

ALMA MATER STUDIORUM

UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN INGEGNERIA CIVILE

*DICAM Costruzioni Idrauliche*

TESI DI LAUREA

in

Costruzioni idrauliche e protezione idraulica del territorio LS

**MODELLO QUASI-BIDIMENSIONALE  
PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO IDRAULICO  
DA ESONDAZIONE FLUVIALE  
NELLA PIANURA PADANA**

RELATORE:  
**Prof. Ing. Attilio Castellarin**

CANDIDATA  
**Francesca Carisi**

CORRELATORI:  
**Dott. Ing. Alessio Domeneghetti**  
**Ing. Piero Tabellini**

Anno Accademico 2010/2011  
Sessione III



# SOMMARIO

<b>1. Introduzione .....</b>	<b>5</b>
<b>2. Caso di studio, dati e strumenti utilizzati .....</b>	<b>11</b>
2.1. Il fiume Po.....	11
2.1.1. Caratteristiche dei principali affluenti del Po .....	17
2.1.2. Regime fluviale.....	22
2.1.3. Autorità sul Fiume .....	30
2.2. Strumenti di analisi di dati georeferenziati: il GIS .....	33
2.2.1. Informazione topografica disponibile.....	35
<b>3. Valutazione del rischio idraulico e idrogeologico e classificazione delle fasce fluviali .....</b>	<b>39</b>
3.1. Definizione di rischio idraulico.....	39
3.2. Procedura metodologica.....	41
3.2.1. Unità territoriale di riferimento .....	41
3.2.2. Fenomeni di dissesto considerati .....	42
3.2.3. Stima della pericolosità (S).....	42
3.2.4. Stima del danno (E) .....	43
3.2.5. Interpretazione sintetica delle classi di rischio .....	44
3.3. Classificazione delle fasce fluviali.....	45
<b>4. Modelli numerico-idraulici.....</b>	<b>53</b>
4.1. Il codice di calcolo HEC-RAS .....	53
4.2. Modelli numerico-idraulici dell'asta di Po .....	56
4.2.1. Modello numerico-idraulico Q2005D e successive modifiche .....	56
4.2.2. Schematizzazione numerica dei maggiori affluenti.....	69
4.2.2.1. Casi particolari: i fiumi Taro e Secchia.....	77
<b>5. Evento di piena al limite della prevedibilità: identificazione della sollecitazione di progetto .....</b>	<b>81</b>
5.1. Idrogrammi Trit 500 attesi nelle sezioni strumentate .....	81
5.1.1. Elaborazioni statistiche .....	84
5.1.2. Curve di riduzione dei colmi di piena.....	85
5.1.3. Posizione del picco .....	86
5.1.4. Costruzione dell'idrogramma sintetico.....	86

5.2. Calibrazione degli idrogrammi sintetici degli affluenti .....	87
<b>6. Modellazione e simulazione dei fenomeni di rotta arginale .....</b>	<b>99</b>
6.1. Collocazione delle breccie.....	101
6.2. Risultati .....	111
<b>7. Evento di piena al limite della prevedibilità: simulazione idraulica con argini inerodibili.....</b>	<b>115</b>
7.1. Risultati .....	116
<b>8. Confronto dei risultati .....</b>	<b>119</b>
<b>9. Valutazione semplificata dei possibili danni attesi.....</b>	<b>127</b>
9.1. Il programma CORINE a livello europeo .....	127
9.2. Il progetto in Italia.....	132
9.3. CLC nel bacino del Po .....	142
9.4. Applicazione della CLC2006 nel caso dei comparti allagati nello scenario con argini erodibili .....	155
<b>10. Conclusioni e obiettivi futuri .....</b>	<b>167</b>
<b>11. Riferimenti bibliografici.....</b>	<b>171</b>
<b>APPENDICE A .....</b>	<b>175</b>
<i>Stage and Flow Hydrograph</i> dei comparti idraulici soggetti ad allagamento nella configurazione con argini erodibili .....	175
<i>Stage and Flow Hydrograph</i> dei comparti idraulici soggetti ad allagamento nella configurazione con argini inerodibili.....	181
<b>APPENDICE B.....</b>	<b>193</b>
CLC2006: Tabella delle aree relative alle singole categorie di copertura del suolo per ogni comparto idraulico di Fascia C .....	193
<b>APPENDICE C .....</b>	<b>197</b>
CLC2006: Rappresentazione delle aree urbane e industriali per i comparti presi in esame .....	197

# 1. INTRODUZIONE

La definizione delle strategie di intervento per la protezione idraulica dei territori potenzialmente soggetti ad allagamenti provocati dal fiume Po, specie lungo il suo tratto medio-inferiore, costituisce da sempre un problema complesso, di grande interesse tecnico e scientifico.

Parte di detto interesse è dovuto alla particolare importanza socio-economica delle aree di pianura potenzialmente allagabili che, proprio in virtù della loro vicinanza al corso d'acqua, sono da sempre caratterizzate da condizioni favorevoli allo sviluppo economico ed antropico. Nel corso degli ultimi due secoli si è assistito ad un progressivo sviluppo dei sistemi arginali a difesa di tali aree, sia in senso verticale (altezza dei rilevati) che in senso longitudinale (lunghezza delle arginature). Questi interventi hanno quasi sempre seguito le principali piene della storia, fra cui particolarmente significative sono quelle del 1951, del 1994 e del 2000. Il progressivo innalzamento della quota sommitale delle arginature ha portato al raggiungimento, su gran parte dell'asta medio-inferiore del Po, di condizioni strutturali limite, tali per cui le quote attuali dei rilevati non appaiono più significativamente aumentabili.

Il lavoro compiuto e descritto nella presente dissertazione si colloca proprio all'interno delle nuove linee strategiche di intervento identificate dall'Autorità di bacino del fiume Po (AdB-Po), orientate non più solo a limitare la probabilità dei fenomeni di allagamento ma anche, per quanto possibile, alla gestione e mitigazione degli eventi di piena la cui intensità superi gli scenari di riferimento per il sistema arginale.

Il prolungamento e il consolidamento della cintura arginale lungo l'asta del Po vengono infatti inquadrati in quelle che sono definite "strategie di resistenza". In quest'ambito bisogna intendere come resistenza di un sistema la capacità di mantenere inalterate le sue caratteristiche quando sottoposto a differenti sollecitazioni. Le strategie tradizionali (o appunto "di resistenza") sono dunque quelle che si prefiggono come obiettivo la riduzione del rischio idraulico (la cui definizione verrà riportata nel capitolo 3), prevenendo gli allagamenti mediante

l'aumento del numero o, più semplicemente, delle dimensioni strutturali dei rilevati posti a difesa delle aree prese in considerazione.

Studi compiuti nel corso degli ultimi anni hanno però identificato nuove politiche di gestione del suddetto rischio, individuando una diversa tipologia di strategie di intervento, denominata “strategie di resilienza”. Col termine resilienza si intende in questo ambito la capacità di un sistema di ritornare a uno stato simile a quello iniziale in seguito ad una perturbazione subita, dovuta a eventi naturali e/o antropici (Hashimoto et al., 1982).

De Bruijn e Klijn (2001) hanno poi inserito tale definizione nel contesto della gestione del rischio alluvionale. Le strategie di mitigazione del rischio idraulico che fanno riferimento al concetto di resilienza si concentrano sulla riduzione degli impatti provocati dagli allagamenti mediante linee di intervento alternative alle strategie tradizionali. Tra queste, la strategia “resiliente” approfondita nell'ambito del presente lavoro di tesi prevede l'esondazione controllata (durante l'evento di piena preso a riferimento) di volumi di piena in comparti idraulici adiacenti alle arginature maestre, opportunamente identificati sulla base di criteri quali la minimizzazione del rischio idraulico e il rapporto costi/benefici. Alla presenza di detti comparti di potenziale esondazione è riconducibile la capacità del corso d'acqua di laminare (ovvero di ridurre) i colmi di portata in occasione dei fenomeni di piena.

L'accumulo di volumi di piena nelle zone di espansione laterale, infatti, ritarda e diluisce nel tempo il fenomeno di propagazione dell'onda di piena che, spostandosi da monte verso valle, si allunga e riduce il valore di portata al colmo. Tale strategia è stata recentemente riconosciuta (assieme alle altre linee d'intervento per la difesa idraulica del territorio alternative al continuo e sistematico rialzo delle quote di sommità degli argini) quale linea strategica d'intervento per i principali corsi d'acqua europei anche dalla Direttiva Europea sui rischi di esondazione (Direttiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo “*Flood Directive*”).

Passando da un livello di scala internazionale a uno interregionale, l'Autorità di bacino del fiume Po (AdBPo), anche per ottemperare agli obiettivi contenuti nella suddetta direttiva, ha intrapreso una sistematica attività di studio volta alla definizione di specifiche linee progettuali strategiche per il miglioramento delle condizioni di sicurezza dei territori di pianura lungo l'asta medio-inferiore del

Po. Gli studi svolti dall'AdBPo evidenziano la necessità di definire strategie per la mitigazione del rischio residuale, intendendosi come tale quella porzione di rischio che permane anche in presenza dell'opera di difesa. L'esistenza di un rischio residuale è relazionata in primo luogo alla possibilità di verificarsi di eventi di piena più intensi di quello assunto a riferimento per la progettazione del sistema di difesa arginale (solitamente l'onda sintetica duecentennale) e che quindi non sono contenibili all'interno dello stesso, in secondo luogo alla possibilità che, anche in un sistema arginale ben monitorato e mantenuto nel tempo quale è quello del Po, non possano essere esclusi eventi di rottura arginale. Tale rischio, definito residuale in quanto connesso a scenari di mancata efficacia di un'opera idraulica, interessa un territorio potenzialmente assai ampio (diverse migliaia di chilometri quadrati) e fortemente antropizzato. Esso deve essere dunque preso attentamente in considerazione, valutato e gestito con opportuni interventi di mitigazione.

Nello specifico le linee strategiche di intervento previste dall'AdBPo prevedono:

- il miglioramento della capacità di laminazione all'interno delle arginature maestre degli eventi di piena aventi tempo di ritorno,  $T_{rit}$ , pari a 200 anni;
- la valutazione e la gestione del rischio residuale nelle porzioni di territorio al di fuori delle arginature maestre, che possono essere interessate da inondazione al verificarsi di eventi di piena sensibilmente più gravosi di quello duecentennale, assunto come riferimento per la progettazione del sistema difensivo arginale (le cosiddette piene al limite della prevedibilità, secondo la definizione di Majone, 2006);
- lo studio delle possibilità di laminazione controllata delle piene al limite della prevedibilità all'esterno delle arginature maestre.

Il presente lavoro, partendo dalla consapevolezza che l'attuale sistema di arginature maestre del Po non possa garantire un livello di sicurezza idraulica assoluto dei territori di pianura prospicienti il corso d'acqua nei confronti di qualsiasi scenario di piena, si concentra su un evento con tempo di ritorno pari a 500 anni e, avvalendosi dei risultati sperimentali ottenuti attraverso un modello matematico idraulico di tipo quasi-bidimensionale, muove i primi passi nella direzione del controllo e gestione delle piene al limite della prevedibilità al fine di minimizzare il rischio idraulico.

Nella pratica, le analisi condotte per il controllo e la gestione del rischio idraulico si sono tradotte nell'individuazione, mediante il supporto di modellistica numerico-idraulica (HEC-RAS), delle aree maggiormente soggette ad allagamento, mettendo a confronto l'attuale configurazione del sistema arginale con una configurazione ipotetica, in cui gli argini siano stati completamente consolidati, al fine di prevenire locali fenomeni erosivi durante i fenomeni di tracimazione.

Il presente lavoro costituisce l'approfondimento e la naturale evoluzione degli studi effettuati in precedenti tesi specialistiche (v. ad es. D'Andrea, 2010 e Pagliccia, 2010), apportando, rispetto a questi ultimi, importanti modifiche che rendono più realistico lo scenario analizzato. Nello specifico, il modello quasi-bidimensionale del tratto medio-inferiore del Fiume Po è stato potenziato introducendo le schematizzazioni dei principali affluenti del Po (Adda, Taro, Parma, Enza, Secchia e Panaro), al fine di migliorare la riproduzione dei fenomeni di rigurgito indotti dal passaggio dell'onda di piena in corrispondenza delle confluenze e di rappresentare con precisione più elevata le dinamiche di allagamento delle aree esterne alle arginature maestre dovute alle esondazioni degli affluenti, elemento fondamentale per una corretta gestione politica a scala di bacino.

Successivamente, utilizzando le mappe dell'uso del suolo fornite a livello europeo dal programma *Corine Land Cover*, sono state identificate le aree esterne alle arginature meno "sensibili", ovvero le aree a minore densità antropica ed industriale, e dunque maggiormente adatte ad accogliere i volumi esondati in occasione di quegli eventi di piena incompatibili con i presidi idraulici preesistenti.

La presente dissertazione, che descrive il lavoro svolto, si articola in nove capitoli.

Nel secondo capitolo sono raggruppate informazioni di carattere geomorfologico, storico e legislativo sull'area del bacino del Po; in esso sono descritti inoltre gli strumenti adottati per l'analisi dei dati georeferenziati e le informazioni topografiche utilizzate nel presente studio.

Nel terzo capitolo vengono riportate la definizione del rischio idraulico adottata dall'AdBPo e la classificazione delle zone territoriali che delimitano il corso fluviale del Po.

Il quarto capitolo fornisce una breve descrizione del programma di calcolo utilizzato per condurre l'analisi e del modello numerico quasi-bidimensionale per il corso medio-inferiore del fiume Po sviluppato dal DISTART e aggiornato nel corso dei precedenti lavori di tesi, punto di partenza dello studio svolto; vi vengono illustrate inoltre le modifiche apportate nel presente studio riguardanti la schematizzazione numerica dei maggiori affluenti.

Nel quinto capitolo viene invece presentato il procedimento utilizzato per individuare l'evento di piena al limite della prevedibilità, definito in questo contesto come quello associabile a un tempo di ritorno pari a 500 anni su tutto il corso medio-inferiore del fiume Po e sugli affluenti considerati, a partire da idrogrammi sintetici cinquecentennali costruiti per le maggiori sezioni idrometriche di Po.

Una volta messo a punto il modello, è stata dunque lanciata una serie di simulazioni con riferimento a due distinti scenari: I) scenario attuale con argini maestri erodibili e dunque suscettibili di essere interessati da fenomeni di rotta arginale in caso di sormonto (sesto capitolo); II) scenario ipotetico con argini maestri tracimabili, ma inerodibili (settimo capitolo). Tale secondo scenario ipotetico corrisponde a un caso limite, nel quale l'intervento di mitigazione del rischio alluvionale comporti il rivestimento e il consolidamento di tutti i tratti arginali critici, al fine di evitare fenomeni di rottura arginale. Esso costituisce un caso più teorico che pratico, vista l'impossibilità di consolidare arginature di lunghezza così vasta.

I risultati delle simulazioni illustrate nei capitoli sesto e settimo sono stati messi a confronto e discussi nell'ottavo capitolo, ottenendo indicazioni utili alla valutazione dei volumi di esondazione controllata all'esterno delle arginature maestre e delle superfici complessivamente allagate.

Nel nono e ultimo capitolo (fatta eccezione per le conclusioni) è illustrata una valutazione semplificata dei danni attesi per l'allagamento dei comparti esterni alle arginature in seguito al passaggio dell'onda di piena cinquecentennale. Tale valutazione è stata effettuata servendosi delle mappe di copertura del suolo

messe a disposizione dal programma *Corine Land Cover*, descritto nel suddetto capitolo a livello europeo, nazionale e a scala di bacino.

## 2. CASO DI STUDIO, DATI E STRUMENTI UTILIZZATI

### 2.1. Il fiume Po

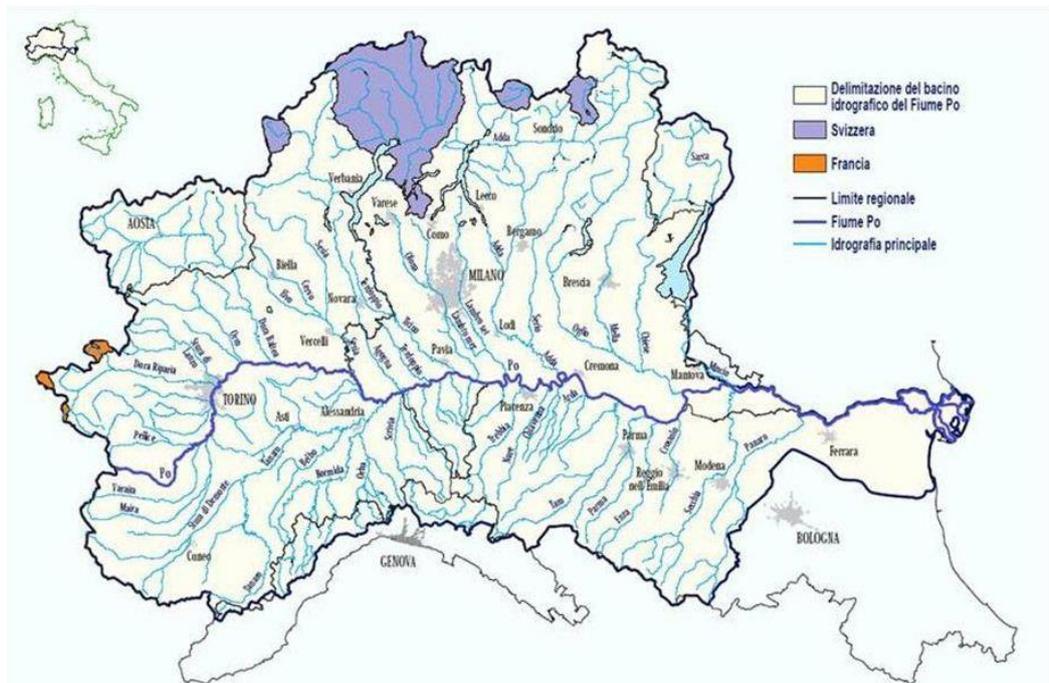


Figura 1: Bacino idrografico del fiume Po

Il Po è per molte ragioni il più importante fiume d'Italia. La sua lunghezza, pari a 652 km, lo rende il più lungo corso d'acqua interamente compreso nel territorio italiano; ha inoltre la massima portata alla foce (pari a ben 10300 m<sup>3</sup>/s in occasione della piena che ha portato all'alluvione del 14 novembre 1951 del territorio del Polesine, la zona di pianura situata tra il basso corso dei fiumi Adige e Po fino al Mar Adriatico) e il bacino più esteso, secondo la definizione di "bacino" data dalla legge 183/89: "il territorio dal quale le acque pluviali o di fusione delle nevi e dei ghiacciai, defluendo in superficie, si raccolgono in un determinato corso d'acqua direttamente o a mezzo di affluenti, nonché il territorio che può essere allagato dalle acque del medesimo corso d'acqua, ivi compresi i suoi rami terminali con le foci in mare e il litorale marittimo prospiciente" (art. 1). La sua superficie infatti, considerando anche il sottobacino

di Burana-Po di Volano, che non fornisce contributi ai deflussi di piena, e il Delta, è di ben 74000 km<sup>2</sup>. Di questi, una piccola parte ricade nei territori francese e svizzero, mentre circa 70000 si trovano in territorio italiano, interessando 3200 comuni e sei regioni (v. Figura 1): Piemonte, Valle d'Aosta, Lombardia, Veneto, Liguria, Emilia Romagna e la Provincia Autonoma di Trento, di cui due terzi sono costituiti da terreni di collina e di montagna e un terzo da terreni pianeggianti. Le regioni a sinistra del Po (ovvero quelle settentrionali) occupano una superficie di circa 43000 km<sup>2</sup>, di cui 16000 km<sup>2</sup> sono regolati dai grandi laghi lombardi i cui specchi d'acqua occupano una superficie di 890 km<sup>2</sup>. Le regioni a destra occupano una superficie di circa 27000 km<sup>2</sup>. Le superfici alpine coperte dai ghiacci perenni occupano circa 600 km<sup>2</sup>.

La mutevolezza del suo aspetto è il tratto saliente di questo fiume e del paesaggio che lo accompagna. Nel corso degli ultimi millenni si è radicalmente trasformato per l'azione di molteplici fattori. I confini tra l'emerso e il sommerso sono mutati e il territorio è stato letteralmente costruito assumendo una relativa stabilità.

L'origine del fiume Po è in Piemonte, in provincia di Cuneo. Attraversa poi da ovest verso est gran parte dell'Italia settentrionale, percorrendo tutta la Pianura Padana, bagnando quattro capoluoghi di provincia (nell'ordine Torino, Piacenza, Cremona e Ferrara) e infine sfocia nel Mare Adriatico in un vasto delta con cinque rami.



Figura 2: Sorgente del Po

La sorgente del Po è situata in Piemonte, più precisamente nel pianoro denominato Piana del Re ai piedi del Monviso, sulle Alpi Cozie in provincia di Cuneo a una quota di 2020 m slm.

Arricchendosi notevolmente dell'apporto di altre innumerevoli sorgenti, prende a scorrere nell'omonima valle. Da qui sbocca in pianura dopo appena una ventina di chilometri, poco più a valle di Sanfront, lambendo i territori della città di Saluzzo. In questo tratto vari affluenti arricchiscono la portata del Fiume, che entra poi nella provincia di Torino attraversandone la città capoluogo. A Torino il fiume, nonostante abbia percorso solo un centinaio di chilometri dalle sorgenti,

è già un considerevole corso d'acqua, con un letto ampio circa 200 m e una portata media già prossima ai 100 m<sup>3</sup>/s.

Con andamento verso est, costeggia poi le estreme propaggini del Monferrato giungendo nella piana del Vercellese, dove si arricchisce dell'apporto di importanti affluenti quali la Dora Baltea e il Sesia.

Piegando poi verso sud, continua a lambire in sponda destra il Monferrato in provincia di Alessandria, bagnando le città di Casale Monferrato e Valenza. Qui il corso funge anche da confine regionale tra Piemonte e Lombardia, cominciando ad assumere dimensioni maestose.

Presso Bassignana, il Fiume punta definitivamente verso est grazie anche alla forte azione del Tanaro, suo principale tributario di destra, e assume una connotazione prevalentemente artificiale a causa delle opere di difesa e sistemazione realizzate sulla sua asta e su quelle dei suoi affluenti. Dopo questa confluenza il Po, ormai notevole nella portata (in media oltre i 500 m<sup>3</sup>/s), entra in territorio lombardo, scorrendo in provincia di Pavia. Pochi chilometri a sud del capoluogo pavese il Fiume riceve il contributo essenziale del Ticino, suo principale tributario per volume d'acqua, che ne trasforma il regime da torrentizio a fluviale, compensando gli stati di magra e di morbida, riducendone la pendenza (da circa 0.35‰ a circa 0.18‰) e rendendolo così navigabile anche da grosse imbarcazioni sino alla foce.

Dopo questa confluenza il Fiume prende a scorrere per parecchi chilometri nella zona di confine tra Lombardia ed Emilia Romagna con andamento dapprima sub-rettilineo, poi caratterizzato da meandri e infine sinuoso, bagnando città importanti come Piacenza e Cremona e ricevendo contributi notevoli dagli affluenti alpini e appenninici.

Nel primo tratto l'alveo si presenta moderatamente pluricursale e dà origine a diverse isole fluviali, la più grande delle quali (escludendo naturalmente quelle presenti alla foce) è Isola Serafini, situata poco più a monte della foce dell'Adda; le arginature maestre sono inizialmente discontinue e distanziate (mediamente 1.7 km con un massimo di 4 km), per farsi poi più continue e ravvicinate (passando a una luce di 1.4 km) dopo la confluenza del Trebbia.

Nel secondo tratto, a valle della confluenza con l'Adda, le arginature diventano continue e distanziate (circa 2.6 km) e creano una grande area per la laminazione

delle piene, che perciò presentano di solito la loro portata al colmo in corrispondenza di Piacenza o Cremona e vengono poi modulate; a causa delle opere longitudinali volte a favorirne la navigazione l'alveo diventa monocursale, caratteristica che mantiene sino alla foce.

Procedendo verso valle il Po riceve i contributi di Oglio, Mincio e Secchia e presenta argini ravvicinati (mediamente 900 m, con punte minime di 500 m) e alveo spesso canalizzato, soprattutto dopo la confluenza dell'ultimo fiume, il Panaro.

Giunto infine nella zona di Ferrara il Po scorre pensile sul confine tra Veneto (provincia di Rovigo) ed Emilia Romagna, nella regione storica del Polesine.

Qui il fiume inizia il suo ampio delta (380 km<sup>2</sup>), dividendosi in cinque rami principali (Po di Maestra, Po della Pila, Po delle Tolle, Po di Gnocca e Po di Goro) e quattordici bocche; un ulteriore ramo secondario (il Po di Volano), che attraversa la città di Ferrara, è ora inattivo.

Il Grande Fiume sfocia quindi nel Mare Adriatico, attraversando territori appartenenti al comune di Porto Tolle e Porto Viro.

Fin dall'antichità questo corso d'acqua è stato scenario di eventi storici, sociali ed economici; segno del riconoscimento della sua rilevanza è il nome a esso attribuito dagli antichi Greci, Ἐριδανός, nome di uno dei fiumi mitologici del regno dell'Ade, cantato anche dal poeta Virgilio nel libro VI dell'Eneide: nel suo nome è contenuta l'antica radice ρδν ossia "rdn", comune ad altri importanti fiumi del territorio europeo (Reno, Rodano e Danubio). Presso gli antichi Liguri era invece chiamato Bodinco. Con la conquista dell'Italia settentrionale da parte dei Galli, infine, assunse il nome Padus, da cui l'aggettivo "padano", derivante dal nome di una resina prodotta da una qualità di pini selvatici particolarmente abbondante presso le sue sorgenti.

Secondo lo storico Plinio il Vecchio furono gli Etruschi i primi a tentare di regolamentare il fiume per favorire la navigazione e distribuire le acque durante le piene; lo sfruttamento del Po come via di comunicazione e la realizzazione d'interventi volti a favorirne l'utilizzo si sono intensificati in epoca romana, come testimoniato da alcuni geografi (ad es. Strabone) e storici (Polibio e lo stesso Plinio il Vecchio nella sua opera *Naturalis Historia*), al punto che nel I secolo d.C. le fosse Augusta, Clodia, Filistina, Messanica e Neronia

permettevano di navigare da Ravenna fino ad Aquileia rimanendo sempre all'interno di lagune e percorrendo canali artificiali e tratti di fiumi.

Nel 476 d.C., con la caduta dell'Impero Romano d'Occidente, vennero meno i principali lavori di manutenzione, ma il decadimento del sistema viario da essi creato rese ancora più importante come via di comunicazione il Po, il cui alveo è stato continuamente navigato e reso oggetto di contese e accordi.

Fu intorno all'anno 1000 che si riprese a costruire argini, che erano però isolati, e solamente nel 1479 le operazioni di arginatura furono completate e il corso del Po fu ricondotto a un solo alveo.

Nonostante gli sforzi degli abitanti della Pianura Padana, nel tempo il Grande Fiume ruppe ripetutamente gli argini. Le principali piene dell'ultimo secolo si ebbero nel 1951 (con la terribile alluvione del Polesine), nel 1994 (quando a finire sott'acqua furono ampie zone del Piemonte) e nel 2000 (quando il livello del Fiume batté ogni record causando ingenti danni lungo tutto il suo corso).

L'insieme dei corsi d'acqua del bacino ha subito nel corso del tempo consistenti interventi di trasformazione e di sistemazione idraulica che hanno condotto a un livello di artificializzazione piuttosto intenso; un indicatore significativo di tale situazione è rappresentato dalla consistenza del sistema delle arginature di 2<sup>a</sup> categoria lungo le aste del Po e degli affluenti nei tratti rigurgitati (Tabella 1).

CORSO D'ACQUA	ARGINATURE		
	IN SPONDA DESTRA [km]	IN SPONDA SINISTRA [km]	TOTALI [km]
Asta Po	418	446	864
Affluenti rigurgitati	924	350	1274
<b>Totale Po</b>	<b>1342</b>	<b>796</b>	<b>2138</b>
Delta			154
<b>Totale Po + Delta</b>			<b>2292</b>

Tabella 1: Lunghezza delle arginature del fiume Po

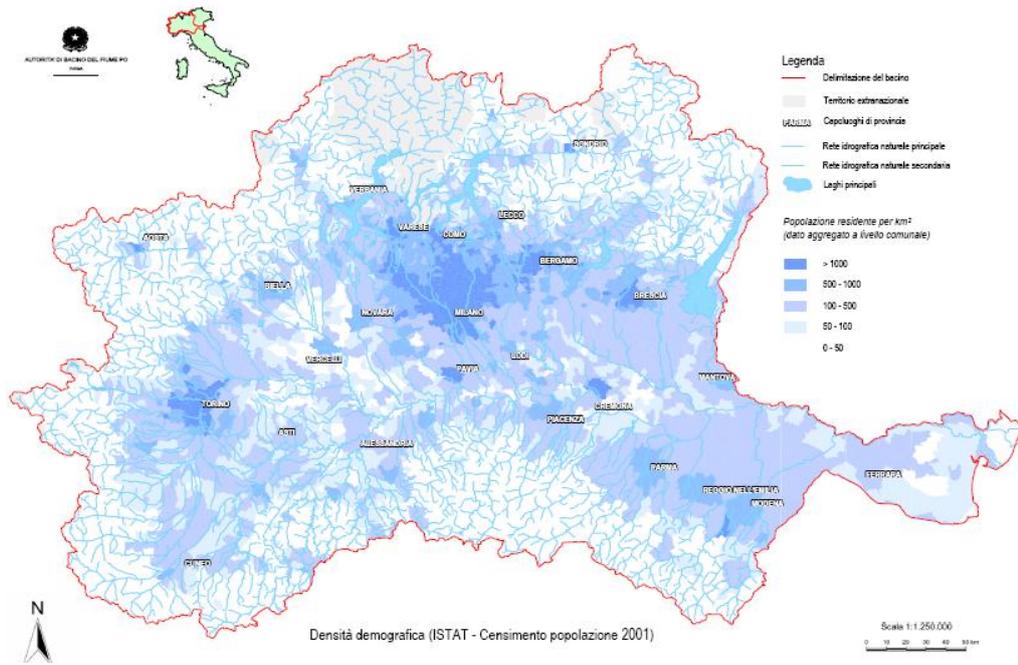
Oggi nelle aree limitrofe al corso d'acqua vivono circa 16 milioni di persone. In Figura 3 è riportata la mappa di distribuzione della densità demografica: la densità media sul bacino si attesta a circa 225 abitanti per km<sup>2</sup>, valore sensibilmente superiore alla media italiana (188 abitanti per km<sup>2</sup>); all'alta densità

demografica corrisponde generalmente un notevole grado di concentrazione insediativa, evidente non solo nelle aree metropolitane (Milano e Torino) e nelle maggiori concentrazioni urbanistiche, ma diffusa in gran parte della Pianura Padana e delle vallate principali

Nel bacino del Po sono concentrati inoltre il 55% del patrimonio zootecnico italiano, il 35% della produzione agricola e il 37% delle industrie, le quali sostengono il 46% dei posti di lavoro (fonte AdBPo). Per questi motivi il Po e il suo bacino sono da considerare come zone nevralgiche per l'intera economia italiana e una delle aree europee con la più alta concentrazione di popolazione, industrie e attività commerciali. Dal punto di vista economico, l'area è strategica per il Paese garantendo un PIL che copre il 40% di quello nazionale, grazie alla presenza di grandi industrie e di una quota rilevante di piccole e medie imprese, nonché di attività agricole e zootecniche diffuse. Sotto l'aspetto della risorsa idrica, inoltre, il bilancio idrologico del bacino riguarda un volume d'acqua complessivo pari a circa il 40% delle disponibilità dell'intero Paese.

Il Po è anche una grande attrazione per il turismo ambientale, sportivo e culturale: la sua valenza naturalistica è data da oltre 60 parchi, riserve, aree attrezzate e oasi naturali, tutti scenari ideali per percorsi in bicicletta o a cavallo e per la navigazione fluviale. Estremamente ricca anche l'offerta di attività indoor, grazie a oltre 30 musei, ville e centri di documentazione dedicati al fiume e a eventi e personaggi a esso legati, da Don Camillo e Peppone a Giuseppe Verdi.

Il delta del Po, per la sua grande valenza ambientale, è stato dichiarato patrimonio dell'umanità dall'UNESCO.



**Figura 3: Distribuzione della densità demografica nel bacino del Po**

### 2.1.1. Caratteristiche dei principali affluenti del Po



**Figura 4: Principali affluenti del Po**

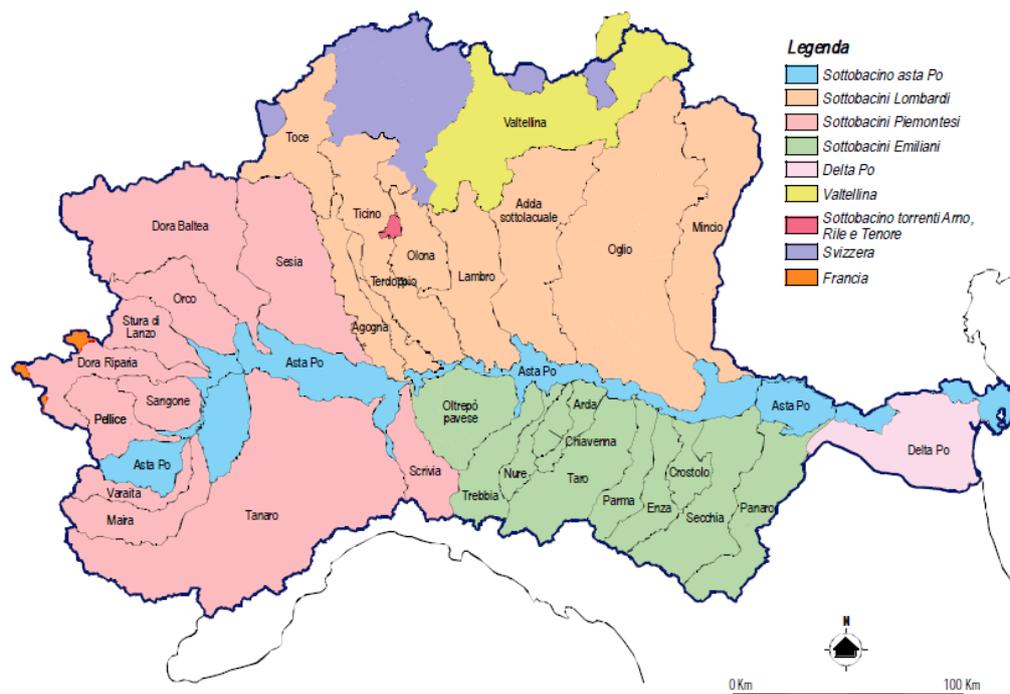


Figura 5: Delimitazione dei principali sottobacini idrografici

Da monte a valle, in sinistra idraulica:

- la *Dora Riparia* (125 km) ha origine da due rami: la Dora di Cesana e la Dora di Bardonecchia nella piana di Oulx e percorre la Valle di Susa fino allo sbocco nella pianura torinese; dopo Susa la valle assume la caratteristica forma a U e si sviluppa in modo rettilineo in direzione est-ovest;
- la *Dora Baltea* (160 km) nasce dal Monte Bianco (Dora di Veny e Dora di Ferret) e percorre la Valle d'Aosta prima in direzione ovest-est, poi in direzione nordovest-sudest; confluisce nel Po all'altezza di Crescentino. Nel tratto piemontese la sezione valliva si presenta ampia e delimitata dai versanti morenici, a eccezione della stretta di Mazzé, con vaste aree allagabili in destra e in sinistra, che nel tratto terminale si connettono a quelle del Po;
- il *Sesia* (138 km) ha origine dal Monte Rosa, scorre per il tratto montano prima in direzione ovest-est (fino a Varallo) e poi verso sud; sbocca in pianura a Romagnano; poco a monte di Vercelli, vi confluisce il torrente Cervo, che con l'Elvo, raccoglie tutti i deflussi provenienti dalla zona prealpina del Biellese. Dall'altezza di Vercelli è limitato da argini quasi continui fino alla confluenza in Po, nei pressi di Breme;

- il *Ticino* (284 km, compresa la parte sopralacuale) ha origine in territorio svizzero, in prossimità del passo del S. Gottardo e costituisce con il fiume Toce il principale affluente del Lago Maggiore. Dallo sbarramento della Miorina (Sesto Calende) scorre in una valle a fondo piatto, incisa nella circostante pianura e a essa raccordata per mezzo di un terrazzo principale; l'alveo è dapprima monocursale, per poi divagare formando meandri con alveo pluricursale fino alla confluenza con il Po, al ponte della Becca. È arginato per un tratto limitato, da Pavia al Po;
- il *Lambro* e l'*Olon*a sono corsi d'acqua principali che costituiscono il reticolo di drenaggio dell'area prealpina e di pianura attorno al capoluogo lombardo; entrambi risentono della forte urbanizzazione del territorio attraversato. Il primo ha origine nell'area montana del Triangolo Lariano, che va da Magreglio ai laghi di Pusiano e di Alserio; successivamente attraversa i rilievi morenici della Brianza, l'area metropolitana milanese e infine la pianura del Lodigiano che va da Melegnano al Po; è arginato per un breve tratto in corrispondenza della confluenza.

L'*Olon*a (60 km) ha origine alle pendici dei monti a nord di Varese a circa 1000 m s.l.m. e termina di fatto all'ingresso di Milano, con il Canale Scolmatore di Nord-Ovest nel comune di Rho. Fino all'altezza dell'autostrada Milano-Laghi, i centri abitati sono situati in posizione sopraelevata rispetto al corso del fiume; in prossimità dell'alveo sono invece presenti numerose industrie; a valle dell'*Olon*a, il territorio diventa pianeggiante e il fiume entra nella zona maggiormente urbanizzata, attraversando i comuni di Castellanza e Legnano;

- l'*Adda* (280 km) nasce sopra Bormio, scorre tra le Alpi Retiche a nord e le Orobie a sud in direzione sudovest prima, poi verso est, lungo la Valtellina, e sfocia nel lago di Como. A valle del lago scorre incassato fino a Cassano d'Adda, per poi snodarsi nella pianura con meandri fino alla confluenza in Po, presso Cremona; è arginato in modo continuo dalla SS 234 alla confluenza. Affluenti principali, in sinistra, sono il Serio e il Brembo;
- l'*Oglio* (280 km) nasce sopra Cevedale, riceve a valle di Ponte di Legno i contributi della Val d'Avio e della Val Grande e percorre la Val Camonica immettendosi nel Lago d'Iseo; dall'uscita del lago, presso Sarnico, prosegue

fino alla confluenza in Po (poco a monte di Borgoforte); è arginato con continuità dalla confluenza quasi sino all'immissione del Mella. Affluenti principali, in sinistra, sono il Chiese (effluente del Lago d'Idro) e il Mella;

- il *Mincio* (194 km, compreso il Sarca a monte del lago), esce a Peschiera dal Lago di Garda (alimentato dal Sarca nel territorio trentino), forma i laghi di Mantova e sbocca nel Po poco a monte di Ostiglia. Presenta un assetto fortemente artificializzato, essendo influenzato dalla regolazione del lago e, in corrispondenza del nodo di Mantova, da una regimazione idraulica complessa; a valle è arginato in modo continuo fino alla confluenza.

Da monte a valle, in destra idraulica:

- il *Tanaro* (276 km) nasce alla confluenza tra il Tanarello e il torrente Negrone, sbocca nell'alta Pianura Padana a Lesegno e l'attraversa con direzione prevalente sudovest-nordest fino alla confluenza in Po, in prossimità di Bassignana. Assume caratteri fluviali con frequenti meandri (a partire da Farigliano, a lentissima evoluzione), ricevendo in sinistra la Stura di Demonte e lambendo a destra il margine occidentale della piega monoclinale delle Langhe fino a Cherasco. Nel tratto tra Asti e Alessandria confluisce il torrente Belbo e, a valle di quest'ultima città, il Bormida, il cui affluente principale è l'Orba;
- lo *Scrivia* (84 km) nasce nell'Appennino Ligure, presso Torriglia in provincia di Genova, e, dopo un iniziale andamento est-ovest fino a Busalla, assume la direzione sudovest-nordest, confluendo nel Po poco a monte di Voghera (Balossa Bigli). Nel tratto iniziale scorre incassato con versanti ripidi e ricoperti di vegetazione; successivamente il fondovalle diventa più ampio e i terrazzi alluvionali acquistano una notevole estensione, con versanti meno acclivi e intensamente coltivati;
- il *Trebbia* (115 km) nasce dal Monte Prella (1406 m slm) nell'Appennino Ligure e confluisce nel Po, poco a ovest di Piacenza con percorso sudovest-nordest. Il tratto montano, dalla sorgente fino a Rivergaro, scorre in una valle tortuosa e spesso molto stretta, costantemente incassato nel substrato roccioso; il tratto di pianura, con alveotipo ramificato ha ampie aree golenali e notevoli depositi alluvionali;

- il *Taro* (150 km) nasce dal Monte Penna (1735 m slm) e confluisce in Po presso Gramignazzo, a monte di Casalmaggiore. Il corso si sviluppa in direzione sudovest-nordest sino allo sbocco in pianura, dove crea un ampio conoide con apice tra Fornovo e Collecchio. Successivamente muta direzione, assumendo andamento meridiano fino alla confluenza in Po. Affluente principale in sinistra è il torrente Stirone;
- il *Parma* (100 km) ha origine dal Lago Santo e dai laghetti Gemio e Scuro, posti sul crinale del Monte Orsaro (1830 m slm) e del Monte Sillara (1861 m slm) e scorre in direzione nordest, immettendosi in Po presso Mezzano Superiore; affluente principale, in sinistra è il torrente Baganza, in corrispondenza della città di Parma. A valle della città è arginato in modo continuo;
- l'*Enza* (85 km) nasce tra il passo del Giogo (1262 m slm) e il Monte Palerà (1425 m slm), in prossimità del crinale tosco-emiliano; dalla sorgente fino a Canossa si sviluppa in direzione nord-est, quindi prevalentemente verso nord fino allo sbocco in pianura, dove forma un vasto conoide con apice a S. Polo; successivamente prosegue arginato fino alla confluenza nel Po, a Brescello;
- il *Secchia* (170 km) nasce dall'Alpe di Succiso (2017 m slm) e dal Monte Acuto, presso il passo del Cerreto. Nella prima parte il corso montano ha un alveo molto ampio; successivamente si incassa e subisce successivi allargamenti e restringimenti fino allo sbocco in pianura (Sassuolo); l'andamento del corso d'acqua diventa meandrizzato fino alla confluenza in Po, a valle di quella del Mincio. È arginato a partire dall'attraversamento della via Emilia;
- il *Panaro* (160 km) nasce dal Monte Cimone (2165 m slm); prende il nome di Panaro a valle di Montespecchio dopo la confluenza dei torrenti Leo e Scoltenna a Marano (300 m slm), che costituiscono la parte alta del reticolo idrografico. Scorre in un'ampia pianura con andamento meandriforme e struttura pluricursale; lasciata l'alta pianura, si dirige verso nord con alveo arginato a partire dalla via Emilia e si immette nel Po fra Stellata e Savatonica.

### 2.1.2. Regime fluviale

Il bacino del Po presenta corsi d'acqua con caratteristiche idrologiche di piena molto differenti, in funzione essenzialmente dell'esposizione alle perturbazioni meteoriche, della morfologia e, in minore misura, del tipo di substrato e di copertura del suolo.

Per quanto le classificazioni comportino sempre un certo grado di arbitrarietà, è possibile riconoscere 5 aree a comportamento omogeneo:

- i bacini alpini interni;
- i bacini alpini pedemontani;
- i bacini appenninici piemontesi;
- i bacini alpini lombardi;
- i bacini appenninici emiliani.

Costituiscono inoltre una classe a parte i tratti di pianura dei fiumi piemontesi principali (in particolare Po, Dora Baltea, Tanaro) e i tratti sublacuali dei corsi d'acqua lombardi (Ticino, Adda, Oglio, Chiese e Mincio), in cui assumono importanza l'effetto di laminazione dei colmi di piena lungo l'asta, la non contemporaneità delle piene sugli affluenti e la regolazione dei laghi. Caratteri ancora diversi presentano infine alcuni corsi d'acqua minori di pianura, il cui bacino idrografico è fortemente urbanizzato e ha profondamente modificato il regime naturale dei deflussi e il cui corso è stato inoltre profondamente artificializzato (Terdoppio, Olona e Lambro).

Il regime di tipo alpino comporta essenzialmente piene tardo primaverili ed estive e secche invernali, mentre quello appenninico è caratterizzato da piene primaverili e autunnali e secche estive; prevale però il regime appenninico, come prova il concentrarsi dei periodi di magra nel corso dell'estate (solitamente in agosto) e delle piene in autunno.

La vasta documentazione storica disponibile permette un'analisi degli eventi di piena che hanno interessato l'asta del Po dagli inizi del Settecento a oggi.

Si evidenzia una netta tendenza all'aumento dei livelli idrometrici al colmo; essi sono in relazione diretta con il progressivo sviluppo in lunghezza e in altezza delle arginature, che dal territorio mantovano al mare erano pressoché continue

su entrambi i lati già a partire dal XVI secolo. Successivamente le opere di contenimento sono state estese verso monte e hanno riguardato anche i principali affluenti, soprattutto quelli lombardi ed emiliani, comportando un progressivo aumento del contenimento dei volumi di piena, una minore laminazione nelle aree di pianura del bacino e un aumento dei valori di colmo nell'asta. Tale processo ha progressivamente ridotto le aree di pianura soggette ad allagamento naturale in quanto non protette, e gli allagamenti nel corso delle piene sono avvenuti per rotte degli argini, causate da sormonto, da processi erosivi al piede o da sifonamento.

L'onda di piena sul Po è costituita dalla sovrapposizione di onde elementari, tra loro più o meno sfalsate nel tempo, in rapporto agli eventi pluviometrici che interessano i bacini idrografici degli affluenti, alle condizioni dei tratti vallivi e agli effetti di laminazione degli stessi.

La diversità di regime degli affluenti fa sì che l'importanza delle piene venga normalmente smorzata, ma quando le piogge cadono contemporaneamente su tutto il bacino con una certa intensità e durata, o si spostano da monte a valle, le piene possono diventare rovinose rompendo gli argini protettivi che ingabbiano il fiume da Valenza Po fino al mare per una lunghezza di circa 450 km.

L'analisi degli eventi storici consente di delineare quattro scenari di riferimento, che definiscono i tipi di associazione più frequenti di bacini, ricadenti in uno o più territori regionali, cui è attribuibile un rilevante contributo nella formazione della piena lungo il Po:

- *primo tipo (piemontese)*: gli eventi si contraddistinguono per il contributo quasi sempre rilevante fornito dai fiumi Sesia, Tanaro e Ticino, cui si associano di volta in volta, con apporti più o meno sensibili, tributari dell'arco alpino occidentale e talora, con deflussi



Figura 6: Piena di tipo "piemontese"

più modesti, alcuni corsi d'acqua dell'Appennino Pavese (Staffora e Scuropasso). Il settore di bacino padano coinvolto è quello occidentale o centro-occidentale; rientrano in questo tipo gli eventi storici del 1705, 1755, 1857, 1907, 1994 e 2000, tutti avvenuti nella stagione autunnale;

- *secondo tipo (lombardo)*: è caratterizzato in misura determinante dalla partecipazione simultanea alla piena dei fiumi Ticino, Lambro, Adda e Oglio; il bacino padano risulta coinvolto fondamentalmente nel settore centrale, percorso dagli emissari lacustri lombardi. Sono assegnabili a questa tipologia le piene del 1807, 1812 e 1968, tutte avvenute, come nel tipo precedente, durante i mesi autunnali;

- *terzo tipo (piemontese-lombardo)*: i corsi d'acqua che forniscono sempre contributi determinanti al Po sono il Sesia e il Tanaro, contraddistinto quest'ultimo da portate elevate per apporti straordinari di Belbo, Bormida e Orba; pressoché in ogni caso vi

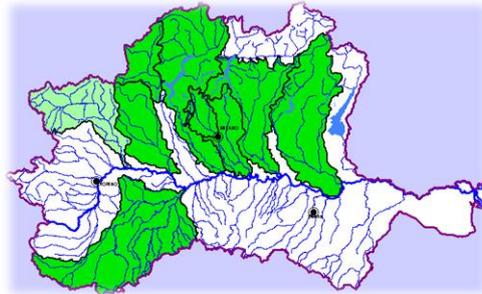


Figura 7: Piena di tipo “piemontese-lombardo”

sono inoltre apporti notevoli di Adda e Oglio, di poco inferiori ai valori massimi. A questi fiumi si associano di volta in volta alcuni tributari piemontesi (Scriveria o Dora Baltea) e altri corsi d'acqua lombardi (Olona e Lambro), tutti con piene non molto elevate, ma importanti perché coincidenti con il passaggio del colmo lungo l'asta del Po. Saltuariamente vengono forniti moderati contributi da singoli corsi d'acqua appenninici emiliani. In questo tipo di evento vengono per lo più coinvolti i bacini del versante alpino centrale e occidentale; ricadono in questo scenario le piene del 1801, del 1917 e del 1926, manifestatesi nella stagione autunnale la prima e nei mesi primaverili le altre due;

- *quarto tipo (intero bacino padano)*: è evidente la dimensione spaziale degli eventi e quindi il numero elevato di corsi d'acqua che, nei diversi settori del sistema idrografico padano, partecipano alla formazione della piena.

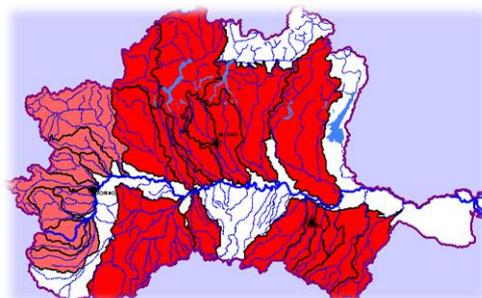


Figura 8: Piena di tipo “intero bacino padano”

Sistematicamente il contributo iniziale perviene da vari fiumi del settore occidentale, tra i quali emerge la

costante presenza del Sesia e, quasi sempre, del Tanaro. Più a valle, sul lato sinistro di Po, si hanno con analoga ripetitività le piene dei fiumi Olona e Lambro, cui si associano con elevata frequenza quelle dell'Adda e dell'Oglio; tra i corsi d'acqua del versante appenninico ricorre costantemente l'apporto del gruppo di tributari dal Parma al Panaro e, più saltuariamente, dei torrenti dell'Oltrepò Pavese e del Piacentino. Sono rappresentativi di questo tipo gli eventi del 1839, del 1872, del 1879 e del 1951 che, con esclusione di quello del 1879 avvenuto nella tarda primavera, si sono manifestati nei mesi autunnali.

Nell'ambito degli scenari descritti è possibile individuare i corsi d'acqua tributari che con maggiore ripetitività hanno determinato o concorso a determinare le piene del Po:

- i fiumi del settore piemontese, la cui partecipazione è segnalata in gran parte degli eventi; tra i corsi d'acqua coinvolti emergono il Sesia e il Tanaro per il contributo spesso determinante fornito per lo più da entrambi (piene del 1705, 1755, 1801, 1857, 1872, 1879, 1917, 1926, 1951, 1994 e 2000);
- tra gli emissari dei grandi laghi lombardi si pone in maggior evidenza il Ticino, per l'essenziale apporto alle piene del 1705, del 1755 e 1868 e per i contributi forniti in altre tre occasioni; i fiumi Adda e Oglio hanno partecipato con massime piene agli eventi del 1812 e del 1868, pur fornendo un apporto sensibile in almeno altre quattro occasioni;
- i corsi d'acqua del versante appenninico raramente determinano un rilevante contributo alla piena del Po; volumi d'acqua di una certa importanza sono pervenuti dai fiumi Secchia e Panaro solo in occasione degli eventi del 1839 e del 1872.

Di seguito (Grafico 1, Grafico 2, Grafico 3, Grafico 4, Grafico 5 e Grafico 6) vengono rappresentati i valori massimi dei livelli raggiunti a Becca, Piacenza, Cremona, Boretto, Borgoforte e Pontelagoscuro, mentre la Tabella 2 propone una sintesi dei valori di portata al colmo di piena ricostruiti per le sezioni fluviali indicate. I valori di portata al colmo indicati nella Tabella 2 sono tratti in particolare da Magis.Po-SIMPO (1982) e AdBPo (2005). Essi sono anche

rappresentati nel Grafico 7 in funzione dell'ascissa curvilinea adottata nel PAI (AdBPo, 1999 e aggiornamenti).



Figura 9: Collocazione degli idrometri lungo il fiume Po

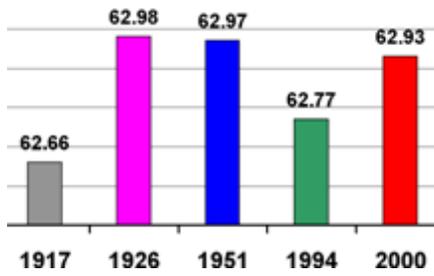


Grafico 1: Massime altezze di piena (m slm) a Becca

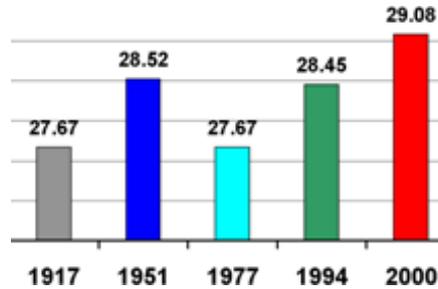


Grafico 4: Massime altezze di piena (m slm) a Boretto

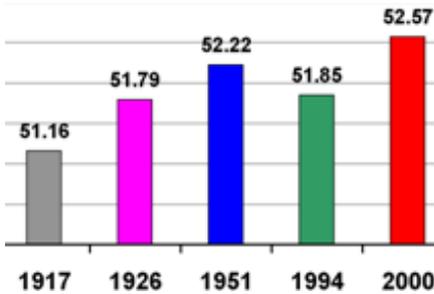


Grafico 2: Massime altezze di piena (m slm) a Piacenza

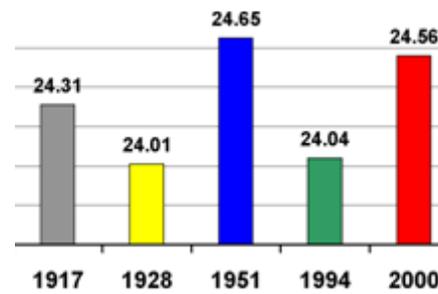


Grafico 5: Massime altezze di piena (m slm) a Borgoforte

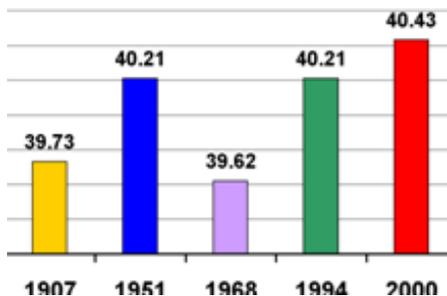


Grafico 3: Massime altezze di piena (m slm) a Cremona

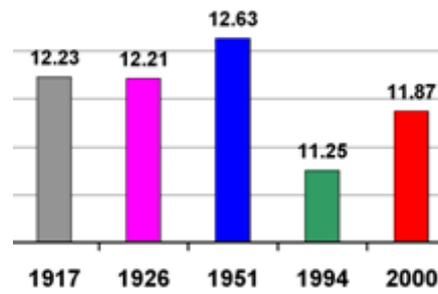


Grafico 6: Massime altezze di piena (m slm) a Pontelagoscuro

	1951 (SIMPO, 1982)	1951 (AdBPo, 2005)	1968 (AdBPo, 2005)	1994 (AdBPo, 2005)	2000 (AdBPo, 2005)
Località	[m <sup>3</sup> /s]				
Pontelagoscuro	11000	10300	7900	8750	9750
Borgoforte	11700	11800	7940	11000	11800
Boretto	12100	12100	8700	10400	11900
Casalmaggiore	12700				
Cremona	13500		10600	11300	11850
Piacenza	12800	12800	9500	11055	12240
Spessa	11300				11200
Becca		11250	9060	11500	
Isola S. Antonio				10500	10500

Tabella 2: Portate storiche massime al colmo (AdBPo-DISTART, 2008)

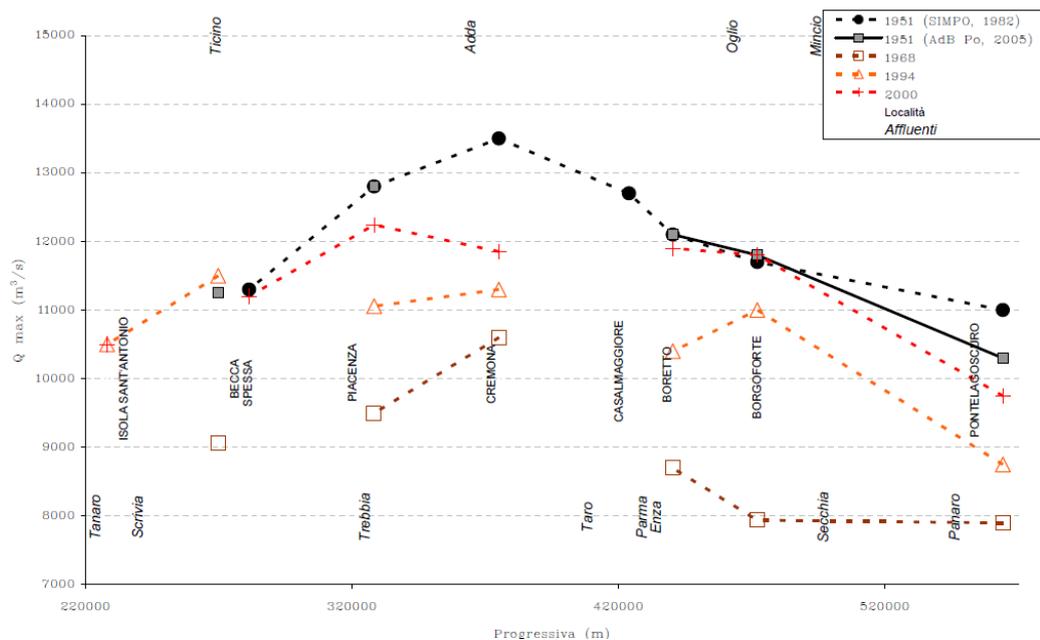


Grafico 7: Andamento delle portate storiche massime al colmo in funzione della distanza progressiva da Foce Tanaro (km 224.395)

Sulla base dei dati riportati in Tabella 2 e Grafico 7, l'analisi dell'evento di piena del 1968 riveste un limitato interesse, essendo l'evento stesso nettamente meno intenso di quelli del 1951, 1994 e 2000. La tabella e il grafico citati mostrano invece una spiccata analogia tra l'evento di piena del 1951 e quello del 2000 in termini di portata al colmo.

Va però ricordato che mentre nell'evento di piena del 1951 il contributo degli affluenti appenninici emiliani è stato tutt'altro che trascurabile, il recente evento del novembre 1994 è stato generato quasi esclusivamente dalle piene dei corsi d'acqua piemontesi, fra cui appunto il Tanaro. Un discorso pressoché analogo può essere fatto per l'evento del 2000, nel quale però è stato rilevato anche il contributo degli affluenti lombardi.

Oltre alla spiccata somiglianza in termini di profilo di piena osservato per gli eventi 1994 e 2000, è importante segnalare come tutti gli eventi di piena storici qui considerati, a eccezione di quello meno significativo del 1968, mostrino una sensibile riduzione delle portate al colmo della piena tra Borgoforte e Pontelagoscuro.

Di seguito un breve approfondimento sulla piena dell'ottobre 2000.

Essa è stata caratterizzata sì dai livelli massimi raggiunti ma, in modo particolare, dalla durata del colmo, elementi compatibili con i rilevanti valori delle precipitazioni registrate nei bacini dell'alto Po, specialmente in quelli della Dora Baltea, del Sesia, del Tanaro, del Ticino e dell'Adda. Le esondazioni verificatesi tra Crescentino e Casale Monferrato hanno ridotto gli effetti della piena che, altrimenti, avrebbe fatto registrare valori superiori su tutta l'asta del Po, in modo particolare agli idrometri di Ponte Valenza e di Pavia.

La velocità di propagazione del colmo nel tratto compreso tra Ponte Valenza e Boretto è risultata significativamente ridotta rispetto alla velocità media osservata nel corso delle piene di maggiore frequenza; la riduzione varia dal 22% al 47% mentre non possono essere confrontate le velocità registrate a valle di Boretto in quanto l'innescio simultaneo dei fenomeni di invaso di numerose golene chiuse ha determinato la quasi contemporaneità del colmo agli idrometri di Revere, Pontelagoscuro e Polesella.

Soltanto in Valle d'Aosta e in Piemonte sono stati allagati 153 comuni, mentre nel tratto a valle della stazione strumentata di Becca tutte le golene chiuse presenti sono state invase nel corso della piena per sormonto, cedimento diretto dell'argine golenale o per taglio artificiale dello stesso argine.

Complessivamente tra Becca e Pontelagoscuro il volume di invaso disponibile ed effettivamente occupato dalla piena del 2000 nelle golene chiuse ammonta a

circa 446 Mm<sup>3</sup>, a cui corrisponde un invaso equivalente sulla lunghezza dell'asta di circa 1.6 Mm<sup>3</sup>/km.

