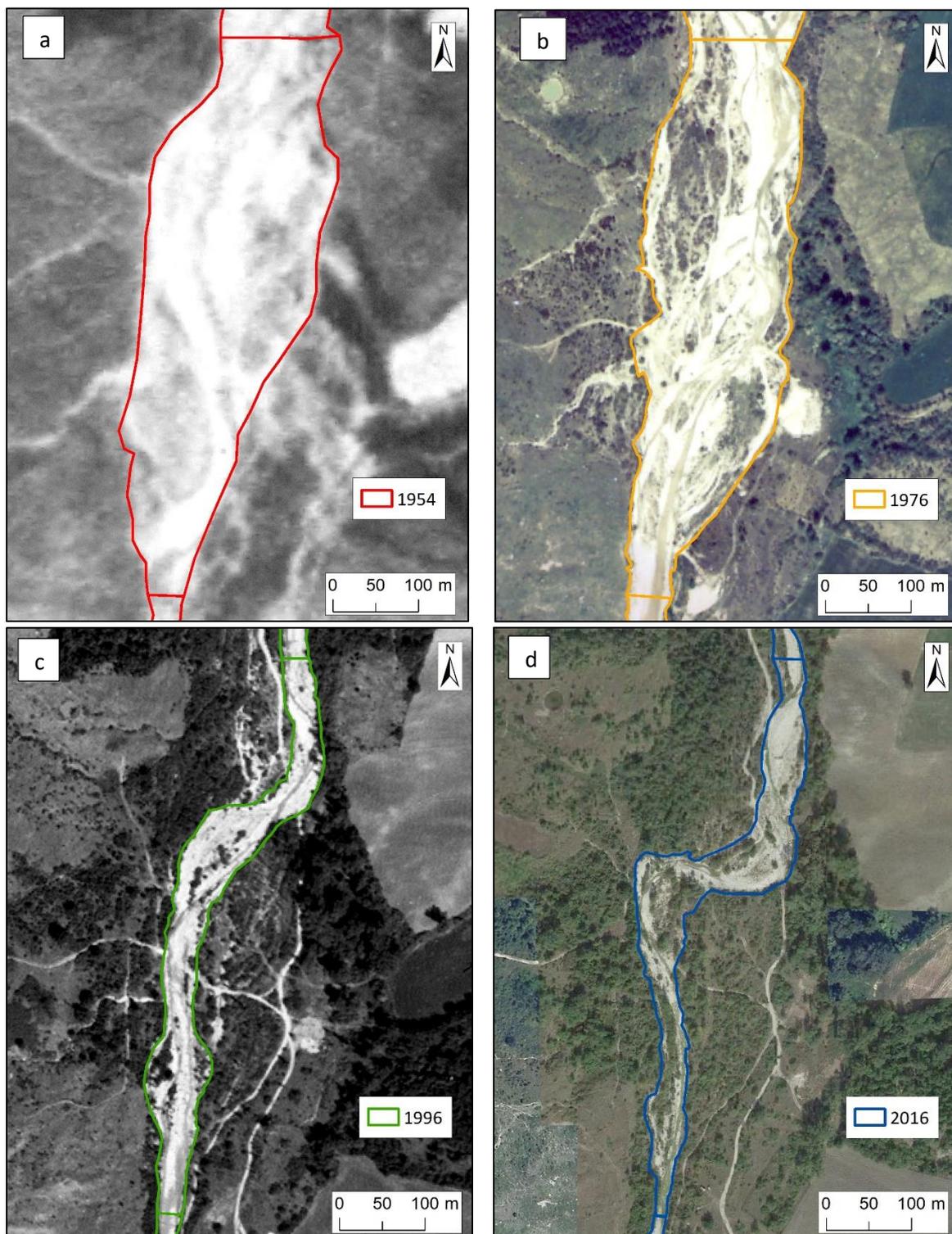


Figura 33. Canale attivo del tratto 3 nel 1954 (a), 1976 (b), 1996 (c) e 2016 (d).

#### 4.3.8.3. Tratti 19 e 20

I tratti 19 e 20, situati nella zona semiconfinata, presentano le larghezze massime raggiunte dal canale attivo nel 1954; è una delle zone in cui si sono avuti i cambiamenti maggiori, in particolare il tratto 20 presenta i massimi valori di restringimento registrati in tutto l'alveo, pari ad un totale di circa 175 metri tra il 1954 e il 2016.

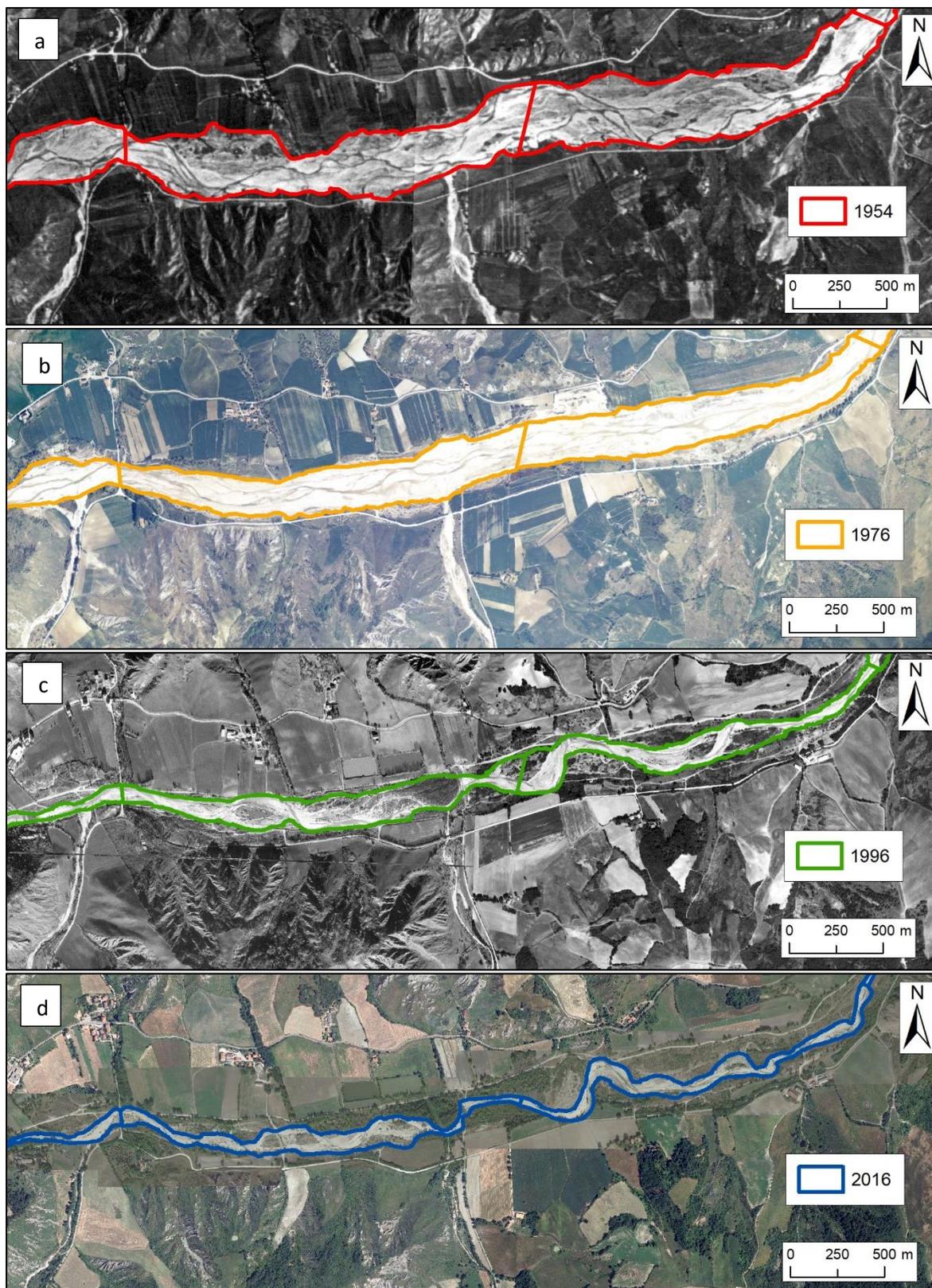


Figura 34. Canale attivo dei tratti 19 e 20 nel 1954 (a), 1976 (b), 1996 (c) e 2016 (d).

Dalla figura 34 si osserva che i due affluenti situati in destra idrografica, costituiscono un'importante fonte di alimentazione per l'alveo negli anni 1954 e 1976, mentre negli anni successivi si restringono sempre di più, diminuendo in modo sostanziale gli apporti nel Fiume Sillaro.

Nella figura 35 è visibile la variazione temporale completa della larghezza del canale attivo in questi due tratti; i restringimenti maggiori si hanno negli intervalli 1954-1976 e 1976-1996 (Tabella 6).

Tabella 6. Variazione della larghezza media del canale attivo nei tratti 19 e 20, negli intervalli 1954-1976, 1976-1996 e 1996-2016.

Tratto	$\Delta$ larghezza 1954-1976 (m)	$\Delta$ larghezza 1976-1996 (m)	$\Delta$ larghezza 1996-2016 (m)
19	-53.65	-51.55	-39.72
20	-68.45	-76.90	-29.45

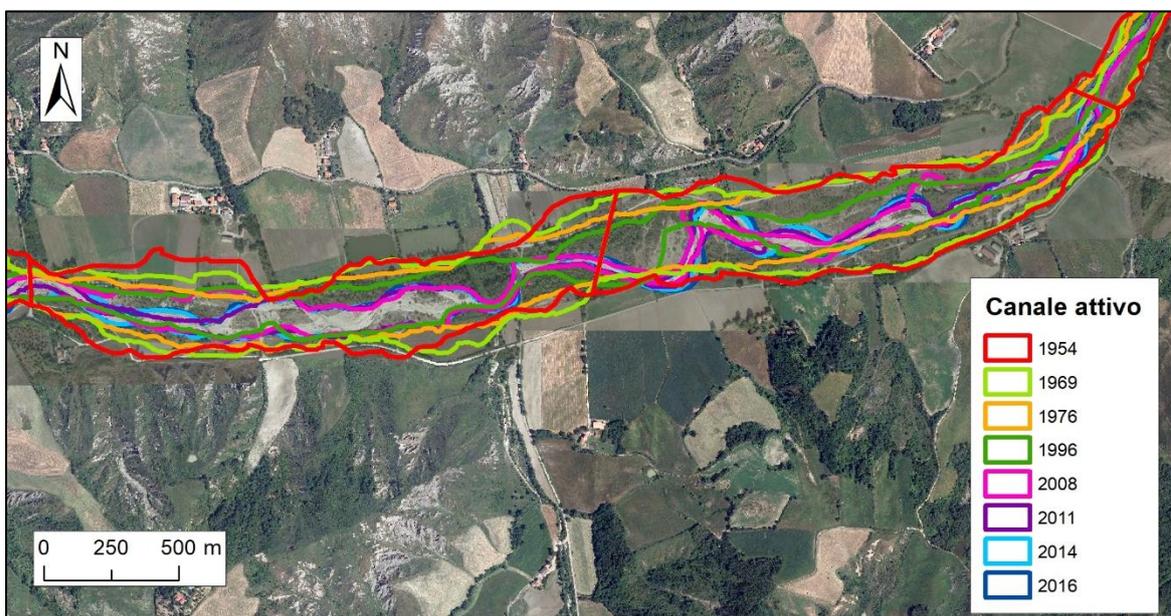


Figura 35. Variazione complessiva del canale attivo dei tratti 19 e 20 tra il 1954 e il 2016.

#### 4.3.8.4. Tratto 22

Rappresenta il tratto della porzione di alveo semiconfinato in cui la larghezza media del canale attivo ha subito i cambiamenti minori. Le variazioni, riportate nella tabella 7, mostrano un iniziale allargamento dell'alveo attivo tra il 1954 e il 1976, seguito poi da restringimento negli anni successivi (Figura 36).

Tabella 7. Variazione della larghezza media del canale attivo nel tratto 22, negli intervalli 1954-1976, 1976-1996 e 1996-2016.

$\Delta$ larghezza 1954-1976 (m)	$\Delta$ larghezza 1976-1996 (m)	$\Delta$ larghezza 1996-2016 (m)
3.77	-17.91	-11.01

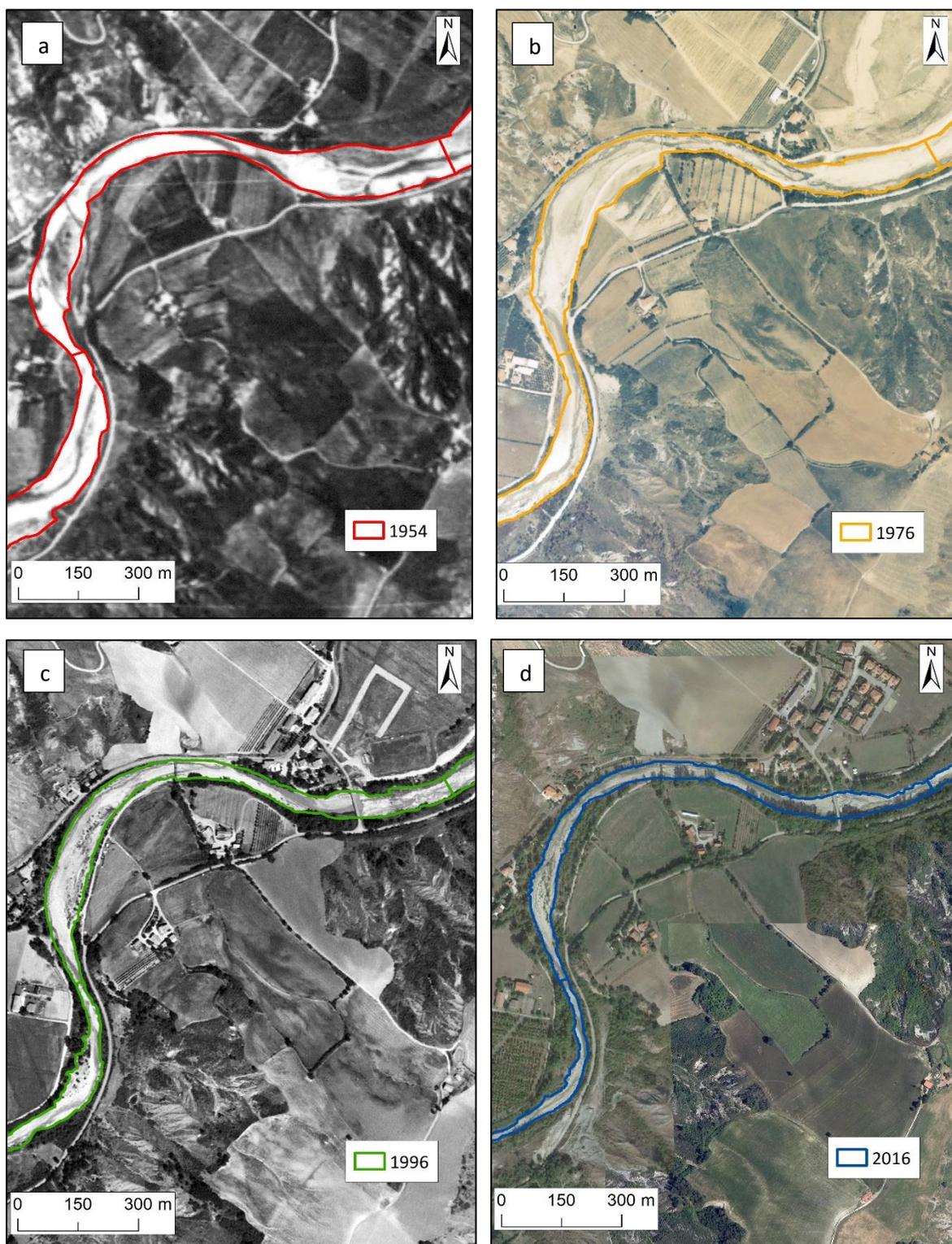


Figura 36. Canale attivo del tratto 22 nel 1954 (a), 1976 (b), 1996 (c) e 2016 (d).

Nella figura 37a si può osservare la complessiva evoluzione di questo tratto. Le variazioni della larghezza del canale attivo, inferiori rispetto agli altri tratti della porzione semiconfinata, sono dovute ad un maggiore confinamento di quest'area, osservabile dall'*hillshade* (Figura 37b). Inoltre, in destra idrografica si nota la zona di trasporto di una frana quiescente complessa, che in tempi indefiniti avrebbe potuto occludere o deviare il corso del Fiume Sillaro (si noti la forma dell'ansa) inducendo erosione al piede sui versanti opposti (Figura 38).

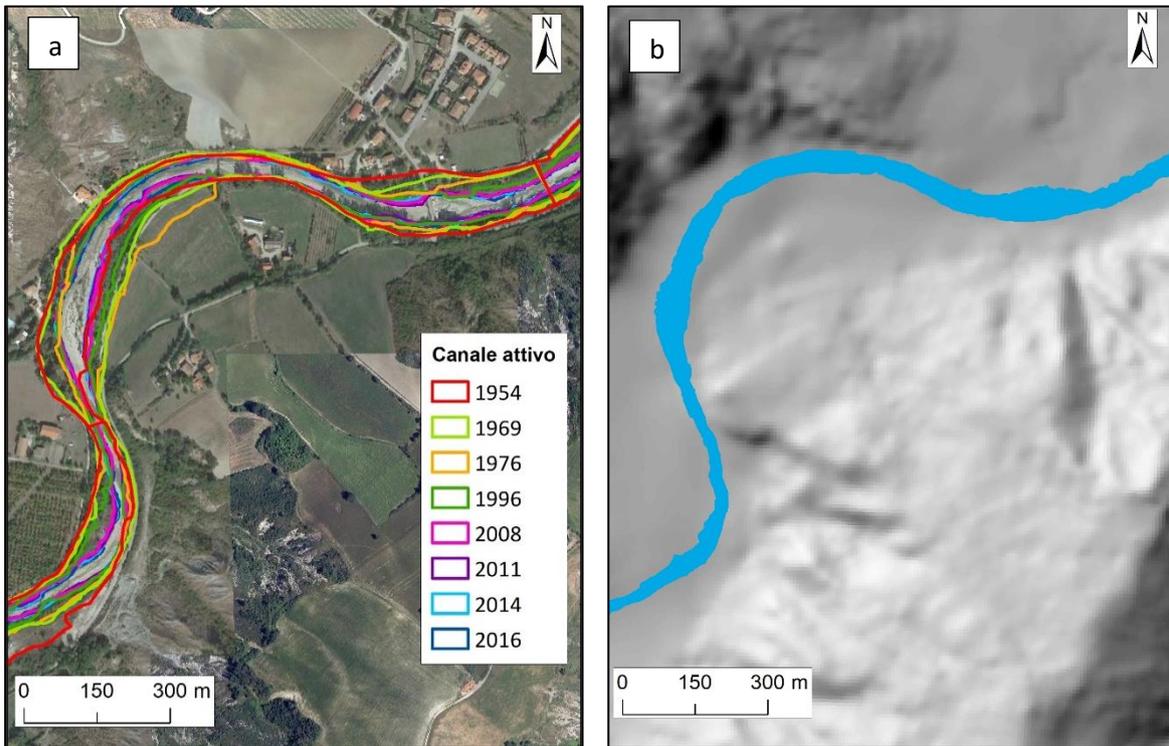


Figura 37. Variazione complessiva del canale attivo del tratto 22 tra il 1954 e il 2016 (a) e hillshade dell'area con sovrapposizione del canale attivo (b).

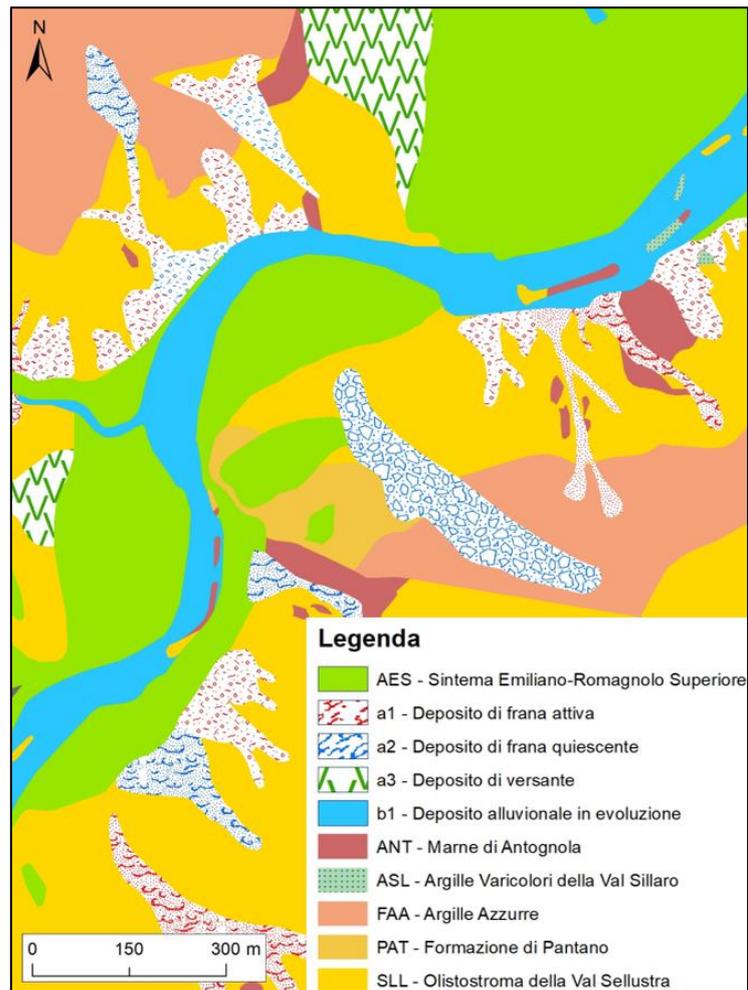


Figura 38. Dettaglio della cartografia CARG nel tratto 22.

