

Comune di Abbadia San Salvatore

Provincia di Siena



PIANO STRUTTURALE

(art. 92 della L.R. 65/2014)

RELAZIONE TECNICA IDROLOGICO-IDRAULICA

PIANO STRUTTURALE

(art. 92 della L.R. 65/2014)

RELAZIONE TECNICA IDROLOGICO-IDRAULICA

Sindaco

Fabrizio Tondi

Ufficio di Piano

Antonio Petrucci - *Responsabile del Servizio edilizia e urbanistica*

Andrea Sabatini - *Responsabile del procedimento*

Sabrina Paradisi - *Garante dell'informazione e della partecipazione*

Progetto e

Procedura di VAS

Fabrizio Milesi

Collaborazione al progetto

Tommaso Di Pietro

Aspetti del territorio fisico

Geoeco studio associato:

Roberto Neroni

Enrico Neroni

Studi idraulici

Andrea Sorbi

Niccolò Neroni

Aspetti archeologici

Archeòtipo Srl:

Federico Salzotti

Stefano Bertoldi

SOMMARIO

Premessa	7
1. Metodologia di indagine	8
1.1 Vincolistica idraulica	8
1.2 Validazione e aggiornamento del reticolo idraulico	8
1.3 Aree di indagine	9
1.4 Fasi di studio per le aree di dettaglio	9
2. Dati di base	11
3. Normativa idraulica di riferimento	12
3.1 Autorità Distrettuale dell'Appennino Centrale	12
3.2 Autorità Distrettuale dell'Appennino Settentrionale	13
3.3 Legge Regione Toscana n. 41/2018	13
4. Bacini idrografici	14
4.1 Area di dettaglio Abbadia Centro	14
4.2 Area di dettaglio Val di Paglia	16
5. Uso del suolo	18
6. Analisi idrologica	27
6.1 Metodo definito all'Appendice A.I.1 degli Allegati alle Norme del PAI	27
6.2 Metodo definito all'Appendice A.I.2. degli Allegati alle Norme del PAI	29
6.3 Valutazione portate di piena tramite software ALTO (v.2.00 aprile 2003)	31
6.4 ALTO con piogge regionalizzate	31
6.5 Confronto con le piogge regionalizzate della Regione Toscana	32
6.6 Analisi dei risultati e scelta del modello idrologico	34
6.7 Confronto con portate derivanti da precedenti studi	35
7. Analisi idraulica	37
7.1 Descrizione del modello idraulico	37
7.1.1 Modellazione monodimensionale	37
7.1.2 Modellazione bidimensionale	38
7.2 Caratteristiche generali dei modelli idraulici	39
7.2.1 Parametri di scabrezza e coefficienti di perdita concentrata	40
7.2.2 Condizioni al contorno di monte	40
7.2.3 Condizioni al contorno di valle	40
7.3 Modello idraulico Abbadia Centro	41
7.3.1 Dimensioni dei tombamenti	42
7.4 Modello idraulico Val di Paglia	46
7.4.1 Dimensioni dei tombamenti	47
8. Analisi dei risultati	50
8.1 Considerazione sui risultati delle modellazioni idrauliche	50
8.1.1 Abbadia Centro	50
8.1.2 Val di Paglia	52
8.2 Riscontro con eventi alluvionali precedenti	52
8.3 Confronto con lo "Studio Castelli"	56
8.4 Considerazioni sui tratti tombati	59
9. Restituzione cartografica	60
9.1 Territorio aperto	60

9.2 Zone di dettaglio	60
10. Conclusioni	62
10.1 Fattibilità idraulica	62
10.2 Indirizzi idraulici per gli strumenti urbanistici	63
10.2.1 Criteri generali	63
10.2.2 Aree soggette ad alluvioni frequenti (P3):	64
10.2.3 Aree soggette ad alluvioni poco frequenti (P2):	64

ALLEGATI IN CALCE

1 - Idrogrammi di piena

2 – Geometria dei modelli HEC RAS

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1- Classificazione HSG dei suoli della Toscana. Fonte dati Regione Toscana “DataBase Pedologico scala 1:10.000” edizione 2017	19
Figura 2- Uso e copertura del suolo – Intera regione. Fonte dati Regione Toscana edizione 2019	20
Figura 3- Valori calcolati del parametro CN_I per la regione Toscana	23
Figura 4- Valori calcolati del parametro CN_II per la regione Toscana	24
Figura 5- Valori calcolati del parametro CN_III per la regione Toscana	25
Figura 6 - Coefficiente del deflusso di piena k_d in funzione della permeabilità del bacino.....	29
Figura 7 – Valori dei parametri “a”, “n” della LSPP (TOS) tr 50 e 200 anni per il bacino del Paglia.....	32
Figura 8- Confronto LSPP AdB Tevere e RT per il bacino del Fiume Paglia	33
Figura 9- Imbocco del tombamento del fosso dell'Uno	42
Figura 10- Imbocco del tombamento del fosso di S. Piero all'Esassetta sotto S.P. 18A.....	42
Figura 11- Imbocco del tombamento del fosso S. Piero all'Esassetta sotto strada per loc. Ferraiole	43
Figura 12- Imbocco del tombamento dei fossi Acqua Gialla e Sambuco	43
Figura 13- Sezione equivalente di modellazione del tombamento dei fossi Acqua Gialla e Sambuco	44
Figura 14- Imbocco del tombamento del fosso del Becco	44
Figura 15- Imbocco del tombamento del fosso delle Acque Bianche con griglia a pettine.....	45
Figura 16- Tratto del fosso delle Acque Bianche a monte dell'imbocco del tratto tombato.....	45
Figura 17- Imbocco del tombamento del fosso di Fonte Risola	46
Figura 18- Imbocco del tombamento del fosso di S. Piero all'Erosa	46
Figura 19- Imbocco del tombamento del fosso di Bugliole	47
Figura 20- Attraversamento sul fosso di Voltole	48
Figura 21- Imbocco dell'attraversamento del Fosso #1	48
Figura 22- Imbocco dell'attraversamento del Fosso #2	49
Figura 23- Imbocco dell'attraversamento del Fosso #2 - dettaglio	49
Figura 24- Imbocco dell'attraversamento del Fosso #3	49
Figura 25- Risultati della modellazione idraulica bidimensionale del fosso di S. Piero all'Erosa – Tr 200 anni	51
Figura 26- Elaborazione grafica fonte https://magazine.meteosiena24.it/nubifragio-di-abbadia-salvatore-2019/	53
Figura 27- Via del Fosso Canali subito a valle dell'imbocco del Fonte Risola.....	54
Figura 28- Alcune abitazioni nel paese	55
Figura 29- Rotatoria S.P. del Monte Amiata (punto più a valle del Centro Abitato di Abbadia)	55
Figura 30- Valori di calcolo dello studio Castelli delle portate massime per tempo di ritorno 200 anni [mc/s] – Modello idrologico adottato MOBIDIC	56
Figura 31- Mappa dei rapporti tra portate calcolate di evento e portata massima Tr 200 anni.....	57
Figura 32- Estratto studio Castelli. Mappa dei battenti massimi. Evento 27/28 Luglio 2019 con l'ipotesi di suolo saturo	58

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 – Definizione delle fasce di pericolosità idraulica	13
Tabella 2 – Tipologie di suolo nel metodo SCS-CN.....	18
Tabella 3 – Valori del Curve Number per la Regione Toscana (U.S.D.A. 1986)	21
Tabella 4 – Criteri di scelta classe AMC metodo SCS-CN	22
Tabella 5 – Valori del parametro CN_III calcolati e adottati per i bacini idrografici in studio	26
Tabella 6 – Valori dei parametri Z/L e Z/Y in funzione della latitudine	28
Tabella 7 – Valori dei quantili adimensionali Kt.....	28
Tabella 8 – Confronto portate Metodo A.I.2 con ALTO Regionalizzato	34
Tabella 9 – Portate di calcolo adottate per le verifiche idrauliche.....	35
Tabella 10 – Portate di calcolo confrontate con altri studi idrologici-idraulici disponibili.....	35
Tabella 11 - Magnitudo idraulica con velocità determinata.....	61
Tabella 12 – Definizione delle fasce di pericolosità idraulica.....	62

TAVOLE GRAFICHE

Tav. ID.01 Carta dei vincoli e della pericolosità idraulica – Quadro	1 (1:10.000)
Tav. ID.02 Carta dei vincoli e della pericolosità idraulica – Quadro 2	(1:10.000)
Tav. ID.03 Carta dei vincoli e della pericolosità idraulica – Quadro 3	(1:10.000)
Tav. ID.04 Carta dei vincoli idraulici e della pericolosità da alluvione – Quadro 4	(1:10.000)
Tav. ID.05 Carta dei battenti idraulici per t.r. 30 anni	(1:5.000)
Tav. ID.06 Carta dei battenti idraulici per t.r. 200 anni	(1:5.000)
Tav. ID.07 Carta della velocità per tempo di ritorno 200 anni	(1:5.000)
Tav. ID.08 Carta della magnitudo idraulica	(1:5.000)
Tav. ID.09 Carta dei bacini	(1:25.000)

Premessa

La presente indagine idrologica ed idraulica, svolta dagli scriventi Ing. Andrea Sorbi e Ing. Niccolò Neroni, è redatta ai fini dell'aggiornamento del quadro conoscitivo a supporto del Nuovo Piano Strutturale del Comune di Abbadia San Salvatore (SI).

L'indagine costituisce affinamento degli studi già redatti nel 2014 a supporto degli strumenti urbanistici oggi vigenti e analizza i corsi d'acqua, presenti nel reticolo idrologico di cui alla DCRT 103/2022, che interessano le aree già urbanizzate, prevalentemente rappresentate dal capoluogo, e le aree di nuova previsione urbanistica con particolare riferimento all'area produttiva della Val di Paglia.

L'indagine è redatta ai sensi della Legge Regionale 24 luglio 2018, n.41 *“Disposizioni in materia di rischio di alluvioni e di tutela dei corsi d'acqua in attuazione del decreto legislativo 23 febbraio 2010, n. 49 (Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni). Modifiche alla l.r. 80/2015 e alla l.r. 65/2014”* nonché del D.P.G.R. 30 gennaio 2020, n. 5/R *“Regolamento di attuazione dell'articolo 104 della legge regionale 10 novembre 2014, n. 65 (Norme per il governo del territorio) contenente disposizioni in materia di indagini geologiche, idrauliche e sismiche.”*

La presente stesura degli studi idrologici idraulici a supporto del Piano Strutturale Comunale, denominata revisione 1 (rev.1), aggiorna e sostituisce gli omonimi documenti emessi nel marzo 2022 recependo le integrazioni richieste dalla Regione Toscana, Direzione Difesa del Suolo e Protezione Civile, Genio Civile Toscana Sud ricevute dall'amministrazione comunale suo protocollo n. 6746/2022 del 27/05/2022.

In via sintetica, nella presente stesura, sono state recepite le seguenti indicazioni:

- revisione e aggiornamento del reticolo idraulico
- revisione degli ambiti di fondovalle
- aggiornamento dei colori delle mappe di pericolosità idraulica;
- incremento dei tempi di ritorno di indagine per eventi alluvionali frequenti da 30 anni a 50 anni;
- approfondimento delle indagini sui tratti tombati e relativi imbocchi con valutazione del funzionamento con parziale ostruzione degli stessi;
- analisi dei modelli idraulici del capoluogo considerando gli edifici presenti come ostacoli;
- confronto dei risultati idrologici già ottenuti e aggiornati con gli studi idraulici condotti dal Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Firenze a seguito dell'evento alluvionale del luglio 2019;
- estensione delle aree di indagine della pericolosità idraulica a monte dei tratti tombati;
- esplicitazione nelle mappe di pericolosità dei battenti idraulici di esondazione in punti significativi.

1. Metodologia di indagine

1.1 Vincolistica idraulica

In prima fase si analizza la vincolistica idraulica sovraordinata costituita, per il territorio comunale di Abbadia San Salvatore, da:

1. Piano Gestione Rischio Idraulico (PGRA) ex PAI per il Fiume Tevere recepito dall'Autorità di bacino distrettuale dell'Appennino Centrale (ADAC) che vede la presenza della "Fascia A" del Fiume Tevere. La fascia rappresenta le aree interessate da inondazione con tempi di ritorno di 50 anni;
2. Piano Gestione Rischio Alluvioni (PGRA) dell'Autorità di bacino distrettuale dell'Appennino Settentrionale (ADAS), che vede la presenza delle fasce di pericolosità idraulica da alluvione P1 bassa, P2 media e P3 elevata;
3. Reticolo idrologico della Regione Toscana ai sensi della L.R. 79/2012 aggiornato con D.C.R.T. n. 103/2022 e relative fasce di assoluto rispetto ai sensi dell'art. 3 L.R. 41/2018. Il reticolo idrologico considerato è stato validato e revisionato come meglio descritto nel seguito;
4. Specchi d'acqua del database Regione Toscana

Per le zone di cui ai punti 1) e 2) si rimanda ai disposti delle NTA del PAI-ADAC e PGRA-ADAS.

In relazione al presente studio la fascia A del Tevere, all'interno dei perimetri studiati in dettaglio, viene assimilata ad area a pericolosità idraulica per alluvioni frequenti di cui alla lettera d), comma 1, art. 2 L.R. 41/2018.

1.2 Validazione e aggiornamento del reticolo idraulico

Per le zone di maggiore interesse urbanistico, è stata verificata la validità del reticolo idrografico regionale aggiornato alla DCRT 103/2022 del 6/12/2022 mediante visite e rilievi sul posto.

Dai sopralluoghi effettuati si è riscontrata la sostanziale corrispondenza del reticolo idrografico della Regione Toscana fatti salvi i seguenti casi:

- Abbadia San Salvatore località Esassetta, tratto TS43769 affluente del Fosso dell'Uno (porzione) indicato come tratto a cielo aperto, è in realtà tombato;
- Abbadia San Salvatore località Esassetta, una porzione del tratto TS44111 indicata come a cielo aperto, è in realtà tombata;
- Abbadia San Salvatore località Esassetta, Fosso dei Pozzi (5) TS44140 il tracciato effettivo è leggermente difforme in prossimità della confluenza con il fosso TS44111;
- Nel capoluogo il reticolo riporta già una configurazione corretta secondo le imminenti previsioni di ristrutturazione dello stesso. Si riportano comunque anche le fasce di rispetto del reticolo ad oggi funzionante;
- Abbadia San Salvatore, località Erosa/Sant'Andrea/Via Remedi, si considera il reticolo esteso verso monte aggiungendo al torrente Vivo (2) tratto TS45291 un tratto tombato e un

tratto a cielo aperto in coerenza con il reticolo definito dalla stessa Regione Toscana nel primo impianto della L.R. 79/2012. Tale richiesta è stata avanzata dal Genio Civile nella nota del maggio 2022. Localmente il corso d'acqua è denominato fosso di San Piero in località Erosa. Il tratto di estensione reticolo, ancorché graficamente non riportato nella cartografia idraulica della Regione Toscana, viene mappato attraverso la fascia di assoluto rispetto idraulico ai sensi dell'art. 3 L.R. 41/2018 e art. 96 R.D. 523/1904.

1.3 Aree di indagine

L'indagine idraulica viene svolta per l'intero territorio comunale tenendo conto delle vulnerabilità delle aree a potenziale rischio di alluvione.

In tale ottica sono state individuate le aree del:

- centro abitato di Abbadia San Salvatore formate dal capoluogo, dalla località Esassetta e dalla località Erosa (nel seguito *Abbadia Centro*);
- complesso produttivo della Val di Paglia (nel seguito *Val di Paglia*),

per le quali è stata condotta un'analisi idraulica di dettaglio ricorrendo a modellazione idraulica bidimensionale dei corsi d'acqua ivi presenti. Le aree sono di seguito definite come "*aree di dettaglio*".

Altrove, nel *territorio aperto*, si è condotta un'indagine idraulica speditiva definendo, per i corsi d'acqua del reticolo idrografico regionale:

- le fasce di assoluto rispetto ai sensi dell'art. 3 L.R. 41/2018 e art. 96 R.D. 523/1904;
- le aree di fondovalle suscettibili di alluvionamento per posizione morfologica, individuate come le zone poste a quota inferiore a 2 m dal piede esterno dell'argine (ovvero del ciglio di sponda), riferibili quindi al paragrafo B4, allegato A) delibera C.R.T. n. 31/2020.