Per avere un'idea dell'imponenza delle piene del Grande Fiume, ecco alcuni altri dati relativi alla suddetta piena:

- le piogge eccezionali hanno raggiunto punte di 600 mm in alcune zone in poche ore, per un valore cumulato nei cinque giorni dal 13 al 17 ottobre di oltre 700 mm;
- il Grande Fiume in pochi giorni ha riversato in Adriatico 1 miliardo di m<sup>3</sup> di acqua;
- in certi paesi lungo gli argini, il dislivello tra l'acqua e le case sottostanti risultava dell'ordine di 7-8 m;
- secondo i dati della Protezione Civile l'alluvione ha provocato 21 vittime;
- le persone evacuate nelle zone lungo il Po durante l'emergenza sono state oltre 40000;
- si stima che le persone impiegate sul campo tra volontari, uomini dei Vigili del Fuoco, Polizia ed Esercito siano state 11000.



**Figura 10: La piena del Po del 2000 a Torino**



Figura 11: Scala idrometrica del fiume Po



Figura 12: I vari livelli delle piene del Po

### 2.1.3. Autorità sul Fiume

La necessità di un organo che si occupasse della gestione del fiume Po è stata avvertita per la prima volta già nel 1806, quando Eugenio Napoleone, Viceré d'Italia, aveva istituito un "Magistrato civile per lavori generali che riguardano il grande sistema del Po", mentre a Parma aveva sede l'Ufficio di Ispezione superiore del Genio Civile per il Po. Dopo l'Unità d'Italia, in occasione delle prime grandi piene del secolo, quelle del 1907 e del 1917, si sentì l'esigenza di individuare una struttura unica alla quale affidare il coordinamento unitario dell'attività idraulica di tutto il complesso denominato Bacino del Po.

Nel 1924 fu quindi istituito il Circolo di Ispezione del Genio Civile per il Po, con sede a Parma, al quale vennero affidati i compiti di vigilanza sui progetti e sull'esecuzione delle opere riguardanti la sistemazione e la regolarizzazione degli alvei e sulla polizia idraulica in tutto il corso del Po e dei suoi affluenti.

In seguito alla catastrofica alluvione del 1951, venne istituito con la legge 735/56 il Magistrato per il Po e i suoi affluenti, il cui compito era coordinare le

competenze dei vari organi preposti; le leggi 240/58 e 1484/62 lo trasformarono poi in un organo di amministrazione di tipo attivo con pieni poteri decisionali in materia di programmazione, esecuzione e gestione delle opere di difesa dell'intero bacino.

Tale ente, già organo decentrato interregionale del Ministero dei Lavori Pubblici, poi organo decentrato interregionale del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti e del Ministero dell'Ambiente e del Territorio, dal gennaio 2003 è divenuto l'Agenzia Interregionale per il fiume Po (AIPO), in attuazione di quanto previsto dall'art. 89 del decreto legge 112/1998. Le regioni interessate, ossia Piemonte, Lombardia, Emilia Romagna e Veneto, hanno quindi recepito tale decreto attraverso leggi regionali (rispettivamente L.R. 38/2001, L.R. 5/2002, L.R. 42/2001 e L.R. 4/2002).

Parallelamente all'Agenzia opera l'Autorità di bacino del fiume Po, la cui attività principale, per effetto delle nuove norme sulla difesa del suolo (cfr. Legge 183/89), consiste nello studio e nella predisposizione del Piano di bacino e nella programmazione, nel coordinamento e nel controllo dei relativi Piani Stralcio a livello di sottobacino.

Le principali attività dell'AIPO possono invece venire identificate con la progettazione ed esecuzione degli interventi sulle opere idrauliche di prima, seconda e terza categoria (si veda Testo Unico n. 523/1904) sull'intero bacino del Po, nonché con i compiti di Polizia Idraulica e Servizio di Piena sulle opere idrauliche di prima, seconda (Regio Decreto 2669/1937) e terza categoria arginata (art. 4 comma 10ter Legge 677/1996). Dette attività vengono svolte dal personale idraulico lungo tutti i tratti arginati, che ammontano ad un totale di 3654 km, suddivisi in 94 tronchi di custodia (Ufficiali Idraulici) e 220 tronchi di guardia (Sorveglianti Idraulici).

Le problematiche connesse con la stabilità arginale e la tutela delle opere idrauliche erano già note in tempi remoti, mentre gli interventi e i servizi di tutela, pur già esistenti, vennero sistematizzati su tutta l'asta praticamente dall'Unità d'Italia con l'istituzione degli uffici provinciali del Genio Civile e in seguito con l'emanazione del R.D. 25 luglio 1904 n. 523 ("Testo Unico delle disposizioni di legge intorno alle opere idrauliche delle diverse categorie") e del

R.D. 9 dicembre 1937 n. 2669 (“Regolamento sulla tutela delle opere idrauliche di prima e seconda categoria e delle opere di bonifica”). Tali disposizioni di legge, tuttora vigenti seppure con qualche integrazione e modifica, hanno regolato e regolano tuttora l’attività di Polizia Idraulica e Servizio di Piena. In particolare il R.D. 523/1904 all’art. 96 prende in esame e regola tutte le attività che possono arrecare danni alle arginature.

Il corpo normativo relativo alle materie di cui si occupa, a vario titolo, l’Agenzia Interregionale per il fiume Po si è via via arricchito nel corso degli anni; in particolare vale la pena di citare i contributi più recenti: la L. 183/1989 (“Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo”), la L. 225/1992 (“Istituzione del servizio nazionale della protezione civile”), la L. 36/1994 (“Disposizioni in materia di risorse idriche”) e la L. 37/1994 (“Norme per la tutela ambientale delle aree demaniali dei fiumi, dei torrenti, dei laghi e delle altre acque pubbliche”). Di particolare rilievo risulta la prima, poiché, come già accennato, da essa vennero istituite le Autorità di bacino.

Tra i Piani Stralcio, invece, di primaria importanza risulta essere il “Piano Stralcio delle Fasce Fluviali” (PSFF, 1995), in cui per la prima volta è stata introdotta, a livello di bacino, la suddivisione delle pertinenze fluviali in fasce aventi diverso grado di interesse da parte dei fenomeni di deflusso: Fascia A o di deflusso della piena ordinaria, Fascia B o di esondazione per la piena di riferimento ( $T_{rit} = 200$  anni), Fascia C o inondazione per piena catastrofica ( $T_{rit} = 500$  anni). Significativamente, all’interno di tali fasce sono state definite a norma di legge le attività ammesse e vietate, mettendo quindi definitivamente un freno alle pericolose intromissioni urbanistiche negli ambiti di pertinenza fluviale e alle attività antropiche, che spesso, nel recente passato, hanno messo a rischio l’equilibrio dei corsi d’acqua.

Le attività iniziate col PSFF sono proseguite col “Piano per l’Assetto Idrogeologico” (PAI, 2001) che, inglobando i contenuti dei precedenti Piani Stralcio (fra cui il PS45, redatto in conseguenza degli eventi alluvionali del novembre 1994), ha preso organicamente in esame tutte le varie situazioni di criticità idrogeologica del bacino. Per quanto riguarda il reticolo idrografico relativo ai corsi d’acqua principali (interessati dalle fasce fluviali), il progetto di assetto idraulico per la messa in sicurezza, una volta analizzate le situazioni di dissesto in atto, è proseguito determinando dapprima la portata di riferimento

( $T_{rit} = 200$  anni), studiando quindi la risposta idraulica della rete fluviale e ipotizzando l'assetto di progetto sulle aste principali del bacino.

## **2.2. *Strumenti di analisi di dati georeferenziati: il GIS***

Il termine GIS (Geographic Information System) viene solitamente adottato per indicare un sistema informativo computerizzato che permette l'acquisizione, la registrazione, l'analisi, la visualizzazione e la restituzione di informazioni derivanti da dati geografici (georeferenziati), associando a ciascun elemento geografico una o più descrizioni alfanumeriche.

È composto da una serie di strumenti software per acquisire, memorizzare, estrarre, trasformare e visualizzare dati spaziali dal mondo reale.

Il software utilizzato nel presente lavoro di tesi è stato ArcGIS, una suite integrata di applicazioni GIS avanzate, disponibile in tre livelli funzionali: ArcView, ArcEditor e ArcInfo.

Per la rappresentazione di dati georeferenziati occorre formalizzare un modello rappresentativo flessibile che si adatti ai fenomeni reali. Nel GIS questo viene realizzato attraverso tre tipologie di informazioni:

- geometriche, ossia relative alla rappresentazione cartografica degli oggetti, quali la forma (punto, linea, poligono), la dimensione e la posizione geografica;
- topologiche, ovvero riferite alle relazioni reciproche tra gli oggetti (ad esempio connessione, adiacenza, inclusione, ecc.);
- informative, ovvero riguardanti i dati (numerici, testuali, ecc.) associati a ogni oggetto.

La gestione di tali informazioni avviene tramite un database relazionale, mentre la loro elaborazione è supportata da una vasta gamma di funzionalità. La loro codificazione avviene attraverso due tipologie principali di dati: i dati vettoriali e i dati raster.

I dati vettoriali sono costituiti da elementi semplici quali punti, linee e poligoni, codificati e memorizzati sulla base delle loro coordinate e a ciascuno dei quali è

associato un record del database informativo che contiene tutti gli attributi dell'oggetto rappresentato.

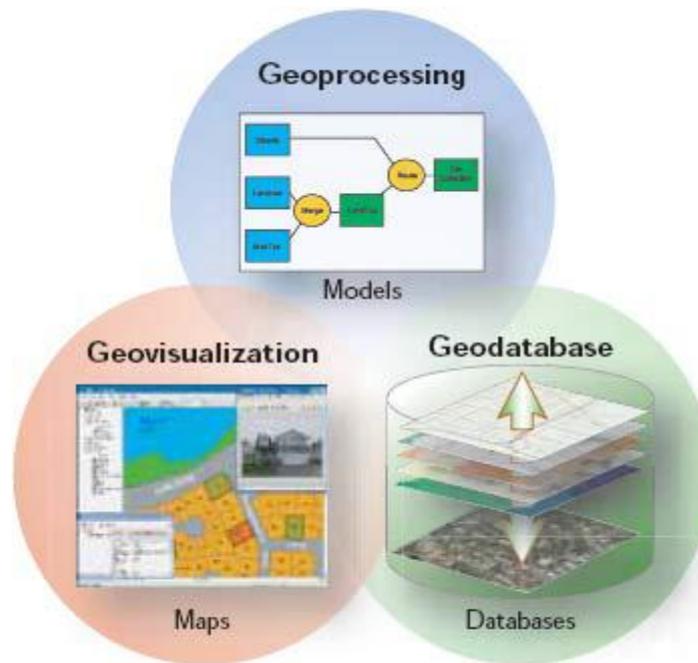
I dati raster schematizzano invece il mondo reale attraverso una matrice di celle dette pixel, a ciascuna delle quali sono associate le informazioni relative all'elemento rappresentato; la dimensione del pixel, generalmente espressa nell'unità di misura della carta (metri, chilometri, ecc.), è strettamente connessa con la precisione del dato.

I dati vettoriali e i dati raster si adattano a usi diversi: i primi sono particolarmente adatti alla rappresentazione di dati che variano in modo discreto, i secondi alla rappresentazione di dati con variabilità di tipo continuo.

Tali informazioni sono utilizzabili dall'utente con diversi approcci:

- approccio del geodatabase: un GIS è un database spaziale, ossia un database contenente dataset che comprendono l'informazione geografica. Tramite un modello di dati specializzato, esso consente la gestione di elementi vettoriali, immagini raster, topologie, reti, ecc.;
- approccio della geovisualizzazione: un GIS consente di costruire rappresentazioni geografiche complete e complesse (mappe), in cui vengono visualizzati gli elementi e le loro relazioni spaziali sulla superficie terrestre. Si possono costruire sia mappe di base che mappe "avanzate", utilizzando le informazioni geografiche associate ai dati. Tali mappe possono essere archiviate e riutilizzate per supportare l'interrogazione, l'analisi e l'editing dei dati;
- approccio del geoprocessing: un GIS è un insieme di strumenti operativi per l'analisi geografica e l'elaborazione delle informazioni. Le funzioni di geoprocessing, a partire da dataset geografici esistenti, consentono di applicarvi delle funzioni analitiche e memorizzare i risultati in nuovi dataset.

Tali approcci sono complementari e rappresentano uno strumento completo per tutte le applicazioni a carattere geografico.



**Figura 13: Le tre viste di un GIS**

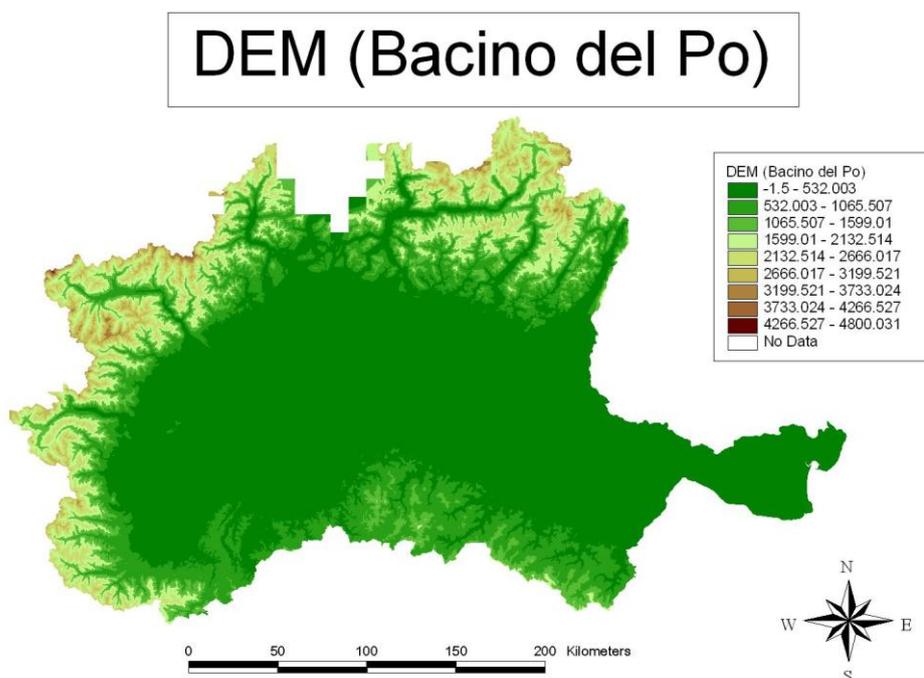
ArcView è il primo dei tre livelli funzionali di ArcGIS e comprende tutti questi approcci, rappresentati rispettivamente da ArcCatalog (il GIS è una collezione di dataset geografici), da ArcMap (il GIS crea ed elabora mappe) e da ArcToolbox (il GIS è una collezione di strumenti per l'analisi geografica o geoprocessing). ArcView offre quindi la possibilità di visualizzare, interrogare, analizzare e integrare dati geografici, oltre alle funzionalità che consentono di creare e modificare le informazioni geografiche a seconda delle proprie esigenze. Proprio per queste ragioni è stata utilizzata quest'applicazione come supporto per il presente lavoro di tesi.

### 2.2.1. Informazione topografica disponibile

I dati sul bacino del Po a disposizione per il lavoro sono:

- DEM (Digital Elevation Model, modello digitale del terreno in formato raster, in cui a ogni pixel è associata la quota assoluta del punto del territorio rappresentato) - Figura 14 e Figura 15;

- CTR (Carte Tecniche Regionali, in scala 1:25000);
- ortofoto (fotografie aeree georeferenziate e assoggettate a orto rettifica - tale procedimento corregge gli effetti della distorsione della lente e dell'orientamento della macchina fotografica sulla base di rilievi topografici, rendendo le foto geometricamente corrette ed equiparabili a mappe e consentendo pertanto su di esse la misurazione di distanze reali);
- idrografia (layer di ArcView contenente la planimetria dei corsi d'acqua del bacino e informazioni associate) - Figura 16;
- planimetria delle sezioni (layer di ArcView contenente le tracce in pianta delle sezioni Brioschi e di quelle, in parte ruotate e/o traslate per esigenze di modellazione, utilizzate in HEC-RAS) - Figura 17;
- livellazione degli argini (layer di ArcView contenente la planimetria degli argini e le informazioni relative alla loro altezza secondo il rilievo topografico del 2005);
- planimetria delle fasce fluviali (informazione topografica sulla suddivisione delle aree prospicienti il Po in Fascia A, B o C secondo la definizione adottata dall'AdBPo) - Figura 18.



**Figura 14: DEM (modello digitale delle quote del terreno) disponibile per il bacino del Po**

## DEM (Fascia C)

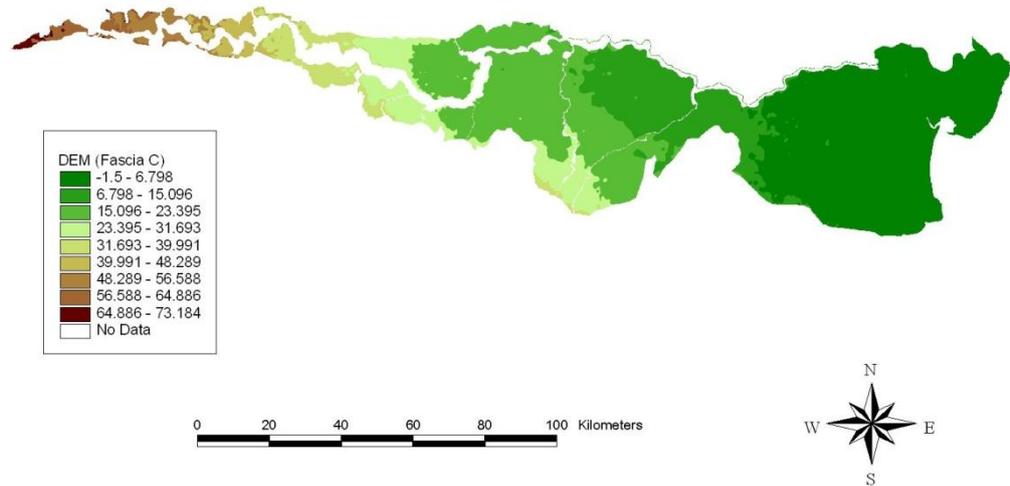


Figura 15: DEM (modello digitale delle quote del terreno) disponibile per la Fascia C

## Idrografia del bacino del Po

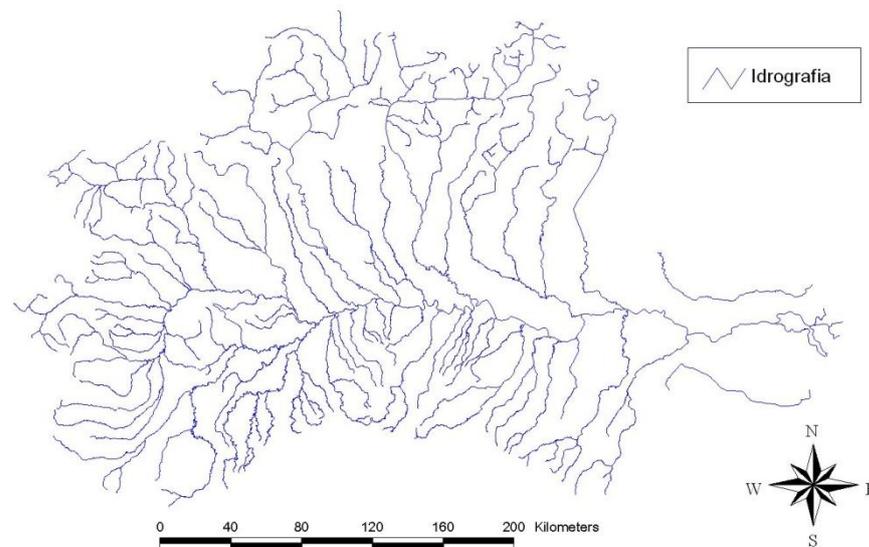
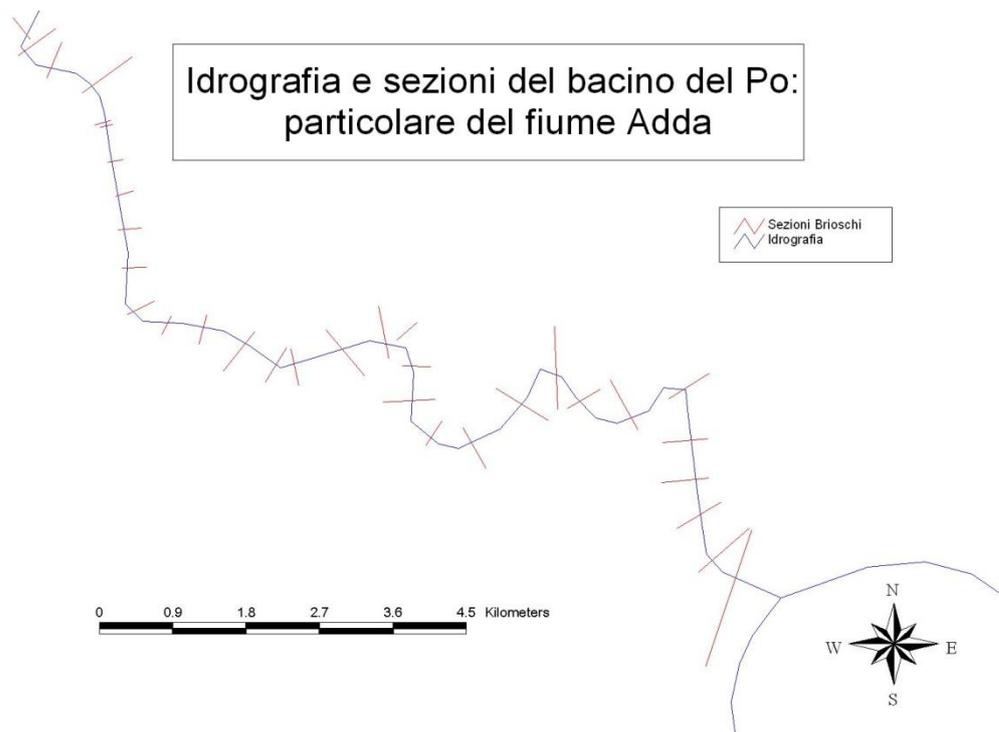
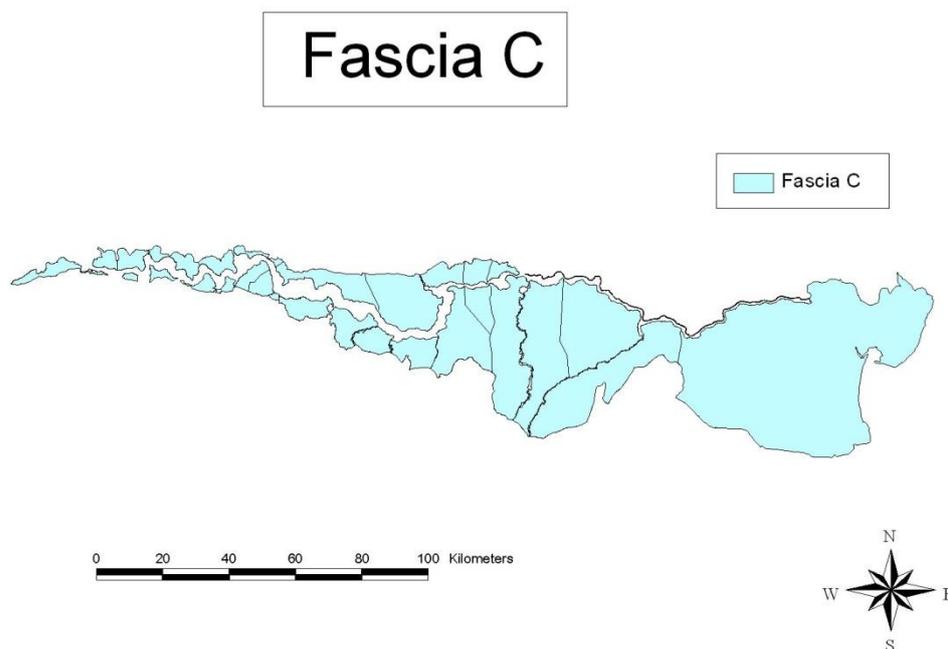


Figura 16: Idrografia principale del bacino del Po



**Figura 17: Fime Adda: sviluppo planimetrico del corso d'acqua e sovrapposizione delle sezioni trasversali utilizzate nella modellazione idraulica.**



**Figura 18: Comparti idraulici della Fascia C (AdB-Po, 1999)**

### 3. VALUTAZIONE DEL RISCHIO IDRAULICO E IDROGEOLOGICO E CLASSIFICAZIONE DELLE FASCE FLUVIALI

#### 3.1. Definizione di rischio idraulico

I diversi fattori che compongono il rischio, secondo la definizione riconosciuta in sede internazionale e ripresa nel Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) dall'AdBPo (1999), si riassumono nella seguente espressione:

$$R = E \cdot H \cdot V$$

dove:

$R$  = rischio relativo a un determinato elemento, inteso come il valore atteso del danno che mediamente può subire l'elemento stesso in un prefissato periodo di tempo;

$E$  = entità degli elementi a rischio, cioè le persone e i beni che possono subire danni quando si verifica un evento, misurata in modo diverso a seconda della loro natura;

$H$  = pericolosità (*Hazard*), cioè probabilità di accadimento di un determinato fenomeno potenziale in uno specifico periodo di tempo e in una data area; il valore di  $H$  è strettamente connesso al tempo di ritorno di un evento  $T_{rit}$ , che esprime l'intervallo di tempo nel quale l'evento si verifica in media una volta. Vale infatti la relazione:

$$H = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_{rit}}\right)^N$$

dove:

$N$  = orizzonte temporale all'interno del quale valutare la pericolosità, espresso in anni.

$V$  = vulnerabilità, definita come attitudine dell'elemento a rischio a subire danni per effetto dell'evento stesso (aliquota dell'elemento a rischio che viene danneggiata); è compresa tra 0 (nessun danno) e 1 (perdita totale).

È evidente che a un determinato elemento a rischio possono competere, in funzione delle caratteristiche dell'evento, valori diversi di  $E$  e  $V$ ; inoltre, a parità di condizioni, gli stessi  $E$  e  $V$  possono variare in base a fattori puramente casuali, quali ad esempio il periodo dell'anno, il giorno della settimana e l'ora a cui l'evento si verifica. Pertanto  $E$  e  $V$  possono essere considerati come variabili casuali.

L'equazione del rischio è stata poi modificata giungendo a una forma semplificata della stessa, soprattutto in relazione alle forme di dissesto tipiche dei bacini montani, fenomeni gravitativi e di dinamica torrentizia, per i quali risulta molto complessa la valutazione quantitativa della pericolosità  $H$ , richiedendo informazioni dettagliate sulla ricorrenza temporale dei fenomeni e/o sulle loro cause.

Sono pertanto state adottate le seguenti semplificazioni:

- l'entità  $E$  degli elementi a rischio è stata rappresentata mediante il valore economico medio (espresso in euro) degli insediamenti, delle infrastrutture e delle attività produttive presenti nell'unità territoriale di riferimento; la quantificazione esclude la presa in considerazione del rischio per l'incolumità delle persone;
- la vulnerabilità  $V$  è stata stimata come valore medio riferito a ogni singola tipologia di elemento a rischio;
- la pericolosità  $H$  è stata valutata tramite un indicatore correlato allo stato di dissesto presente all'interno dell'unità territoriale elementare di riferimento, indicatore espresso tramite valori parametrici di densità superficiale.

La versione semplificata della relazione del rischio idraulico e idrogeologico diviene pertanto:

$$R = S \cdot E \cdot V$$

dove  $S$  costituisce l'indicatore di pericolosità.

Con le semplificazioni assunte, l'espressione del rischio esprime una valutazione relativa, ovvero consente una zonizzazione del territorio su basi semi-quantitative la cui funzione principale è quella di evidenziare in termini relativi la distribuzione del rischio a cui il territorio soggiace a causa di fenomeni idrogeologici naturali. I valori di rischio determinati tramite l'impiego dell'equazione sopra riportata vengono solitamente aggregati in quattro classi a valore crescente (da 1 = rischio moderato a 4 = rischio molto elevato); i limiti di ciascuna classe sono stati individuati attraverso procedure d'analisi statistica della distribuzione dei valori ottenuti.

Da tale definizione si evince come un termine su cui si possa efficacemente intervenire per ridurre il rischio sia il prodotto  $E \cdot V$ . Questa linea strategica di intervento si traduce nella pratica individuando sul territorio aree poco "sensibili", in virtù del loro minor valore o dell'inferiore vulnerabilità dei beni in esse presenti, e dunque adatte ad accogliere i volumi di piena esondanti in occasione di quegli eventi di piena incompatibili con i presidi idraulici preesistenti. L'esondazione controllata dei volumi di piena in tali aree avrebbe infatti il fine di tutelare le aree di maggior pregio, interessate da centri abitati, infrastrutture e beni di vario tipo, e di permettere migliori e più tempestivi interventi.

## **3.2. *Procedura metodologica***

### **3.2.1. Unità territoriale di riferimento**

L'applicazione dell'equazione del rischio è stata riferita a un'unità territoriale elementare costituita dai confini amministrativi comunali; la pericolosità connessa ai fenomeni di dissesto in atto e potenziali, il valore socio-economico e la vulnerabilità sono pertanto determinati tramite indicatori parametrici con riferimento all'intera unità territoriale, indipendentemente dalla distribuzione dei diversi parametri all'interno del comune.

### 3.2.2. Fenomeni di dissesto considerati

Le condizioni di dissesto idraulico e idrogeologico del territorio sono state rappresentate con riferimento alle seguenti cinque categorie di fenomeni prevalenti:

- frane;
- esondazioni;
- dissesti lungo le aste dei corsi d'acqua (erosioni di sponda, sovralluvionamenti, sovraincisioni del thalweg);
- trasporto di massa sui conoidi;
- valanghe.

Tali fenomeni sono rappresentati a livello cartografico secondo forme geometriche areali, poligonali aperte e poligonali puntuali. Per ognuna delle categorie elencate è stato valutato un parametro quantitativo utilizzato come indice della pericolosità. Per ogni unità territoriale elementare (comune) è stato calcolato lo stato di dissesto presente attraverso l'intersezione, con tecniche GIS, della cartografia del dissesto con i confini amministrativi; ciascuna unità è pertanto caratterizzata dalla dimensione (areale, lineare e puntuale) delle tipologie di dissesto presenti. Per le stesse unità elementari è stato calcolato il valore dei beni esposti a rischio, sulla base di indici espressivi delle attività umane, delle infrastrutture presenti e della relativa vulnerabilità.

### 3.2.3. Stima della pericolosità (S)

La pericolosità, in termini di indicatore S, è stata stimata in base allo stato di dissesto presente all'interno del territorio comunale; come già detto, l'indicatore non rappresenta, per ogni categoria di fenomeno, la probabilità con la quale un dissesto può verificarsi: molti casi sono di complessa valutazione, quindi tale parametro indica la densità superficiale del dissesto in atto e potenziale sul territorio.

Tale semplificazione comporta l'assunzione di una correlazione diretta tra la densità del dissesto rilevato e la probabilità del manifestarsi di nuovi eventi; si osserva infatti che la densità del dissesto presente su un'unità elementare abbastanza estesa, quale il territorio comunale, la cui rilevazione deriva dalla

raccolta di serie storiche di eventi sufficientemente lunghe, rappresenta una sorta di “frequenza” dei fenomeni di dissesto, anche se non esistono i presupposti per un’effettiva valutazione statistica.

Peraltro l’osservazione empirica delle piene storiche, anche recenti, rende evidente la ricorrenza dei fenomeni nelle stesse aree, a indicare che più alta è la concentrazione dei dissesti storicamente osservati, più alta può considerarsi la probabilità che se ne verificano di nuovi o che quelli presenti si riattivino.

Il grado di pericolosità è stato valutato singolarmente per ogni tipologia di dissesto (frane, esondazioni, dissesti della rete idrografica, conoidi e valanghe) e a livello di *pericolosità complessiva*, data dall’involuppo delle cinque tipologie componenti. La valutazione della pericolosità complessiva deriva dall’assunzione, per ciascuna unità elementare, del valore più elevato presente in funzione delle tipologie di dissesto esaminate; ciò in ragione dello scarso significato di operazioni di sommatoria di effetti, per considerare valori medi assoluti o pesati. Tale criterio, certamente cautelativo, consente di segnalare tutti i comuni che risultano a elevata pericolosità, anche per una sola forma di dissesto.

#### 3.2.4. Stima del danno (E)

Per la valutazione su base comunale del danno economico atteso a seguito del verificarsi di un fenomeno di dissesto è stata individuata, attraverso l’elaborazione e l’incrocio di dati statistici (essenzialmente fonte ISTAT), una serie di indici espressivi del valore delle entità esposte. Tali indici si distinguono in “indici di valore diffuso”, se riguardanti caratteri del territorio valutati sull’intera superficie comunale, e in “indici di valore puntuale” se espressivi della presenza d’insediamenti localizzati, quali industrie o infrastrutture di servizio.

Gli “indici” di valore diffuso riguardano i seguenti aspetti:

- densità territoriale della popolazione;
- concentrazione edilizia;
- intensità di utilizzazione agricola del territorio;

- concentrazione industriale;
- concentrazione di infrastrutture viarie (autostradali e ferroviarie);
- carico zootecnico;
- densità di presenza turistica.

Per gli “indici di valore puntuale” si è fatto riferimento a:

- impianti elettrici di rilevanti dimensioni (potenza maggiore di 3000 kW);
- centrali di pompaggio e distribuzione di gas metano;
- infrastrutture depurative civili e/o miste di significative dimensioni (maggiori di 10.000 A.E.);
- impianti di incenerimento rifiuti (maggiori di 10.000 t/anno di R.S.U o maggiori di 5.000 t/anno di R.I.);
- infrastrutture di servizio pubblico quali ospedali, aeroporti, stazioni ferroviarie.

Allo scopo di rendere confrontabili tra loro i vari indici, in modo tale da pervenire a una definizione complessiva del valore dell’unità elementare, è stato attribuito agli stessi un valore economico parametrico.

Per ciascuno degli indici di valore è stata stimata una vulnerabilità media, correlata alla tipologia del bene economico esposto, in funzione di valutazioni qualitative, effettuate sulla base di casi storici relativamente ai danni manifestatisi a seguito dei dissesti. La stima del valore economico e del danno atteso riferiti all’unità elementare deriva dalla semplice valutazione del numero degli elementi indicatori presenti all’interno del territorio comunale.

### 3.2.5. Interpretazione sintetica delle classi di rischio

Le precedenti considerazioni consentono l’assegnazione di classi di rischio alle unità elementari in cui è stato suddiviso il territorio del bacino idrografico; è evidente che la caratterizzazione è di tipo qualitativo, anche se fondata su una procedura di quantificazione numerica, ed è prevalentemente a carattere relativo.

In via qualitativa il significato fisico delle classi di rischio individuate è riconducibile alle seguenti definizioni che esprimono le conseguenze attese a seguito del manifestarsi dei dissesti:

- **moderato (R1)**, per il quale sono possibili danni sociali ed economici marginali;
- **medio (R2)**, per il quale sono possibili danni minori agli edifici e alle infrastrutture che non pregiudicano l'incolumità delle persone, l'agibilità degli edifici e lo svolgimento delle attività socio-economiche;
- **elevato (R3)**, per il quale sono possibili problemi per l'incolumità delle persone, danni funzionali agli edifici e alle infrastrutture con conseguente inagibilità degli stessi e l'interruzione delle attività socio-economiche, danni al patrimonio culturale;
- **molto elevato (R4)**, per il quale sono possibili la perdita di vite umane e lesioni gravi alle persone, danni gravi agli edifici e alle infrastrutture, danni al patrimonio culturale, la distruzione di attività socio-economiche.

### ***3.3. Classificazione delle fasce fluviali***

L'AdBPo in fase di redazione del Secondo Piano Stralcio per le Fasce Fluviali (PSFF, 1998) ha condotto una serie di analisi fluviali finalizzate all'identificazione di linee guida e criteri per l'individuazione delle fasce fluviali, elementi indispensabili alla delimitazione stessa delle fasce.

Per i corsi d'acqua principali nei tratti di pianura e di fondovalle montano è stata condotta in particolare una valutazione delle modalità di deflusso delle portate di piena per assegnati tempi di ritorno  $T_{rit}$  (20, 100, 200 e 500 anni), delimitando l'alveo di piena e le aree inondabili.

L'analisi ha consentito di:

- migliorare la stima del rischio idraulico nella regione fluviale;
- valutare il livello di protezione delle opere idrauliche esistenti e individuare la necessità di nuove opere;
- delimitare le fasce fluviali.

L'asta del Po è stata oggetto di un particolare approfondimento di valutazione attraverso i seguenti punti:

- analisi della portata massima al colmo defluente nell'attuale condizione di assetto delle arginature;
- definizione del profilo di inviluppo di piena per un tempo di ritorno omogeneo lungo l'asta, pari a 200 anni;
- delimitazione delle aree potenzialmente allagabili in caso di rotta arginale, sulla base dell'analisi delle rotte storiche, delle caratteristiche morfologiche del territorio circostante e delle grandezze idrauliche coinvolte.

L'analisi è stata finalizzata alla delimitazione della Fascia C, che per tutto il tratto medio-inferiore dell'asta corrisponde alla situazione di un evento catastrofico che provochi una o più rotte degli argini (per sormonto o per cedimento del corpo arginale), e all'individuazione degli interventi di adeguamento del sistema arginale esistente.

Di seguito si riportano le assunzioni e i criteri generali per l'articolazione in fasce della regione fluviale:

*“L'applicazione del metodo di delimitazione delle fasce fluviali alle condizioni degli alvei dei corsi d'acqua oggetto del presente secondo Piano Stralcio delle Fasce Fluviali ha comportato alcune puntualizzazioni tecniche delle procedure di applicazione e un affinamento e approfondimento dei diversi elementi conoscitivi e di elaborazione.*

*Si richiamano di seguito le definizioni adottate per le fasce fluviali:*

- *«Fascia A» di deflusso della piena; è costituita dalla porzione di alveo che è sede prevalente, per la piena di riferimento, del deflusso della corrente, ovvero che è costituita dall'insieme delle forme fluviali riattivabili durante gli stati di piena;*
- *«Fascia B» di esondazione; esterna alla precedente, è costituita dalla porzione di alveo interessata da inondazione al verificarsi dell'evento di piena di riferimento. Con l'accumulo temporaneo in tale fascia di parte del volume di piena si attua la laminazione dell'onda di piena con riduzione delle portate di colmo. Il limite della fascia si estende fino al punto in cui le quote naturali del terreno sono superiori ai livelli idrici corrispondenti alla piena di riferimento ovvero sino alle opere idrauliche di controllo delle*

*inondazioni (argini o altre opere di contenimento), dimensionate per la stessa portata;*

- *«Fascia C» di inondazione per piena catastrofica; è costituita dalla porzione di territorio esterna alla precedente (Fascia B), che può essere interessata da inondazione al verificarsi di eventi di piena più gravosi di quelli di riferimento.*

*I criteri generali, comuni a tutti i corsi d'acqua interessati, che hanno condotto alla delimitazione delle fasce fluviali sono riferibili ai seguenti punti:*

- ***Fascia di deflusso della piena (Fascia A).** Per i corsi d'acqua arginati la delimitazione della Fascia A coincide frequentemente con quella della Fascia B (fascia di esondazione), a sua volta delimitata dal tracciato dell'argine. Eccezioni a tale sovrapposizione si hanno nei casi in cui si sia in presenza di golene chiuse (aree golenali il cui allagamento è regolato da un sistema arginale minore), ovvero di golene aperte caratterizzate da un'estensione planimetrica particolarmente ampia al punto che la porzione contribuente al moto non arriva al limite degli argini. La stessa situazione si verifica nei tratti di attraversamento urbano, in cui frequentemente il corso d'acqua è strettamente vincolato da opere di sponda e da argini di contenimento.*
- ***Fascia di esondazione (Fascia B).** Per i corsi d'acqua arginati (arginature esistenti) la Fascia B è fatta coincidere con il piede esterno dell'argine maestro, anche nelle situazioni in cui l'argine maestro sia eventualmente inadeguato al contenimento della piena di riferimento per la fascia stessa (tempo di ritorno 200 anni).*
- ***Area di inondazione per piena catastrofica (Fascia C).** Per gli affluenti principali a valle della confluenza del Fiume Tanaro, compresi quelli in cui vi è presenza di arginature discontinue, ovvero è prevista la realizzazione di nuovi argini, la Fascia C è delimitata assumendo la piena teorica con tempo di ritorno di 500 anni.*

*Per l'asta del fiume Po la Fascia C, delimitata nel presente Piano nel tratto medio-inferiore dell'asta, corrisponde alla situazione di un evento catastrofico che comporti una o più rotte degli argini (per sormonto o per cedimento del*

corpo arginale); essa è rappresentata raccordando le quote idriche di piena catastofica (Fascia C) degli affluenti principali entro il limite fisico del bacino. Nei casi in cui, in ragione dell'andamento topografico del terreno, il limite esterno della Fascia C coincide con quello della B, viene rappresentato convenzionalmente solamente il limite della Fascia B”.

Uno schema esplicativo della definizione delle fasce fluviali è riportato in Figura 19.

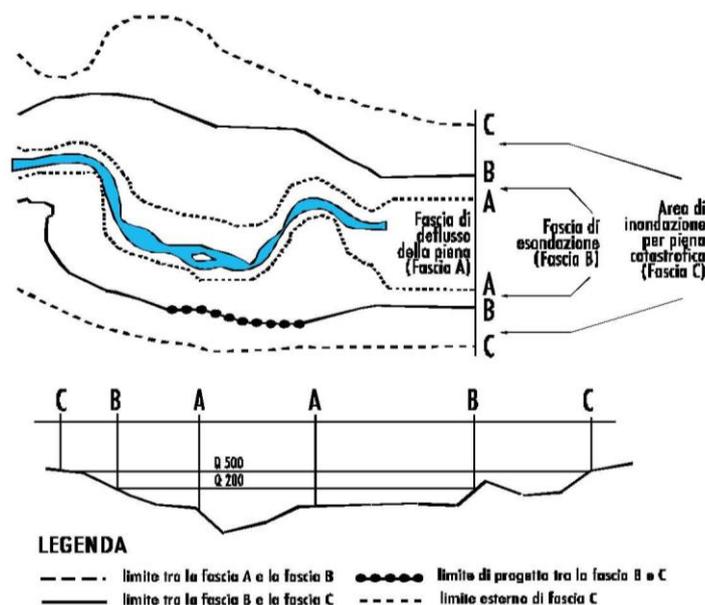


Figura 19: Schema esplicativo per la definizione delle fasce fluviali (Adb-Po, 1999)

Di seguito vengono illustrati in sintesi gli elementi caratteristici principali della delimitazione delle fasce fluviali per il fiume Po. In relazione al metodo utilizzato, le fasce fluviali sono state delimitate in funzione dei principali elementi dell'alveo che ne determinano la connotazione fisica: caratteristiche geomorfologiche, dinamica evolutiva, opere idrauliche, caratteristiche naturali e ambientali.

La Fascia A e la Fascia B del Po nel tratto *da Martiniana Po all'incile del Delta*, nonché la Fascia C nel tratto *da Martiniana Po alla confluenza del Sesia* sono state delimitate nel Piano Stralcio delle Fasce Fluviali.

Trattandosi di un sistema fluviale delimitato da argini praticamente senza soluzione di continuità, il limite della Fascia C è stato perimetrato in modo da rappresentare l'inviluppo delle aree potenzialmente allagabili in caso di rotte; la delimitazione è stata effettuata con riferimento alle quote idriche che si instaurano in corrispondenza delle ipotetiche aperture nel corpo arginale di brecce che si manifestano in caso di rotta. Si è inoltre tenuto conto dell'estensione degli allagamenti verificatisi in occasione delle rotte storiche documentate, quali elementi di taratura e di riscontro delle valutazioni idrauliche, e delle caratteristiche geomorfologiche della porzione di territorio potenzialmente inondabile.

Fino alla *confluenza del Ticino* la fascia presenta un'ampiezza variabile, fino a un massimo di circa 11 km nella zona di confluenza con il Ticino, e si attesta in generale lungo la linea di inviluppo di paleoalvei antichissimi, prevalentemente meandriformi. All'interno della fascia sono compresi alcuni abitati significativi, quali Casei Gerola (in parte), Pancarana, Bastida, Cava Manara e S. Martino Siccomario.

Nel tratto *dalla confluenza del Ticino a Piacenza* la fascia ha ampiezza molto variabile, da un minimo di 5-6 km nel tratto foce Ticino-Belgioioso, a oltre 10 km poco a monte di foce Lambro, dove il limite sinistro si attesta lungo la sponda di un paleoalveo meandriforme molto distante dall'attuale corso del Po. All'interno della fascia sono presenti vari centri abitati, in particolare Mezzanino, Albaredo Arnaboldi, Spessa, S. Zenone al Po, Zerbo, Pieve Porto Morone, Monticelli Pavese e Calendasco.

Nel tratto *da Piacenza a Cremona* la Fascia C di Po assume un'estensione sensibilmente superiore rispetto al tratto precedente, in quanto si raccorda in un'unica ampia area con le analoghe fasce C del Nure e del Chiavenna in destra e dell'Adda in sinistra. Il limite coincide sia con opere viarie in rilevato sia, saltuariamente, con elementi morfologici naturali (orli di terrazzo antichi). All'interno della fascia sono presenti vari abitati significativi, in particolare nel settore più prossimo alla foce dell'Adda: Caselle Landi, Maccastorna, Crotta d'Adda e Castelnuovo Bocca d'Adda.

Nel tratto *da Cremona alla confluenza dell'Oglio* l'ampiezza della Fascia C aumenta significativamente, sia per l'assenza quasi generale di elementi naturali di contenimento (paleosponde, orli di terrazzo), più o meno saltuariamente

presenti nei tratti precedenti, sia per la presenza degli affluenti emiliani e lombardi, le cui fasce C si raccordano con quella del Po in un'unica ampia area. Ne risulta una fascia ampia fino a circa 25 km nel tratto tra la foce del Parma in destra e quella dell'Oglio in sinistra. All'interno della fascia sono presenti vari centri abitati significativi come Gussola, Martignana Po, Casalmaggiore, Viadana, Guastalla, Luzzara, Suzzara, Gonzaga e Moglie, oltre a numerosissimi insediamenti minori.

A valle della confluenza dell'Oglio l'ampiezza delle aree potenzialmente interessate da piene catastrofiche aumenta ulteriormente, a causa della mancanza di elementi morfologici naturali di contenimento dei livelli idrici di inondazione. Come nel tratto precedente il limite si attesta dunque spesso su rilevati di opere viarie, che interrompono l'uniformità della pianura, a distanze anche di 20-30 km dal corso attuale. La Fascia Comprende al suo interno grandi agglomerati urbani, in particolare le città di Ferrara e di Mantova (quest'ultima al raccordo tra la Fascia C di Po e del Mincio), oltre a numerosissimi centri abitati minori.

A valle della confluenza del Mincio in sinistra e dall'altezza di Ferrara in destra, la Fascia C interessa ampi territori esterni al limite del bacino: in destra segue l'argine del fiume Reno fino alla foce e in sinistra si raccorda al limite della Fascia C del Mincio all'altezza di Mantova.

Si ritiene importante, inoltre, sottolineare come il lavoro di tesi descritto dalla presente dissertazione ricada perfettamente nel quadro organizzativo redatto dall'AdBPo nel PSFF, poiché tra gli obiettivi generali e specifici del Piano figurano i seguenti elementi:

- stabilire condizioni di equilibrio tra le esigenze di contenimento della piena, al fine della sicurezza della popolazione e dei luoghi, e quelle di laminazione della stessa, in modo tale da non incrementare i deflussi nella rete idrografica a valle;
- salvaguardare e ampliare le aree naturali di esondazione;
- limitare gli interventi artificiali di contenimento delle piene a scapito dell'espansione naturale delle stesse, e privilegiare, per la difesa degli abitati, interventi di laminazione controllata, al fine di non aumentare il deflusso sulle aste principali e in particolare sull'asta del Po;

- segnalare le condizioni di rischio idraulico ai fini della riduzione della vulnerabilità degli insediamenti in rapporto alle funzioni di protezione civile, soprattutto per la fase di gestione dell'emergenza.



## 4. MODELLI NUMERICO-IDRAULICI

### 4.1. *Il codice di calcolo HEC-RAS*

Tra i software disponibili per lo sviluppo e l'implementazione di modelli numerico-idraulici è stato selezionato il codice di calcolo HEC-RAS (River Analysis System sviluppato dall'Hydrological Engineering Center (HEC) dello United States Army Corps of Engineering (USACE); tale scelta è stata dettata dalla sua estrema affidabilità e duttilità, attestata dalle numerosissime applicazioni effettuate in tutto il mondo, e dalla larga disponibilità del codice tra i tecnici operanti nel settore dell'ingegneria idraulica. Tale diffusione, essenzialmente dovuta alla natura freeware del codice di calcolo, rappresenta anche una garanzia di riproducibilità e, dunque, di verificabilità delle elaborazioni presentate, con evidenti vantaggi in termini non solo di trasparenza, ma anche di confronto e approfondimento dei risultati conseguiti.

L'utente può interagire con HEC-RAS attraverso un'interfaccia grafica estremamente semplice e intuitiva, pur mantenendo un alto livello di efficienza.

Una volta inserite le caratteristiche geometriche del canale da modellare, queste vengono salvate in un file di tipo "geometry", mentre le relative condizioni al contorno del moto in un file di tipo "steady flow" o "unsteady flow".

Per effettuare una simulazione, le caratteristiche geometriche devono essere associate alle condizioni al contorno costituendo un "plan". HEC-RAS permette di effettuare un agevole confronto tra diversi scenari, poiché le condizioni al contorno possono venire condivise da più *plan* contemporaneamente.

HEC-RAS permette la simulazione del moto dell'acqua all'interno di canali naturali o artificiali tramite la messa a punto di modelli che possono essere definiti quasi-bidimensionali (quasi-2D). Infatti, sebbene le equazioni che vengono risolte per descrivere il moto siano strettamente di tipo monodimensionale e utilizzino la linea di fondo dell'alveo come unica variabile spaziale (ascissa curvilinea), esiste la possibilità di collegare delle golene laterali,

rendendo così schematizzabile una realtà bidimensionale. Il software può gestire una rete completa di canali o un singolo tratto di fiume, effettuando simulazioni in moto permanente o vario.

La funzione di moto permanente è in grado di modellare profili di livello a regime supercritico, subcritico e misto. La procedura computazionale di base si fonda sulla soluzione di un'equazione energetica monodimensionale. Queste situazioni comprendono i calcoli del regime di corrente mista (ad esempio dove sono presenti salti idraulici), l'idraulica dei ponti e la valutazione dei profili alle confluenze dei fiumi. La funzione di moto permanente è progettata per essere applicata nella gestione di aree allagabili e negli studi di messa in sicurezza dei fiumi. Inoltre il programma è in grado di valutare i cambiamenti dei profili di livello dovuti a modifiche e ad argini naturali.

Le caratteristiche avanzate della funzione di moto permanente comprendono l'analisi di *plan* multipli, i calcoli di profili multipli, l'analisi di aperture multiple di dighe e/o ponti, l'analisi dell'erosione dei ponti e la progettazione di canali artificiali.

La funzione di moto vario, invece, di interesse per il presente lavoro, si avvale di uno schema implicito alle differenze finite per la risoluzione delle equazioni complete di De Saint Venant:

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} = i - j \\ \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \end{cases}$$

dove:

h = tirante idrico;

u = velocità;

i = pendenza del corso d'acqua;

j = cadente idraulica;

Q = portata idrica in transito;

A = area bagnata della generica sezione fluviale.

Le equazioni di De Saint Venant per il moto vario (dipendente dal tempo) si basano su tre ipotesi fondamentali:

- 1) corrente gradualmente variata o lineare, che implica una distribuzione idrostatica delle pressioni lungo una generica sezione verticale;
- 2) ipotesi di sezioni trasversali piane e verticali, ossia linea del carico piezometrico della corrente coincidente con il pelo libero;
- 3) fluido incomprimibile (per l'acqua questo punto è sempre verificato, tranne nel caso di colpo d'ariete).

Le caratteristiche avanzate della funzione di moto vario comprendono l'analisi delle falle delle dighe, il sormonto e la formazione delle brecce negli argini, le stazioni di pompaggio, il funzionamento delle dighe di navigazione e i sistemi di tubature in pressione.

Nei calcoli, sia di moto uniforme che di moto vario, possono essere considerati gli effetti di ostruzioni di vario tipo, quali ponti, dighe, serbatoi e altre strutture nelle aree allagabili.

L'immagazzinamento dei dati avviene per mezzo di file "flat" (ASCII e binari), nonché per mezzo di file HEC-DSS. I dati inseriti dall'utente vengono immagazzinati in file *flat* secondo categorie separate (*project, plan, geometry, steady flow, unsteady flow, quasi-steady flow, sediment data e water quality information*). I dati in uscita vengono immagazzinati principalmente in file binari separati. I dati possono essere trasferiti tra HEC-RAS e altri programmi utilizzando i file HEC-DSS.

Di notevole comodità risultano essere i risultati grafici, che includono mappe bidimensionali di schemi di sistemi fluviali, sezioni, profili, curve di deflusso, idrogrammi e mappe di esondazione. Sono disponibili, inoltre, una mappa 3D di sezioni multiple e risultati sotto forma di tabelle. Gli utenti possono scegliere tra tabelle predefinite o personalizzarle secondo le proprie esigenze. Tutti gli output grafici e tabellari possono essere visualizzati sullo schermo, inviati direttamente a una stampante o copiati su altri software.

Le funzioni di report permettono di stampare sia i dati di input che di output. Possono inoltre essere personalizzati sia per quanto riguarda la quantità che il tipo di informazioni desiderate.

## **4.2. Modelli numerico-idraulici dell'asta di Po**

Nel corso degli ultimi anni sono stati condotti diversi studi, commissionati dall'AdBPo, per indagare il comportamento idraulico del bacino; particolare importanza ha rivestito uno studio, elaborato dal dipartimento DISTART e presentato nel 2008, che ha inteso identificare in maniera univoca un profilo di piena di riferimento alla luce delle conoscenze fornite dagli studi idraulici a oggi disponibili e a valle degli aggiornamenti della descrizione morfologica dell'alveo.

Questa importanza deriva dall'utilizzo di un modello numerico Q2005D, costruito per condurre le simulazioni idrauliche volte a individuare i profili di inviluppo di piena del tratto medio-inferiore del fiume Po.

Tale modello, unitamente alle modifiche apportate in un successivo lavoro di tesi, ha dunque costituito la base di questo lavoro, dedicato agli sviluppi dello stesso, trattati nei prossimi paragrafi.

### **4.2.1. Modello numerico-idraulico Q2005D e successive modifiche**

Il punto di partenza del presente lavoro è costituito dal preesistente modello numerico-idraulico Q2005D del corso medio-inferiore del Po, realizzato con il software HEC-RAS (L. Galletti, 2007, e sviluppi successivi DISTART – AdBPo, 2008), modificato in ambito di successive tesi specialistiche (v. D'Andrea, 2010 e Pagliccia, 2010).

In questo paragrafo viene descritta per sommi capi la messa a punto del suddetto modello.

Per quanto riguarda il modello di partenza Q2005D, la sua geometria (informazioni planimetriche e relative alle sezioni trasversali, v. Figura 20) era stata creata importando i dati del DTM da ArcView a HEC-RAS tramite l'estensione *Hec-Geo-Ras*; erano stati poi definiti la *Stream Centerline*, come schematizzazione della linea di fondo del fiume (adottata dal software come ascissa curvilinea e utilizzata per successive applicazioni), e i limiti dell'alveo inciso (*Bank Station Lines*), per separare il flusso all'interno del canale principale (*Main Channel*) da quello nelle espansioni golenali (*Overbanks*) e

attribuire differenti condizioni di scabrezza. Erano state poi inserite le sezioni trasversali (*Cross Sections*) sulla base dei dati forniti dall'AdBPo e vi erano state apportate alcune modifiche, ove necessario, eliminando le intersezioni e traslandole, ruotandole e modificandone la lunghezza al fine di rendere i dati omogenei. Nel modello erano state infine schematizzate le golene chiuse (ovvero le aree identificabili attraverso il secondo P.S.F.F. come aree di fascia B o di esondazione) tramite lo strumento *Storage Area* (utilizzato anche nel presente lavoro) ed erano poi state opportunamente collegate al corso d'acqua ed eventualmente tra di loro.



Figura 20: Schematizzazione geometrica adottata nel modello iniziale di HEC-RAS

Il modello numerico-idraulico sfrutta il codice di calcolo di moto vario 1D UNET (Barkau, 1997); 1D UNET rappresenta lo stato dell'arte in termini di riproduzione del comportamento idraulico di complessi sistemi di corsi d'acqua naturali e canali artificiali mediante schematizzazioni di tipo 1D o quasi-2D. Esso risolve le equazioni di De Saint Venant 1D, consistenti nell'equazione di continuità

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial t} - q_e = 0$$

e nell'equazione del moto

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left( \frac{\partial z}{\partial x} - S_f \right) = 0$$

dove:

$Q$  = portata della corrente fluviale;

$A$  = area della porzione di sezione trasversale bagnata che si considera attiva nei confronti del deflusso;

$S$  = area di accumulo (area della sezione trasversale bagnata che non contribuisce al deflusso);

$q_e$  = portata per unità di larghezza dovuta agli apporti laterali;

$V$  = velocità media della corrente;

$S_f$  = cadente.

La risoluzione delle equazioni è effettuata dal modello attraverso un classico schema implicito alle differenze finite a quattro nodi, definito in letteratura come box scheme.

Il modello, una volta completato, era stato calibrato nello studio condotto in ambito di tesi specialistica (v. D'Andrea, 2010) per riprodurre l'evento di piena verificatosi nell'ottobre del 2000, corrispondente a un tempo di ritorno di 200 anni e scelto in quanto ultimo evento significativo e temporalmente abbastanza vicino da poter considerare ininfluenti i cambiamenti morfologici occorsi nel fiume da allora a oggi. Tale evento (indicato dal secondo Piano Stralcio per le

Fasce Fluviali) è quello preso a riferimento per l'identificazione delle aree di fascia B.

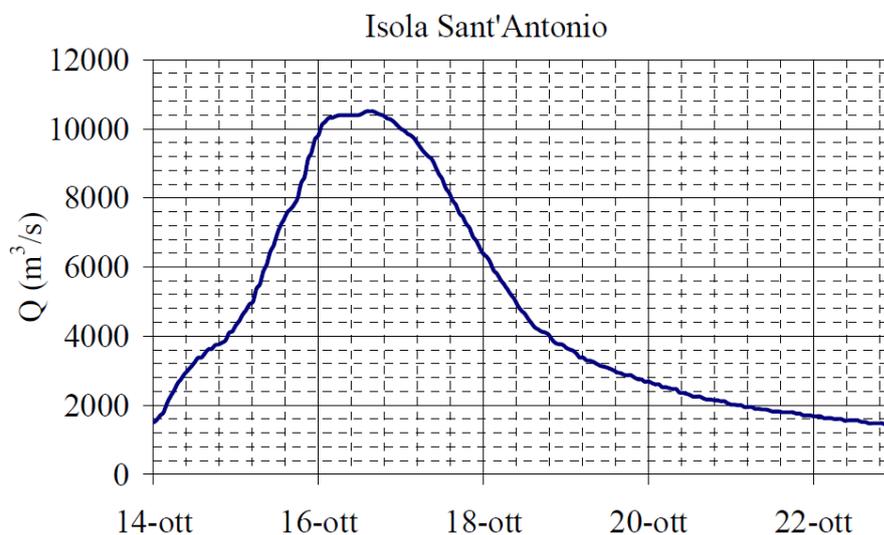
La fase di taratura era stata finalizzata all'identificazione dei coefficienti distribuiti di resistenza al moto caratteristici delle diverse sezioni trasversali impiegate dal modello idraulico. In particolare, per quanto concerne la rappresentazione delle condizioni di scabrezza del fiume Po, era stato deciso di differenziare il coefficiente di scabrezza del canale principale da quello delle espansioni laterali. Ogni sezione trasversale era stata pertanto divisa in tre porzioni, una rappresentativa dell'alveo inciso, caratterizzata da un ben preciso valore del coefficiente di scabrezza, e due rappresentative delle espansioni laterali che partecipano attivamente al deflusso idrico (porzioni aperte, non arginate lato fiume, delle espansioni golenali), caratterizzate da un diverso valore del coefficiente di scabrezza. I due valori di scabrezza caratteristici della generica sezione trasversale erano stati mantenuti costanti all'interno di tratti fluviali omogenei dal punto di vista delle condizioni di scabrezza al fondo, identificati proprio attraverso la fase di taratura del modello. Detta fase era stata condotta con l'obiettivo di pervenire attraverso il modello a una corretta riproduzione del comportamento idraulico dell'asta medio-inferiore del fiume Po per l'evento di piena di riferimento.