#### 4.4. ANALISI DELLE INCERTEZZE SULLE MISURE DELLA LARGHEZZA DEL CANALE ATTIVO STIMATE DA REMOTO

I tratti scelti per effettuare l'analisi delle incertezze sono: (i) un tratto A, corrispondente al tratto numero 8, tratto confinato e a canale singolo (*single thread*), localizzato nelle vicinanze di Sassoleone; (ii) un tratto B, corrispondente al tratto numero 19, tratto semiconfinato a carattere *wandering*, sito in prossimità di San Clemente (Figura 39).

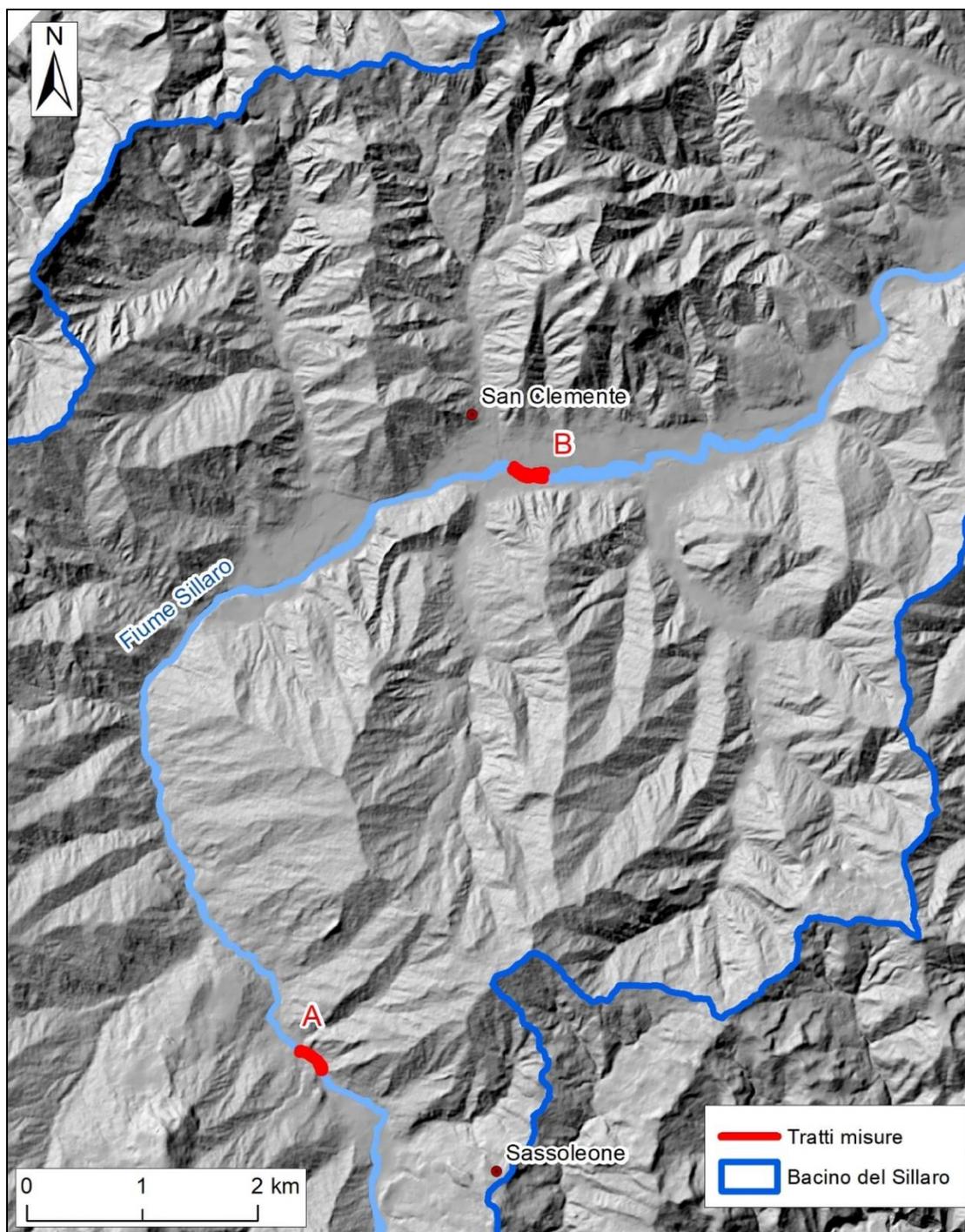


Figura 39. Collocazione dei tratti A e B, scelti per eseguire l'analisi delle incertezze sulle misure di larghezza di canale attivo stimate da immagini telerilevate in ambiente GIS.

In ciascuno dei tratti è stata misurata la larghezza trasversale del canale attivo, in 30 transetti posti ad una distanza di circa 10 metri l'uno dall'altro (Figura 40).

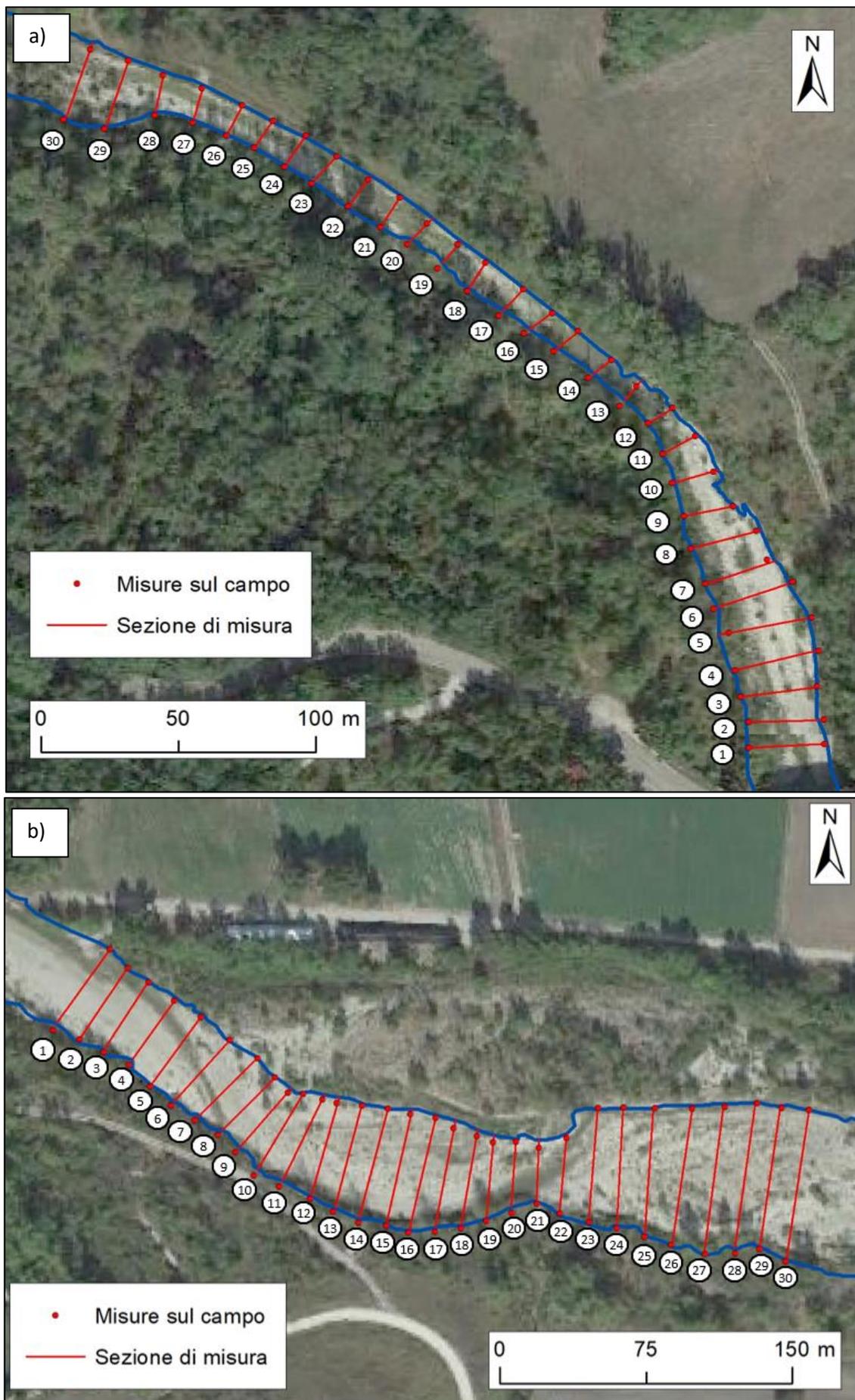


Figura 40. Localizzazione delle sezioni misurate in campo: a) tratto A, b) tratto B. In ogni tratto, le sezioni sono numerate in ordine progressivo da monte verso valle.

I valori di campo comparati e sottratti a quelli misurati da remoto, in modo da quantificare la sovrastima/sottostima derivante dalla mappatura, sono visibili nell'ALLEGATO 3, (Tabella 13).

Successivamente sono state confrontate le misure di campo con i residui (Figura 41).

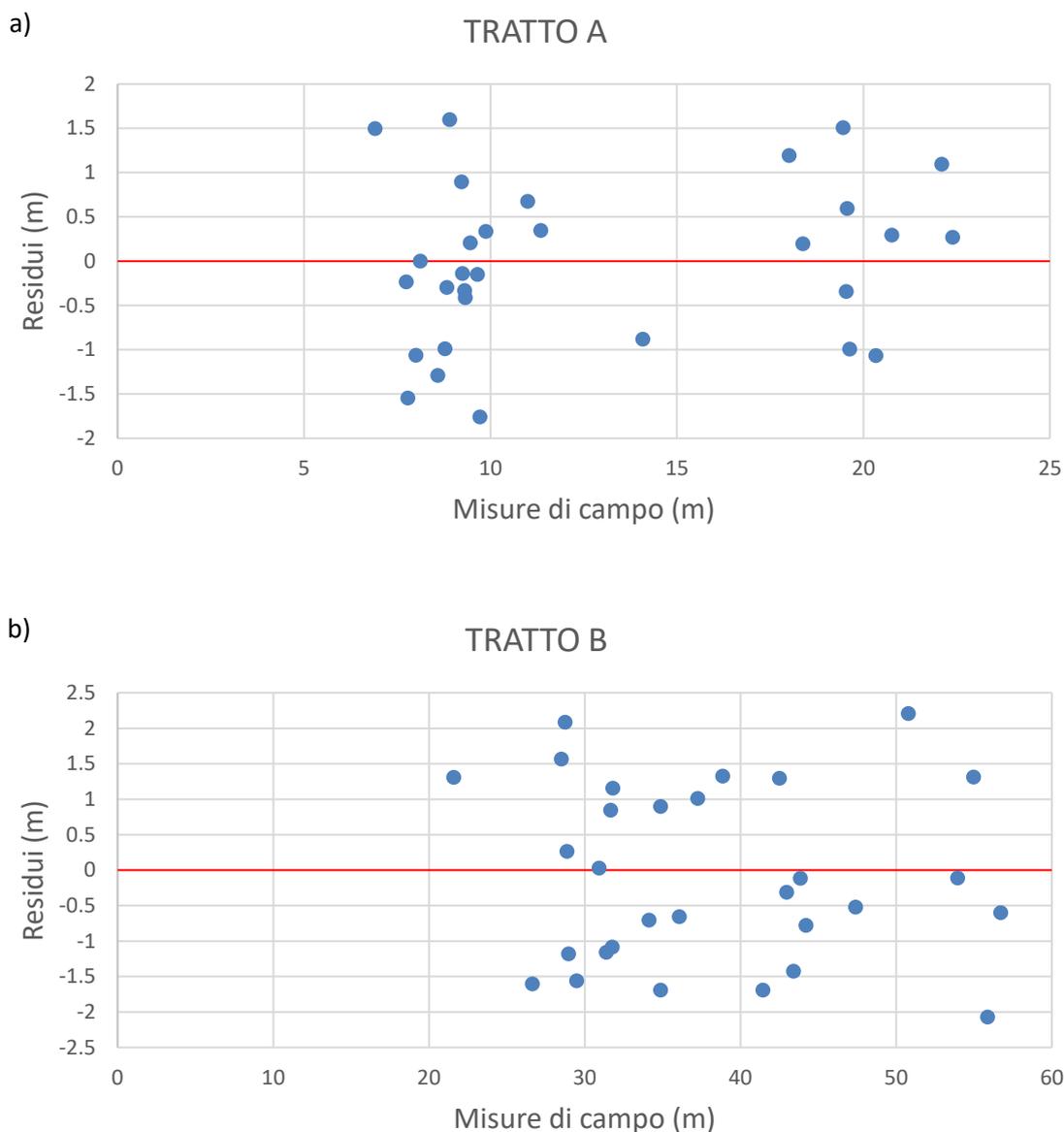


Figura 41. Confronto tra le misure di campo e i residui per il tratto A (a) e il tratto B (b).

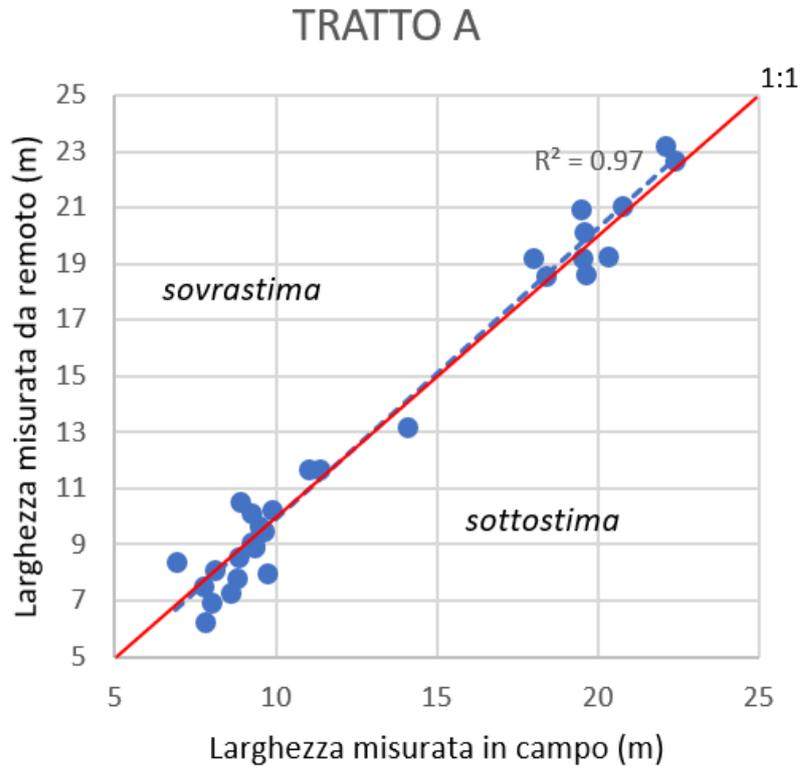
In entrambi i casi non si nota alcuna autocorrelazione nella variabilità dei valori residui ed è possibile procedere all'analisi di regressione tra larghezze misurate in campo e larghezze misurate su immagini telerilevate in ambiente GIS.

Sono stati dunque rapportati i valori di larghezza del canale attivo misurati in campo con quelli misurati da remoto. In entrambi i casi si vede una buona correlazione tra questi due serie di valori, con un buon  $R^2$ , pari a 0,97 per il tratto A e a 0,98 per il tratto B (Figura 42). Per il tratto A si osserva che dove il canale attivo è più stretto le misure effettuate da remoto vanno per lo più a sottostimare la larghezza misurata in campo, mentre dove il

canale attivo è più largo le misure da remoto vanno per lo più a sovrastimare le larghezze reali.

Nel tratto B invece le misure effettuate da remoto vanno per lo più a sottostimare la larghezza reale del canale attivo, in generale vi è una maggiore sovrapposizione tra le misure di campo e quelle misurate su immagini telerilevate in ambiente GIS.

a)



b)

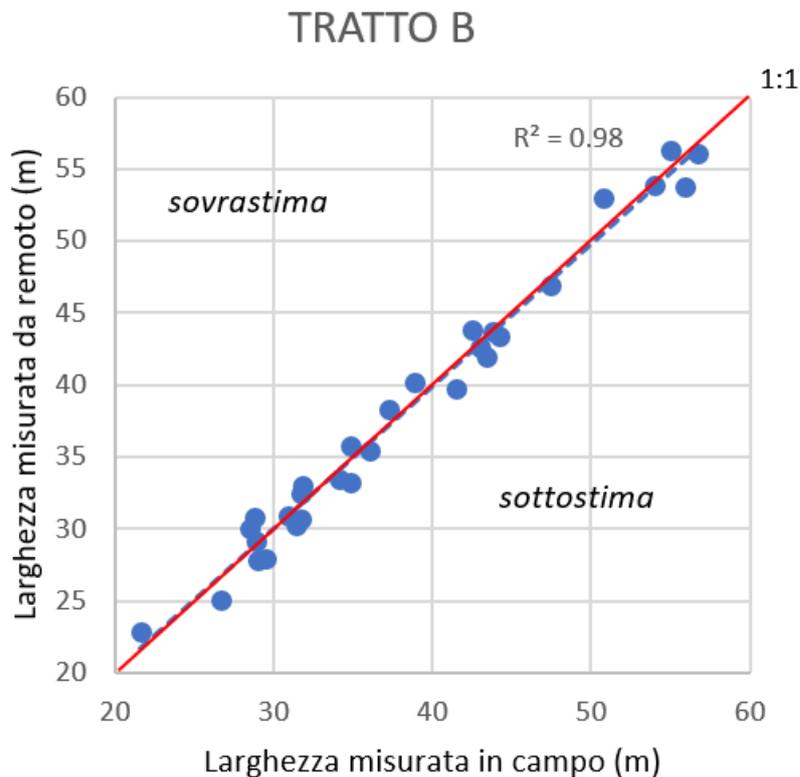


Figura 42. Larghezze del canale attivo del tratto A (a) e B (b) misurate in campo confrontate con quelle misurate da remoto.

L'errore nella mappatura, e di conseguenza nella misura da remoto della larghezza del canale attivo, è dovuto alla presenza di fattori che limitano l'identificazione dei limiti del reale canale attivo su immagini telerilevate: sponde coperte da vegetazione arborea e sponde in condizioni di ombra particolarmente intensa. In questo caso sono state differenziate le zone con e senza ombra (Figura 43).