1.4 Fasi di studio per le aree di dettaglio

Lo studio idrologico-idraulico delle aree di dettaglio è stato articolato nelle seguenti fasi:

- 1) reperimento, integrazione e raccordo dei dati idrologici e morfologici di studi precedenti;
- 2) integrazione dei dati morfologici con rilievi topografici svolti con tecnologia GPS effettuati dal Geom. Alessio Mazzetti nel dicembre 2022;
- 3) rappresentazione tridimensionale delle aree di indagine mediante l'utilizzo dei dati LIDAR della Regione Toscana con definizione 1x1 m aggiornato sulla base dei rilievi topografici svolti;
- 4) analisi geomorfologica mediante software di analisi GIS l'individuazione dei bacini idrografici, la definizione delle caratteristiche geomorfologiche di ciascuna area drenante e il calcolo dei relativi tempi di corrivazione;
- 5) analisi dell'uso del suolo e della pedologia aggiornati agli ultimi dati disponibili nei databases della Regione Toscana per la definizione delle caratteristiche di permeabilità dei suoli;
- 6) definizione degli afflussi di pioggia attraverso il calcolo delle curve di possibilità pluviometriche e gli ietogrammi di progetto, scegliendo il più idoneo tra:

- a. il metodo definito all'Appendice A.I.1 degli "*Allegati alle Norme*" del Piano di Stralcio Assetto Idrogeologico dell'Autorità di Bacino del Fiume Tevere;
 - b. il metodo definito all'Appendice A.I.2 degli "*Allegati alle Norme*" del Piano di Stralcio Assetto Idrogeologico dell'Autorità di Bacino del Fiume Tevere;
 - c. il metodo di valutazione delle portate di piena della Regione Toscana tramite l'utilizzo del software ALTO (v.2.00 aprile 2003);
 - d. il metodo di valutazione delle portate di piena della Regione Toscana tramite regionalizzazione delle piogge con durata da 1 a 5 giorni e da 1 a 24 ore così come definito al capitolo 4 del "*Quaderno Idrologico del Bacino del Fiume Tevere*" dell'Autorità di Bacino del Fiume Tevere.
- 7) definizione dei deflussi netti attraverso il calcolo degli idrogrammi di progetto;
 - 8) analisi critica dei risultati mediante confronto con studi precedenti;
 - 9) modellazione idraulica in moto vario monodimensionale o bidimensionale, utilizzando il software HEC-RAS nella versione 6.3.1 tenendo conto dei tombamenti e delle opere d'arte in genere. Nel caso dell'area di dettaglio Abbadia Centro è stata definita la massima portata transitabile nei tratti tombati dei canali del capoluogo, tenuto conto di possibili ostruzioni all'imbocco, per poi indagare la propagazione dell'esondazione mediante modellazione idraulica bidimensionale, di quanto non smaltito dal sistema dei tombamenti;
 - 10) analisi dei risultati della modellazione e sintetizzazione grafica degli stessi negli elaborati cartografici di progetto.

2. Dati di base

Al fine di poter effettuare un'analisi il più dettagliata possibile, sia in fase di modellazione monodimensionale per quanto riguarda le aste fluviali sia in fase di modellazione bidimensionale per quanto riguarda le aree golenali e di esondazione sono stati utilizzati i seguenti dati:

- Reticolo idrografico e di gestione, individuato dalla Regione Toscana attuando quanto disposto dalla Legge Regionale 79/2012 e aggiornato con Delibera di Consiglio 103/2022, utilizzato previa validazione;
- Rilievi LIDAR con risoluzione 1mx1m, disponibili sul portale OpenData della Regione Toscana aggiornati in specifiche aree di interesse;
- Carta Tecnica Regionale in scala 1:2.000 e scala 1:10.000;
- Dati geometrici ottenuti da campagne topografiche precedentemente svolte forniti dagli Enti Pubblici;
- Dati geometrici appositamente rilevati per gli studi precedenti mediante campagne topografiche;
- Dati geometrici appositamente rilevati mediante nuova campagna topografica eseguita nel mese di dicembre 2022 a cura del Geom. Alessio Mazzetti;
- Dati di uso del suolo disponibili sul portale Geoscopio della Regione Toscana;
- Dati pluviometrici sviluppati dalla Regione Toscana e disponibili sui portali del Sistema Informativo Regionale.

Prima di costruire il modello idraulico è stata controllata l'omogeneità delle sezioni e dei modelli digitali del terreno e la georeferenziazione delle quote dei vari rilievi utilizzati.

Le sezioni sono state appoggiate planimetricamente sul sistema di riferimento Gauss-Boaga.

Per ottenere una corretta analisi del comportamento idraulico della corrente in corrispondenza dei manufatti (ponti ed attraversamenti) esistenti, ove necessario, sono state eseguite apposite campagne topografiche di dettaglio a monte e a valle degli stessi.

3. Normativa idraulica di riferimento

Il territorio del comune di Abbadia S. Salvatore è suddiviso tra i bacini idrografici del fiume Tevere e fiume Fiora, ricadenti nel dominio dell'Autorità di Bacino del Distretto dell'Appennino Centrale e del fiume Ombrone ricadente nel dominio dell'Autorità di Bacino del Distretto dell'Appennino Settentrionale.

3.1 Autorità Distrettuale dell'Appennino Centrale

Il Piano di gestione del Rischio Alluvioni dell'Appennino Centrale (PGRAAC) è stato approvato con DPCM pubblicato in Gazzetta Ufficiale n. 28 del 3 febbraio 2017.

Il Piano è stato preceduto da una lunga fase di attività preparatorie raccogliendo e omogeneizzando i dati di pericolosità precedentemente studiati per singoli bacini individuati con D.Lgs. 152/2006 tra cui il Tevere, già bacino nazionale ai sensi della legge n. 183 del 1989.

Il PGRAAC, in termini di pericolosità idraulica, ha recepito il D. lgs. n. 49/2010, definendo le seguenti fasce di pericolosità:

- P1: Bassa probabilità, ex fascia C PAI fiume Tevere – inondabile per tempi di ritorno oltre 200 anni;
- P2: Media probabilità, ex fascia B PAI fiume Tevere – inondabile per tempi di ritorno compresi tra 100 e 200 anni;
- P3: Elevata probabilità, ex fascia A PAI fiume Tevere – inondabile per tempi di ritorno fino a 50 anni;

Il territorio comunale ricade, per le aree maggiormente abitate, nel bacino del Tevere e pertanto le analisi idrologiche sono state condotte per tempi di ritorno dell'evento pari a 50 anni.

Le aree inondabili da tali eventi sono state considerate, ai fini della L.R. Toscana n. 41/2018, equivalenti alle "aree a pericolosità per alluvioni frequenti".

Solo successivamente la L.221/2015 ha modificato l'articolazione dei distretti idrografici precedentemente definiti con il D. Lgs.152/2006 assegnando al Distretto dell'Appennino ulteriori bacini tra i quali il Fiora, già bacino interregionale ai sensi della legge 18 maggio 1989, n. 183.

Il bacino del fiume Fiora non è ad oggi ancora integrato nel PGRAAC e rimane quindi normato dal precedente Piano di Assetto Idrogeologico (PAI) dell'Autorità di Bacino Interregionale del Fiume Fiora che prevede le seguenti fasce di pericolosità:

- P.I.3 Aree a pericolosità idraulica elevata – inondabile per tempi di ritorno fino a 200 anni;
- P.I.4 Aree a pericolosità idraulica molto elevata – inondabile per tempi di ritorno fino a 30 anni;

Nello specifico la porzione di territorio comunale ricompresa nel bacino del Fiora è estremamente modesta e interessa esclusivamente il territorio aperto. Si è quindi proceduto ad

¹ Aree interessate da alluvioni con tempo di ritorno 30 anni

analisi speditive come specificato nel § 1.3 senza valutare esondazioni in funzione del tempo di ritorno dell'evento.

3.2 Autorità Distrettuale dell'Appennino Settentrionale

Il Piano di gestione del Rischio Alluvioni dell'Appennino Settentrionale (PGRAAS) 1° ciclo è stato approvato con DPCM pubblicato in Gazzetta Ufficiale n. 28 del 3 febbraio 2017 e ricomprende il bacino del fiume Ombrone per il quale sono già presenti delle mappe di pericolosità idraulica che tengono conto della seguente classificazione in fasce:

- P1 - pericolosità da alluvione bassa corrispondenti ad aree inondabili da eventi con tempo di ritorno superiore a 200 anni e comunque corrispondenti al fondovalle alluvionale;
- P2 - pericolosità da alluvione media, comprendenti le aree inondabili da eventi con tempo di ritorno maggiore di 30 anni e minore/uguale a 200 anni ... *omissis*;
- P3 - pericolosità da alluvione elevata, comprendenti le aree inondabili da eventi con tempo di ritorno minore/uguale a 30 anni ... *omissis*.

Nello specifico la porzione di territorio comunale ricompresa nel bacino dell'Ombrone è modesta e interessa esclusivamente il territorio aperto. Si sono quindi mantenute le fasce di pericolosità già vigenti.

3.3 Legge Regione Toscana n. 41/2018

Poiché il territorio comunale di Abbadia San Salvatore rimane compreso nella Regione Toscana vige – oltre alle norme sopra richiamate – la legge regionale n. 41 del 24/07/18 e il relativo Regolamento DPGR n. 5/R del 30/01/20.

Nella definizione delle fasce di pericolosità idraulica si terrà pertanto conto delle seguenti equivalenze:

Fascia	Nomenclatura PGRA-AC	Nomenclatura PGRA-AS	Nomenclatura RT	Tempo di ritorno ² (Tr)
P1	Bassa probabilità, ex fascia C PAI fiume Tevere	Pericolosità da alluvione bassa	aree a pericolosità da alluvioni rare o di estrema intensità	Oltre 200 anni
P2	media probabilità, ex fascia B PAI fiume Tevere	Pericolosità da alluvione media	aree a pericolosità per alluvioni poco frequenti	Fino a 200 anni
P3	elevata probabilità, ex fascia A PAI fiume Tevere	Pericolosità da alluvione elevata	aree a pericolosità per alluvioni frequenti	Fino a 50 anni ³

Tabella 1 – Definizione delle fasce di pericolosità idraulica

² Come assunto nel calcolo idrologico

³ 30 anni nel caso del bacino del fiume Ombrone

4. Bacini idrografici

4.1 Area di dettaglio Abbadia Centro

I bacini dei corsi d'acqua in esame, ricompresi nel bacino del fiume Tevere, si estendono principalmente dal versante est del Monte Amiata; come conseguenza il centro abitato risulta attraversato da una serie di corsi d'acqua nel tempo canalizzati ed interrati con direzione di scorrimento preferenziale est-ovest.

Gli originari corsi d'acqua a cielo aperto sono stati infatti, nel tempo, sostituiti con canali interrati per consentire un più intensivo utilizzo del territorio a fini urbani a discapito della sicurezza idraulica.

Lo studio in esame ha tenuto conto della presenza dei tombamenti e della loro capacità di smaltimento delle piene eccezionali, distribuendo sul territorio gli eventuali volumi d'acqua non recepiti dai canali tombati.

In particolare, sono stati studiati in ordine da nord a sud:

- il fosso dell'Uno con particolare riferimento al tratto iniziale TS43769;
- il fosso TS44111 localmente denominato fossi di San Pietro all'Esassetta che confluisce nel fosso dei Pozzi TS44127;
- il fosso del Sambuco considerando anche un tratto del fosso dell'Acqua Gialla, suo affluente;
- il fosso del Becco;
- il fosso di Fonte Risola e il suo affluente TS45676, localmente denominato fosso dell'Acqua Bianca;
- l'estensione verso monte del torrente Vivo TS45291 localmente denominato fosso di San Piero in località Erosa.

A seguito degli eventi alluvionali avvenuti nel novembre 2012, l'Amministrazione Comunale di Abbadia ha avviato la realizzazione di un insieme di opere volto ad aumentare la sicurezza idraulica dell'intero centro abitato.

Di tali nuovi interventi alcuni risultano già funzionanti mentre altri sono rimasti, alla data odierna, solo ad un livello progettuale.

Nel presente studio si considera la presenza delle sole opere effettivamente realizzate e collaudate come di seguito meglio descritte:

- canalizzazione del fosso del Sambuco e fosso dell'Acqua Gialla realizzata nell'ambito del progetto *“Opere di regimazione idraulica all'interno del perimetro di bonifica dell'area mineraria” a firma degli Ingg. Alberto Bertocci e Fabrizio Bisconti depositato – gennaio 2013;*
- rifacimento dello scatolare del fonte Risola (*progetto di “Realizzazione del canale di by-pass idraulico dell'invaso del Muraglione – Lotto 4” – Extrò studio associato – novembre 2017”*);
- rifacimento del tratto tombato del fosso Acqua Bianca (*progetto di “Implementazione raccolta acque bianche zona alta del centro abitato” – Extrò studio associato – aprile 2021”*).

Di seguito l'analisi delle caratteristiche morfologiche principali dei bacini con i relativi tempi di corrivazione⁴.

Fosso dell'Uno TS43769

Area del bacino = 0.20 km²

Lunghezza asta principale = 0.25 km

Quota massima del bacino = 1040 m s.l.m.

Quota massima dell'asta = 905 m s.l.m.

Quota media del bacino = 950 m s.l.m.

Quota minima = 867.4 m s.l.m.

Tempo di corrivazione secondo Kirpich: tc = 0.05 h

San Pietro all'Esassetta TS44111

Area del bacino = 0.43 km²

Lunghezza asta principale = 1.0 km

Quota massima del bacino = 1300 m s.l.m.

Quota massima dell'asta = 1038 m s.l.m.

Quota media del bacino = 1050 m s.l.m.

Quota minima = 896 m s.l.m.

Tempo di corrivazione secondo Kirpich: tc = 0.14 h

Fosso dell'Acqua Gialla TS78935

Area del bacino = 2.54 km²

Lunghezza asta principale = 3.21 km

Quota massima del bacino = 1738 m s.l.m.

Quota massima dell'asta = 1535 m s.l.m.

Quota media del bacino = 1266 m s.l.m.

Quota minima = 900 m s.l.m.

Tempo di corrivazione secondo Kirpich: tc = 0.30 h

Fosso del Sambuco TS45087

Area del bacino = 0.32 km²

Lunghezza asta principale = 0.93 km

Quota massima del bacino = 1102 m s.l.m.

Quota massima dell'asta = 980 m s.l.m.

Quota media del bacino = 968 m s.l.m.

Quota minima = 880 m s.l.m.

Tempo di corrivazione secondo Kirpich: tc = 0.15 h

⁴ I tempi di corrivazione sono stati revisionati a seguito delle richieste di integrazione pervenute da parte del Genio Civile escludendo la metodologia proposta da Giandotti.

Fosso del Becco TS45442Area del bacino = 0.45 km²

Lunghezza asta principale = 1.0 km

Quota massima del bacino = 1102 m s.l.m.

Quota massima dell'asta = 1000 m s.l.m.

Quota media del bacino = 955 m s.l.m.

Quota minima = 866 m s.l.m.

Tempo di corrivazione secondo Kirpich: tc = 0.14 h

Fosso dell'Acqua Bianca TS45676Area del bacino = 0.08 km²

Lunghezza asta principale = 0.33 km

Quota massima del bacino = 921 m s.l.m.

Quota massima dell'asta = 896 m s.l.m.

Quota media del bacino = 873 m s.l.m.

Quota minima = 835 m s.l.m.

Tempo di corrivazione secondo Kirpich: tc = 0.05 h

Fosso di Fonte Risola TS45914Area del bacino = 2.77 km²

Lunghezza asta principale = 4.7 km

Quota massima del bacino = 1616 m s.l.m.

Quota massima dell'asta = 1400 m s.l.m.

Quota media del bacino = 1070 m s.l.m.

Quota minima = 843 m s.l.m.

Tempo di corrivazione secondo Kirpich: tc = 0.50 h

San Piero (loc.Erosa) – estensione Torrente Vivo TS45291Area del bacino = 0.16 km²

Lunghezza asta principale = 0.4 km

Quota massima del bacino = 984 m s.l.m.

Quota massima dell'asta = 867 m s.l.m.

Quota media del bacino = 885 m s.l.m.

Quota minima = 834 m s.l.m.

Il tempo di corrivazione secondo Kirpich: tc = 0.09 h

4.2 Area di dettaglio Val di Paglia

Si analizza il Fiume Paglia chiuso alla confluenza con il Torrente degli Olmarelli con il contributo idraulico degli affluenti minori in destra idraulica (Fosso delle Bugliole, Fosso delle Voltole, e dei fossi minori compresi fra il Bugliole e il Voltole), per i quali si è condotta l'analisi delle caratteristiche morfologiche principali dei bacini tributari.

Tutti i bacini indagati sono ricompresi nel bacino del fiume Tevere.

Fiume Paglia sino alla confluenza del Torrente degli Olmarelli:

Area del bacino = 53.163 km²

Quota minima = 350.2 m s.l.m.

Lunghezza asta principale = 12.358 km

Quota media del bacino = 742.2 m s.l.m.

Con tali dati il tempo di corrivazione secondo Giandotti è risultato: $t_c = 3.01$ h

Fosso delle Bugliole

Area del bacino = 0.872 km²

Quota minima = 377.8 m s.l.m.

Lunghezza asta principale = 1.505 km

Dislivello altimetrico fra gli estremi dell'asta = 212.2 m

Con tali dati il tempo di corrivazione secondo Kirpich è risultato: $t_c = 0.19$ h

Fosso delle Voltole

Area del bacino = 1.013 km²

Quota minima = 352.9 m s.l.m.

Lunghezza asta principale = 1.952 km

Dislivello altimetrico fra gli estremi dell'asta = 200.1 m

Con tali dati il tempo di corrivazione secondo Kirpich è risultato: $t_c = 0.27$ h

Fosso#1 (TS 45631)

Area del bacino = 0.078 km²

Quota minima = 373.0 m s.l.m.

Lunghezza asta principale = 0.650 km

Dislivello altimetrico fra gli estremi dell'asta = 47.0 m

Con tali dati il tempo di corrivazione secondo Kirpich è risultato: $t_c = 0.13$ h

Fosso#2 (TS45770 – sottobacino nord)

Area del bacino = 0.145 km²

Quota minima = 367.7 m s.l.m.

Lunghezza asta principale = 1.050 km

Dislivello altimetrico fra gli estremi dell'asta = 152.4 m

Con tali dati il tempo di corrivazione secondo Kirpich è risultato: $t_c = 0.14$ h

Fosso#3 (TS45770 – sottobacino sud)

Area del bacino = 0.107 km²

Quota minima = 367.5 m s.l.m.

Lunghezza asta principale = 0.662 km

Dislivello altimetrico fra gli estremi dell'asta = 82.5 m

Con tali dati il tempo di corrivazione secondo Kirpich è risultato: $t_c = 0.11$ h

5. Uso del suolo

Per la definizione dell'uso del suolo si è fatto riferimento al metodo del *Curve Number*, proposto dal *Soil Conservation Service* (SCS-CN). Tale procedura, utilizzata per il calcolo delle piogge nette, è di seguito illustrata.