Il comportamento idraulico dell'asta era stato sintetizzato mediante le seguenti grandezze di riferimento:

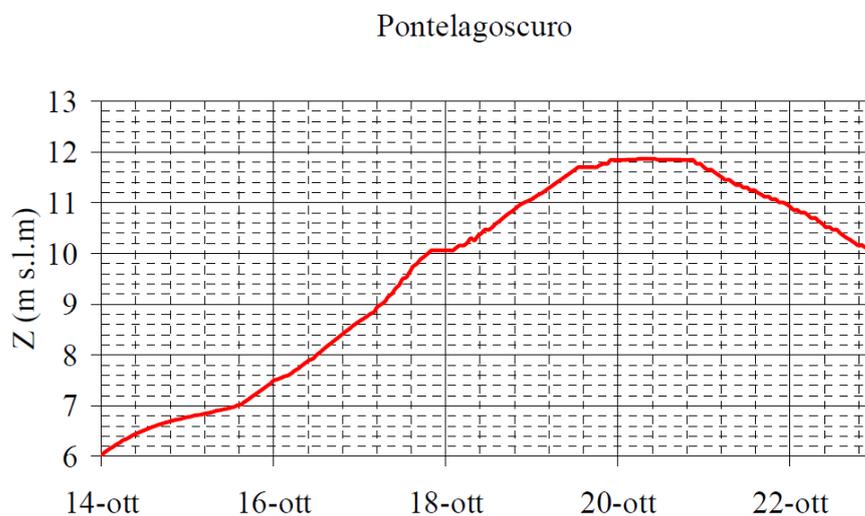
- osservazioni idrometriche (idrogrammi di piena osservati in corrispondenza delle stazioni idrometriche disponibili e tracce di piena identificate a valle dell'evento);
- dinamica di invaso delle golene chiuse (istanti di inizio invaso e tiranti idrici massimi);
- valori di portata al colmo (valori di portata al colmo in corrispondenza delle sezioni idrometriche di riferimento, desunti dalle scale di deflusso).

Il Grafico 8 e il Grafico 9 illustrano invece le condizioni al contorno di monte e di valle utilizzate in simulazione. Il Grafico 8 riporta la condizione al contorno di monte adottata in corrispondenza della sezione Brioschi 00B1, ovvero l'idrogramma di piena in termini di portata desunto per la sezione idrometrica di

Isola Sant'Antonio. Il Grafico 9 illustra la condizione al contorno di valle utilizzata in corrispondenza della sezione di Pontelagoscuero, coincidente con l'idrogramma di piena in termini di livello.



**Grafico 8: Condizione al contorno di monte, idrogramma di piena (portata) per la sezione di Isola S. Antonio (sez. Brioschi 00B1) (Fonte: AdBPo – DISTART, 2008)**



**Grafico 9: Condizione al contorno di valle, idrogramma di piena (livello) per la sezione di Pontelagoscuero (sez. Brioschi 65) (Fonte: AdBPo – DISTART, 2008)**

La Fascia C di inondazione per piena catastrofica, come è stato precedentemente spiegato nel Paragrafo 3.3, è costituita dalla porzione di territorio esterna alla Fascia B, che può essere interessata da inondazione al verificarsi di eventi di piena più gravosi di quelli di riferimento; perciò per poter studiare il comportamento idraulico del fiume Po e soprattutto le sue interazioni con queste aree adiacenti agli argini, nell'ambito di una successiva tesi specialistica (v. Pagliccia, 2010) erano state apportate alcune modifiche e perfezionamenti del modello matematico idraulico messo a punto dal DISTART.

Una prima modifica era stata fatta per poter rappresentare nel modello i comparti idraulici situati nella Fascia C; la suddivisione di tale fascia era stata realizzata utilizzando il software ArcView seguendo i criteri dell'autore (ossia una prima suddivisione delle aree comprese tra gli affluenti del corso medio-basso del fiume Po, e una seconda suddivisione riguardante solo parte dei comparti, nello specifico quelli che presentavano aree troppo estese o interazioni significative con infrastrutture viarie e ferroviarie – v. paragrafo 3.1 e successivi).

Erano stati così classificati 19 comparti idraulici (v. Figura 22), di seguito elencati in Tabella 3. In Tabella 4 sono invece riportati quei comparti che erano stati ulteriormente suddivisi secondo i criteri sopra specificati; per identificare tali sottocomparti era stata utilizzata la precedente denominazione dei comparti originari, aggiungendo alla fine della dicitura la lettera A, B o C a seconda della posizione che il sottocomparto assume rispetto all'orientamento monte-valle (la lettera A è assegnata all'area più a monte e la lettera C all'area più a valle – v. Figura 21).

	<b>COMPARTO</b>	<b>AFFLUENTE DI MONTE</b>	<b>AFFLUENTE DI VALLE</b>	<b>AREA [km<sup>2</sup>]</b>
<b>DESTRA IDRAULICA</b>	staf_vers	Staffora	Versa	55.40
	vers_po	Versa	Po	3.50
	po_tido	Po	Tidone	8.08
	tido_treb	Tidone	Trebbia	17.30
	treb_nure	Trebbia	Nure	25.70
	nure_chia	Nure	Chiavenna	14.20
	chia_arda	Chiavenna	Arda	76.60
	arda_ongi	Arda	Ongina	4.79
	ongi_taro	Ongina	Taro	77.00
	taro_parm	Taro	Parma	89.20
	parm_enza	Parma	Enza	70.70
	enza_cros	Enza	Crostolo	99.80
	cros_secc	Crostolo	Secchia	726.00
	secc_pana	Secchia	Panaro	906.00
	pana_po	Panaro	Po	3150.00
<b>SINISTRA IDRAULICA</b>	rogg_lamb	Roggia Olona	Lambro	77.50
	lamb_adda	Lambro	Adda	99.00
	adda_ogli	Adda	Oglio	444.00
	ogli_minc	Oglio	Mincio	150.00

**Tabella 3: Comparti idraulici individuati e catalogati in base all'idrografia dei principali affluenti**

	COMPARTO	AFFLUENTE DI MONTE	AFFLUENTE DI VALLE	AREA [km <sup>2</sup> ]
<b>DESTRA IDRAULICA</b>	chia_ardaA	Chiavenna	Arda	38.70
	chia_ardaB			38.80
	cross_seccA	Crostolo	Secchia	269.00
	cross_seccB			80.60
	cross_seccC			377.00
	secc_panaA	Secchia	Panaro	430.00
	secc_panaB			476.00
	pana_poA	Panaro	Po	521.00
	pana_poB			2640.00
<b>SINISTRA IDRAULICA</b>	rogg_lambA	Roggia Olona	Lambro	31.00
	rogg_lambB			46.30
	lamb_addaA	Lambro	Adda	15.60
	lamb_addaB			39.30
	lamb_addaC			44.20
	adda_ogliA	Adda	Oglio	21.70
	adda_ogliB			145.00
	adda_ogliC			281.00
	ogli_mincA	Oglio	Mincio	69.70
	ogli_mincB			52.90
	ogli_mincC			28.90

**Tabella 4: Comparti idraulici sezionati**



**Figura 21: Particolare della suddivisione del comparto ogli\_minc in 3 sottocomparti**

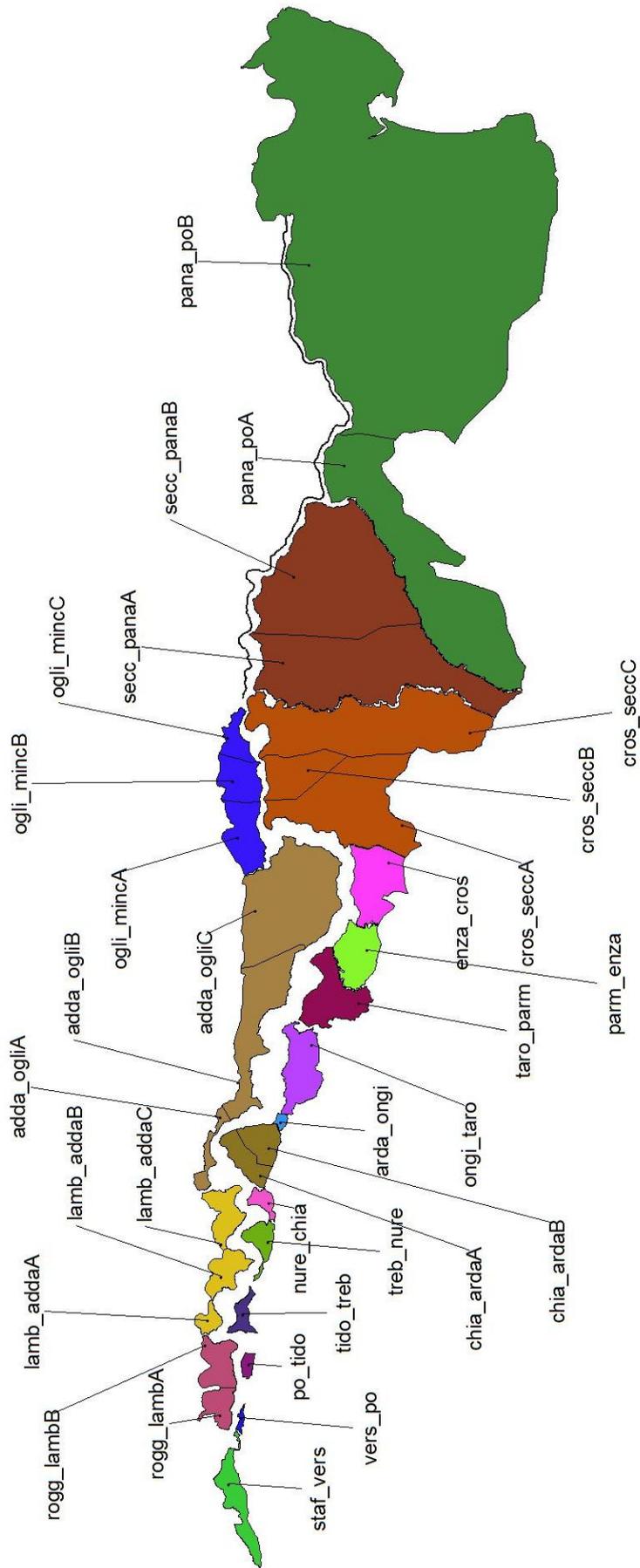
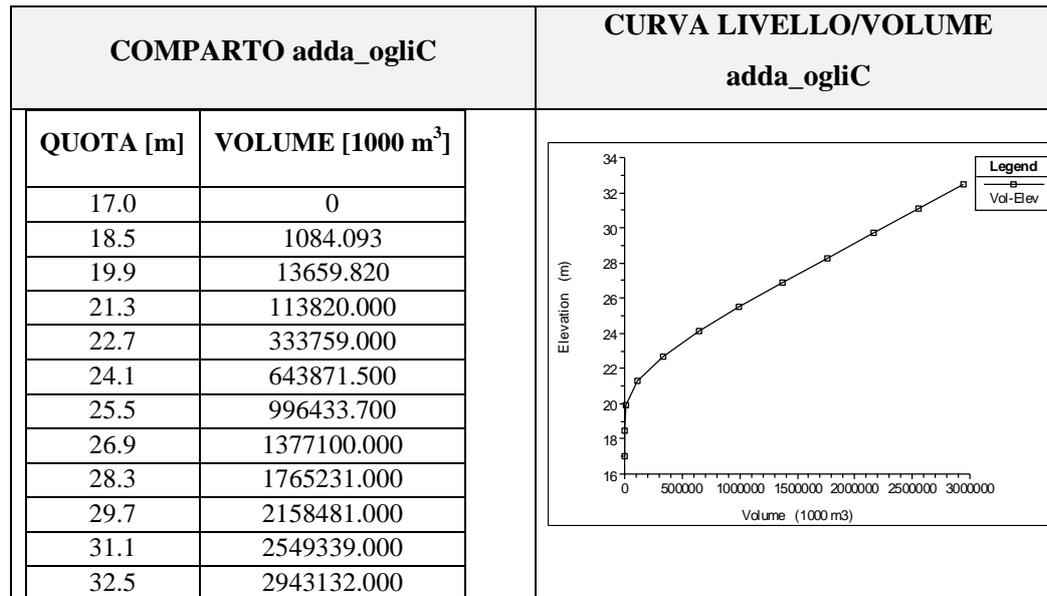


Figura 22: Fascia C del tratto medio-inferiore del Po suddivisa in comparti

I file schematizzanti i comparti idraulici erano dunque stati importati nel programma HEC-RAS, nel quale, una volta caricata la nuova geometria, era stato necessario completare le informazioni delle singole *Storage Area* (quota di fondo e curva d'invaso con relativi valori di livello e volumi invasati – v. Tabella 5).



**Tabella 5: Andamento del volume al variare della quota (dati tabulati e curva d'invaso) del comparto adda\_ogliC**

Il modello dell'AdBPo-DISTART del 2008 conteneva come *Storage Area* le golene chiuse incluse nella fascia B; aggiungendo le nuove *Storage Area* appartenenti alla Fascia C era stato necessario creare dei collegamenti tra queste ultime e le eventuali golene protette già presenti o tra le nuove e il corso d'acqua stesso; tali connessioni schematizzano l'andamento plano-altimetrico degli argini maestri.

I collegamenti tra golene erano stati effettuati servendosi della funzione *Storage Area Connection* (Figura 23), un'applicazione di HEC-RAS nella quale è necessario specificare le due *Storage Area* che si intendono collegare e l'andamento, descritto per punti, della sommità arginale.

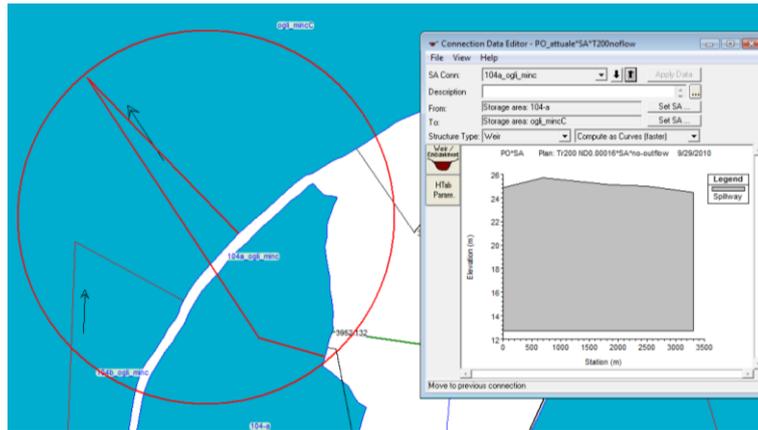


Figura 23: Esempio di *Storage Area Connection* per la connessione idraulica tra una golaena interna al sistema arginale (Fascia B) e una *Storage Area* esterna alle arginature (Fascia C).

I collegamenti tra le nuove *Storage Area* e il fiume Po erano stati invece schematizzati utilizzando degli sfioratori laterali (*Lateral Structure*), per i quali era stato necessario immettere diversi parametri, quali l'andamento longitudinale e altimetrico dei profili dei diversi sfioratori, l'identificazione della *Storage Area* in cui la *Lateral Structure* riversa le portate laminate durante la simulazione dell'evento di piena e la collocazione degli sfioratori (destra o sinistra idraulica) – v. Figura 24.

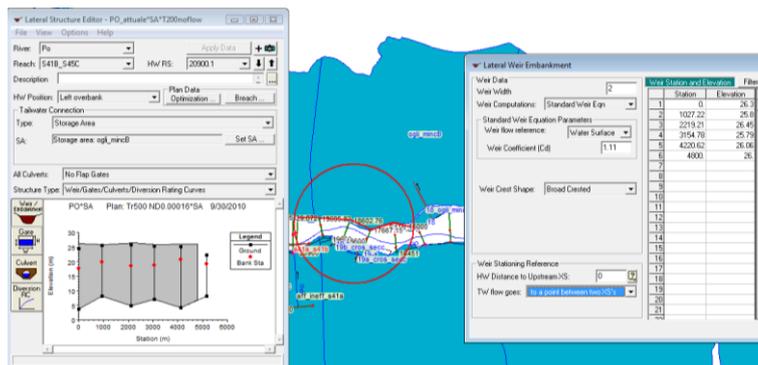
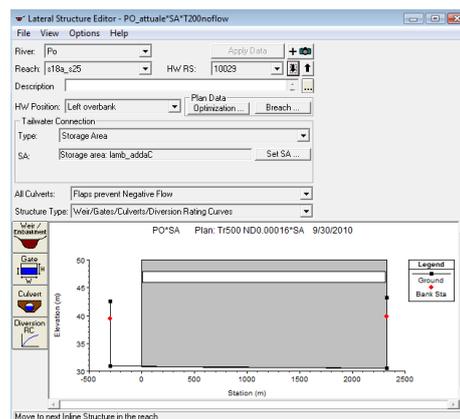


Figura 24: Creazione di una *Lateral Structure*

Nell'editor della *Lateral Structure* è presente la funzione *Culvert* (Figura 25), la quale permette di inserire all'interno di questi sfioratori laterali un canale dotabile di una valvola di non ritorno. Questo stratagemma era stato adottato per pervenire a una modellazione più realistica di tre *Lateral Structure* per le quali le

simulazioni preliminari evidenziavano la fuoriuscita di volumi idrici tracimati nella *Storage Area* da altre *Lateral Structure* a essa connesse.

Tale “soluzione” si è resa necessaria per porre rimedio a un limite intrinseco del programma, il quale schematizza i comparti idraulici come vasche di accumulo, e quindi simula un trasferimento istantaneo dei volumi d’acqua da un punto all’altro: tale simulazione non corrisponde però alla reale propagazione.



**Figura 25: Lateral Structure con Culvert**

Una seconda modifica, apportata sempre da Pagliccia, aveva riguardato invece la calibrazione del modello che era stato utilizzato per identificare attraverso un procedimento iterativo gli idrogrammi sintetici, rappresentativi della sollecitazione idraulica corrispondente a un evento di piena catastrofica. Tale evento, anche definito evento al limite della prevedibilità, è caratterizzato da portata al colmo di piena e volumi idrici associati a un tempo di ritorno di 500 anni (v. capitolo 1).

Terminata la fase di calibrazione e connesse idraulicamente le aree di Fascia C al corso d’acqua principale, erano state condotte diverse simulazioni idrauliche con il modello aggiornato, ognuna delle quali caratterizzata da una diversa configurazione geometrica delle strutture arginali:

- configurazione arginale attuale, considerando la possibilità di formazione di brecce nei tratti arginali in cui il transito dell’evento di piena ( $T_{rit} = 500$  anni) avviene con tracimazione (v. capitolo 1);

- configurazione con argini inerodibili, in cui, anche in caso di tracimazione, i cedimenti arginali sono scongiurati dall'ipotetica presenza di opportuni rivestimenti superficiali in grado di impedire la formazione dei fenomeni erosivi (v. capitolo 7).

Per quanto riguarda gli apporti idrici dei principali affluenti, sia nel modello matematico idraulico messo a punto dal DISTART, sia in quello modificato da Pagliccia, questi ultimi erano stati schematizzati come un'immissione laterale concentrata in corrispondenza della foce del corso d'acqua. Sebbene fornisca una rappresentazione sufficientemente realistica degli scambi di volumi idrici tra affluenti e asta di Po in occasione dell'evento esaminato e per il tratto d'asta tra Isola Sant'Antonio e Cremona, questa soluzione non consente di rappresentare con elevata precisione le dinamiche di allagamento della Fascia C dovute alle esondazioni degli affluenti, elemento fondamentale per una corretta gestione politica a scala di bacino.

Per questo motivo, parte del presente lavoro consiste nella schematizzazione della geometria degli affluenti, al fine di migliorare la riproduzione dei fenomeni di rigurgito indotti dal passaggio dell'onda di piena in corrispondenza delle confluenze e avere quindi una rappresentazione più realistica di quel sistema complesso, costituito da più corsi d'acqua, che è il bacino del Po.

#### 4.2.2. Schematizzazione numerica dei maggiori affluenti

La creazione della geometria degli affluenti principali, come era avvenuto per quella relativa allo stesso fiume Po, è avvenuta utilizzando inizialmente il software ArcView, che crea geometricamente l'asse fluviale di ogni affluente; le geometrie create sono state successivamente importate in HEC-RAS, integrate con le necessarie informazioni planimetriche e quelle relative alle sezioni trasversali e successivamente unite in un unico file insieme al corso d'acqua principale.

Sono stati inizialmente selezionati gli affluenti principali in termini di dimensioni e di volumi di acqua immessi nel fiume Po, per poi effettuare un'ulteriore scrematura arrivando a schematizzare soltanto sei affluenti: Adda, Taro, Parma, Enza, Secchia e Panaro. Si disponeva in realtà anche dei rilievi di Oglio, Ticino e Trebbia, ma questi ultimi non ricadevano nella Fascia C nemmeno per un solo tratto e sono stati pertanto tralasciati.

In questo paragrafo verranno riassunti i principali passaggi che hanno portato alla creazione di un unico file definitivo, utilizzato poi per effettuare le simulazioni con il software HEC-RAS.

Inizialmente sono stati caricati in ArcView i file relativi all'idrografia del bacino del Po, alle sezioni trasversali e alla Fascia C (solitamente sempre rappresentata in colore azzurro), ottenendo la visualizzazione riportata in Figura 26.

# Bacino del Po

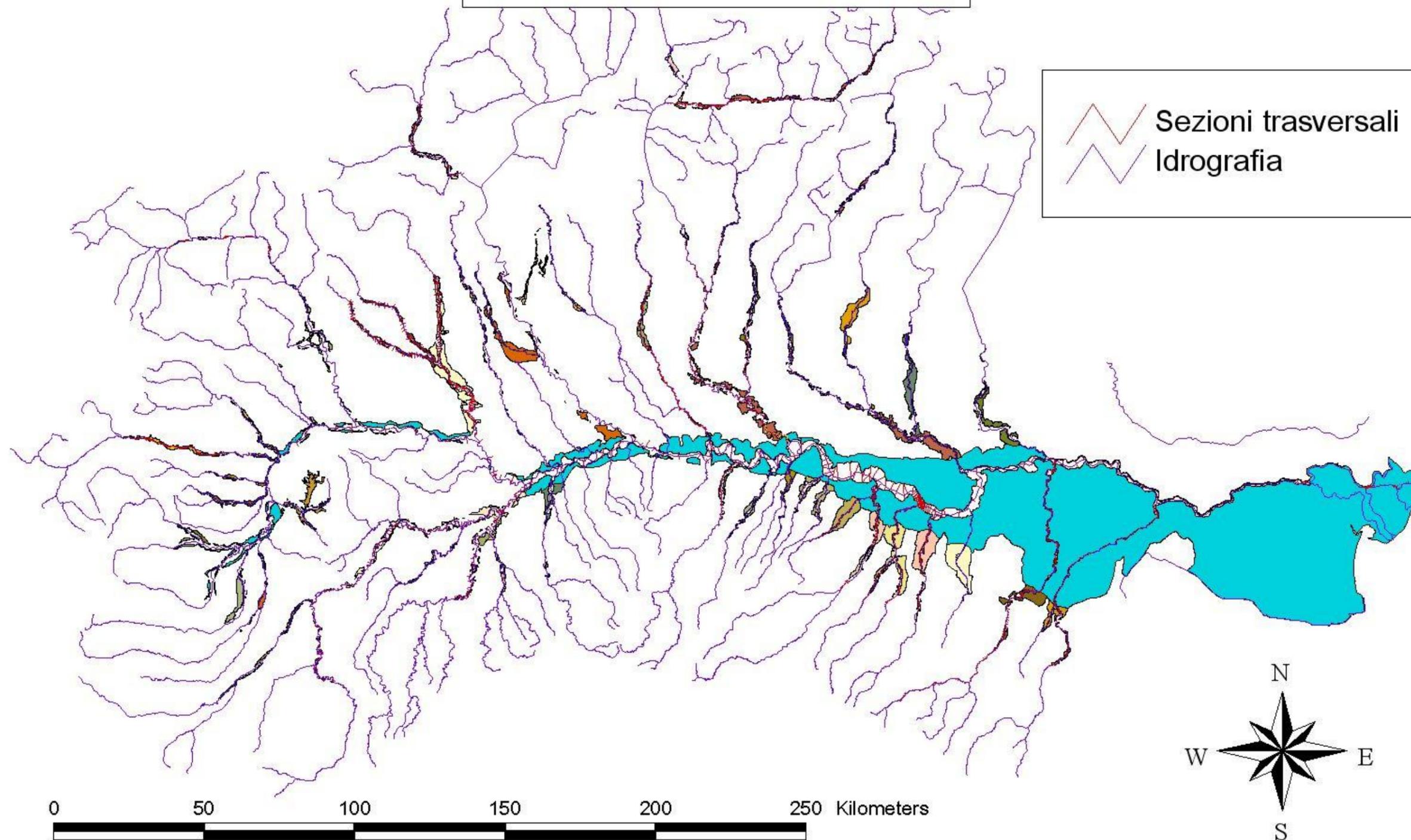


Figura 26: Bacino del Po: idrografia principale, Fascia C del Fiume Po (aree azzurre) e dei principali affluenti.



È stato quindi selezionato il tratto di corso d'acqua dell'affluente da schematizzare ricadente nella Fascia C ed è stato invertito il suo verso, poiché in HEC-RAS esso è considerato positivo da monte a valle.

A questo punto è stato necessario tagliare l'asse del corso d'acqua, in modo da poter importare in HEC-RAS solamente il tratto di Fascia C dell'affluente.

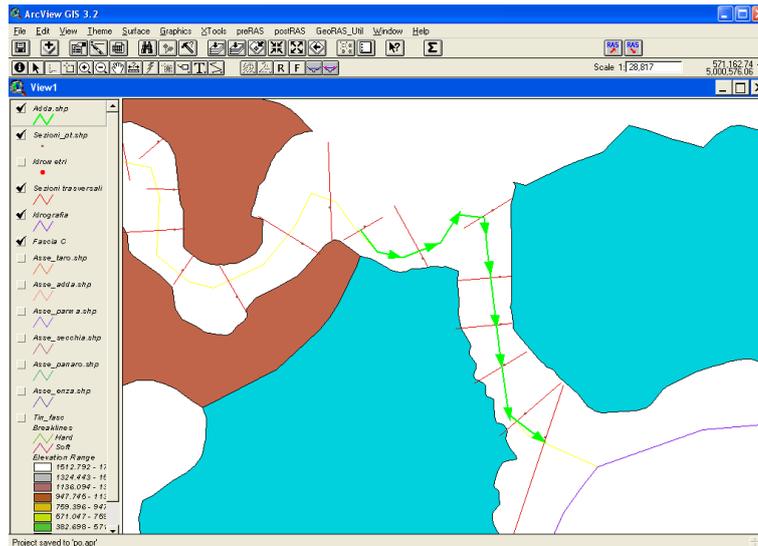


Figura 27: Esempio di creazione di uno shapefile in ArcView

Una volta creati tutti i file necessari, è stato possibile importare effettivamente i file in HEC-RAS, utilizzando la funzione *Import Geometry Data – GIS Format* dalla finestra dei dati geometrici di questo software e specificando che i file dovevano essere importati utilizzando come unità di misura il Sistema Internazionale.

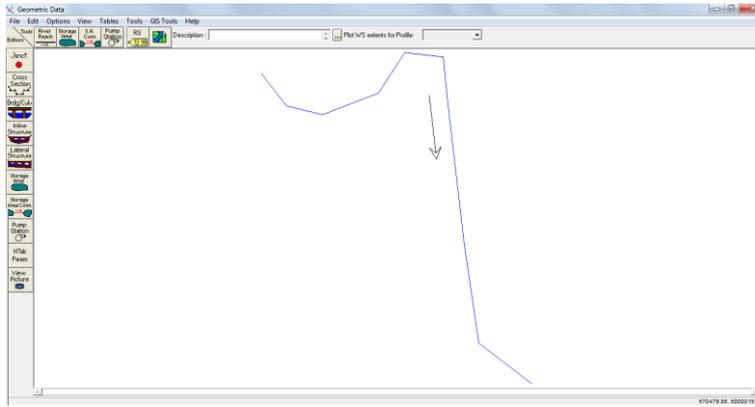


Figura 28: Asse del fiume Adda importato in HEC-RAS

Il passaggio successivo è consistito nell'immissione dei dati relativi alle sezioni trasversali del tratto di affluente importato, numerandole in ordine decrescente da monte a valle.

Sono state inserite le quote relative a ogni punto della sezione (tratte dai rilievi dell'AdBPo) e lo stesso è avvenuto per quanto riguarda la distanza dalla sezione successiva, i valori del coefficiente di Manning e le coordinate dei punti che delimitano l'alveo principale. Per quanto riguarda il coefficiente di scabrezza, sono stati considerati due valori diversi in base alla differenza tra alveo principale e golene, adottando gli stessi valori del fiume Po all'imbocco dell'affluente.

Sono state inoltre inserite le coordinate relative agli argini maestri della sezione (*Levees*), indicanti le altezze che l'onda deve superare prima che i territori adiacenti comincino a riempirsi.

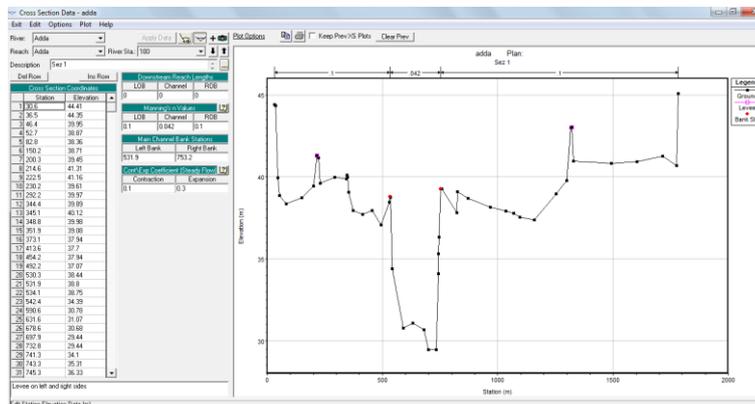
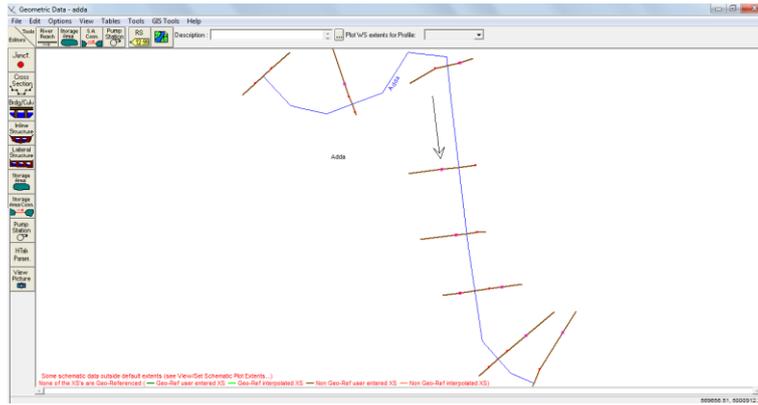


Figura 29: Inserimento dei dati relativi a una sezione trasversale

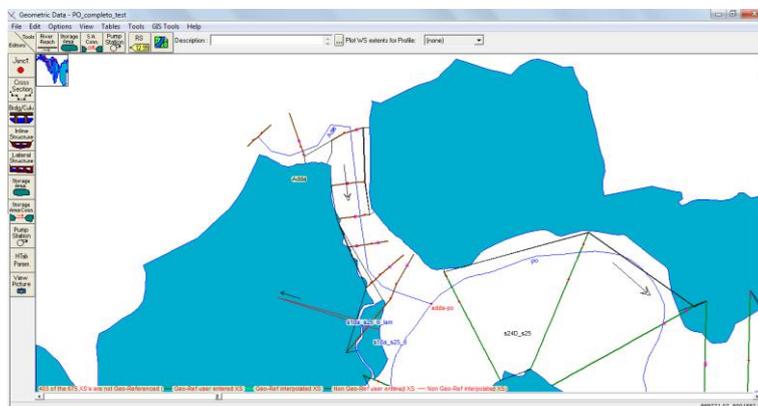


**Figura 30: Affluente con le relative sezioni trasversali in HEC-RAS**

Le stesse operazioni sono state effettuate per tutti e sei gli affluenti considerati.

Una volta creati i sei file separati, è stato necessario unirli alla geometria del fiume Po, per avere un unico file da usare nelle simulazioni del modello.

Dopo aver importato attraverso la funzione *Import Geometry Data – HEC-RAS Format* i singoli file nel file principale contenente il modello precedente preso come base, gli affluenti sono stati uniti al fiume Po tramite l’inserimento in quest’ultimo di una *junction* all’altezza dello sbocco in Po dell’affluente. Tale *junction* divide il corrispondente tratto del corso d’acqua principale in due parti, le quali sono state coerentemente rinominate. È stato necessario inoltre dividere le eventuali *Lateral Structure* che si trovavano lungo il corso del fiume Po proprio all’imbocco degli affluenti.



**Figura 31: Unione dell’affluente al corso d’acqua principale del fiume Po**

Poichè i rilievi sugli affluenti forniti dall'AdBPo risalgono a qualche decennio fa (il più recente è quello del 1992 per i fiumi Adda e Secchia, mentre quello del fiume Parma è datato 1972) e nel periodo di tempo trascorso da allora a oggi sia la morfologia del corso d'acqua sia gli argini potrebbero aver subito delle importanti modifiche, è stata effettuata una simulazione in moto permanente con un'onda di piena duecentennale al fine di verificare che, con i dati in nostro possesso, la suddetta piena fosse contenuta all'interno degli argini maestri dei singoli affluenti. A meno di rotture per sifonamento, infatti, al giorno d'oggi gli affluenti considerati risultano in sicurezza per quanto riguarda il passaggio di piena di un'onda con  $T_{rit}$  duecentennale, in pratica non si verificano sormonti in nessun punto.

Dai risultati della simulazione di moto permanente sono quindi stati individuati i punti critici, per i quali sono state apportate le seguenti modifiche alla geometria degli affluenti:

- nel caso di sormonto dei tratti immediatamente adiacenti all'imbocco nel fiume Po, se la quota degli argini maestri risultava minore di quella degli argini del Po, i suddetti argini sono stati rialzati fino ad arrivare ad una condizione di omogeneità;
- negli altri punti critici sono stati inseriti degli sfioratori laterali della lunghezza di circa 1000 m a cavallo del punto più depresso rilevato.

Si può dire che in definitiva il tempo di ritorno complessivo dell'onda di piena simulata sia maggiore di quello duecentennale: si considera infatti una condizione di sbocco rigurgitato, in quanto l'onda duecentennale dell'affluente va a immettersi in un fiume, il Po, già in condizioni di piena. Se l'onda viene contenuta entro gli argini maestri in questo scenario, si può quindi affermare che questa soluzione permetta di rispettare condizioni prudenziali di sicurezza.

#### 4.2.2.1. Casi particolari: i fiumi Taro e Secchia

Mentre per gli altri affluenti inseriti nel modello si è proceduto come descritto nel paragrafo precedente, in due casi è stato necessario apportare alcune ulteriori modifiche: si tratta degli affluenti Taro e Secchia, le cui geometrie costituiscono un caso particolare.

##### Taro

Il fiume Taro presenta, quasi in prossimità del suo sbocco nel fiume Po, un'ansa molto stretta, visibile solo in condizioni di magra, in quanto in condizioni di piena essa viene interamente allagata e il corso d'acqua procede in direzione quasi rettilinea. Dal momento che nel presente lavoro di tesi viene studiato il passaggio di un'onda di piena, è stata semplificata la geometria dell'asse fluviale, rettificandolo nel tratto considerato ed eliminando alcune sezioni (modifiche effettuate in ArcView), mentre l'area di circa 275 ha che costituisce l'ansa è stata schematizzata in HEC-RAS come una *Storage Area*, opportunamente collegata al fiume Taro e alla Fascia C, rispettivamente tramite *Lateral Structure* e *Storage Area Connection*.

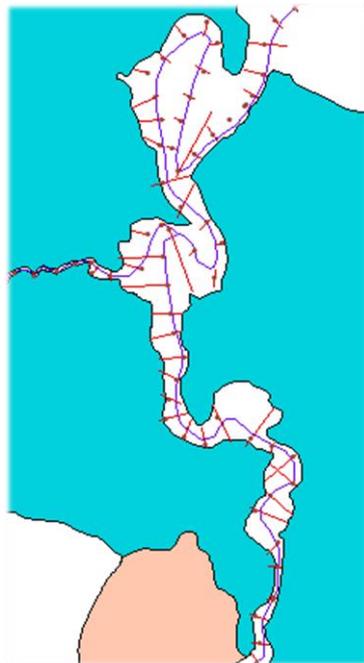


Figura 33: Corso originale del fiume Taro (ArcView)

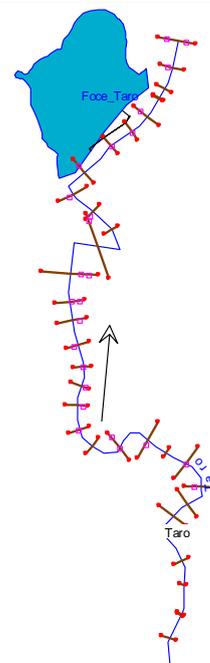


Figura 32: Corso modificato del fiume Taro (HEC-RAS)

### Secchia

Le modifiche apportate al fiume Secchia hanno invece riguardato le quattro sezioni più a monte ricadenti in Fascia C: esse sono state semplicemente tagliate a causa di un salto di fondo che, in mancanza di informazioni più dettagliate, causava problemi di instabilità del modello; poiché le suddette sezioni si trovano a una notevole distanza dall'imbocco dell'affluente in Po e poiché il nostro interesse si concentra nella zona della foce, la loro presenza o meno non influenzava l'accuratezza dei risultati.

La figura seguente mostra il file della geometria definitiva del modello in HEC-RAS.

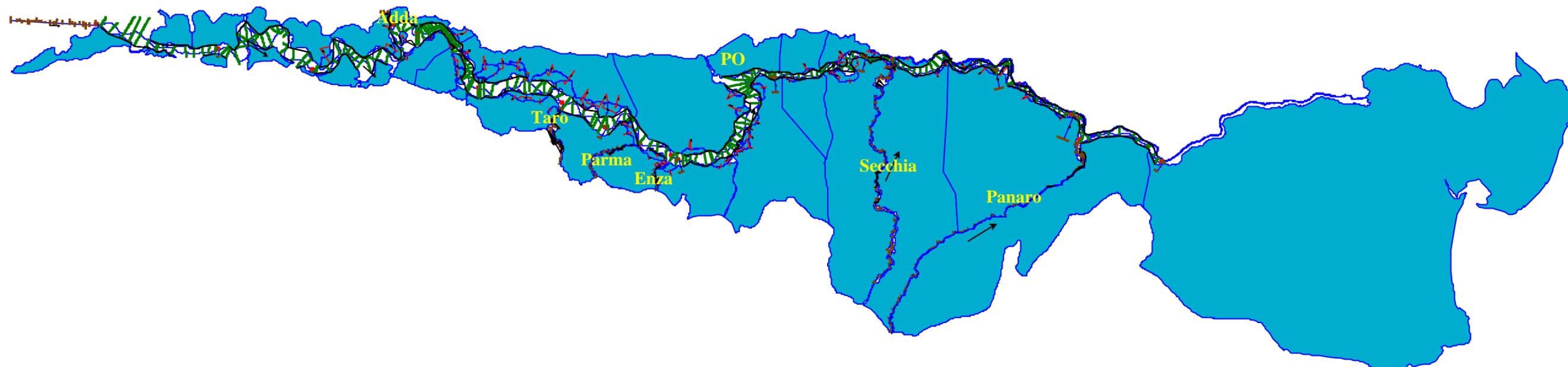


Figura 34: Schematizzazione geometrica adottata nel modello definitivo di HEC-RAS



## **5. EVENTO DI PIENA AL LIMITE DELLA PREVEDIBILITÀ: IDENTIFICAZIONE DELLA SOLLECITAZIONE DI PROGETTO**

Il modello numerico del fiume Po Q2005D, con le successive modifiche e l'aggiunta degli affluenti, è stato ricalibrato per simulare correttamente la propagazione di una piena con tempo di ritorno cinquecentennale; tale procedimento iterativo è consistito nella determinazione degli idrogrammi sintetici da inserire come condizioni al contorno per gli affluenti del Po considerati nel modello, tali che, come risultato delle simulazioni, fornissero nelle sezioni strumentate del Po di Piacenza, Cremona, Boretto, Borgoforte e Pontelagoscuro degli idrogrammi quanto più vicini possibile a quelli sintetici  $T_{rit}500$  messi a disposizione dall'AdBPo.

### **5.1. *Idrogrammi Trit 500 attesi nelle sezioni strumentate***

Per poter affrontare i problemi riguardanti la protezione idraulica del territorio, oltre alle portate di colmo, è necessario conoscere anche il volume delle piene e la loro distribuzione nel tempo. La definizione di un'onda di piena sintetica con tempo di ritorno assegnato è il metodo più generale per trattare questo tipo di problemi.

Non è possibile attribuire un valore della probabilità di non superamento a un'onda, ma solo ad alcuni parametri tipici della stessa. Le caratteristiche più importanti dell'onda di piena sono la portata al colmo e il volume in una durata assegnata (portata media nella medesima durata); di conseguenza all'onda sintetica si può attribuire un tempo di ritorno di riferimento, imponendo che alla portata di colmo e alle massime portate medie in ogni durata parziale corrisponda tale valore del tempo di ritorno.

Qualora nella sezione d'interesse sia disponibile una serie sufficientemente lunga e completa di registrazioni di idrogrammi di piena, la determinazione degli idrogrammi sintetici è basata sulla costruzione della curva di riduzione dei colmi di piena e sull'individuazione della posizione media del picco in ciascuna durata

a partire dall'analisi delle onde di piena storiche (Maione et al., 2000a, Maione et al., 2000b).

La costruzione degli idrogrammi sintetici  $T_{rit}$  500 nelle sezioni strumentate di Piacenza, Cremona, Boretto, Borgoforte e Pontelagoscuro è il frutto di un lavoro svolto su commissione dell'AdBPo dal Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale e del Rilevamento (DIIAR) del Politecnico di Milano nell'ottobre del 2001; tali idrogrammi sintetici sono stati ricavati tramite elaborazioni statistiche effettuate su un campione di onde di piena storiche, i cui dati sono stati recuperati dalle registrazioni effettuate a partire dal 1951. Le registrazioni idrometriche delle sezioni di Cremona, Boretto, Borgoforte e Pontelagoscuro sono state recuperate presso la sezione di Parma dell'Ufficio Idrografico del Po; per la stazione di Piacenza non è stato possibile recuperare le registrazioni idrometriche e le onde sono state ricostruite a partire dalle letture giornaliere dei livelli idrometrici pubblicate sulla Parte II degli Annali Idrologici. La lettura degli idrogrammi di piena è stata condotta individuando, anno per anno, gli eventi utili all'analisi statistica; in particolare sono state digitalizzate le onde contenenti i valori massimi annui della portata al colmo e dei volumi di durata assegnata. Per alcuni anni è stato sufficiente prendere in considerazione un solo evento, in altri casi è stato necessario considerare due o tre eventi per anno. Oltre alle registrazioni idrometriche, è stato necessario recuperare per ogni evento la scala di deflusso relativa al periodo corrispondente e indispensabile per il passaggio dai livelli alle portate.

Per ricavare l'informazione necessaria all'individuazione di un idrogramma di progetto di tempo di ritorno assegnato a partire dall'analisi delle onde di piena storiche si è scelto di procedere fissando una serie di valori di durata e analizzando, mediante un'analisi a finestra mobile, il valore massimo del volume (o della portata media) compreso in dette durate.

Tale approccio si basa sull'elaborazione statistica delle massime portate medie in assegnata durata  $D$ :

$$\overline{Q}_D = \max \left( \frac{1}{D} \cdot \int_{t-D}^t Q(\tau) d\tau \right)$$

dove il massimo è calcolato rispetto a tutte le possibili finestre temporali ( $t-D, t$ ) di ampiezza  $D$  contenute nel generico idrogramma di piena. Per ciascun idrogramma di piena è stato calcolato il valore massimo assunto dalla portata media per  $n$  durate prefissate, ottenendo così  $n$  serie di portate, composte ciascuna da un numero di dati pari al numero di eventi. La scelta di tali finestre temporali ( $D$ ) è stata fatta in base a un'analisi preliminare della durata della porzione più significativa degli idrogrammi di piena registrati. Per ciascuna durata è stata anche calcolata la posizione  $r$  assunta dal picco ( $r_D = 0 \div 1$ , v. Figura 19) e definita come rapporto tra la frazione della finestra temporale che precede il picco ( $D_b$ ) e l'intera durata considerata ( $D$ ). Questo parametro, come si vedrà, è di fondamentale importanza nella determinazione della forma dell'onda sintetica.

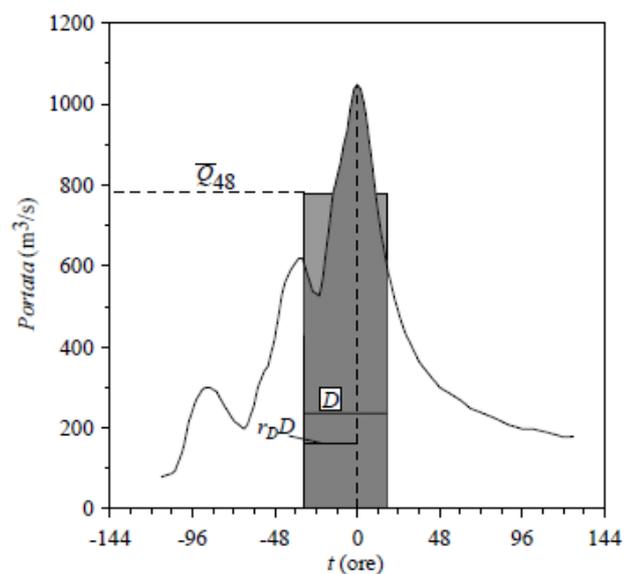


Figura 35: Posizione del picco  $r_D$

Per ogni evento e per ciascuna durata sono state estratte quindi due informazioni: la portata media e la posizione massima del picco  $r_D$ . Complessivamente sono stati estratti  $n(\text{eventi}) \times n(\text{durate})$  valori di portata e lo stesso numero di posizioni del picco  $r_D$ .

### 5.1.1. Elaborazioni statistiche

Nel caso di sezioni strumentate la costruzione delle onde di piena sintetiche può essere effettuata attraverso l'interpretazione statistica di alcuni caratteri fondamentali dei fenomeni di piena osservati. La portata  $Q$  relativa a una sezione fluviale è variabile nel tempo, sicché può essere descritta come un processo stocastico continuo, indicato con  $Q(t)$ , dove  $t$  indica appunto il parametro temporale del processo. La portata media in un intervallo temporale  $D$  relativamente alla stessa sezione si ottiene integrando il processo stocastico  $Q(t)$ :

$$Q(t, D) = \frac{1}{D} \cdot \int_{t-D}^t Q(\tau) d\tau$$

Le durate devono essere comprese tra 0, corrispondente alla portata istantanea, e un valore  $D_f$ , sufficientemente lungo da essere rappresentativo della natura dei fenomeni di piena nella sezione considerata.

Dal momento che entrambi i processi risultano continui e che la continuità è l'unica proprietà utilizzata, è risultato conveniente indicare i due processi, puntuale e mediato, con l'unica notazione  $Q(t, D)$ , ponendo  $Q(t, 0) = Q(t)$ .

Poiché l'interesse si è concentrato sui valori estremi del processo  $Q(t, D)$ , si è studiata la probabilità che il valore massimo di  $Q(t, D)$  non superi il valore  $q$  in un intervallo  $\Delta t$ :

$$P_{\overline{Q_D}}(q) = \text{Prob} [\max Q(t, D) \leq q \quad t \in (0, \Delta t)]$$

assumendo il periodo omogeneo di riferimento  $\Delta t = 1$  anno.

Pertanto la stima della legge  $\overline{q_D} = \overline{q_D}(T_{rit})$  è stata condotta a partire dalla serie dei massimi annuali (Annual Flood Series, AFS), vale a dire la serie dei valori massimi assunti dalla variabile in ciascuno degli anni di osservazione.

### 5.1.2. Curve di riduzione dei colmi di piena

Lo scopo delle elaborazioni statistiche consisteva nella determinazione della legge  $\overline{q}_D = \overline{q}_D(T_{rit})$ , che esprime l'equazione della curva di riduzione dei colmi di piena e dalla quale sono stati poi ricavati gli idrogrammi di riferimento in corrispondenza dei tempi di ritorno di interesse. Tale curva rappresenta la relazione che lega la portata media  $\overline{Q}_D$  alla corrispondente durata D, fissato il generico valore del tempo di ritorno  $T_{rit}$ .

Poiché i coefficienti di variazione dei campioni sono risultati poco variabili rispetto alla durata, è stato possibile considerare ciascun elemento, una volta normalizzato rispetto alla media del campione di appartenenza estratto dalla popolazione dell'unica variabile casuale  $Q^* = \frac{\overline{Q}_D}{\mu(\overline{Q}_D)}$  (avendo trascurato l'influenza dei momenti di ordine superiore al secondo).

Le serie corrispondenti alle diverse durate sono state dunque normalizzate rispetto al valor medio e raggruppate a formare un unico campione della variabile  $Q^*$  di numerosità pari al prodotto del numero di durate considerate nell'analisi e della numerosità di ciascuna serie storica.

In tal modo la curva di riduzione dei colmi di piena è stata ricavata adattando all'unico campione della variabile adimensionale  $Q^*$  una funzione di probabilità, stimando la quantità  $q^*(T)$  e moltiplicando tale valore per la media  $\mu(\overline{Q}_D)$  (stimata in base ai valori medi campionari delle serie storiche relative alle diverse durate):

$$\overline{q}_D(T_{rit}) = q^*(T_{rit}) \cdot \mu(\overline{Q}_D)$$

Per l'elaborazione statistica dei campioni della variabile  $Q^*$  è stata adottata la distribuzione di Gumbel; indicando con  $u$  e  $\alpha$  i due parametri di tale distribuzione, la curva di riduzione dei colmi di piena ha quindi equazione:

$$\overline{q}_D(T_{rit}) = \left\{ u - \alpha \cdot \ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{T_{rit}} \right) \right] \right\} \cdot \mu(\overline{Q}_D)$$

### 5.1.3. Posizione del picco

Per come è stato definito, il valore della posizione del picco  $r_D$  può variare tra 0 e 1. In particolare assume il valore 0 se il picco cade all'inizio della finestra temporale considerata, mentre assume valore 1 se il picco cade alla fine della finestra temporale. Si hanno così a disposizione tante serie temporali di posizioni del picco quante sono le durate analizzate. Ai fini della ricostruzione dell'onda di piena è stato calcolato il valore medio di ogni serie. Inoltre, per rendere la forma dell'onda sintetica il più regolare possibile, i punti  $(D, r_D)$ , ottenuti con la procedura sopra descritta, sono stati interpolati per tutte le stazioni con una curva polinomiale del sesto ordine.

### 5.1.4. Costruzione dell'idrogramma sintetico

Ottenuta la curva di riduzione dei colmi di piena, la costruzione dell'idrogramma sintetico è stata effettuata imponendo che la massima portata media in ciascuna durata coincidesse con quella prevista dalla curva di riduzione; la forma dell'idrogramma è stata determinata dal coefficiente esprime la posizione del picco  $r_D$ . L'idrogramma sintetico è stato dunque definito dalle condizioni:

$$\int_{-r_D \cdot D}^0 Q(\tau, T_{rit}) d\tau = r_D \cdot \overline{Q_D(T_{rit})} \cdot D$$

$$\int_0^{(1-r_D) \cdot D} Q(\tau, T_{rit}) d\tau = (1 - r_D) \cdot \overline{Q_D(T_{rit})} \cdot D$$

Le espressioni dei due rami dell'idrogramma  $Q(\tau, T_{rit})$  prima e dopo il colmo sono state ottenute differenziando le equazioni sopracitate rispetto alla durata  $D$ :

$$Q(\tau, T_{rit}) = \frac{\frac{d}{dD} (r_D \cdot \overline{Q_D(T_{rit})} \cdot D) \Big|_{D=D(t)}}{\frac{d}{dD} (r_D \cdot D) \Big|_{D=D(t)}}; t = -r_D \cdot D \quad (-r_{D_f} \cdot D_f \leq t \leq 0)$$

$$Q(\tau, T_{rit}) = \frac{\frac{d}{dD} ((1 - r_D) \cdot \overline{Q_D(T_{rit})} \cdot D) \Big|_{D=D(t)}}{\frac{d}{dD} ((1 - r_D) \cdot D) \Big|_{D=D(t)}}; t = (1 - r_D) \cdot D \quad (-r_{D_f} \cdot D_f \leq t \leq 0)$$

## 5.2. Calibrazione degli idrogrammi sintetici degli affluenti

Di seguito viene descritta l'elaborazione degli idrogrammi sintetici dei principali affluenti del fiume Po utilizzati per rappresentare in maniera ancora più accurata l'evento di piena al limite della prevedibilità.

Il primo passaggio del procedimento di calibrazione è consistito nell'effettuare una simulazione in moto vario per ciascuno degli affluenti importati in HEC-RAS: come condizione al contorno di valle è stata inserita l'altezza degli argini maestri in corrispondenza della sezione più a valle dell'affluente, mentre come condizioni al contorno di monte sono stati inseriti gli idrogrammi sintetici calibrati nel precedente lavoro di tesi, nel quale essi erano stati inseriti come apporti laterali puntuali (v. Pagliccia, 2010).

Quest'operazione è servita per stabilire con quanto ritardo il massimo della portata transitava da monte a valle, in modo da poter inserire come idrogrammi di primo tentativo nelle condizioni al contorno del modello completo (Po + affluenti) i suddetti idrogrammi sintetici, considerando il ritardo ricavato.

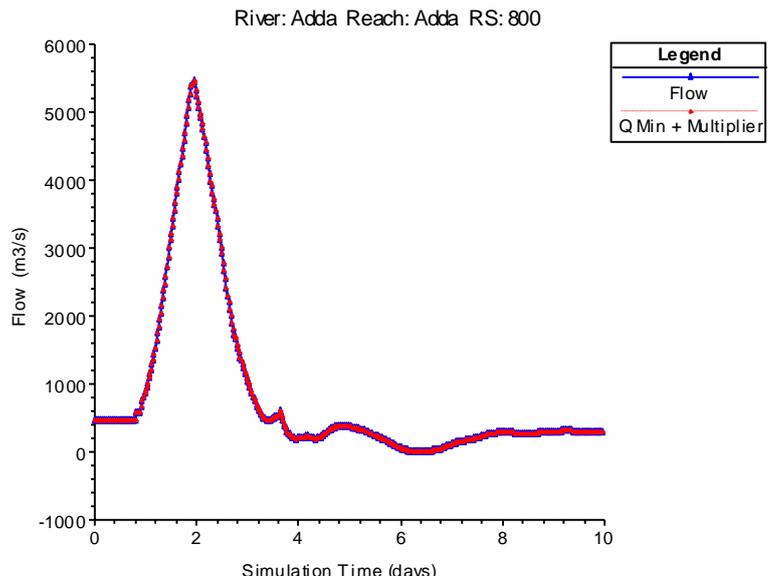
Per gli affluenti Secchia e Panaro è stata inserita come condizione al contorno una portata costante pari a  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ , non essendo stato calibrato nelle precedenti versioni del modello nessun idrogramma sintetico (una qualsiasi aggiunta di portata avrebbe alterato in eccesso l'onda di piena sul Po del modello precedente), mentre in questo lavoro di tesi si è inteso studiare le tracimazioni legate a possibili rigurgiti anche nel tratto più a valle del fiume Po, nonché

schematizzare un modello il più possibile completo che possa considerare in futuro anche altri scenari.

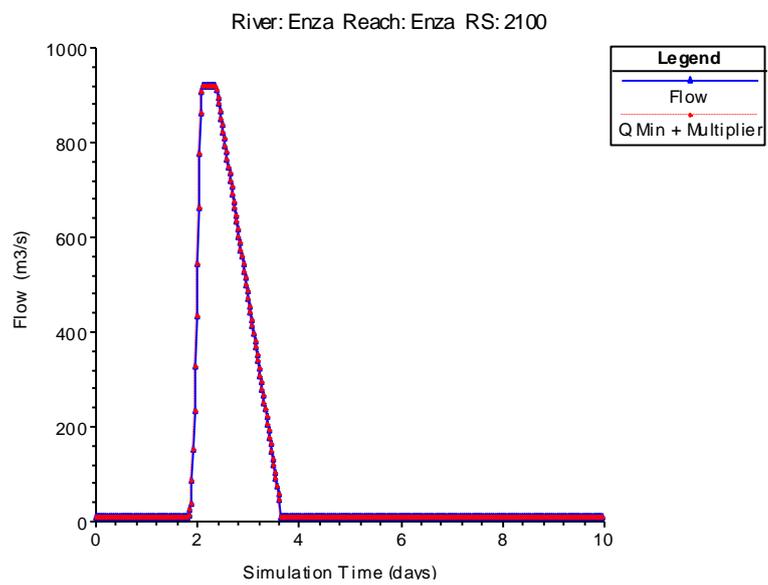
Il procedimento di calibrazione degli idrogrammi sintetici è stato svolto in maniera iterativa, procedendo in ogni fase a una simulazione in HEC-RAS, al calcolo della differenza, istante per istante, tra le portate attese nelle sezioni strumentate (Piacenza, Cremona, Boretto, Borgoforte e Pontelagoscuro) e quelle calcolate da HEC-RAS nelle stesse sezioni e ottenendo quindi un idrogramma di correzione da applicare all'affluente compreso tra la sezione strumentata in questione e quella immediatamente a monte. Nei casi in cui erano presenti più affluenti interessati dall'aggiustamento, l'idrogramma correttivo è stato ripartito tra di essi in maniera proporzionale alle superfici dei bacini dei relativi affluenti. Essendo il risultato non ancora soddisfacente e l'andamento degli idrogrammi sintetici così ottenuti piuttosto artificioso e poco realistico, si è proceduto ad un ulteriore aggiustamento manuale, guidato dal criterio del mantenimento dei volumi individuati.

Per gli affluenti che non sono stati schematizzati geometricamente a causa della mancata disponibilità dei rilievi o dell'assenza di un loro tratto nella Fascia C (Scrivia, Ticino, Trebbia e Oglio), essi sono stati schematizzati come apporti concentrati (*lateral inflow*) nel fiume Po, i cui idrogrammi sintetici erano stati calibrati da Pagliccia nel suo lavoro di tesi (v. Pagliccia, 2010).

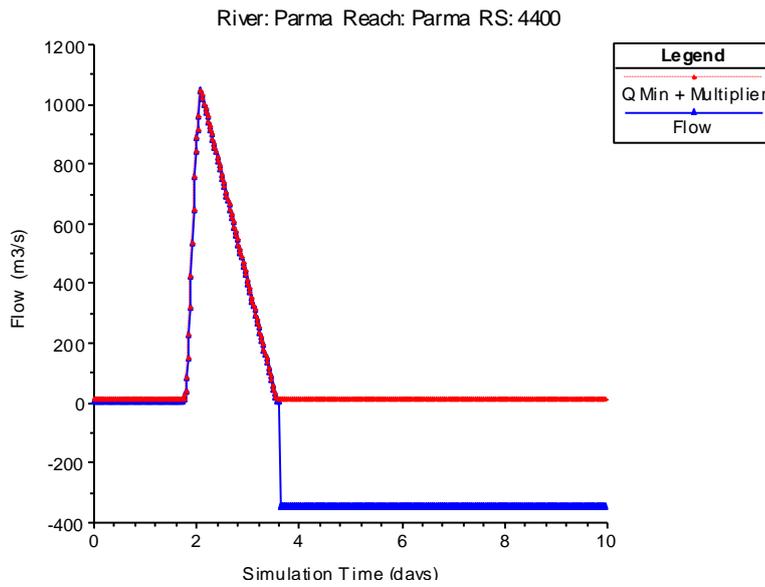
Si è così giunti alla configurazione definitiva degli idrogrammi degli affluenti laterali in ingresso nel Po (in rosso in Grafico 10, Grafico 11, Grafico 12, Grafico 13, Grafico 14 e Grafico 15 e in blu in Grafico 16, Grafico 17, Grafico 18 e Grafico 19); la cui bontà di tale configurazione è stata valutata confrontando, oltre agli idrogrammi attesi e simulati nelle cinque stazioni del Po (Grafico 20, Grafico 22, Grafico 24, Grafico 26 e Grafico 28), anche le curve di laminazione (V,Q) da essi ricavabili (Grafico 21, Grafico 23, Grafico 25, Grafico 27, Grafico 29).