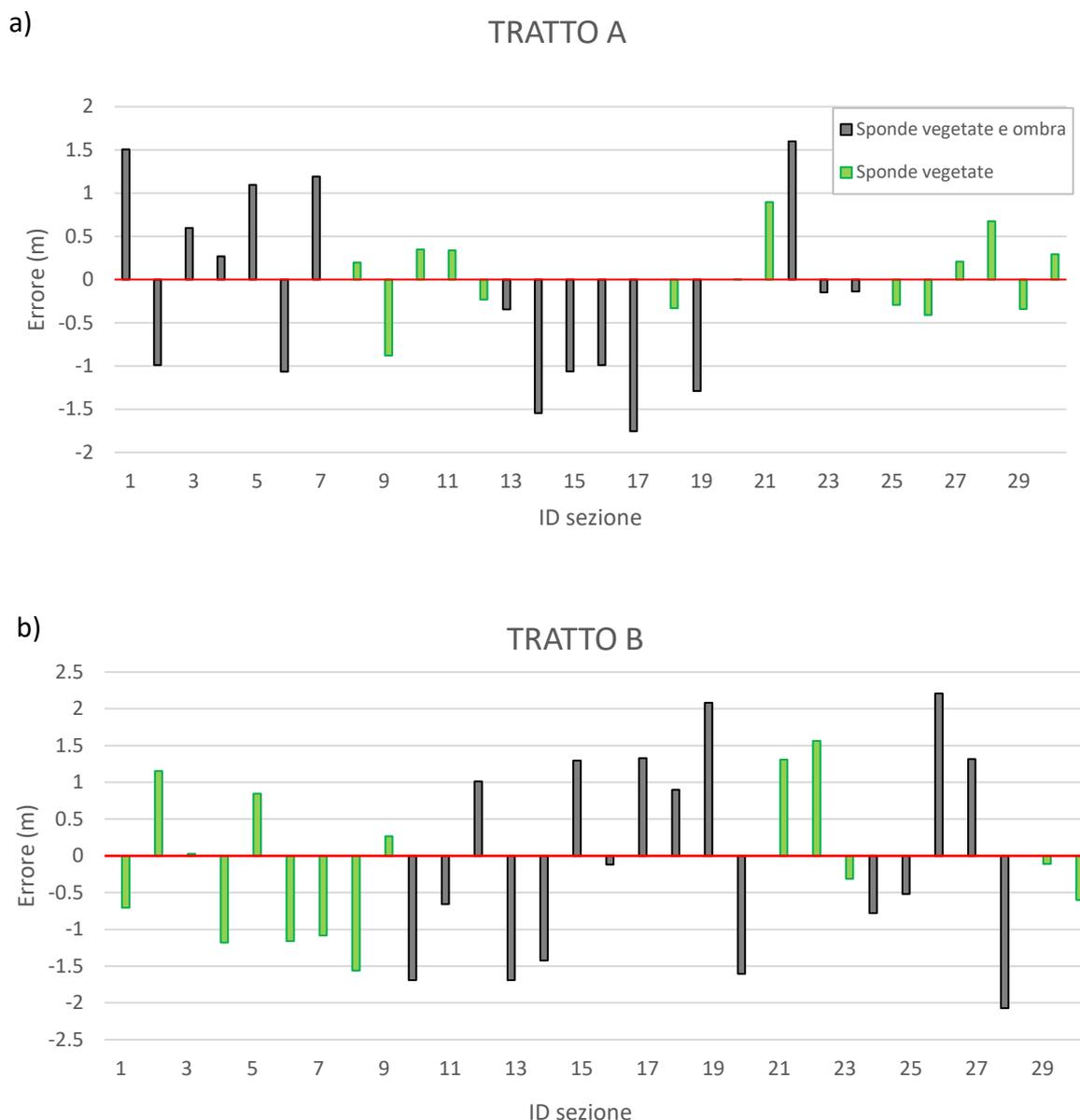


Figura 43. Errore delle misure effettuate da remoto nel tratto A (a) e nel tratto B (b), con la distinzione tra zone con ombreggiatura e senza ombreggiatura.

Per quantificare gli errori sono stati calcolati anche alcuni parametri statistici come media, errore standard, mediana, deviazione standard, valore minimo e valore massimo, sia per le aree ombreggiate che per quelle non ombreggiate di entrambi i tratti (Tabelle 8 e 9).

Tabella 8. Statistiche descrittive relative alle discrepanze tra misure dirette (campo) e indirette (GIS) di ampiezza di alveo espresse in metri (tratto A).

TRATTO A			
Con ombreggiatura		Senza ombreggiatura	
Media	-0.19	Media	0.03
Errore standard	0.28	Errore standard	0.13
Mediana	-0.22	Mediana	0.10
Deviazione standard	1.12	Deviazione standard	0.48
Minimo	-1.76	Minimo	-0.88
Massimo	1.60	Massimo	0.90
Conteggio	16	Conteggio	14

Tabella 9. Statistiche descrittive relative alle discrepanze tra misure dirette (campo) e indirette (GIS) di ampiezza di alveo espresse in metri (tratto B).

TRATTO B			
Con ombreggiatura		Senza ombreggiatura	
Media	-0.03	Media	-0.11
Errore standard	0.37	Errore standard	0.27
Mediana	-0.32	Mediana	-0.21
Deviazione standard	1.46	Deviazione standard	1.02
Minimo	-2.07	Minimo	-1.56
Massimo	2.20	Massimo	1.56
Conteggio	16	Conteggio	14

Si osserva che, in generale, gli errori maggiori corrispondono alla presenza di zone in ombra. Nel tratto A, nelle zone ombreggiate, le misure da remoto portano sia ad una sottostima, quantificata con valori massimi di 1,76 metri, sia ad una sovrastima, quantificata con valori massimi di 1,60 metri, della reale larghezza del canale attivo; nelle zone non in ombra invece i valori di errore riguardanti la misura della larghezza del canale attivo da remoto sono minori, con sovrastime del canale attivo reale massime di 0,90 metri e sottostime massime di 0,88 metri. Nel tratto B invece, i massimi valori di errore sono maggiori sia per i tratti in ombra che per quelli non in ombra; la larghezza del canale attivo misurata da remoto sovrastima quella reale sino ad un massimo di 2,20 metri e la sottostima sino ad un massimo di 2,07 metri nelle zone con ombra, mentre nelle zone prive di ombreggiatura sia la sovrastima che la sottostima della larghezza reale del canale attivo arrivano ad un massimo di 1,56 metri.

La deviazione standard e l'errore standard, sia per il tratto A che per il tratto B, testimoniano che l'errore nella misura della larghezza del canale attivo da remoto è maggiore e ha maggiore variabilità nelle zone in ombra. La differenza dei valori di errore tra il tratto A e il tratto B, in cui risultano maggiori, è funzione delle loro caratteristiche; infatti il tratto B, essendo semiconfinato e a carattere *wandering*, presenta una variabilità maggiore dei limiti del canale attivo, che rende più difficile individuare da telerilevamento in ambiente GIS l'inizio della vegetazione perenne, mentre il tratto A, essendo confinato e a canale singolo, rimane pressoché invariato nel tempo rendendo più semplice l'individuazione dei limiti del canale attivo da remoto.

#### 4.5. INDICE DI SINUOSITÀ E DI INTRECCIAMENTO

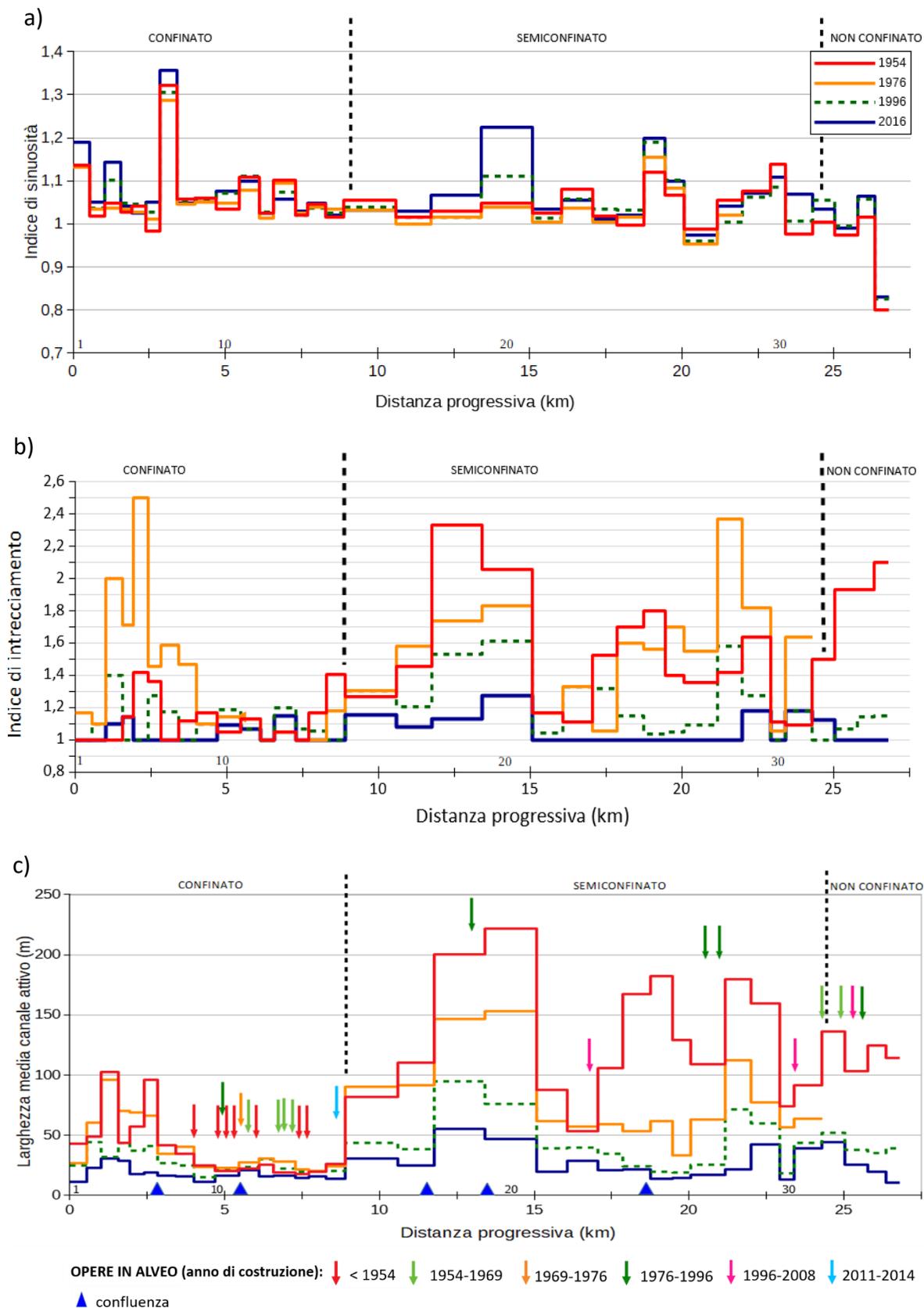


Figura 44. Indice di sinuosità (a), indice di intrecciamento (b) e larghezza media del canale attivo (c) alla scala di tratto, relativi agli anni 1954, 1976, 1996 e 2016.

Confrontando le variazioni della larghezza media del canale attivo, dell'indice di sinuosità e dell'indice di intrecciamento (Figura 44), si osserva che tra il 1996 e il 2016 al restringimento dell'alveo attivo corrisponde una diminuzione dell'indice di intrecciamento (con medie che variano tra 0,58 e 0,04) ed un aumento dell'indice di sinuosità (con medie che variano tra 0,01 e 0,11), a parte pochissime eccezioni in cui si ha un'inversione di quest'andamento, si tratta però di variazioni molto piccole (medie di aumento dell'indice di intrecciamento che variano tra 0,13 e 0,14 e medie di diminuzione dell'indice di sinuosità che variano tra 0,01 e 0,11). Tra il 1976 e il 1996 si ha lo stesso trend, con medie di diminuzione dell'indice di intrecciamento che variano tra 0,07 e 1,50 e medie di aumento dell'indice di sinuosità che variano tra 0,01 e 0,07, ad eccezione della zona compresa tra i tratti 13 e 16 (distanza progressiva compresa tra 6,6 e 9 km), dove sono situate il maggior numero di opere idrauliche in alveo, in cui l'indice di intrecciamento aumenta (con medie che variano tra 0,06 e 0,26) e l'indice di sinuosità diminuisce (con medie che variano tra 0,01 e 0,03) al diminuire della larghezza del canale attivo. Tra il 1954 e il 1976 invece non si osserva un trend ben definito, solo in alcuni tratti, in particolare dove si concentrano le opere antropiche in alveo (dal tratto 11 al 14, distanza progressiva compresa tra 5,5 e 7,7 km) questi andamenti coincidono con quelli precedenti, mentre nella maggior parte dei casi alla diminuzione/aumento della larghezza del canale attivo corrisponde una diminuzione/aumento dell'indice di intrecciamento oppure un aumento/diminuzione dell'indice di sinuosità; in pochi tratti si ha un'inversione del trend. In quest'ultimo intervallo di tempo si hanno variazioni dell'indice di intrecciamento comprese tra -0,60 e 1,08 e dell'indice di sinuosità comprese tra -0,05 e 0,03.

In generale l'indice di sinuosità tende ad aumentare nel tempo, anche se le variazioni nella maggior parte dei casi sono molto ridotte; tra il 1954 e il 1976 non mostra una relazione ben definita con la variazione della larghezza del canale attivo, mentre negli intervalli successivi, in maniera particolare tra il 1996 e il 2016, quando le variazioni della larghezza dell'alveo diminuiscono di intensità, si osserva che assume un trend ben specifico, ossia aumenta al diminuire della larghezza del canale attivo, soprattutto nei tratti in cui si sono registrati i restringimenti maggiori. Nel Sillaro predominano i tratti sinuosi, con  $I_s$  compreso tra 1.05 e 1.5; un indice di sinuosità inferiore a 1.05 fa invece riferimento a tratti rettilinei, in generale indicativi di una situazione artificiale, ma in questo caso un indice di tale valore è dovuto al fatto che, in questi tratti, l'asse del tracciato planimetrico tende a coincidere con l'asse dell'alveo.

L'indice di intrecciamento invece sembra avere più regolarità nel tempo, generalmente segue l'andamento dell'evoluzione del canale attivo; è legato soprattutto alla diminuzione/aumento della larghezza del canale e quindi alla conseguente diminuzione/aumento del numero di canali attivi in ciascun tratto. Bisogna tenere in considerazione che questo indice può presentare degli errori, legati alla soggettività, ossia all'interdistanza tra i transetti scelta per calcolarlo, ai livelli idrometrici presenti durante la ripresa aerea e alla risoluzione dell'ortofoto che influisce sull'individuazione del numero corretto di canali presenti.

Nell'ALLEGATO 4 sono riportati i valori dell'indice di sinuosità dei singoli tratti per ciascun anno (Tabella 14), le sue variazioni (Tabella 15) e la rappresentazione del confronto dell' $I_s$  tra i singoli anni dell'analisi (Figura 54).

Nell'ALLEGATO 5 sono invece riportati i valori dell'indice di intrecciamento dei singoli tratti per ciascun anno (Tabella 16), le sue variazioni (Tabella 17) e la rappresentazione del confronto dell' $I_i$  tra i singoli anni dell'analisi (Figura 55).

## 5. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

L'analisi storica effettuata da immagini telerilevate sul Fiume Sillaro ricostruisce l'evoluzione morfologica dell'alveo a partire dagli anni '50 sino al 2016. In generale, il processo dominante osservato è una progressiva diminuzione, a scala di tratto, della larghezza media del canale attivo, con medie di restringimento complessivo nel periodo 1954-2016 comprese tra il 5 e l'81% (media del 45%) nella porzione di alveo confinato, tra il 47 e il 92% (media del 76%) nella porzione di alveo semiconfinato e tra il 68 e il 91% (media dell'83%) nella porzione di alveo non confinato (Figura 45). Questa elevata variabilità è legata alle grandi differenze esistenti tra i 35 tratti di studio, i quali essendo stati delineati utilizzando la metodologia proposta da Montgomery & Buffington (1997), tendono a minimizzare la variabilità morfologica interna ad ogni tratto, massimizzando la variabilità tra tratti. Così facendo si sono confrontati tratti molto diversi tra loro e.g., da tratti a canale singolo a tratti *wandering*, da tratti confinati ad altri semiconfinati e non confinati.

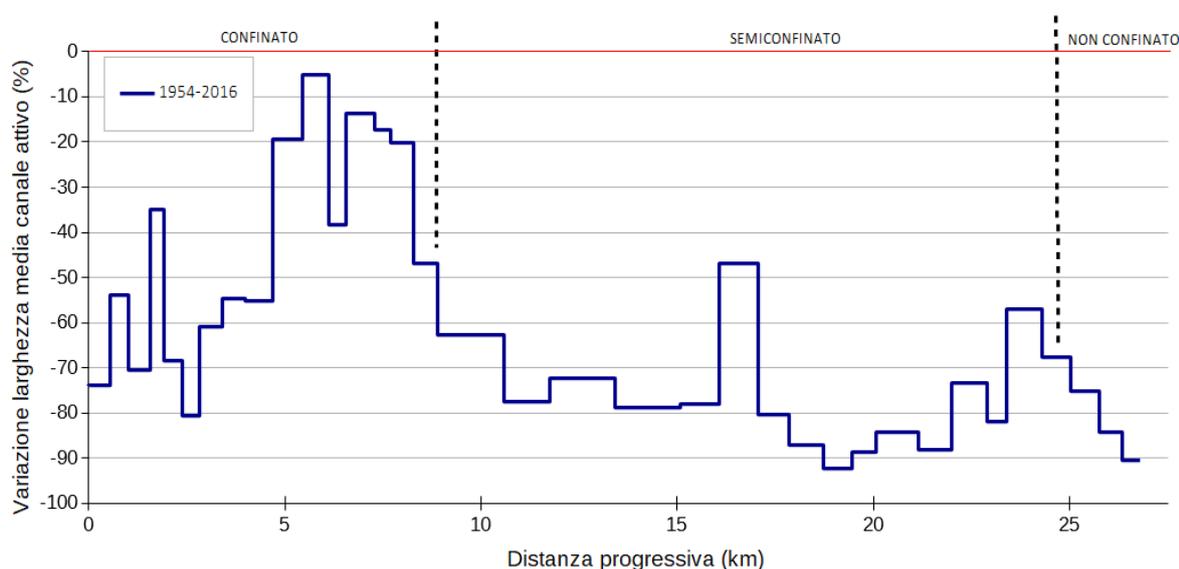


Figura 45. Variazione della larghezza media del canale attivo alla scala di tratto tra il 1954 e il 2016, espressa in percentuale.

Per poter contestualizzare i risultati di questo lavoro con i trend evolutivi degli altri fiumi italiani delineati da studi precedenti, i valori medi delle percentuali di variazione della larghezza del canale attivo dei segmenti vallivi confinato e semiconfinato del Fiume Sillaro sono stati confrontati con le rispettive variazioni a scala di segmento (superiore e intermedio) di fiumi dell'Appennino Tosco-Emiliano (Panaro, Trebbia, Magra e Cecina) e di un fiume dell'Appennino Ligure (Vara), riportate da Surian et al. (2009a).

In questi cinque fiumi (Figura 46), le percentuali di restringimento raggiungono i valori maggiori tra la seconda metà degli anni '80 e i primi anni '90, per poi declinare verso gli anni 2000; in alcuni casi si registrano anche degli allargamenti del canale attivo, senza distinzioni tra porzioni superiori e intermedie. Per la parte semiconfinata (intermedia) del Fiume Sillaro, dove sono presenti i tratti inizialmente più larghi e che hanno subito i restringimenti maggiori, le percentuali massime di restringimento vengono raggiunte nel 1996; in seguito le percentuali di restringimento calano in maniera più blanda rispetto agli altri fiumi, sino a registrare un leggero allargamento nel 2014. La parte confinata (superiore) del Sillaro invece subisce un allargamento tra il 1969 e il 1976; in seguito la percentuale di restringimento aumenta progressivamente, sino a raggiungere il valore

massimo nel 2008, per poi diminuire progressivamente sino al 2014. La maggior sovrapposizione tra gli altri fiumi appenninici e la parte di alveo semiconfinato del Sillaro, è dovuta al fatto che in questa porzione le percentuali di variazione della larghezza del canale attivo sono più simili tra loro, a differenza di quanto accade nella parte di alveo confinata, dove si hanno percentuali di variazione più disomogenee.

Le linee della porzione confinata e semiconfinata del Sillaro sono parallele fino al 1996, questo indica che nel primo periodo dell'analisi multitemporale le due porzioni del fiume si comportano allo stesso modo (in termini relativi), e soprattutto mostrano un comportamento sincronizzato; negli ultimi anni si osserva invece un andamento identico delle due porzioni del Sillaro (le due linee si sovrappongono), indice del fatto che i cambiamenti cumulati hanno semplificato il fiume, ossia il grado di confinamento laterale non incide più in maniera significativa sulla percentuale delle variazioni della larghezza del canale attivo. Si osserva inoltre che il Sillaro tende a rispondere più tardi e con percentuali di allargamento molto basse rispetto agli altri fiumi, che iniziano ad allargarsi notevolmente già dagli anni 2000.

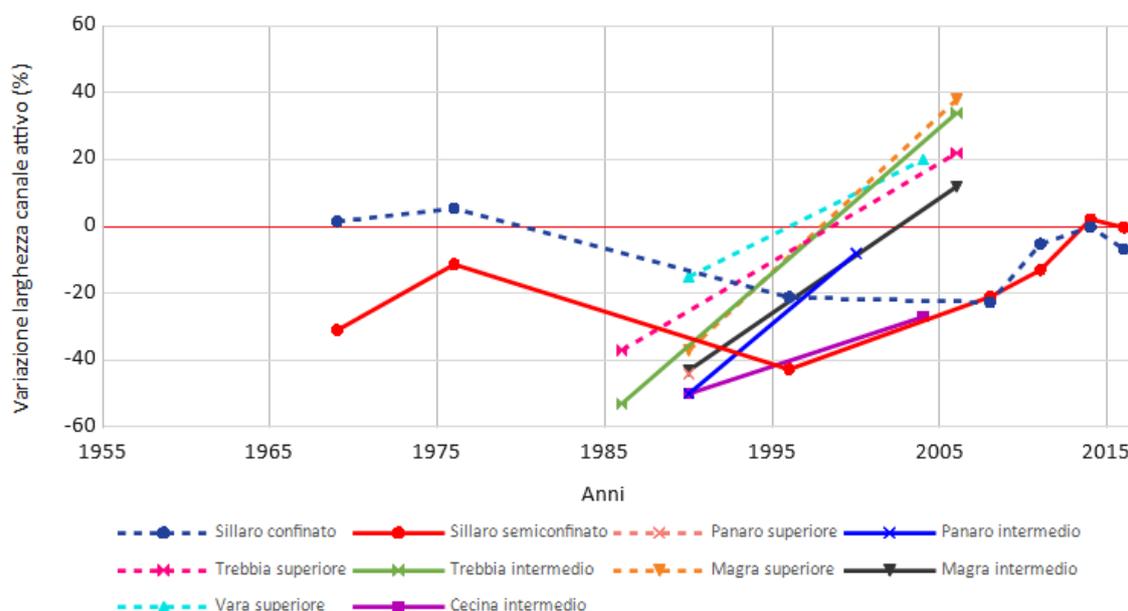


Figura 46. Percentuali medie delle variazioni della larghezza del canale attivo registrate nella porzione confinata e semiconfinita del Sillaro confrontate con le percentuali di variazione della parte superiore e intermedia dei tratti di fiumi appenninici riportate da Surian et al., (2009a).