Il metodo consiste nell'assegnare ad una determinata area un numero adimensionale (CN) che varia tra 100 (per corpi idrici e suoli completamente impermeabili) e circa 30 (per suoli con elevati tassi di infiltrazione). Con valori di CN uguali o prossimi allo 0, si è in presenza di una superficie assimilabile alla perfetta "spugna". Viene assorbita e trattenuta la totalità o quasi della precipitazione. Con valori di CN uguali o prossimi a 100, siamo in presenza di terreni o superfici impermeabili dove la precipitazione si trasforma interamente, o quasi, in deflusso.

Il CN è essenzialmente correlato ai seguenti fattori:

- Natura litologica del suolo;
- Tipo di copertura (uso del suolo)
- Condizioni iniziali di umidità del suolo antecedenti un evento meteorico;
- Stagione di riposo o crescita della vegetazione.

L'agenzia del Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti (USDA) Natural Resources Conservation Service (NRCS), precedentemente nota come Soil Conservation Service, ha fornito nel 1972 delle tabelle per facilitare la determinazione del parametro CN. Innanzitutto, ha suddiviso il suolo in quattro classi in base alla capacità di assorbimento:

Tipo idrologico di suolo	Descrizione
A	Scarsa potenzialità di deflusso. Comprende sabbie profonde con scarsissimo limo e argilla; anche ghiaie profonde, molto permeabili.
B	Potenzialità di deflusso moderatamente bassa. Comprende la maggior parte dei suoli sabbiosi meno profondi che nel gruppo A, ma il gruppo nel suo insieme mantiene alte capacità di infiltrazione anche a saturazione.
C	Potenzialità di deflusso moderatamente alta. Comprende suoli sottili e suoli contenenti considerevoli quantità di argilla e colloidali, anche se meno che nel gruppo D. Il gruppo ha scarsa capacità di infiltrazione a saturazione.
D	Potenzialità di deflusso molto alta. Comprende la maggior parte delle argille con alta capacità di rigonfiamento, ma anche suoli sottili con orizzonti pressoché impermeabili in vicinanza delle superfici.

Tabella 2 – Tipologie di suolo nel metodo SCS-CN

I parametri di suolo assunti sono derivati dal *DataBase Pedologico della Regione Toscana in scala 1:10.000*⁵, pubblicato nell'anno 2017 la cui mappa risultante è riportata in Figura 1.

⁵ Fonte dati: Regione Toscana <https://dati.toscana.it/dataset/dbped>

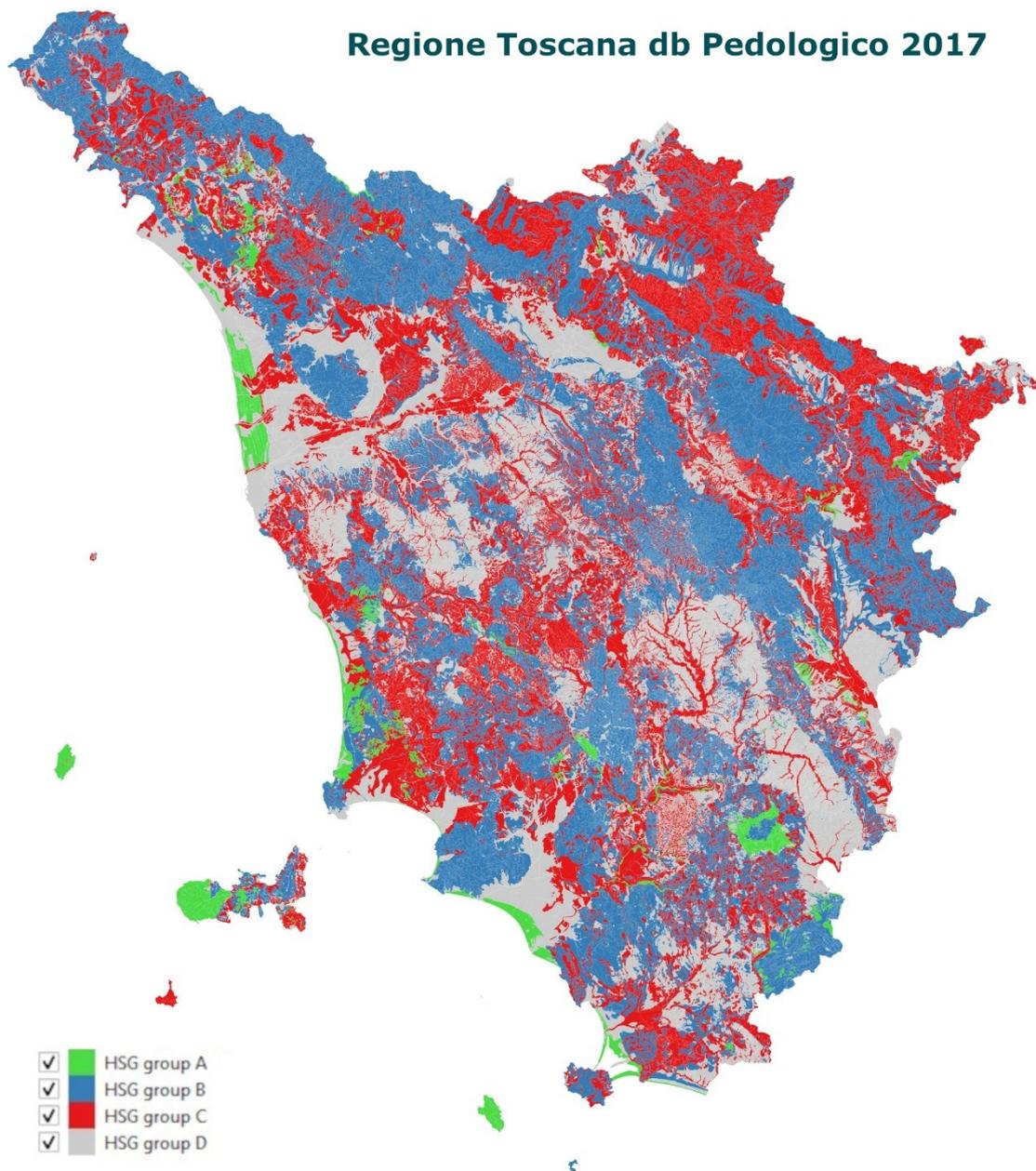


Figura 1- Classificazione HSG dei suoli della Toscana. Fonte dati Regione Toscana “DataBase Pedologico scala 1:10.000” edizione 2017

Altro dato essenziale nella definizione del parametro CN è l’informazione circa l’uso del suolo. Il miglior compromesso fra livello di dettaglio di classificazione, risoluzione spaziale e aggiornamento temporale è costituito dallo strato informativo della Regione Toscana *DB Uso e Copertura del Suolo in scala 1:10.000*⁶, pubblicato nell’anno 2019 la cui mappa risultante è riportata in Figura 2.

⁶ <https://dati.toscana.it/dataset/ucs/resource/c60342ad-e297-47bd-ad40-dea69e619bf1>

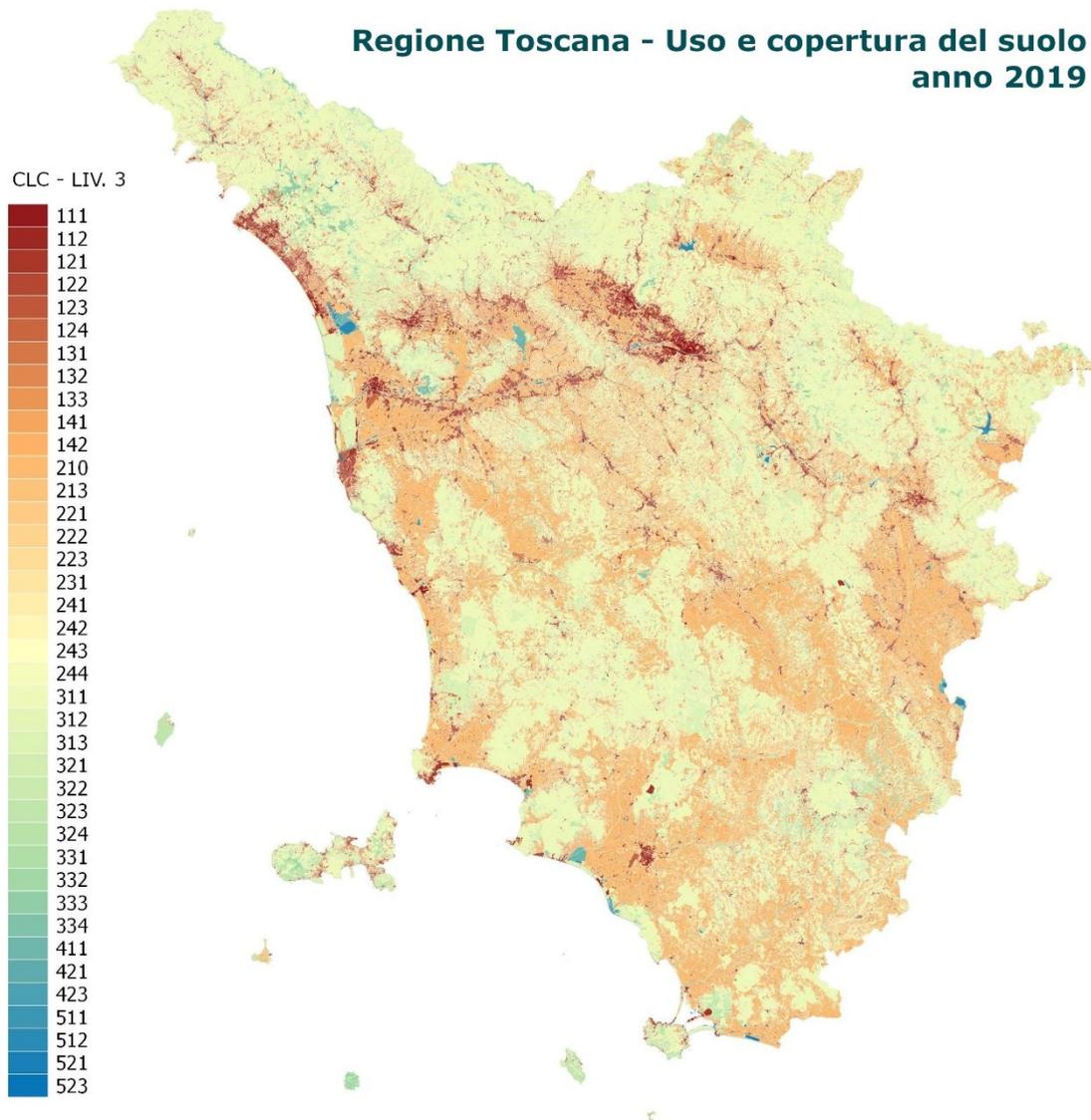


Figura 2- Uso e copertura del suolo – Intera regione. Fonte dati Regione Toscana edizione 2019

I dati di cui sopra sono combinati assieme attraverso la Tabella 3 (USDA 1986) per attribuire il valore del parametro CN_{II} (suolo in condizione di saturazione media).

CORINE LAND COVER		CN_II per SUOLO			
LIV.3	DESCRIZIONE	A	B	C	D
111	Zone residenziali a tessuto continuo	89	92	94	95
112	Zone residenziali a tessuto discontinuo e rado	77	85	90	92
121	Aree industriali e commerciali	81	88	91	93
122	Reti stradali, ferroviarie e infrastrutture tecniche	98	98	98	98
123	Aree portuali	98	98	98	98
124	Aeroporti	98	98	98	98
131	Aree estrattive	76	85	89	91
132	Discariche, depositi di rottami	81	88	91	93
133	Cantieri, edifici in costruzione	77	86	91	94
141	Aree verdi urbane	49	69	79	84
142	Aree ricreative e sportive	68	79	86	89
210	Seminativi irrigui e non irrigui	79	86	89	67
211	Seminativi in aree non irrigue	61	73	81	84
212	Seminativi in aree irrigue	67	78	85	89
213	Risaie	62	71	78	81
221	Vigneti	76	85	90	93
222	Frutteti e frutti minori	43	65	76	82
223	Oliveti	43	65	76	82
231	Prati stabili	49	69	79	84
241	Colture temporanee associate a colture permanenti	61	73	81	84
242	Sistemi colturali e particellari complessi	61	73	81	84
243	Colture agrarie con presenza di spazi naturali importanti	61	73	81	84
244	Aree agroforestali	43	65	76	82
311	Boschi di latifoglie	36	60	73	79
312	Boschi di conifere	36	60	73	79
313	Boschi misti di conifere e latifoglie	36	60	73	79
321	Aree a pascolo naturale e praterie	49	69	79	84
322	Brughiere e cespuglieti	49	69	79	84
323	Aree a vegetazione sclerofilla	35	56	70	77
324	Aree a vegetazione boschiva ed arbustiva in evoluzione	35	56	70	77
331	Spiagge, dune e sabbie	46	65	77	82
332	Rocce nude, falesie, rupi e affioramenti	96	96	96	96
333	Aree con vegetazione rada	63	77	85	88
334	Aree percorse da incendio	63	77	85	88
335	Ghiacciai e nevi perenni	98	98	98	98
411	Paludi interne	98	98	98	98
412	Torbiere	98	98	98	98
421	Paludi salmastre	98	98	98	98
422	Saline	98	98	98	98
423	Zone intertidali	98	98	98	98
511	Corsi di acqua, canali e idrovie	98	98	98	98
512	Specchi di acqua	98	98	98	98
521	Lagune	98	98	98	98
522	Estuari	98	98	98	98
523	Mare	98	98	98	98
999	no data	98	98	98	98

Tabella 3 – Valori del Curve Number per la Regione Toscana (U.S.D.A. 1986)

Le condizioni di saturazione del terreno sono fondamentali per la corretta valutazione della curva di frequenza delle portate al colmo. Difatti, a parità di precipitazione, le diverse condizioni del terreno incidono sulla risposta del bacino e sulla portata al colmo.

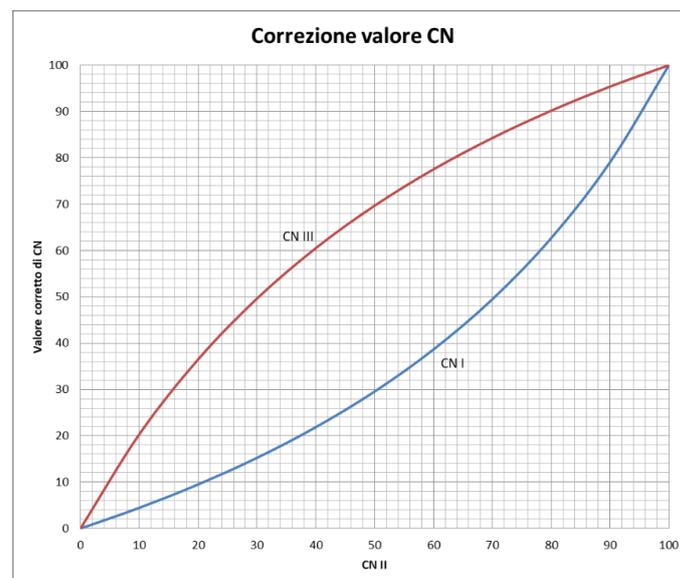
Il metodo tiene conto le condizioni di umidità del terreno antecedenti l'inizio dell'evento (AMC, Antecedent Moisture Condition).

L'SCS individua tre classi, AMC I, AMC II e AMC III, in relazione al valore assunto dall'altezza di pioggia caduta nei 5 giorni precedenti l'evento meteorico. L'attribuzione della classe AMC si basa sui criteri riportati nella tabella di seguito:

Classe AMC	Stagione di riposo	Stagione di crescita
I	< 12.7 mm	<35.5 mm
II	12.7-28.0 mm	35.5-53.3 mm
III	>28.0 mm	>53.3 mm

Tabella 4 – Criteri di scelta classe AMC metodo SCS-CN

Il CN calcolato si riferisce alla classe AMC II. Per condizioni antecedenti l'evento molto umide, AMC III, o molto asciutte, AMC I, si possono derivare i relativi valori di CN, attraverso il seguente grafico o applicando le seguenti espressioni:



$$CN I = \frac{4.2 CN II}{10 - 0.058 CN II}$$

$$CN III = \frac{23 CN II}{10 + 0.13 CN II}$$

L'applicazione del procedimento descritto ha portato alla definizione dei raster, calcolati su maglia 10x10 m per l'intera regione⁷, rappresentativi dei valori di CN_I, CN_II e CN_III.