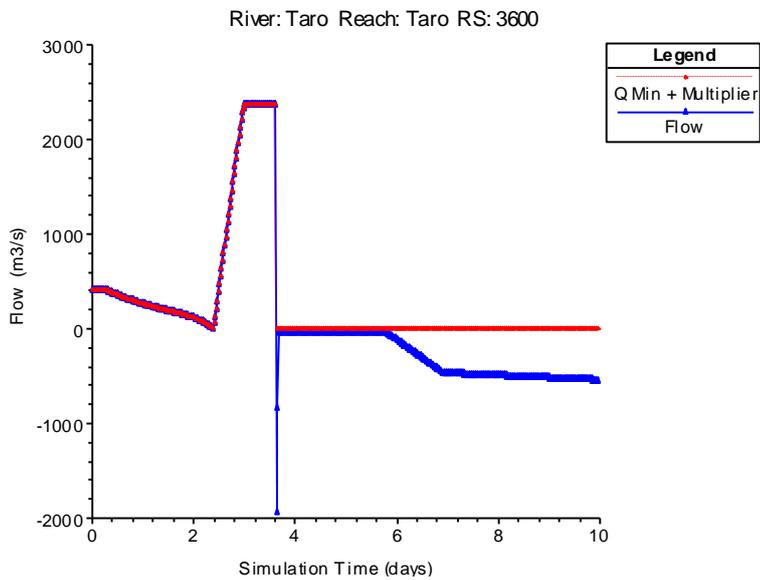
**Grafico 10: Idrogramma sintetico dell'affluente Adda**



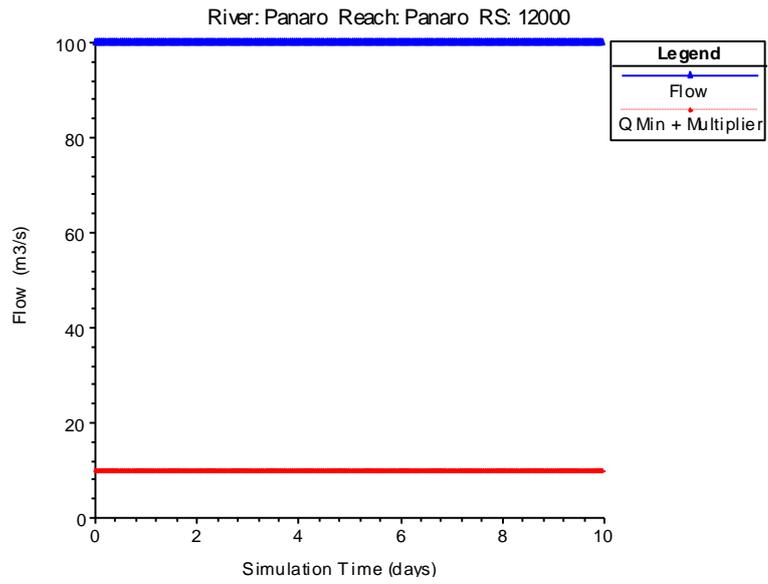
**Grafico 11: Idrogramma sintetico dell'affluente Enza**



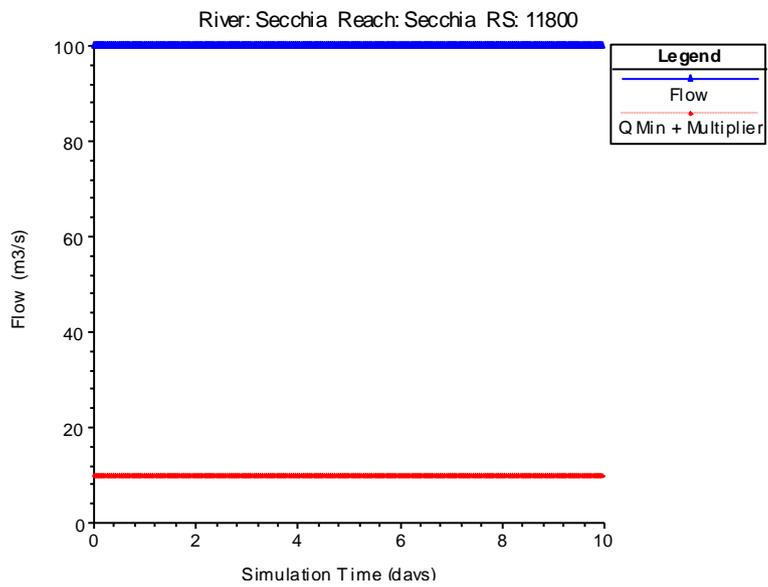
**Grafico 12: Idrogramma sintetico dell'affluente Parma**



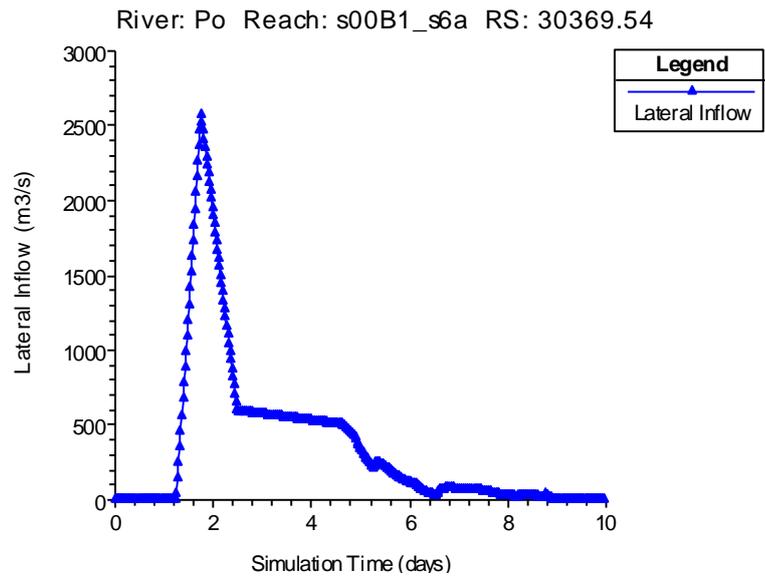
**Grafico 13: Idrogramma sintetico dell'affluente Taro**



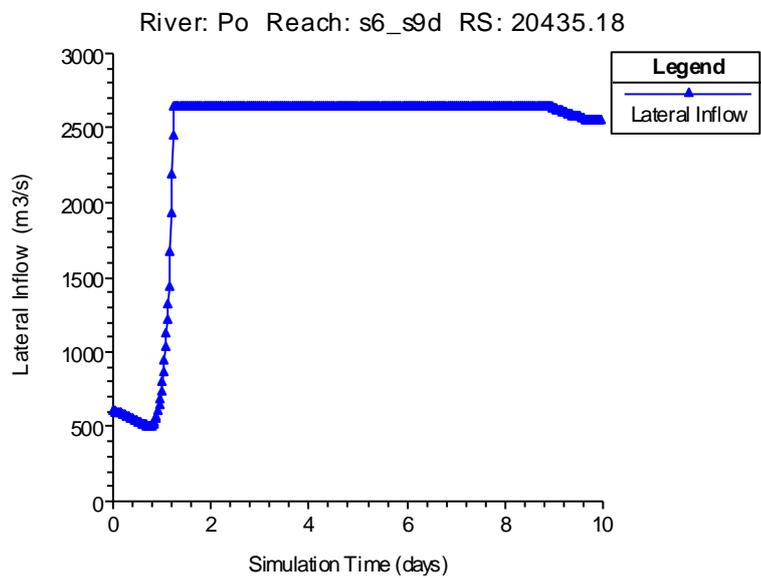
**Grafico 14: Idrogramma sintetico dell'affluente Panaro**



**Grafico 15: Idrogramma sintetico dell'affluente Secchia**



**Grafico 16: Idrogramma sintetico dell'apporto laterale dell'affluente Scrivia**



**Grafico 17: Idrogramma sintetico dell'apporto laterale dell'affluente Ticino**

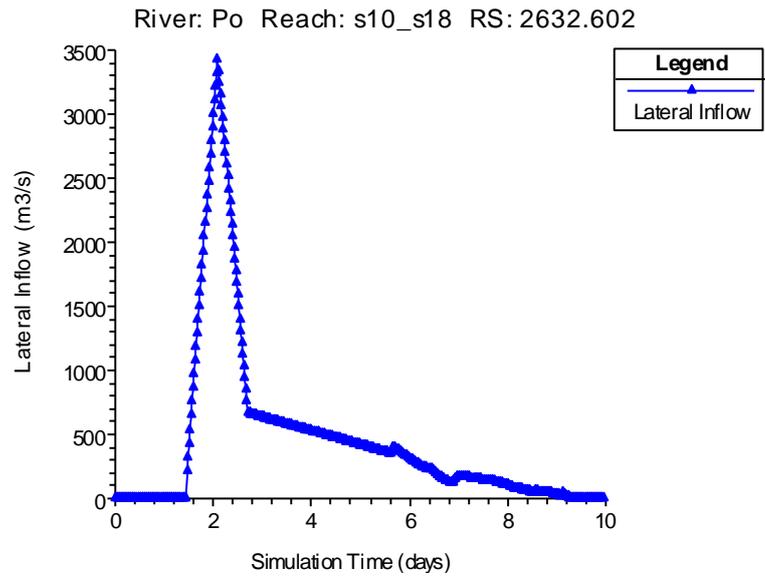


Grafico 18: Idrogramma sintetico dell'apporto laterale dell'affluente Trebbia

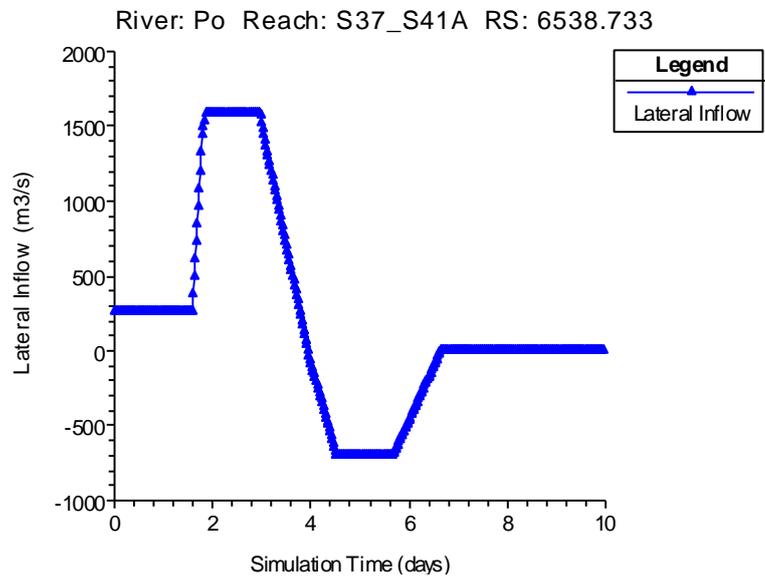
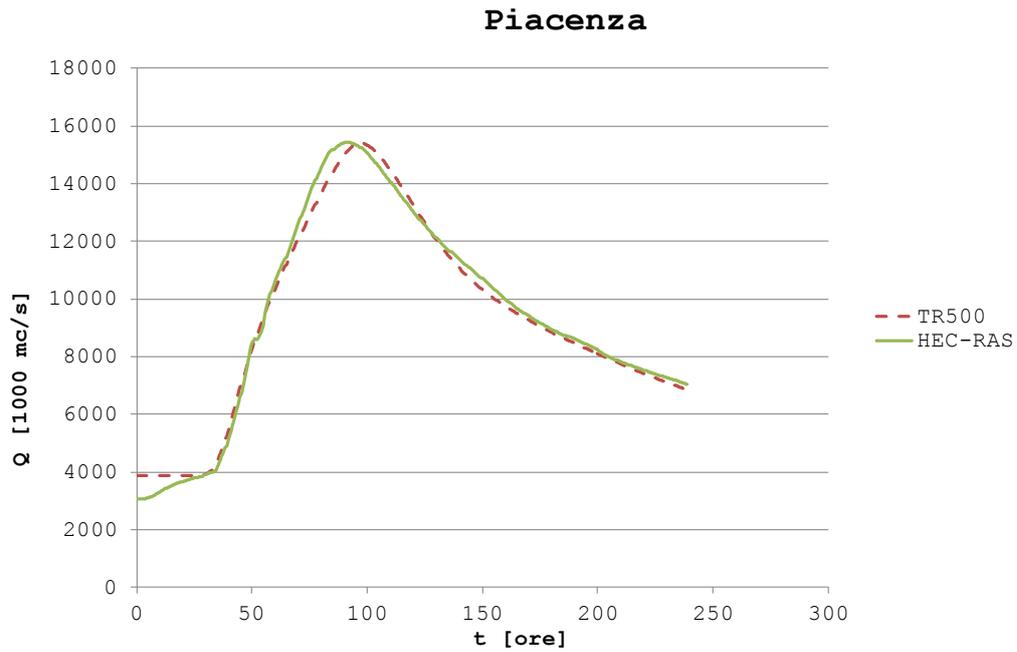
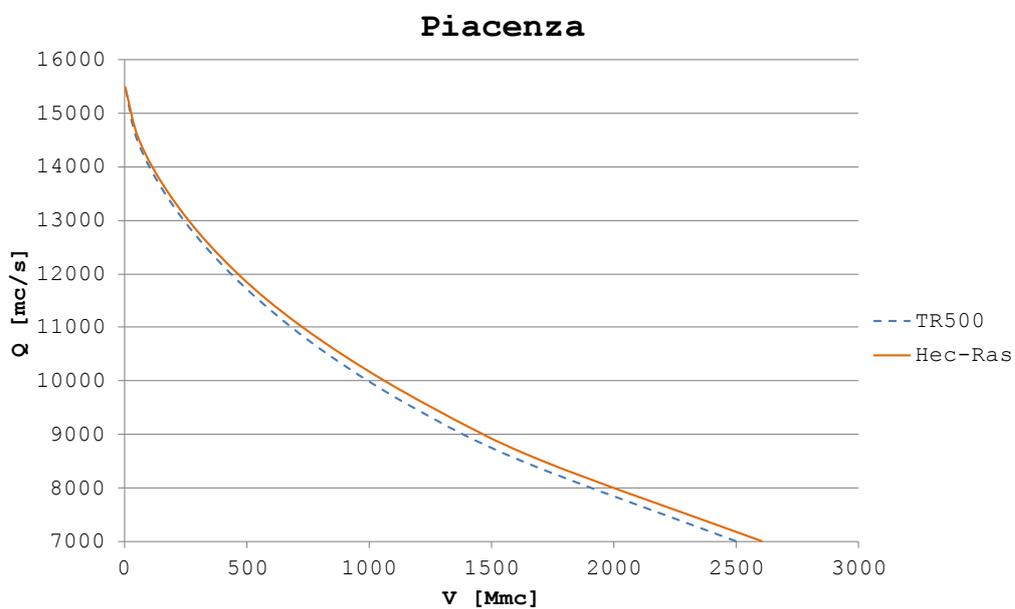


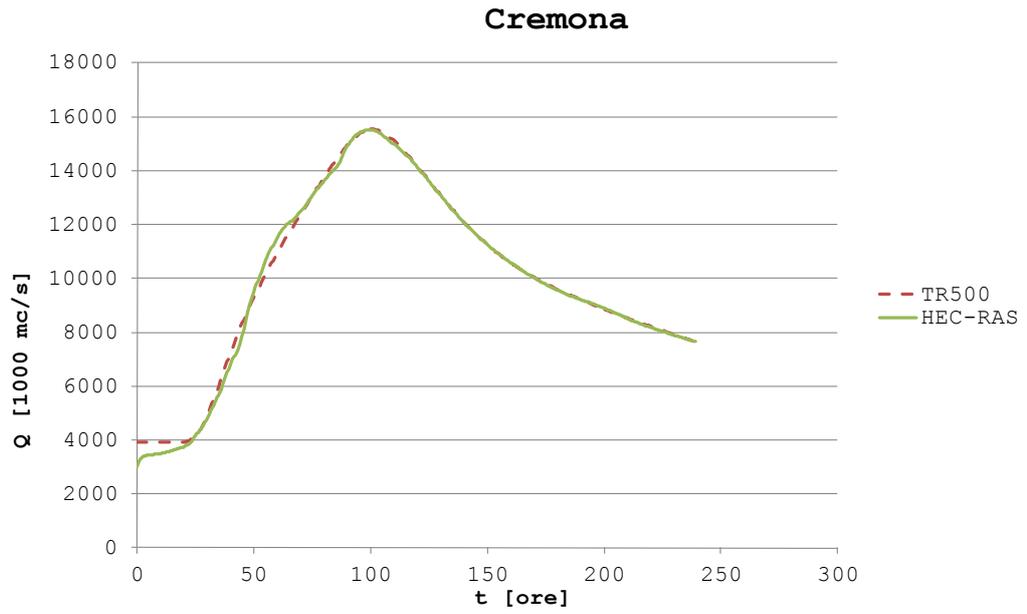
Grafico 19: Idrogramma sintetico dell'apporto laterale dell'affluente Oglio



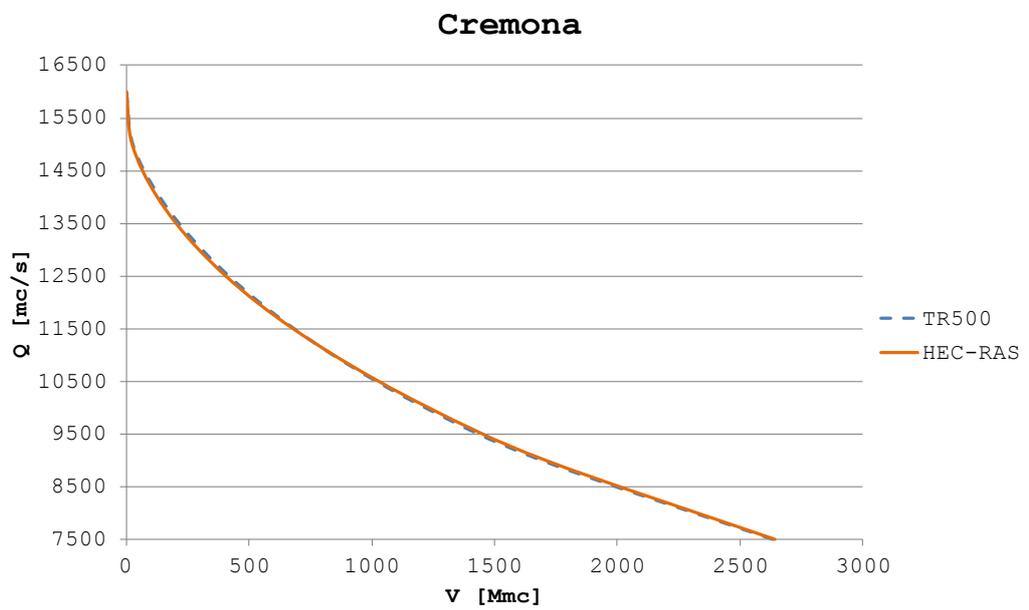
**Grafico 20: Idrogramma  $T_{rit}$  500 e idrogramma simulato dal modello nel Po a Piacenza**



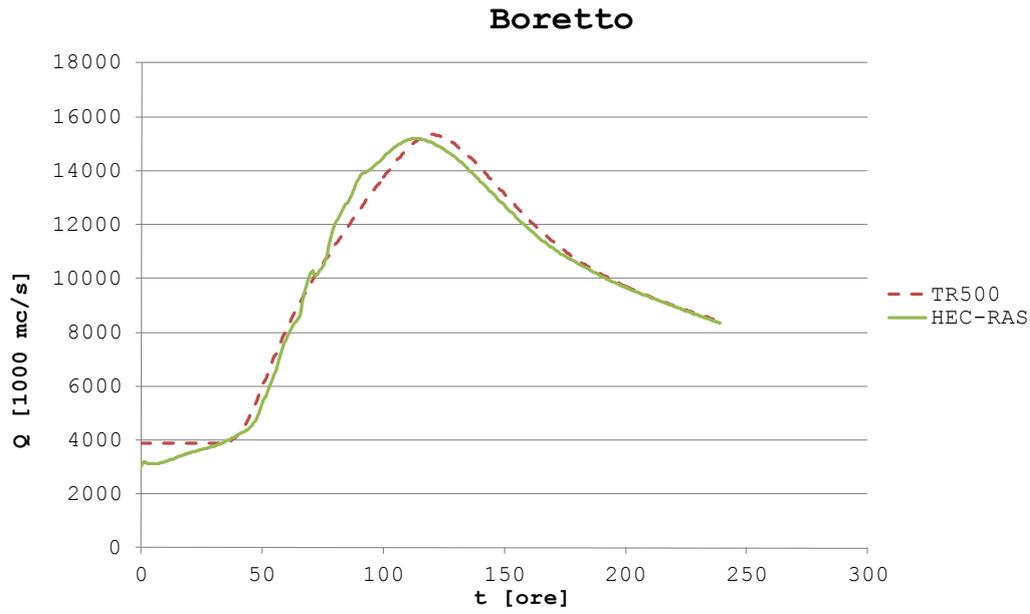
**Grafico 21: Andamento dei volumi di laminazione ricavati dall'idrogramma  $T_{rit}$  500 e dall'idrogramma simulato dal modello nel Po a Piacenza**



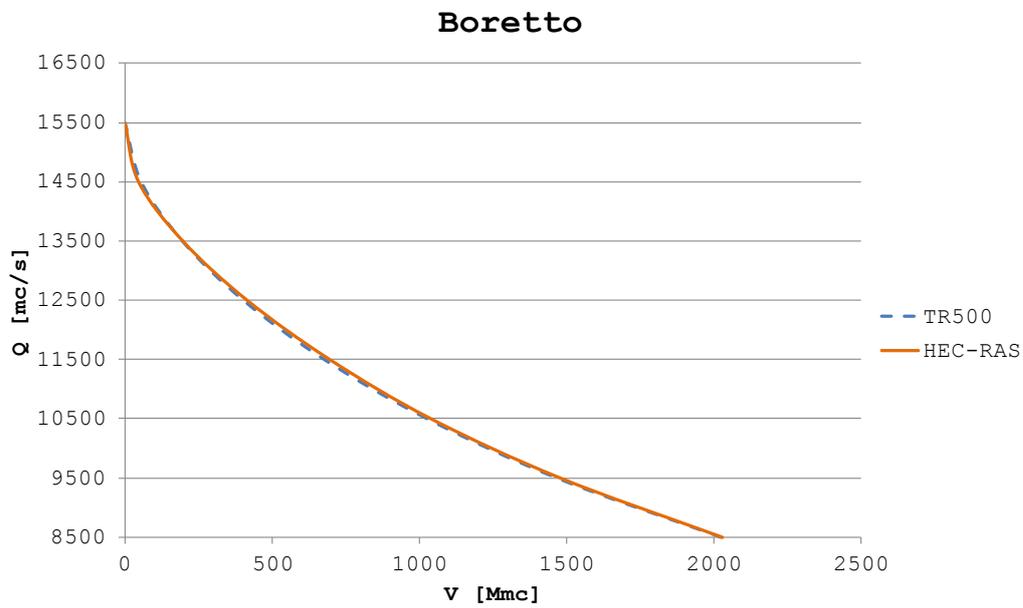
**Grafico 22: Idrogramma  $T_{rit}$  500 e idrogramma simulato dal modello nel Po a Cremona**



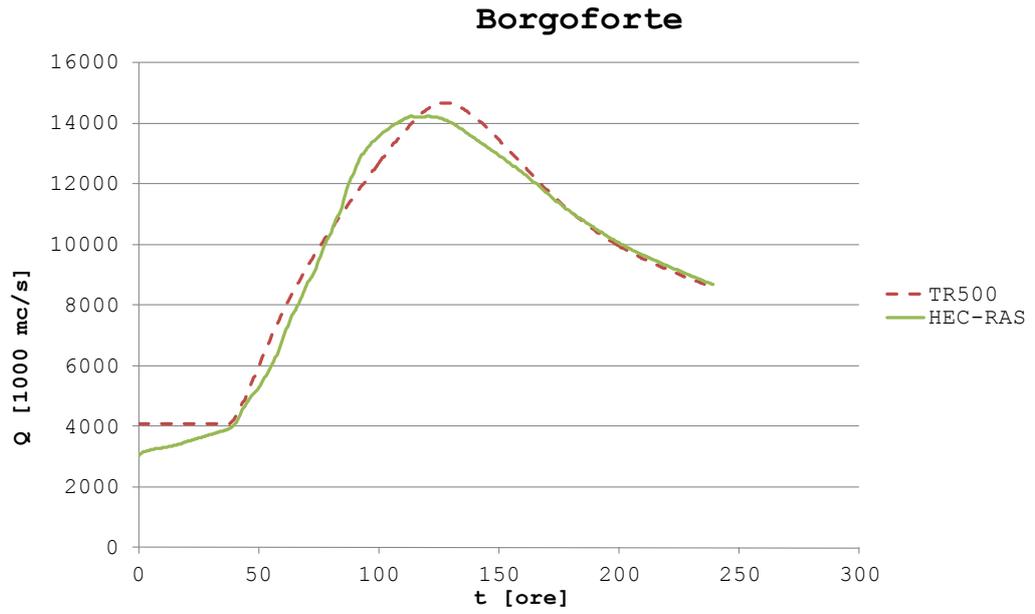
**Grafico 23: Andamento dei volumi di laminazione ricavati dall'idrogramma  $T_{rit}$  500 e dall'idrogramma simulato dal modello nel Po a Cremona**



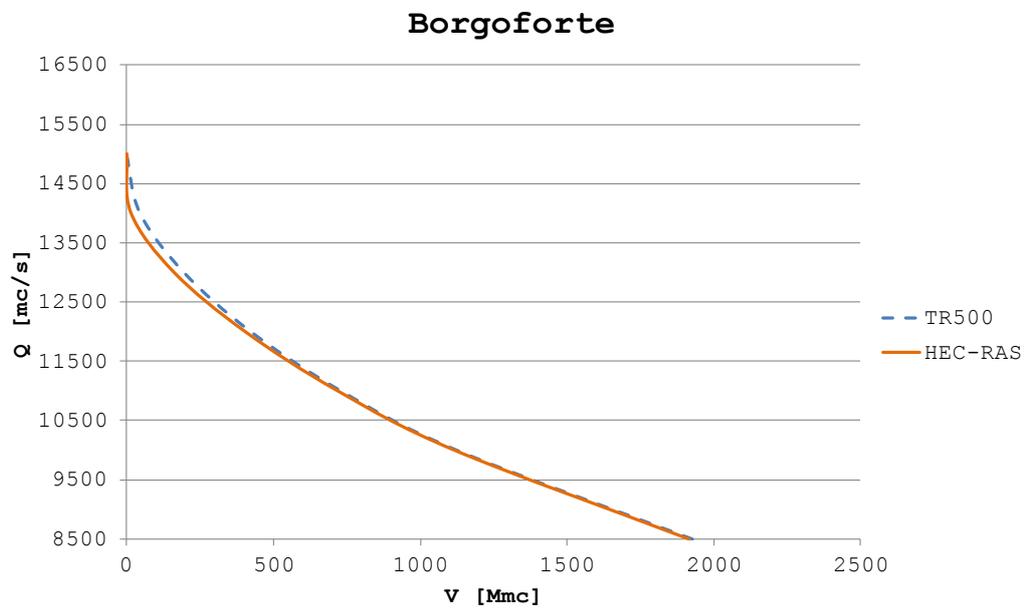
**Grafico 24: Idrogramma  $T_{rit}$  500 e idrogramma simulato dal modello nel Po a Boretto**



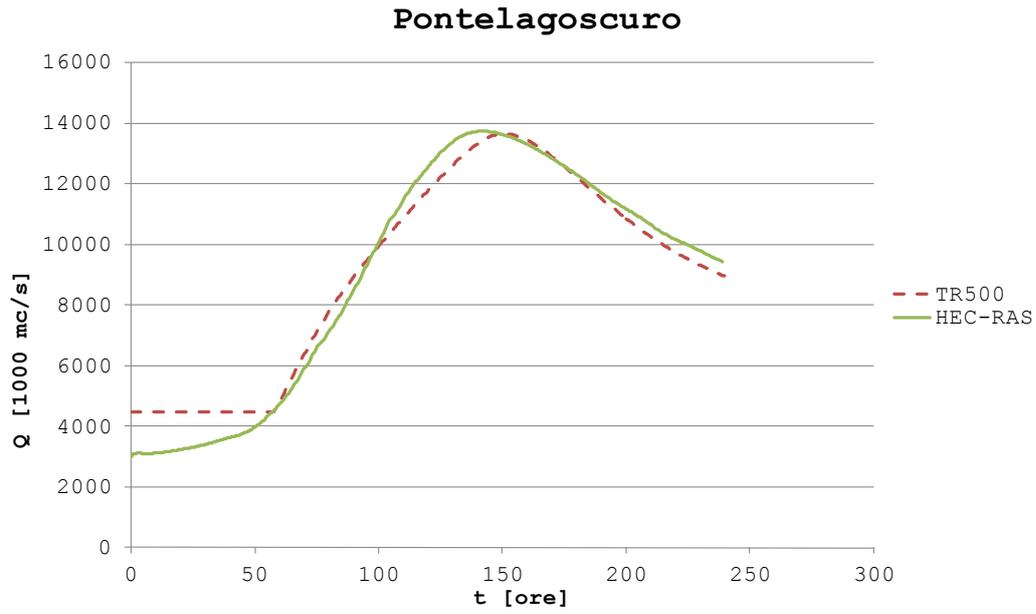
**Grafico 25: Andamento dei volumi di laminazione ricavati dall'idrogramma  $T_{rit}$  500 e dall'idrogramma simulato dal modello nel Po a Boretto**



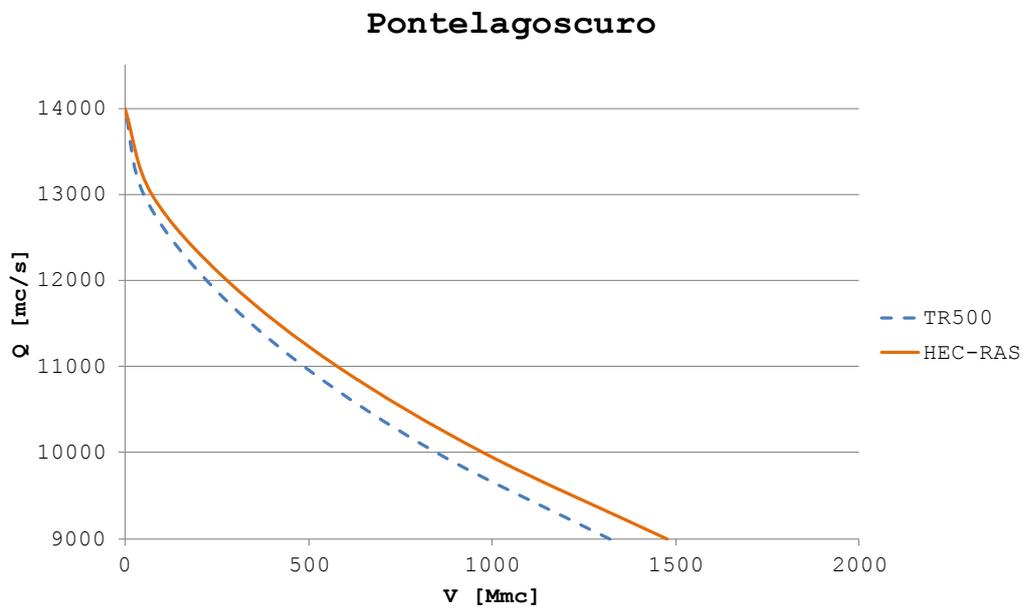
**Grafico 26: Idrogramma  $T_{rit}$  500 e idrogramma simulato dal modello nel Po a Borgoforte**



**Grafico 27: Andamento dei volumi di laminazione ricavati dall'idrogramma  $T_{rit}$  500 e dall'idrogramma simulato dal modello nel Po a Borgoforte**



**Grafico 28: Idrogramma  $T_{rit}$  500 e idrogramma simulato dal modello nel Po a Pontelagoscuro**



**Grafico 29: Andamento dei volumi di laminazione ricavati dall'idrogramma  $T_{rit}$  500 e dall'idrogramma simulato dal modello nel Po a Pontelagoscuro**

## 6. MODELLAZIONE E SIMULAZIONE DEI FENOMENI DI ROTTA ARGINALE

Per prima cosa è stato assegnato un codice numerico a ogni comparto idraulico di Fascia C, al fine di facilitarne il riferimento in seguito.

ID comparto	comparto	collocazione
1	staf_vers	Dx. Idraulica
2	vers_po	Dx. Idraulica
3	rogg_lambA	Sn. Idraulica
4	rogg_lambB	Sn. Idraulica
5	po_tido	Dx. Idraulica
6	lamb_addaA	Sn. Idraulica
7	tido_treb	Dx. Idraulica
8	lamb_addaB	Sn. Idraulica
9	treb_nure	Dx. Idraulica
10	lamb_addaC	Sn. Idraulica
11	nure_chia	Dx. Idraulica
12	adda_ogliA	Sn. Idraulica
13	chia_ardaA	Dx. Idraulica
14	chia_ardaB	Dx. Idraulica
15	arda_ongi	Dx. Idraulica
16	adda_ogliB	Sn. Idraulica
17	ongi_taro	Dx. Idraulica
18	taro_parm	Dx. Idraulica
19	adda_ogliC	Sn. Idraulica
20	parm_enza	Dx. Idraulica
21	enza_cros	Dx. Idraulica
22	cros_seccA	Dx. Idraulica
23	ogli_mincA	Sn. Idraulica
24	ogli_mincB	Sn. Idraulica
25	cros_seccB	Dx. Idraulica
26	cros_seccC	Dx. Idraulica
27	ogli_mincC	Sn. Idraulica
28	secc_panaA	Dx. Idraulica
29	secc_panaB	Dx. Idraulica
30	pana_poA	Dx. Idraulica
31	pana_poB	Dx. Idraulica

Tabella 6: Assegnazione del codice numerico per l'identificazione dei comparti

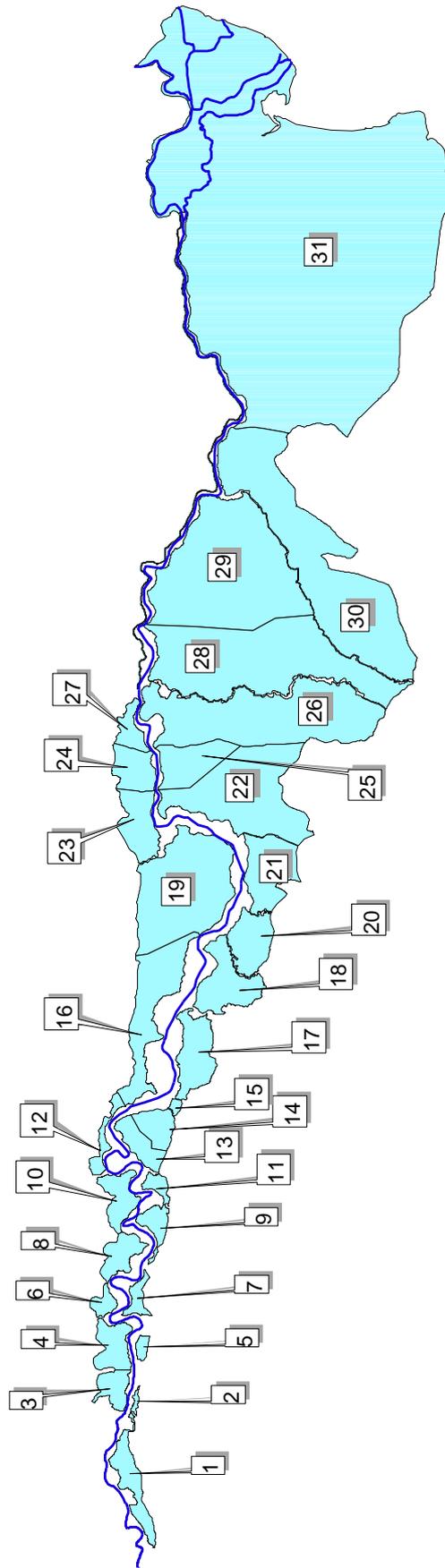


Figura 36: Assegnazione del codice numerico per l'identificazione dei comparti



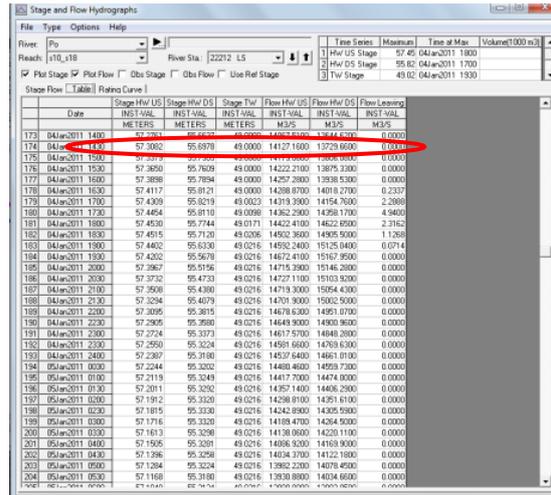


Figura 38: Esempio di uno Stage and Flow Hydrograph relativo a una Lateral Structure sormontata

Per entrare più nel dettaglio, si è rivelato estremamente utile lo strumento *Profile Plot* (v. Figura 39 e Figura 40), che permette di osservare l'andamento nel tempo del profilo del pelo libero simulato lungo il corso d'acqua durante l'evento di piena. Tale visualizzazione, unitamente all'animazione dell'evento di piena, ha reso possibile individuare visivamente il primo punto all'interno della *Lateral Structure* in cui si verifica il superamento dell'argine da parte del pelo libero.

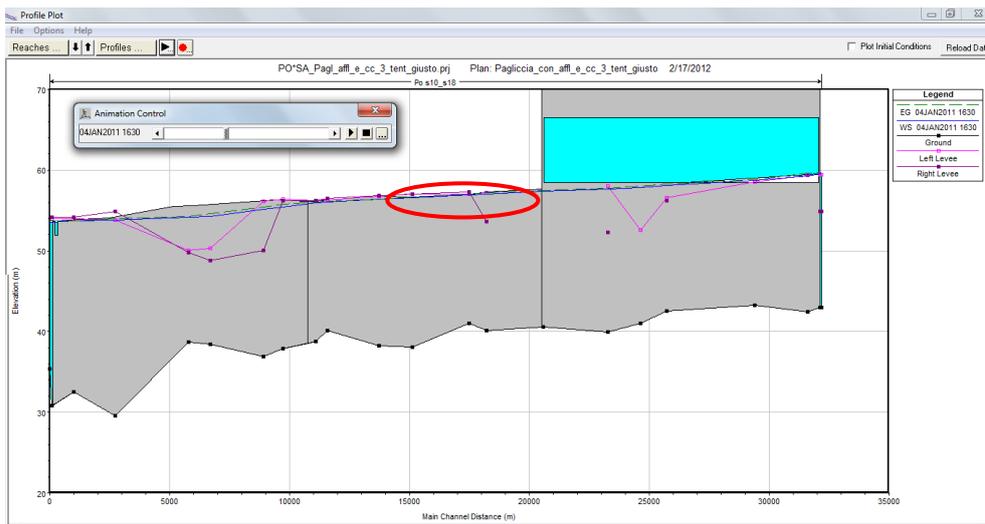
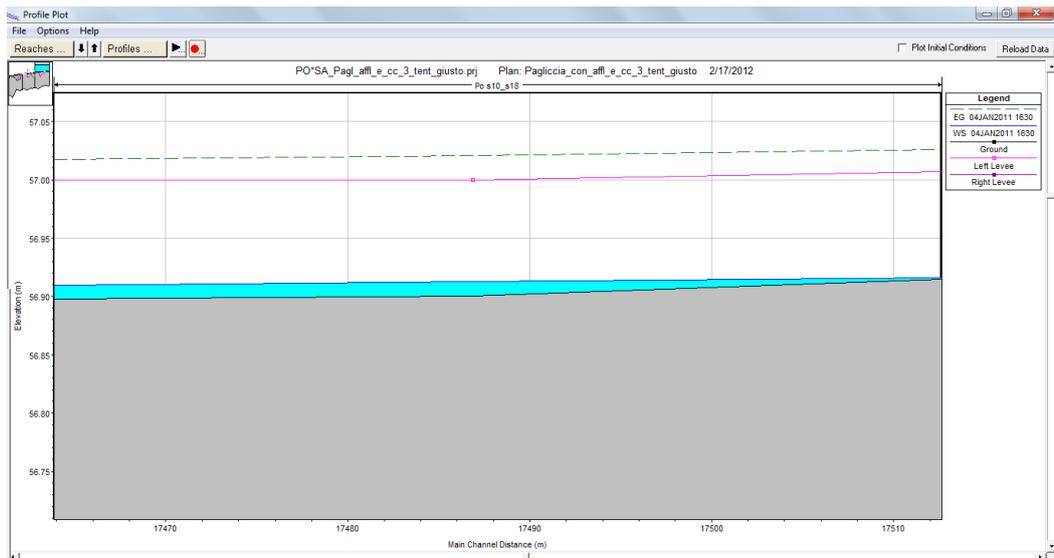
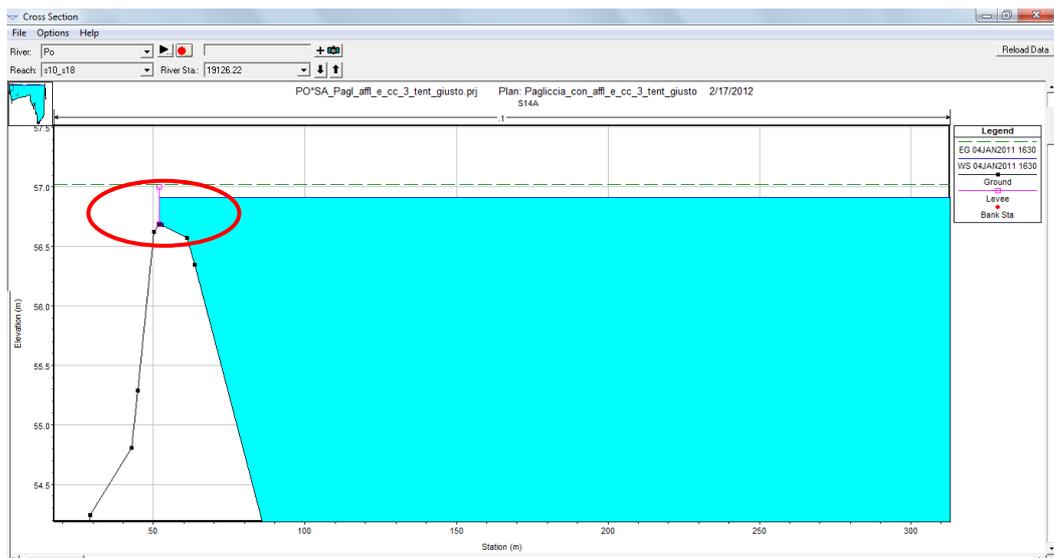


Figura 39: Esempio di Profile Plot



**Figura 40: Esempio di *Profile Plot*, (dettaglio del sormonto di una *Lateral Structure*)**



**Figura 41: Esempio di sormonto degli argini di una sezione**

A questo punto è stata inserita una breccia in corrispondenza della sezione (fra le tante comprese nell'estensione laterale dei suddetti elementi) in cui si è osservata la tracimazione (Figura 41). È verosimile infatti che, conseguentemente alla tracimazione degli argini maestri, si producano delle rotte, poiché il manufatto arginale è generalmente progettato e realizzato per contenere le portate fluviali entro l'alveo, ma non per resistere a tracimazione. Una recente indagine storica (Govi e Turitto, 2000) ha evidenziato come ai fenomeni di tracimazione delle

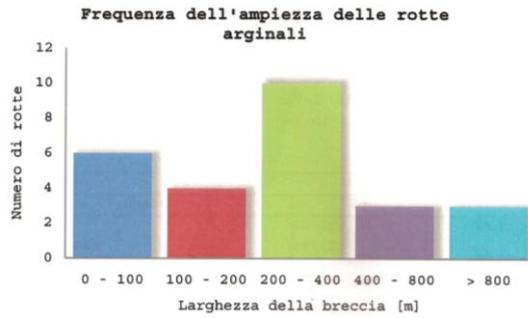
arginature maestre del Po sia generalmente seguita la formazione di brecce nel corpo del manufatto.

Descrivendo le caratteristiche geometriche della breccia arginale ipotizzata attraverso il *Lateral Structure Editor* (Figura 43), è stata condotta una nuova simulazione. Riferendosi a questa nuova simulazione e procedendo con lo stesso criterio, si è individuata la successiva *Lateral Structure* in cui simulare una rotta arginale. Tale processo è stato ripetuto fino al raggiungimento di una condizione di deflusso della piena cinquecentennale per cui in nessun ulteriore segmento arginale si potessero riprodurre condizioni di sormonto della sommità.

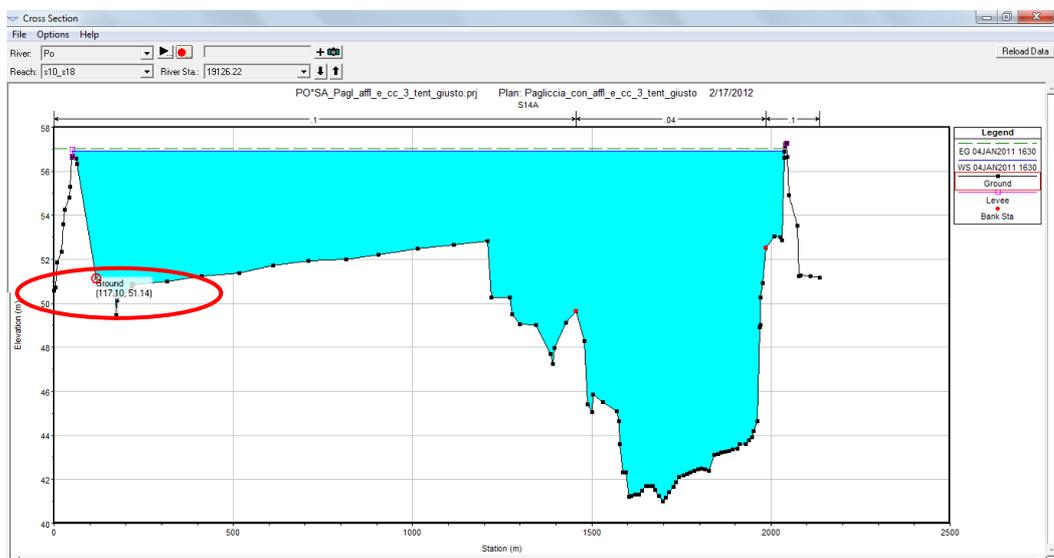
La generica breccia prevista nel rilevato arginale viene definita sulla base di alcuni parametri:

- l'ubicazione lungo l'asta fluviale;
- la larghezza complessiva;
- l'entità del suo approfondimento rispetto alla sommità arginale;
- la pendenza delle sue pareti laterali, considerate nel nostro modello sempre verticali;
- il tempo di formazione a partire dall'istante di sormonto;
- la modalità di formazione.

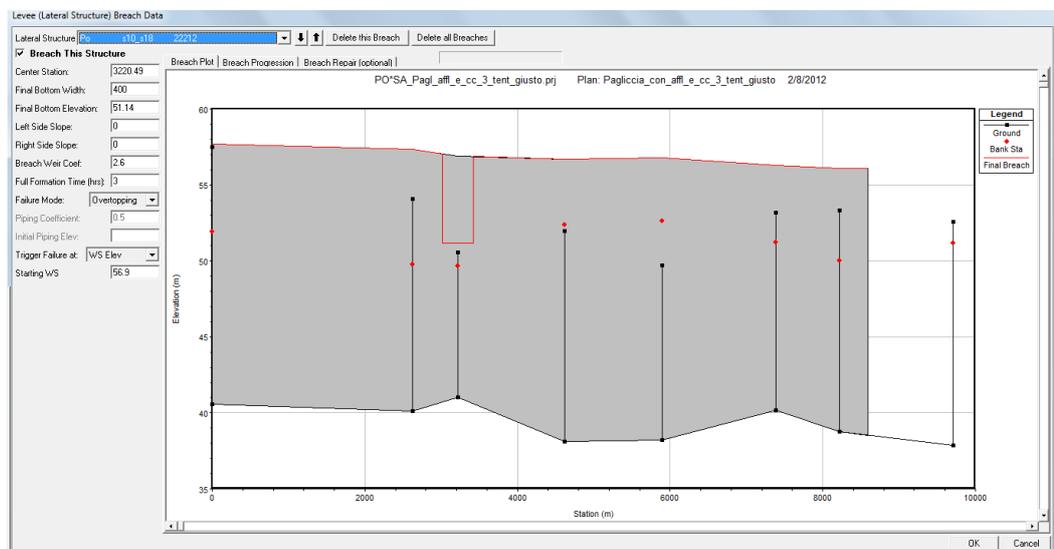
A livello modellistico è stato imposto che la formazione della breccia avesse inizio al raggiungimento di un tirante idrico pari all'altezza del relativo argine (rotta per tracimazione) e avesse una durata pari a tre ore (Figura 44); tale scelta, supportata da studi che evidenziano la scarsa influenza sui risultati della simulazione della variazione del tempo di formazione della breccia tra zero e sei ore (Brath e Di Baldassarre, 2006), è finalizzata all'incremento della stabilità del modello. In seguito all'analisi della casistica storica delle rotte verificatesi nel Po (come si vede nel Grafico 30) effettuata dall'AdBPo sulla base dei dati riportati dallo studio di Govi e Turitto del 2000, si è optato come larghezza finale della breccia per un valore di 400 m, mentre per la quota di fondo si è assunta la maggiore tra quelle del piano golenale e del piano campagna prospicienti l'argine maestro. Per operare tale scelta, è stato necessario consultare i rilievi topografici delle sezioni all'altezza delle quali il modello aveva individuato l'inizio della tracimazione; tali rilievi sono stati messi a disposizione dal DISTART (Figura 42).



**Grafico 30: Frequenza dell'ampiezza delle rotte arginali nel Po (Fonte: AdBPo - Distart, 2008)**



**Figura 42: Esempio di individuazione della Final Bottom Elevation**



**Figura 43: Esempio di inserimento dei dati relativi a una breccia**

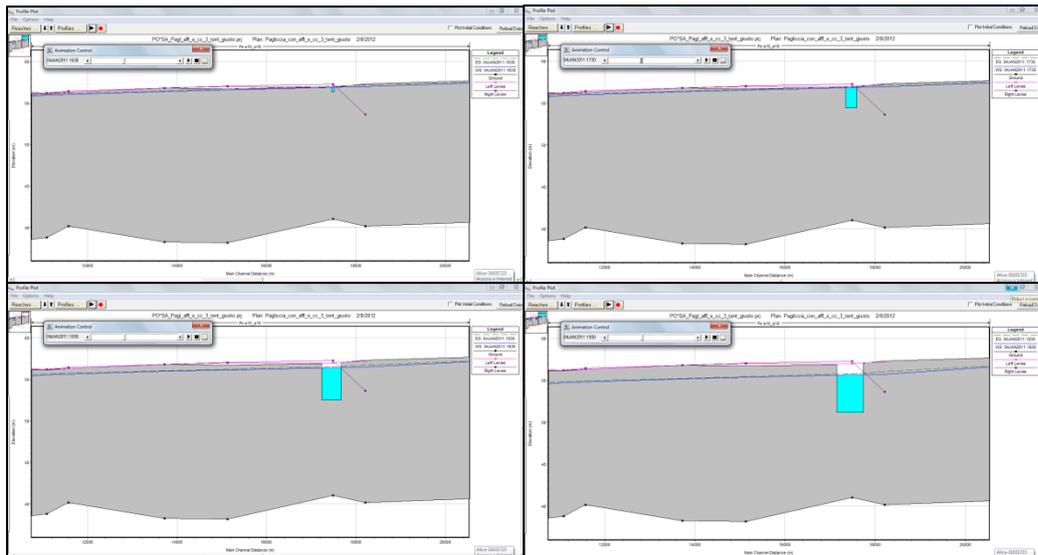


Figura 44: Esempio di formazione di una breccia nel tempo

La configurazione finale delle breccie inserite è riassunta in Tabella 7 e illustrata in Figura 45.

BRECCIE						
n progr	RIVER	REACH	LATERAL STRUCTURE	COMPARTO	ID COMPARTO	COLLOCAZIONE BRECCIA
1	Parma	Parma	1850	taro_parm	18	Sn. Idraulica
2	Enza	Enza	1450	parm_enza	20	Sn. Idraulica
3	Po	s6_s9d	13235	rogg_lambA	3	Sn. Idraulica
4	Po	s18a_s24D	34529	lamb_addaC	10	Sn. Idraulica
5	Parma	Parma	150	parm_enza	20	Dx. Idraulica
6	Po	s10_s18	12735	lamb_addaB	8	Sn. Idraulica
7	Po	s10_s18	22212	lamb_addaA	6	Sn. Idraulica

Tabella 7: Configurazione finale delle breccie

In realtà si verifica un sormonto anche negli argini maestri dei comparti n. 1 e 2 (staf\_vers e vers\_po), ma si è scelto di non inserirvi nessuna breccia poiché, trovandosi essi decisamente a monte lungo il corso del fiume Po, presentano arginature discontinue, mentre in altri tratti l'alveo risulta inciso con quote inferiori al terreno circostante; questo renderebbe poco verosimile l'inserimento delle breccie.

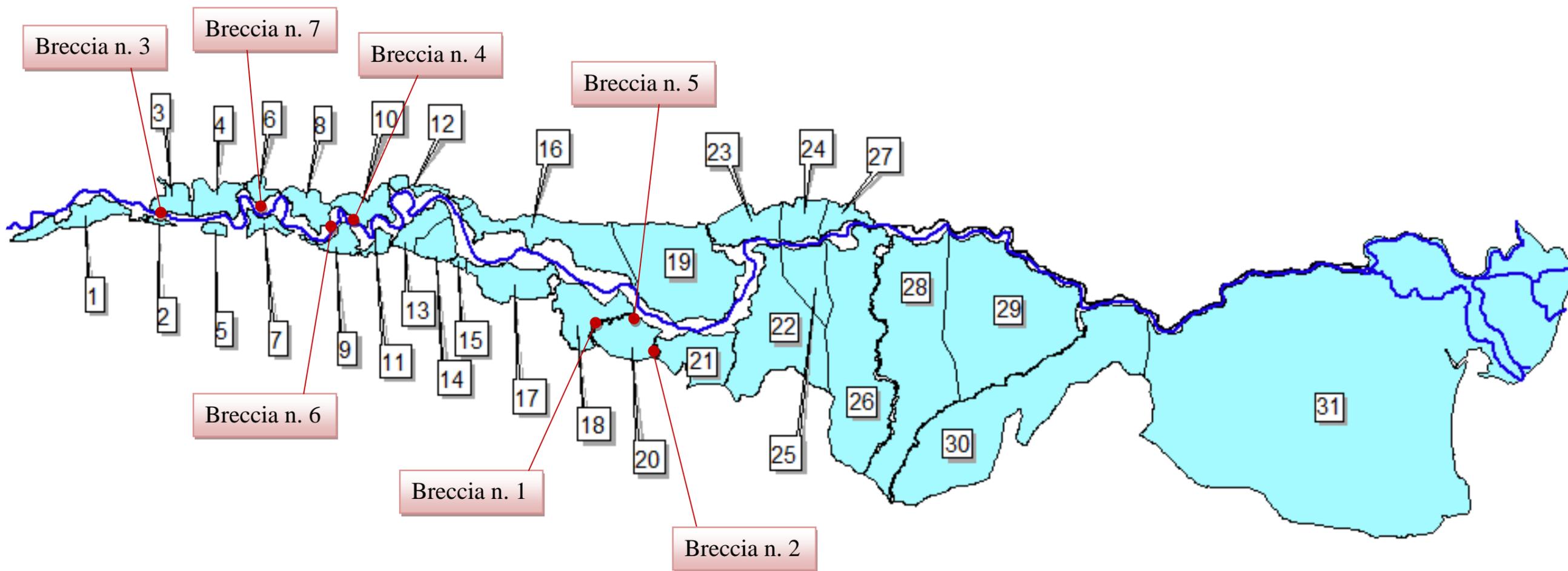


Figura 45: Collocazione delle breccie



Vengono di seguito riportati i dati relativi a ogni breccia.

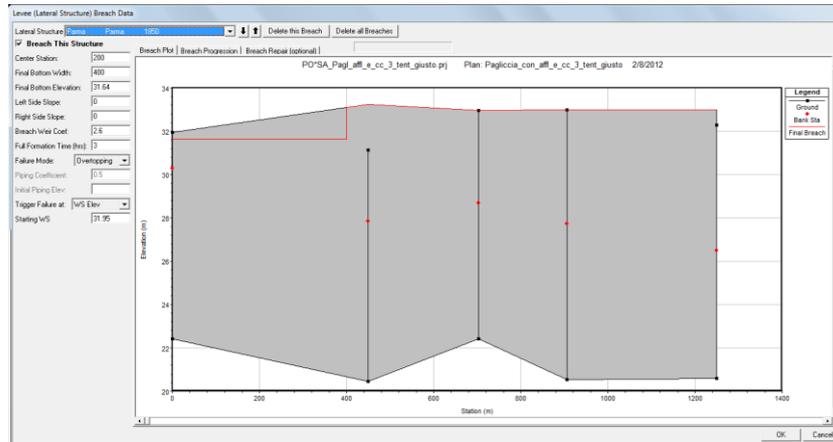


Figura 46: Inserimento dei dati relativi alla breccia n. 1

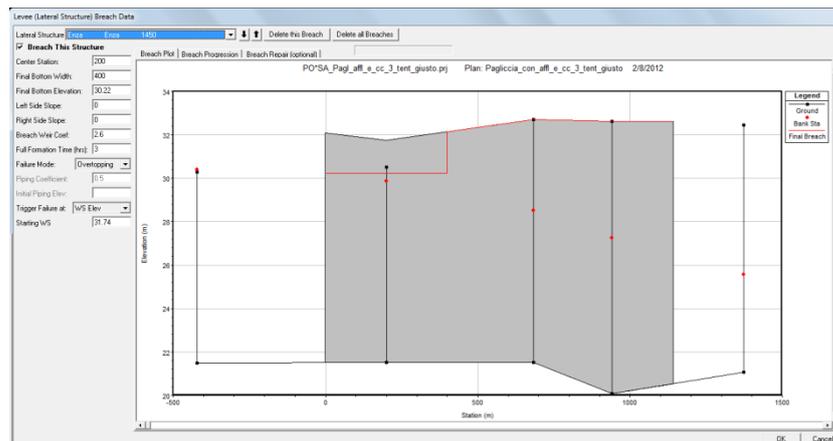


Figura 47: Inserimento dei dati relativi alla breccia n. 2

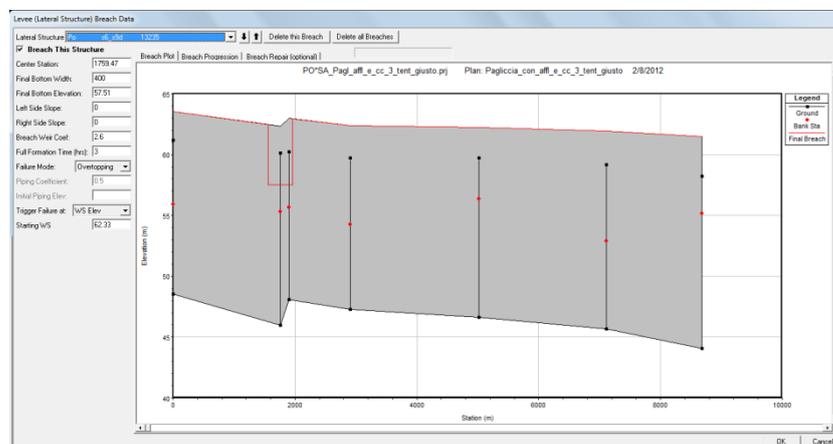


Figura 48: Inserimento dei dati relativi alla breccia n. 3

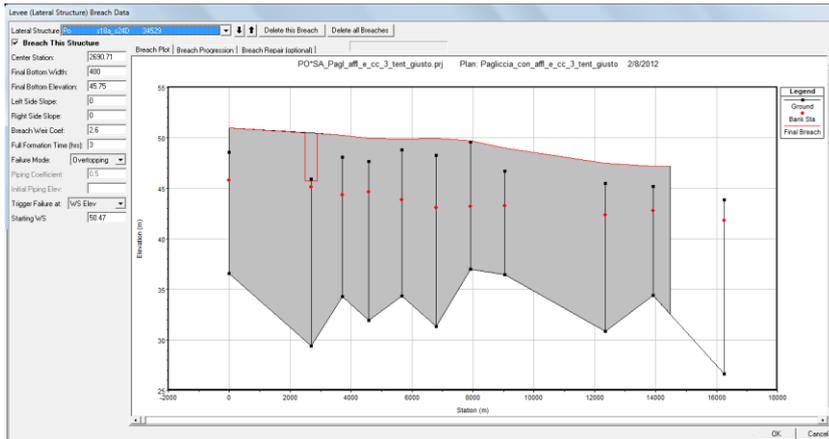


Figura 49: Inserimento dei dati relativi alla breccia n. 4

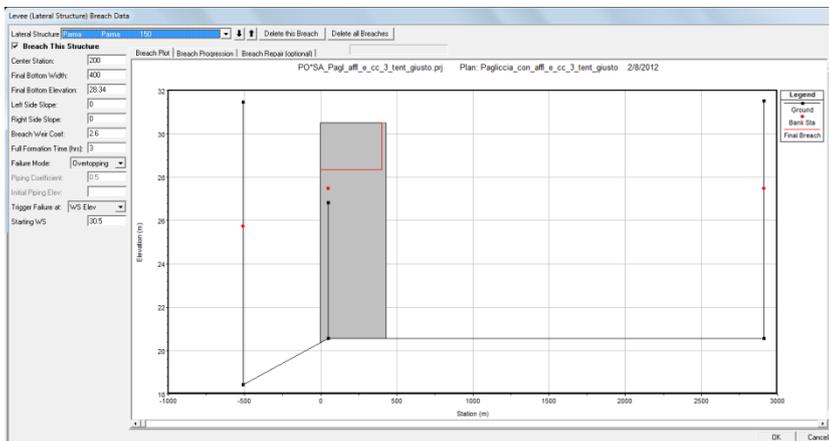


Figura 50: Inserimento dei dati relativi alla breccia n. 5

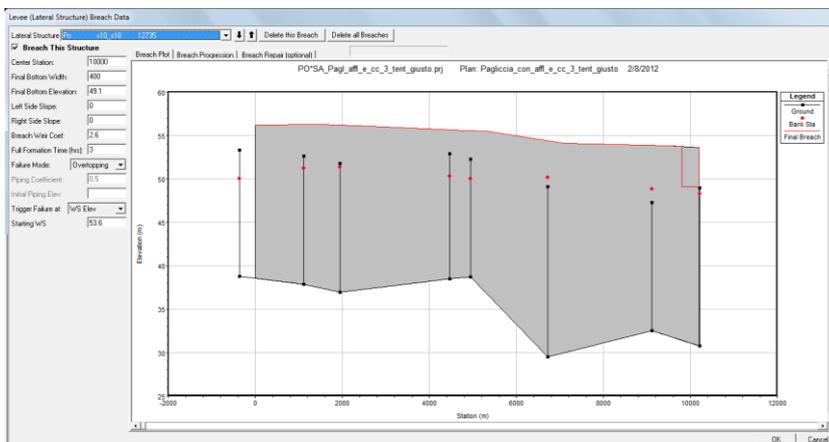
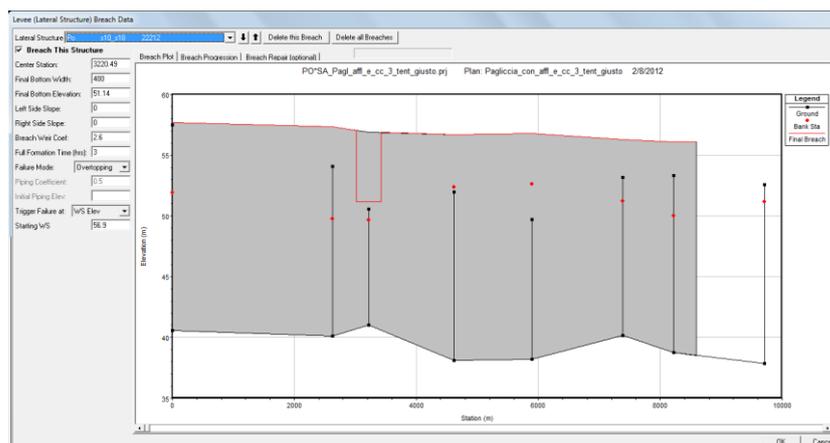


Figura 51: Inserimento dei dati relativi alla breccia n. 6



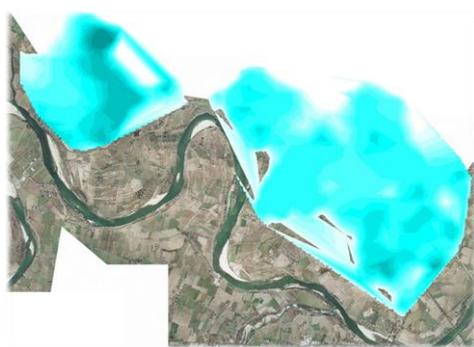
**Figura 52: Inserimento dei dati relativi alla breccia n. 7**

## **6.2. Risultati**

La simulazione condotta con la configurazione arginale attuale ha evidenziato che, in caso di evento di piena con tempo di ritorno cinquecentennale, 8 dei 31 comparti di Fascia C verrebbero interessati da esondazioni (Tabella 8), con tiranti massimi anche dell'ordine di diversi metri e con ingenti volumi d'acqua coinvolti. I risultati riportati in Tabella 8 risentono ovviamente della schematizzazione concettuale adottata per il comportamento idraulico dei comparti, poiché essa concentra immediatamente nelle zone più depresse i volumi esondati, i quali in realtà occupano inizialmente avvallamenti locali, impiegando un tempo finito per il trasferimento dal punto di tracimazione a quello di accumulo finale.