Considerando l'analisi storica effettuata in questo lavoro, il Fiume Sillaro nei primi due intervalli di tempo (1954-1969 e 1969-1976) mostra un diffuso allargamento del canale attivo nella parte di alveo confinato e restringimento nelle porzioni semiconfinita e non confinata. A partire dall'intervallo 1976-1996, i restringimenti si estendono a tutto l'alveo, diminuendo progressivamente nel tempo. Tra il 2011 e il 2014 si registra invece un allargamento generale del canale attivo, che rimane stabile tra il 2014 e il 2016.

Osservando i dati sulle precipitazioni e sull'uso del suolo, non si nota un trend che possa correlare queste forzanti con gli importanti restringimenti subiti dall'alveo; si osserva invece che le variazioni del canale attivo sono contenute, anche in presenza delle confluenze principali, nei tratti in cui sono concentrate le infrastrutture antropiche in alveo. L'estrazione di materiale in alveo, documentata tra gli anni '50 e '80, è ipotizzabile sia la causa principale dei cambiamenti registrati dal canale attivo durante questi anni; il persistere del deficit di sedimento prodotto dalle estrazioni, combinato alla riduzione degli apporti di sedimento provenienti

dagli affluenti principali, osservata dalle ortofoto tra il 1976 e il 1996, fanno sì che in questo intervallo di tempo si raggiungano le percentuali massime di restringimento.

Durante gli anni presi in considerazione dall'analisi storica, si sono registrate delle variazioni negli indici di intrecciamento e di sinuosità (Figura 47). L'indice di intrecciamento segue complessivamente gli andamenti dell'alveo attivo; quest'indice è legato alla diminuzione/aumento della larghezza del canale e quindi alla conseguente diminuzione/aumento del numero di canali attivi in ciascun tratto. Le variazioni complessive dell'indice di intrecciamento, per l'intervallo 1954-2016, sono comprese tra il -29 e 10% nella porzione di alveo confinato, tra il -51 e l'8% in quella semiconfinata e tra il -52 e il -25% in quella non confinata; in molti tratti si ha il passaggio da una morfologia *wandering* ad una a canale singolo.

La sinuosità, che inizialmente non ha un andamento definito, a partire dal 1976 inizia a descrivere un trend ben specifico, ossia aumenta (o diminuisce, a seconda dei tratti) in modo inverso rispetto alla variazione della larghezza del canale attivo. Le variazioni complessive dell'indice di sinuosità, per l'intervallo 1954-2016, sono comprese tra il -4 e il 9% nella parte di alveo confinato, tra il -3 e il 17% nella parte di alveo semiconfinato e tra il 2 e il 5% nella parte di alveo non confinato; in generale i cambiamenti più elevati di sinuosità si hanno in corrispondenza dei tratti in cui si sono registrati i restringimenti maggiori del canale attivo. Queste variazioni, in linea con il cambiamento morfologico che in alcuni tratti ha visto l'alveo passare da un andamento planimetrico di tipo *wandering* ad uno di tipo *single thread* (canale singolo), sono spiegabili con una generalizzata e drastica diminuzione (i) della disponibilità di sedimento in alveo e (ii) degli apporti di sedimento provenienti dagli affluenti principali.

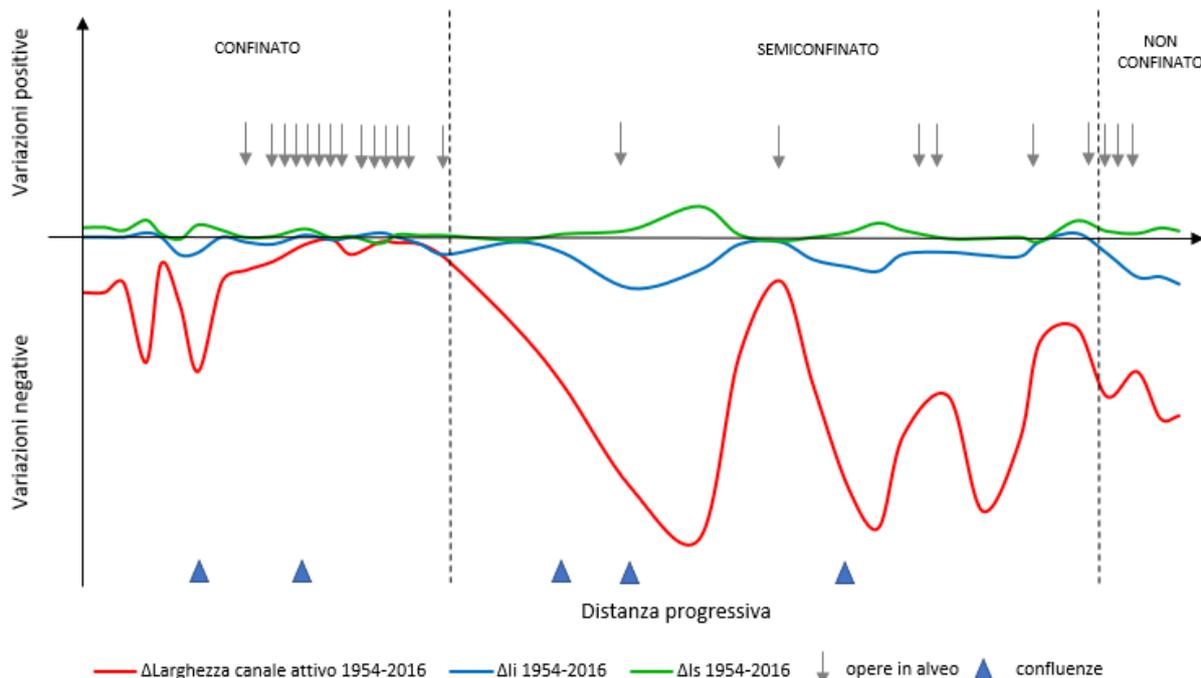


Figura 47. Schema concettuale della variazione della larghezza del canale attivo, dell'indice di intrecciamento e dell'indice di sinuosità tra il 1954 e il 2016.

In conclusione, dai dati acquisiti attraverso questo lavoro, si può ipotizzare che i restringimenti del Fiume Sillaro siano principalmente correlati alla diminuzione di sedimento in alveo, dovuta sia all'estrazione di materiale in alveo che alla riduzione degli apporti di sedimento provenienti dagli affluenti principali; le infrastrutture antropiche in alveo invece tendono a stabilizzare le variazioni del canale attivo, soprattutto nella zona a monte (confinata) in cui esse sono concentrate.

## BIBLIOGRAFIA

- Ashmore P., (1991). Channel morphology and bed load pulses in braided, gravel-bed streams. *Geografiska Annaler*, 73A, 37-52.
- Benini A., De Nardo M. T., Severi P., (2009). Note illustrative della Carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000, foglio 238 "Castel S. Pietro Terme". Regione Emilia-Romagna - Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli.
- Brardinoni F., Hassan M. A., (2007). Glacially induced organization of channel-reach morphology in mountain streams, *J. Geophys. Res.*, 112, F03013, doi:10.1029/2006JF000741.
- Brierley G.J., Fryirs K.A., (2005). *Geomorphology and River Management. Applications of the River Styles Framework*. Blackwell Publishing, 398 pp.
- Ferraresi M., Venturini L., (1983). Piano progettuale per la difesa della costa adriatica Emiliano-Romagnola- volume IV, il trasporto solido fluviale nei bacini tributari dell'Adriatico. IDROSER. Bologna, settembre 1983.
- Gazzolo P., Bortone G., Bonotto P., (2011). COASTANCE - Strategie e strumenti di gestione della costa in Emilia-Romagna. Regione Emilia-Romagna – Servizio Difesa del Suolo, della Costa e Bonifica.
- Montgomery D. R., Buffington J. M., (1997). Channel-reach morphology in mountain drainage basins, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 109, 596– 611.
- Pavanelli D., Pagliarani A., Bigi A., (2004). Rilevamento idrologico e dei solidi sospesi nelle stazioni sperimentali dei torrenti Sillaro, Lavino, Savena e foce Reno. Convegno "Il monitoraggio idrotorbidimetrico dei corsi d'acqua per la stima dei processi erosivi e il bilancio dei solidi", Bologna, 8 ottobre 2004. ArpaRivista n.6- supplemento, pp 3-7.
- Rinaldi M., Surian N., Comiti F., Bussetini M., (2014). IDRAIM – Sistema di valutazione idromorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d'acqua. ISPRA – Manuali e Linee Guida 113/2014. Roma, giugno 2014.
- Rinaldi M., Belletti B., Comiti F., Nardi L., Mao L., Bussetini M., (2015). SUM - Sistema di rilevamento e classificazione delle unità morfologiche dei corsi d'acqua. ISPRA – Manuali e Linee Guida 122/2015. Roma, aprile 2015.
- Surian N., Rinaldi M., (2008). Dinamica recente ed attuale degli alvei fluviali in Italia: stato dell'arte e prospettive. *Il Quaternario*, 21(1B), 233-240.
- Surian N., Rinaldi M., Pellegrini L., Audisio C., Maraga F., Teruggi L., Turitto O., Ziliani L., (2009a). Channel adjustments in northern and central Italy over the last 200 years. In: James L.A., Rathburn S.L., Whittecar G.R. (Eds.), *Management and Restoration of Fluvial Systems with Broad Historical Changes and Human Impacts*, Geological Society of America Special Paper 451, 83-95, DOI: 10.1130/2009.2451(05).
- Surian N., Rinaldi M., Pellegrini L., (2009b). Linee guida per l'analisi geomorfologica degli alvei fluviali e delle loro tendenze evolutive.

## SITOGRAFIA

Arpae Emilia-Romagna - <http://www.smr.arpa.emr.it/dext3r/>  
Geoportale Regione Emilia-Romagna - <https://geoportale.regione.emilia-romagna.it/>

## APPENDICE

### ALLEGATO 1: variazione della larghezza media del canale attivo

Tabella 10. Misura della larghezza media (espressa in metri) del canale attivo alla scala di tratto, per ciascun anno analizzato.

<b>Id tratti</b>	<b>1954 (m)</b>	<b>1969 (m)</b>	<b>1976 (m)</b>	<b>1996 (m)</b>	<b>2008 (m)</b>	<b>2011 (m)</b>	<b>2014 (m)</b>	<b>2016 (m)</b>
1	43.09	24.7	26.58	24.93	12.64	13.38	13.23	11.28
2	48.99	67.74	60.14	44.57	40.25	19.8	24.15	22.59
3	102.75	90.82	96	31.78	24.08	18.88	29.76	30.38
4	43.68	69.46	69.85	43.71	27.01	19.64	29.17	28.42
5	56.9	65.67	69.11	36.9	21.55	17.35	19.53	17.91
6	96.34	68.55	66.21	41.17	22.87	20.29	23.61	18.72
7	41.85	38.26	34.49	26.75	16.99	18.38	18.43	16.32
8	34.79	35.22	40.24	24.75	18.98	17.95	16.37	15.75
9	24.93	25.4	23.5	15.28	12.69	12.96	12.67	11.19
10	20.49	19.88	22.86	21.77	17.91	18.1	18.03	16.52
11	21.92	23.13	27.62	23.41	22.9	21.75	22.36	20.81
12	25.76	31.79	30.68	30.28	18.77	16.88	16.09	15.92
13	18.75	24.11	28.08	22.5	17.53	17.43	17.34	16.18
14	17.7	20.68	21.83	19.48	15.52	14.78	17.03	14.64
15	19.54	18.9	20.14	20.38	17.66	16.51	16.37	15.58
16	26.01	23.93	24.32	20.05	16.01	15.21	14.04	13.8
17	82.1	99.11	90.17	43.64	65.52	29.32	32.78	30.54
18	110.55	93.06	91.75	38.2	34.84	22.5	24.71	24.73
19	200.23	190.57	146.58	95.03	66.51	48.49	55.2	55.31
20	221.66	197.57	153.21	76.31	40.42	34.09	41.44	46.86
21	87.6	69.19	61.69	39.05	21.42	20.52	21.28	19.35
22	53.54	62.5	57.31	39.4	30.47	28.11	27.46	28.39
23	105.96	70.49	58.97	34.44	25.82	24.2	21.72	20.77
24	167.59	86.25	53.46	24.32	22.68	19.74	20.14	21.69
25	182.07	101.62	61.8	19.76	18.71	16.64	14.73	13.89
26	129.01	51.55	33.54	19.22	15.17	15.62	14.64	14.5
27	109.04	71.34	63.18	25.44	18.87	16.73	17.1	17.22
28	179.92	124.17	112.47	71.64	32.12	23.06	21.6	21.53
29	159.26	82.33	77.61	59.81	47.16	37.36	40.44	42.33
30	73.85	25.1	56.3	18.36	18.26	16.87	15.52	13.39
31	91.3	72.13	63.97	43.66	34.79	32.93	38.49	39.18
32	136.17	98.1	-	52.28	43.93	34.6	46.52	44.21
33	103.4	53.63	-	37.6	37.4	30.54	30.48	25.78
34	124.38	-	-	35.38	22.77	20.17	21.75	19.59
35	114.03	-	-	39.35	11.22	12.05	13.31	10.81

Tabella 11. Quantificazione delle variazioni della larghezza media del canale attivo alla scala di tratto (espressa in metri).

<b>Id tratto</b>	<b>Δ larghezza 1954-1969</b>	<b>Δ larghezza 1969-1976</b>	<b>Δ larghezza 1976-1996</b>	<b>Δ larghezza 1996-2008</b>	<b>Δ larghezza 2008-2011</b>	<b>Δ larghezza 2011-2014</b>	<b>Δ larghezza 2014-2016</b>
1	-18.39	1.88	-1.65	-12.29	0.74	-0.15	-1.95
2	18.75	-7.60	-15.57	-4.32	-20.45	4.35	-1.56
3	-11.93	5.18	-64.22	-7.70	-5.20	10.88	0.62
4	25.78	0.39	-26.14	-16.70	-7.37	9.53	-0.75
5	8.77	3.44	-32.21	-15.35	-4.20	2.18	-1.62
6	-27.79	-2.34	-25.04	-18.30	-2.58	3.32	-4.89
7	-3.59	-3.77	-7.74	-9.76	1.39	0.05	-2.11
8	0.43	5.02	-15.49	-5.77	-1.03	-1.58	-0.62
9	0.47	-1.90	-8.22	-2.59	0.27	-0.29	-1.48
10	-0.61	2.98	-1.09	-3.86	0.19	-0.07	-1.51
11	1.21	4.49	-4.21	-0.51	-1.15	0.61	-1.55
12	6.03	-1.11	-0.40	-11.51	-1.89	-0.79	-0.17
13	5.36	3.97	-5.58	-4.97	-0.10	-0.09	-1.16
14	2.98	1.15	-2.35	-3.96	-0.74	2.25	-2.39
15	-0.64	1.24	0.24	-2.72	-1.15	-0.14	-0.79
16	-2.08	0.39	-4.27	-4.04	-0.80	-1.17	-0.24
17	17.01	-8.94	-46.53	21.88	-36.20	3.46	-2.24
18	-17.49	-1.31	-53.55	-3.36	-12.34	2.21	0.02
19	-9.66	-43.99	-51.55	-28.52	-18.02	6.71	0.11
20	-24.09	-44.36	-76.90	-35.89	-6.33	7.35	5.42
21	-18.41	-7.50	-22.64	-17.63	-0.90	0.76	-1.93
22	8.96	-5.19	-17.91	-8.93	-2.36	-0.65	0.93
23	-35.47	-11.52	-24.53	-8.62	-1.62	-2.48	-0.95
24	-81.34	-32.79	-29.14	-1.64	-2.94	0.40	1.55
25	-80.45	-39.82	-42.04	-1.05	-2.07	-1.91	-0.84
26	-77.46	-18.01	-14.32	-4.05	0.45	-0.98	-0.14
27	-37.70	-8.16	-37.74	-6.57	-2.14	0.37	0.12
28	-55.75	-11.70	-40.83	-39.52	-9.06	-1.46	-0.07
29	-76.93	-4.72	-17.80	-12.65	-9.80	3.08	1.89
30	-48.75	31.20	-37.94	-0.10	-1.39	-1.35	-2.13
31	-19.17	-8.16	-20.31	-8.87	-1.86	5.56	0.69
32	-38.07	-	-	-8.35	-9.33	11.92	-2.31
33	-49.77	-	-	-0.20	-6.86	-0.06	-4.70
34	-	-	-	-12.61	-2.60	1.58	-2.16
35	-	-	-	-28.13	0.83	1.26	-2.50

Tabella 12. Quantificazione delle variazioni della larghezza media del canale attivo alla scala di tratto (espressa in percentuale).

Id tratto	$\Delta$ larghezza 1954-1969	$\Delta$ larghezza 1969-1976	$\Delta$ larghezza 1976-1996	$\Delta$ larghezza 1996-2008	$\Delta$ larghezza 2008-2011	$\Delta$ larghezza 2011-2014	$\Delta$ larghezza 2014-2016
1	-43	8	-6	-49	6	-1	-15
2	38	-11	-26	-10	-51	22	-6
3	-12	6	-67	-24	-22	58	2
4	59	1	-37	-38	-27	49	-3
5	15	5	-47	-42	-19	13	-8
6	-29	-3	-38	-44	-11	16	-21
7	-9	-10	-22	-36	8	0	-11
8	1	14	-38	-23	-5	-9	-4
9	2	-7	-35	-17	2	-2	-12
10	-3	15	-5	-18	1	0	-8
11	6	19	-15	-2	-5	3	-7
12	23	-3	-1	-38	-10	-5	-1
13	29	16	-20	-22	-1	-1	-7
14	17	6	-11	-20	-5	15	-14
15	-3	7	1	-13	-7	-1	-5
16	-8	2	-18	-20	-5	-8	-2
17	21	-9	-52	50	-55	12	-7
18	-16	-1	-58	-9	-35	10	0
19	-5	-23	-35	-30	-27	14	0
20	-11	-22	-50	-47	-16	22	13
21	-21	-11	-37	-45	-4	4	-9
22	17	-8	-31	-23	-8	-2	3
23	-33	-16	-42	-25	-6	-10	-4
24	-49	-38	-55	-7	-13	2	8
25	-44	-39	-68	-5	-11	-11	-6
26	-60	-35	-43	-21	3	-6	-1
27	-35	-11	-60	-26	-11	2	1
28	-31	-9	-36	-55	-28	-6	0
29	-48	-6	-23	-21	-21	8	5
30	-66	124	-67	-1	-8	-8	-14
31	-21	-11	-32	-20	-5	17	2
32	-28	-	-	-16	-21	34	-5
33	-48	-	-	-1	-18	0	-15
34	-	-	-	-36	-11	8	-10
35	-	-	-	-71	7	10	-19

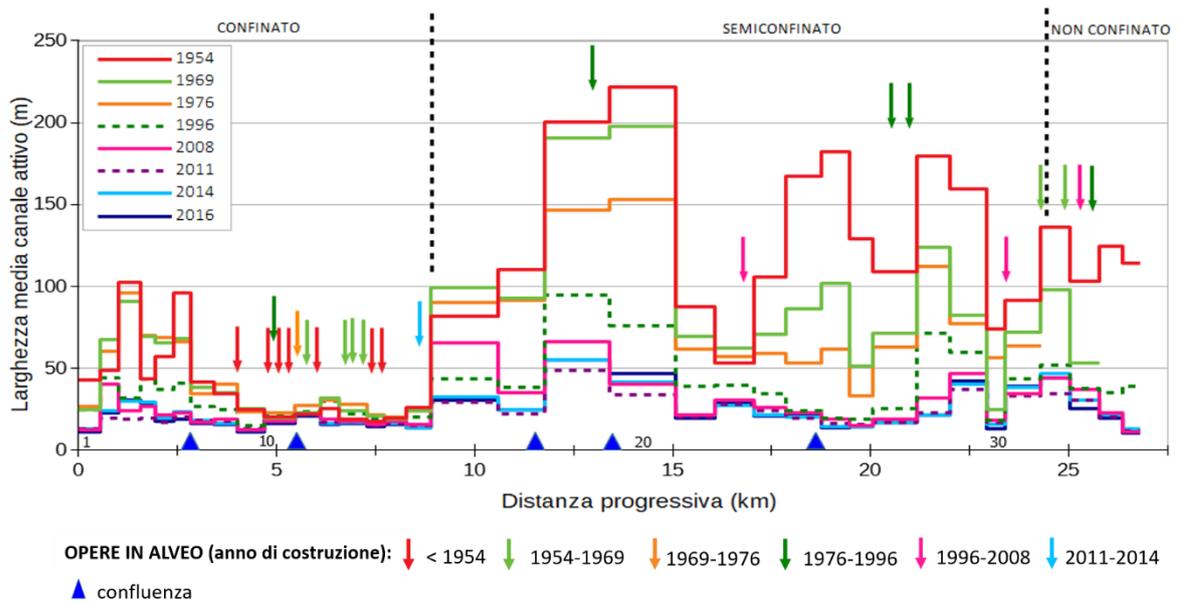


Figura 48. Rappresentazione della larghezza media del canale attivo del Fiume Sillaro alla scala di tratto tra il 1954 e il 2016, completa di opere in alveo e confluenze.