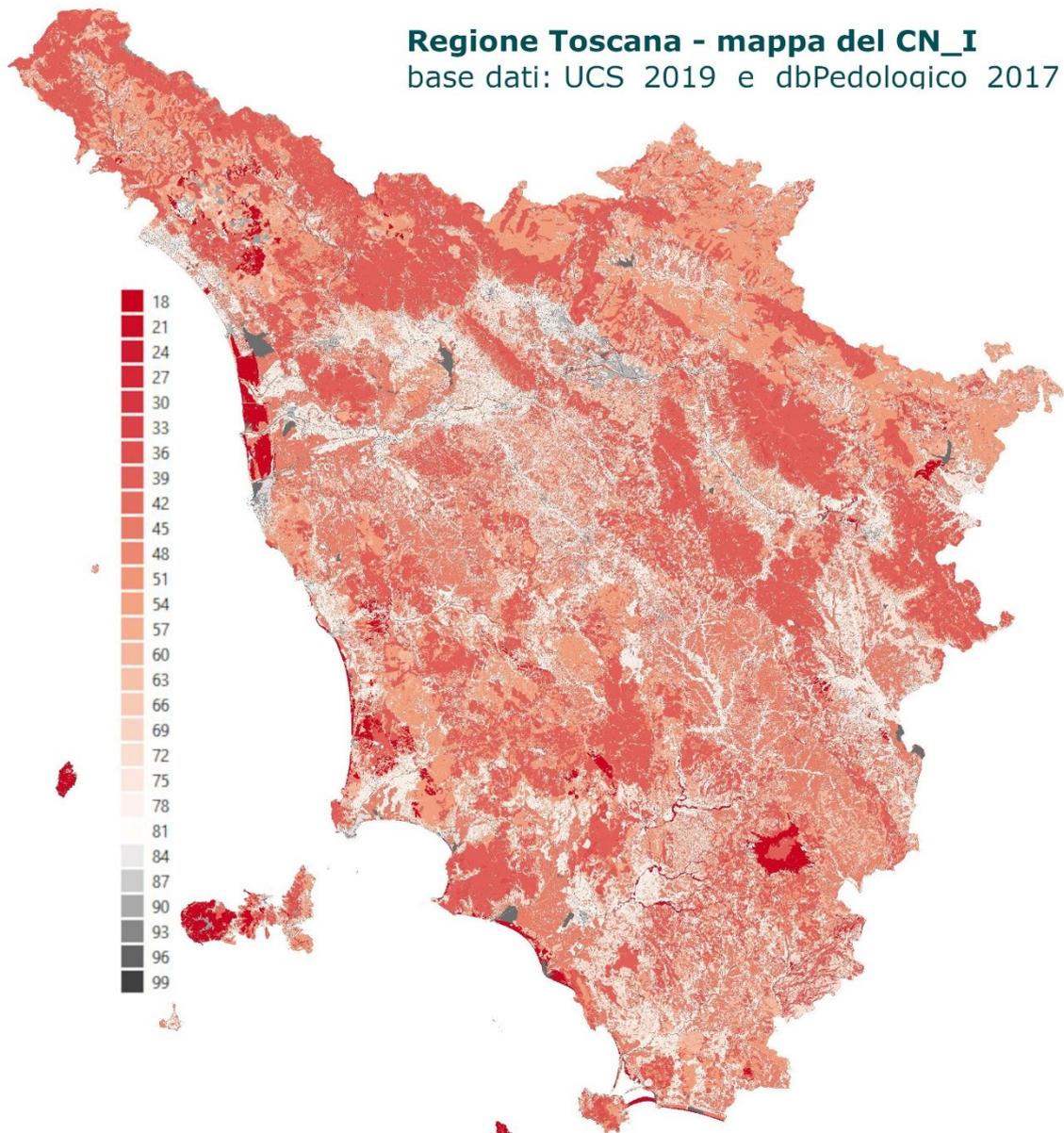


Figura 3- Valori calcolati del parametro CN_I per la regione Toscana

⁷ La maglia scelta è sovrapponibile a quella del DTM idrologico pubblicato dalla Regione Toscana - [Altimetria 10 metri - DTM Idrologico - OpenData - Regione Toscana \(dati.toscana.it\)](#)

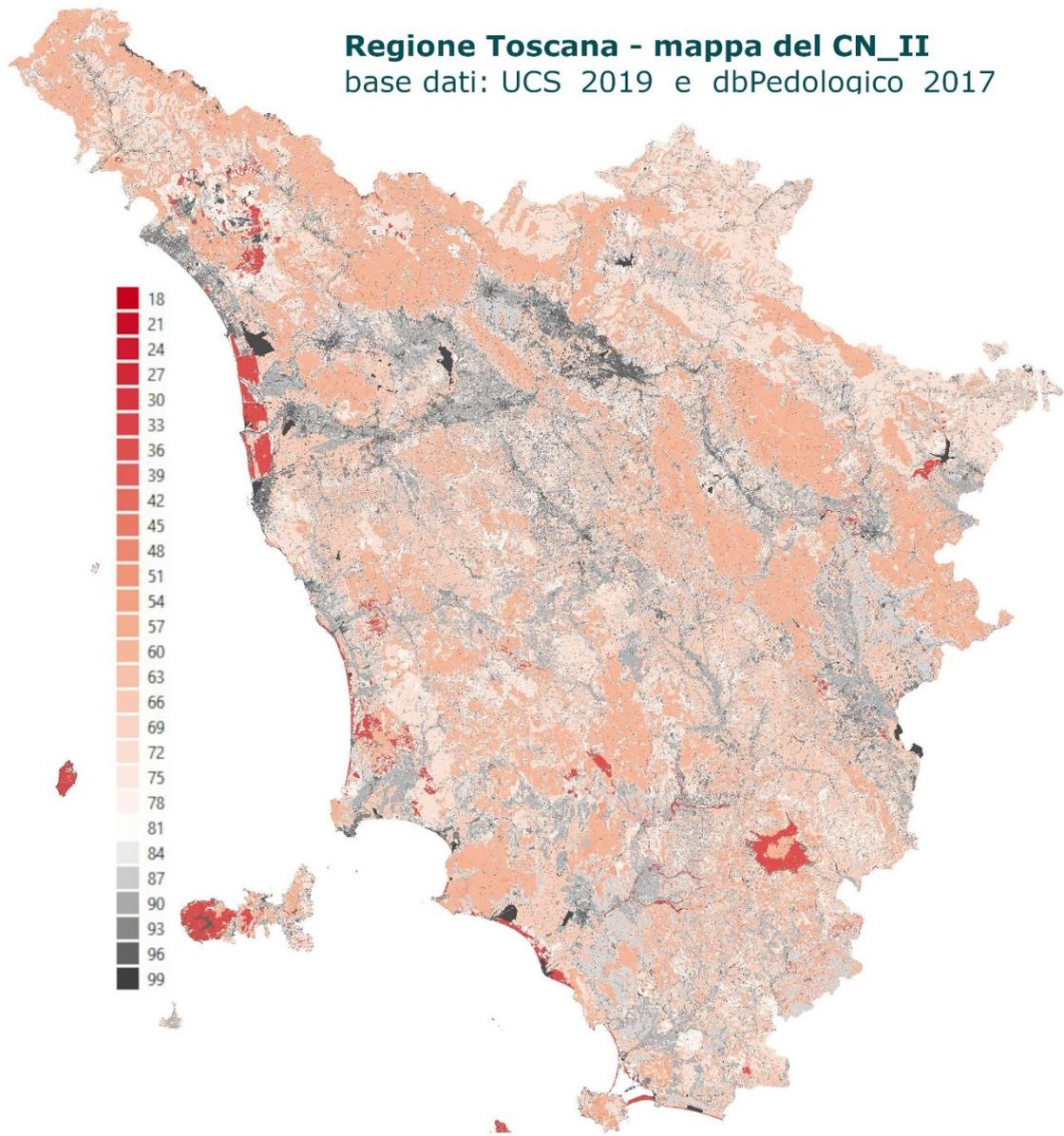


Figura 4- Valori calcolati del parametro CN_II per la regione Toscana

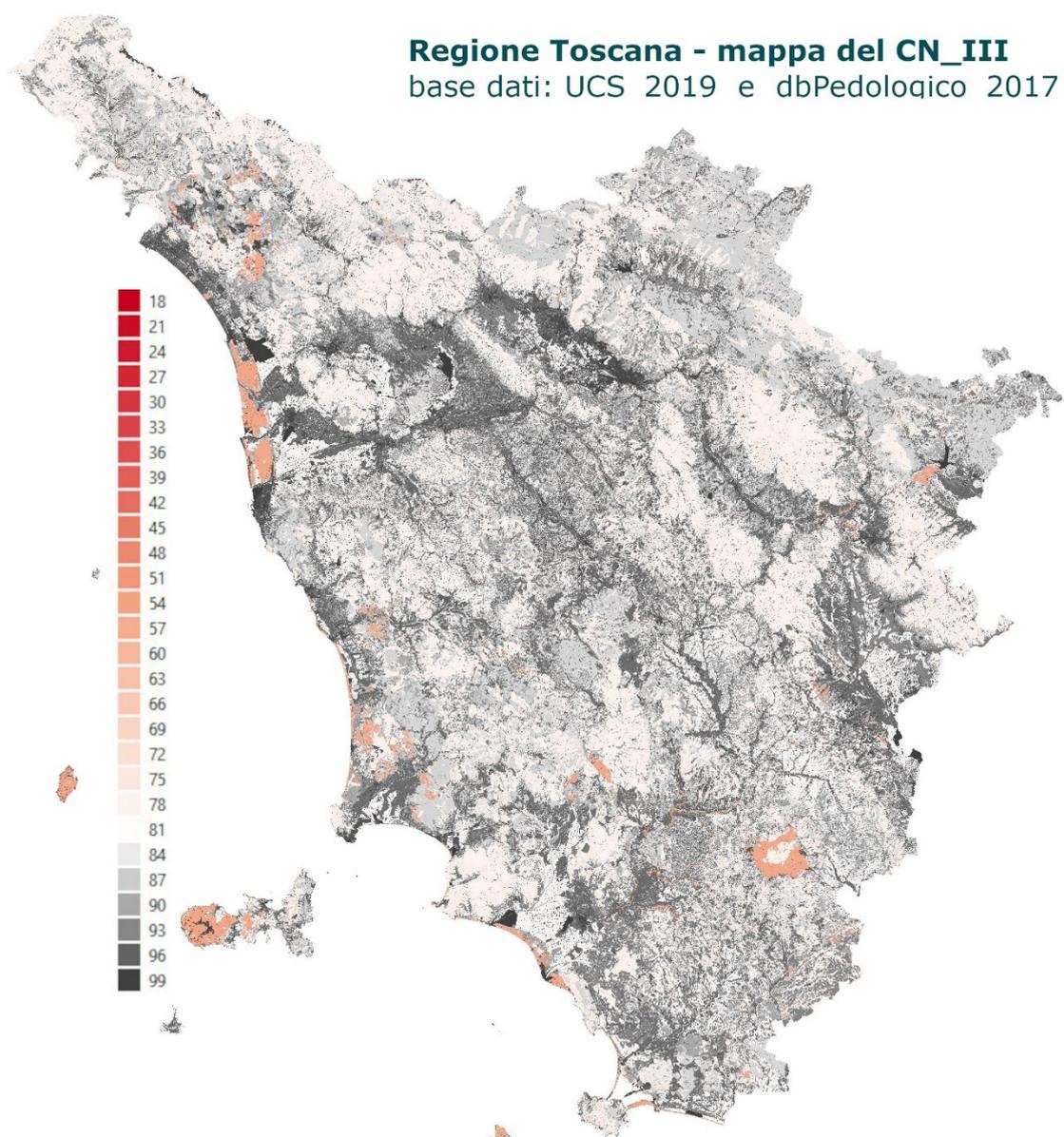


Figura 5- Valori calcolati del parametro CN_III per la regione Toscana

Sovrapponendo alle informazioni della Figura 5 i bacini in studio si determinano i valori medi del parametro CN_III, come riportati nella seguente Tabella 5.

A favore di sicurezza si limita il valore inferiore del CN III a valori congruenti con quelli già utilizzati nelle stesure precedenti del documento, $CN_{III_{min}} = 81$ per i bacini del Capoluogo e $CN_{III_{min}} = 85$ per i bacini della Val di Paglia.

Bacino	CN_III calcolato	CN_III adottato
<i>Zona Abbadia Centro</i>		
Fosso dell'uno	86.88	86.88
San Piero Esassetta	68.86	81.00
Acque Gialle	68.46	81.00
Fosso del Sambuco	57.43	81.00
Fosso del Becco	56.74	81.00
Acqua Bianca	59.18	81.00
Fonte Risola	65.70	81.00
San Piero Erosa	80.46	81.00
Muraglione	66.29	81.00
<i>Zona Val di paglia</i>		
Paglia	81.12	85.00
Bugliole	85.71	85.71
Fosso#1	90.97	90.97
Fosso#2	87.82	87.82
Fosso#3	87.01	87.01
Voltole	84.73	85.00

Tabella 5 – Valori del parametro CN_III calcolati e adottati per i bacini idrografici in studio

6. Analisi idrologica

Nel presente capitolo vengono determinate le massime portate e gli idrogrammi di massima piena attesi nei tratti di interesse dei corsi d'acqua in esame. È stato calcolato l'idrogramma di piena di ciascun bacino per tempi di ritorno di 50 e 200 anni.

Si ricorda che – ai fini della normativa idraulica Toscana L.R. 41/2018 – si confonde il tempo di ritorno di 50 anni qui determinati con quello di 30 anni richiesto stante la sostanziale equivalenza.

Per la stima della portata di piena dei corsi d'acqua indagati, in mancanza di una serie storica di dati di portata al colmo misurata in prossimità della sezione di chiusura, sono stati confrontati più metodi indiretti.

In particolare, si sono analizzati:

1. il metodo definito all'Appendice A.I.1 degli *"Allegati alle Norme"* del Piano di Stralcio Assetto Idrogeologico dell'Autorità di Bacino del Fiume Tevere;
2. il metodo definito all'Appendice A.I.2 degli *"Allegati alle Norme"* del Piano di Stralcio Assetto Idrogeologico dell'Autorità di Bacino del Fiume Tevere;
3. il metodo di valutazione delle portate di piena della Regione Toscana tramite l'utilizzo del software ALTO (v.2.00 aprile 2003);
4. il metodo di valutazione delle portate di piena della Regione Toscana tramite regionalizzazione delle piogge con durata da 1 a 5 giorni e da 1 a 24 ore così come definito al capitolo 4 del *"Quaderno Idrologico del Bacino del Fiume Tevere"* dell'Autorità di Bacino del Fiume Tevere (c.d. ALTO regionalizzato Tevere).

Le valutazioni idrologiche condotte sono successivamente state confrontate tra loro per determinare quella più affidabile e cautelativa da applicare per l'indagine del corso d'acqua come meglio illustrato nel §6.6.

6.1 Metodo definito all'Appendice A.I.1 degli Allegati alle Norme del PAI

Tale metodo è stato adottato per il calcolo della portata al colmo della piena di riferimento nell'ambito degli studi propedeutici alla redazione del piano di bacino del Fiume Tevere del 1998. Tale valore è fornito dalla formula razionale:

$$Q = (h_{d,t} \cdot k_r \cdot k_d \cdot S) / (3.6 \cdot T_c)$$

Dove Q è espressa in m³/s

S superficie del bacino espressa in km²

T_c è il tempo di corrivazione espresso in ore,

h_{d,t} è funzione della latitudine del centroide di riferimento del bacino.

Una volta nota la latitudine del centroide secondo il sistema di coordinate UTM è possibile risalire ai valori dei termini Z/L e Z/Y in base alla Tabella 6 seguente:

Latitudine	Z/L	Z/Y	Latitudine	Z/L	Z/Y
41.233	0.02941	0.21948	42.650	0.01903	0.14899
41.283	0.02919	0.21770	42.683	0.01868	0.14684
41.450	0.02838	0.21140	42.717	0.01833	0.14465
41.467	0.02829	0.21073	42.767	0.01779	0.14133
41.617	0.02744	0.20451	42.850	0.01688	0.13569
41.667	0.02714	0.20234	42.867	0.01669	0.13454
41.683	0.02704	0.20160	42.900	0.01631	0.13224
41.750	0.02661	0.19860	42.950	0.01574	0.12873
41.783	0.02639	0.19706	42.967	0.01554	0.12754
41.833	0.02606	0.19471	43.017	0.01495	0.12397
41.900	0.02559	0.19150	43.033	0.01475	0.12277
41.917	0.02547	0.19068	43.050	0.01455	0.12156
41.967	0.02510	0.18819	43.083	0.01415	0.11912
42.417	0.02133	0.16346	43.150	0.01333	0.11418
42.433	0.02117	0.16247	43.167	0.01312	0.11293
42.450	0.02101	0.16147	43.183	0.01291	0.11168
42.467	0.02085	0.16046	43.200	0.01270	0.11041
42.517	0.02037	0.15740	43.233	0.01228	0.10788
42.550	0.02004	0.15533	43.267	0.01184	0.10531
42.567	0.01988	0.15429	43.317	0.01119	0.10142
42.583	0.01971	0.15325	43.350	0.01075	0.09880
42.600	0.01954	0.15219	43.450	0.00940	0.09080
42.633	0.01920	0.15007			

Tabella 6 – Valori dei parametri Z/L e Z/Y in funzione della latitudine

I valori così calcolati di Z/L e Z/Y vengono inseriti nella formula:

$$S_1 = 90 \cdot Z/L - 11.4 Z/Y$$

Per calcolare poi il valore di E_{h1} espresso in mm con la seguente formula:

$$E_{h1} = (S_1 + 1) \cdot 29$$

Si ricava il valore del termine K_t in funzione del tempo di ritorno e lo si inserisce nella formula:

$$h_{d,t} = K_t \cdot E_{h1} \cdot d^{0.29}$$

dove $h_{d,t}$ è espresso in mm, il pedice d e il termine d rappresentano la durata della pioggia critica espressa in ore pari al tempo di corrivazione e il pedice t è il tempo di ritorno prescelto.

T [anni]	K_T	T [anni]	K_T
5	1.2074	150	2.5666
10	1.4309	200	2.7036
20	1.6803	250	2.8104
25	1.7679	500	3.1442
50	2.0601	750	3.3402
75	2.2427	1000	3.4793
100	2.376		

Tabella 7 – Valori dei quantili adimensionali K_t

k_r si calcola dalla formula:

$$k_r = 1 - \exp(-0.033 \cdot E_{h1} \cdot 1.1 \cdot T_c^{0.25}) + \exp(-0.033 \cdot E_{h1} \cdot 1.1 \cdot T_c^{0.25} - 0.01 \cdot S)$$

k_d è il valore del coefficiente di deflusso della piena in funzione della frazione permeabile del bacino e del tempo di ritorno. Per valori del tempo di ritorno pari a 200 anni si incrementa il valore k_d relativo a 100 anni con la differenza tra questo ed il valore relativo a 50 anni.