ID COMPARTO	COMPARTO	COLLOCAZIONE COMPARTO RISPETTO AL PO	VOLUME [Mm <sup>3</sup> ]	TIRANTE [m]
1	staf_vers	Dx. Idraulica	4.61	2.10
2	vers_po	Dx. Idraulica	1.20	3.70
3	rogg_lambda	Sn. Idraulica	111.64	7.39
6	lamb_addaA	Sn. Idraulica	60.95	7.43
8	lamb_addaB	Sn. Idraulica	143.93	6.79
10	lamb_addaC	Sn. Idraulica	80.76	6.88
18	taro_parm	Dx. Idraulica	27.23	3.95
20	parm_enza	Dx. Idraulica	204.96	6.42
<b>VOLUME TOTALE [Mm<sup>3</sup>]</b>			<b>635.27</b>	

**Tabella 8: Volumi e tiranti massimi nei comparti interessati da esondazione nell'attuale configurazione arginale**



**Figura 53: Esempio di allagamento di un comparto idraulico nell'attuale configurazione arginale**

I risultati in termini di portate (Tabella 9) evidenziano la presenza di flussi provenienti dai comparti in direzione del corso d'acqua; tali flussi sono localizzati in corrispondenza dei comparti nei quali è stata inserita una breccia e vengono giustificati dal fatto che tale elemento non permette alcun tipo di controllo della direzione del flusso.

ID COMPARTO	COMPARTO	COLLOCAZIONE COMPARTO RISPETTO AL PO	INFLOW [m <sup>3</sup> /s]	OUTFLOW [m <sup>3</sup> /s]
1	staf_vers	Dx. Idraulica	177.25	0.00
2	vers_po	Dx. Idraulica	71.87	0.00
3	rogg_lambA	Sn. Idraulica	8384.46	1137.45
6	lamb_addaA	Sn. Idraulica	9026.54	120.38
8	lamb_addaB	Sn. Idraulica	6736.05	263.92
10	lamb_addaC	Sn. Idraulica	6901.74	85.83
18	taro_parm	Dx. Idraulica	462.03	0.00
20	parm_enza	Dx. Idraulica	1276.34	212.19

**Tabella 9: Portate massime in ingresso e in uscita dalle *Storage Area* interessate da esondazione nell'attuale configurazione arginale**

In APPENDICE A vengono riportati gli *Stage and Flow Hydrograph* relativi ai comparti idraulici soggetti ad allagamento.



## **7. EVENTO DI PIENA AL LIMITE DELLA PREVEDIBILITÀ: SIMULAZIONE IDRAULICA CON ARGINI INERODIBILI**

In questa parte del lavoro è stato preso a riferimento uno scenario ipotetico di argini maestri inerodibili, il che corrisponderebbe operativamente a un intervento di rivestimento e consolidamento del lato campagna di tutte le arginature maestre attualmente interessate dal fenomeno di sormonto in occasione dell'evento di piena cinquecentennale. La simulazione con tale scenario fornisce indicazioni precise relativamente ai volumi di piena da gestire esternamente alle arginature maestre, ipotizzando che non avvengano fenomeni di rotta arginale. L'identificazione di detti volumi costituisce un primo passo nella direzione del controllo e della gestione degli eventi di piena al limite della prevedibilità, essendo infatti lo scenario di riferimento, come già detto, del tutto ipotetico, e non essendo possibile neppure realizzare una configurazione arginale tale da evitare la tracimazione a fronte di qualsiasi evento di piena, per via del raggiungimento su gran parte dell'asta inferiore del fiume di condizioni strutturali limite. Pertanto i suddetti eventi al limite della prevedibilità devono necessariamente essere gestiti anche attraverso una laminazione controllata al di fuori delle arginature maestre (v. ad es. DISTART AdBPo, 2008). A tal fine è necessario quantificare i volumi da scolmare (primo passo compiuto nel presente lavoro di tesi), identificare le zone esterne alle arginature maestre più adatte ad accogliere i volumi di laminazione, nell'ottica di minimizzare le condizioni di rischio idraulico e, infine, proteggere dai fenomeni erosivi i tratti arginali soggetti a tracimazione con l'auspicio di scongiurare rotte catastrofiche come quella di Occhiobello (FE) del novembre del 1951. Esse infatti provocano pericolose esondazioni incontrollate e ingenti danni al patrimonio socio-economico in un territorio, il quale, come precedentemente illustrato, risulta densamente popolato e intensamente sfruttato sia da un punto di vista agricolo che industriale.

Per poter valutare i volumi di piena da laminare in maniera controllata, nel modello è stata caricata una geometria schematizzante l'attuale configurazione arginale, nella quale è stata impedita la formazione delle brecce, ed è stata quindi

condotta una nuova simulazione, i cui esiti sono stati studiati e poi successivamente confrontati con quelli precedentemente ottenuti e illustrati nel Capitolo 1. Tale scenario geometrico, chiaramente del tutto ipotetico, si basa sull'ipotesi di un rivestimento della struttura arginale. Tale rinforzo superficiale, impedendo i fenomeni erosivi tipicamente connessi ai fenomeni di sormonto, evita il cedimento strutturale del rilevato e riproduce una condizione di laminazione controllata dei volumi di piena per eventi particolarmente intensi.

### ***7.1. Risultati***

La simulazione condotta sotto l'ipotesi di argini inderodibili ha evidenziato una differente dinamica della propagazione della piena e delle esondazioni all'esterno delle arginature maestre, con 20 comparti su 31 interessati da esondazione (Tabella 10 e Tabella 11).

ID COMPARTO	COMPARTO	COLLOCAZIONE COMPARTO RISPETTO AL PO	VOLUME [Mm <sup>3</sup> ]	TIRANTE [m]
1	staf_vers	Dx. Idraulica	39.8956	4.4159
2	vers_po	Dx. Idraulica	2.1650	4.4680
3	rogg_lambA	Sn. Idraulica	4.0301	1.0747
4	rogg_lambB	Sn. Idraulica	0.8467	0.6027
6	lamb_addaA	Sn. Idraulica	26.2076	4.8500
7	tido_treb	Dx. Idraulica	0.0048	0.0258
8	lamb_addaB	Sn. Idraulica	35.1363	3.6824
10	lamb_addaC	Sn. Idraulica	26.7220	4.8367
11	nure_chia	Dx. Idraulica	0.3548	2.0286
12	adda_ogliA	Sn. Idraulica	0.0942	0.2000
13	chia_ardaA	Dx. Idraulica	0.0011	0.0029
14	chia_ardaB	Dx. Idraulica	0.5503	1.3001
16	adda_ogliB	Sn. Idraulica	0.1106	0.0411
17	ongi_taro	Dx. Idraulica	0.0004	0.0300
18	taro_parm	Dx. Idraulica	16.0103	3.0860
19	adda_ogliC	Sn. Idraulica	0.0035	0.0021
20	parm_enza	Dx. Idraulica	29.0246	2.5900
21	enza_cros	Dx. Idraulica	9.7079	1.3300
25	cross_seccB	Dx. Idraulica	0.0671	0.9800
29	secc_panaB	Dx. Idraulica	0.0056	0.0009
<b>VOLUME TOTALE [Mm<sup>3</sup>]</b>			<b>190.9385</b>	

**Tabella 10: Volumi e tiranti massimi nei comparti interessati da esondazione nella configurazione con argini inerodibili**

ID COMPARTO	COMPARTO	COLLOCAZIONE COMPARTO RISPETTO AL PO	INFLOW [m <sup>3</sup> /s]	OUTFLOW [m <sup>3</sup> /s]
1	staf_vers	Dx. Idraulica	862.19	189.56
2	vers_po	Dx. Idraulica	165.85	72.15
3	rogg_lambA	Sn. Idraulica	66.05	0.00
4	rogg_lambB	Sn. Idraulica	22.17	0.00
6	lamb_addaA	Sn. Idraulica	347.14	0.00
7	tido_treb	Dx. Idraulica	0.16	0.00
8	lamb_addaB	Sn. Idraulica	462.70	0.00
10	lamb_addaC	Sn. Idraulica	312.08	0.00
11	nure_chia	Dx. Idraulica	6.42	0.00
12	adda_ogliA	Sn. Idraulica	5.62	0.00
13	chia_ardaA	Dx. Idraulica	0.06	0.00
14	chia_ardaB	Dx. Idraulica	10.28	0.00
16	adda_ogliB	Sn. Idraulica	1.46	0.00
17	ongi_taro	Dx. Idraulica	0.15	0.00
18	taro_parm	Dx. Idraulica	303.25	0.00
19	adda_ogliC	Sn. Idraulica	0.33	0.00
20	parm_enza	Dx. Idraulica	340.57	0.00
21	enza_cros	Dx. Idraulica	113.46	0.00
25	cross_seccB	Dx. Idraulica	3.86	0.00
29	secc_panaB	Dx. Idraulica	0.18	0.00

**Tabella 11: Portate massime in ingresso e in uscita dalle *Storage Area* interessate da esondazione nella configurazione con argini inerodibili**

Con questa configurazione non si presentano quasi mai portate che dai comparti si reimmettono nel corso fluviale; ciò è spiegato dal fatto che l'assetto degli argini e i valori assunti dai tiranti non sono sufficientemente elevati per permettere ai volumi invasati di dare origine a portate negative. Fanno eccezione i primi due comparti (staf\_vers e vers\_po), che, come già detto, presentano argini discontinui e quindi facilmente attraversati dall'acqua in entrambe le direzioni, specialmente in occasione di portate particolarmente elevate come in questo caso.

In APPENDICE A vengono riportati gli *Stage and Flow Hydrograph* relativi ai comparti idraulici soggetti ad allagamento.

## 8. CONFRONTO DEI RISULTATI

Il confronto tra i risultati ottenuti dalla simulazione condotta nell'ipotesi di possibili breccie arginali (argini erodibili) e quelli relativi alla condizione ipotetica di argini inerodibili, evidenzia per quest'ultimo caso un netto calo dei volumi idrici tracimati (Grafico 31 e Tabella 12). Il volume complessivamente esondato si riduce di circa il 70%, ridistribuendosi tuttavia in un numero maggiore di comparti, in modo tale da impedire pericolosi allagamenti dei comparti posti sulla sinistra idraulica (comparti n. 3, 6, 8 e 10, rispettivamente: rogg\_lambA, lamb\_addaA, lamb\_addaB e lamb\_addaC) e del comparto n. 20 (parm\_enza), osservabili invece nel primo scenario. Tale redistribuzione comporta un aumento dei volumi invasati nei comparti più a monte in destra idraulica, aumento che è comunque da considerarsi modesto e dovuto ai fenomeni di rigurgito verso monte per effetto del sormonto delle arginature più a valle.

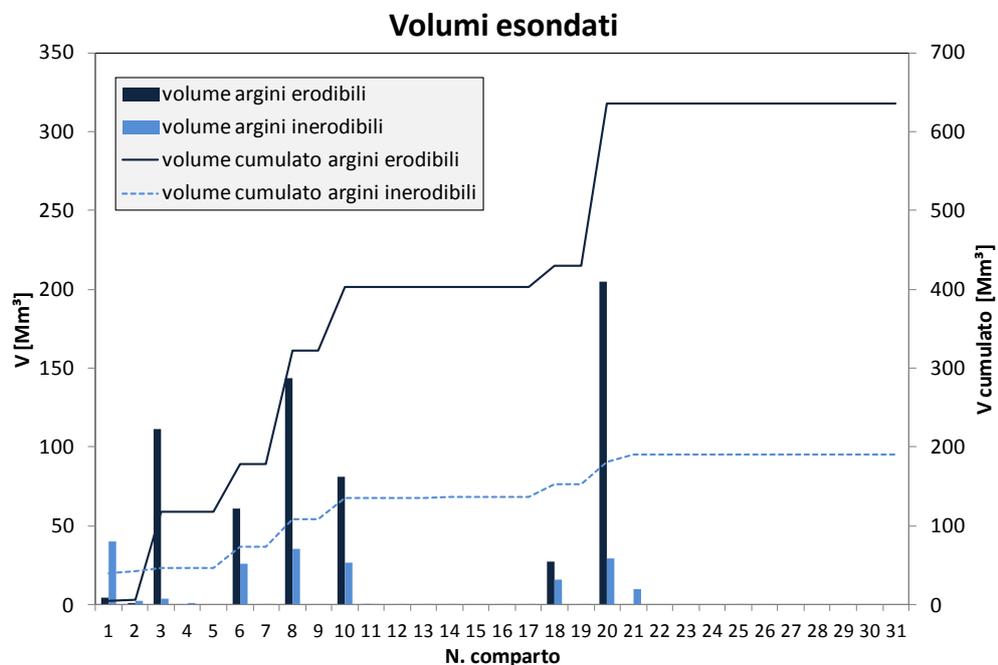
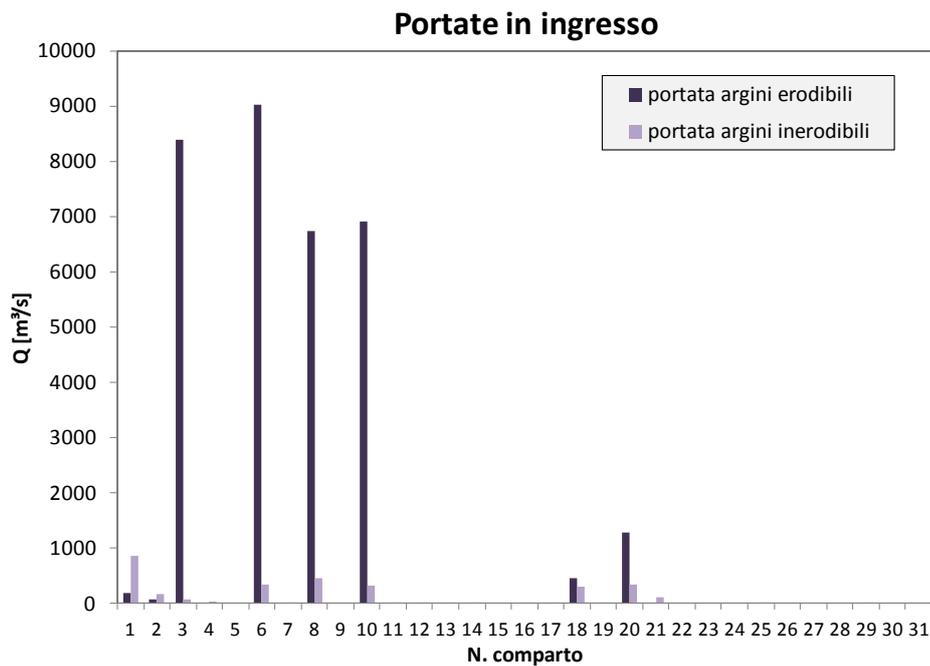


Grafico 31: Confronto tra i volumi idrici invasati nelle configurazioni con argini erodibili ed inerodibili

			VOLUME INVASATO [Mm <sup>3</sup> ]	
ID COMPARTO	COMPARTO	COLLOCAZIONE	Argini erodibili	Argini inerodibili
1	staf_vers	Dx. Idraulica	4.6117	39.8956
2	vers_po	Dx. Idraulica	1.2016	2.1650
3	rogg_lambA	Sn. Idraulica	111.6375	4.0301
4	rogg_lambB	Sn. Idraulica	0	0.8467
5	po_tido	Dx. Idraulica	0	0
6	lamb_addaA	Sn. Idraulica	60.9491	26.2076
7	tido_treb	Dx. Idraulica	0	0.0048
8	lamb_addaB	Sn. Idraulica	143.9251	35.1363
9	treb_nure	Dx. Idraulica	0	0
10	lamb_addaC	Sn. Idraulica	80.7662	26.7220
11	nure_chia	Dx. Idraulica	0	0.3548
12	adda_ogliA	Sn. Idraulica	0	0.0942
13	chia_ardaA	Dx. Idraulica	0	0.0011
14	chia_ardaB	Dx. Idraulica	0	0.5503
15	arda_ongi	Dx. Idraulica	0	0
16	adda_ogliB	Sn. Idraulica	0	0.1106
17	ongi_taro	Dx. Idraulica	0	0.0004
18	taro_parm	Dx. Idraulica	27.2294	16.0103
19	adda_ogliC	Sn. Idraulica	0	0.0035
20	parm_enza	Dx. Idraulica	204.9573	29.0246
21	enza_cros	Dx. Idraulica	0	9.7079
22	cros_seccA	Dx. Idraulica	0	0
23	ogli_mincA	Sn. Idraulica	0	0
24	ogli_mincB	Sn. Idraulica	0	0
25	cros_seccB	Dx. Idraulica	0	0.0671
26	cros_seccC	Dx. Idraulica	0	0
27	ogli_mincC	Sn. Idraulica	0	0
28	secc_panaA	Dx. Idraulica	0	0
29	secc_panaB	Dx. Idraulica	0	0.0056
30	Pana_poA	Dx. Idraulica	0	0
31	Pana_poB	Dx. Idraulica	0	0
		<b>TOTALE</b>	<b>635.2780</b>	<b>190.9385</b>

**Tabella 12: Confronto tra i volumi idrici invasati nelle configurazioni con argini erodibili ed inerodibili**

Anche lo studio delle portate (Grafico 32 e Tabella 13) evidenzia le ricadute positive dell'ipotesi di laminazione controllata dell'evento di piena cinquecentennale sui comparti più coinvolti. Tuttavia un aspetto negativo e che merita di essere sottolineato è rappresentato dal maggior coinvolgimento nel processo di tracimazione del comparto n. 1, staf\_vers (e in misura minore del comparto n. 2, vers\_po) nello scenario privo di brecce arginali.

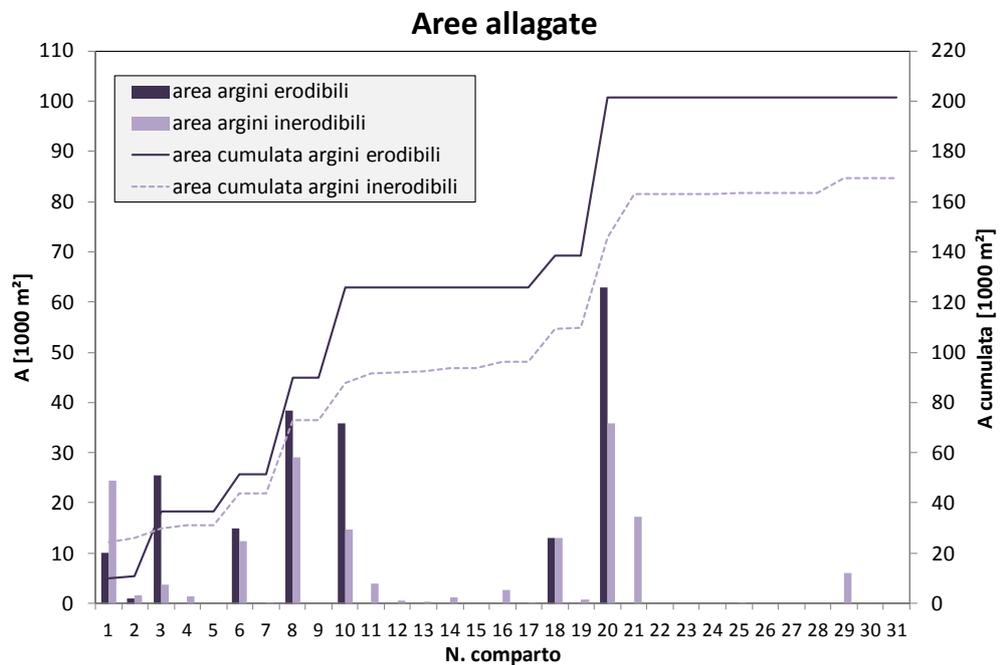


**Grafico 32 Confronto tra le massime portate in ingresso nelle configurazioni con argini erodibili ed inerodibili**

			MASSIMA PORTATA IN INGRESSO [m <sup>3</sup> /s]	
ID COMPARTO	COMPARTO	COLLOCAZIONE	Argini erodibili	Argini inerodibili
1	staf_vers	Dx. Idraulica	177.25	862.19
2	vers_po	Dx. Idraulica	71.87	165.85
3	rogg_lambA	Sn. Idraulica	8384.46	66.05
4	rogg_lambB	Sn. Idraulica	0	22.17
5	po_tido	Dx. Idraulica	0	0
6	lamb_addaA	Sn. Idraulica	9026.54	347.14
7	tido_treb	Dx. Idraulica	0	0.16
8	lamb_addaB	Sn. Idraulica	6736.05	462.70
9	treb_nure	Dx. Idraulica	0	0
10	lamb_addaC	Sn. Idraulica	6901.74	312.08
11	nure_chia	Dx. Idraulica	0	6.42
12	adda_ogliA	Sn. Idraulica	0	5.62
13	chia_ardaA	Dx. Idraulica	0	0.06
14	chia_ardaB	Dx. Idraulica	0	10.28
15	arda_ongi	Dx. Idraulica	0	0
16	adda_ogliB	Sn. Idraulica	0	1.46
17	ongi_taro	Dx. Idraulica	0	0.15
18	taro_parm	Dx. Idraulica	462.03	303.25
19	adda_ogliC	Sn. Idraulica	0	0.33
20	parm_enza	Dx. Idraulica	1276.34	340.57
21	enza_cros	Dx. Idraulica	0	113.46
22	cros_seccA	Dx. Idraulica	0	0
23	ogli_mincA	Sn. Idraulica	0	0
24	ogli_mincB	Sn. Idraulica	0	0
25	cros_seccB	Dx. Idraulica	0	3.86
26	cros_seccC	Dx. Idraulica	0	0
27	ogli_mincC	Sn. Idraulica	0	0
28	secc_panaA	Dx. Idraulica	0	0
29	secc_panaB	Dx. Idraulica	0	0.18
30	Pana_poA	Dx. Idraulica	0	0
31	Pana_poB	Dx. Idraulica	0	0

**Tabella 13: Confronto tra le massime portate in ingresso nelle configurazioni con argini erodibili e inerodibili**

Analizzando il Grafico 33 e la Tabella 14 si deduce che anche l'andamento delle aree interessate da esondazione rispecchi quello dei volumi esondati e delle portate in ingresso ai comparti: si ha infatti una generale riduzione delle aree allagate, passando dalla configurazione con formazione di brecce a quella con arginature consolidate. Tuttavia il beneficio non è così grande come per i volumi, soprattutto in termini di aree totali: queste vengono infatti ridotte soltanto circa del 15%. Come per gli altri casi si ha inoltre un'inversione di tendenza nei primi due comparti passando da uno scenario all'altro.

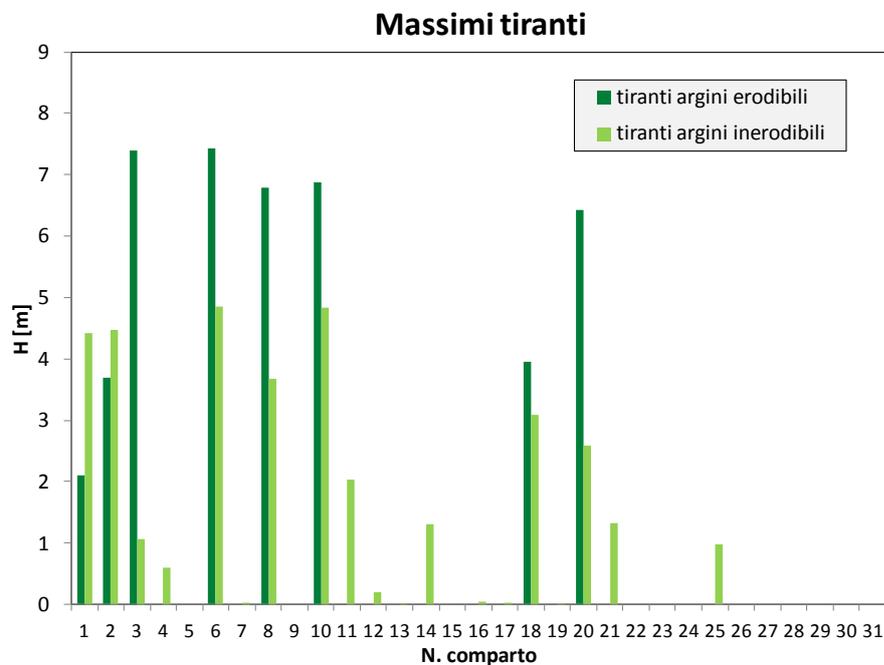


**Grafico 33: Confronto tra le aree allagate nelle configurazioni con argini erodibili ed inerodibili**

ID COMPARTO	COMPARTO	COLLOCAZIONE	AREA ALLAGATA [1000 m <sup>2</sup> ]	
			Argini erodibili	Argini inerodibili
1	staf_vers	Dx. Idraulica	10000.41	24530.84
2	vers_po	Dx. Idraulica	870.24	1508.88
3	rogg_lambA	Sn. Idraulica	25584.90	3752.04
4	rogg_lambB	Sn. Idraulica	0	1405.85
5	po_tido	Dx. Idraulica	0	0
6	lamb_addaA	Sn. Idraulica	14925.02	12409.52
7	tido_treb	Dx. Idraulica	0	185.69
8	lamb_addaB	Sn. Idraulica	38417.98	29102.58
9	treb_nure	Dx. Idraulica	0	0
10	lamb_addaC	Sn. Idraulica	35867.81	14663.40
11	nure_chia	Dx. Idraulica	0	3970.43
12	adda_ogliA	Sn. Idraulica	0	459.70
13	chia_ardaA	Dx. Idraulica	0	353.19
14	chia_ardaB	Dx. Idraulica	0	1226.89
15	arda_ongi	Dx. Idraulica	0	0
16	adda_ogliB	Sn. Idraulica	0	2628.29
17	ongi_taro	Dx. Idraulica	0	17.13
18	taro_parm	Dx. Idraulica	12960.64	12960.64
19	adda_ogliC	Sn. Idraulica	0	722.62
20	parm_enza	Dx. Idraulica	62873.08	35913.03
21	enza_cros	Dx. Idraulica	0	17323.89
22	cros_seccA	Dx. Idraulica	0	0
23	ogli_mincA	Sn. Idraulica	0	0
24	ogli_mincB	Sn. Idraulica	0	0
25	cros_seccB	Dx. Idraulica	0	68.47
26	cros_seccC	Dx. Idraulica	0	0
27	ogli_mincC	Sn. Idraulica	0	0
28	secc_panaA	Dx. Idraulica	0	0
29	secc_panaB	Dx. Idraulica	0	6131.54
30	Pana_poA	Dx. Idraulica	0	0
31	Pana_poB	Dx. Idraulica	0	0
		<b>TOTALE</b>	201500.08	169334.62

Tabella 14: Confronto tra le aree allagate nelle configurazioni con argini erodibili e inerodibili

Analizzando infine il Grafico 34 e la Tabella 15 si nota che anche il confronto tra i tiranti conferma la tendenza già rilevata: si ha infatti una diminuzione media dei tiranti dell'ordine di quattro metri in corrispondenza dei comparti più critici (con punte dell'ordine di sei metri per il comparto n. 3, rogg\_lambA), cioè quelli che nel primo scenario con breccie arginali subiscono un pericoloso allagamento. Opposto andamento si osserva invece nei massimi tiranti raggiunti nei compartimenti di monte (comparti n. 1 e 2: staf\_vers e vers\_po), per i quali, nel caso di scenario con argini inerodibili, i livelli idrici raggiunti sono maggiori rispetto al caso in cui sia ammessa la formazione di breccie arginali.



**Grafico 34: Confronto tra i massimi tiranti simulati nei comparti idraulici nelle configurazioni con argini erodibili e inerodibili**

ID COMPARTO	COMPARTO	COLLOCAZIONE	TIRANTE [m]	
			Argini erodibili	Argini inerodibili
1	staf_vers	Dx. Idraulica	2.100	4.420
2	vers_po	Dx. Idraulica	3.700	4.470
3	rogg_lambA	Sn. Idraulica	7.390	1.070
4	rogg_lambB	Sn. Idraulica	0	0.600
5	po_tido	Dx. Idraulica	0	0
6	lamb_addaA	Sn. Idraulica	7.430	4.850
7	tido_treb	Dx. Idraulica	0	0.030
8	lamb_addaB	Sn. Idraulica	6.790	3.680
9	treb_nure	Dx. Idraulica	0	0
10	lamb_addaC	Sn. Idraulica	6.880	4.840
11	nure_chia	Dx. Idraulica	0	2.030
12	adda_ogliA	Sn. Idraulica	0	0.200
13	chia_ardaA	Dx. Idraulica	0	0.003
14	chia_ardaB	Dx. Idraulica	0	1.300
15	arda_ongi	Dx. Idraulica	0	0
16	adda_ogliB	Sn. Idraulica	0	0.040
17	ongi_taro	Dx. Idraulica	0	0.030
18	taro_parm	Dx. Idraulica	3.950	3.090
19	adda_ogliC	Sn. Idraulica	0	0.002
20	parm_enza	Dx. Idraulica	6.420	2.590
21	enza_cros	Dx. Idraulica	0	1.330
22	cros_seccA	Dx. Idraulica	0	0
23	ogli_mincA	Sn. Idraulica	0	0
24	ogli_mincB	Sn. Idraulica	0	0
25	cros_seccB	Dx. Idraulica	0	0.980
26	cros_seccC	Dx. Idraulica	0	0
27	ogli_mincC	Sn. Idraulica	0	0
28	secc_panaA	Dx. Idraulica	0	0
29	secc_panaB	Dx. Idraulica	0	0.000
30	Pana_poA	Dx. Idraulica	0	0
31	Pana_poB	Dx. Idraulica	0	0

**Tabella 15: Confronto tra i massimi tiranti nelle configurazioni con argini erodibili e inerodibili**

## **9. VALUTAZIONE SEMPLIFICATA DEI POSSIBILI DANNI ATTESI**

Dopo aver ricavato le aree e i volumi esondati nei due scenari considerati, si è proceduto a uno studio volto principalmente a identificare il danno prodotto dalle eventuali esondazioni del fiume Po e dei suoi affluenti nei territori ricadenti nella Fascia C. Un'ulteriore applicazione futura consiste nell'identificare, in base a determinati criteri economici, le aree meno rischiose in cui permettere la laminazione dell'onda di piena del fiume Po, al fine di preservare altre zone del territorio dove un allagamento risulterebbe più dannoso.

Per quest'analisi ci si è soffermati in particolare sullo studio delle aree urbane ed industriali, poiché, rivestendo un'importanza molto elevata dal punto di vista economico e sociale, risulterebbero maggiormente danneggiate da una possibile esondazione.

La prima parte di questo capitolo descrive, a livello europeo e successivamente nazionale, il programma utilizzato per effettuare la suddetta analisi, mentre gli ultimi due paragrafi illustrano nel dettaglio lo studio dei danni attesi nel bacino del Po e in particolare nei comparti di Fascia C interessati da allagamento nello scenario con argini erodibili, descritto nel Capitolo 1

### ***9.1. Il programma CORINE a livello europeo***

Le moderne tecniche d'analisi spaziale e di telerilevamento costituiscono uno strumento molto potente a supporto delle valutazioni ambientali su ampia scala geografica. Carte digitali di uso e copertura del suolo permettono di fotografare alcune caratteristiche del territorio e di individuarne le evoluzioni nel tempo.

In questo contesto, nel 1985 il Consiglio delle Comunità Europee, con la Decisione 85/338/EEC, ha varato il programma CORINE (**CO**o**R**dination of **I**Nformation on the **E**nvironment) per dotare l'Unione Europea, gli Stati

associati e i paesi limitrofi dell'area mediterranea e balcanica di informazioni territoriali omogenee sullo stato dell'ambiente.

Lo scopo principale dell'iniziativa è verificare dinamicamente lo stato dell'ambiente nell'area comunitaria, al fine di fornire supporto per lo sviluppo di politiche comuni, controllarne gli effetti e proporre eventuali correttivi.

Obiettivi secondari, ma non per questo meno importanti, sono la formazione e la diffusione di standard e metodologie comuni e la promozione di contatti e scambi internazionali, onde facilitare la realizzazione d'iniziative congiunte europee.

Le priorità tematiche del programma CORINE sono state identificate nella definizione dei siti di maggiore importanza per la conservazione della natura (*Corine-Biotopes*), le emissioni in aria (*Corine-AIR*), la copertura del suolo (*Corine Land Cover*), i suoli e l'erosione (*Corine Erosion*), le acque e l'erosione costiera. I dati riferibili a queste tematiche sono stati gestiti in un sistema GIS (*Geographical Information System*) unitamente ad altri dati di base, quali le linee di costa, i limiti amministrativi regionali e nazionali, le industrie, le reti di trasporto, ecc.

Di particolare interesse per il presente lavoro di tesi è risultato essere il progetto *CORINE Land Cover* (CLC), la cui prima realizzazione, coordinata dalla Commissione Europea e dall'Agenzia Europea per l'Ambiente (AEA), risale al 1990 (CLC90).

A dieci anni dalla conclusione del CLC90, nel 2001 l'AEA ha lanciato il nuovo progetto *Image & Corine Land Cover 2000* (I&CLC2000), con l'obiettivo di aggiornare la base dati CLC e di individuare le principali dinamiche di cambiamento di copertura e uso del territorio. L'iniziativa è stata cofinanziata dagli Stati membri e dalla Commissione Europea. I paesi che alla data dell'1/6/2005 hanno aderito al progetto CLC2000 erano 33.

Nel novembre del 2004 il Management Board dell'AEA, a seguito delle discussioni tra gli Stati Membri, l'Unione Europea e le principali istituzioni della stessa (DG ENV, EEA, ESTAT e JRC), ha valutato la possibilità di aumentare la frequenza di aggiornamento del *Corine Land Cover* e ha avviato un aggiornamento del CLC, riferito all'anno 2006 e sviluppato nell'ambito

dell'iniziativa Fast Track Service on Land Monitoring (FTSP) del programma Global Monitoring for Environment and Security (GMES).

Con questo progetto si è inteso realizzare un mosaico europeo aggiornato all'anno 2006 e basato su immagini satellitari SPOT-4 HRVIR, SPOT 5 HRG e/o IRS P6 LISS III: da tali immagini è stata ricavata la cartografia digitale di uso/copertura del suolo all'anno 2006 e quella dei relativi cambiamenti. Nell'ambito del progetto sono stati inoltre prodotti due strati ad alta risoluzione; il primo consiste nella mappatura delle aree impermeabilizzate, mentre il secondo è relativo alla copertura forest/no forest con discriminazione di conifere e latifoglie.

L'iniziativa del CLC2006, cofinanziata dagli Stati Membri e dalla Commissione Europea, ha visto l'adesione di 38 paesi, tra i quali l'Italia (Figura 54).

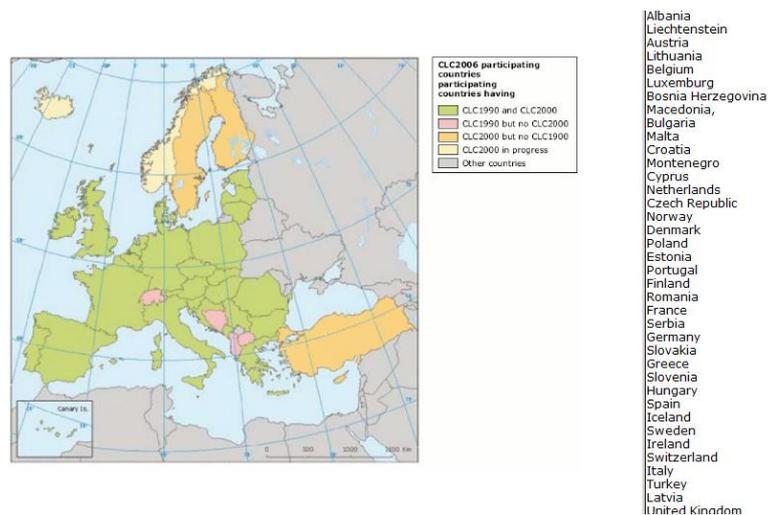


Figura 54: Paesi partecipanti al progetto CLC2006

Obiettivo del progetto *CORINE Land Cover* è fornire al programma CORINE e a ogni possibile utilizzatore interessato informazioni sulla copertura del suolo e sulle sue modifiche nel tempo. Queste informazioni devono essere per quanto possibile omogenee, compatibili e comparabili per tutti i paesi interessati, suscettibili di aggiornamento periodico e di costo sostenibile.

Con l'aggiornamento della base dati CORINE s'intende rivisitare, a livello geometrico e tematico, la base dati CLC90 e produrre la base dati dei cambiamenti d'uso del suolo tra il 1990 e il 2000 (*CLC Change 2000*) e tra il 2000 e il 2006 (*CLC Change 2006*).

Operativamente, l'aggiornamento al 2006 della base informativa CLC si distacca dai precedenti prodotti, in quanto lo strato vettoriale risultante è il prodotto dell'intersezione dei cambiamenti fotointerpretati tra il 2000 e il 2006 con lo strato vettoriale CLC2000. Utilizzando questo approccio, si pretende inoltre di identificare e correggere eventuali errori di classificazione presenti nello strato CLC 2000.

La copertura *Corine Land Cover 90* (CLC90) e i suoi successivi aggiornamenti sono riconosciuti a livello europeo quali strumenti di base per la definizione delle politiche territoriali da parte di diversi servizi della Commissione Europea, quali la DG-Politiche Regionali (*DG-Regional policy*), la DG-Ambiente (*DG-Environment*) e la DG-Agricoltura (*DG-Agriculture*), oltre all'AEA e ai nodi della rete costituita dai Centri Tematici Europei (*European Topic Centres - ETCs*). Essa inoltre rappresenta uno strato informativo di base per lo sviluppo di applicazioni o modelli di analisi spaziale su base GIS finalizzati alla produzione d'informazioni complesse utili a supportare le scelte dei decisori politici a livello europeo e nazionale.

Il progetto *Corine Land Cover* aggiornato al 2006 utilizza come sistema di base la copertura satellitare europea di riferimento *Image2006*, con immagini acquisite negli anni 2005-2007. Queste sono state ricampionate con convoluzione cubica a 20 m e ortorettificate in modo tale che l'errore di posizionamento (espresso come errore quadratico medio) risulti inferiore a 25 m. Le immagini così ottenute sono state mosaicate per tutto il territorio interessato dal progetto e costituiscono la base per la produzione del database del *CLC Change 2006*. Le coperture CLC sono costituite esclusivamente da poligoni con larghezza minima 100 m. Per assicurare una adeguata coerenza temporale i dati satellitari sono stati acquisiti con una deviazione massima di un anno rispetto al riferimento, in totale assenza di copertura nuvolosa, con deroga al 5% in paesi critici.

Il sistema di classificazione dell'uso e copertura del suolo del CLC è di tipo gerarchico e suddiviso in 3 livelli. Il primo livello è costituito da 5 classi, che rappresentano le grandi categorie di copertura del suolo; il secondo livello comprende 15 classi che vengono ulteriormente distinte sino a giungere a 44 classi al terzo livello.

Nella base dati CLC non sono ammessi codici diversi dai 44 ufficiali, così come non sono accettate aree “non classificate”.

Il sistema di nomenclatura al 3° livello tematico è riportato di seguito:

*1. Superfici artificiali*

*1.1.Zone urbanizzate di tipo residenziale*

*1.1.1.Zone residenziali a tessuto continuo*

*1.1.2.Zone residenziali a tessuto discontinuo e rado*

*1.2.Zone industriali, commerciali ed infrastrutturali*

*1.2.1.Aree industriali, commerciali e dei servizi pubblici e privati*

*1.2.2.Reti stradali, ferroviarie e infrastrutture tecniche*

*1.2.3.Aree portuali*

*1.2.4. Aeroporti*

*1.3.Zone estrattive, cantieri, discariche e terreni artefatti e abbandonati*

*1.3.1.Aree estrattive*

*1.3.2. Discariche*

*1.3.3 Cantieri*

*1.4.Zone verdi artificiali non agricole*

*1.4.1.Aree verdi urbane*

*1.4.2.Aree ricreative e sportive*

*2. Superfici agricole utilizzate*

*2.1.Seminativi*

*2.1.1.Seminativi in aree non irrigue*

*2.1.2.Seminativi in aree irrigue*

*2.1.3 Risaie*

*2.2.Colture permanenti*

*2.2.1.Vigneti*

*2.2.2.Frutteti e frutti minori*

*2.2.3. Oliveti*

*2.3.Prati stabili (foraggiere permanenti)*

*2.3.1. Prati stabili (foraggiere permanenti)*

*2.4.Zone agricole eterogenee*

*2.4.1.Colture temporanee associate a colture permanenti*

*2.4.2.Sistemi culturali e particellari complessi*

*2.4.3.Aree prevalentemente occupate da colture agrarie con presenza di spazi naturali importanti*

*2.4.4.Aree agroforestali*

*3. Territori boscati e ambienti seminaturali*

*3.1.Zone boscate*

*3.1.1 Boschi di latifoglie*

*3.1.2 Boschi di conifere*

*3.1.3. Boschi misti di conifere e latifoglie*

*3.2.Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea*

*3.2.1.Aree a pascolo naturale e praterie*

*3.2.2.Brughiere e cespuglieti*

*3.2.3.Aree a vegetazione sclerofilla*

*3.2.4 Aree a vegetazione boschiva ed arbustiva in evoluzione*

*3.3.Zone aperte con vegetazione rada o assente*

*3.3.1.Spiagge, dune e sabbie*

*3.3.2.Rocce nude, falesie, rupi, affioramenti*

*3.3.3.Aree con vegetazione rada*

*3.3.4.Aree percorse da incendi*

*3.3.5.Ghiacciai e nevi perenni*

*4. Zone umide*

*4.1.Zone umide interne*

*4.1.1.Paludi interne*

*4.1.2. Torbiere*

*4.2.Zone umide marittime*

*4.2.1.Paludi salmastre*

*4.2.2.Saline*

*4.2.3.Zone intertidali*

*5. Corpi idrici*

*5.1.Acque continentali*

*5.1.1.Corsi d'acqua, canali e idrovie*

*5.1.2 Bacini d'acqua*

*5.2.Acque marittime*

*5.2.1.Lagune*

*5.2.2.Estuari*

*5.2.3.Mari e oceani*

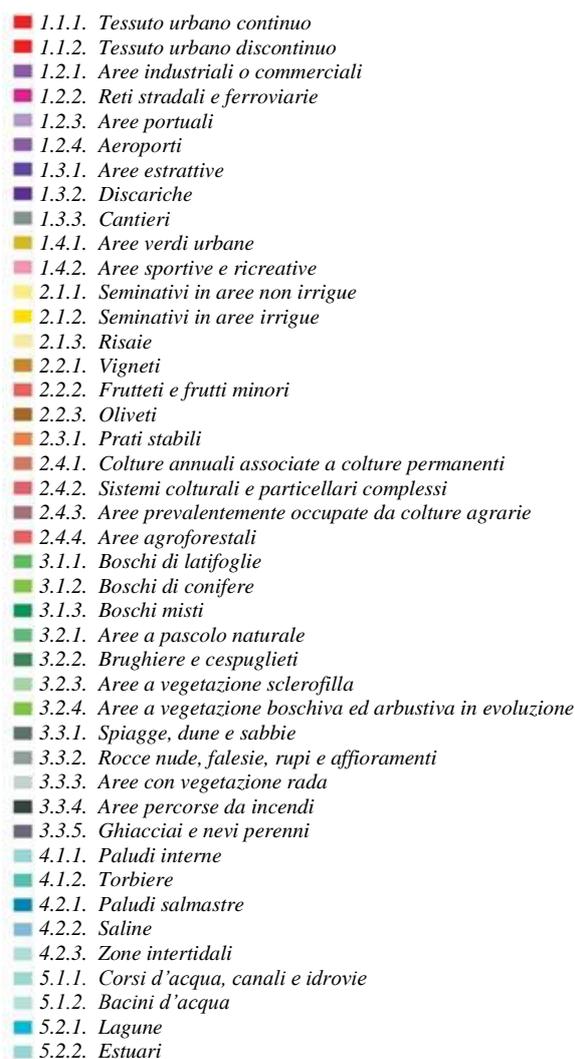
## 9.2. *Il progetto in Italia*

In Italia la realizzazione del progetto europeo *Corine Land Cover 2000* è stata curata dall'APAT - Agenzia nazionale per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici, con il supporto tecnico-scientifico dell'Università *La Sapienza* di Roma, dell'Università di Firenze e dell'Università della Tuscia.

Il dato elaborato sul CLC2000 – 3° Livello tematico è mostrato dalla Figura 55 e dalla relativa legenda in Figura 56.



Figura 55: CLC2000 in Italia - 3° livello tematico



**Figura 56: CLC2000 in Italia - 3° livello tematico (legenda)**

Quando l’Agenzia Europea per l’Ambiente ha deciso di avviare un aggiornamento del CLC, riferito all’anno 2006, nell’ambito del programma GMES Fast Track Service on Land Monitoring, l’ISPRA - Istituto Superiore per le Prevenzione e la Ricerca Ambientale (allora APAT) ha aderito a tale iniziativa e ha realizzato il progetto “CLC2006 IT”.

Il progetto nazionale ha proposto alcuni elementi innovativi rispetto agli obiettivi europei. In particolare, nell’implementazione del CLC2000 e del CLC2006 in Italia sono stati previsti:

- la realizzazione di un maggior dettaglio tematico, implementando la legenda del IV livello CORINE per le voci relative alle superfici boschive e altri

ambienti seminaturali, secondo la classificazione elaborata dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio;

- la validazione al suolo della cartografia attraverso la realizzazione di controlli in campo.

I prodotti CLC2000 e CLC2006 - 4° Livello rappresentano quindi una peculiarità nazionale del progetto europeo. Il prodotto è stato realizzato come un approfondimento tematico delle basi dati *Corine Land Cover 2000* e *Corine Land Cover 2006* per alcune classi del sistema di nomenclatura CORINE, prevalentemente per i territori boscati e per gli altri ambienti naturali e seminaturali. La finalità era quella di giungere, compatibilmente con l'impostazione metodologica di base del progetto I&CLC2000, a una versione delle coperture CLC2000 e CLC2006 più dettagliata (4° livello tematico) e il più possibile compatibile con le definizioni nomenclaturali forestali ormai accettate in ambito internazionale (*Eunis Habitat Classification*, *Global Land Cover 2000*, *FAO Forest Resource Assessment 2000* e *Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio - INFC*). Questo sistema di nomenclatura permette una caratterizzazione tematica degli ambienti forestali e semi-naturali sufficiente a supportare scelte di pianificazione territoriale, specie nel quadro di una gestione sostenibile delle risorse naturali.

Limitatamente alle classi che hanno subito un approfondimento tematico (al 4° o al 5° livello), il sistema di nomenclatura è riportato di seguito. Le altre classi rispecchiano la legenda CORINE standard.

## 2. SUPERFICI AGRICOLE UTILIZZATE

### 2.1. Seminativi

#### 2.1.1. Seminativi in aree non irrigue

##### 2.1.1.1. Colture intensive

##### 2.1.1.2. Colture estensive

### 2.2. Colture permanenti

#### 2.2.4. Arboricoltura da legno

##### 2.2.4.1. Pioppicoltura

##### 2.2.4.2. Latifoglie pregiate (quali ciliegio e noce)

##### 2.2.4.3. Eucalitteti

##### 2.2.4.4. Conifere (quali pino insigne)

##### 2.2.4.5. Impianti misti di latifoglie e conifere

## 3. TERRITORI BOSCATI E AMBIENTI SEMI-NATURALI

### 3.1. Zone boscate

#### 3.1.1. Boschi di latifoglie

##### 3.1.1.1. Boschi a prevalenza di querce e altre latifoglie sempreverdi (quali leccio e sughera)

##### 3.1.1.2. Boschi a prevalenza di querce caducifoglie (cerro e/o roverella e/o farnetto e/o rovere e/o farnia)

##### 3.1.1.3. Boschi misti a prevalenza di altre latifoglie autoctone (latifoglie mesofile e mesotermofile quali acero-frassino, carpino nero-orniello)

##### 3.1.1.4. Boschi a prevalenza di castagno

##### 3.1.1.5. Boschi a prevalenza di faggio

##### 3.1.1.6. Boschi a prevalenza di specie igrofite (quali salici e/o pioppi e/o ontani, ecc.)

##### 3.1.1.7. Boschi ed ex-piantagioni a prevalenza di latifoglie esotiche (quali robinia, e ailanto)

#### 3.1.2. Boschi di conifere

##### 3.1.2.1. Boschi a prevalenza di pini mediterranei e cipressi (pino domestico, pino marittimo, pino d'aleppo)

##### 3.1.2.2. Boschi a prevalenza di pini oro-mediterranei e montani (pino nero e laricio, pino silvestre, pino loricato)

##### 3.1.2.3. Boschi a prevalenza di abeti (quali bianco e/o rosso)

##### 3.1.2.4. Boschi a prevalenza di larice e/o pino cembro

##### 3.1.2.5. Boschi ed ex-piantagioni a prevalenza di conifere esotiche (quali douglasia, pino insigne, pino strobo)

#### 3.1.3. Boschi misti di conifere e latifoglie

##### 3.1.3.1. Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di latifoglie

##### 3.1.3.1.1. Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di querce e altre latifoglie sempreverdi (quali leccio e sughera)

##### 3.1.3.1.2. Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di querce caducifoglie (cerro e/o roverella e/o farnetto e/o rovere e/o farnia)

##### 3.1.3.1.3. Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di altre latifoglie autoctone (latifoglie mesofile e mesotermofile quali acero-frassino, carpino nero-orniello)

##### 3.1.3.1.4. Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di castagno

##### 3.1.3.1.5. Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di faggio

##### 3.1.3.1.6. Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di specie igrofite (quali salici e/o pioppi e/o ontani, ecc.)

##### 3.1.3.1.7. Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di specie esotiche

##### 3.1.3.2. Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di conifere

##### 3.1.3.2.1. Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di pini mediterranei e cipressi (pino domestico, pino marittimo, pino d'aleppo)

##### 3.1.3.2.2. Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di pini oro-mediterranei e montani (pino nero e laricio, pino silvestre, pino loricato)

##### 3.1.3.2.3. Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di abeti (quali bianco e/o rosso)

##### 3.1.3.2.4. Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di larice e/o pino cembro

##### 3.1.3.2.5. Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di conifere esotiche (quali douglasia, pino insigne, pino strobo)

### 3.2. Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea

#### 3.2.1. Aree a pascolo naturale e praterie

##### 3.2.1.1. Praterie continue

##### 3.2.1.2. Praterie discontinue

#### 3.2.3. Aree a vegetazione sclerofilla

##### 3.2.3.1. Macchia alta

##### 3.2.3.2. Macchia bassa e garighe



**Figura 57: Esempio di 4° livello tematico: distribuzione dei territori boscati (classi 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3 e 3.2.3.1)**

Per quanto riguarda l'attendibilità dei dati, a livello nazionale i risultati ottenuti hanno confermato complessivamente che l'impostazione metodologica del progetto I&CLC2000 permette la derivazione di una cartografia in scala 1:100.000 dell'uso/copertura del suolo di elevata accuratezza tematica.

La metodologia omogenea utilizzata per la produzione del CLC2000 e del CLC2006 e per la riproduzione del CLC90 ha permesso di analizzare le tendenze in atto in Italia per quanto concerne la copertura e l'uso dei suoli. Di seguito vengono presentate in maniera riassuntiva alcune delle elaborazioni dei dati CLC volte a individuare le principali dinamiche territoriali esistenti sia a livello nazionale che a livello regionale nei periodi compresi tra il 1990 e il 2000 e tra il 2000 e il 2006. Poiché i dati di copertura/uso del suolo CLC sono organizzati in 44 classi su tre livelli gerarchici, è possibile darne rappresentazioni diverse a seconda del livello di analisi. Ciascun livello è in grado di fornire indicazioni utili per l'interpretazione delle dinamiche territoriali italiane, ma per brevità ci si

limiterà a presentare i risultati relativi all'analisi del primo livello gerarchico. A questo livello la legenda *Corine Land Cover* presenta 5 tipi di uso/copertura del suolo:

- superfici artificiali;
- superfici agricole utilizzate;
- territori boscati e ambienti semi-naturali;
- zone umide;
- corpi idrici.

Il fenomeno che appare più evidente dal confronto della copertura del 2000 con quella del 1990 è la perdita di aree agricole, a favore soprattutto di aree artificiali e di territori boscati e ambienti seminaturali. Ciò si nota anche confrontando la copertura del 2006 con quella del 2000. In particolare, dal 1990 al 2000 le aree agricole sono diminuite di oltre 1400 km<sup>2</sup>, circa 800 km<sup>2</sup> sono stati “artificializzati” (sono sorte nuove aree residenziali, industriali e commerciali, nonché servizi, aree estrattive, strade, ferrovie, ecc.) ed i territori boscati e gli ambienti naturali o semi-naturali hanno conquistato quasi 600 km<sup>2</sup>.

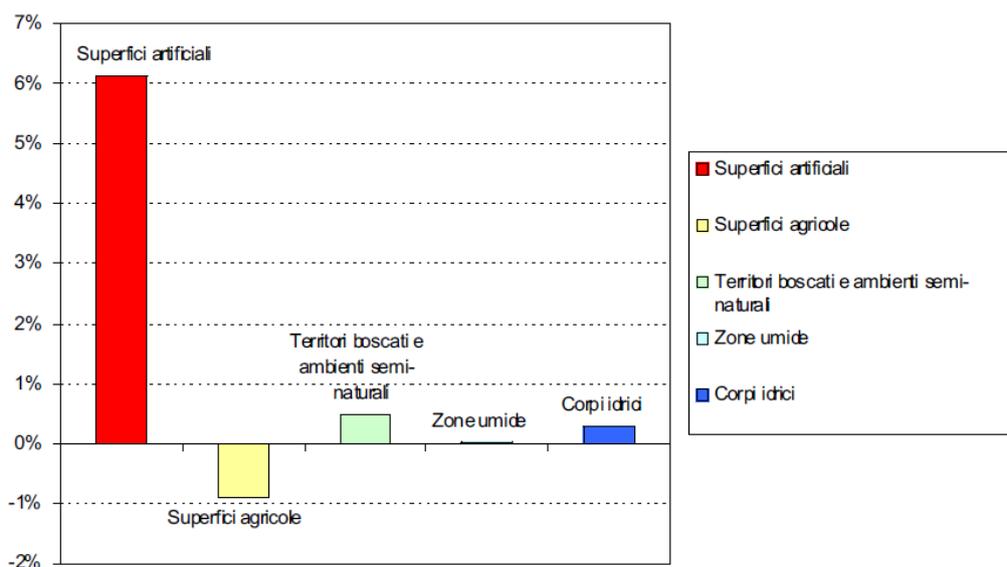
Dal 2000 al 2006 le superfici artificiali hanno invece registrato un incremento complessivo di 466 km<sup>2</sup>, di cui circa 400 provenienti dalla classe delle superfici agricole.

L'abbandono colturale delle aree agricole e pastorali continua quindi a essere una delle principali forze alla base delle dinamiche paesaggistiche in Italia.

Nella Tabella 16 e nella Tabella 17, come nel Grafico 35, sono mostrate le superfici relative alle cinque classi CLC del primo livello per gli anni 1990, 2000 e 2006.

Codice CLC	Uso del suolo CLC 1° Livello	2000 [km <sup>2</sup> ]	1990 [km <sup>2</sup> ]	2000 - 1990 [km <sup>2</sup> ]	$\frac{2000 - 1990}{1990}$ [%]
1	Superfici artificiali	14.316,1	13.489,4	826,8	6,13%
2	Superfici agricole utilizzate	156.452,9	157.886,9	-1.434,0	-0,91%
3	Territori boscati e ambienti semi-naturali	126.823,7	126.224,9	598,8	0,47%
4	Zone umide	690,8	690,7	0,1	0,02%
5	Corpi idrici	3.131,7	3.123,0	8,7	0,28%

**Tabella 16: Uso del suolo (1° livello Corine) sull'Italia, per gli anni 2000 e 1990**



**Grafico 35: Cambiamenti nell'uso del suolo (1° livello Corine) tra il 1990 e il 2000, espressi in percentuale rispetto alla superficie di ciascuna categoria [(2000-1990)/1990]**

Classe CLC	Uso del suolo CLC 1° Livello	2000 (km <sup>2</sup> )	2000 (%)	2000rev (km <sup>2</sup> )	2000rev (%)	2000rev - 2000 (km <sup>2</sup> )	2000rev - 2000/ 2000 (%)	2006 (km <sup>2</sup> )	2006 (%)	2006 - 2000rev (km <sup>2</sup> ) (*)
1	Superfici artificiali	14316,1	4,7	14392,1	4,8	76,0	0,5	14874,4	4,9	482,2
2	Superfici agricole utilizzate	156452,9	51,9	157676,6	52,3	1223,7	0,8	157274,4	52,2	-402,2
3	Territori boscati e ambienti semi-naturali	126823,7	42,1	125403,4	41,6	-1420,3	-1,1	125298,2	41,6	-105,2
4	Zone umide	690,8	0,2	674,4	0,2	-16,4	-2,4	668,5	0,2	-5,9
5	Corpi idrici	3131,7	1,0	3139,9	1,0	8,2	0,3	3171,0	1,1	31,1
TOTALE		301415,2	100,0	301286,5	100,0	-128,7	-1,9	301286,5	100,0	0,0

**Tabella 17: Uso del suolo (1° livello Corine) sull'Italia, per gli anni 2000 e 2006**

Si può notare come le aree agricole siano la categoria preponderante in termini di superficie totale coperta, nonché quella protagonista del cambiamento più significativo, con una contrazione di 1434 km<sup>2</sup> dal 1990 al 2000 e di 402 km<sup>2</sup> dal 2000 al 2006. In termini relativi invece la classe che ha subito l'evoluzione maggiore rispetto alla situazione del 1990 è quella delle superfici artificiali, aumentate nel 2000 di oltre il 6% e nel 2006 di oltre il 3%.

Per le elaborazioni regionali si è eseguita l'intersezione tra le coperture CLC e i limiti amministrativi, ricalcolando poi le aree dei poligoni risultato dell'intersezione.

In Tabella 18, Tabella 19, Tabella 20 e Figura 58 sono sintetizzati i cambiamenti su scala regionale verificatisi tra i due periodi presi in esame.