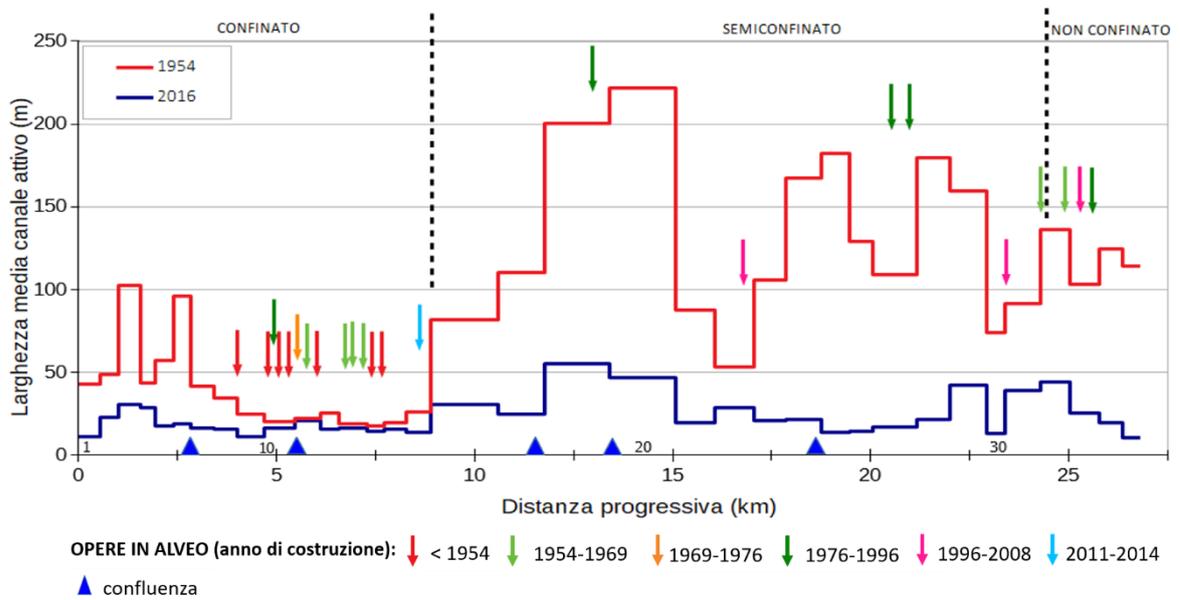
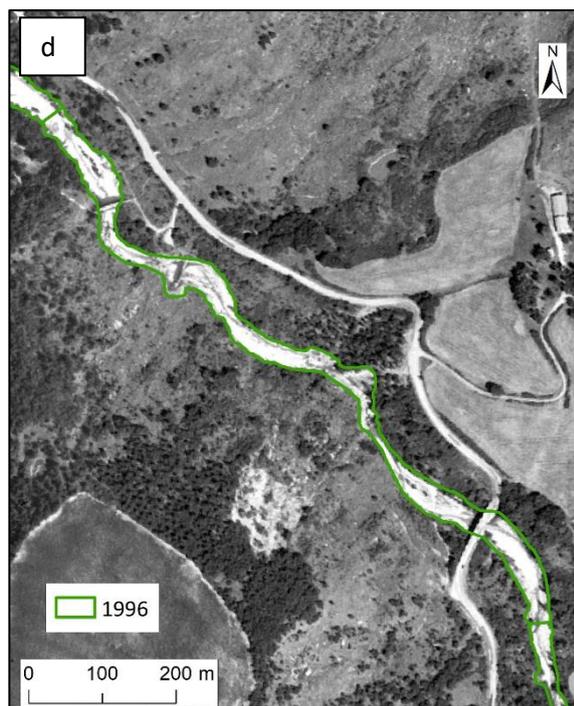
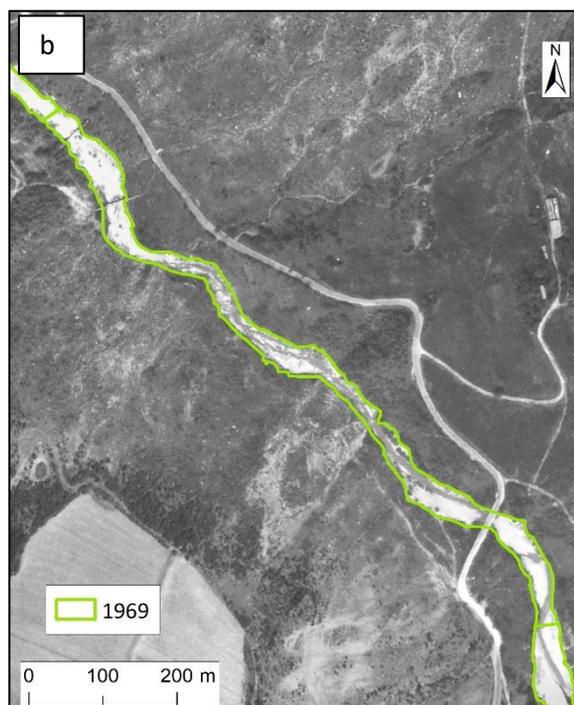
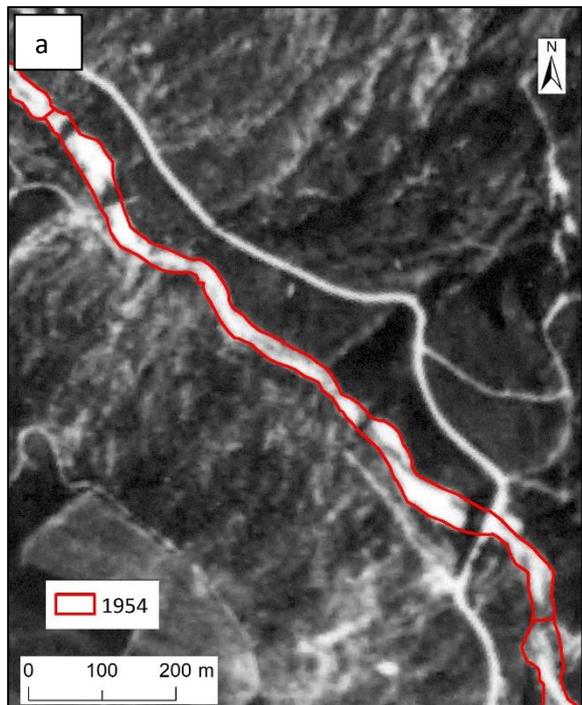


Figura 49. Larghezza media del canale attivo alla scala di tratto negli anni 1954 e 2016.

ALLEGATO 2: esempi rappresentativi dei trend evolutivi

Tratto 10



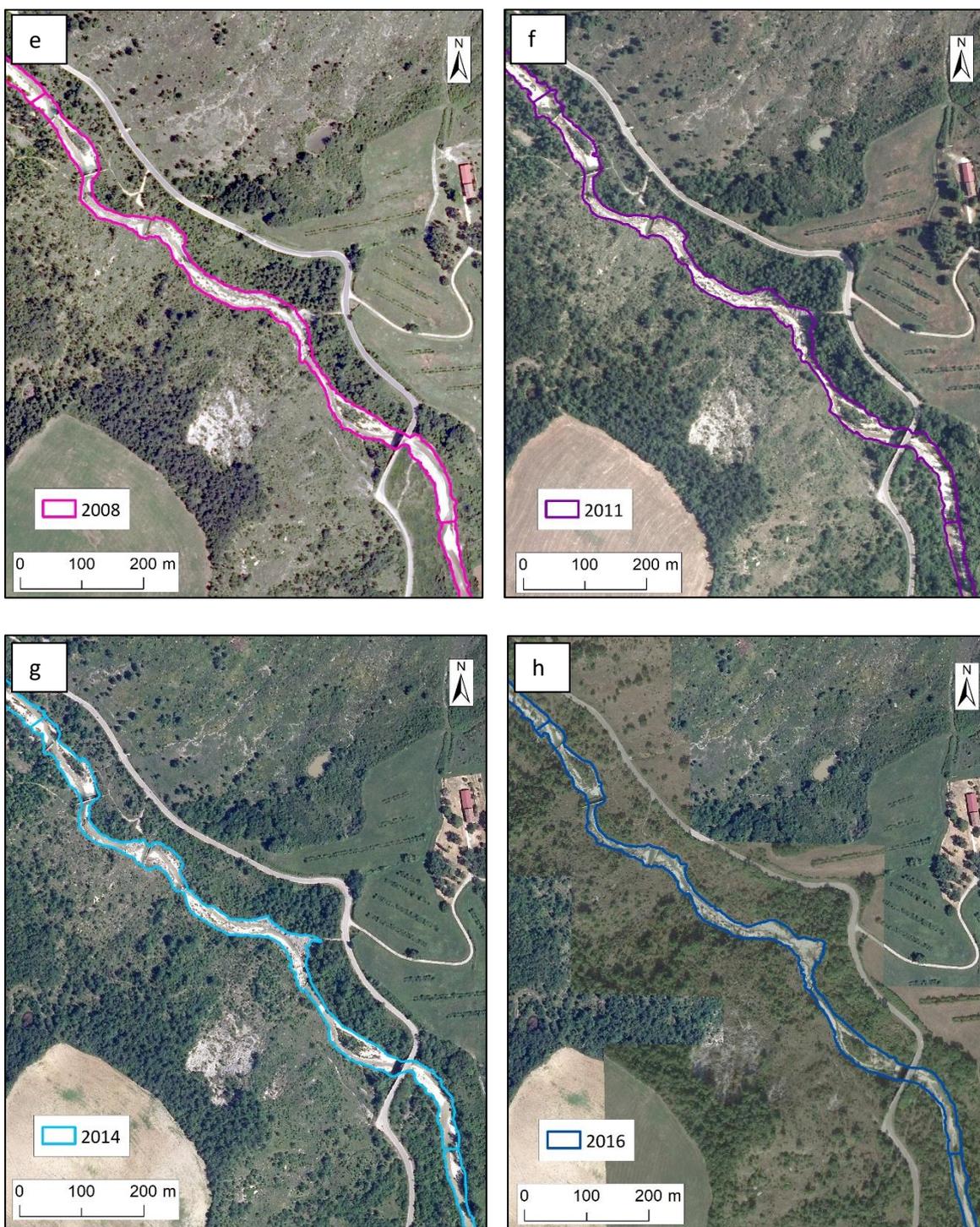
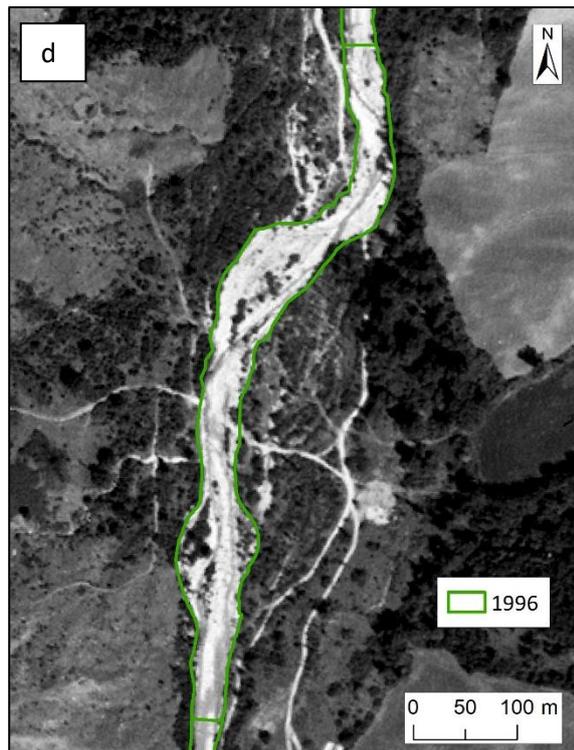
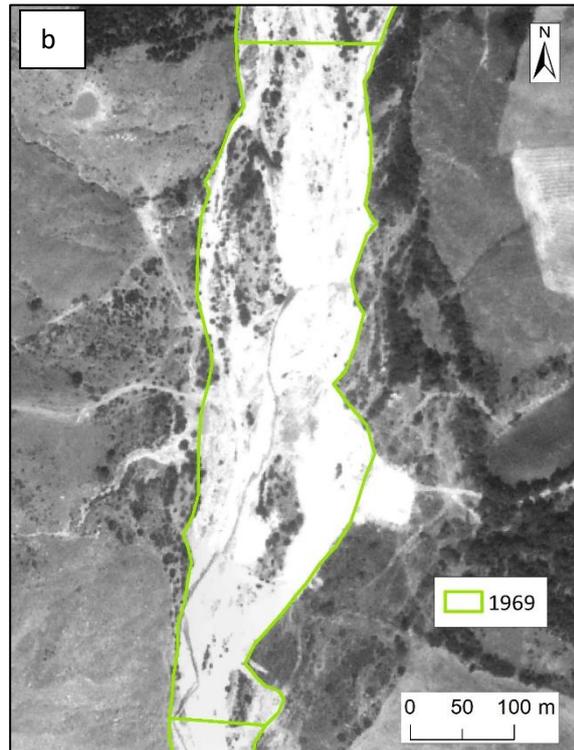
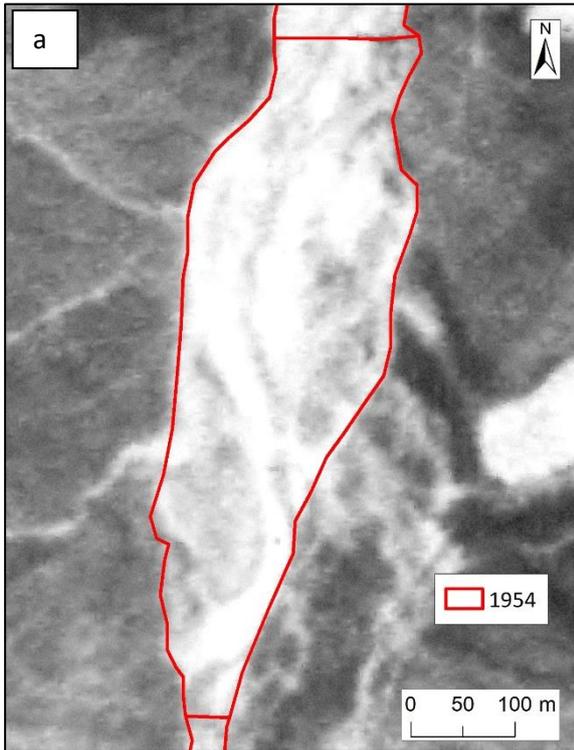


Figura 50. Evoluzione del canale attivo del tratto 10 negli anni 1954 (a), 1969 (b), 1976 (c), 1996 (d), 2008 (e), 2011 (f), 2014 (g) e 2016 (h).

Tratto 3



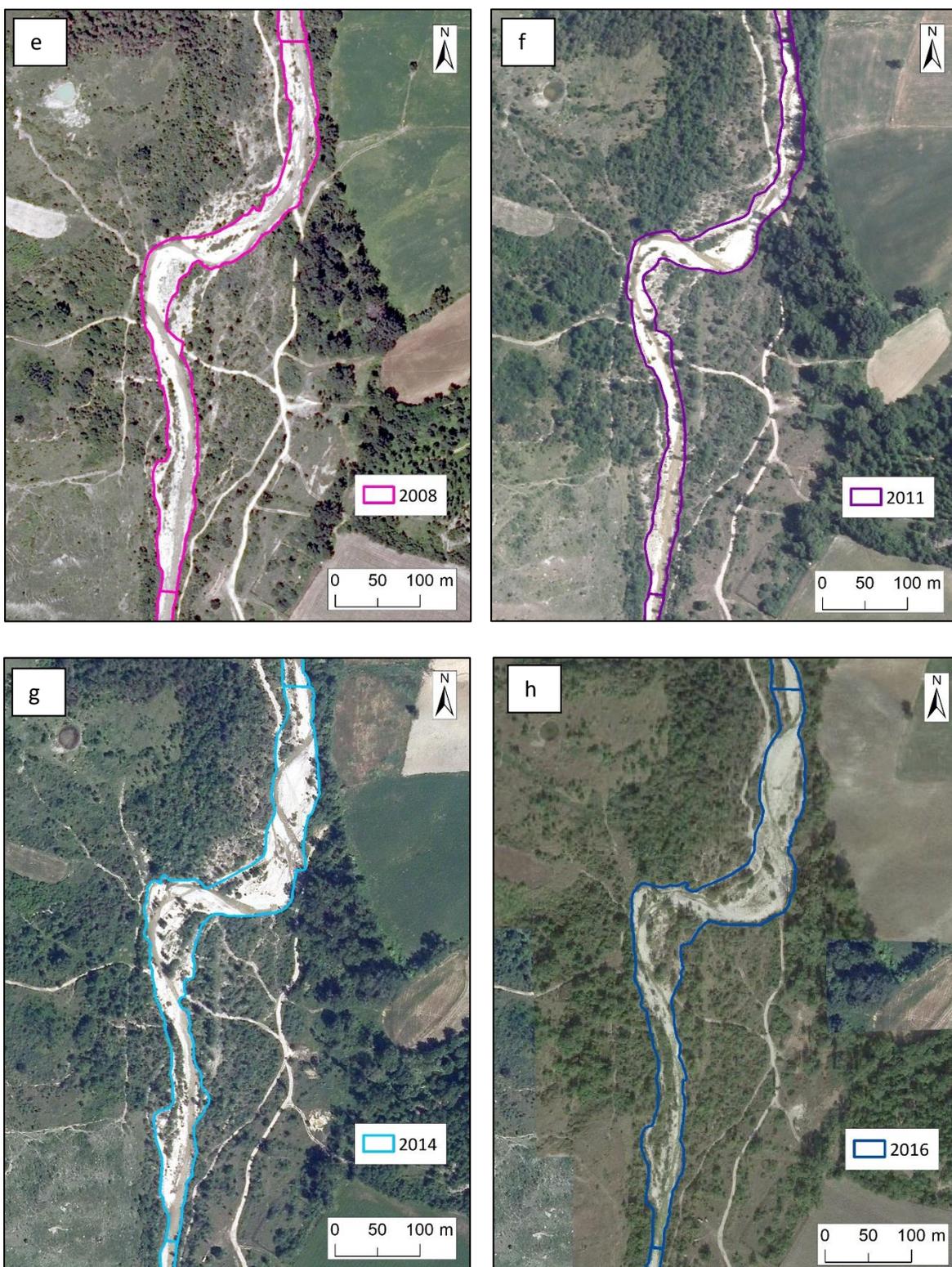
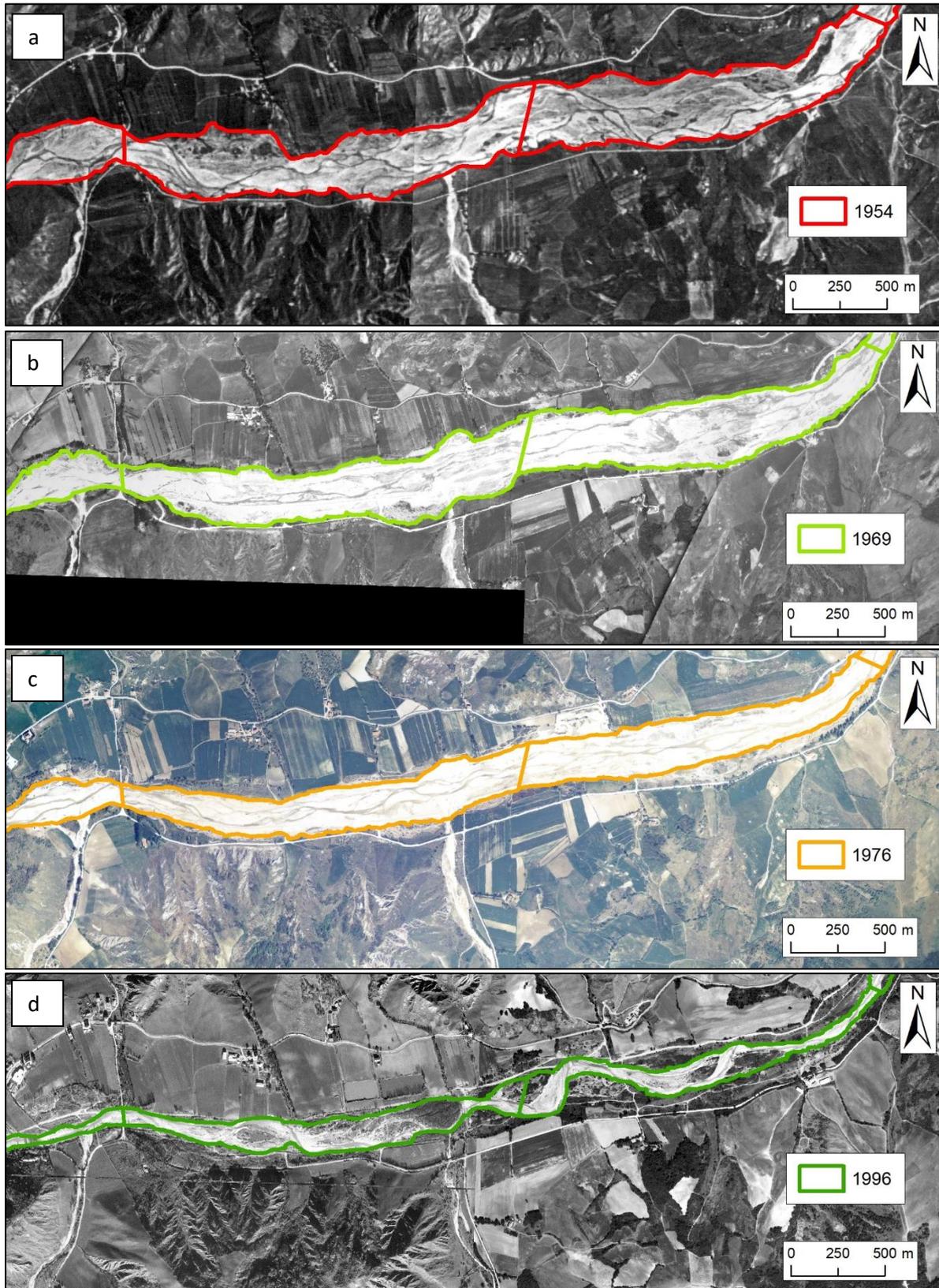


Figura 51. Evoluzione del canale attivo del tratto 3 negli anni 1954 (a), 1969 (b), 1976 (c), 1996 (d), 2008 (e), 2011 (f), 2014 (g) e 2016 (h).