La valutazione della permeabilità in termini di “parte permeabile” (% della superficie del bacino sotteso) deriva dalla tradizionale formulazione utilizzata dal Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (Annali Idrologici – Parte II – Elaborazioni e Studi) e assume il valore derivante dalla figura seguente:

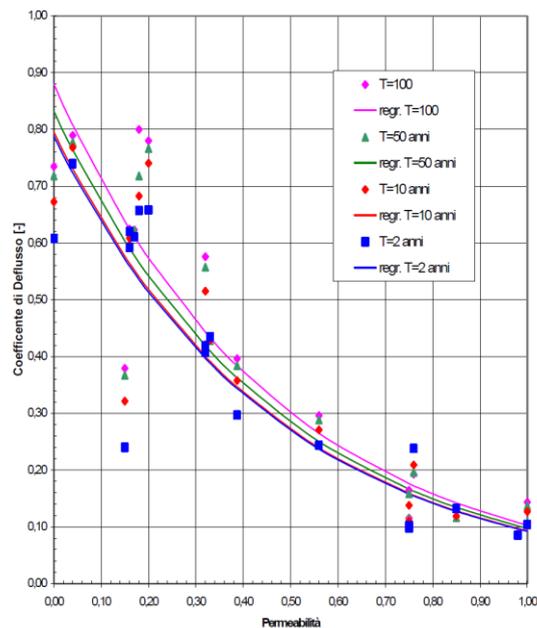


Figura 6 - Coefficiente del deflusso di piena k_d in funzione della permeabilità del bacino

6.2 Metodo definito all'Appendice A.I.2. degli Allegati alle Norme del PAI

Il secondo metodo indagato è quello indicato dall'AdB Tevere per piccoli bacini⁸ risulta quello riportato nel “Quaderno Idrologico del Bacino del Fiume Tevere” dell'Autorità di Bacino del Fiume Tevere.

Tale metodo, che consiste nella definizione della curva di possibilità climatica di assegnato tempo di ritorno in qualunque punto del bacino del Tevere, si basa sulle seguenti relazioni:

$$h = a \cdot D^b \cdot f(K, T)$$

$$f(K, T) = 1 - K \cdot (0.45 + 0.799 \ln(-\ln(1 - 1/T)))$$

essendo h = altezza di pioggia in mm;

a, b = coefficienti della curva di possibilità climatica;

D = durata della precipitazione in ore;

K = coefficiente di variazione;

T = tempo di ritorno in anni.

⁸ Estensione inferiore a 100 km²

Questa procedura consente il calcolo di un'altezza di pioggia puntuale che può pertanto riferirsi al baricentro del bacino stesso.

I parametri a, b, K desunti mediante lettura delle carte con le isolinee relative alle piogge orarie.

Il calcolo della pioggia areale viene effettuato mediante una procedura proposta dal U.S. Weather Bureau che tiene conto sia della durata dell'evento meteorico sia della superficie interessata dallo stesso.

Il metodo è rappresentato analiticamente dalle seguenti formule:

$$H_a = h (P_a/100)$$

Ove

$$P_a = 100 - A/(x_1 + x_2 A)$$

$$x_1 = 100 D / (0.236 + 0.062 D)$$

$$x_2 = 0.003 D + 0.0234$$

H_a = pioggia areale (mm)

h = altezza di pioggia puntuale (mm)

A = $S \times 100$ superficie del bacino (ha)

D = durata della precipitazione (ore)

Il calcolo della pioggia netta, ovvero del volume di piena, viene effettuato in base al metodo del Curve Number, formulato dal Soil Conservation Service nel 1972.

Tale metodo mette in relazione l'altezza H_a di pioggia areale afflitta con l'altezza di pioggia P_n defluita in retta attraverso la seguente formula:

$$P_n = (H_a - 5.08 S')^2 / (H_a + 20.32 S')$$

dove S' rappresenta la massima ritenzione del bacino ed è funzione del tipo di terreno, del suo grado di saturazione e dell'uso del suolo e viene espresso sotto la forma:

$$S' = (1000/CN) - 10$$

Per la determinazione del CN o "Runoff Number" si rimanda al paragrafo 5).

Per il calcolo della portata al colmo la forma dell'idrogramma adottata è quella proposta dal metodo SCS-CN dove la fase ascendente dell'idrogramma pesa per il 37.5% del volume totale di deflusso con valore della portata al colmo determinati con la formula:

$$Q = (P_n \cdot A) / (360 \cdot T_c)$$

dove Q portata al colmo (m^3/s); P_n pioggia netta areale (mm); T_c tempo di corrivazione (ore); A superficie del bacino (ha).

Si ottengono quindi le portate al colmo per tempo di ritorno 50 e 200 anni.

6.3 Valutazione portate di piena tramite software ALTO (v.2.00 aprile 2003)

Sono state condotte indagini, tramite software ALTO (v.2.00 aprile 2003) della Regione Toscana, relativamente alle aste di interesse studiate dal software con particolare riferimento a:

- Fosso dell'Acqua Gialla + Sambuco (codice asta n°11241 – codice IDRETLR79 TS45099);
- Fosso San Pietro all'Esassetta (codice asta n°10956);
- Fosso del Becco (codice asta n°11250);
- Fosso di Fonte Risola (codice asta n°11519);
- Fiume Paglia con sezione di chiusura ubicata subito a monte della confluenza con il Torrente degli Olmarelli (codice asta n°11874 11241 – codice IDRETLR79 TS46578)

Adeguando, qualora non congruente, l'estensione dell'area del bacino a quella calcolata nel paragrafo 4 sono stati ricalcolati gli idrogrammi e i relativi valori di picco mantenendo gli altri parametri invariati. In particolare, per le condizioni di partenza per la costruzione dell'idrogramma è stata scelta una durata di evento variabile atta a massimizzare la portata di picco, ietogramma costante e utilizzati i parametri $f_a = 0.036$, $f_b = 0.25$ e $f_c = 0.01$.

6.4 ALTO con piogge regionalizzate

Si è scelto anche di valutare le portate di piena dei bacini ancora con il software ALTO (v.2.00 aprile 2003) utilizzando però la regionalizzazione delle piogge come definito dall'AdB Tevere.

Per fare ciò sono stati immessi nel software ALTO i coefficienti a, n, m provenienti dai calcoli e valutazioni fatte nel paragrafo 6.2.

Tale operazione è stata condotta conducendo un parallelo tra la formula utilizzata per la definizione della curva di possibilità climatica dell'AdB Tevere e la curva di possibilità climatica della Regione Toscana:

$$h = a \cdot D^b \cdot f(K, T) \quad [\text{AdB Tevere}]$$

essendo h = altezza di pioggia in mm;

a, b = coefficienti della curva di possibilità climatica;

D = durata della precipitazione in ore;

K = coefficiente di variazione;

T = tempo di ritorno in anni.

$$h = a \cdot T_c^n \cdot T^m \quad [\text{Regione Toscana}]$$

a, n, m = coefficienti della curva di possibilità climatica;

T_c = tempo di corrivazione in ore;

T = tempo di ritorno in anni.

In particolare, si può facilmente asserire che attribuendo la durata della precipitazione uguale al tempo di corrivazione i coefficienti a , b della curva di possibilità climatica dell'AdB Tevere sono uguali rispettivamente ai coefficienti a , n della Regione Toscana.

Per quanto riguarda invece il coefficiente m si è dovuto riportare la funzione $f(K,T)$ nella forma T^m ed essendo la formula dell'AdB Tevere funzione di K e T si è giunti ad un valore di m diverso per ogni tempo di ritorno.

6.5 Confronto con le piogge regionalizzate della Regione Toscana

La scelta di utilizzare le piogge regionalizzate secondo la metodologia dell'Autorità di Bacino del Tevere è dovuta al fatto che LSPP derivate da queste portano a eventi pluviometrici (e quindi di piena) più significativi.

Nel marzo 2014 sono stati pubblicati dalla RT i nuovi dati di regionalizzazione delle piogge che forniscono i parametri a ed n della LSPP con risoluzione di 1 km x 1 km nel territorio regionale.

Grazie a questi valori è stato svolto un confronto delle LSPP utilizzate nel §6.4 per il bacino del Fiume Paglia di cui anche i bacini del capoluogo fanno parte.

Sono stati estrapolati i valori a ed n relativi alle piogge con tempo di ritorno 50 e 200 anni per le celle interessate dal bacino del Fiume Paglia.

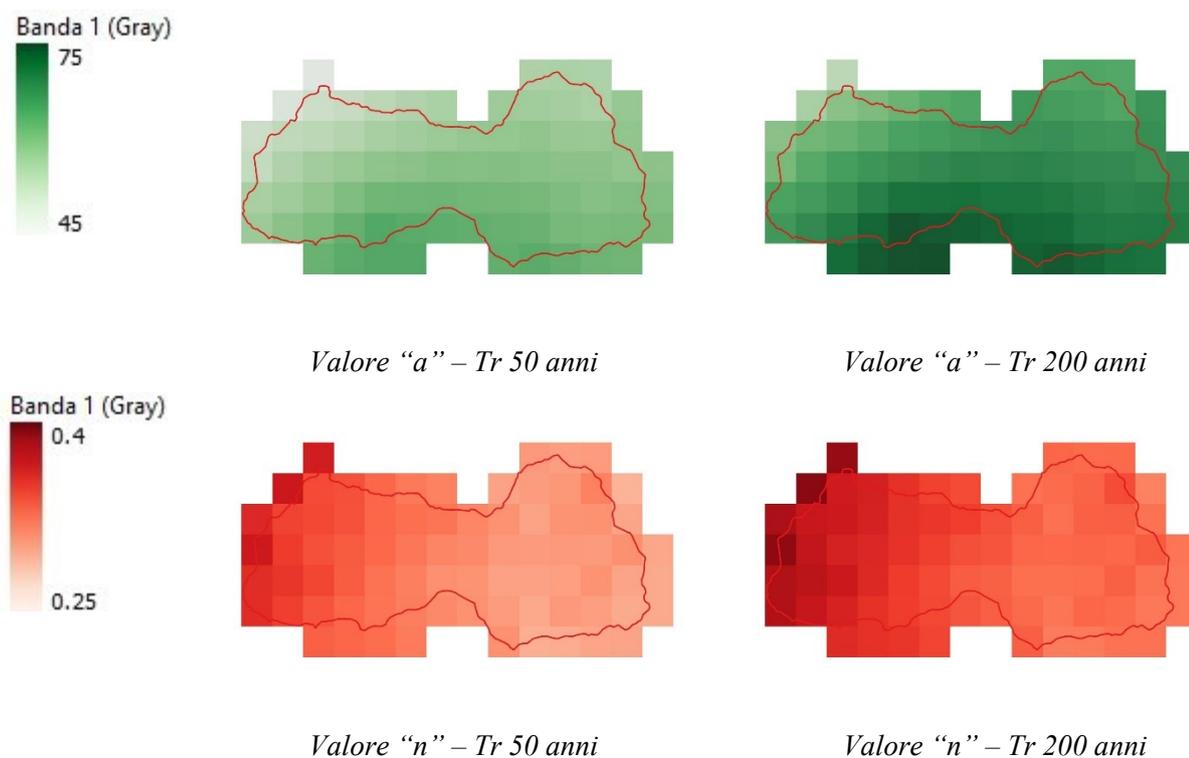


Figura 7 – Valori dei parametri “ a ”, “ n ” della LSPP (TOS) tr 50 e 200 anni per il bacino del Paglia

Successivamente è stato eseguito, in ogni cella, il calcolo dell'altezza di pioggia per i diversi tempi di pioggia e per i diversi tempi di ritorno indagati. La media delle altezze di pioggia ha permesso di definire le LSPP (TOS) di cui alla figura Figura 8.

Tali valori sono stati successivamente confrontati con i valori di calcolo riportati al paragrafo 6.4 (TEV) occupandosi di trasformare il valore a con la formula $A=a*Tr^m$ essendo il secondo fattore integrato nel valore di a per la regionalizzazione della Toscana.

Coefficiente di calcolo		
Tr	50	200
a	32.5	32.5
m	0.192	0.179
A	68.913	84.115
n	0.330	0.330

Dai valori così ottenuti è stato pertanto possibile paragonare le curve di possibilità pluviometrica di calcolo con metodologia AdB Tevere con quelle provenienti dalla nuova regionalizzazione Toscana 2014.

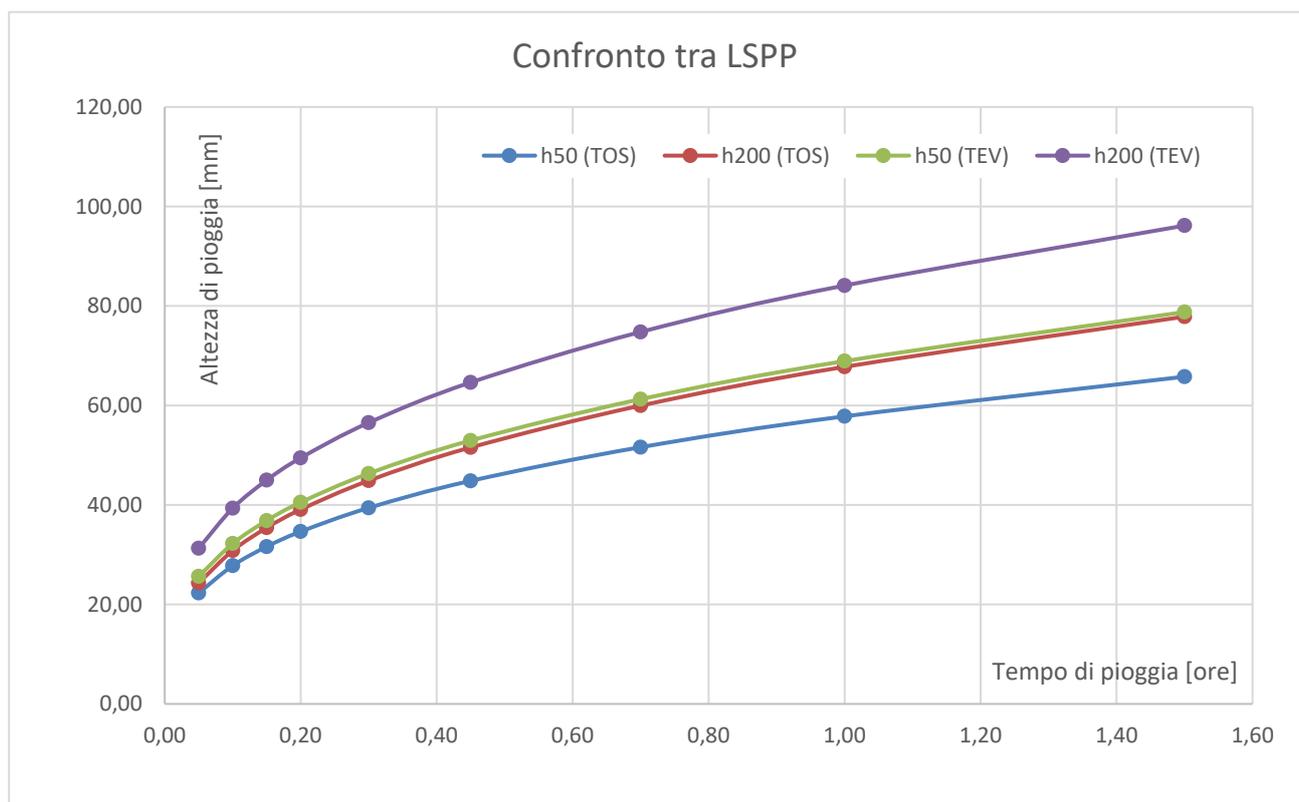


Figura 8- Confronto LSPP AdB Tevere e RT per il bacino del Fiume Paglia

Si evince chiaramente dalla figura che le altezze di pioggia ottenute con la regionalizzazione dell'AdB Tevere risultano più alte e cautelative di quelle provenienti dalla regionalizzazione Toscana del marzo 2014.

6.6 Analisi dei risultati e scelta del modello idrologico

Analizzando i risultati ottenuti si vede che il metodo definito all'Appendice A.I.1 degli Allegati alle Norme del PAI Tevere è solitamente il meno cautelativo dei 4 metodi indagati e pertanto risulta preferibile scartarlo.

La scelta del metodo idrologico più idoneo si restringe fra quelli descritti ai paragrafi 6.2 (metodo A.I.2), 6.3 (Alto) e 6.4 (Alto regionalizzato Tevere).

La differenza sostanziale degli ultimi due metodi è rappresentata dalla scelta della curva di possibilità climatica. Nel metodo illustrato al paragrafo 6.4 è stata adottata infatti la curva di possibilità climatica derivante dagli studi svolti dall'AdB Tevere sul proprio bacino (del quale l'intero centro abitato di Abbadia San Salvatore fa parte) in sostituzione della curva utilizzata dalla Regione Toscana.

Ritenendo più cautelativo il calcolo di portata con ALTO regionalizzato, ovvero "personalizzato", con le piogge del bacino del Tevere, come ben dimostrato al paragrafo precedente si scarta anche il metodo al paragrafo 6.3.

È stato quindi ristretto il campo di scelta del modello idrologico più idoneo fra quello definito all'Appendice A.I.2. e ALTO regionalizzato.

Per il metodo A.I.2., vista la sua forte correlazione e dipendenza con il tempo di corrivazione, è stato approfondito il calcolo di portata tenendo conto di differenti Tc.