REGIONE	Variazioni di Uso del suolo il 1990 ed il 2000 1° Livello [ha]				
	1	2	3	4	5
Abruzzo	3.591	-4.067	476	0	0
Basilicata	1.982	-2.261	623	-43	-302
Calabria	6.116	-6.053	-136	-18	90
Campania	3.058	-3.122	-72	-227	363
Emilia Romagna	10.456	-22.512	11.175	195	687
Friuli Venezia Giulia	3.783	-3.526	-257	0	0
Lazio	4.213	-4.234	-6	0	27
Liguria	80	-664	583	0	0
Lombardia	5.431	-5.313	21	0	-139
Marche	532	-533	1	0	0
Molise	314	-288	101	41	-168
Piemonte	9.015	-12.370	3.307	0	48
Puglia	1.141	-1.110	-37	0	5
Sardegna	11.671	-52.028	40.415	0	-58
Sicilia	2.345	-2.071	-164	38	-148
Toscana	8.137	-12.073	3.239	0	697
Trentino Alto Adige	1.910	-2.258	347	0	0
Umbria	1.377	-1.299	-58	0	-20
Valle d'Aosta	961	-1.121	160	0	0
Veneto	6.232	-6.397	201	-12	-24

**Tabella 18: Variazioni regionali di uso del suolo tra il 1990 e il 2000 (1° livello CORINE)**

REGIONE	Variazioni di Uso del suolo il 1990 ed il 2000 1° Livello [%]				
	1	2	3	4	5
Abruzzo	15,5	-0,8	0,1	0	0,0
Basilicata	16,0	-0,4	0,2	-20,9	-9,4
Calabria	15,4	-0,8	0,0	-31,3	2,1
Campania	3,8	-0,4	0,0	-37,5	17,4
Emilia Romagna	11,2	-1,5	2,0	3,0	2,7
Friuli Venezia Giulia	7,7	-1,1	-0,1	0,0	0,0
Lazio	4,4	-0,4	0,0	0,0	0,1
Liguria	0,3	-0,8	0,1	0,0	0,0
Lombardia	2,2	-0,5	0,0	0,0	-0,2
Marche	1,4	-0,1	0,0	0,0	0,0
Molise	6,6	-0,1	0,1	80,0	-13,8
Piemonte	9,0	-1,1	0,3	0,0	0,2
Puglia	1,4	-0,1	0,0	0,0	0,0
Sardegna	21,3	-4,7	3,3	0,0	-0,3
Sicilia	1,9	-0,1	0,0	1,8	-1,4
Toscana	9,5	-1,2	0,3	0,0	8,3
Trentino Alto Adige	7,1	-1,2	0,0	0,0	0,0
Umbria	5,6	-0,3	0,0	0,0	-0,1
Valle d'Aosta	25,6	-4,1	0,1	0,0	0,0
Veneto	4,6	-0,6	0,0	0,0	0,0

**Tabella 19: Variazioni percentuali di uso del suolo rispetto all'anno 1990 rilevate nel 2000 (1° livello CORINE) (2000-1990/1990)**



Figura 58: Percentuali regionali di territorio che hanno subito una modifica di uso del suolo (3° livello Corine) tra il 1990 e il 2000

	1	2	3	4	5
Abruzzo	9,21	-8,31	-1,06	0	0,16
Basilicata	7,58	-6,77	-10,46	-1,27	10,91
Calabria	22,85	-12,73	-12,73	-0,41	3,03
Campania	19,65	-17,99	-1,65	-0,96	0,96
Emilia Romagna	53,37	-38,58	-18	-0,1	3,31
Friuli Venezia Giulia	11,85	-14,63	2,98	0	-0,2
Lazio	35,77	-33,54	-2,29	0	0,07
Liguria	1,67	-1,52	0	0	-0,14
Lombardia	62,52	-35,66	-26,04	-0,2	-0,62
Marche	19,78	-18,94	-0,85	0	0
Molise	3,87	-3,96	-0,03	-0,84	0,96
Piemonte	38,26	-27,37	-7,86	0	-3,03
Puglia	33,94	-30,02	-3,5	-1,99	1,56
Sardegna	16,38	-16,55	-10,44	0,18	10,42
Sicilia	17,46	-12,01	-7,36	-0,41	2,32
Toscana	40,61	-38,68	-3,26	0,11	1,22
Trentino Alto Adige	1,85	-1,02	-0,83	0	0
Umbria	6,81	-5,85	-0,96	0	0
Valle d'Aosta	0	0	0	0	0
Veneto	78,72	-78	-0,9	0	0,18

Tabella 20: Variazioni regionali (in km<sup>2</sup>) di uso del suolo tra il 2000 e il 2006 (1° livello CORINE)

Si può osservare dalla Figura 58 che la Sardegna è di gran lunga la regione che ha subito le modifiche più significative dal 1990 al 2000, modifiche che hanno interessato quasi il 5% del suo territorio; l'avanzamento delle aree artificiali è quantificato in oltre 11000 ettari, corrispondenti a un aumento di oltre il 20% della superficie di questa classe. Si può anche notare che, sempre dal 1990 al 2000, l'evoluzione percentualmente maggiore è stata quella delle aree artificiali in Valle D'Aosta, cresciute di oltre un quarto (25,6%).

Nel periodo 2000 – 2006, invece, la Lombardia registra il maggior decremento degli ambienti naturali e seminaturali, con valori areali di poco superiori ai 26 km<sup>2</sup>; segue l'Emilia-Romagna con 18 km<sup>2</sup>. I valori più elevati di incremento delle superfici artificiali riguardano il Veneto (circa 79 km<sup>2</sup>), la Lombardia (quasi 63 km<sup>2</sup>) e l'Emilia-Romagna (circa 53 km<sup>2</sup>).

Nella maggior parte dei casi, gli incrementi delle superfici artificiali sono a discapito delle zone agricole utilizzate, i cui maggiori valori di decremento sono visibili in Veneto (78 km<sup>2</sup>), Toscana ed Emilia Romagna (quasi 39 km<sup>2</sup>), Lombardia (quasi 36 km<sup>2</sup>), Lazio (quasi 34 km<sup>2</sup>) e Puglia (circa 30 km<sup>2</sup>).

Incrementi, seppur limitati a circa 10 km<sup>2</sup>, sono visibili per i corpi idrici (classe 5) nelle regioni Basilicata e Sardegna, in particolar modo nei bacini interni.

La classe 4 (aree umide) ha subito variazioni, seppur limitate, solo nelle regioni Puglia (-2 km<sup>2</sup>) e Basilicata (-1,27 km<sup>2</sup>).

La diffusione dei risultati a livello nazionale è stata demandata alle Autorità Nazionali incaricate della realizzazione dei risultati stessi. Nel caso italiano è quindi l'ISPRA a provvedere alla diffusione dei risultati di sua competenza. Quest'ultimo ente diffonde gratuitamente tutti i risultati relativi al progetto per applicazioni non commerciali. Lo strumento di diffusione più importante è il sito internet, dal quale è possibile scaricare la vasta gamma di risultati realizzati nell'ambito del progetto, comprese ovviamente le coperture del suolo e le immagini satellitari.

La partecipazione dell'APAT al programma CORINE ha consentito di dotare l'Europa di alcuni tra gli strati informativi di maggiore utilità per soddisfare le esigenze conoscitive espresse essenzialmente dai decisori politici, dagli amministratori e dalla comunità scientifica. La base informativa CLC

rappresenta infatti a livello europeo uno strumento fondamentale per la valutazione dell'efficacia delle politiche regionali di sviluppo, la valutazione dell'impatto delle politiche agricole sull'ambiente, l'elaborazione di strategie per una gestione integrata delle aree costiere, l'implementazione delle convenzioni sulla biodiversità e delle direttive sugli habitat e sugli uccelli, la gestione integrata dei bacini idrografici, la valutazione delle emissioni atmosferiche, la misura della qualità dell'aria e la valutazione ambientale strategica delle reti di trasporti. In definitiva, le basi di dati CLC rivestono particolare importanza per misurare la sostenibilità dello sviluppo socio-economico; ciò è di particolare interesse per i nuovi Stati Membri dell'Unione Europea, i quali, con l'applicazione della legislazione comunitaria in settori quali l'agricoltura, l'ambiente, le reti di trasporto e l'industria, sono chiamati ad adeguare le politiche di settore, orientando le stesse verso l'uso sostenibile delle risorse naturali.

In particolare per quanto concerne l'Italia, i nuovi database di copertura del suolo insieme alla copertura di 4° livello tematico per i territori boscati e gli ambienti naturali e semi-naturali, aprono la strada a un uso decisamente più esteso delle basi dati CLC a livello nazionale e regionale.

### ***1.1. CLC nel bacino del Po***

Per quanto riguarda il presente lavoro di tesi, la mappa di copertura del territorio realizzata nell'ambito del progetto CLC2006 è stata utilizzata per analizzare l'uso del suolo nei territori ricadenti nel bacino del Po.

Per effettuare questo studio, partendo dal 3° livello tematico della CLC2006, è stata effettuata una riclassificazione arbitraria (denominata CLU\_CODE – Cluster Code, spiegata nella Tabella 21) per ridurre il numero delle classi di uso del suolo da 44 a 6; ciò al fine di poter effettuare una prima analisi in maniera semplificata.

CLU_CODE	NOME	CLC_CODE
91	URBANO	111, 112, 14x
92	INDUSTRIALE-INFRASTRUTTURE	12x, 13x
93	PRATO STABILE	231
94	COLTURE	21x, 22x, 24x
95	AREE NATURALI	3xx
999	AREE UMIDE	4xx, 5xx

**Tabella 21: Riclassificazione delle classi del 3° livello tematico**

Utilizzando il software ArcView, sono stati quindi sovrapposti i tematismi riguardanti il bacino del Po e il progetto CLC2006, rendendo così possibile visualizzare la mappa dell'uso del suolo nell'area interessata (Figura 59).

Nella Figura 60 si può vedere la stessa mappa dopo aver effettuato la riclassificazione delle celle: essa appare nettamente più chiara e intuitiva.



# CLC2006\_3° livello tematico

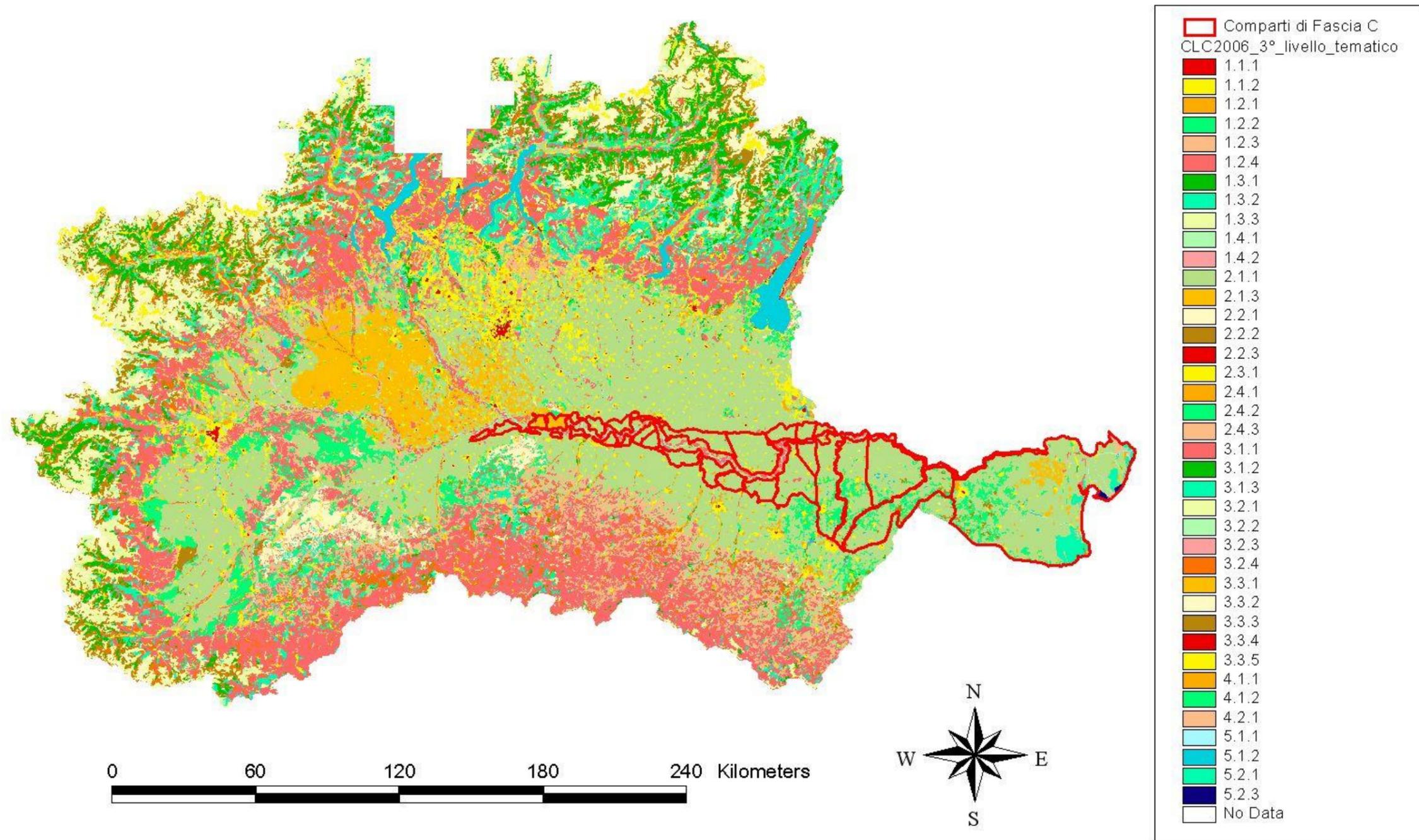


Figura 59: CLC2006 – Mappa di uso del suolo

# Riclassificazione CLC2006\_3° livello tematico

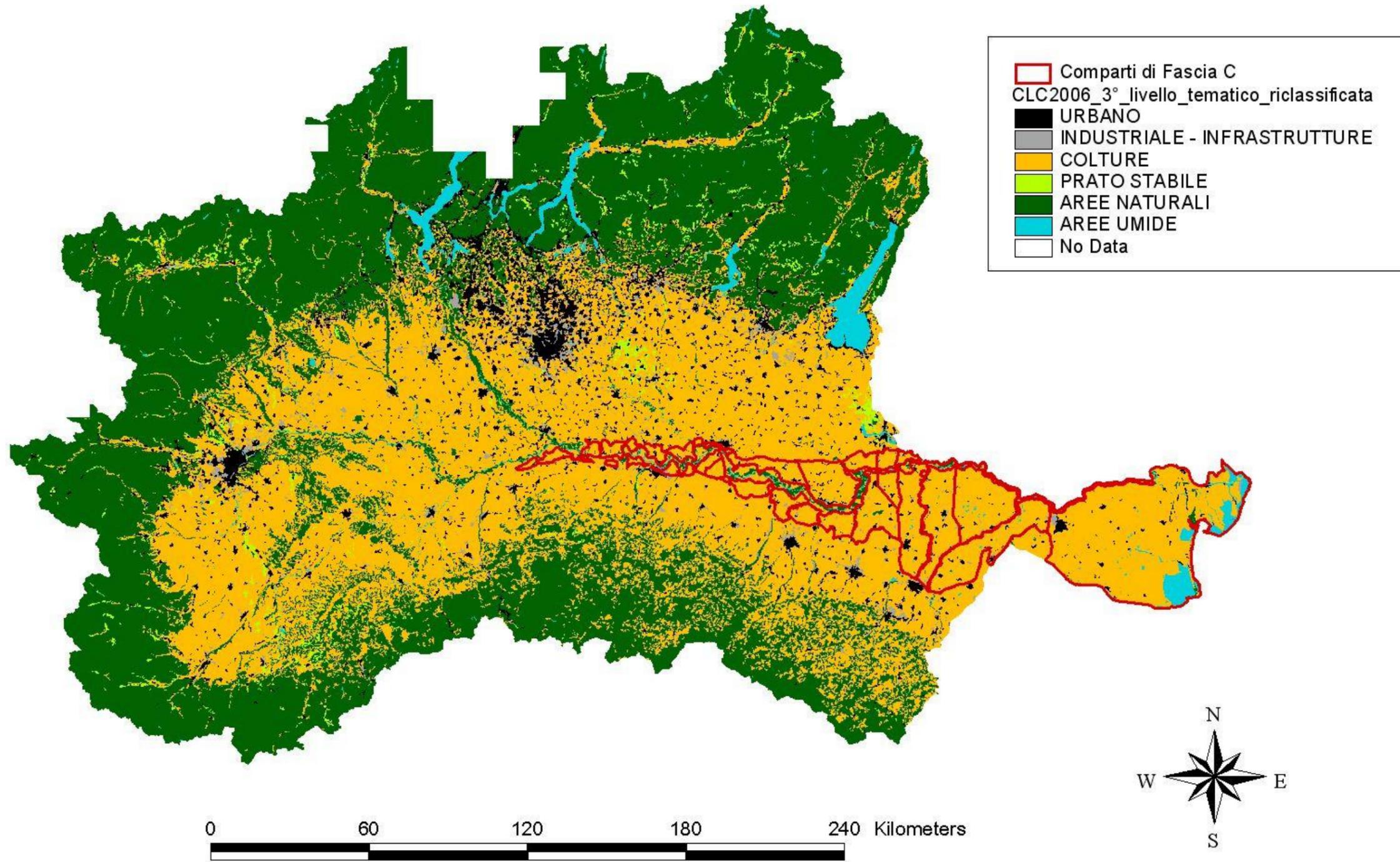


Figura 60: CLC2006 – Mappa di uso del suolo riclassificata

Considerando che ogni cella della CLC2006 IT misura un ettaro, per ogni comparto di Fascia C è stato calcolato il totale delle celle di ogni categoria riclassificata per ottenere le dimensioni delle aree appartenenti alle varie classi. Sono quindi stati creati due appositi grafici (Grafico 36 e Grafico 37), il primo relativo alle aree dei comparti in ettari e il secondo riguardante la percentuale dell'area relativa alle singole classi rispetto all'area totale di ogni comparto.

Nell'APPENDICE B sono riportati i dati dettagliati delle aree relative alle singole categorie.

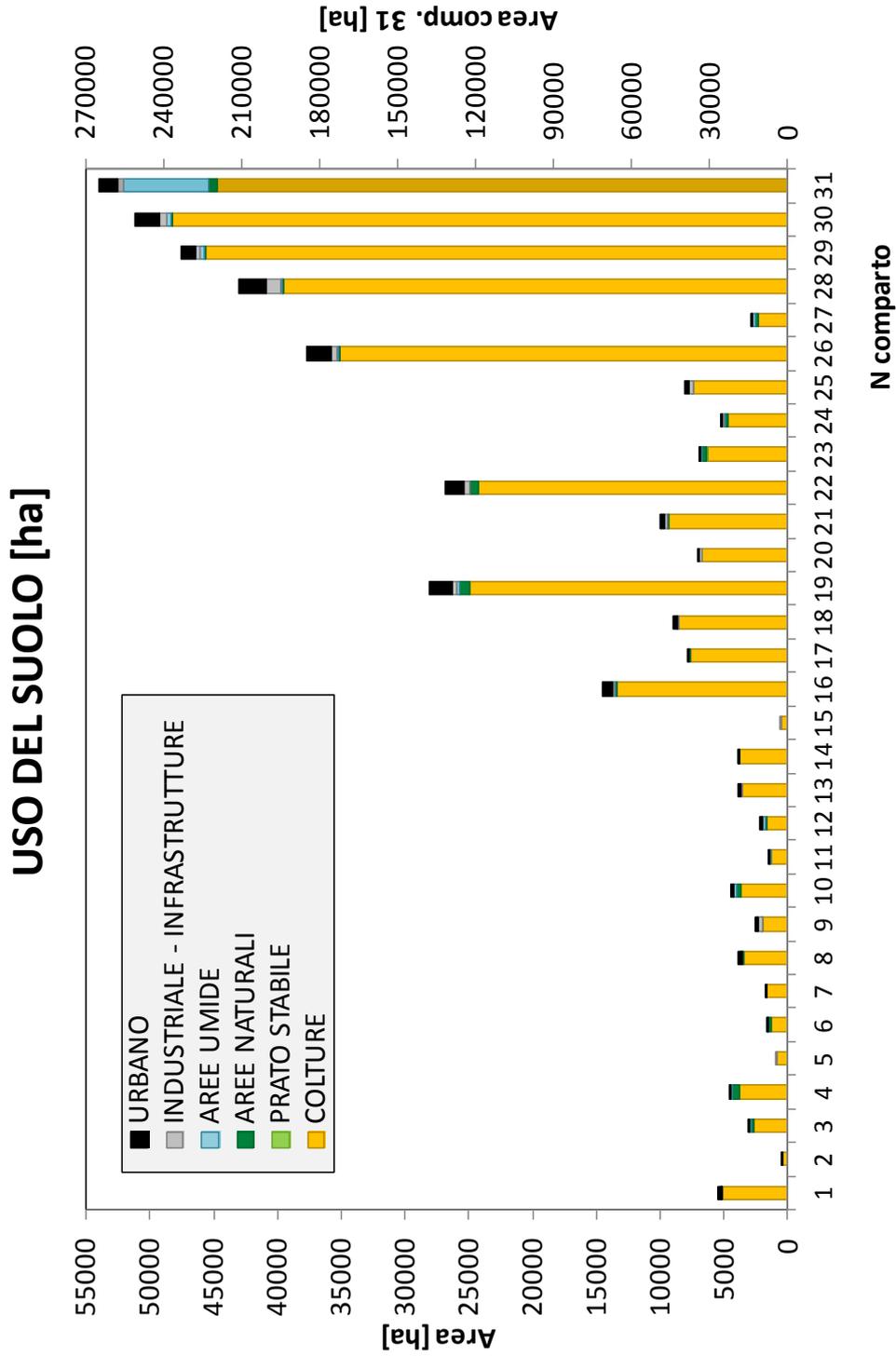


Grafico 36: Aree dei singoli comparti appartenenti alle varie classi di uso del suolo (in ha); il comparto n. 31 (pana\_poB), essendo molto vasto rispetto agli altri, fa riferimento all'asse secondario del grafico, indicato a destra

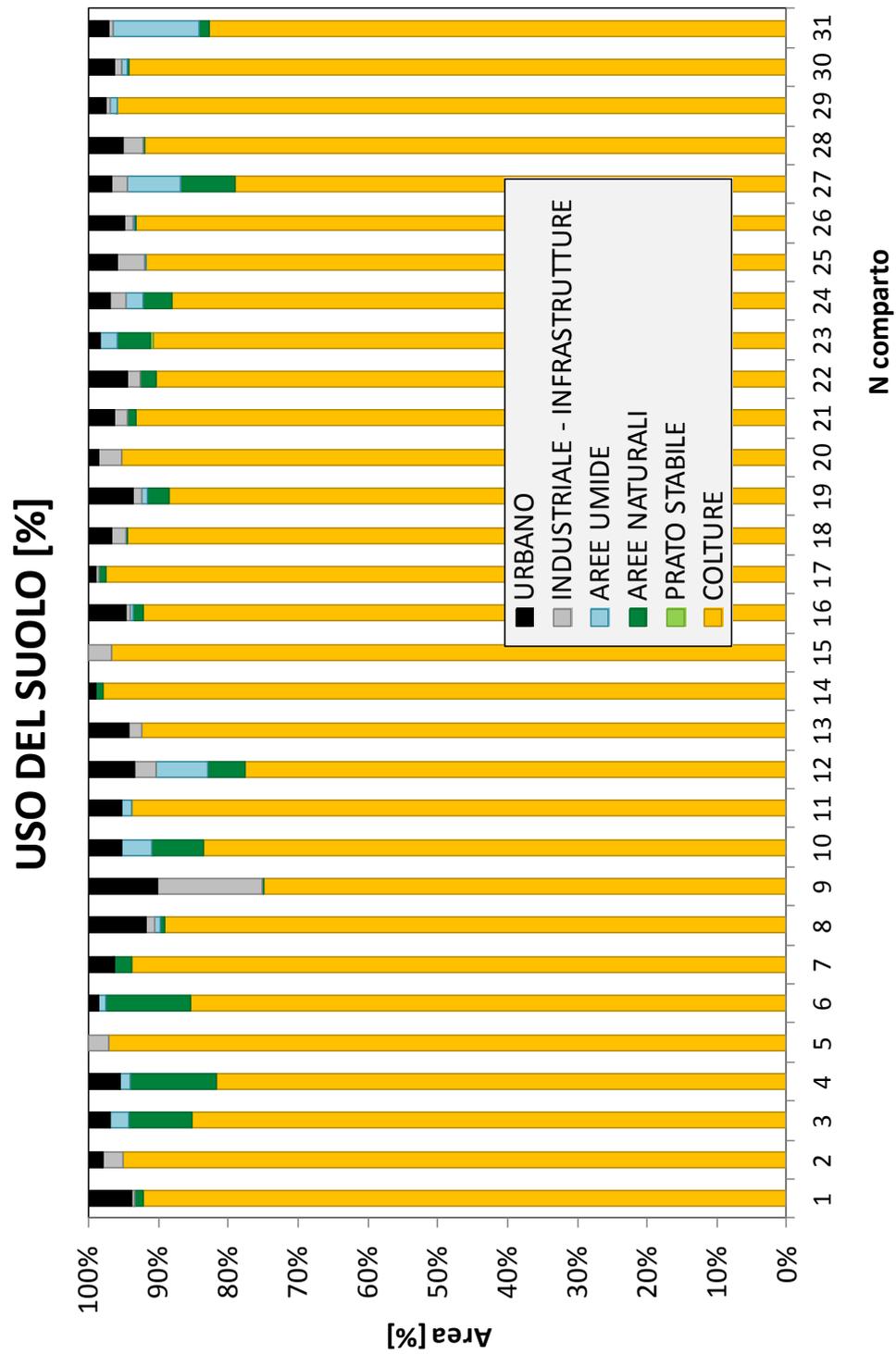


Grafico 37: Aree appartenenti alle varie classi di uso del suolo (in % rispetto all'area totale del singolo comparto)

Dall'analisi dei grafici si nota come l'uso del suolo prevalente nei comparti di Fascia C sia quello delle colture: queste infatti costituiscono almeno il 75% dell'intera area del comparto (comparto n. 9, *treb\_nure*, in prossimità di Piacenza), fino ad arrivare a un massimo di oltre il 98% nei comparti n. 14 e 17 (*chia\_ardaB* e *ongi\_taro*), nella zona a ovest di Parma. Quantitativamente, dal Grafico 36 si nota che il comparto con la superficie più vasta destinata alle coltivazioni è il comparto n. 31 (*pana\_poB*), con quasi 220000 ha di colture, ma questo dato è ovviamente influenzato dalla vastità della sua area totale, non paragonabile con quella degli altri comparti.

Nel Grafico 37 si osserva, come era prevedibile, data la morfologia del territorio italiano, che i comparti più a monte (ad es. i comparti n. 3 – *rogg\_lambA*, 4 – *rogg\_lambB*, 6 - *lamb\_addaA* e 10 – *lamb\_addaC*) possiedono una percentuale relativamente elevata di terreni naturali (fino al 12%), mentre a valle, in prossimità del Delta del Po, prevalgono le zone umide (quasi l'8% dell'area totale nel comparto n. 27 – *ogli:mincC* e circa il 12% nel comparto n. 31 – *pana\_poB*).

La classe “prato stabile”, cioè le foraggere permanenti, sono presenti solamente nel comparto n. 23 (*ogli\_minca*) con 23 ha, pari allo 0.33% dell'area totale.

Le aree urbanizzate e quelle industriali (mostrate in dettaglio nella Figura 61), nonostante costituiscano una percentuale relativamente bassa rispetto alle superfici totali, rivestono come già accennato un'importanza molto elevata dal punto di vista economico e sociale. Sono state quindi studiate a parte, ricavando il Grafico 38 e il Grafico 39.

# CLC2006\_3° livello tematico

## AREE URBANE E INDUSTRIALI

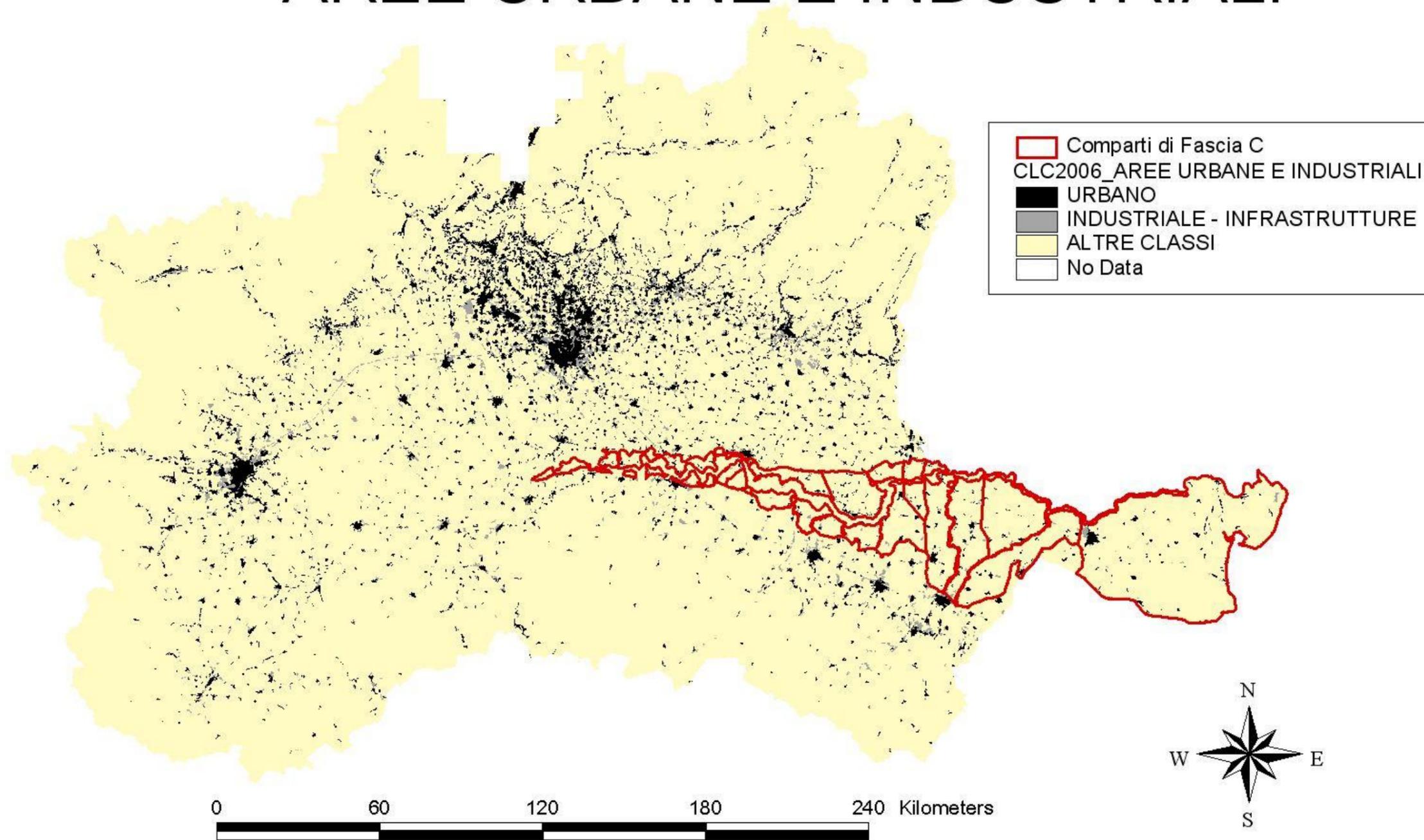


Figura 61: CLC2006 – Mappa delle aree urbane e industriali



## USO DEL SUOLO: AREE URBANE E INDUSTRIALI [ha]

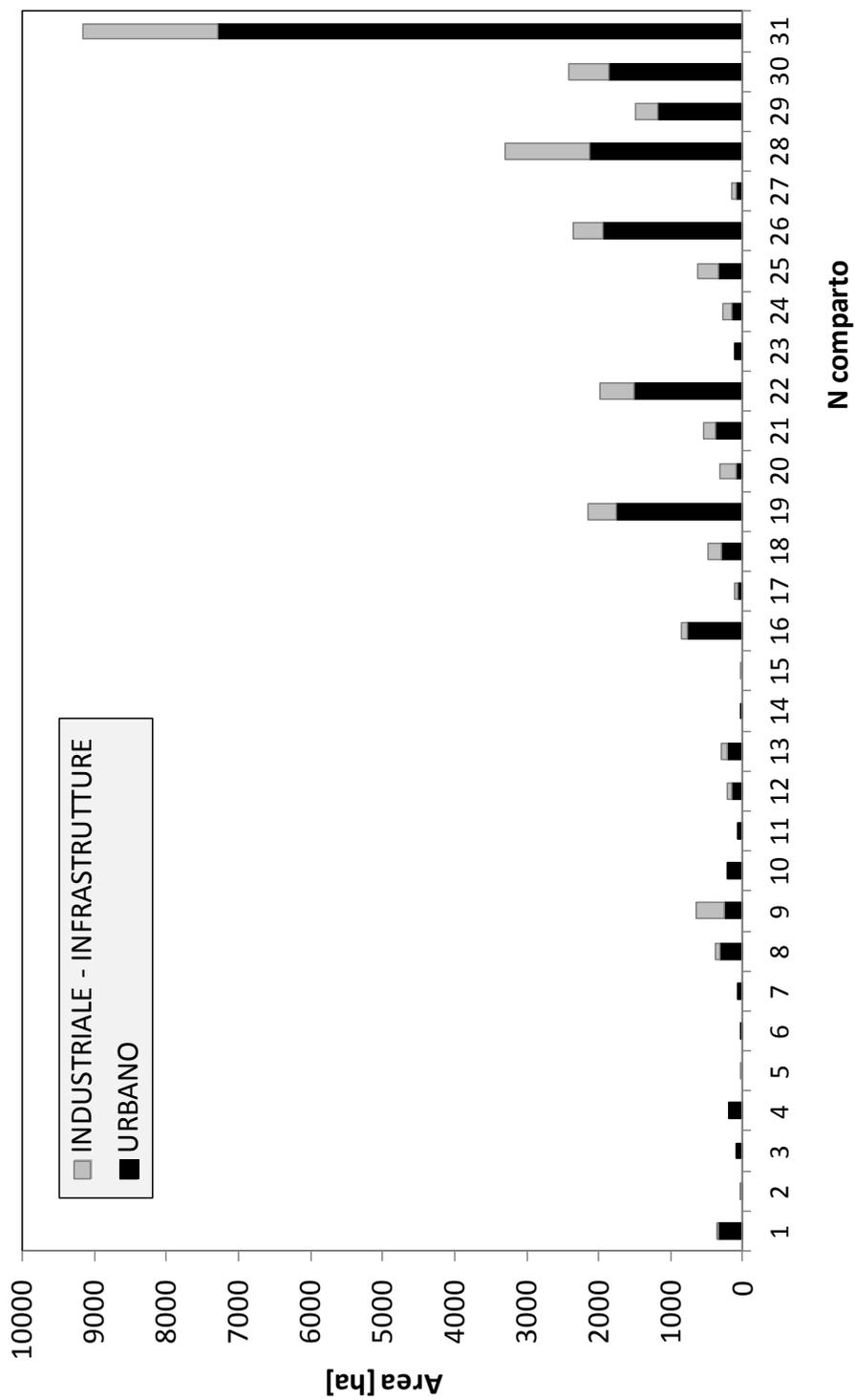


Grafico 38: Aree urbane e industriali dei singoli comparti (in ha)

## USO DEL SUOLO: AREE URBANE E INDUSTRIALI [%]

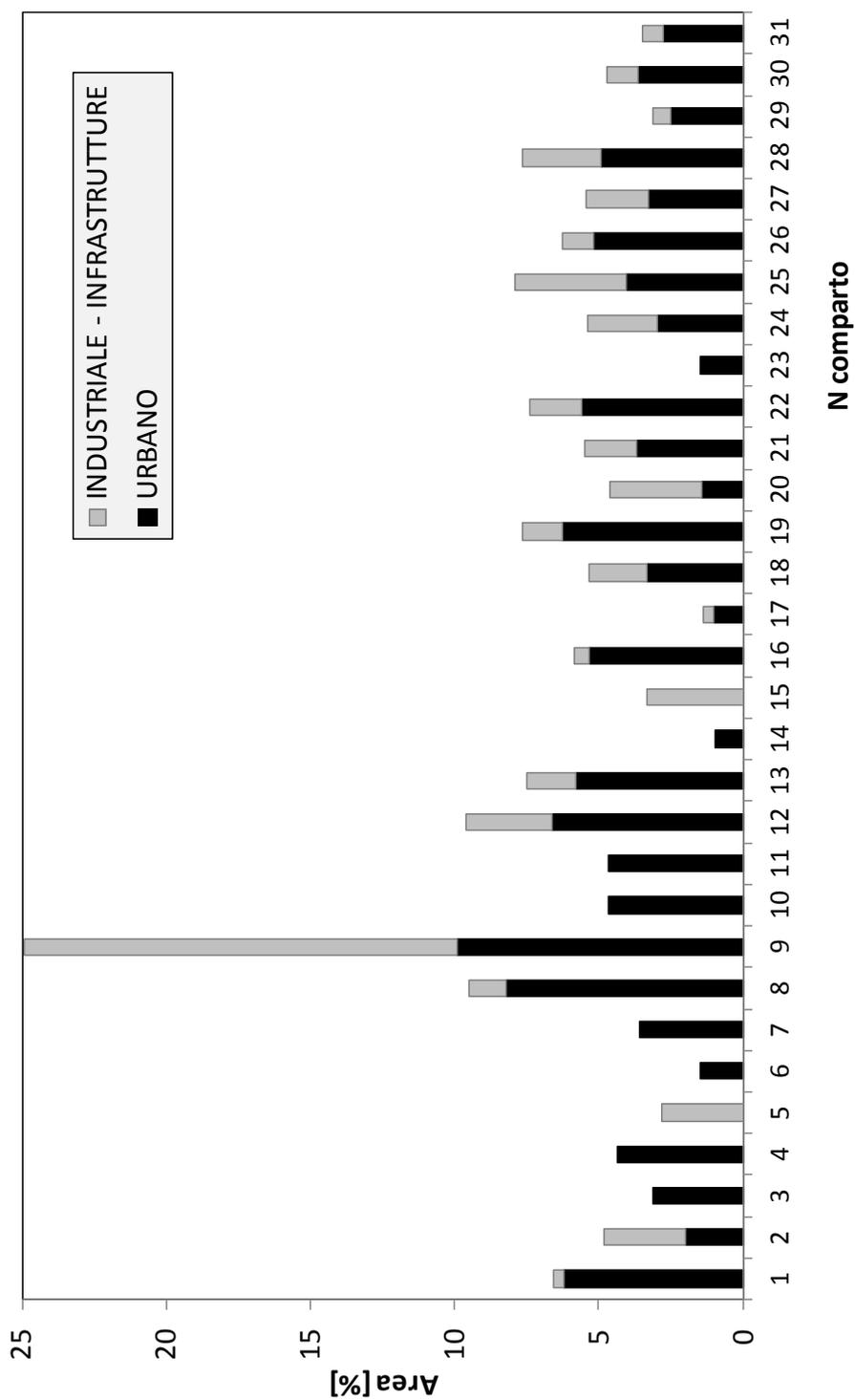


Grafico 39: Aree urbane e industriali (in % rispetto all'area totale del singolo comparto)

La presenza di aree urbanizzate si riscontra prevalentemente nei comparti a valle di Mantova (Grafico 38): il comparto n. 31, pana\_poB, comprendente la zona di Ferrara, presenta infatti quasi 7300 ha di area urbana, seguito dal comparto n. 28, secc\_panaA, in prossimità di Modena, con 2100 ha. Anche nei comparti cros\_seccC (n. 26) e pana\_poA (n. 30) si superano i 1850 ha di territorio urbanizzato.

Secondo quanto censito nei progetti CORINE, le aree urbane sono totalmente assenti nei comparti n. 5 e 15 (po\_tido e arda\_ongi), mentre in quasi tutti gli altri comparti la loro percentuale non supera il 6% rispetto all'area totale (Grafico 39).

Sempre dal Grafico 39 si nota che, per quanto riguarda le aree industrializzate, ove presenti, la loro distribuzione percentuale risulta abbastanza omogenea, normalmente inferiore al 4% dell'area totale, a eccezione di un picco del 15% del comparto n. 9 (treb\_nure), corrispondente alla zona di Piacenza. Quantitativamente (Grafico 38), come per quasi tutte le altre classi di uso del suolo, il comparto con più superficie destinata alle industrie (1864 ha) è il n. 31 (pana\_poB), seguito dal n. 28 (secc\_panaA) con 1175 ha. In nessun altro comparto si superano i 500 ha di area industriale.

### ***1.2. Applicazione della CLC2006 in caso di comparti allagati nello scenario con argini erodibili***

Per questa analisi, come già anticipato nell'introduzione a questo capitolo, ci si è soffermati in particolare sullo studio delle aree urbane e industriali (Figura 61), poiché per i motivi esposti nel paragrafo precedente risulterebbero maggiormente danneggiate da una possibile esondazione.

Per valutare il danno prodotto da eventuali straripamenti del fiume Po limitatamente all'ambito urbano e industriale dei territori adiacenti agli argini del suddetto fiume, sono stati presi in esame singolarmente i comparti di Fascia C interessati da allagamento nello scenario con argini erodibili: staf\_vers, vers\_po, rogg\_lambA, lamb\_addaA, lamb\_addaB, lamb\_addaC, taro\_parm, e parm\_enza.

Per ognuno di essi, con il metodo descritto in seguito e grazie al software ArcView è stato intersecato il tematismo della CLC2006 con quello del DEM (modello digitale del terreno, in cui a ogni pixel è associata la quota assoluta del punto del territorio rappresentato), allo scopo di ricavare le quote dei punti appartenenti alle classi “URBANO” e “INDUSTRIALE-INFRASTRUTTURE”. In questo modo, conoscendo dalle simulazioni effettuate con il software HEC-RAS la quota massima raggiunta dall’acqua nei singoli comparti, è possibile valutare la percentuale di area urbana e industriale che risulterebbe allagata in caso di passaggio della piena simulata.

Verranno a questo punto brevemente sintetizzati i principali passaggi che hanno portato alla realizzazione dei grafici risultanti.

In ArcView sono stati innanzitutto caricati i vari file necessari: *BacinoPo-100m*, *clc\_2006*, *dem\_100\_fc* e *comparti\_new*.

Il file *BacinoPo-100m* è stato quindi tagliato seguendo i confini del file *comparti\_new* e la stessa cosa è stata fatta con il file *clc\_2006*, tagliato seguendo i confini del primo comparto considerato. Si è ottenuto un nuovo file, che a ogni cella (con area di un ettaro) del comparto considerato associa un codice e un colore specifico, a seconda dell’uso del suolo ricavato dalla mappa del progetto CLC2006 (Figura 62).

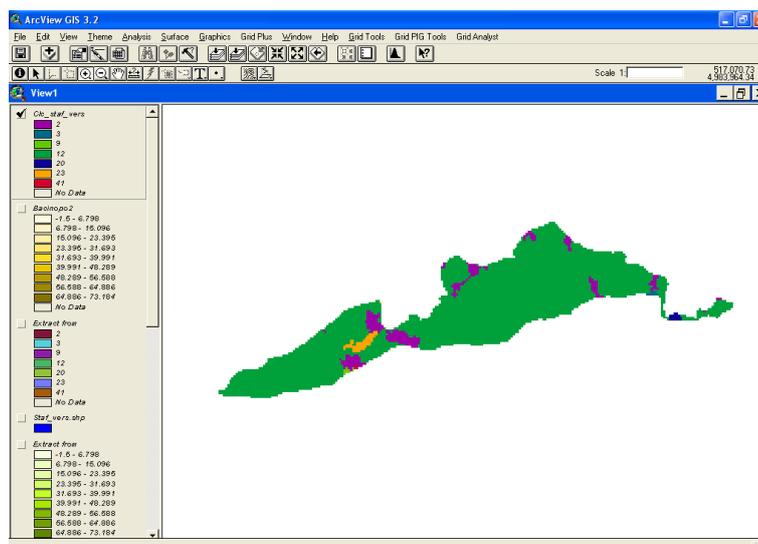


Figura 62: CLC2006 per il comparto staf\_overs

A questo punto è stato necessario riclassificare il file, assegnando a tutte le celle classificate come 1, 2, 10 e 11 (codici corrispondenti alle classi 111, 112, 14x della CLC) il valore “1”, mentre a tutte le altre celle è stato assegnato il valore ”No Data” e il colore trasparente. Si è così ottenuta la visualizzazione delle sole celle classificate come “area urbana” appartenenti al comparto considerato (Figura 63).

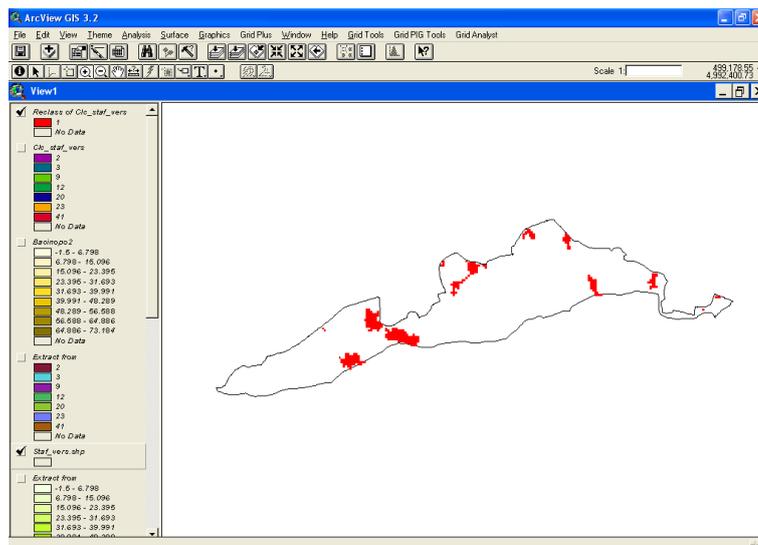


Figura 63: CLC2006 per il comparto staf\_vers riclassificato: in rosso le aree urbane

È stato quindi possibile intersecare il file ottenuto con il file del modello digitale del terreno, in modo da associare una quota a ogni cella dell’area urbana. Questa operazione viene effettuata con il comando *Analysis – Map Calculator*. Una volta terminato il calcolo, interrogando con il comando *Identify* un punto appartenente ad una cella dell’area urbana, viene visualizzata la sua quota.

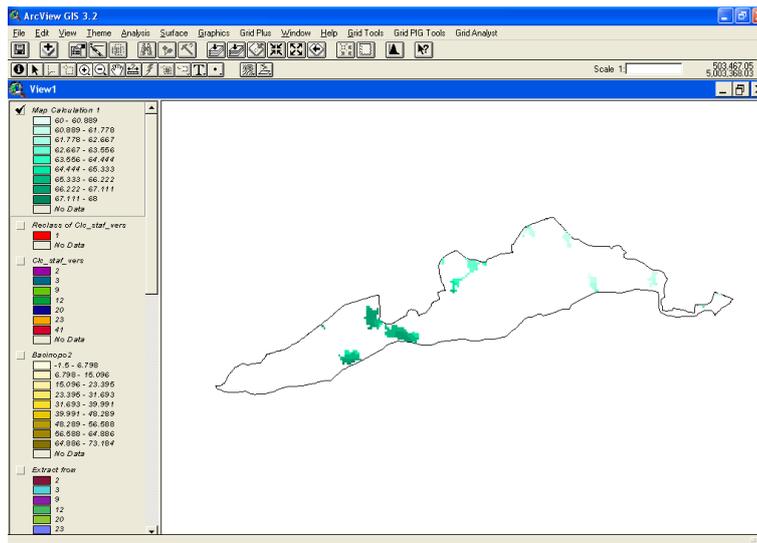


Figura 64:CLC2006 per il comparto staf\_vers riclassificato moltiplicato per il file DEM

Le stesse operazioni sono state inoltre ripetute per quanto riguarda il tessuto industriale.

Le figure che rappresentano le aree urbane e industriali quotate di ogni comparto preso in esame sono riportate nell'APPENDICE C.

Ultima operazione effettuata è stata la conversione del file ottenuto in un file di testo che, una volta copiato in Excel, fornisce le coordinate X, Y e Z di ogni punto del comparto.

Dopo aver ordinato le quote in ordine crescente, è stata calcolata per ogni punto la relativa frequenza cumulata percentuale, secondo la formula

$$F_i = \frac{N_i}{n} * 100$$

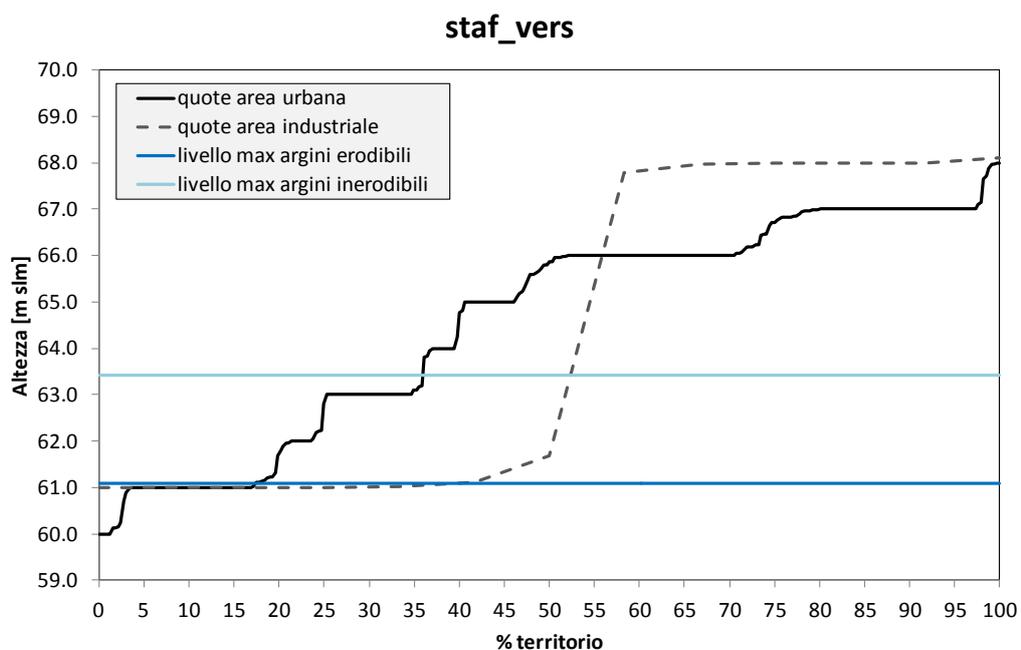
dove:

$N_i$  = numero progressivo del dato;

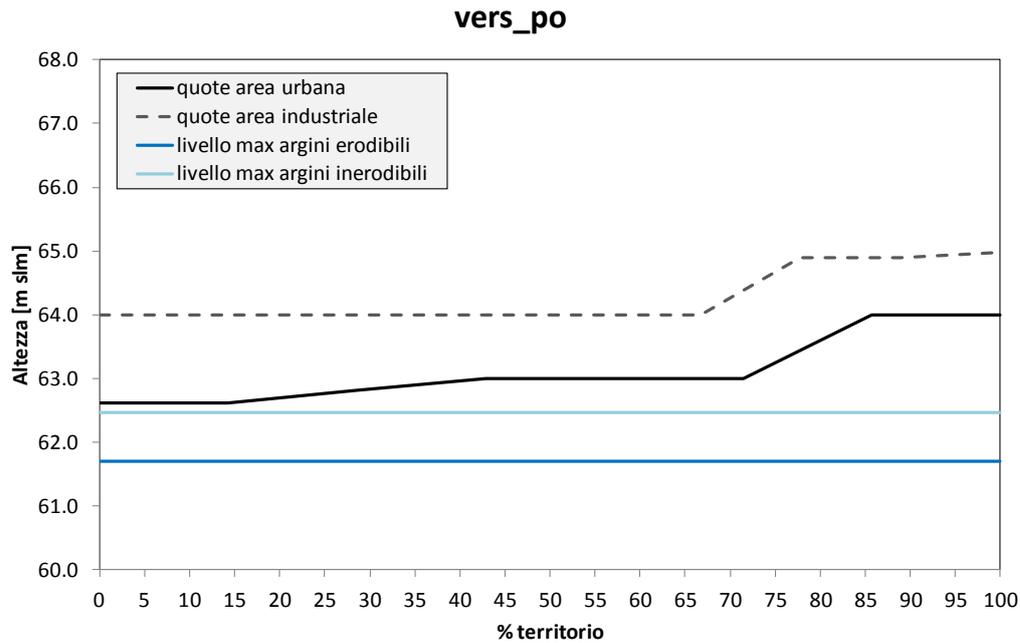
$n$  = numero totale dei dati.

Riportando sull'asse delle ascisse le frequenze cumulate percentuali (che indicano la percentuale di territorio che si trova a una quota inferiore o uguale a quella cercata) e sull'asse delle ordinate le quote del terreno e ripetendo tutte le

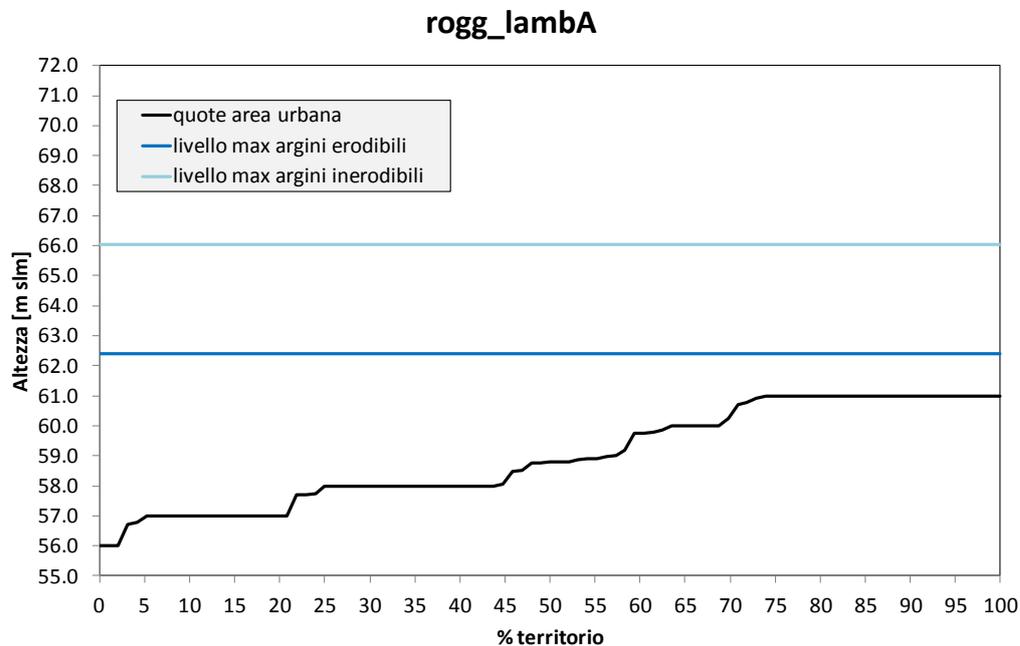
operazioni per tutti gli altri comparti considerati si ottengono i grafici seguenti, in cui sono stati inoltre rappresentati i livelli massimi raggiunti nello scenario con argini erodibili e in quello con argini inerodibili (Grafico 40, Grafico 41, Grafico 42, Grafico 43, Grafico 44, Grafico 45, Grafico 46 e Grafico 47).