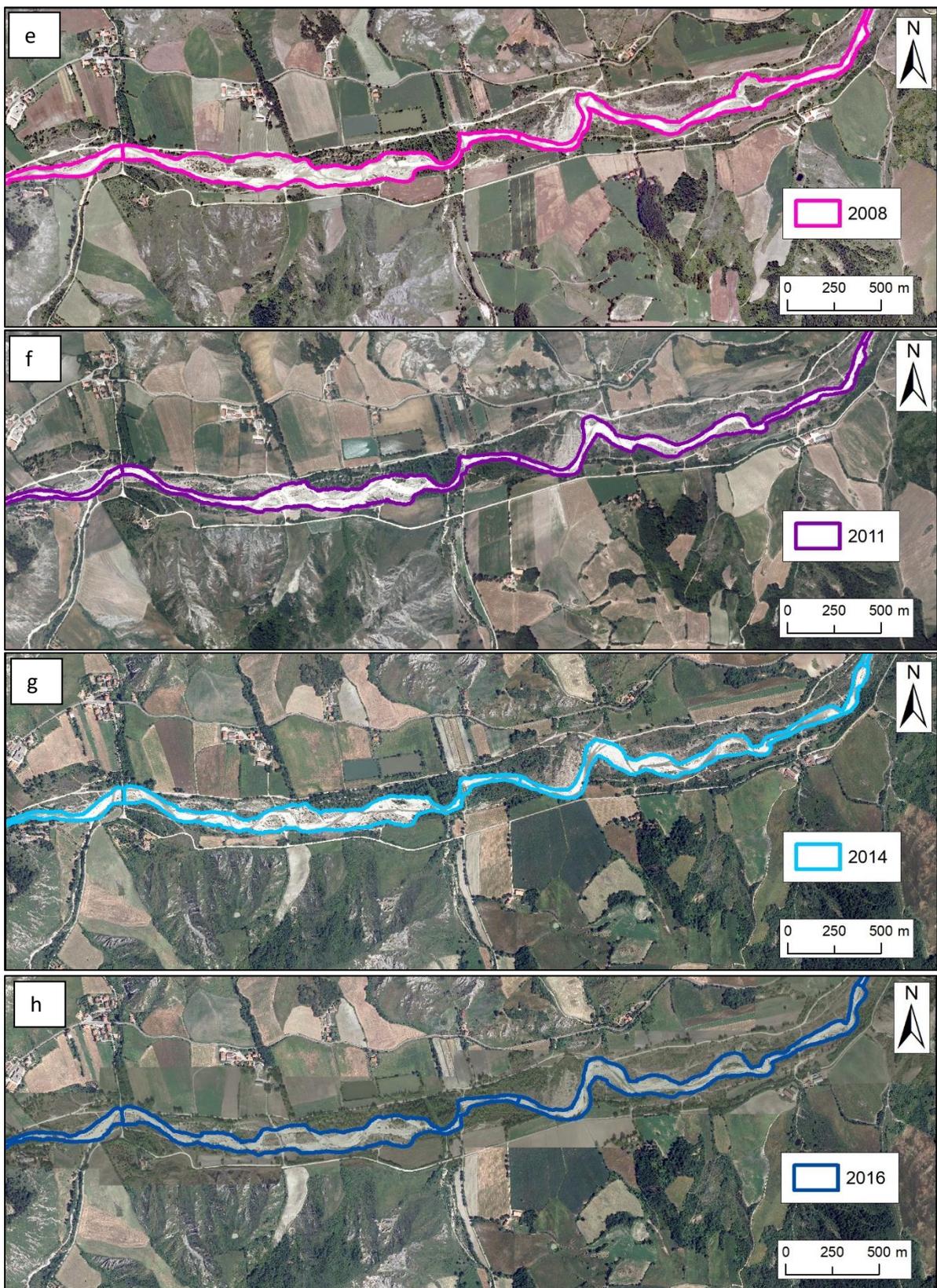
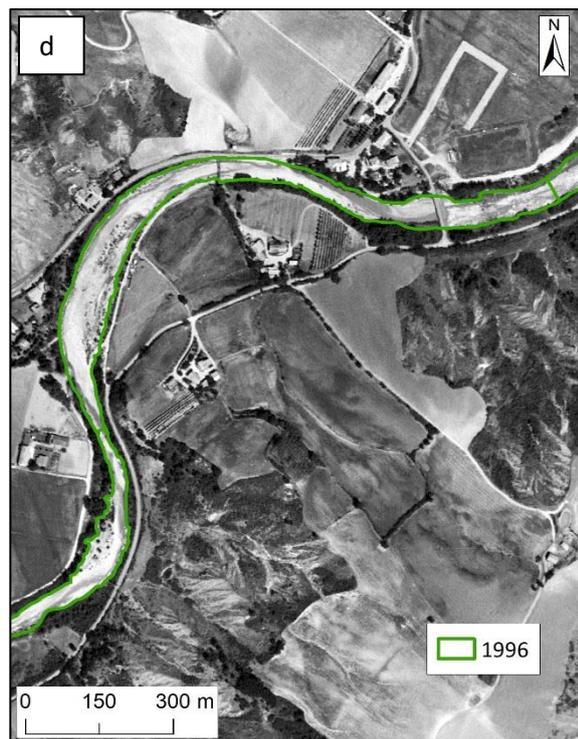
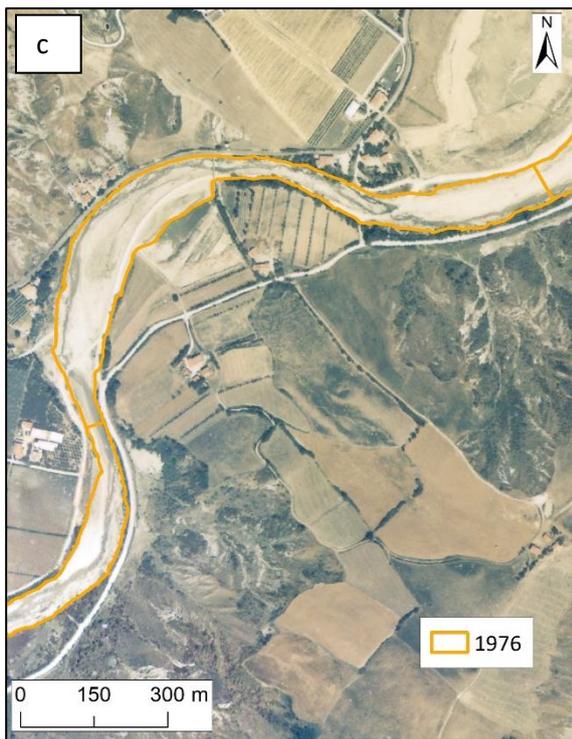
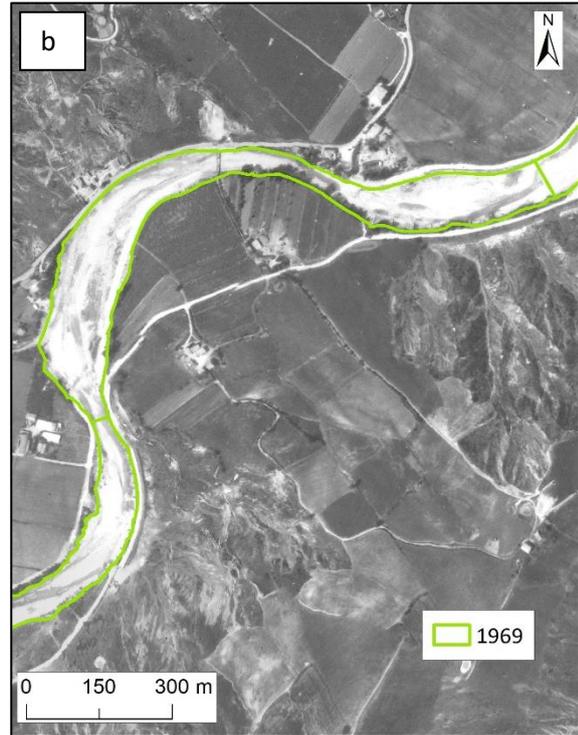
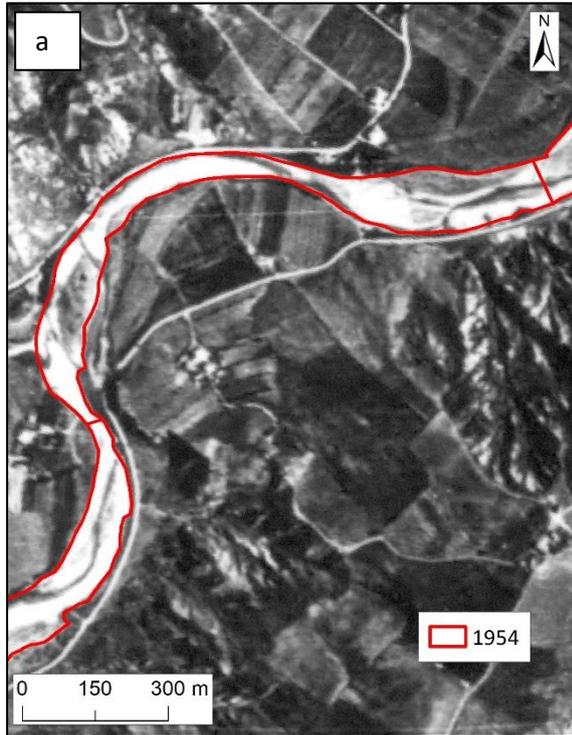


Figura 52. Evoluzione del canale attivo dei tratti 19 e 20 negli anni 1954 (a), 1969 (b), 1976 (c), 1996 (d), 2008 (e), 2011 (f), 2014 (g) e 2016 (h).

Tratto 22



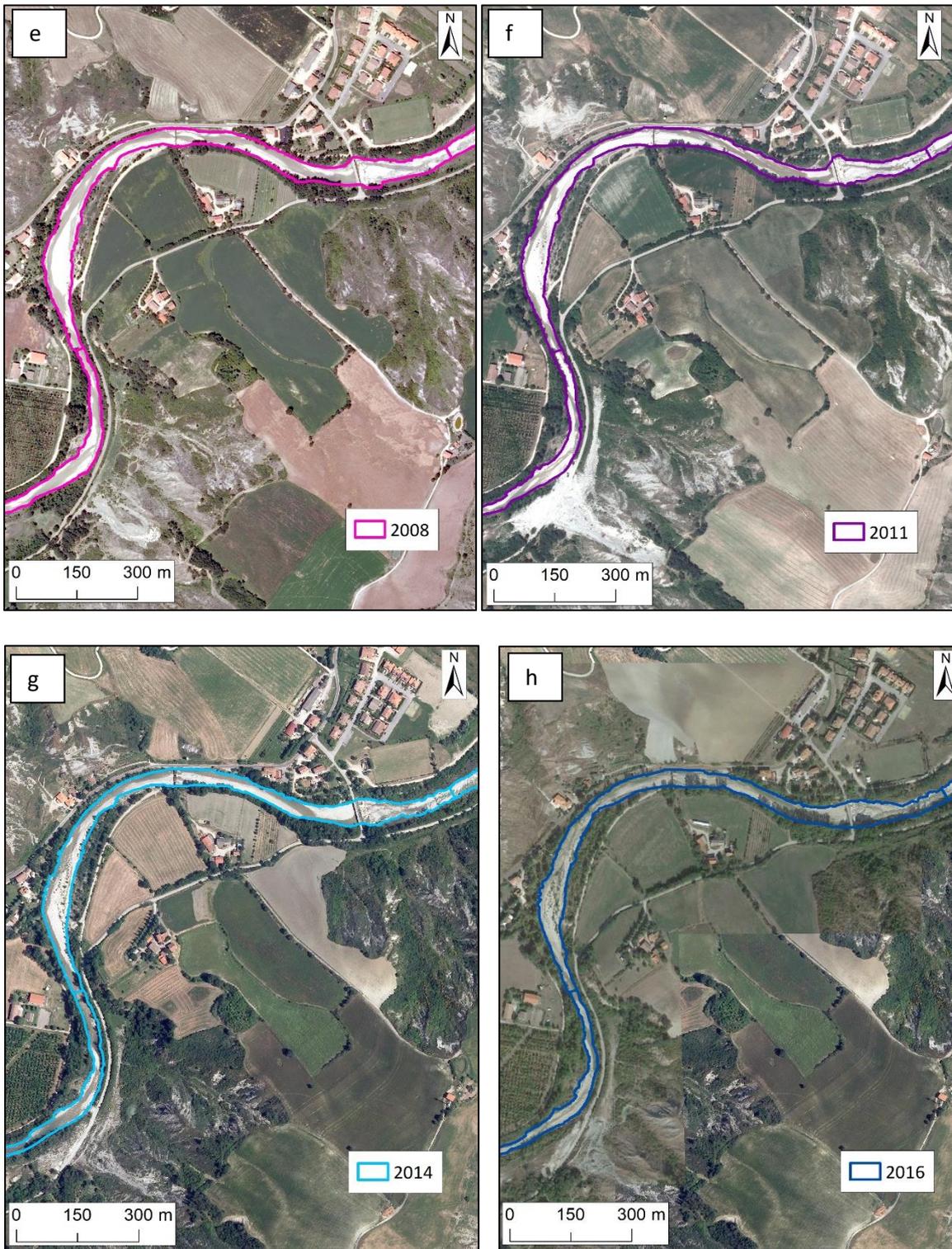


Figura 53. Evoluzione del canale attivo del tratto 22 negli anni 1954 (a), 1969 (b), 1976 (c), 1996 (d), 2008 (e), 2011 (f), 2014 (g) e 2016 (h).

### ALLEGATO 3: analisi delle incertezze associate alla mappatura da remoto del canale attivo

Tabella 13. Larghezza trasversale dei transetti nei tratti A e B, misurati in campo e da remoto, e calcolo della differenza tra i due valori (remoto-campo). Le misure sono espresse in metri.

TRATTO A				TRATTO B			
Id sottotratto	Misura di campo (m)	Misura da remoto (m)	Differenza (m)	Id sottotratto	Misura di campo (m)	Misura da remoto (m)	Differenza (m)
1	19.46	20.97	1.51	1	34.13	33.43	-0.70
2	19.64	18.64	-0.99	2	31.81	32.97	1.16
3	19.57	20.16	0.59	3	30.92	30.95	0.03
4	22.40	22.66	0.27	4	28.96	27.78	-1.18
5	22.10	23.20	1.09	5	31.67	32.52	0.85
6	20.34	19.27	-1.07	6	31.40	30.24	-1.16
7	18.01	19.20	1.19	7	31.77	30.68	-1.08
8	18.38	18.58	0.20	8	29.48	27.92	-1.56
9	14.09	13.20	-0.88	9	28.86	29.13	0.27
10	11.35	11.70	0.35	10	34.88	33.19	-1.69
11	9.88	10.21	0.34	11	36.09	35.43	-0.66
12	7.75	7.51	-0.23	12	37.27	38.28	1.01
13	6.91	8.41	1.50	13	41.45	39.76	-1.69
14	7.79	6.24	-1.55	14	43.41	41.98	-1.42
15	8.01	6.94	-1.06	15	42.51	43.81	1.30
16	8.78	7.79	-0.99	16	43.86	43.74	-0.12
17	9.71	7.96	-1.76	17	38.87	40.20	1.33
18	9.31	8.98	-0.33	18	34.89	35.78	0.90
19	8.59	7.30	-1.29	19	28.75	30.83	2.08
20	8.12	8.12	0.00	20	26.65	25.04	-1.61
21	9.22	10.12	0.90	21	21.59	22.90	1.31
22	8.91	10.50	1.60	22	28.50	30.06	1.56
23	9.65	9.50	-0.15	23	42.97	42.66	-0.31
24	9.25	9.11	-0.14	24	44.21	43.43	-0.78
25	8.83	8.54	-0.29	25	47.40	46.88	-0.52
26	9.32	8.91	-0.41	26	50.80	53.00	2.21
27	9.46	9.67	0.21	27	54.98	56.30	1.31
28	11.00	11.67	0.68	28	55.88	53.81	-2.07
29	19.54	19.20	-0.34	29	53.96	53.85	-0.11
30	20.76	21.06	0.29	30	56.72	56.12	-0.60