Come scelta più cautelativa e in accordo a quanto consigliato nel quaderno AdB Tevere al paragrafo 5.1 è stato scelto per bacini con superficie inferiore a 10 km² la formulazione di Kirpich mentre per bacini superiori ai 10 km², di cui solo il Fiume Paglia fa parte, la formulazione di Giandotti.

Nome bacino			<i>Metodo A.I.2</i>		<i>ALTO Regionalizzato</i>		diff % Tr200
	Abac [Km]	Abac [ha]	Q50 [mc/s]	Q200 [mc/s]	Q50 [mc/s]	Q200 [mc/s]	
San Piero Esassetta TS44111	0.43	43	4.79	7.86		8.64	9.97%
Fosso Acqua Gialla TS78935	2.54	254	23.93	36.71		35.23	-4.03%
Fosso Becco TS45442	0.45	45	5.02	8.23		8.11	-1.47%
Fonte Risola TS45914	2.77	277	23.13	34.26		32.32	-5.66%
Fosso Acqua Gialla + Sambuco	2.86	286	26.26	40.00		39.65	-0.88%
Fiume Paglia	53.2	5316	269.56	359.87	371.827	496.736	38.03%

Tabella 8 – Confronto portate Metodo A.I.2 con ALTO Regionalizzato

Come si può notare le portate ottenute con l'appendice A.I.2 e le portate ottenute con ALTO regionalizzato sono sostanzialmente equivalenti eccetto per il Fiume Paglia.

Pertanto, al termine di questa indagine comparativa, si ritiene di utilizzare in accordo alle indicazioni dell'Autorità di Bacino del Fiume Tevere il metodo A.I.2 per la totalità dei bacini indagati fatta eccezione per il fiume Paglia per il quale si adotta il metodo ALTO regionalizzato poiché risulta largamente più cautelativo.

Le portate di riferimento per le successive verifiche idrauliche saranno quindi:

Nome bacino	Q50 [mc/s]	Q200 [mc/s]
Fosso dell'Uno TS43769	5.23	8.37
San Piero Esassetta TS44111	4.79	7.86
Fosso Acqua Gialla TS78935	23.93	36.71
Fosso Sambuco TS45087	3.57	5.82
Fosso Becco TS45442	5.02	8.23
Fosso Acqua Bianca TS45676	0.90	1.70
Fonte Risola TS45914	23.13	34.26
San Piero loc. Erosa TS45291	1.89	3.29
Fosso Acqua Gialla + Sambuco	26.26	40.00
Fiume Paglia	371.83	496.74
Voltole	16.33	23.74
Bugliole	16.57	24.29
Fosso#1	2.71	3.75
Fosso#2	3.70	5.34
Fosso#3	2.80	4.15

Tabella 9 – Portate di calcolo adottate per le verifiche idrauliche

Per gli idrogrammi utilizzati quale dati di ingresso nella modellazione idraulica bidimensionale si rimanda all'allegato 1 - Idrogrammi di piena.

6.7 Confronto con portate derivanti da precedenti studi

Le portate sopra definite sono state quindi confrontate con la precedente versione dello studio consegnata in data marzo 2022 e con altri studi disponibili sui corsi d'acqua indagati.

Nome bacino	Portate di Calcolo rev.1		Precedente studio rev.0	Studio Castelli 2020	Studi Extrò		Studio by-pass Val di Paglia
	Q50 [mc/s]	Q200 [mc/s]	Q200 [mc/s]	Q200 [mc/s]	Q50 [mc/s]	Q200 [mc/s]	Q200 [mc/s]
Fosso dell'Uno TS43769	5.23	8.37	5.77				
San Piero Esassetta TS44111	4.79	7.86	8.65				
Fosso Acqua Gialla TS78935	23.93	36.71		24.02	29.96	35.94	
Fosso Sambuco TS45087	3.57	5.82			4.69	6.37	
Fosso Becco TS45442	5.02	8.23	8.11	2.18	5.17	7.63	
Fosso Acqua Bianca TS45676	0.90	1.70		0.735		1.17	
Fonte Risola TS45914	23.13	34.26	32.32	21.33	27.48	36.41	
San Piero loc. Erosa TS45291	1.89	3.29					
Fosso Acqua Gialla + Sambuco	26.26	40.00	39.65	26.58	38.13	49.33	
Fiume Paglia	371.83	496.74	496.74				502.01
Voltole	16.33	23.74	32.15				
Bugliole	16.57	24.29	32.30				
Fosso#1	2.71	3.75	3.50				
Fosso#2	3.70	5.34	6.23				
Fosso#3	2.80	4.15	5.24				

Tabella 10 – Portate di calcolo confrontate con altri studi idrologici-idraulici disponibili

Dal confronto sopra riportato si evince che le attuali portate di calcolo sono assolutamente comparabili per i corsi d'acqua del centro abitato rispetto al precedente studio, mentre per quanto

riguarda gli affluenti minori del Fiume Paglia in val di Paglia gli attuali valori delle portate duecentennali sono leggermente meno severe rispetto al marzo 2022 (rev.0). Questo è dovuto all'affinamento dei valori del CN che ha portato ad una loro generale riduzione (cfr. §5).

Per quanto riguarda il confronto con le portate dello studio Castelli (cfr. §8.3) dell'anno 2020, ottenute con il modello idrologico MOBIDIC, si nota come quest'ultime siano sensibilmente inferiori rispetto a quelle calcolate nel presente studio.

I valori determinati sono in linea con le valutazioni eseguite dallo studio Extrò, volte alla progettazione dell'adeguamento dei canali tombati del centro abitato; si riscontra infatti un valore delle portate con tempi di ritorno cinquantennali e duecentennali comparabili a quelle di calcolo.

Nello specifico lo studio idrologico condotto, essendo orientato alla valutazione di perimetri di pericolosità idraulica cautelativi, ha tenuto conto di adeguati margini di sicurezza.

La portata del Fiume Paglia è stata confrontata con la portata di calcolo per la realizzazione del by-pass tra la SP n°24 "di Radicofani" e la SRT n°2 "Cassia". Tale portata risulta quasi identica (scarto dell'1%) rispetto a quella di calcolo.

7. Analisi idraulica

La modellazione idraulica dei tratti fluviali di interesse per la determinazione delle condizioni di pericolosità idraulica è stata condotta mediante il software HEC-RAS 6.3.1 (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) prodotto dal Corpo degli Ingegneri dell'esercito americano (USACE).

7.1 Descrizione del modello idraulico

Le simulazioni sono state eseguite in regime di moto vario mono e bidimensionale e sono descritte in dettaglio nel seguito. In particolare, si è proceduto ad implementare un'analisi monodimensionale in alveo e bidimensionale al di fuori dell'alveo inciso.

Per la definizione delle condizioni di pericolosità dell'area sono state effettuate più simulazioni, corrispondenti alle durate di pioggia critiche e ai diversi tempi di ritorno per i corsi d'acqua in esame.

Per agevolare in termini temporali la modellazione, e per la non interferenza idraulica tra zone molto distanti tra loro, sono stati creati più modelli idraulici di dettaglio.

7.1.1 Modellazione monodimensionale

La forma delle equazioni del moto vario (o equazioni di De Saint Venant) utilizzate in HEC-RAS è la seguente:

Equazione di continuità:

$$\frac{(\partial A)}{(\partial t)} + \frac{(\partial(\Phi \cdot Q))}{(\partial x_c)} + \frac{(\partial[(1-\Phi) \cdot Q])}{(\partial x_f)} = 0$$

Equazione di conservazione della quantità di moto:

$$\frac{(\partial Q)}{(\partial t)} + \frac{(\partial(\Phi^2 Q^2 / A_c))}{(\partial x_c)} + \frac{(\partial((1-\Phi^2) Q^2 / A_f))}{(\partial x_f)} + g A_c \left[\frac{(\partial Z)}{(\partial x_c)} + S_{f_c} \right] + g A_f \left[\frac{(\partial Z)}{(\partial x_f)} + S_{f_f} \right] = 0$$

con:

$$Q_c = \Phi \cdot Q ; \quad \Phi = (K_c) / (K_c + K_f)$$

I pedici c ed f si riferiscono rispettivamente al *main channel* (alveo centrale) ed alle *floodplain* (aree golenali), Q rappresenta la portata, g l'accelerazione di gravità, x l'ascissa, t il tempo, K la conveyance (o fattore di trasporto) della sezione, Z la quota del pelo libero (somma della quota di fondo z e dell'altezza liquida y), A l'area liquida, Sf la pendenza della linea dell'energia. HEC-RAS utilizza generalmente il modello completo delle equazioni di De Saint Venant. Nelle analisi in moto vario le tecniche di soluzione numerica delle equazioni del moto assumono un'importanza maggiore rispetto alle analisi a moto permanente. La soluzione numerica di tali equazioni in regime di corrente lenta è basata su un metodo alle differenze finite di tipo implicito a quattro punti, noto in letteratura come *box scheme*. Dalla discretizzazione alle differenze finite delle equazioni del moto applicate ad un tratto di corso d'acqua, e dall'applicazione delle condizioni al contorno, risulta un sistema lineare di N equazioni in N incognite, con N pari a 2 volte il numero di sezioni in cui è stato suddiviso il corso d'acqua meno le sezioni in cui sono state assegnate le condizioni al contorno. Tale sistema deve

essere risolto ad ogni successivo istante di calcolo. Il sistema di equazioni lineari viene risolto con metodo iterativo, utilizzando l'algoritmo skyline, specificatamente pensato per la soluzione dei problemi di moto vario nelle reti a pelo libero.

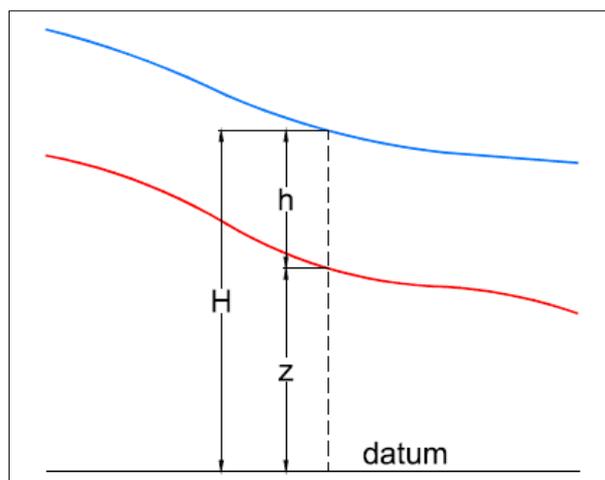
Nel caso di corrente mista lenta o veloce HEC-RAS utilizza la tecnica LPI "Local Partial Inertia", mediante la quale si passa gradualmente dalla soluzione delle equazioni complete del moto alla soluzione del modello parabolico delle equazioni del moto vario. Il modello parabolico viene applicato dal programma soltanto nei tratti di corso d'acqua in cui si ha un numero di Froude maggiore di un valore soglia definibile dall'utente (generalmente si assume $Fr=1$, corrispondente al passaggio della corrente attraverso lo stato critico). Il modello matematico riesce così a garantire una buona stabilità di calcolo anche nei tratti interessati da corrente veloce o mista, pur mantenendo un'adeguata accuratezza di calcolo.

Per ulteriori dettagli sulle equazioni e gli algoritmi di calcolo si rimanda alla manualistica di HECRAS ed in particolare all'Hydraulic Reference Manual.

7.1.2 Modellazione bidimensionale

Il modello matematico bidimensionale utilizza le equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto, che vengono risolte con uno schema ai volumi finiti.

Nell'immagine che segue è mostrato il sistema di riferimento di Hec-Ras 2D, la quota del terreno è indicata con $z(x,y)$ l'altezza idrica con $h(x,y,t)$; la quota del pelo libero con $H(x,y,t) = z(x,y) + h(x,y,t)$.



Conservazione della massa: assumendo il fluido incomprimibile, l'equazione differenziale della conservazione della massa (continuità) in moto vario è:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(h \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(h \cdot v)}{\partial y} + q = 0$$

in cui t è il tempo, u e v sono rispettivamente le componenti di velocità lungo le direzioni x ed y e q è la portata in ingresso ed in uscita dovuta a immissioni od uscite di acqua.

Conservazione della quantità di moto: quando la dimensione orizzontale caratteristica dell'area di studio è molto maggiore della dimensione verticale, gli effetti legati alla componente verticale della velocità possono essere trascurati e si può assumere una distribuzione idrostatica delle pressioni, a

partire dalle equazioni di Navier-Stokes. In tali ipotesi e nell'ipotesi di densità del fluido costante, l'equazione di conservazione della quantità di moto assume la seguente forma:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} = -g \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f \cdot u + f \cdot v$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} = -g \cdot \frac{\partial H}{\partial y} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f \cdot v - f \cdot u$$

in cui oltre ai simboli già illustrati, g è l'accelerazione di gravità, ν_t è il coefficiente di viscosità turbolenta, c_f è il coefficiente di attrito al fondo, ed f è il coefficiente di Coriolis.

Utilizzando la formula di Chézy il coefficiente di scabrezza sul fondo è dato da:

$$c_f = \frac{g \cdot |V|}{C^2 \cdot R}$$

in cui g è l'accelerazione di gravità, $|V|$ è il modulo del vettore velocità, C è il coefficiente di Chézy ed R è il raggio idraulico. Utilizzando la formula di Manning $C = R^{1/6}/n$, in cui n è il coefficiente di scabrezza di Manning, pertanto si ha:

$$c_f = \frac{n^2 \cdot g \cdot |V|}{R^{4/3}}$$

Per la modellazione del campo di moto HEC-RAS utilizza l'approccio batimetrico *sub-grid* sviluppato da Casulli. Con tale approccio si riesce a sfruttare informazioni topografiche ad alta risoluzione (ad esempio dati Lidar con passo della griglia pari ad 1m) pur utilizzando celle di calcolo a dimensione caratteristica maggiore rispetto alla risoluzione dei dati in ingresso. Per ogni singola cella di calcolo, infatti, in fase di pre-processo viene ricavata la legge di variazione con la quota del pelo libero delle grandezze idrauliche caratteristiche, basandosi sui dati topografici ad alta risoluzione relativi alla cella stessa. Vengono così determinate: curva di vaso della cella, area, contorno bagnato e raggio idraulico su ogni bordo della cella. Tale schema di risoluzione consente di sfruttare al massimo il dettaglio dei dati in ingresso.

7.2 Caratteristiche generali dei modelli idraulici

Le analisi idrauliche sono state condotte implementando i seguenti modelli numerici bidimensionali:

- Modello idraulico Abbadia Centro, costituito dai sotto modelli per il Fosso dell'Uno, Fosso di S. Piero all'Esassetta, Fosso di S. Piero all'Erosa e un unico modello per il centro abitato che prende in esame il comportamento dei Fossi Acqua Gialla, Sambuco, Becco, Acqua Bianca e Fonte Risola.
- Modello idraulico Val di Paglia (unico) che analizza il comportamento dei corsi d'acqua Fiume Paglia e affluenti Fosso delle Bugliole, Voltole e affluenti minori (TS 45631 e TS45770).

Le geometrie dei modelli (riportate in allegato 2 – Geometria dei modelli HEC RAS al quale si rimanda per maggiori dettagli) sono state implementate dettagliando le basi dati lidar disponibili per

l'area con i rilievi topografici appositamente svolti con le specifiche campagne di indagine già illustrate.

In particolare è stata verificata la congruenza tra i rilievi disponibili ed i dati LIDAR per definire la rete di calcolo bidimensionale in HEC-RAS con maglia variabile in funzione della necessità di approfondimento di indagine, utilizzando opportune *break lines*, *terrain modifications*, ecc.. in corrispondenza di elementi morfologicamente ed idraulicamente significativi, quali strade, corsi d'acqua, rilevati.

I canali tombati presenti nel territorio sono stati modellati con *culvert* di connessione tra *storage area*. I *culvert* sono stati geometricamente definiti sulla base dei rilievi disponibili e la modellazione effettuata ha tenuto conto della loro capacità di deflusso a bocca piena e bocca parzialmente ostruita, per simulare eventuali situazioni di ostruzione dell'entrata legate al trasporto flottante.

7.2.1 Parametri di scabrezza e coefficienti di perdita concentrata

I coefficienti di scabrezza n di Manning sono stati fissati avvalendosi del confronto tra le caratteristiche dei tratti in esame ed altri corsi d'acqua di caratteristiche di scabrezza simili, per cui si hanno a disposizione misure di taratura.

Il coefficiente di scabrezza delle celle bidimensionali è stato assunto pari a 0.03, valore ritenuto maggiormente attendibile a seguito di prove di modellazione.

In particolare, per l'area abitata del capoluogo, su richiesta degli Uffici del Genio Civile, sono stati considerati gli edifici come impermeabili, diversamente dalla precedente stesura dove erano considerati semipermeabili. Questo ha comportato una concentrazione dei battenti e delle velocità dell'esondazione nelle sedi stradali, scontornando dall'inondazione i singoli edifici.

In via cautelativa gli scriventi pur recependo le maggiori criticità in termini di velocità e battente idraulico sulle strade, hanno inteso di estendere agli edifici la pericolosità idraulica delle strade adiacenti.

7.2.2 Condizioni al contorno di monte

I modelli idraulici necessitano di condizioni al contorno di monte e di valle. HEC-RAS permette di inserire come input idrologici sia gli idrogrammi nelle sezioni idrauliche che le precipitazioni nelle aree bidimensionali di esondazioni.

Nei modelli idraulici in esame sono state assunte come condizioni al contorno di monte gli idrogrammi calcolati nell'analisi idrologica, questi definiti per la sezione di valle della stessa asta così da comprendere, in via cautelativa, anche il bacino tributario presente tra le sezioni di monte e valle della modellazione idraulica.