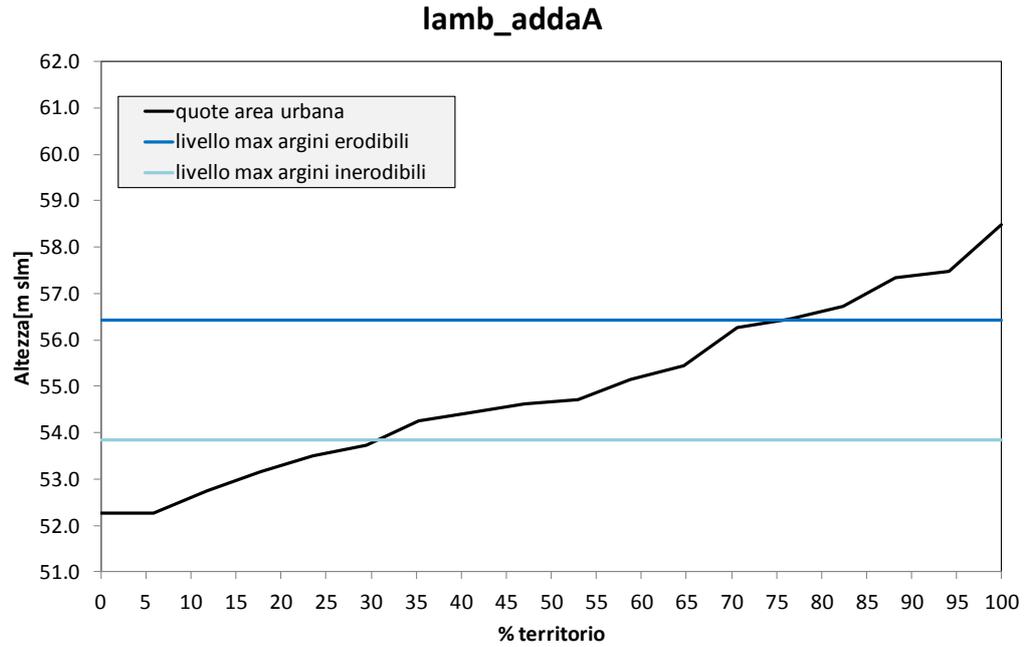
**Grafico 40: Curve ipsografiche delle superfici urbane (tratto nero continuo) e industriali (tratto grigio discontinuo) nel comparto staf\_vers; quote di massimo allagamento simulate dal modello nello scenario con argini erodibili (linea blu) e inerodibili (linea azzurra); superficie totale area urbana: 343 ha; superficie totale area industriale: 19 ha**



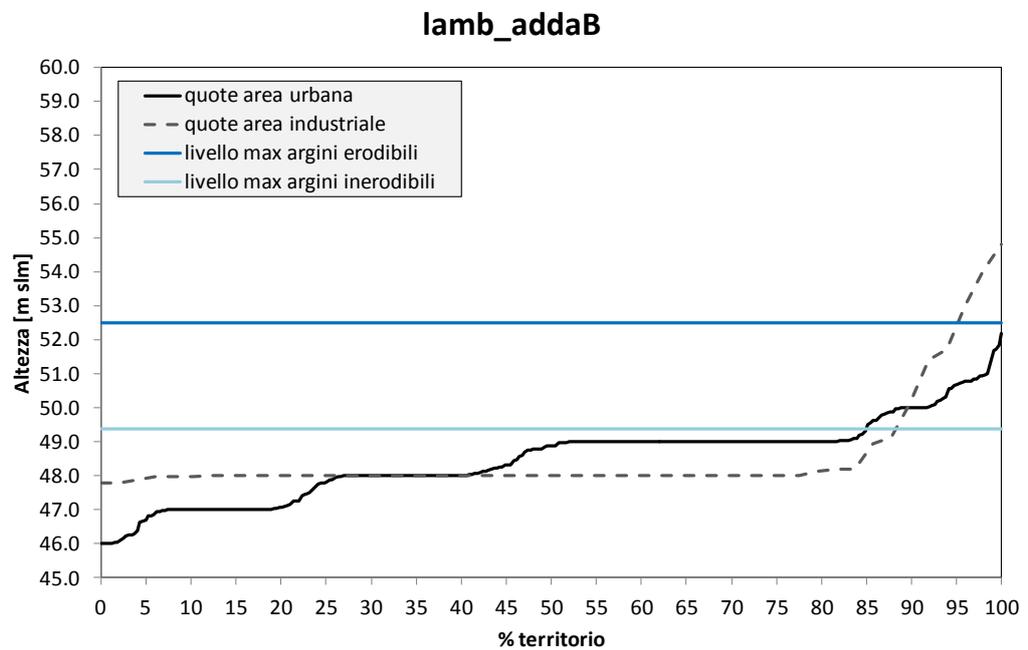
**Grafico 41: Curve ipsografiche delle superfici urbane (tratto nero continuo) e industriali (tratto grigio discontinuo) nel comparto vers\_po; quote di massimo allagamento simulate dal modello nello scenario con argini erodibili (linea blu) e inerodibili (linea azzurra); superficie totale area urbana: 7 ha; superficie totale area industriale: 10 ha**



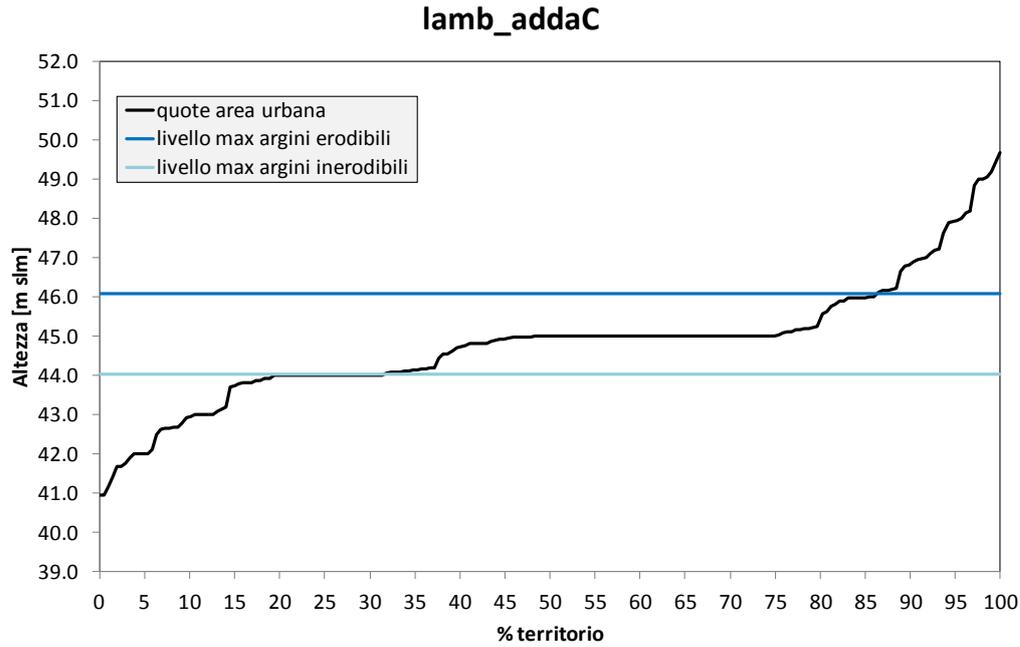
**Grafico 42: Curve ipsografiche delle superfici urbane (tratto nero continuo) e industriali (tratto grigio discontinuo) nel comparto rogg\_lambA; quote di massimo allagamento simulate dal modello nello scenario con argini erodibili (linea blu) e inerodibili (linea azzurra); superficie totale area urbana: 96 ha; superficie totale area industriale: 0 ha**



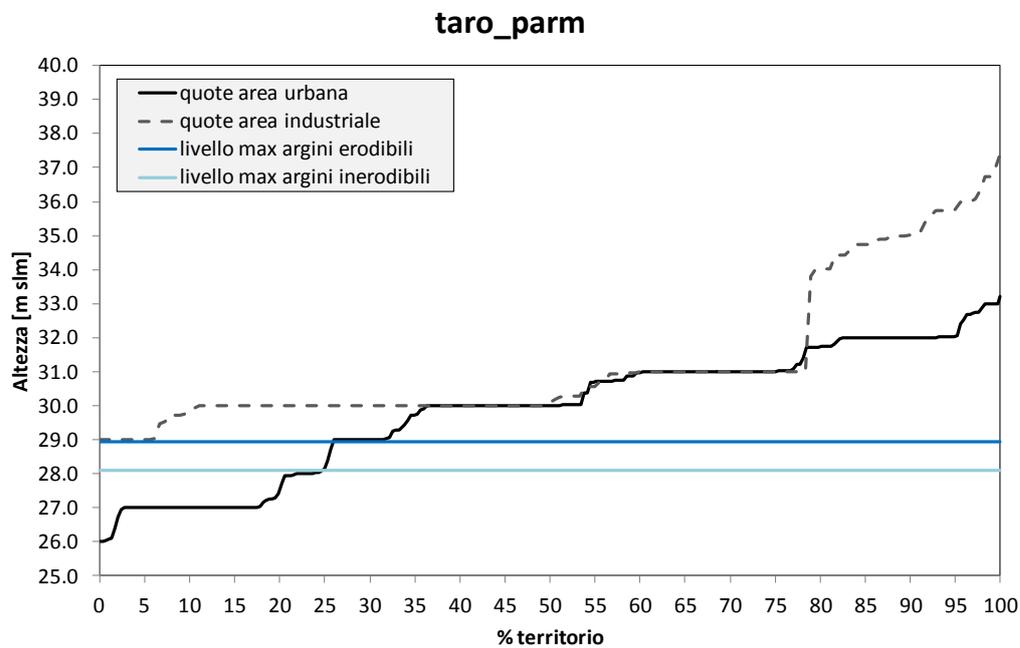
**Grafico 43:** Curve ipsografiche delle superfici urbane (tratto nero continuo) e industriali (tratto grigio discontinuo) nel comparto lamb\_addaA; quote di massimo allagamento simulate dal modello nello scenario con argini erodibili (linea blu) e inerodibili (linea azzurra); superficie totale area urbana: 23 ha; superficie totale area industriale: 0 ha



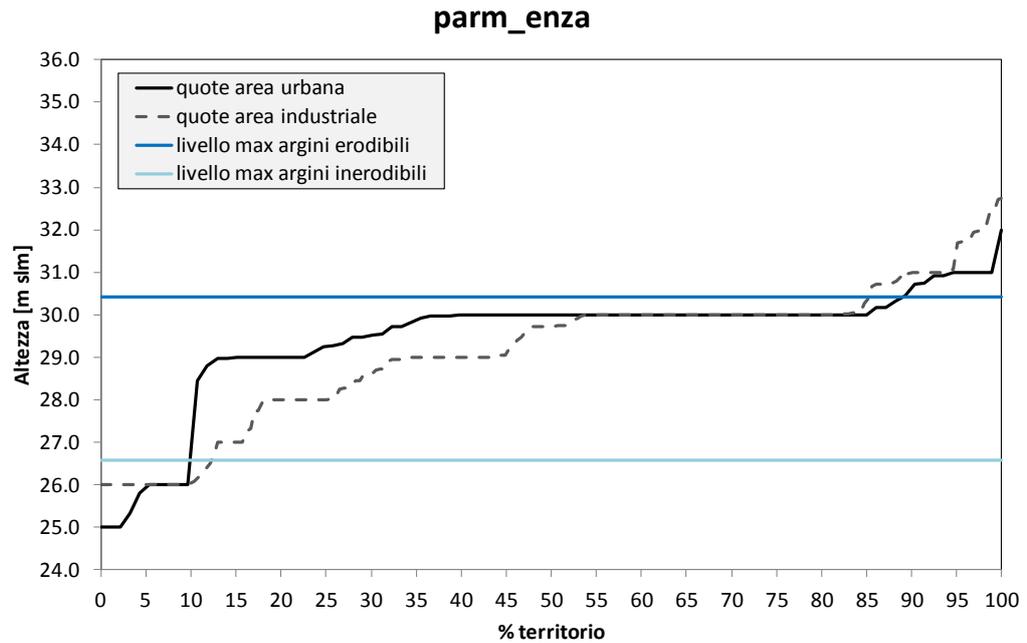
**Grafico 44:** Curve ipsografiche delle superfici urbane (tratto nero continuo) e industriali (tratto grigio discontinuo) nel comparto lamb\_addaB; quote di massimo allagamento simulate dal modello nello scenario con argini erodibili (linea blu) e inerodibili (linea azzurra); superficie totale area urbana: 323 ha; superficie totale area industriale: 49 ha



**Grafico 45:** Curve ipsografiche delle superfici urbane (tratto nero continuo) e industriali (tratto grigio discontinuo) nel comparto lamb\_addaC; quote di massimo allagamento simulate dal modello nello scenario con argini erodibili (linea blu) e inerodibili (linea azzurra); superficie totale area urbana: 207 ha; superficie totale area industriale: 0 ha



**Grafico 46:** Curve ipsografiche delle superfici urbane (tratto nero continuo) e industriali (tratto grigio discontinuo) nel comparto taro\_parm; quote di massimo allagamento simulate dal modello nello scenario con argini erodibili (linea blu) e inerodibili (linea azzurra); superficie totale area urbana: 297 ha; superficie totale area industriale: 181 ha



**Grafico 47: Curve ipsografiche delle superfici urbane (tratto nero continuo) e industriali (tratto grigio discontinuo) nel comparto parm\_enza; quote di massimo allagamento simulate dal modello nello scenario con argini erodibili (linea blu) e inerodibili (linea azzurra); superficie totale area urbana: 100 ha; superficie totale area industriale: 225 ha**

Nella seguente tabella vengono riassunte le percentuali di territorio urbano e industriale allagate in seguito al passaggio dell'onda di piena del Po nello scenario con argini erodibili e in quello con argini inerodibili, ricavate dall'intersezione tra le curve "quote area urbana" e "quote area industriale" e le rette che indicano il livello massimo raggiunto dall'acqua nei due scenari (dai risultati delle simulazioni con il software HEC-RAS).

ID COMPARTO	NOME COMPARTO	% AREA URBANA ALLAGATA		% AREA INDUSTRIALE ALLAGATA	
		argini erodibili	argini inerodibili	argini erodibili	argini inerodibili
1	staf_vers	18	36	41	53
2	vers_po	0	0	0	0
3	rogg_lambA	100	100	-	-
6	lamb_addaA	76	30	-	-
8	lamb_addaB	100	85	95	88
10	lamb_addaC	86	31	-	-
18	taro_parm	26	25	0	0
20	parm_enza	89	10	85	12

**Tabella 22: Percentuali di territorio urbano e industriale allagate dal passaggio dell'onda di piena con  $T_{rit}$  cinquecentennale nel fiume Po**

Da una prima analisi dei grafici precedenti si nota subito che vi sono alcuni comparti (rogg\_lambA, lamb\_addaA e lamb\_addaC) in cui le aree industriali sono assenti: ciò permette di considerare meno dannoso un eventuale sormonto degli argini maestri. Considerando le aree urbane degli stessi comparti, si nota che vi sono due casi differenti: nel comparto n. 3 (rogg\_lambA) si verifica l'allagamento dell'intera superficie urbana sia nello scenario con argini erodibili che in quello con argini inerodibili, mentre nei due comparti rimanenti vi è una sostanziale differenza tra ciò che si verifica permettendo la rottura degli argini (rispettivamente 76 e 86% di territorio urbano allagato) e ciò che si verifica consolidando gli argini (30% e 31%). Nel primo caso, considerando anche che si tratta di uno dei comparti più a monte, varrebbe la pena permettere la formazione di una breccia, in modo da ridurre il volume di acqua che transiterebbe oltre e proteggere così da esondazioni alcuni dei comparti più a valle, in cui un volume d'acqua minore comporterebbe una drastica riduzione delle aree allagate. Nel secondo caso varrebbe invece la pena considerare l'ipotesi di un consolidamento degli argini maestri, in quanto ciò porterebbe a una notevole riduzione dei danni alle aree urbane considerate.

Nel caso del comparto n. 3 (rogg\_lambA) varrebbe la pena pensare a una possibile strategia per evitare che la totalità delle aree urbane e industriali venisse sommersa in seguito al passaggio dell'onda di piena con  $T_{rit}$  cinquecentennale.

Le stesse considerazioni possono essere fatte per quanto riguarda gli altri comparti in cui sono presenti zone industriali:

- nei comparti n. 1 (staf\_vers), 6 (lamb\_addaB) e 18 (taro\_parm) non sono presenti sostanziali differenze tra i due scenari dal punto di vista della percentuale di aree urbane e industriali allagate, pertanto la situazione attuale (argini erodibili) sembra essere quella più vantaggiosa da adottare: il consolidamento degli argini lungo decine di km sarebbe un'operazione alquanto onerosa a fronte di benefici relativamente contenuti;
- per quanto riguarda il comparto n. 20 (parm\_enza), il beneficio derivante dal consolidamento degli argini sarebbe consistente, poiché permetterebbe di passare da un allagamento delle aree urbane e industriali pari rispettivamente all'89% e all'85% ad una percentuale di aree allagate pari al 10% e 12%.

Veramente soddisfacente è il risultato dell'analisi del comparto n. 2 (vers\_po), in quanto le relative aree urbane e industriali non risultano allagate in nessun caso: pertanto in questo comparto converrebbe sicuramente permettere la formazione di brecce (verrebbero allagate solamente le aree naturali e agricole, con perdite meno ingenti dal punto di vista economico) a beneficio dei comparti a valle che verrebbero interessati da un volume minore di acqua esondata.

Va ricordato, però, che dall'analisi effettuata è possibile ricavare soltanto delle indicazioni di massima, in quanto sono presenti numerosi limiti che rendono lo scenario considerato ancora lontano dalla realtà. Per citarne uno, il software HEC-RAS non consente di simulare le reali dinamiche di allagamento dei comparti idraulici di Fascia C conseguenti alla tracimazione delle arginature maestre, ma schematizza il fenomeno di allagamento attraverso la simulazione di una serie di istanti idrostatici: tutti i punti alla stessa quota vengono allagati contemporaneamente, sia che si tratti di un punto in prossimità dell'argine maestro, sia che il punto si trovi all'estremità opposta del comparto.

Successive indagini considereranno inoltre tutti i comparti di Fascia C che risultano allagati anche nello scenario con argini inerodibili. Sebbene sia improponibile pensare a un consolidamento degli argini maestri per l'intero tratto del fiume Po e dei suoi affluenti, solo così sarebbe possibile avere una

visione d'insieme per poter studiare possibili strategie di riduzione del danno provocato dal passaggio di un'onda di piena con  $T_{rit}$  cinquecentennale.

## 2. CONCLUSIONI E OBIETTIVI FUTURI

L'obiettivo posto nell'ambito di questo lavoro di tesi specialistica è stato la difesa delle aree di pianura prospicienti il tratto medio-inferiore del fiume Po dall'allagamento in occasione del passaggio di un'onda di piena al limite della prevedibilità, definita in questo contesto come un'onda avente tempo di ritorno pari a cinquecento anni. Tale lavoro ricade nell'ambito dell'attuazione delle linee strategiche redatte dall'AdBPo per la mitigazione del rischio idraulico residuale, ossia quella parte di rischio che permane anche in presenza di opere di difesa progettate e verificate con riferimento a un ben preciso tempo di ritorno (200 anni nel caso in esame). Queste linee strategiche sono denominate "strategie di resilienza", in contrasto con quelle messe in atto negli anni passati che invece prevedevano perlopiù il rialzo arginale ("strategie di resistenza").

Lo studio ha riprodotto, attraverso una schematizzazione condotta mediante l'ausilio del codice di calcolo HEC-RAS, le esondazioni all'esterno delle arginature maestre che si verificherebbero a seguito di un evento estremo, quale quello preso in esame, e il conseguente allagamento dei comparti idraulici prospicienti l'asta fluviale del Po e i suoi affluenti. Detti comparti sono costituiti dalle zone di pianura adiacenti all'asta fluviale, classificate dall'Autorità di bacino del fiume Po come Fascia C e suddivise in base alla presenza degli affluenti principali del fiume Po e alle principali infrastrutture viarie e ferroviarie situate in tale fascia.

Il punto di partenza è stato un modello numerico quasi-bidimensionale precedentemente sviluppato (DSTART-AdBPo, 2008 e successivi sviluppi: D'Andrea, 2010 e Pagliccia, 2010), la cui schematizzazione geometrica comprendeva unicamente l'alveo del fiume Po (corrispondente alle Fasce A e B secondo la denominazione adottata dall'AdBPo) e i comparti di Fascia C, geometricamente descritti in termini di curve di riempimento, ricavate a partire dal DTM del Bacino del Po attraverso opportune elaborazioni in ambiente GIS (*Geographic Information System*). Si è proceduto quindi alla schematizzazione numerica dei maggiori affluenti e alla definizione di nuove sollecitazioni di progetto, volte a riprodurre nelle sezioni strumentate del Po (Piacenza, Cremona,

Boretto, Borgoforte e Pontelagoscuro) gli idrogrammi sintetici con tempo di ritorno di cinquecento anni messi a punto dal DIIAR (Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale e del Rilevamento, DIIAR, 2001) del Politecnico di Milano. Il risultato ottenuto consiste in un nuovo modello matematico idraulico di tipo quasi-bidimensionale, il quale, attraverso una schematizzazione concettuale delle interazioni tra alveo principale, golene laterali e compartimenti esterni alle arginature, riproduce il comportamento idraulico in occasione di eventi di piena al limite della prevedibilità per tutte e tre le fasce fluviali considerate nel Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico redatto dall'AdBPo (Fasce A, B C, v. PAI, 1999).

Una volta messo a punto il modello, sono state condotte due tipologie di simulazioni. Una prima serie è stata dedicata alla definizione in maniera iterativa dei punti critici in cui gli argini maestri venivano sormontati e alla modellazione delle corrispondenti brecce arginali, decisive per una corretta riproduzione del fenomeno di esondazione all'esterno delle arginature nell'attuale configurazione; le arginature maestre vengono infatti comunemente progettate con il solo scopo di contenere le portate di piena in alveo, dunque un'eventuale tracimazione induce fenomeni erosivi che solitamente portano all'apertura di una breccia nel manufatto (rotta arginale).

Una successiva serie di simulazioni ha permesso di valutare l'evoluzione del fenomeno nell'ipotesi di un intervento di consolidamento degli argini maestri nei tratti critici (interessati dai sormonti) e quindi di rotta arginale impedita.

Il confronto dei risultati ottenuti ha evidenziato i benefici associati a una laminazione controllata dell'evento di piena preso in esame all'esterno delle arginature. In questo contesto il termine "controllata" è da intendersi associato al fenomeno di rotta arginale inibito per lo scenario ipotetico. I benefici di tale controllo sono stati riscontrati sia in termini di riduzione (a volte anche considerevole) dei volumi invasati e delle portate esondate, sia in termini di abbassamento dei tiranti attesi nei comparti idraulici allagati, sebbene la superficie totale delle aree allagate risulti maggiore nello scenario con argini inderodibili rispetto a quella nella configurazione con la formazione di brecce.

Un ulteriore studio ha riguardato la valutazione dei possibili danni attesi nei comparti di Fascia C in seguito al verificarsi di un evento al limite della prevedibilità come quello sopra descritto; concentrandosi prevalentemente

sull'analisi delle aree urbane e industriali (poiché ritenute le zone di maggior pregio da un punto di vista economico e sociale) degli otto comparti interessati da allagamento nella configurazione arginale attuale, si sono osservate due situazioni differenti: mentre per alcuni comparti non vi è una sostanziale differenza in termini di percentuale di area urbana e industriale allagata in caso di argini erodibili e inerodibili, in altri il beneficio derivante dal consolidamento degli argini appare consistente, ottenendo una notevole riduzione della superficie interessata dall'esondazione. Nel primo caso varrebbe la pena permettere la formazione delle brecce negli argini interessati da sormonto, in modo da ridurre il volume di acqua che transiterebbe oltre e proteggere così da esondazioni alcuni dei comparti più a valle, in cui un volume d'acqua minore comporterebbe una drastica riduzione delle aree allagate. Nel secondo caso si potrebbe considerare l'ipotesi di un consolidamento delle arginature maestre, in quanto ciò porterebbe a una notevole riduzione dei danni alle aree urbane considerate.

Ovviamente, per poter predisporre possibili strategie di riduzione del danno provocato dal passaggio di un'onda di piena con  $T_{rit}$  cinquecentennale sarebbero necessari ulteriori e più approfondite indagini, estendendo innanzitutto le analisi condotte sulle aree urbane ed industriali a tutti i comparti di Fascia C.

Per quanto riguarda il modello utilizzato nelle simulazioni del codice di calcolo HEC-RAS (sebbene l'aggiunta degli affluenti abbia reso lo scenario più realistico da un punto di vista numerico e concettuale, aumentando notevolmente l'attendibilità dei risultati), esso contiene ancora numerosi limiti, che potranno essere superati da studi futuri. Tra questi, appare importante sottolineare che l'attuale schematizzazione dell'asta fluviale non consente la simulazione delle reali dinamiche di allagamento dei comparti idraulici di Fascia C conseguenti alla tracimazione delle arginature maestre, ma schematizza il fenomeno di allagamento attraverso la simulazione di una serie di istanti idrostatici: tutti i punti alla stessa quota vengono allagati contemporaneamente, sia che si tratti di un punto in prossimità dell'argine maestro, sia che il punto si trovi all'estremità opposta del comparto. Per poter avere una visione più veritiera dell'allagamento dei comparti, sarebbe necessario conoscere più nel dettaglio le modalità di propagazione dell'onda nelle aree considerate, data la loro morfologia. La definizione di tali dinamiche, seppur riproducibili esclusivamente mediante il ricorso a modellistica a maggior complessità (ad es. modelli puramente

bidimensionali), richiede tuttavia la conoscenza di opportune condizioni al contorno (ad es. portate esondate attraverso l'ipotetica breccia arginale) che il modello messo a punto in tale attività di tesi è in grado di fornire.

Lo strumento modellistico ampliato nel presente lavoro di tesi, nonché le metodologie predisposte per una prima rapida valutazione dell'esposizione al rischio idraulico dei compartimenti della Fascia C saranno alla base delle future attività di studio. Tali indagini, estese a tutti le aree allagabili del Po e dei suoi principali affluenti appaiono fondamentali per poter delineare concretamente, a scala di bacino, le strategie ottimali di laminazione controllata degli eventi al limite della prevedibilità lungo il Fiume Po.

### 3. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- AdBPo – DISTART, Attività di studio, ricerca e supporto scientifico nell'ambito del "PROGETTO STRATEGICO PER IL MIGLIORAMENTO DELLE CONDIZIONI DI SICUREZZA IDRAULICA DEI TERRITORI DI PIANURA LUNGO L'ASTA PRINCIPALE DEL FIUME PO", Parma, 2008.
- AdBPo, PIANO STRALCIO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO (PAI) – INTERVENTI SULLA RETE IDROGRAFICA E SUI VERSANTI – Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica, Parma, 2001.
- AdBPo, (PAI) - INTERVENTI SULLA RETE IDROGRAFICA E SUI VERSANTI, Relazione generale, Parma, 1999.
- AdBPo, (PAI) - INTERVENTI SULLA RETE IDROGRAFICA E SUI VERSANTI – Secondo Piano Stralcio delle Fasce Fluviali, Relazione generale, Parma, 1999.
- APAT (Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici), LA REALIZZAZIONE IN ITALIA DEL PROGETTO EUROPEO *CORINE LAND COVER 2000*, Roma, 2005
- Brath A., Di Baldassarre G., MODELLI MATEMATICI PER L'ANALISI DELLA SICUREZZA IDRAULICA DEL TERRITORIO, *L'Acqua*, 6, 39-48, 2006
- D'Andrea, D., DIFESA IDRAULICA DELLE AREE DI PIANURA DALLE PIENE AL LIMITE DELLA PREVEDIBILITÀ: ASTA MEDIO-INFERIORE DEL FIUME PO, Tesi di Laurea Specialistica in Ingegneria Civile, Università di Bologna, AA 2008/2009
- De Stales, L., MODALITÀ DI FORMAZIONE DELLE PIENE LUNGO L'ASTA DEL PO, Tesi di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, Università di Bologna, AA 2006/2007
- Galletti, L., PREDISPOSIZIONE DI UN MODELLO NUMERICO IDRAULICO QUASI-BIDIMENSIONALE DEL CORSO MEDIO-INFERIORE DEL FIUME PO SULLA BASE DI UN RILIEVO TOPOGRAFICO LASER SCANNING, Tesi di Laurea Specialistica in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, Università di Bologna, AA 2005/2006.

- Govi M., Turitto O., CASISTICA STORICA SUI PROCESSI DI INTERAZIONE DELLE CORRENTI DI PIENA DEL PO CON ARGINATURE E CON ELEMENTI MORFOTOPOGRAFICI DEL TERRITORIO ADIACENTE, Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere, 2000.
- Hashimoto R., Stedinger J.R. and Loucks D.P., RELIABILITY, RESILIENCY, AND VULNERABILITY CRITERIA FOR WATER RESOURCE SYSTEM PERFORMANCE EVALUATION, Water Resources Research, 18, 14–20, 1982.
- HEC (Hydrologic Engineering Center), HEC–RAS River Analysis System - USER’S MANUAL, Version 4.1, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California, 2010.
- ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), ANALISI DEI CAMBIAMENTI DELLA COPERTURA ED USO DEL SUOLO IN ITALIA NEL PERIODO 2000-2006, Roma, 2010.
- Majone M., Tomirotti M., EVENTI DI PIENA IMPREVEDIBILI, XXX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche – IDRA2006.
- Pagliccia, G., ASTA MEDIO-INFERIORE DEL FIUME PO: MODELLO MATEMATICO PER LA VALUTAZIONE DELLE CONDIZIONI DI PERICOLOSITÀ IDRAULICA DELLE AREE DI PIANURA, Tesi di Laurea Specialistica in Ingegneria per l’Ambiente e il Territorio, Università di Bologna, AA 2009/2010
- Vis M., Klijn F., De Bruijn K.M., Van Buuren M., RESILIENCE STRATEGIES FOR FLOOD RISK MANAGEMENT IN THE NETHERLANDS, International Journal of River Basin Management, 1: 1, 33 — 40, 2003.

Siti internet consultati:

AdBPo (Autorità di bacino del fiume Po), [www.adbpo.it](http://www.adbpo.it). Sito ufficiale.

AIPO (Agenzia Interregionale per il fiume Po), [www.agenziapo.it](http://www.agenziapo.it). Sito ufficiale.

ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale),  
[www.isprambiente.gov.it](http://www.isprambiente.gov.it). Sito ufficiale.

[www.esridipendente.it/Manuale%20ESRIDipendente.pdf](http://www.esridipendente.it/Manuale%20ESRIDipendente.pdf).

<http://it.wikipedia.org/wiki/Po>

<http://www.visitporiver.it/Il-Fiume-Po/page/147/Fiume-Po.html>

<http://www.ilfiumepo.net/>

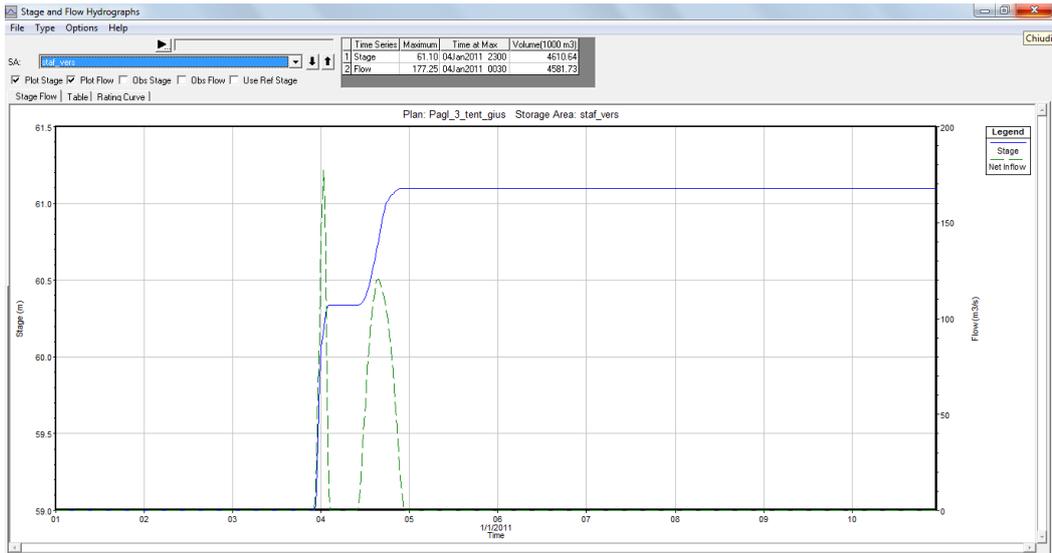
<http://www.dipartimentodibiologiabari.it/media/materiale/7q3T2xI0hVWAFehpEgTlk5L6sDtAJ3kE/Cos%27e%27%20il%20GIS.pdf>



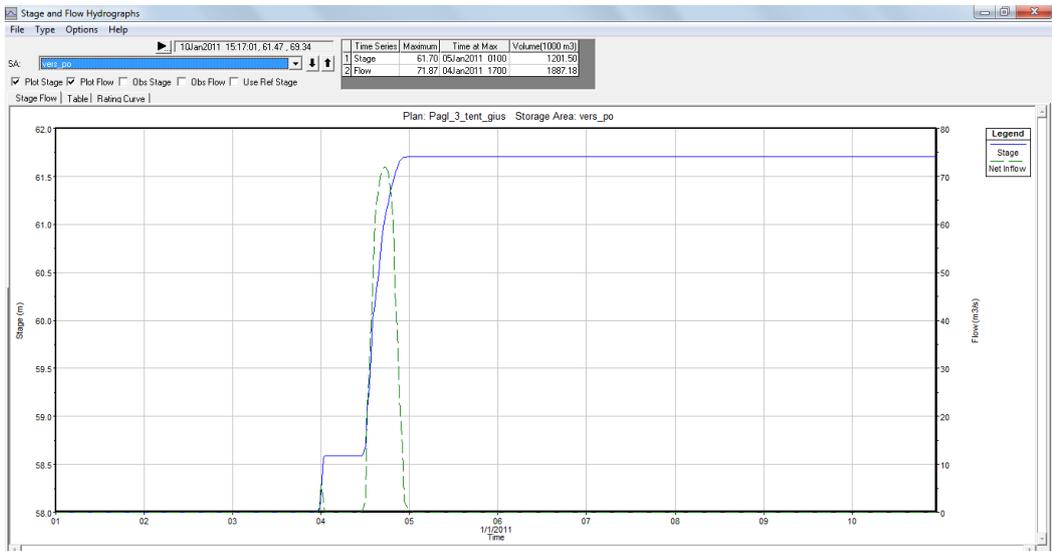
## **APPENDICE A**

*Stage and Flow Hydrograph dei comparti idraulici soggetti ad allagamento nella configurazione con argini erodibili*

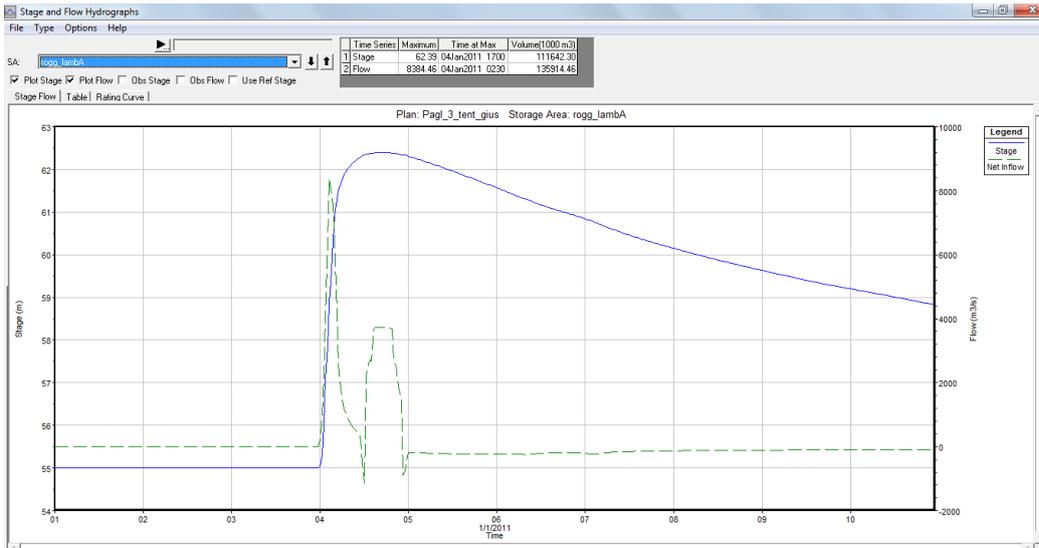




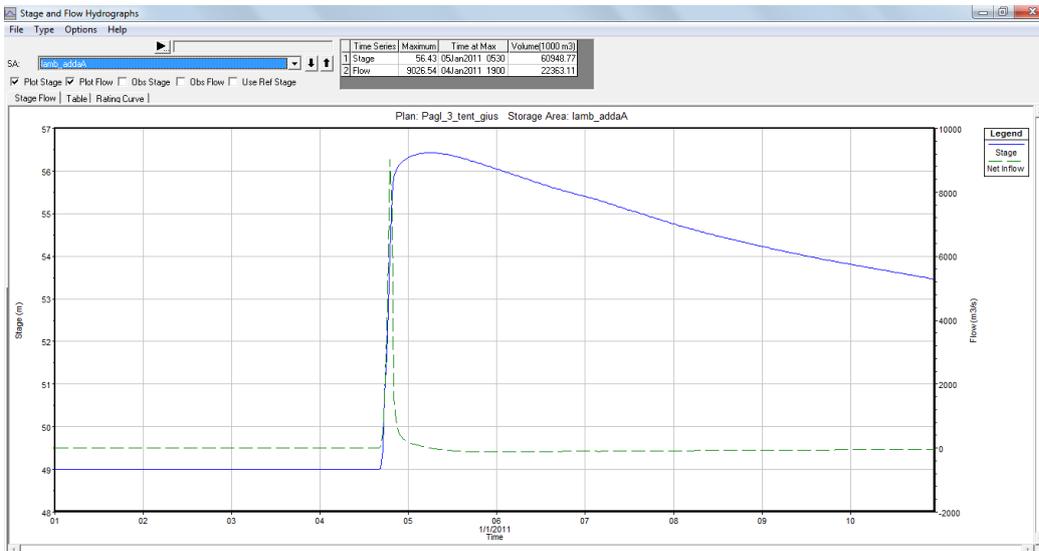
**Grafico 48: Andamento nel tempo di tirante e portata del comparto n. 1 (staf\_vers) con argini erodibili**



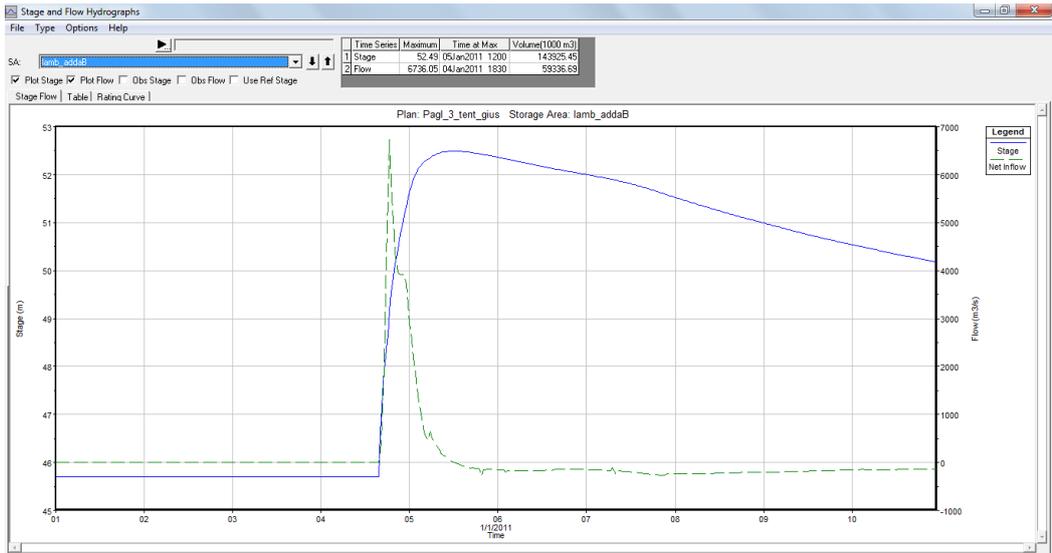
**Grafico 49: Andamento nel tempo di tirante e portata del comparto n. 2 (vers\_po) con argini erodibili**



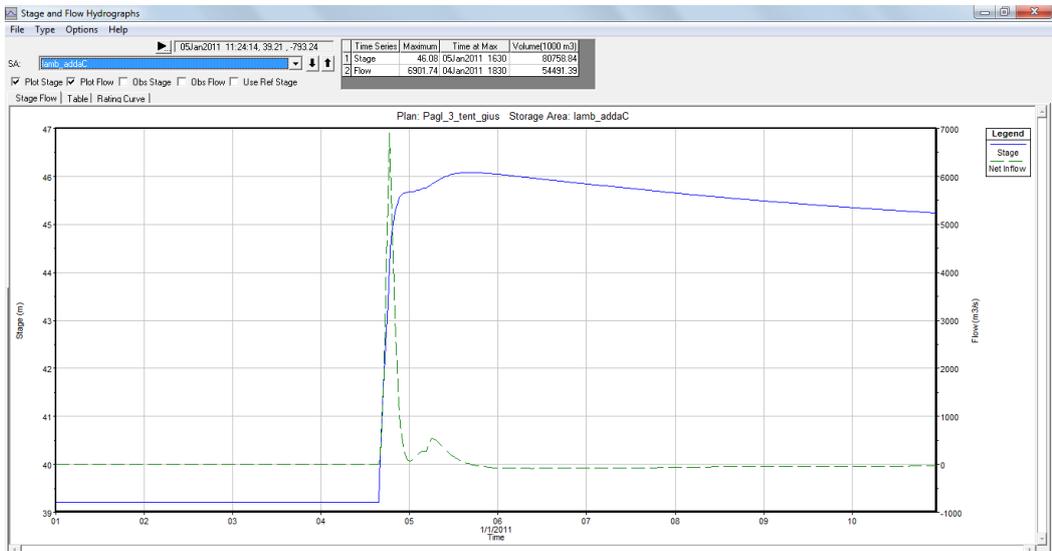
**Grafico 50: Andamento nel tempo di tirante e portata del comparto n. 3 (rogg\_lambda) con argini erodibili**



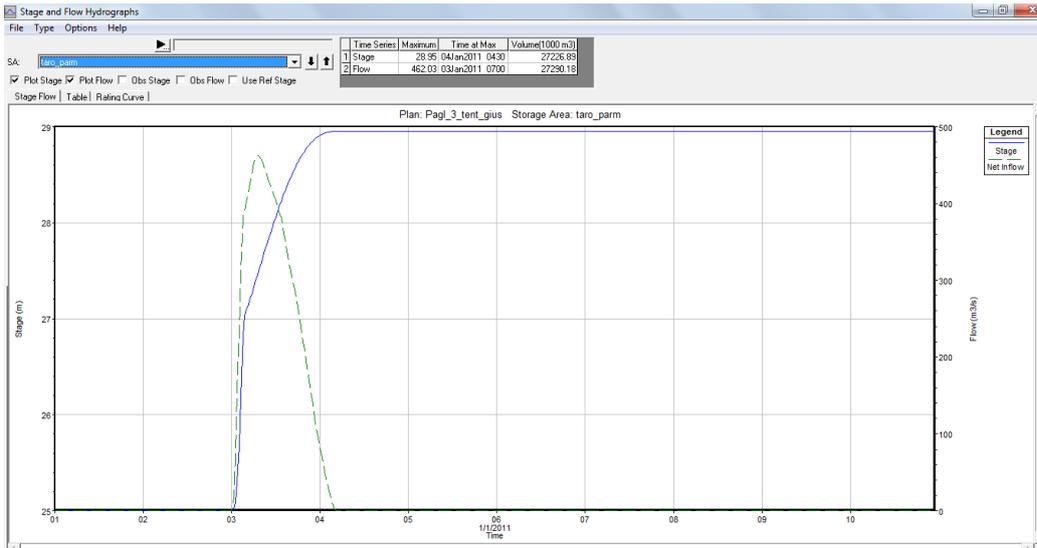
**Grafico 51: Andamento nel tempo di tirante e portata del comparto n. 6 (lamb\_addaA) con argini erodibili**



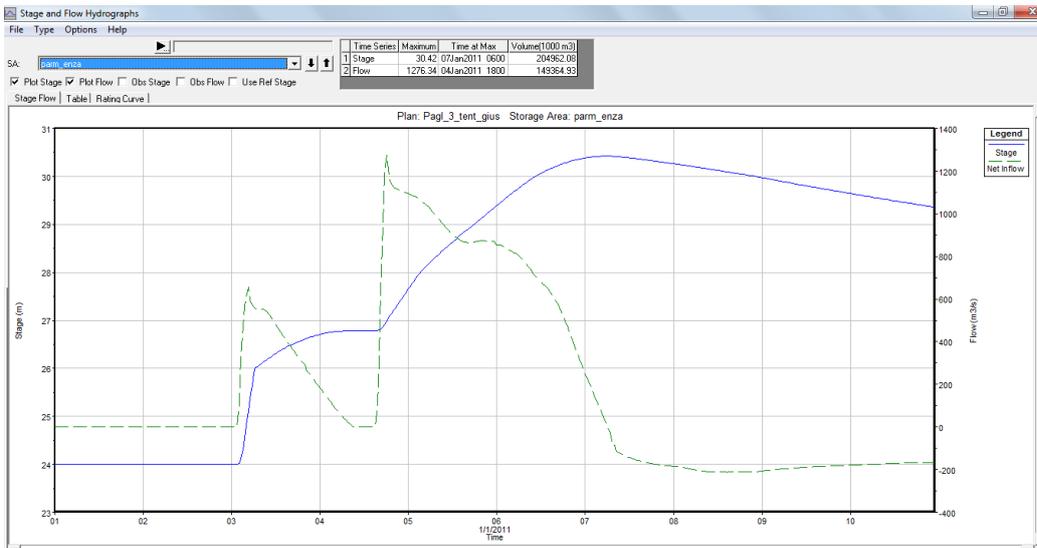
**Grafico 52: Andamento nel tempo di tirante e portata del comparto n. 8 (lamb\_addaB) con argini erodibili**



**Grafico 53: Andamento nel tempo di tirante e portata del comparto n. 10 (lamb\_addaC) con argini erodibili**



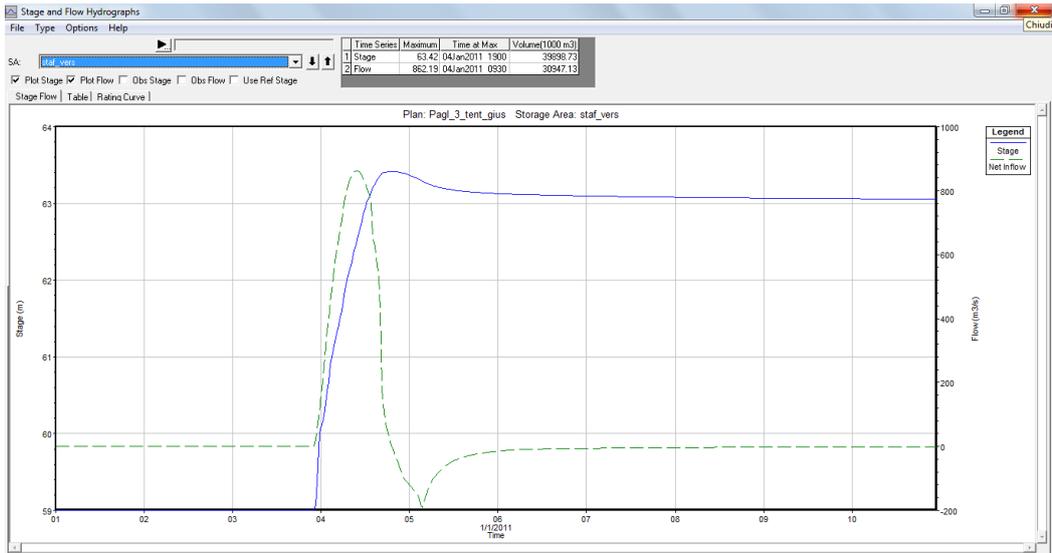
**Gráfico 54: Andamento nel tempo di tirante e portata del comparto n. 18 (taro\_parm) con argini erodibili**



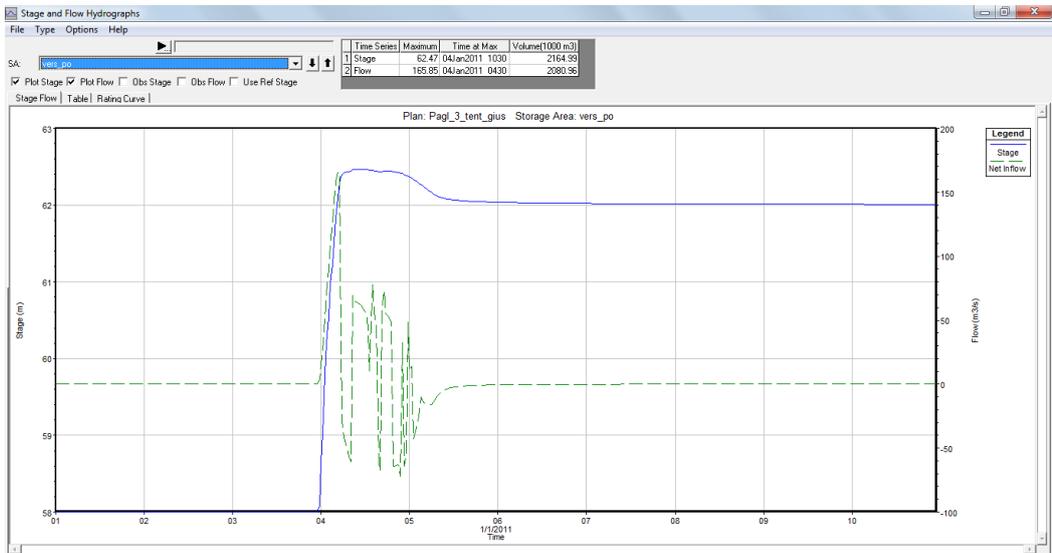
**Gráfico 55: Andamento nel tempo di tirante e portata del comparto n. 20 (parm\_enza) con argini erodibili**

*Stage and Flow Hydrograph dei comparti idraulici soggetti ad allagamento nella configurazione con argini inerodibili*

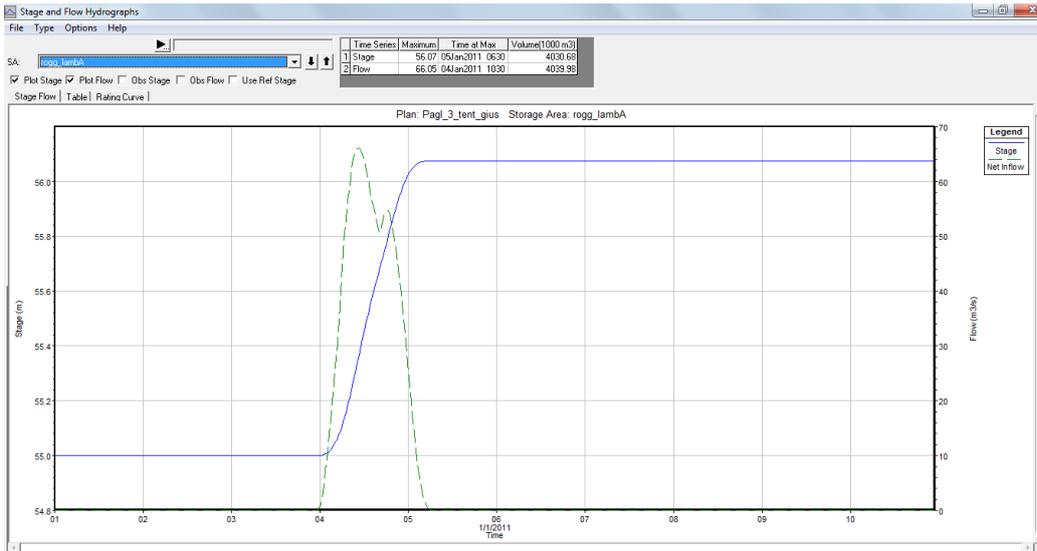




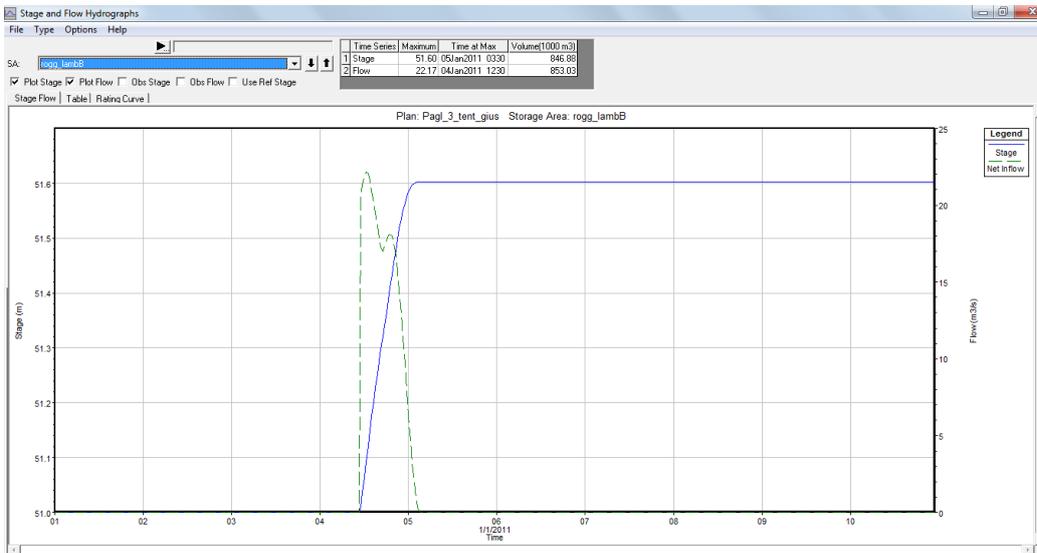
**Grafico 56: Andamento nel tempo di tirante e portata del comparto n. 1 (staf\_vers) con argini inerodibili**



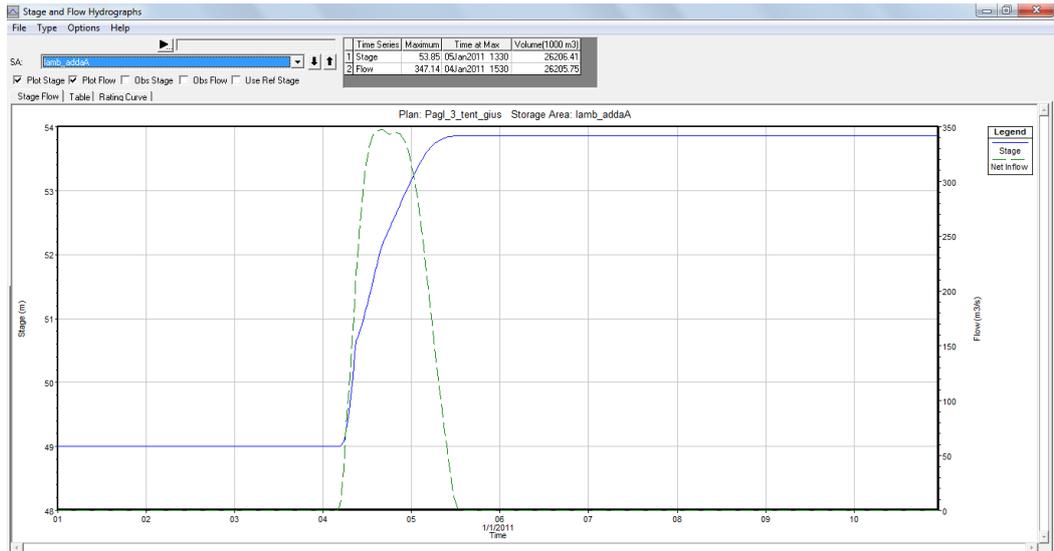
**Grafico 57: Andamento nel tempo di tirante e portata del comparto n. 2 (vers\_po) con argini inerodibili**



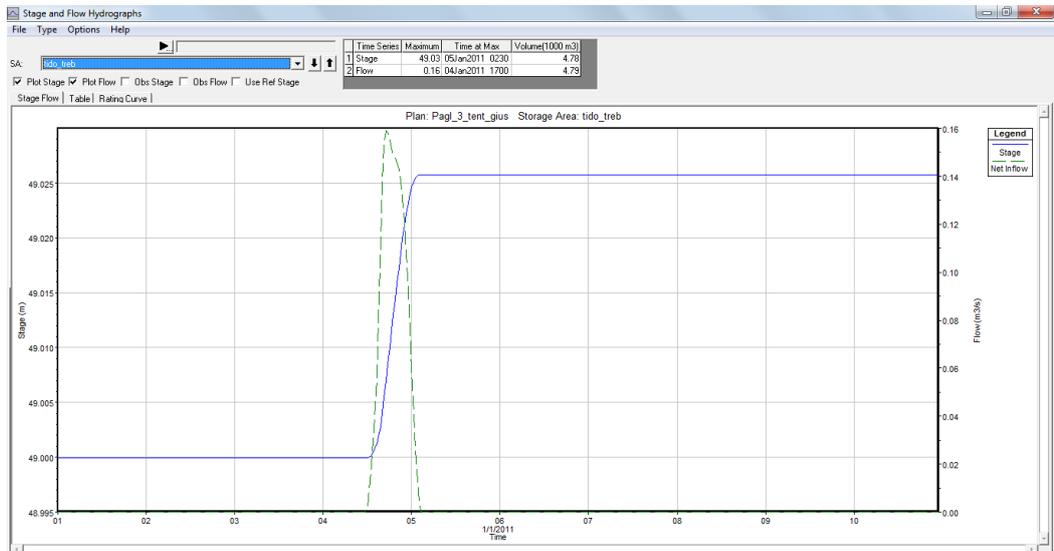
**Gráfico 58: Andamento nel tempo di tirante e portata del comparto n. 3 (rogg\_lambA) con argini inerodibili**



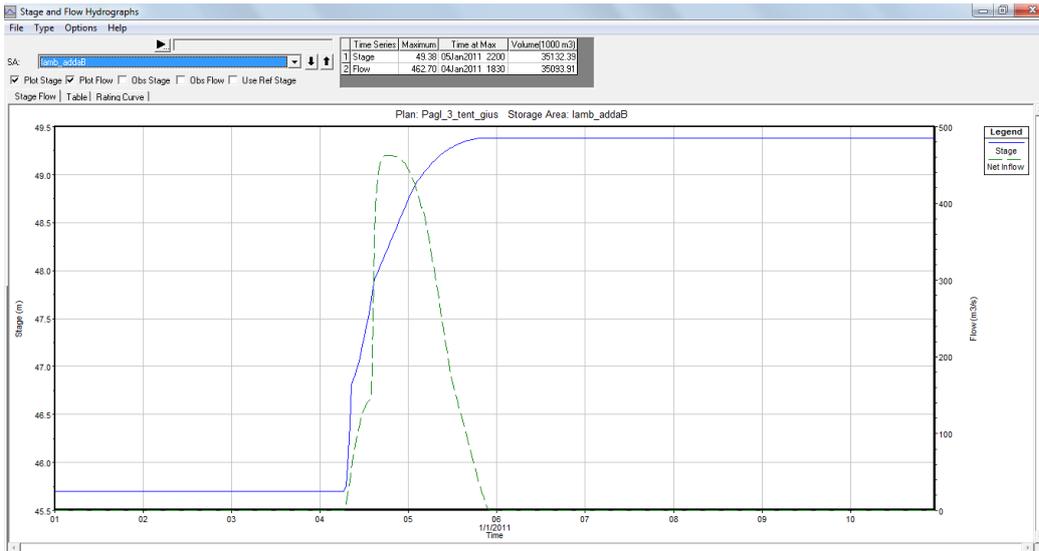
**Gráfico 59: Andamento nel tempo di tirante e portata del comparto n. 4 (rogg\_lambB) con argini inerodibili**



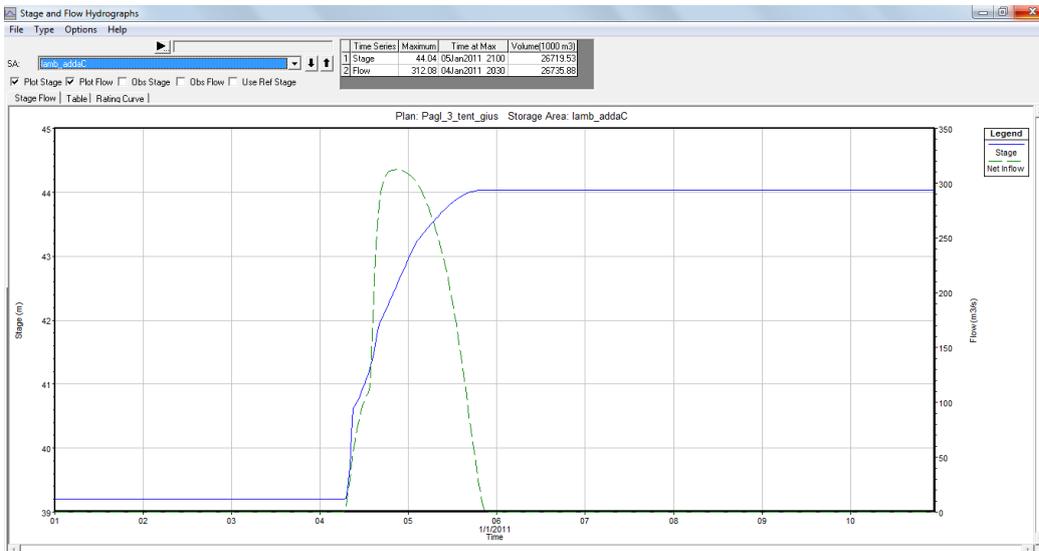
**Grafico 60: Andamento nel tempo di tirante e portata del comparto n. 6 (lamb\_addaA) con argini inerodibili**



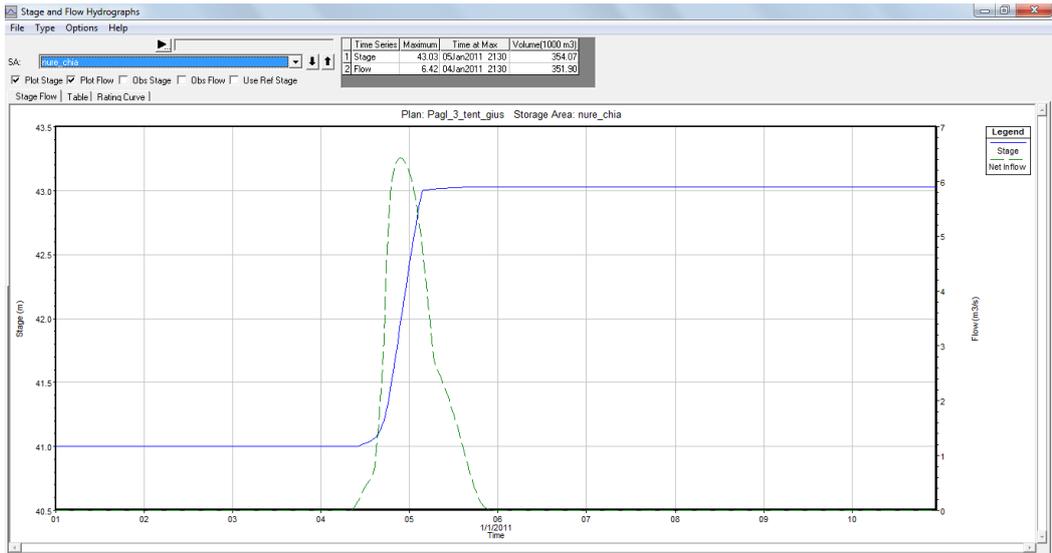
**Grafico 61: Andamento nel tempo di tirante e portata del comparto n. 7 (tido\_treb) con argini inerodibili**



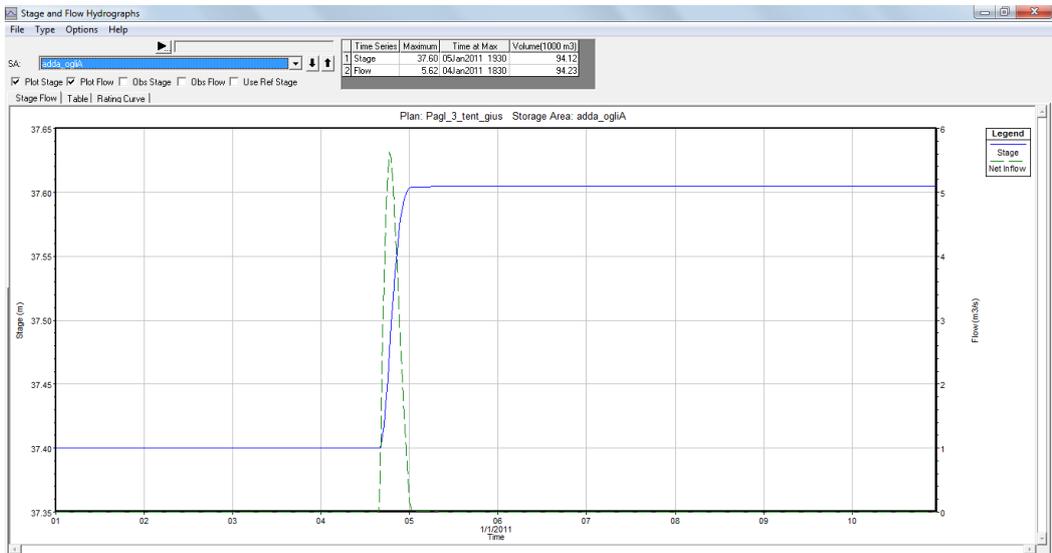
**Grafico 62: Andamento nel tempo di tirante e portata del comparto n. 8 (lamb\_addaB) con argini inerodibili**



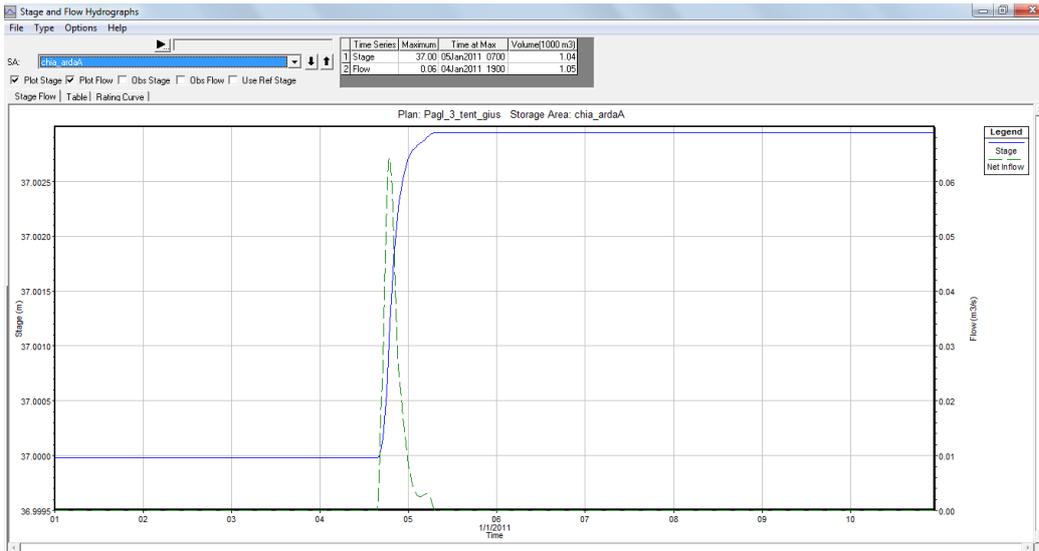
**Grafico 63: Andamento nel tempo di tirante e portata del comparto n. 10 (lamb\_addaC) con argini inerodibili**