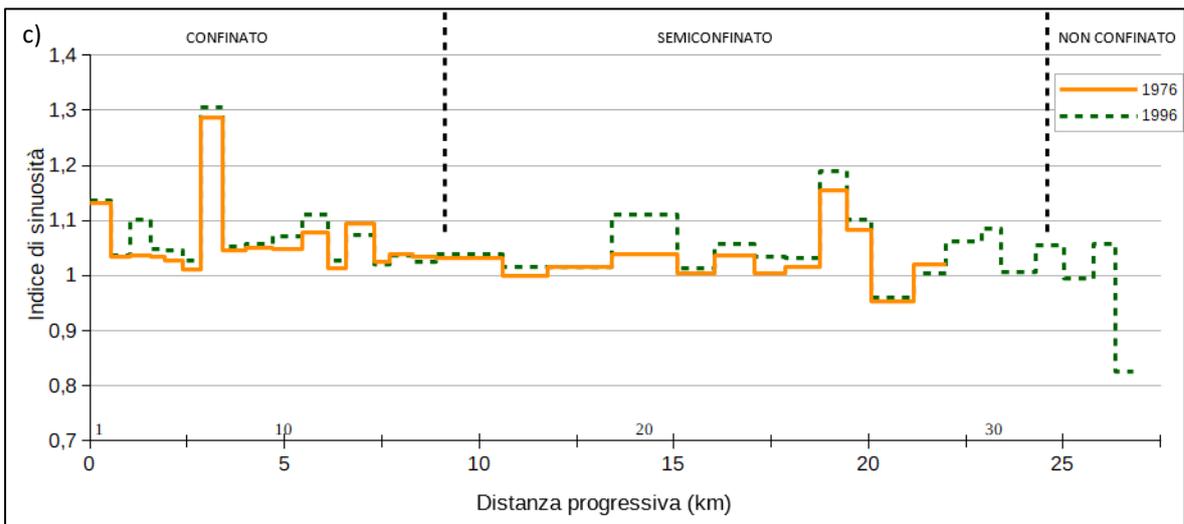
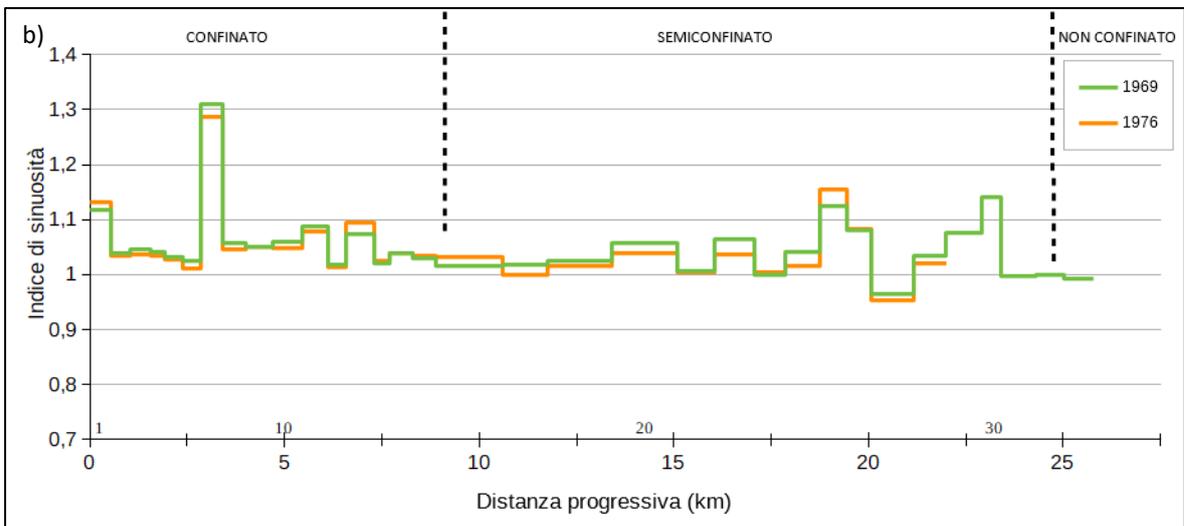
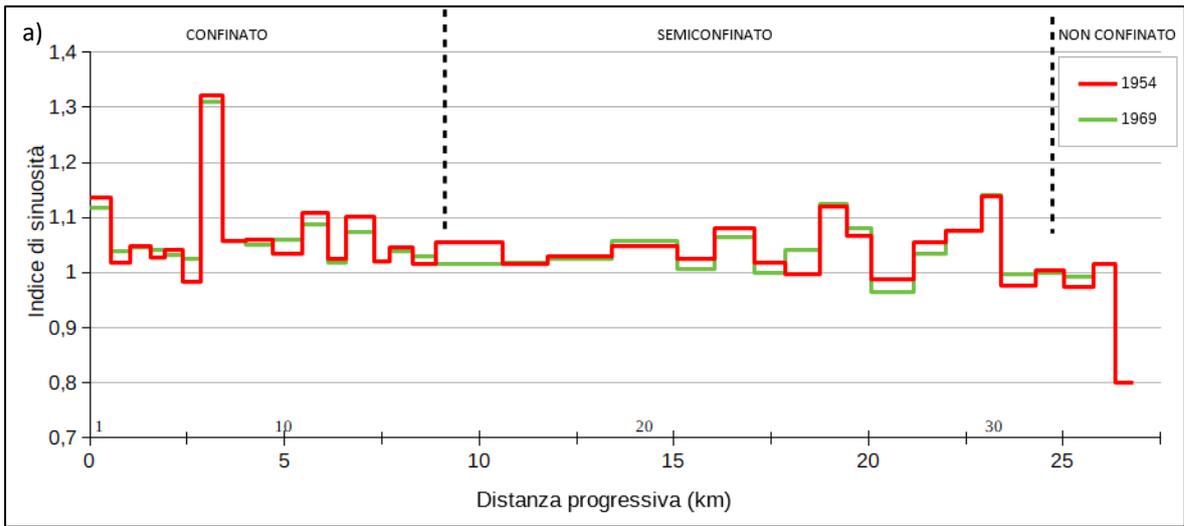
#### ALLEGATO 4: indice di sinuosità

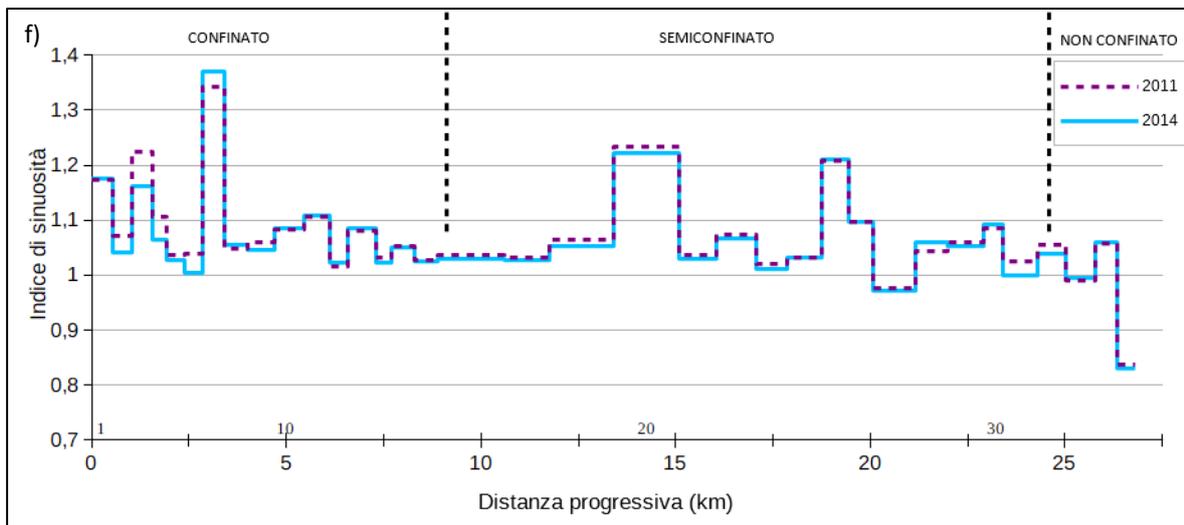
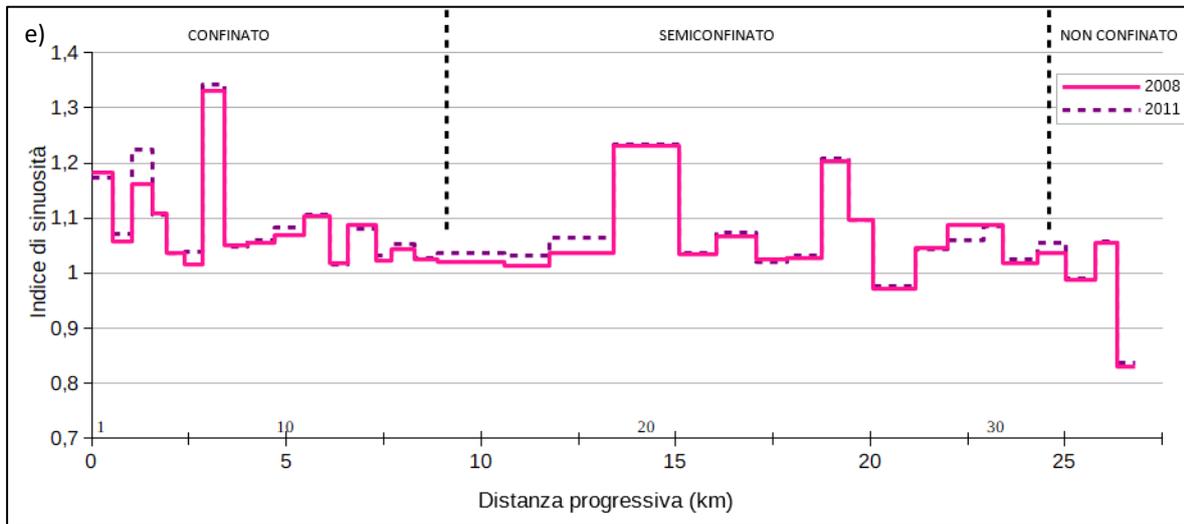
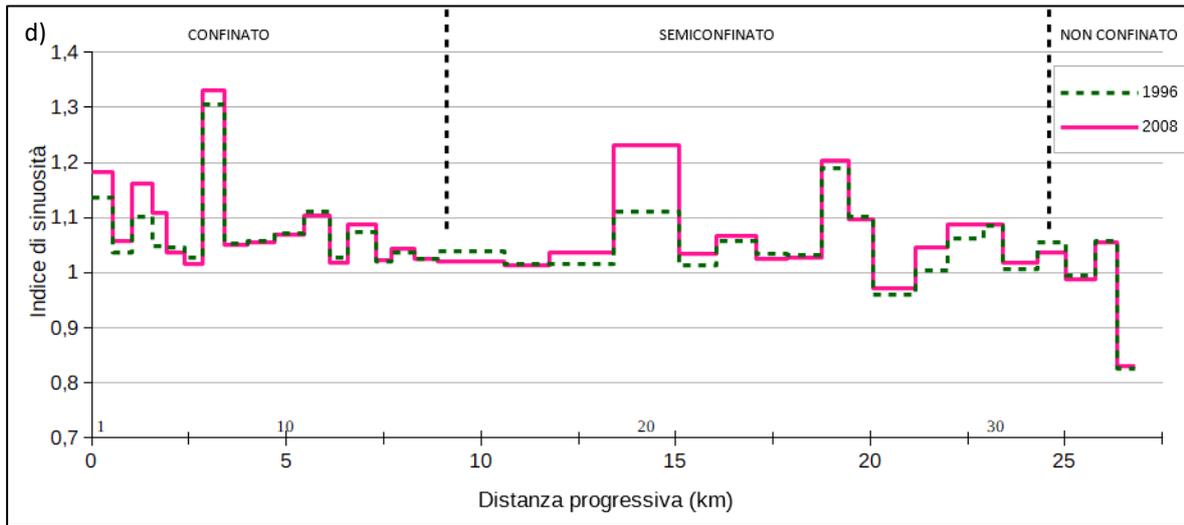
Tabella 14. Indice di sinuosità (Is).

<b>Id tratto</b>	<b>Is 1954</b>	<b>Is 1969</b>	<b>Is 1976</b>	<b>Is 1996</b>	<b>Is 2008</b>	<b>Is 2011</b>	<b>Is 2014</b>	<b>Is 2016</b>
1	1.14	1.12	1.13	1.14	1.18	1.17	1.18	1.19
2	1.02	1.04	1.03	1.04	1.06	1.07	1.04	1.05
3	1.05	1.05	1.04	1.10	1.16	1.22	1.16	1.14
4	1.03	1.04	1.03	1.05	1.11	1.11	1.06	1.04
5	1.04	1.03	1.03	1.05	1.04	1.04	1.03	1.02
6	0.98	1.03	1.01	1.03	1.02	1.04	1.00	1.05
7	1.32	1.31	1.29	1.31	1.33	1.34	1.37	1.36
8	1.06	1.06	1.05	1.05	1.05	1.05	1.06	1.05
9	1.06	1.05	1.05	1.06	1.06	1.06	1.05	1.06
10	1.03	1.06	1.05	1.07	1.07	1.08	1.09	1.08
11	1.11	1.09	1.08	1.11	1.10	1.11	1.11	1.10
12	1.03	1.02	1.01	1.03	1.02	1.02	1.02	1.02
13	1.10	1.07	1.09	1.07	1.09	1.08	1.08	1.06
14	1.02	1.02	1.03	1.02	1.02	1.03	1.02	1.03
15	1.05	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05	1.05	1.05
16	1.02	1.03	1.03	1.02	1.03	1.03	1.03	1.02
17	1.05	1.02	1.03	1.04	1.02	1.04	1.03	1.03
18	1.02	1.02	1.00	1.02	1.01	1.03	1.03	1.03
19	1.03	1.02	1.02	1.02	1.04	1.06	1.05	1.07
20	1.05	1.06	1.04	1.11	1.23	1.23	1.22	1.22
21	1.03	1.01	1.00	1.01	1.03	1.04	1.03	1.03
22	1.08	1.07	1.04	1.06	1.07	1.07	1.07	1.05
23	1.02	1.00	1.00	1.03	1.03	1.02	1.01	1.01
24	1.00	1.04	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	1.02
25	1.12	1.13	1.16	1.19	1.20	1.21	1.21	1.20
26	1.07	1.08	1.08	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
27	0.99	0.97	0.95	0.96	0.97	0.98	0.97	0.97
28	1.06	1.03	1.02	1.00	1.05	1.04	1.06	1.04
29	1.08	1.08	1.05	1.06	1.09	1.06	1.05	1.07
30	1.14	1.14	1.12	1.09	1.09	1.09	1.09	1.11
31	0.98	1.00	1.00	1.01	1.02	1.03	1.00	1.07
32	1.01	1.00	-	1.05	1.04	1.06	1.04	1.03
33	0.97	0.99	-	0.99	0.99	0.99	1.00	0.99
34	1.02	-	-	1.06	1.06	1.06	1.06	1.07
35	0.80	-	-	0.83	0.83	0.84	0.83	0.83

Tabella 15. Variazioni dell'indice di sinuosità ( $\Delta Is$ ).

<b>Id tratto</b>	<b><math>\Delta Is</math> 1954-1969</b>	<b><math>\Delta Is</math> 1969-1976</b>	<b><math>\Delta Is</math> 1976-1996</b>	<b><math>\Delta Is</math> 1996-2008</b>	<b><math>\Delta Is</math> 2008-2011</b>	<b><math>\Delta Is</math> 2011-2014</b>	<b><math>\Delta Is</math> 2014-2016</b>
1	-0.02	0.01	0.00	0.05	-0.01	0.00	0.01
2	0.02	-0.01	0.00	0.02	0.01	-0.03	0.01
3	0.00	-0.01	0.06	0.06	0.06	-0.06	-0.02
4	0.01	-0.01	0.01	0.06	0.00	-0.04	-0.02
5	-0.01	-0.01	0.02	-0.01	0.00	-0.01	0.00
6	0.04	-0.02	0.02	-0.01	0.02	-0.04	0.05
7	-0.01	-0.02	0.02	0.03	0.01	0.03	-0.01
8	0.00	-0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	-0.01
9	-0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	-0.01	0.01
10	0.03	-0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	-0.01
11	-0.02	-0.01	0.03	-0.01	0.00	0.00	-0.01
12	-0.01	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.01	0.00
13	-0.03	0.02	-0.02	0.01	-0.01	0.00	-0.03
14	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.01	-0.01	0.01
15	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
16	0.01	0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
17	-0.04	0.02	0.01	-0.02	0.01	-0.01	0.00
18	0.00	-0.02	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00
19	-0.01	-0.01	0.00	0.02	0.03	-0.01	0.02
20	0.01	-0.02	0.07	0.12	0.00	-0.01	0.00
21	-0.02	0.00	0.01	0.02	0.00	-0.01	0.00
22	-0.02	-0.03	0.02	0.01	0.01	-0.01	-0.01
23	-0.02	0.01	0.03	-0.01	-0.01	-0.01	0.00
24	0.04	-0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	-0.01
25	0.00	0.03	0.03	0.01	0.01	0.00	-0.01
26	0.02	0.00	0.02	-0.01	0.00	0.00	0.00
27	-0.02	-0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
28	-0.02	-0.01	-0.02	0.04	0.00	0.01	-0.02
29	0.00	-0.03	0.01	0.02	-0.03	-0.01	0.02
30	0.00	-0.02	-0.03	0.00	0.00	0.01	0.02
31	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	-0.03	0.07
32	0.00	-	-	-0.02	0.02	-0.02	0.00
33	0.02	-	-	-0.01	0.00	0.01	-0.01
34	-	-	-	0.00	0.00	0.00	0.01
35	-	-	-	0.01	0.01	-0.01	0.00





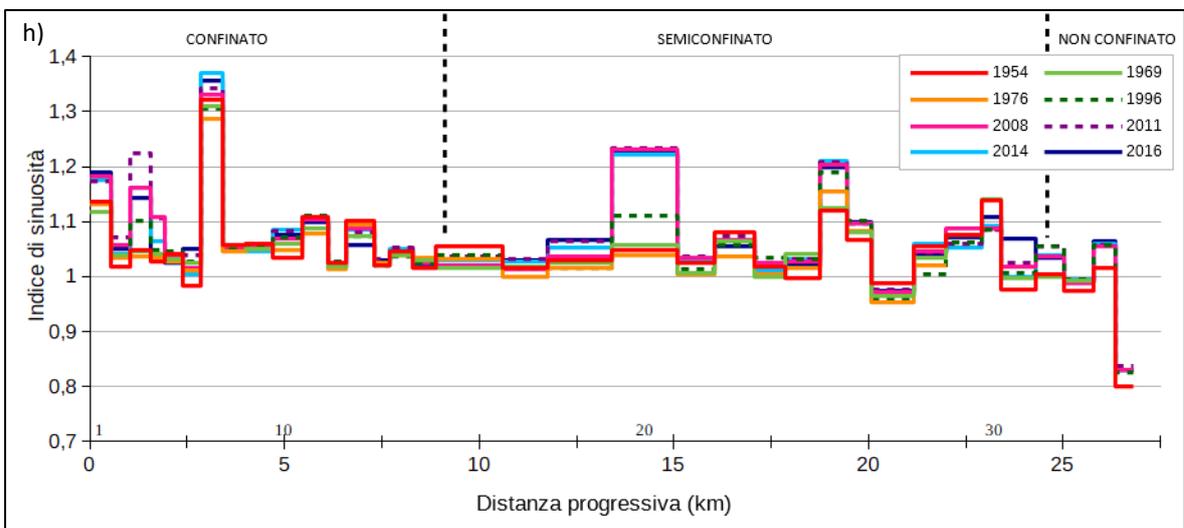
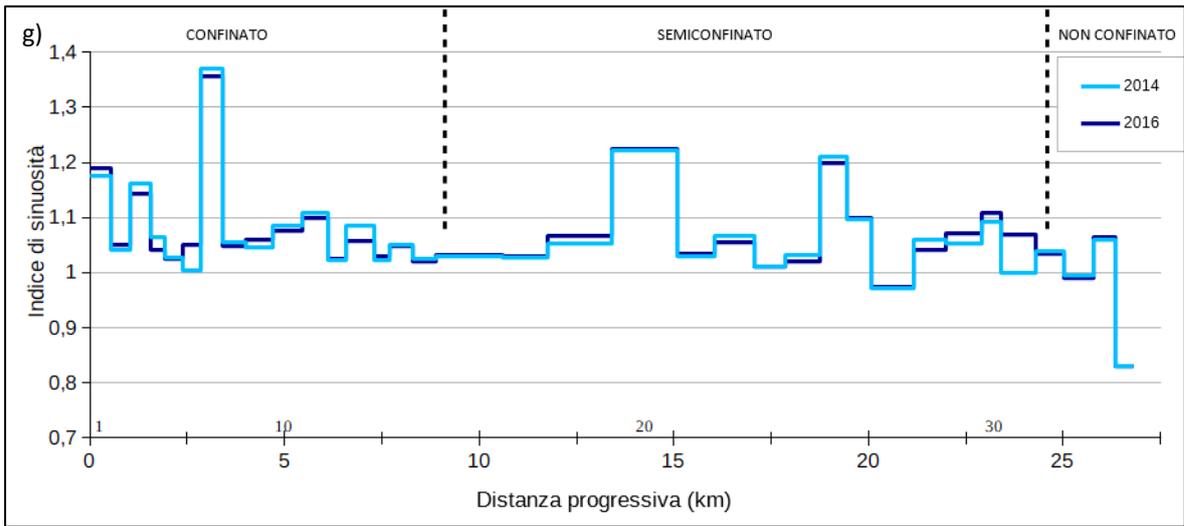


Figura 54. Indice di sinuosità, confronto tra 1954 e 1969 (a), 1969 e 1976 (b), 1976 e 1996 (c), 1996 e 2008 (d), 2008 e 2011 (e), 2011 e 2014 (f), 2014 e 2016 (g), totale (h).