Gli idrogrammi sono stati applicati nelle *boundary condition line* di monte.

7.2.3 Condizioni al contorno di valle

Per quanto riguarda le condizioni al contorno di valle, al fine di modellare il deflusso delle portate, il software permette di inserire la pendenza dell'alveo o delle aree di esondazione in caso di deflusso libero, oppure una quota fissa del pelo libero nel caso in cui il corso d'acqua sfoci in mare, in un lago o in un invaso. Trovandoci in zone montane e collinari, come condizioni al contorno

di valle si è scelta in via cautelativa una pendenza pari a 0.05, sia per gli alvei incisi che per le aree d'esondazione.

Tale condizione, essendo posta sul limite dell'area di studio di valle (*boundary line*), questa ubicata ben oltre l'area di dettaglio, non risulta influente sui risultati della zona di indagine.

7.3 Modello idraulico Abbadia Centro

È costituito, oltre che dal modello idraulico del capoluogo dove sono stati inseriti i contributi di portata dei fossi Acqua Gialla, Sambuco, Becco, Acqua Bianca e Fonte Risola per studiarne l'effetto combinato delle esondazioni, dai modelli del:

- Fosso dell'Uno;
- Fosso di S. Piero all'Esassetta;
- Fosso di S. Piero all'Erosa.

L'area di indagine dei corsi d'acqua a monte dei tratti tombati, in accoglimento alle richieste del Genio Civile, è stata ampliata per valutare l'effetto di eventuali esondazioni che, una volta verificatesi, non riuscissero più a rientrare nell'alveo idraulico; conseguentemente sono state spostate verso monte le *boundary lines*.

In particolare, sono stati analizzati i tratti a monte degli imbocchi dei tombamenti dei fossi Acqua Gialla, Fonte Risola, Acqua Bianca, Uno, S. Piero Esassetta, S. Piero Erosa rilevati con apposita campagna topografica seguita dal Geom. Alessio Mazzetti.

La restituzione topografica di dettaglio ha consentito di modificare⁹ localmente il *terrain* di HEC-RAS descrivendo con esattezza anche le zone con presenza di manufatti idraulici quali briglie, gabbionate, muri, ecc...

Sui *terrains* modificati è stata quindi costruita la maglia di calcolo di 1x1 m per l'analisi idraulica bidimensionale in HEC-RAS. Caso particolare è rappresentato dal capoluogo dove la maglia di riferimento, vista l'estensione dell'area di indagine, è stata scelta di 2x2 m con raffittimenti a 30x30 cm¹⁰ nelle zone di imbocco dei tombamenti.

Il passo temporale di indagine è stato fissato in ogni caso a 0.1 s per garantire la corretta convergenza numerica del calcolo.

Nello specifico del capoluogo si è analizzata la funzionalità dei tombamenti con tempi di ritorno di 50 e 200 anni inserendo nel modello idraulico opportuni collegamenti (*culvert*) tra aree di territorio, così da poter ottenere in via automatica la valutazione delle portate d'acqua non smaltite dai tombamenti e la loro distribuzione sul terreno. Per il capoluogo sono stati modellati due scenari:

- Tombamento libero con il *culvert* rappresentativo delle giuste dimensioni geometriche;
- Tombamento parzialmente efficace con il *culvert* ostruito al 50%¹¹ per tenere conto dell'assenza di briglie a pettine a monte dei tratti tombati e della conseguente possibilità di arrivo di materiale flottante capace di ostruire gli imbocchi.

⁹ Opzione *modification*

¹⁰ Opzione *refinement*

¹¹ Opzione *depth blocked*

7.3.1 Dimensioni dei tombamenti

Fosso dell'Uno

Percorrendo la Strada Provinciale del Monte Amiata provenendo da nord in ingresso ad Abbadia San Salvatore in località Esasseta, esiste un tombamento alla S.P. del Monte Amiata n. 18A per consentire l'attraversamento del fosso dell'Uno.

La sezione di imbocco di tale tombamento risulta essere un tubolare in CLS di diametro 800 mm, dimensione che è stata riscontrata anche a metà percorso. La pendenza media del tombamento è del 14%.

È stato modellato il *culvert* con le dimensioni della sezione di imbocco parzializzata al 50%.



Figura 9- Imbocco del tombamento del fosso dell'Uno

Fosso di San Pietro all'Esasseta

Proseguendo l'avvicinamento al Capoluogo sulla SP 18A si incontra il fosso di S. Piero all'Esasseta che attraversa la strada provinciale con tratto tombato.

La sezione di imbocco di tale tombamento risulta essere un tubolare in CLS di diametro 1000 mm con pendenza 15%, mentre lo sbocco risulta essere in sezione scatolare in CLS delle dimensioni 1.5 x 1.5.m¹².

È stato modellato il *culvert* con le dimensioni della sezione di imbocco parzializzata al 50%.

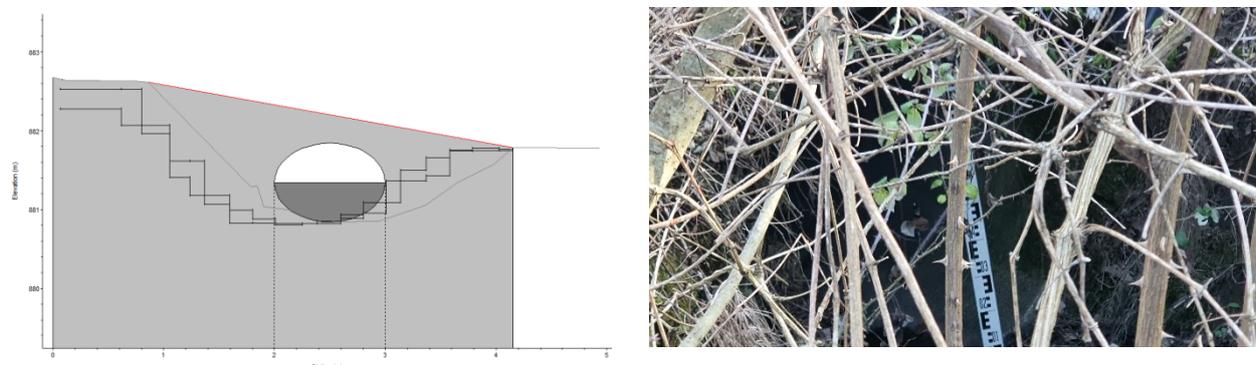


Figura 10- Imbocco del tombamento del fosso di S. Piero all'Esasseta sotto S.P. 18A

¹² Recentemente è stata affiancata alla sezione di sbocco una seconda canna tubolare che tuttavia scarica le acque di drenaggio dell'opera di consolidamento di versante da poco conclusa.

Stante l'estensione verso monte dell'area di indagine si è studiato anche l'attraversamento sulla strada per loc. Ferraiole rappresentato da due tubolari in CLS di diametro 500 mm con lunghezza circa 9.5 m e pendenza dell'11%.

È stato modellato il *culvert* con le dimensioni della sezione di imbocco parzializzata al 50%.

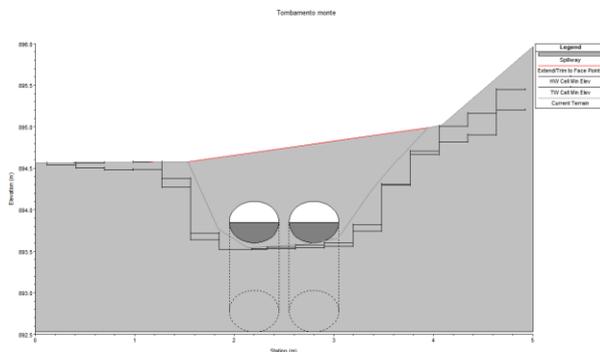


Figura 11- Imbocco del tombamento del fosso S. Piero all'Esasseta sotto strada per loc. Ferraiole

Fossi Sambuco e Acqua Gialla

A monte dell'abitato esiste un laghetto artificiale denominato Laghetto Verde dal quale nasce il fosso dell'Acqua Gialla che, incanalato in canale artificiale di recente costruzione, confluisce nel fosso del Sambuco, scarico del Laghetto Goroncino.

Dopo la confluenza il corso d'acqua transita in un canale a sezione ad "U" a cielo aperto di ampie dimensioni per giungere all'imbocco del vecchio tombamento, che si trova a circa 100 m a sud-est del Piazzale dei Minatori. La sezione di imbocco è rappresentata nella figura seguente.

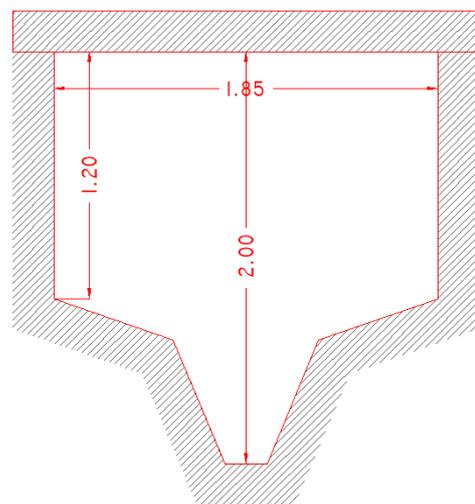


Figura 12- Imbocco del tombamento dei fossi Acqua Gialla e Sambuco

Il tombamento è stato ispezionato per un lungo tratto dall'imbocco, la sezione più piccola risulta essere quella in corrispondenza del campo sportivo a circa 70 m dall'imbocco delle dimensioni sotto riportate in Figura 13. In via cautelativa il *culvert* è stato modellato simulando le dimensioni della sezione minore come scatolare di 1.85 x 0.60 m senza savanella di magra; considerando quindi la sezione di imbocco ostruita per i primi 60 cm..

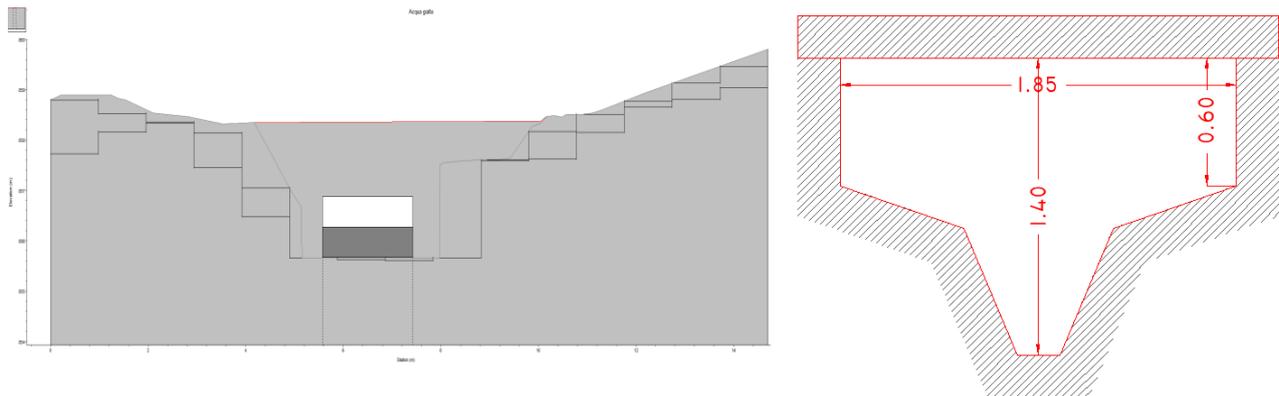


Figura 13- Sezione equivalente di modellazione del tombamento dei fossi Acqua Gialla e Sambuco

Fosso del Becco

Circa 100 m a sud del laghetto Goroncino, esiste un'altra piccola valle che dà vita al fosso del Becco.

Tale fosso dopo un breve percorso a cielo aperto, scorre interamente tombato sotto attraversando i campi sportivi fino a confluire nel tombamento dei fossi Acqua Gialla e Sambuco.

La sezione di imbocco del tombamento risulta essere un tubolare in HDPE del diametro del 1000 mm. Dopo circa 40 m dalla sezione di imbocco la sezione diventa una galleria in muratura di ben più ampie dimensioni.

È stato modellato il *culvert* con le dimensioni della sezione di imbocco parzializzata al 50%.



Figura 14- Imbocco del tombamento del fosso del Becco

All'altezza dell'imbocco del tombamento è presente un significativo rilevato costituito dai depositi minerali succedutisi nel tempo che chiude completamente la valle del fosso del Becco e crea, in termini idraulici, una cassa di espansione in linea con scarico a bocca tarata.

Fosso delle Acque Bianche

A sud rispetto all'abitato di Abbadia si trova il fosso delle Acque Bianche che risulta tombato a partire da Via del Laghetto fino alla confluenza tombamento del fosso di Fonte Risola.

Il tombamento è stato oggetto di recente ristrutturazione adeguando la sua sezione a circolare CLS diametro 600 mm e rifacendo l'inghiottitoio e dotandolo anche di briglia a pettine per la trattenuta del flottante.

È stato modellato il *culvert* con le dimensioni della sezione di imbocco non parzializzata



Figura 15- Imbocco del tombamento del fosso delle Acque Bianche con griglia a pettine

La modellazione del corso d'acqua è stata estesa anche a monte della nuova opera dove il fosso presenta sezione formata da semi tubo circolare in CLS diametro 400 mm.



Figura 16- Tratto del fosso delle Acque Bianche a monte dell'imbocco del tratto tombato

Fosso di Fonte Risola

A sud del fosso delle Acque Bianche si trova il fosso di Fonte Risola che risulta tombato a partire da una curva di via Fosso Canali fino alla confluenza nel laghetto Muraglione.

Il canale interrato è stato oggetto di recente rifacimento con dimensioni tali da garantire il transito della portata duecentennale. Si effettua tuttavia la verifica idraulica considerando la bocca di ingresso ostruita al 50% per tener conto, stante l'assenza di briglia di trattenuta a monte, del possibile arrivo di vegetazione flottante di alto fusto.

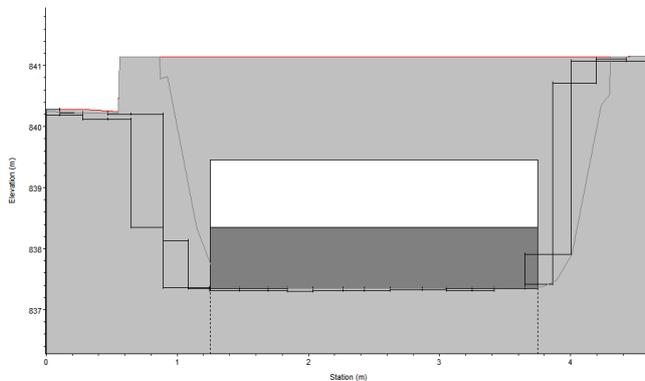


Figura 17- Imbocco del tombamento del fosso di Fonte Risola

San Piero (loc.Erosa)

Al confine sud del centro abitato in località Erosa scorre un piccolo fosso che nasce dalla località Casa S'Andrea.

Tale fosso risulta intubato per un lungo tratto di circa 700 m a partire dall'area boschiva a sud ovest di via della Rupe fino a sfociare all'altezza del Cimitero di via Castagnucci, con sezione scatolare CLS 150 x 150 cm.

A monte dell'imbocco del tombamento rinvenuto e rappresentato in Figura 18 è in realtà presente un ulteriore tratto intubato del quale è incognita l'origine.

È stato modellato il *culvert* con le dimensioni della sezione di imbocco parzializzata al 50%.

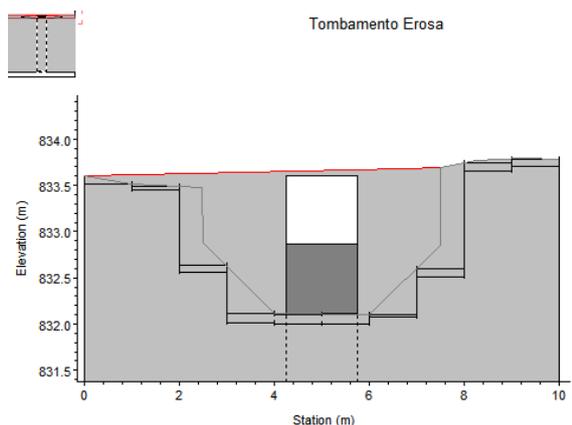


Figura 18- Imbocco del tombamento del fosso di S. Piero all'Erosa

7.4 Modello idraulico Val di Paglia

Per l'area in esame si è sviluppato un modello del terreno con i dati Lidar effettuando un riscontro puntuale con le sezioni trasversali del fiume Paglia, del Fosso delle Bugliole e del Fosso delle Voltole, disponibili dai precedenti studi idraulici.

Il modello Lidar è stato puntualmente editato per rappresentare l'attuale situazione che vede il ponte della s.s. 2 Cassia demolito e sostituito da ponte temporaneo posto poco a valle.

I tombamenti e ponti rilevati nella precedente campagna topografica sono stati inseriti nel modello idraulico bidimensionale come "culvert".

Sul *terrain* modificato è stata quindi costruita la maglia di calcolo di 4x4 m per l'analisi idraulica bidimensionale in HEC-RAS. Il passo temporale di indagine è stato fissato in ogni caso a 1 s per garantire la corretta convergenza numerica del calcolo.

Il riscontro ha fornito risultati estremamente soddisfacenti e ha quindi suggerito la possibilità di poter condurre uno studio idraulico puramente bidimensionale.

Stante la notevole differenza areale dei bacini tributari indagati, che comporta differenti tempi di corrivazione, si è posta attenzione a sfalsare tra loro gli idrogrammi di piena in ingresso per creare una coincidenza temporale dell'arrivo dei picchi di piena e massimizzarne l'effetto.