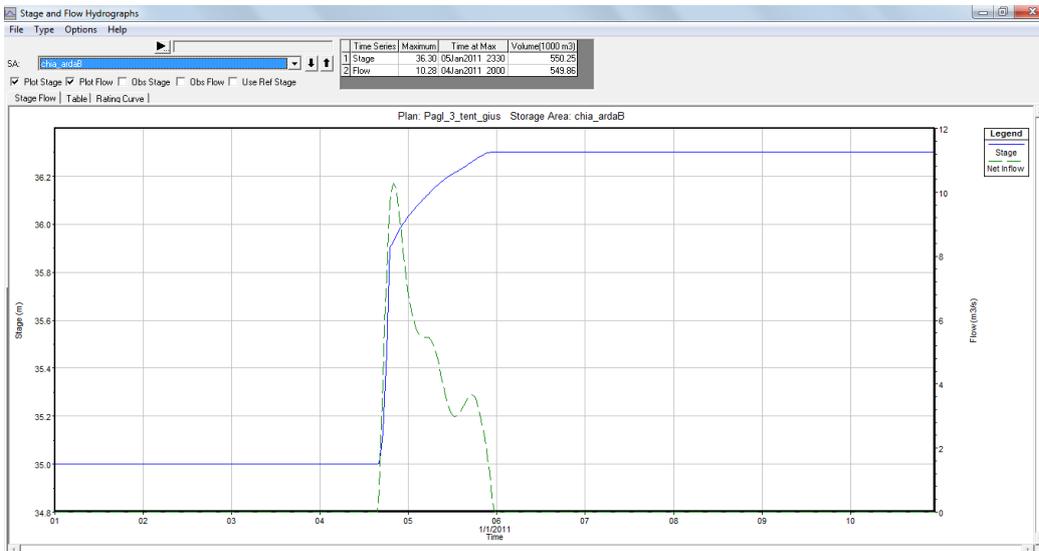
**Grafico 64: Andamento nel tempo di tirante e portata del comparto n. 11 (nure\_chia) con argini inerodibili**



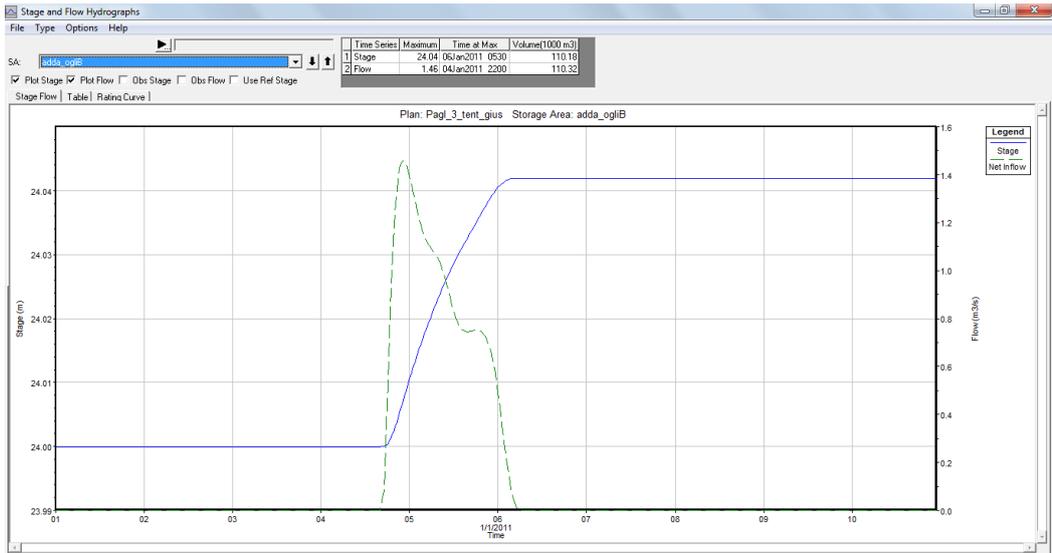
**Grafico 65: Andamento nel tempo di tirante e portata del comparto n. 12 (adda\_ogliA) con argini inerodibili**



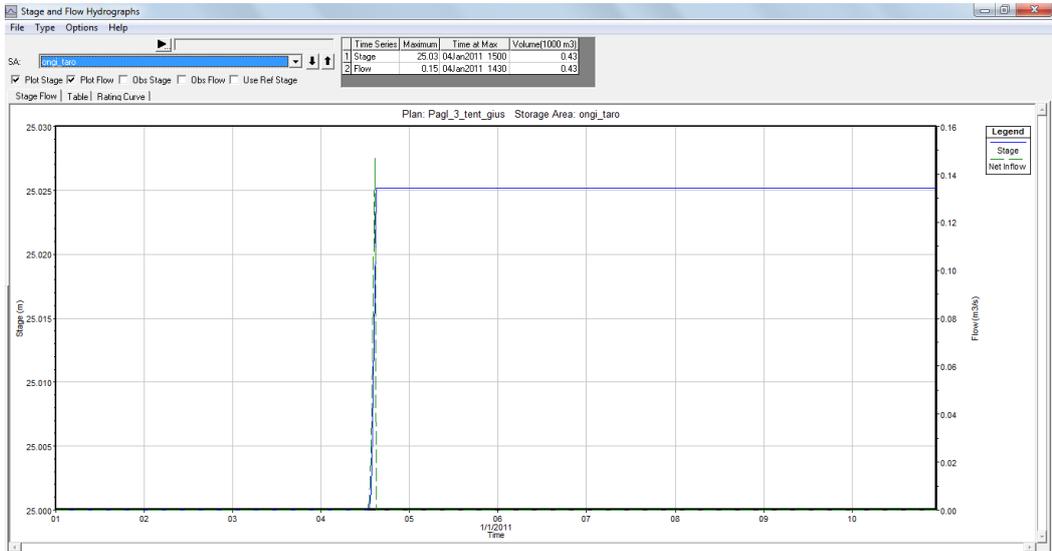
**Grafico 66: Andamento nel tempo di tirante e portata del comparto n. 13 (chia\_ardaA) con argini inerodibili**



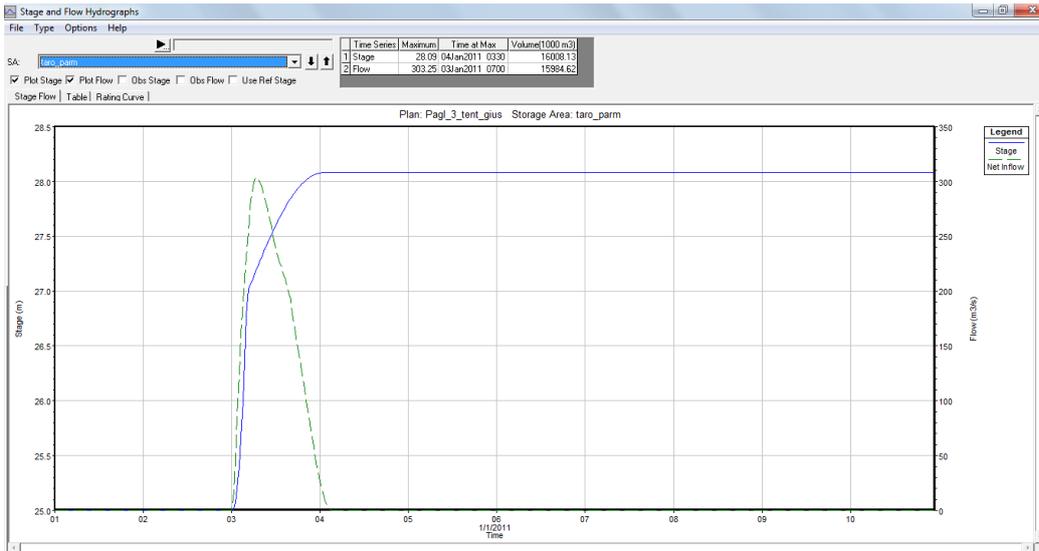
**Grafico 67: Andamento nel tempo di tirante e portata del comparto n. 14 (chia\_ardaB) con argini inerodibili**



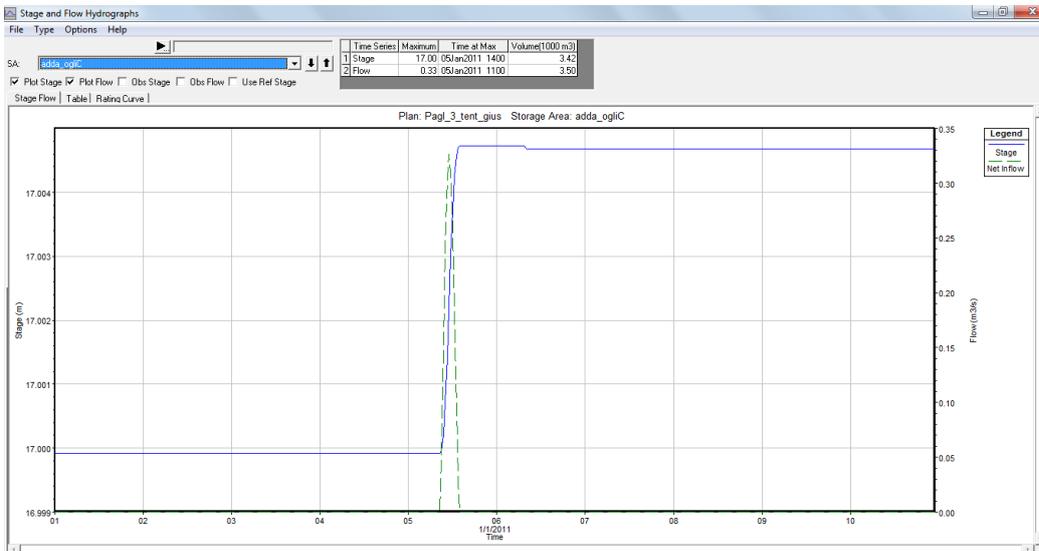
**Grafico 68: Andamento nel tempo di tirante e portata del comparto n. 16 (adda\_ogliB) con argini inerodibili**



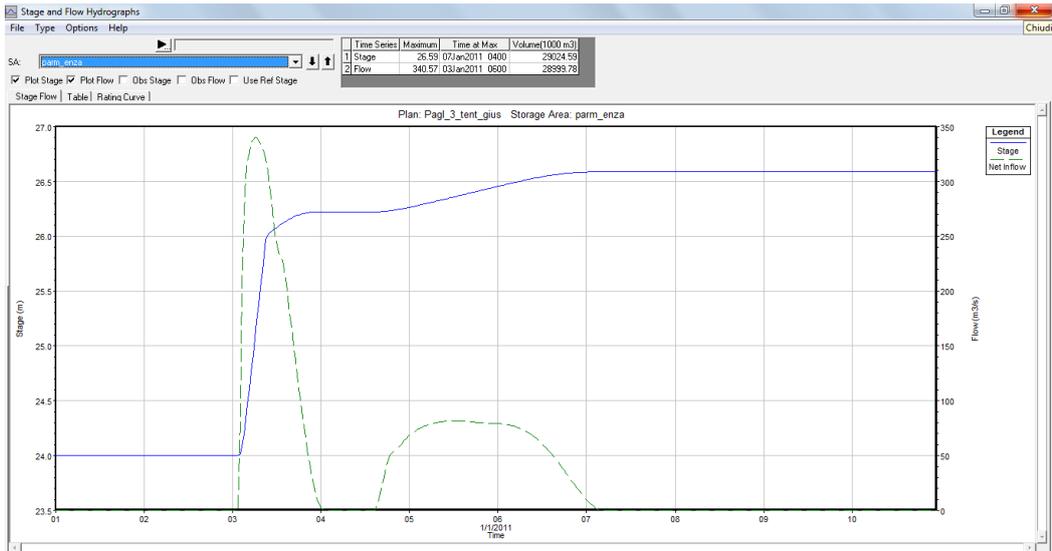
**Grafico 69: Andamento nel tempo di tirante e portata del comparto n. 17 (ongi\_taro) con argini inerodibili**



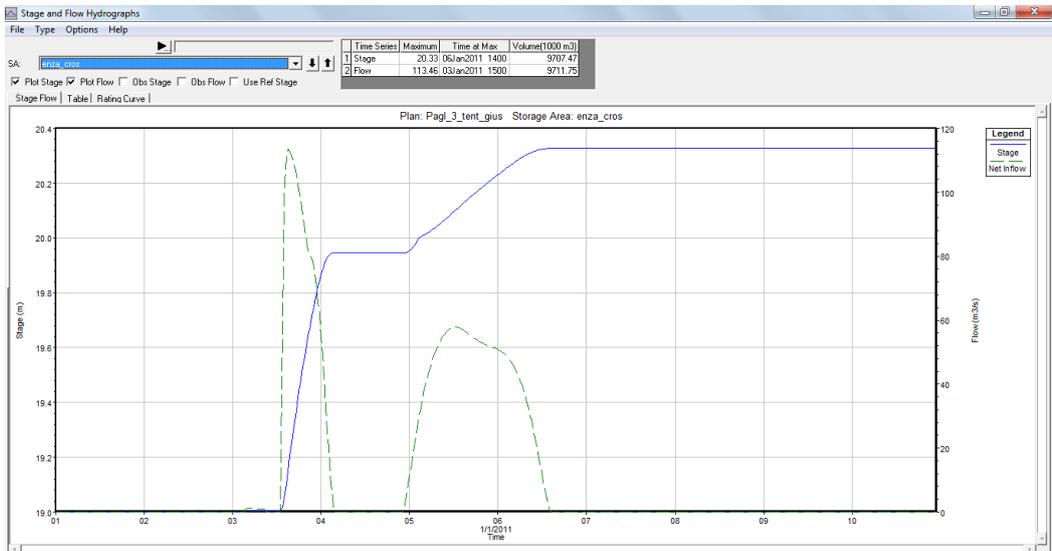
**Grafico 70: Andamento nel tempo di tirante e portata del comparto n. 18 (taro\_parm) con argini inerodibili**



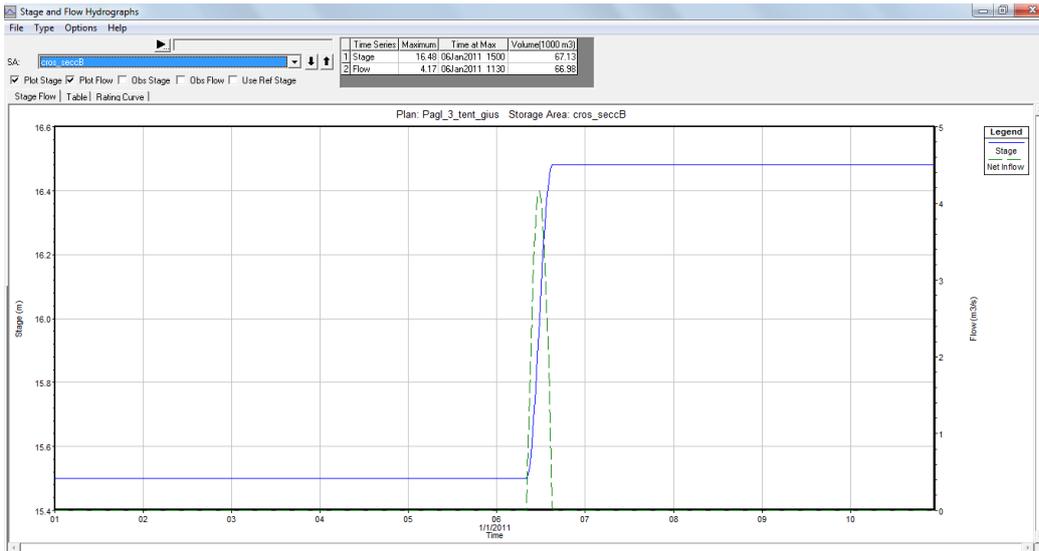
**Grafico 71: Andamento nel tempo di tirante e portata del comparto n. 19 (adda\_ogliC) con argini inerodibili**



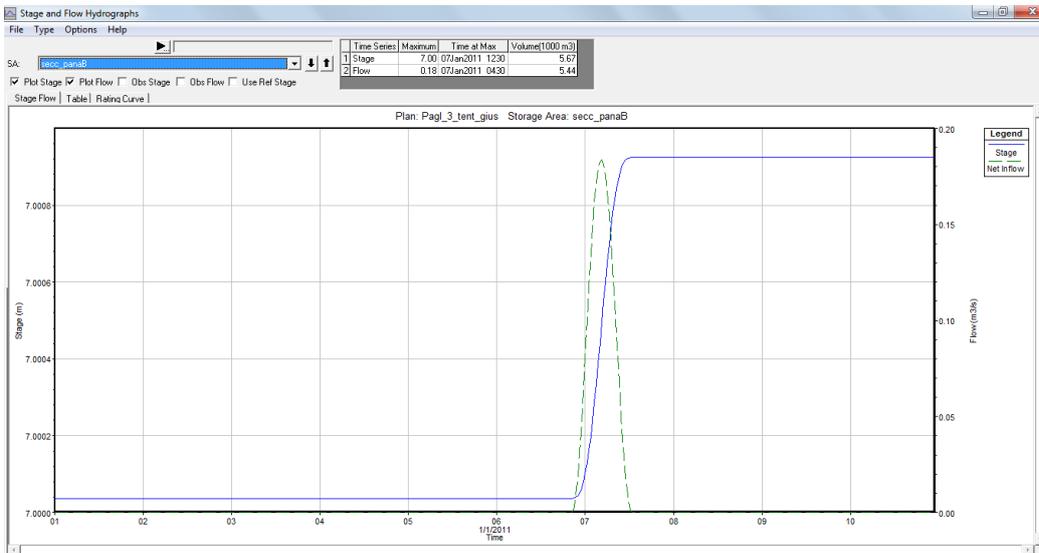
**Grafico 72: Andamento nel tempo di tirante e portata del comparto n. 20 (parm\_enza) con argini inerodibili**



**Grafico 73: Andamento nel tempo di tirante e portata del comparto n. 21 (enza\_cros) con argini inerodibili**



**Gráfico 74: Andamento nel tempo di tirante e portata del comparto n. 25 (cros\_secB) con argini inerodibili**



**Gráfico 75: Andamento nel tempo di tirante e portata del comparto n. 29 (secc\_panaB) con argini inerodibili**

## **APPENDICE B**

*CLC2006: Tabella delle aree relative alle singole categorie di copertura del suolo per ogni comparto idraulico di Fascia C*



ID comparto	nome comparto	superficie totale	urbano	industriale - infrastrutture	prato stabile	colture	aree naturali	aree umide
		[ha]	[ha]	[ha]	[ha]	[ha]	[ha]	[ha]
1	staf_vers	5527.00	343.00	19.00	0.00	5099.00	63.00	3.00
2	vers_po	351.00	7.00	10.00	0.00	334.00	0.00	0.00
3	rogg_lambA	3088.00	96.00	0.00	0.00	2631.00	280.00	81.00
4	rogg_lambB	4613.00	202.00	0.00	0.00	3772.00	568.00	71.00
5	po_tido	810.00	0.00	23.00	0.00	787.00	0.00	0.00
6	lamb_addaA	1567.00	23.00	0.00	0.00	1339.00	189.00	16.00
7	tido_treb	1740.00	62.00	0.00	0.00	1632.00	45.00	1.00
8	lamb_addaB	3923.00	323.00	49.00	0.00	3496.00	26.00	29.00
9	treb_nure	2566.00	254.00	385.00	0.00	1924.00	3.00	0.00
10	lamb_addaC	4413.00	207.00	0.00	0.00	3688.00	331.00	187.00
11	nure_chia	1416.00	66.00	0.00	0.00	1330.00	0.00	20.00
12	adda_ogliA	2171.00	144.00	65.00	0.00	1686.00	114.00	162.00
13	chia_ardaA	3870.00	224.00	65.00	0.00	3581.00	0.00	0.00
14	chia_ardaB	3876.00	38.00	0.00	0.00	3796.00	42.00	0.00
15	arda_ongi	480.00	0.00	16.00	0.00	464.00	0.00	0.00
16	adda_ogliB	14494.00	770.00	78.00	0.00	13360.00	207.00	79.00
17	ongi_taro	7804.00	80.00	26.00	0.00	7623.00	75.00	0.00
18	taro_parm	8986.00	297.00	181.00	0.00	8499.00	9.00	0.00
19	adda_ogliC	28103.00	1761.00	381.00	0.00	24898.00	844.00	219.00
20	parm_enza	7021.00	100.00	225.00	0.00	6696.00	0.00	0.00
21	enza_cros	10005.00	370.00	178.00	0.00	9329.00	128.00	0.00
22	cros_seccA	26869.00	1504.00	485.00	0.00	24301.00	579.00	0.00
23	ogli_mincA	6964.00	104.00	0.00	23.00	6326.00	327.00	184.00
24	ogli_mincB	5288.00	158.00	127.00	0.00	4662.00	215.00	126.00
25	cros_seccB	8060.00	328.00	308.00	0.00	7403.00	0.00	21.00
26	cros_seccC	37703.00	1951.00	405.00	0.00	35137.00	70.00	140.00
27	ogli_mincC	2883.00	94.00	62.00	0.00	2281.00	225.00	221.00
28	secc_panaA	43033.00	2123.00	1175.00	0.00	39579.00	91.00	65.00
29	secc_panaB	47596.00	1188.00	301.00	0.00	45642.00	61.00	404.00
30	pana_poA	51156.00	1865.00	559.00	0.00	48229.00	81.00	422.00
31	pana_poB	264975.00	7296.00	1864.00	0.00	219371.00	3831.00	32613.00

**Tabella 23: Aree (in ettari) relative ad ogni categoria di uso del suolo**

ID comparto	nome comparto	superficie totale	urbano	industriale - infrastrutture	prato stabile	colture	aree naturali	aree umide
		[ha]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
1	staf_vers	5527.00	6.21	0.34	0.00	92.26	1.14	0.05
2	vers_po	351.00	1.99	2.85	0.00	95.16	0.00	0.00
3	rogg_lambA	3088.00	3.11	0.00	0.00	85.20	9.07	2.62
4	rogg_lambB	4613.00	4.38	0.00	0.00	81.77	12.31	1.54
5	po_tido	810.00	0.00	2.84	0.00	97.16	0.00	0.00
6	lamb_addaA	1567.00	1.47	0.00	0.00	85.45	12.06	1.02
7	tido_treb	1740.00	3.56	0.00	0.00	93.79	2.59	0.06
8	lamb_addaB	3923.00	8.23	1.25	0.00	89.12	0.66	0.74
9	treb_nure	2566.00	9.90	15.00	0.00	74.98	0.12	0.00
10	lamb_addaC	4413.00	4.69	0.00	0.00	83.57	7.50	4.24
11	nure_chia	1416.00	4.66	0.00	0.00	93.93	0.00	1.41
12	adda_ogliA	2171.00	6.63	2.99	0.00	77.66	5.25	7.46
13	chia_ardaA	3870.00	5.79	1.68	0.00	92.53	0.00	0.00
14	chia_ardaB	3876.00	0.98	0.00	0.00	97.94	1.08	0.00
15	arda_ongi	480.00	0.00	3.33	0.00	96.67	0.00	0.00
16	adda_ogliB	14494.00	5.31	0.54	0.00	92.18	1.43	0.55
17	ongi_taro	7804.00	1.03	0.33	0.00	97.68	0.96	0.00
18	taro_parm	8986.00	3.31	2.01	0.00	94.58	0.10	0.00
19	adda_ogliC	28103.00	6.27	1.36	0.00	88.60	3.00	0.78
20	parm_enza	7021.00	1.42	3.20	0.00	95.37	0.00	0.00
21	enza_cros	10005.00	3.70	1.78	0.00	93.24	1.28	0.00
22	cros_seccA	26869.00	5.60	1.81	0.00	90.44	2.15	0.00
23	ogli_mincA	6964.00	1.49	0.00	0.33	90.84	4.70	2.64
24	ogli_mincB	5288.00	2.99	2.40	0.00	88.16	4.07	2.38
25	cros_seccB	8060.00	4.07	3.82	0.00	91.85	0.00	0.26
26	cros_seccC	37703.00	5.17	1.07	0.00	93.19	0.19	0.37
27	ogli_mincC	2883.00	3.26	2.15	0.00	79.12	7.80	7.67
28	secc_panaA	43033.00	4.93	2.73	0.00	91.97	0.21	0.15
29	secc_panaB	47596.00	2.50	0.63	0.00	95.89	0.13	0.85
30	pana_poA	51156.00	3.65	1.09	0.00	94.28	0.16	0.82
31	pana_poB	264975.00	2.75	0.70	0.00	82.79	1.45	12.31

**Tabella 24: Aree (in % rispetto all'area totale di ogni comparto) relative ad ogni categoria di uso del suolo**

## **APPENDICE C**

*CLC2006: Rappresentazione delle aree urbane e industriali per i comparti presi in esame*



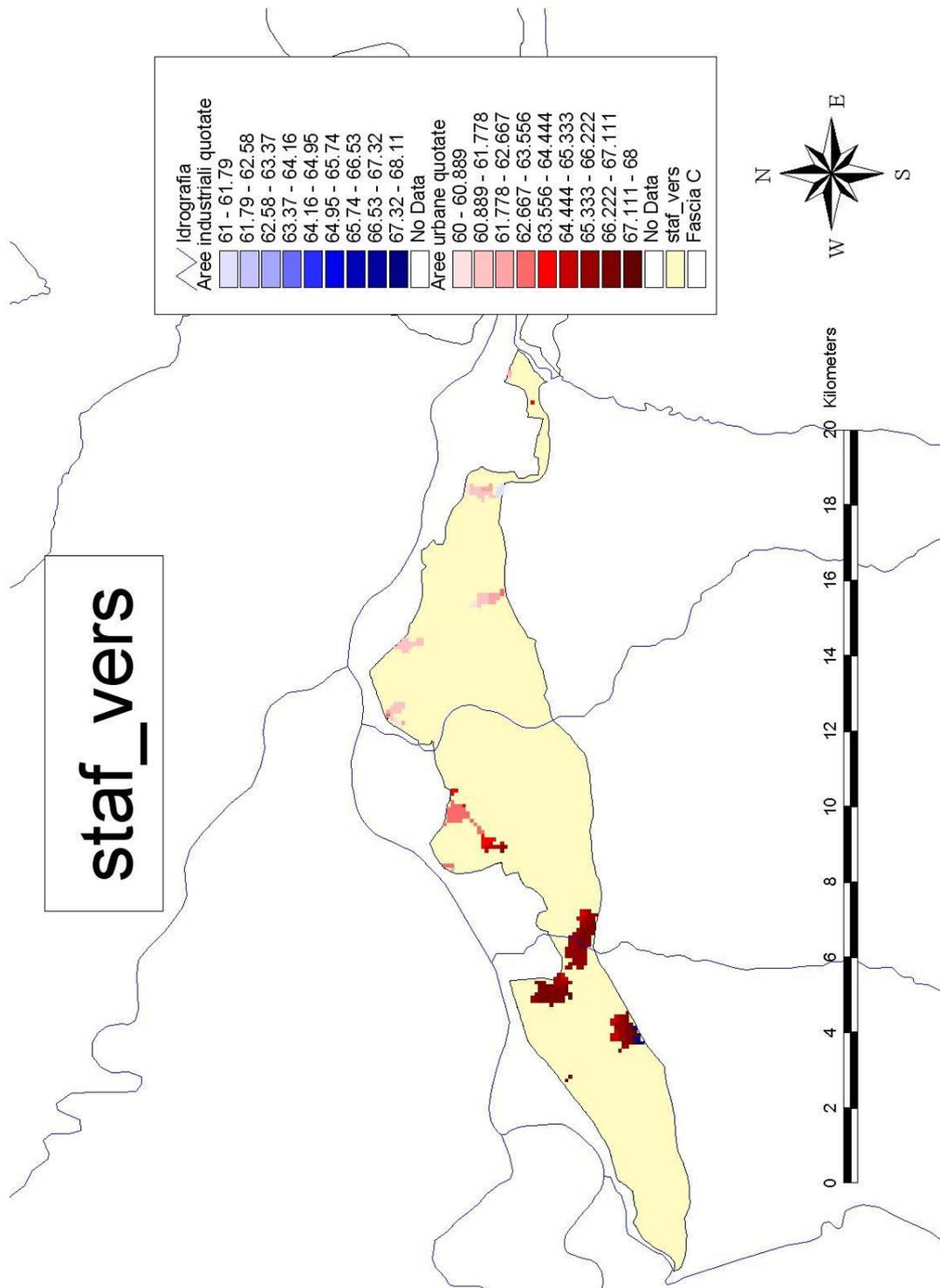
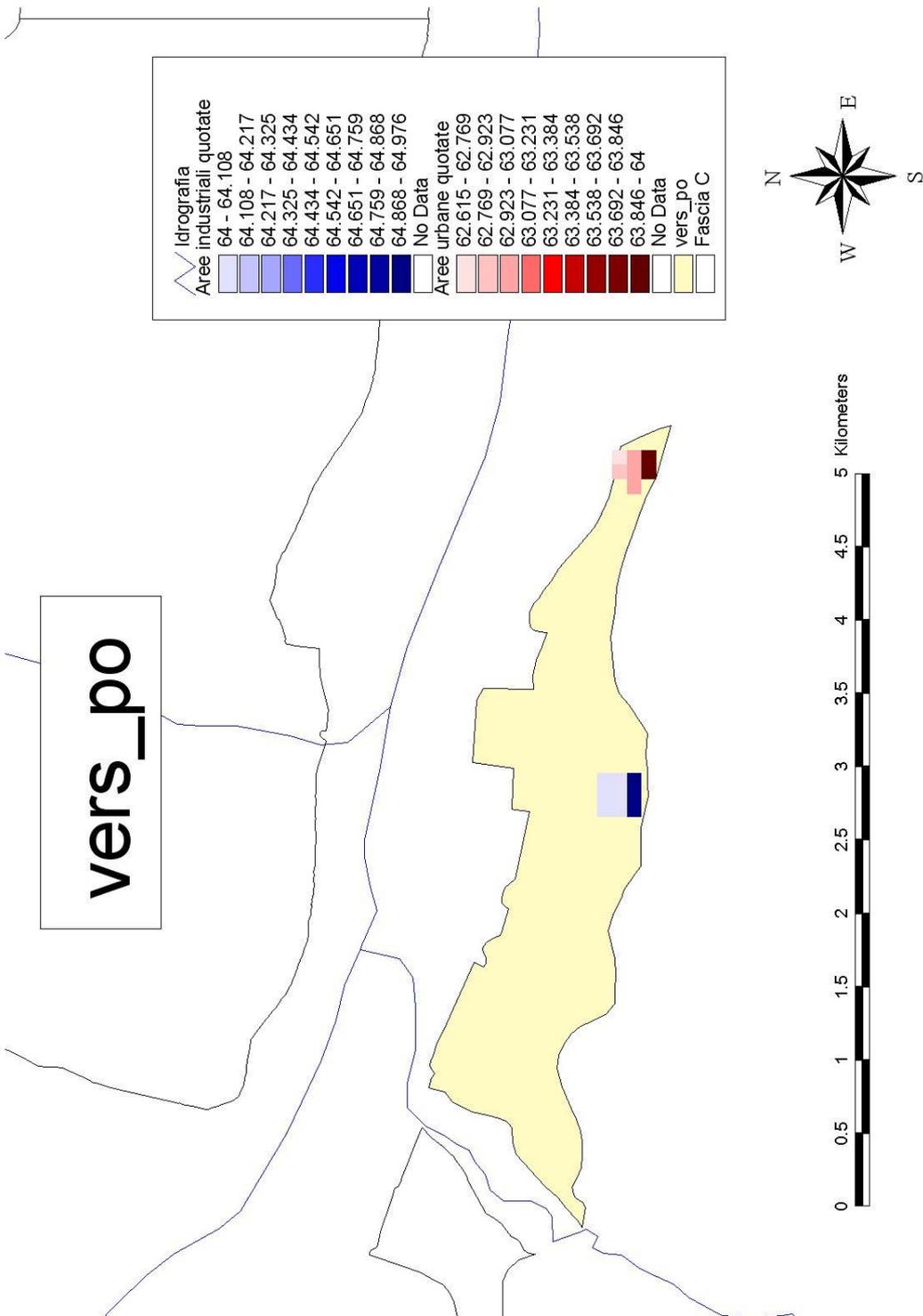
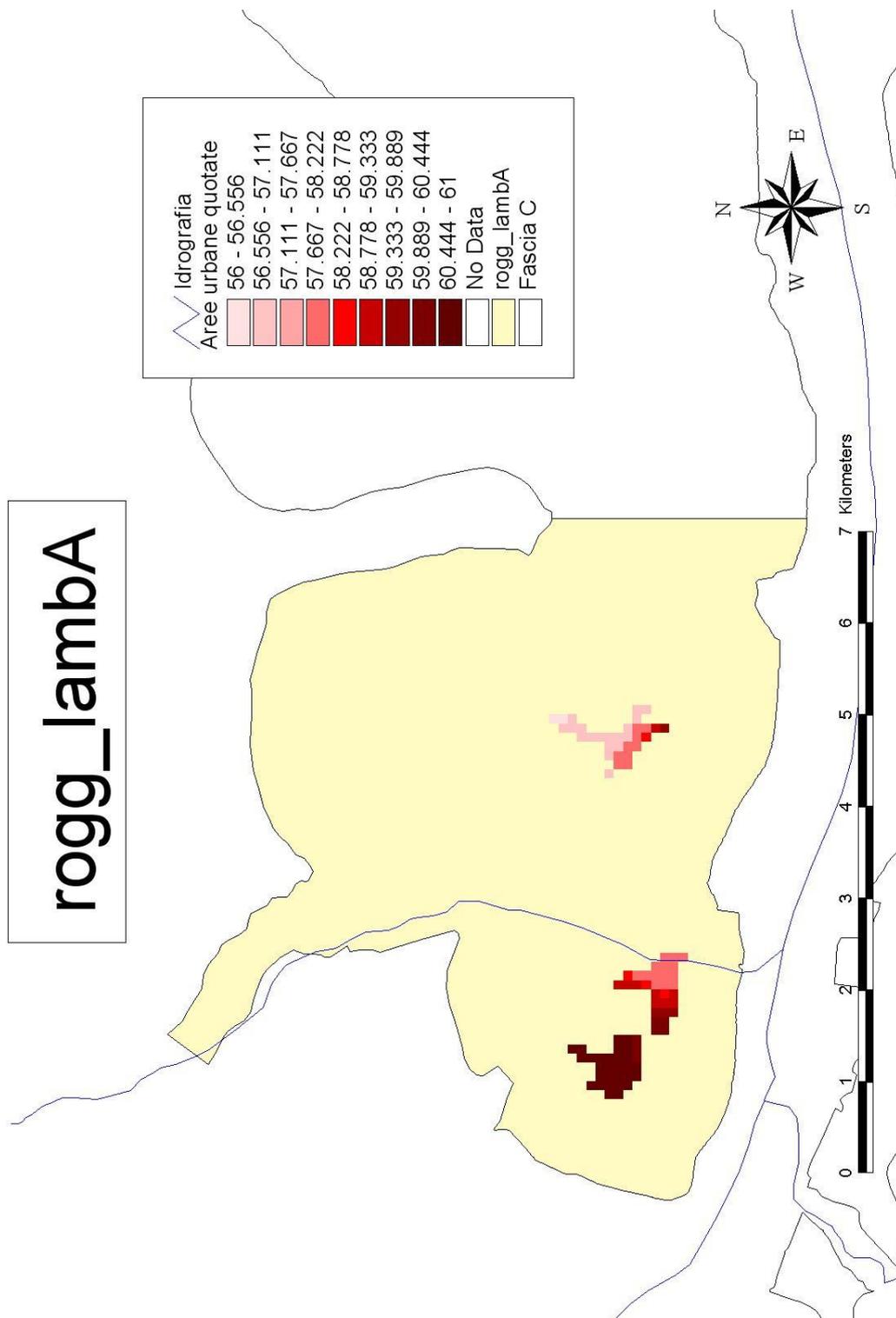


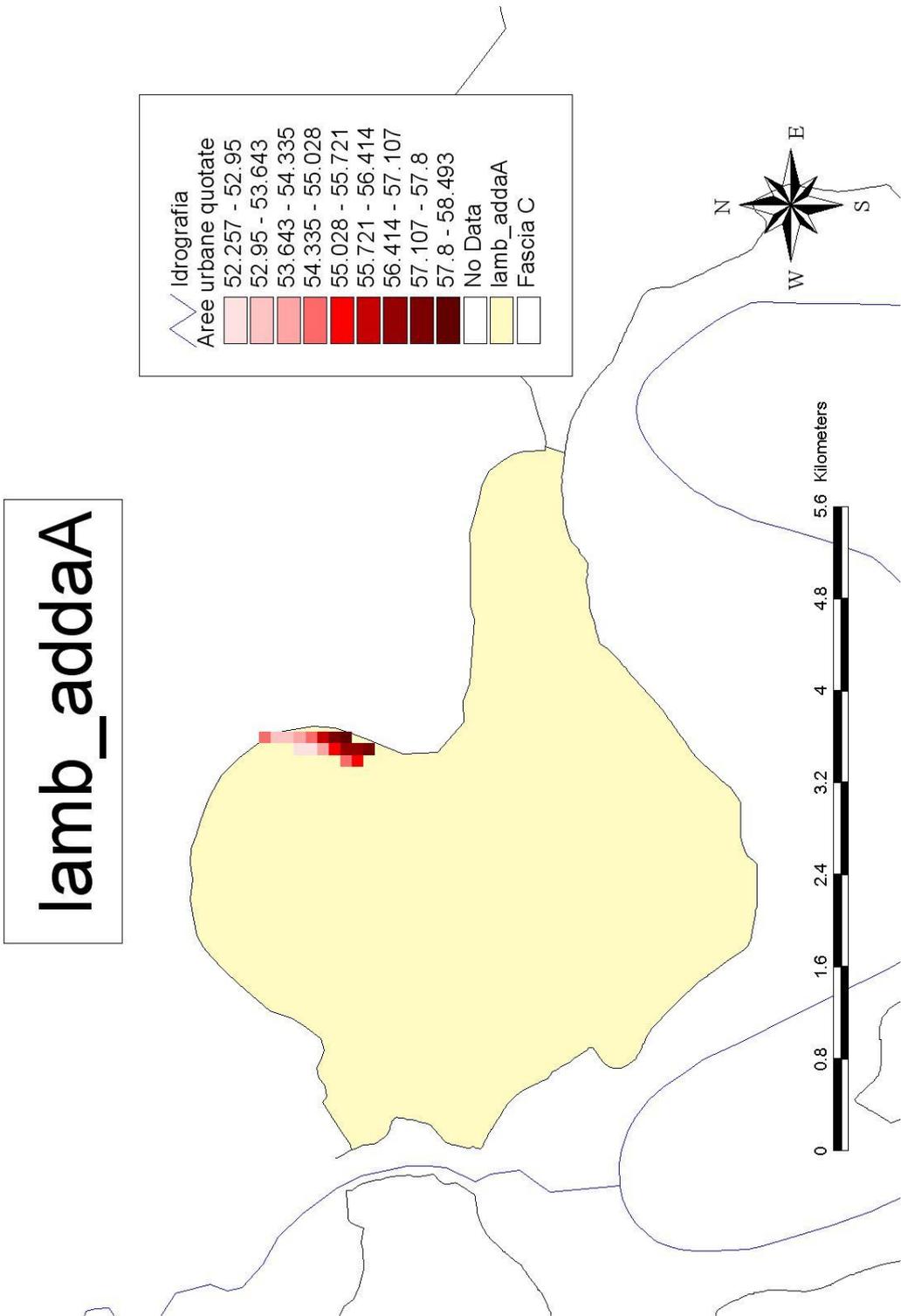
Figura 65: CLC2006: Rappresentazione delle aree urbane (in rosso) e industriali (in blu) per il comparto n. 1 (staf\_ers)



**Figura 66: CLC2006: Rappresentazione delle aree urbane (in rosso) e industriali (in blu) per il comparto n. 2 (vers\_po)**



**Figura 67: CLC2006: Rappresentazione delle aree urbane (in rosso) e industriali (in blu) per il comparto n. 3 (rogg\_lambdaA)**



**Figura 68: CLC2006: Rappresentazione delle aree urbane (in rosso) e industriali (in blu) per il comparto n. 6 (lamb\_addaA)**

# lamb\_addaB

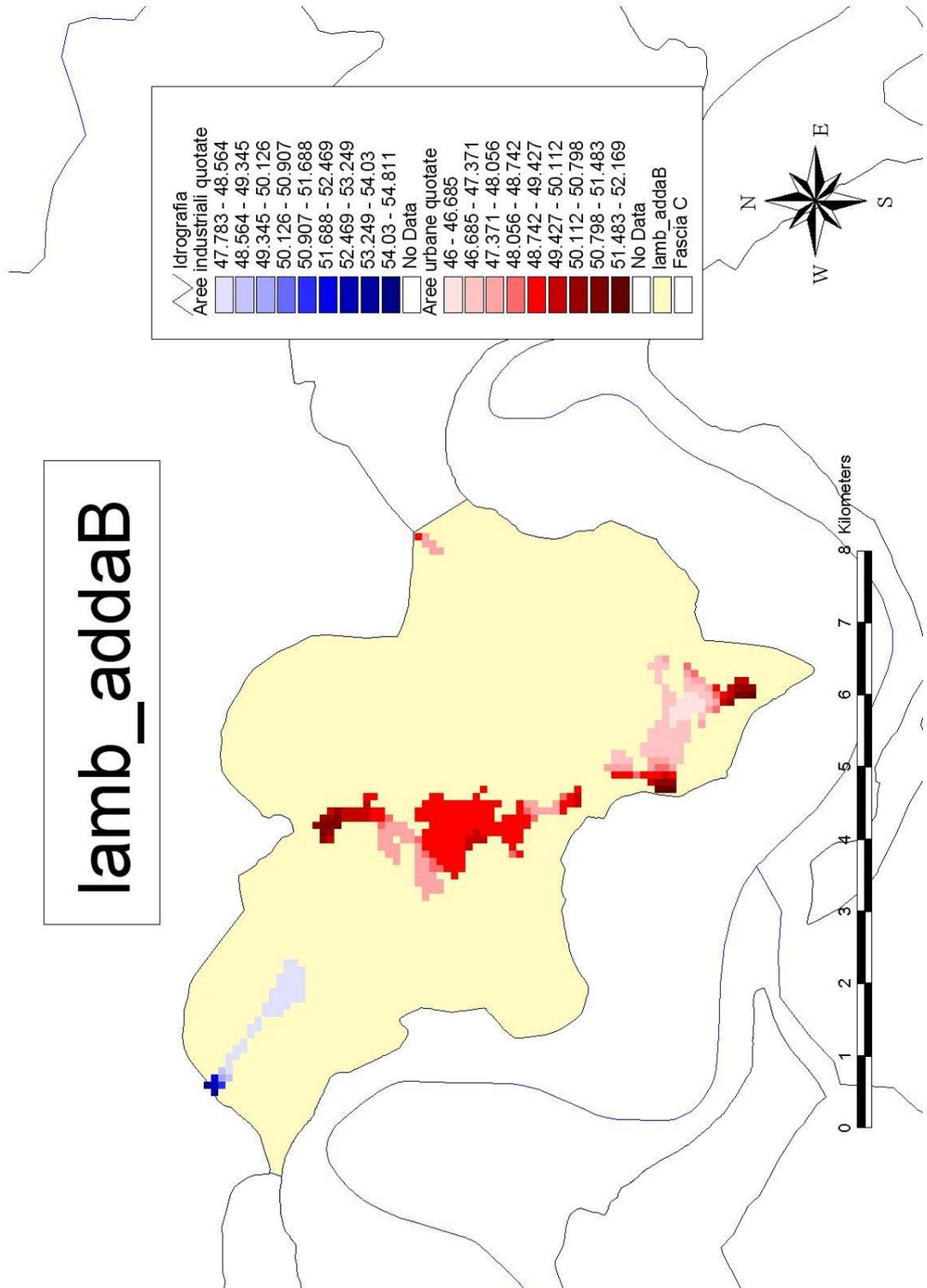
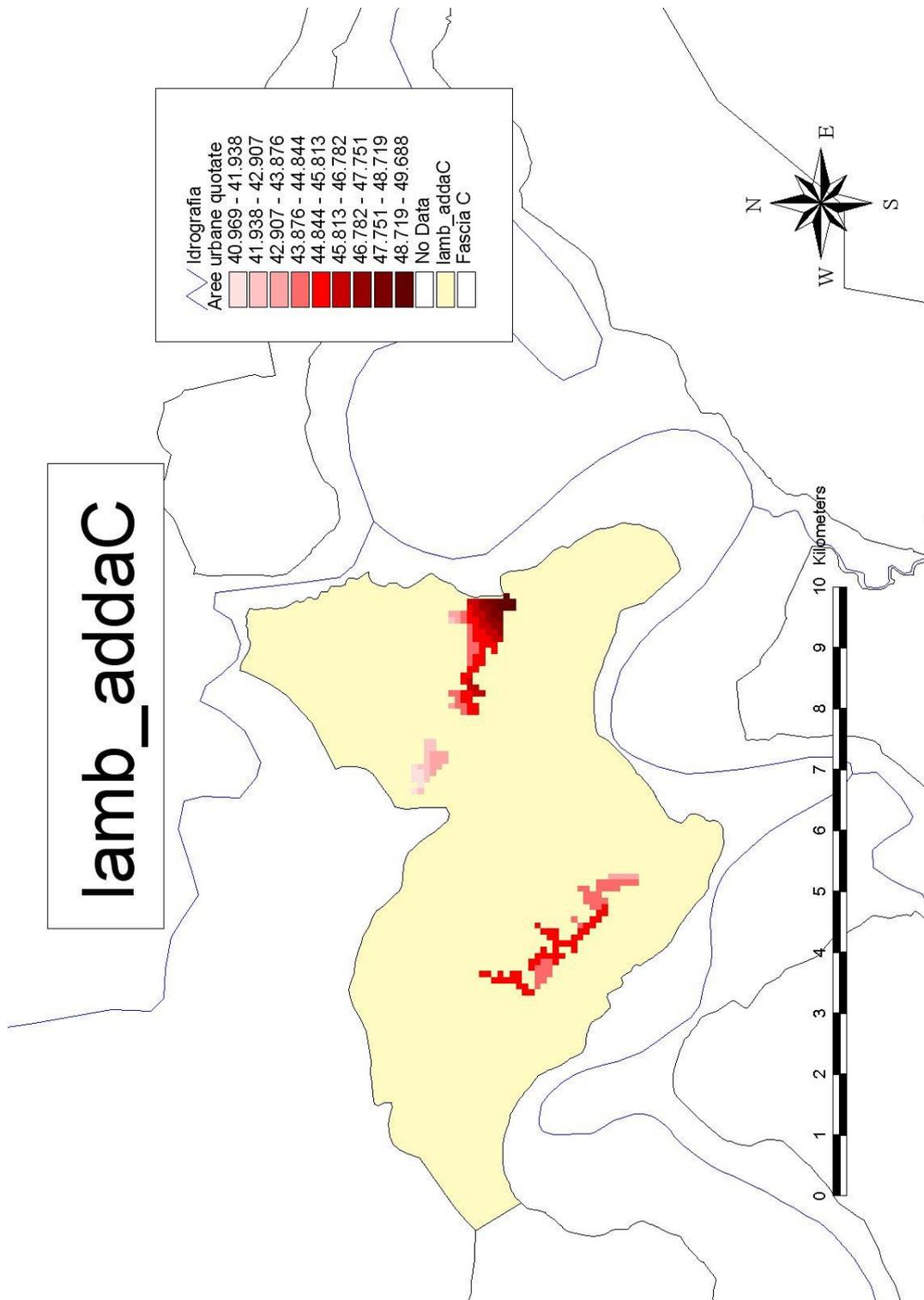


Figura 69: CLC2006: Rappresentazione delle aree urbane (in rosso) e industriali (in blu) per il comparto n. 8 (lamb\_addaB)



**Figura 70: CLC2006: Rappresentazione delle aree urbane (in rosso) e industriali (in blu) per il comparto n. 10 (lamb\_addaC)**

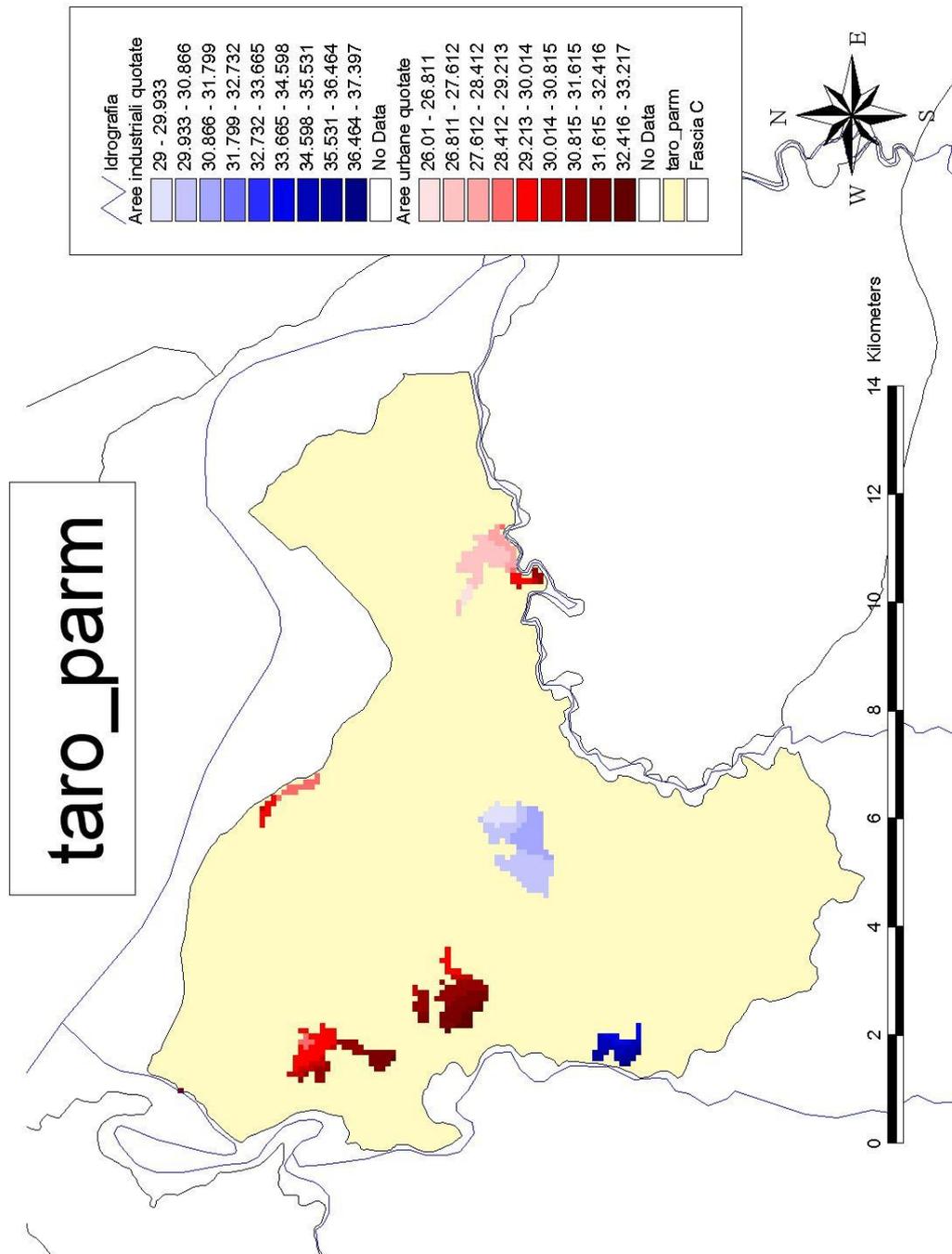
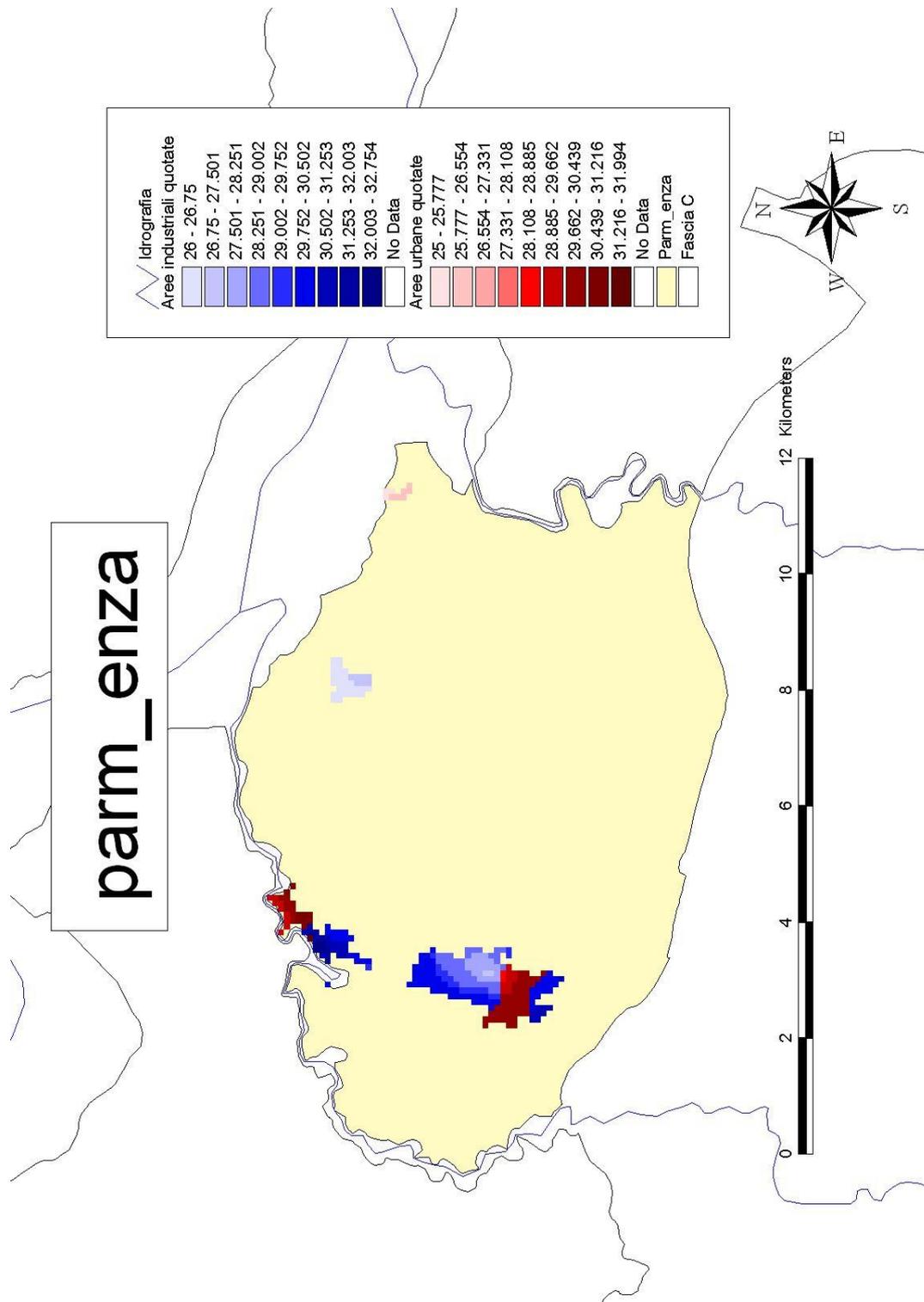


Figura 71: CLC2006: Rappresentazione delle aree urbane (in rosso) e industriali (in blu) per il comparto n. 18 (taro\_parm)



**Figura 72: CLC2006: Rappresentazione delle aree urbane (in rosso) e industriali (in blu) per il comparto n. 20 (parm\_enza)**

## **RINGRAZIAMENTI**

Ed eccomi arrivata alla versione definitiva di questo lavoro...

Quando entrai per la prima volta in dipartimento per prendere accordi per la tesi mi sembrava di essere quasi in dirittura d'arrivo, invece da allora ad oggi di mesi ne sono passati ancora tanti e, anche se adesso non vedo l'ora di non avere più l'incubo di finire di scrivere la tesi, porto con me tanti bellissimi ricordi di questo periodo, in cui molte persone mi sono state vicine permettendomi di arrivare fin qui e meritano di essere ringraziate.

Innanzitutto desidero dire un GRAZIE grande alle due persone che mi hanno seguito passo dopo passo in questo lavoro, con una disponibilità e una competenza fuori dal comune: il Prof. Castellarin e l'Ing. Domeneghetti. Già durante le lezioni mi avevate fatto apprezzare questa materia e durante questi mesi sono stata entusiasta di poter lavorare con voi. Grazie per avermi prontamente aiutato a superare gli inconvenienti tecnici e soprattutto per aver compreso le difficoltà personali di questo periodo, venendomi incontro in ogni modo.

Un ringraziamento speciale, ma proprio speciale, va alla mia nuova famiglia: Riqui, con la tua forza di volontà sei stato un esempio insostituibile che mi ha dato le energie per arrivare fin qui; grazie per essermi stato accanto con infinita pazienza, comprendendo quando era il caso di farmi recuperare la fiducia in me stessa e facendo di tutto per farmi trovare il tempo da dedicare alla tesi. Sei un compagno e un papà meraviglioso e sono fiera di averti vicino! Ema, grazie per aver sopportato la mamma in questi mesi di ansie, spero di non averti trascurato troppo, ora recupereremo! Sei un bimbo fantastico, davvero il dono più bello che potessero farmi.

Ovviamente una parte di questa laurea è dei miei genitori, della mia nonnina e di mia sorella, che mi hanno SEMPRE sostenuto in questo percorso con amore e stima, chi da vicino e chi da lontano. Senza di voi non so se sarei qui. Grazie soprattutto alla mia mamma per il ruolo di babysitter che ha assunto, insieme ai nonni paterni, in questi ultimi mesi, dandomi la possibilità di finire il mio percorso di studi.

Grazie ad Alba, Guido e Roberta per l'affetto e la stima che mi avete dimostrato e per avermi accolto da subito come una della famiglia.

Un ringraziamento davvero di cuore va alla mia amica Giulia: il caso ha voluto che raggiungessimo praticamente insieme anche questo traguardo e avessimo l'ennesima occasione di rafforzare la bellissima amicizia che ci lega ormai da tanti anni. Grazie a te e Henry per l'entusiasmo che dimostrate in ogni cosa che condividiamo.

Grazie a Flavia, l'amica giramondo che ovunque vada ha sempre un pensiero per me e con la sua esperienza e maturità mi ha sempre aiutato a compiere le scelte migliori.

Grazie anche a Chiara, ha sempre trovato il modo di farci riunire tutte e quattro per un momento di chiacchiere e spettegolezzi, per poi tornare più cariche ad affrontare le difficoltà giornaliere e di studio.

Un ringraziamento particolare va ai miei compagni di studi, con cui ho condiviso davvero tanto in questi anni e per cui un po' mi dispiace che sia tutto giunto al termine: gli idraulici Valeria, Enrico e Daniele, che mi hanno fatto passare dei momenti indimenticabili negli ultimi anni sui banchi di questa facoltà e non, e tutti gli altri colleghi degli anni precedenti, soprattutto Michela, Silvia, Arianna, Aligi, Sara e Romina; con te Romi credo che l'intesa che ci lega e che rinasce all'istante persino dopo un anno che non ci si vede sia destinata a sopravvivere anche negli anni futuri.

Pure tutti gli amici della pallavolo meritano un sentito grazie per aver contribuito all'esito positivo di questo percorso: mi avete permesso sia di sfogare le ansie pre-esame durante gli allenamenti e le partite sia di distrarmi con divertenti serate all'insegna della semplicità e dell'amicizia, secondo i valori che ci accomunano all'interno delle nostre squadre. Grazie a Lucia, Marti, Gio, Michi, Mery, Anto, Babi, Max, Gigi, Giangi, a tutta la squadra Under18 capitanata dalla Chiarina, a tutta la mia ex-squadra del femminile e a tutta la mia attuale squadra. Vorrei ringraziare in particolare Angela, che da lassù continua ad essere un punto di riferimento per il mio modo di affrontare le cose, a livello sportivo e non.

Grazie anche a tutti gli amici del Fossolo, che in questi anni hanno rappresentato un fondamentale punto fermo nella mia vita: Paolo, Frà Masina, Chiara, Chicco, Nena, Agnese, Valentina, il gruppo "giovanissimi" e tutti gli altri.

E grazie di cuore anche alle mie cugine Marialuisa, Giorgia, Silvia e in particolare Cristina; sono molto contenta di quest'ultimo riavvicinamento e della possibilità di confronto che offre, nonché del sostegno psicologico fornito in questi ultimi otto mesi di vita "nuova".

Ultimi, ma non in ordine di importanza, ringrazio tutti gli amici incontrati durante i soggiorni al Campo Caritas a L'Aquila: ognuno a suo modo ha contribuito ad affermare in me la convinzione che niente avviene per caso e accettando ogni sfida con coraggio e ottimismo si arriva davvero ovunque, ad esempio a laurearsi quasi in tempo! Francesco, Simone, Elena, Sara, Rita, Giulia, Laretta, Max, Diego, Don Marco e tantissimi altri: GRAZIE!

Voglio infine ringraziare tutte le altre persone che in qualunque modo hanno contribuito alla realizzazione di questo lavoro e che per dimenticanza o per mancanza di tempo e spazio non ho citato. Grazie davvero di cuore a tutti!