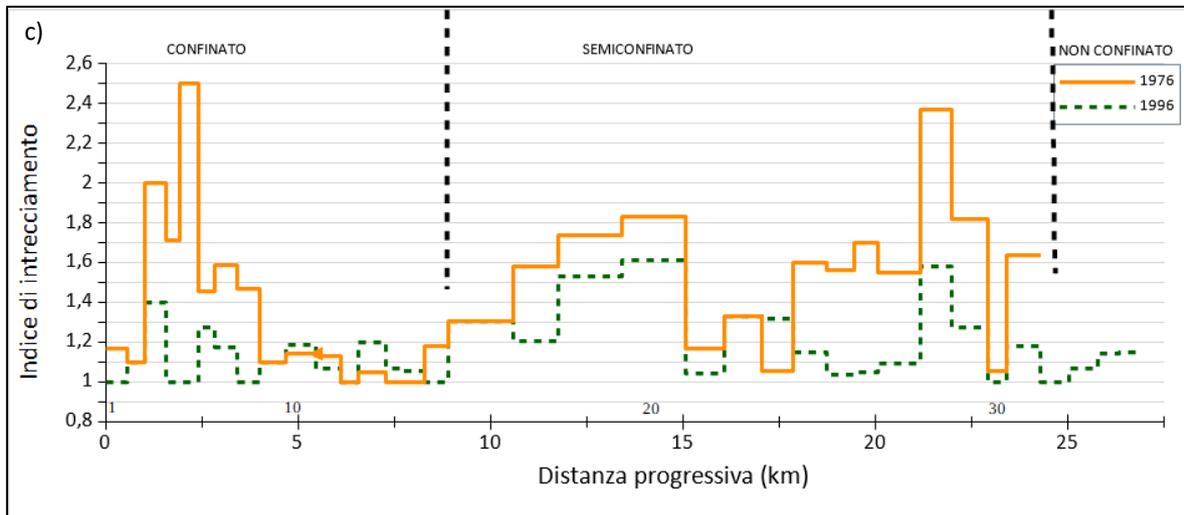
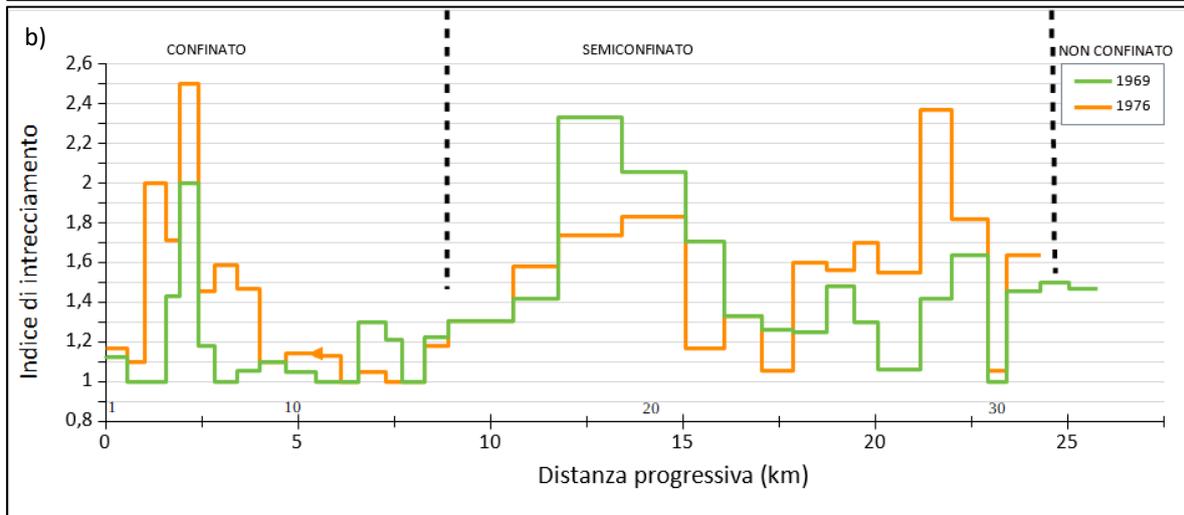
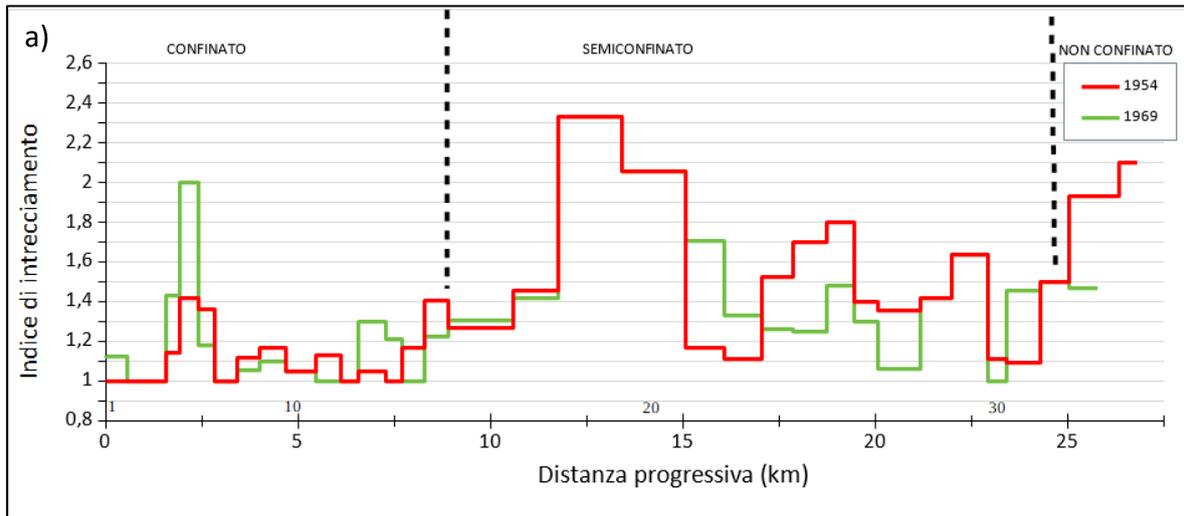
## ALLEGATO 5: indice di intrecciamento

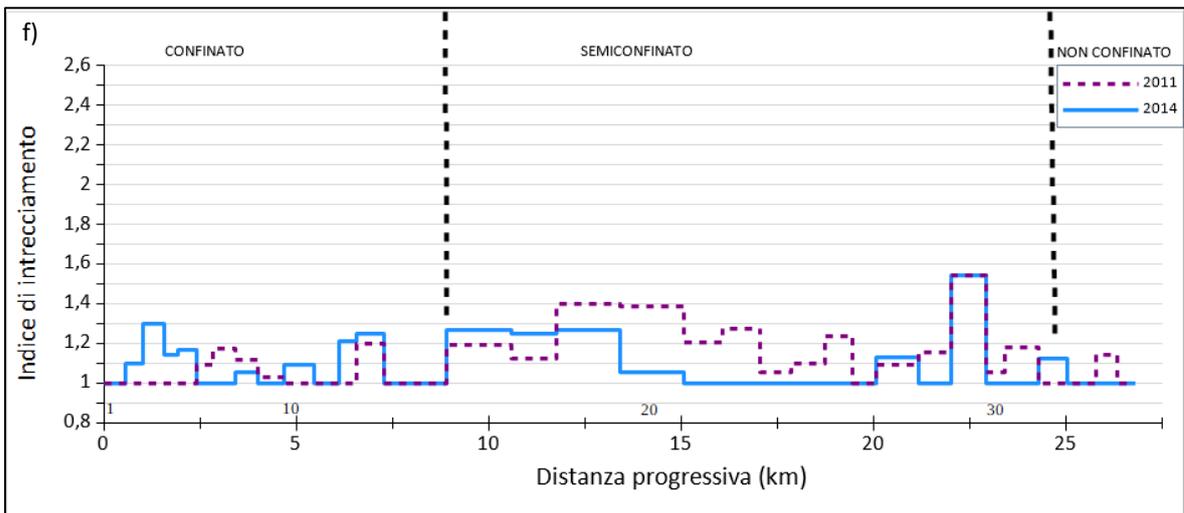
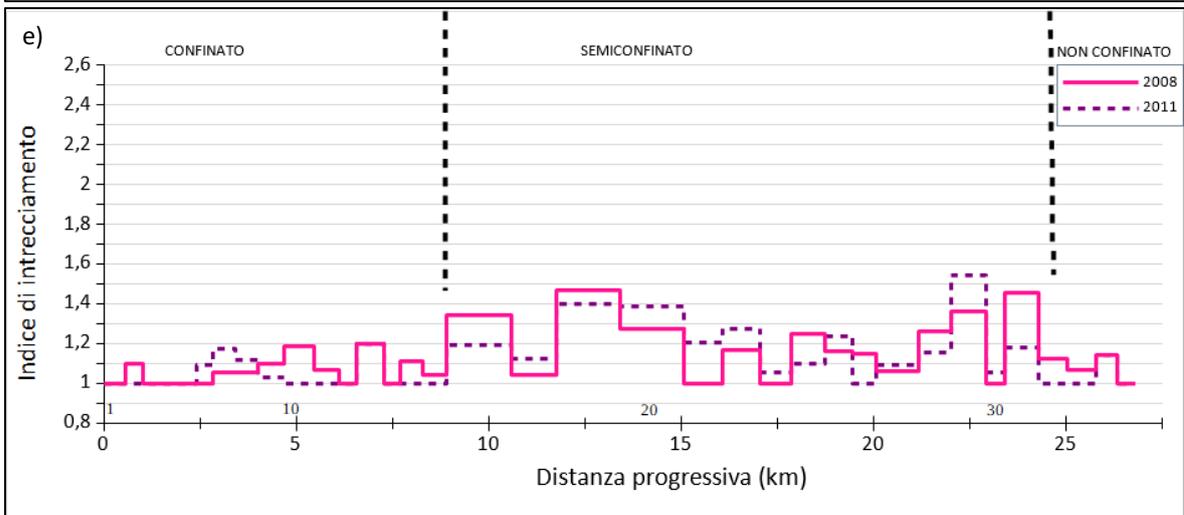
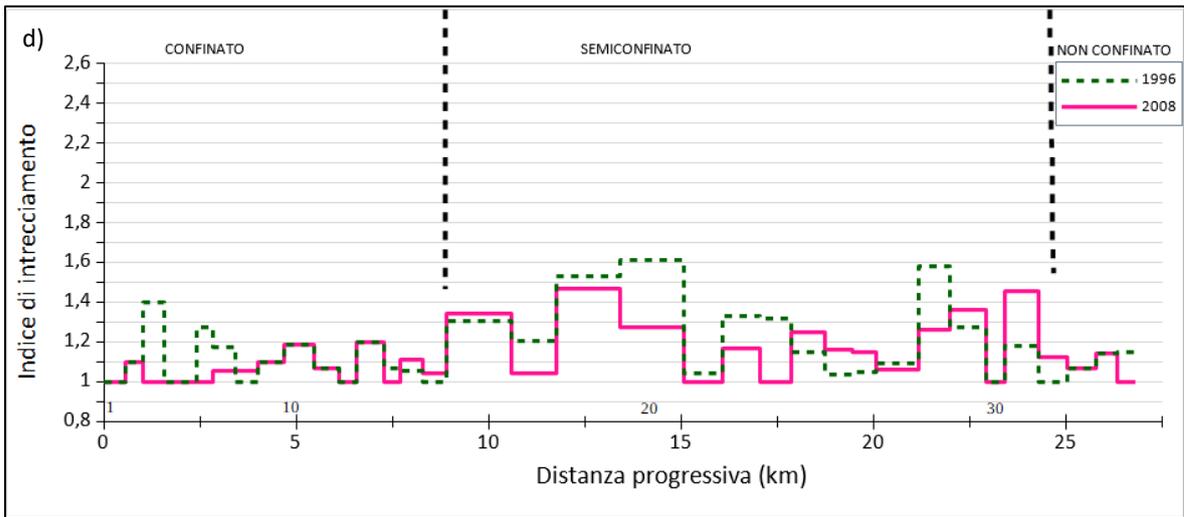
Tabella 16. Indice di intrecciamento (li).

<b>Id tratto</b>	<b>li 1954</b>	<b>li 1969</b>	<b>li 1976</b>	<b>li 1996</b>	<b>li 2008</b>	<b>li 2011</b>	<b>li 2014</b>	<b>li 2016</b>
1	1.00	1.13	1.17	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	1.00	1.00	1.10	1.10	1.10	1.00	1.10	1.00
3	1.00	1.00	2.00	1.40	1.00	1.00	1.30	1.10
4	1.14	1.43	1.71	1.00	1.00	1.00	1.14	1.14
5	1.42	2.00	2.50	1.00	1.00	1.00	1.17	1.00
6	1.36	1.18	1.45	1.27	1.00	1.09	1.00	1.00
7	1.00	1.00	1.59	1.18	1.06	1.18	1.00	1.00
8	1.12	1.06	1.47	1.00	1.06	1.12	1.06	1.00
9	1.17	1.10	1.10	1.10	1.10	1.03	1.00	1.00
10	1.05	1.05	1.14	1.19	1.19	1.00	1.10	1.10
11	1.13	1.00	1.13	1.07	1.07	1.00	1.00	1.07
12	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.21	1.00
13	1.05	1.30	1.05	1.20	1.20	1.20	1.25	1.15
14	1.00	1.21	1.00	1.07	1.00	1.00	1.00	1.00
15	1.17	1.00	1.00	1.06	1.11	1.00	1.00	1.00
16	1.41	1.23	1.18	1.00	1.05	1.00	1.00	1.00
17	1.27	1.31	1.31	1.31	1.35	1.19	1.27	1.15
18	1.46	1.42	1.58	1.21	1.04	1.13	1.25	1.08
19	2.33	2.33	1.74	1.53	1.47	1.40	1.27	1.13
20	2.06	2.06	1.83	1.61	1.28	1.39	1.06	1.28
21	1.17	1.71	1.17	1.04	1.00	1.21	1.00	1.00
22	1.11	1.33	1.33	1.33	1.17	1.28	1.00	1.00
23	1.53	1.26	1.05	1.32	1.00	1.05	1.00	1.00
24	1.70	1.25	1.60	1.15	1.25	1.10	1.00	1.00
25	1.80	1.48	1.56	1.04	1.16	1.24	1.00	1.00
26	1.40	1.30	1.70	1.05	1.15	1.00	1.00	1.00
27	1.35	1.06	1.55	1.10	1.06	1.10	1.13	1.00
28	1.42	1.42	2.37	1.58	1.26	1.16	1.00	1.00
29	1.64	1.64	1.82	1.27	1.36	1.55	1.55	1.18
30	1.11	1.00	1.06	1.00	1.00	1.06	1.00	1.00
31	1.09	1.45	1.64	1.18	1.45	1.18	1.00	1.18
32	1.50	1.50	-	1.00	1.13	1.00	1.13	1.13
33	1.93	1.47	-	1.07	1.07	1.00	1.00	1.00
34	1.93	-	-	1.14	1.14	1.14	1.00	1.00
35	2.10	-	-	1.15	1.00	1.00	1.00	1.00

Tabella 17. Variazione dell'indice di intrecciamento ( $\Delta I_i$ ).

<b>Id tratto</b>	<b><math>\Delta I_i</math> 1954-1969</b>	<b><math>\Delta I_i</math> 1969-1976</b>	<b><math>\Delta I_i</math> 1976-1996</b>	<b><math>\Delta I_i</math> 1996-2008</b>	<b><math>\Delta I_i</math> 2008-2011</b>	<b><math>\Delta I_i</math> 2011-2014</b>	<b><math>\Delta I_i</math> 2014-2016</b>
1	0.13	0.04	-0.17	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.10	0.00	0.00	-0.10	0.10	-0.10
3	0.00	1.00	-0.60	-0.40	0.00	0.30	-0.20
4	0.29	0.29	-0.71	0.00	0.00	0.14	0.00
5	0.58	0.50	-1.50	0.00	0.00	0.17	-0.17
6	-0.18	0.27	-0.18	-0.27	0.09	-0.09	0.00
7	0.00	0.59	-0.41	-0.12	0.12	-0.18	0.00
8	-0.06	0.41	-0.47	0.06	0.06	-0.06	-0.06
9	-0.07	0.00	0.00	0.00	-0.07	-0.03	0.00
10	0.00	0.10	0.05	0.00	-0.19	0.10	0.00
11	-0.13	0.13	-0.07	0.00	-0.07	0.00	0.07
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	-0.21
13	0.25	-0.25	0.15	0.00	0.00	0.05	-0.10
14	0.21	-0.21	0.07	-0.07	0.00	0.00	0.00
15	-0.17	0.00	0.06	0.06	-0.11	0.00	0.00
16	-0.18	-0.05	-0.18	0.05	-0.05	0.00	0.00
17	0.04	0.00	0.00	0.04	-0.15	0.08	-0.12
18	-0.04	0.17	-0.38	-0.17	0.08	0.13	-0.17
19	0.00	-0.60	-0.20	-0.07	-0.07	-0.13	-0.13
20	0.00	-0.22	-0.22	-0.33	0.11	-0.33	0.22
21	0.54	-0.54	-0.13	-0.04	0.21	-0.21	0.00
22	0.22	0.00	0.00	-0.17	0.11	-0.28	0.00
23	-0.26	-0.21	0.26	-0.32	0.05	-0.05	0.00
24	-0.45	0.35	-0.45	0.10	-0.15	-0.10	0.00
25	-0.32	0.08	-0.52	0.12	0.08	-0.24	0.00
26	-0.10	0.40	-0.65	0.10	-0.15	0.00	0.00
27	-0.29	0.48	-0.45	-0.03	0.03	0.03	-0.13
28	0.00	0.95	-0.79	-0.32	-0.11	-0.16	0.00
29	0.00	0.18	-0.55	0.09	0.18	0.00	-0.36
30	-0.11	0.06	-0.06	0.00	0.06	-0.06	0.00
31	0.36	0.18	-0.45	0.27	-0.27	-0.18	0.18
32	0.00	-	-	0.13	-0.13	0.13	0.00
33	-0.47	-	-	0.00	-0.07	0.00	0.00
34	-	-	-	0.00	0.00	-0.14	0.00
35	-	-	-	-0.15	0.00	0.00	0.00





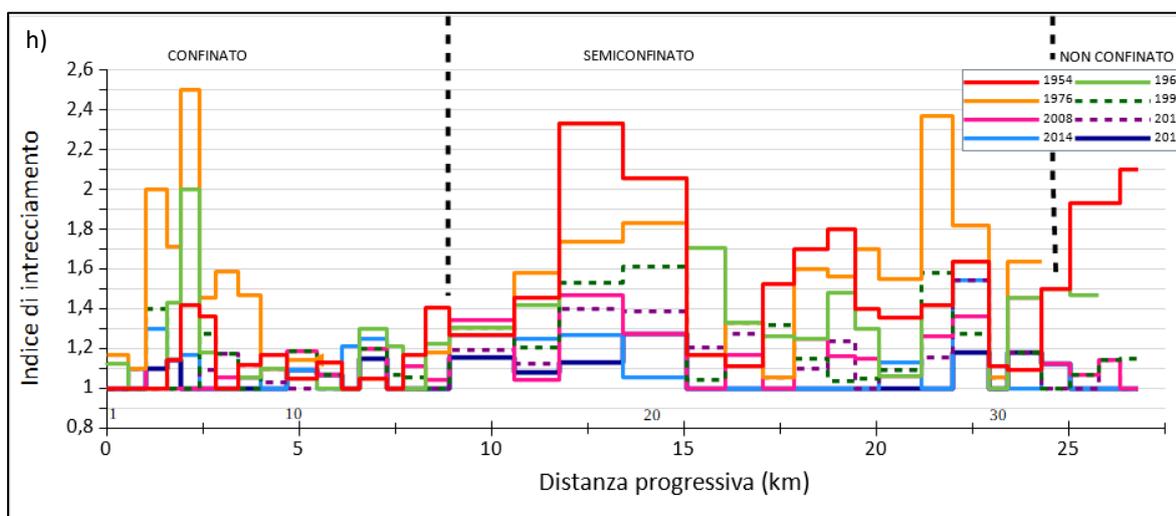
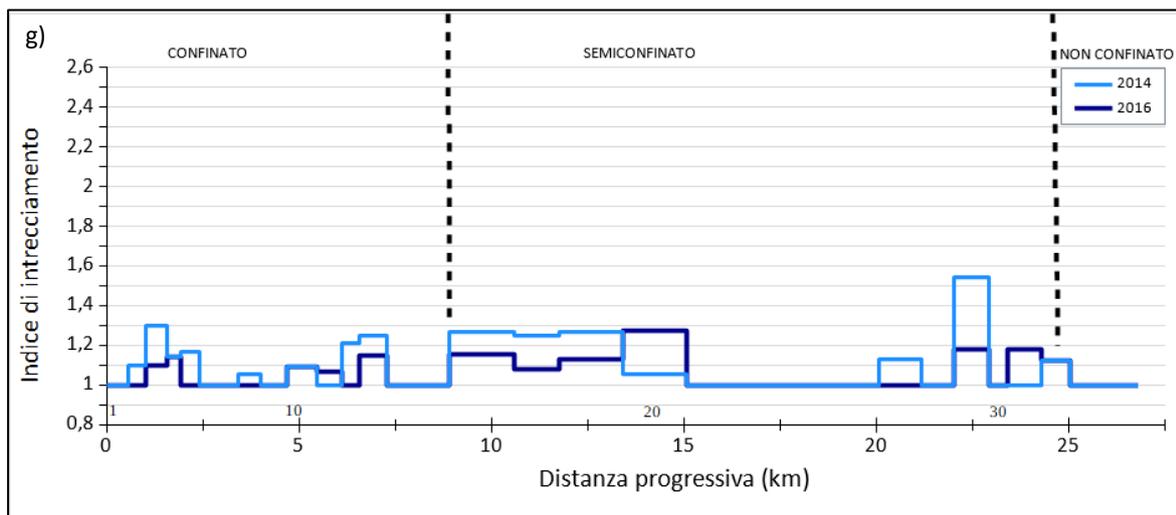


Figura 55. Indice di intrecciamento, confronto tra 1954 e 1969 (a), 1969 e 1976 (b), 1976 e 1996 (c), 1996 e 2008 (d), 2008 e 2011 (e), 2011 e 2014 (f), 2014 e 2016 (g), totale (h).