7.4.1 Dimensioni dei tombamenti

Fosso di Bugliole

Il fosso di Bugliole sotto attraversa la strada Cassia e scorre poi tombato sotto la zona industriale senza praticamente tornare a cielo aperto.

La sezione di imbocco del tombamento è scatolare in CLS di 1.85 x 2.45 m. Il *culvert* viene modellato considerando le dimensioni della sezione di imbocco parzializzata al 50%.

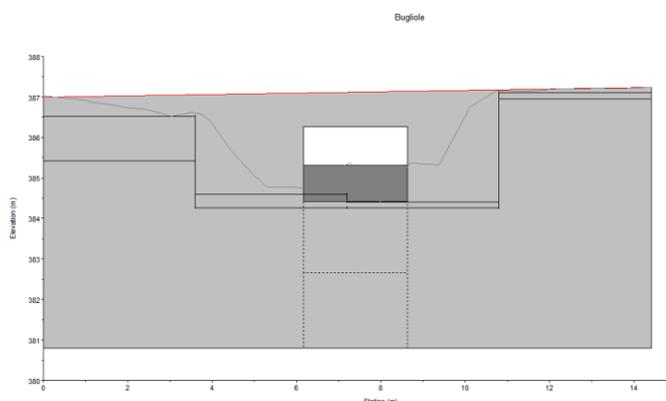


Figura 19- Imbocco del tombamento del fosso di Bugliole

Fosso delle Voltole

Presenta un attraversamento stradale formato da doppia canna in acciaio, ciascuna di forma approssimabile a rettangolare di 1.7x1.1 m. Il *culvert* viene modellato considerando le dimensioni effettive.



Figura 20- Attraversamento sul fosso di Voltole

Fosso #1 (TS 45631)

Il fosso #1 (TS 45631) sotto attraversa la strada Cassia con sezione scatolare in CLS di 2.15 x 1.45 m. Il *culvert* viene modellato considerando le dimensioni della sezione di imbocco parzializzate al 50%.

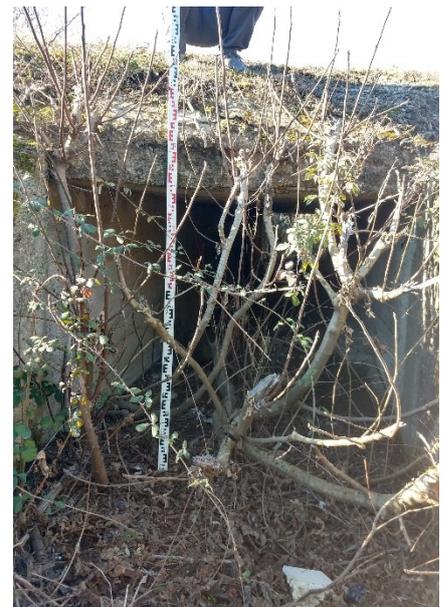
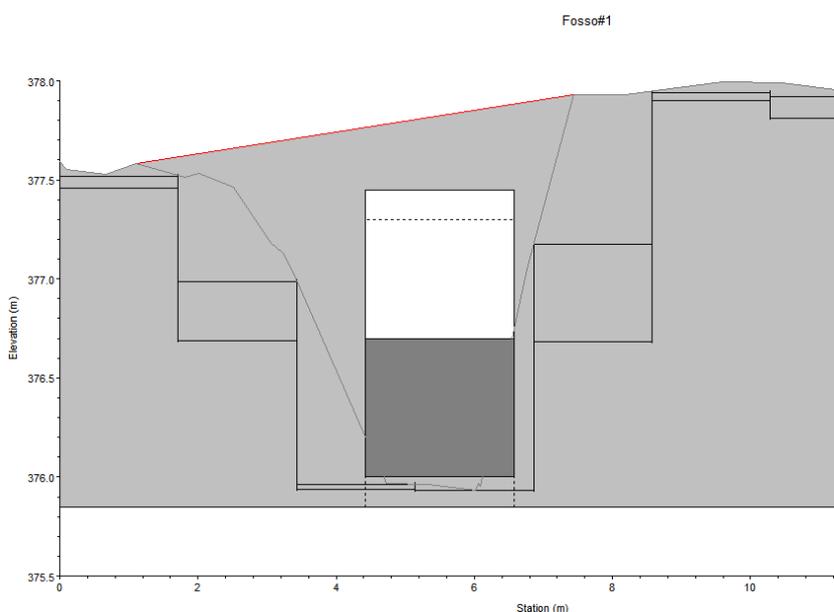


Figura 21- Imbocco dell'attraversamento del Fosso #1

Fosso #2 (TS 45770 sottobacino nord)

Il fosso #2 (TS 45700 sottobacino nord) sotto attraversa la strada Cassia con sezione circolare in CLS di 800 mm. Il *culvert* viene modellato considerando le dimensioni della sezione di imbocco parzializzate al 50%.



Figura 22- Imbocco dell'attraversamento del Fosso #2

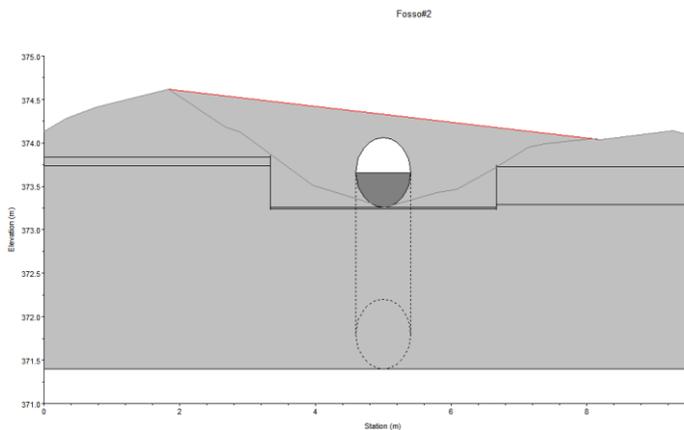


Figura 23- Imbocco dell'attraversamento del Fosso #2 - dettaglio

Fosso #3 (TS 45770 sottobacino sud)

Il fosso #3 (TS 45700 sottobacino sud) sotto attraversa la strada di accesso all'area artigianale con sezione circolare in CLS di 500 mm. Il *culvert* viene modellato considerando le dimensioni della sezione di imbocco parzializzate al 50%.

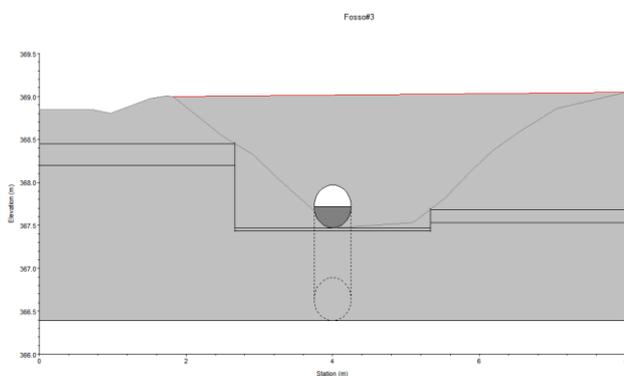


Figura 24- Imbocco dell'attraversamento del Fosso #3

8. Analisi dei risultati

8.1 Considerazione sui risultati delle modellazioni idrauliche

8.1.1 Abbadia Centro

Le verifiche idrauliche svolte, tenendo conto di una limitata capacità di smaltimento dei tratti tombati legata alla ipotesi di parziale ostruzione della bocca di ingresso, in riferimento ad eventi pluviometrici con tempo di ritorno 50 e 200 anni hanno messo in luce i seguenti aspetti.

Il tombamento sotto la Strada Provinciale del Monte Amiata del **fosso dell'Uno** non consente il completo smaltimento delle portate di indagine in arrivo che vengono conseguentemente diffuse sulla superficie stradale e limitrofe zone abitate con battenti modesti, velocità tendenzialmente oltre 1 m/s con magnitudo idraulica distribuita tra “severa” e “moderata”;

Il tombamento sotto la Strada Provinciale del Monte Amiata del **fosso di San Pietro** in località **Esasseta** risulta idraulicamente insufficiente. L'indagine è stata estesa verso monte fino a considerare il tombamento sotto via Loc. Ferraiole che risulta anch'esso idraulicamente insufficiente. L'esondazione che si verifica a monte si diffonde lungo la strada Loc. Ferraiole fino ad attraversare la S.P. del Monte Amiata dove si allarga interessando anche l'area dell'Hotel Gambrinus. I battenti rilevabili sono modesti, le velocità tendenzialmente oltre 1 m/s con magnitudo idraulica distribuita tra “severa” e “moderata”;

Le esondazioni che interessano il capoluogo sono generate dalle insufficienze dei tombamenti dei **fossi Acqua Gialla, Sambuco, Acque Bianche e Fonte Risola** per i quali è stato studiato anche un significativo tratto a monte dell'imbocco. In particolare:

- i fossi Acqua Gialla e Sambuco hanno evidenziato insufficienze localizzate nel tratto dell'area mineraria, qui comunque confinate e insufficienza del tombamento sotto il centro abitato;
- il fosso delle Acque Bianche ha evidenziato un'insufficienza idraulica della sezione a monte dell'opera di presa da dove si genera un'esondazione incapace di re-inalvearsi prima della stessa opera e che va quindi ad interessare il capoluogo attraverso via del Laghetto;
- il fosso fonte Risola, nell'ipotesi di parzializzazione della bocca di presa, genera esondazioni per le portate indagate diversamente dalle ipotesi progettuali¹³ che, a bocca libera, lo indicano capace di smaltire fino alla portata duecentennale;

Il fosso del Becco, ancorché il suo tombamento risulti insufficiente a smaltire le portate di indagine, non genera allagamenti in virtù della conformazione del terreno a monte dell'imbocco che crea una naturale cassa di laminazione.

L'abitato del capoluogo risulta quindi allagabile dalle portate indagate con battenti prevalentemente modesti seppur con localizzati picchi. Le velocità delle esondazioni sono generalmente superiori ad 1 m/s in virtù della modellazione idraulica condotta che ha considerato gli

¹³ Progetto Extrò novembre 2017

edifici quali ostacoli impermeabili. La magnitudo sulle strade è prevalentemente “severa” con puntuali zone a magnitudo “molto severa”. Le aree edificate sono in genere interessate da magnitudo “moderata”. Caso a parte è rappresentato dallo Stadio Comunale che, per la sua particolare conformazione, funge da vasca di accumulo.

L’indagine dei corsi d’acqua del capoluogo si è conclusa con lo studio del **fosso di San Piero** in località **Erosa** che scorre in area boschiva a margine dell’abitato per poi venire intubato a monte di via della Rupe e infine sbucare ad ovest del Cimitero Comunale.

Il tombamento del fosso di S. Piero Erosa risulta idraulicamente insufficiente a smaltire le portate di indagine che, tuttavia, per la particolare morfologia locale, deviano verso est cambiando di valle per confluire verso il fosso di Rovignano senza interessare aree abitate.

Per quanto sopra si è ritenuto eccessivo mappare il comportamento dell’esonazione in termini di battenti e velocità, limitandosi a definire un’area di fondovalle¹⁴ verso il Fosso di Rovignano (cfr. tav. ID03).

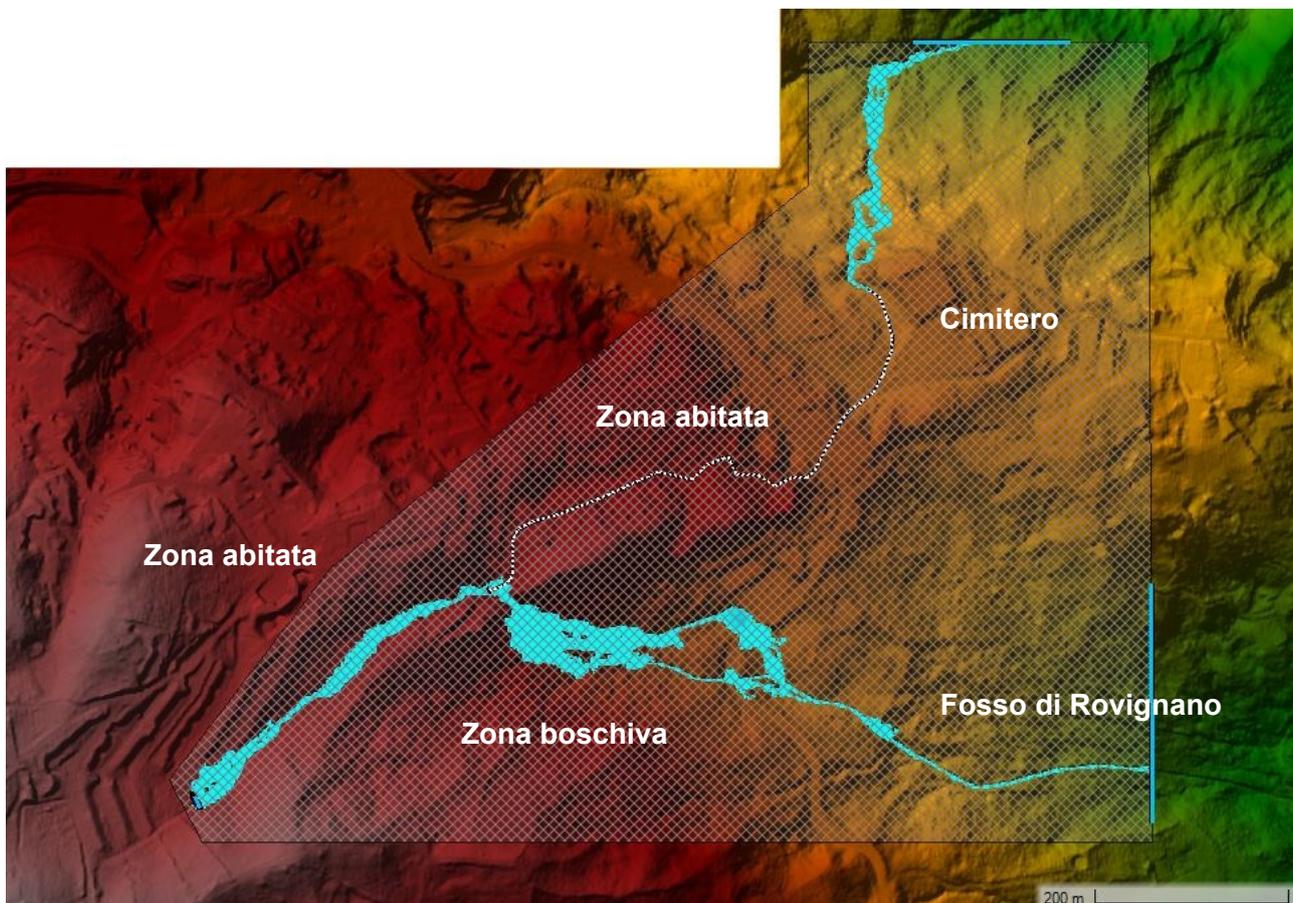


Figura 25- Risultati della modellazione idraulica bidimensionale del fosso di S. Piero all’Erosa – Tr 200 anni

¹⁴ ai sensi del par. B4, all. A, Del. CRT 31/2020

8.1.2 Val di Paglia

L'area artigianale "Val di Paglia" è interessata da esondazioni per tempi di ritorno 50 e 200 anni provenienti sia dal fiume Paglia sia dagli affluenti minori in destra idraulica. In particolare, il primo genera esondazioni che interessano l'area golenale mentre i secondi generano esondazioni che interessano le aree a campagna della S.S. Cassia, sormontandola localmente.

I battenti di esondazioni sono generalmente contenuti salvo particolari situazioni dove, per morfologica territoriale, si verifica un accumulo di acqua. Anche le velocità sono generalmente modeste e, di conseguenza, la magnitudo idraulica prevalente al di fuori delle aree di stretta pertinenza idraulica è "moderata".

Nello specifico:

- l'attraversamento delle S.S. Cassia del **Fosso delle Bugliole** e il suo successivo tratto tombato al di sotto dell'area industriale non risultano verificati per le portate indagate. Il volume d'acqua non smaltito dal tratto tombato risulta defluire verso il Paglia interessando una porzione della S.S. Cassia e gran parte della zona industriale Val di Paglia nord;
- il tombamento del **fosso#1** sotto il complesso industriale val di Paglia Nord risulta insufficiente per il transito delle portate indagate causando allagamenti delle aree lato a monte della S.S. Cassia senza peraltro interessare la viabilità;
- il sottoattraversamento della S.S. Cassia del diametro dell'800 mm in corrispondenza del **fosso#2** risulta insufficiente per il transito delle portate indagate causando allagamenti delle aree lato a monte della S.S. Cassia e interessando anche la viabilità;
- il sottoattraversamento del **fosso#3** sulla strada di accesso zona industriale Val di Paglia sud risulta idraulicamente insufficiente e genera esondazioni che allagano la citata area industriale senza sormontare la S.S. Cassia e si propagano verso valle interessando marginalmente le viabilità dell'area industriale;
- per il **Fosso delle Voltole**, sia l'attraversamento carrabile che il sistema arginale risultano insufficienti a contenere portate con tempo di ritorno di 50 e 200 anni. Il cono alluvionale si estende in destra e in sinistra idraulica fino alla confluenza con il Paglia.

8.2 Riscontro con eventi alluvionali precedenti

Nella notte fra il 27 e il 28 luglio del 2019 si è abbattuto su Abbadia San Salvatore un evento meteorico di carattere eccezionale.

Nel capoluogo le precipitazioni sono iniziate intorno alle ore 21 con un crescendo dell'intensità della pioggia fino ad avere un picco intorno alle ore 22, quando la stazione meteorologica del CFR (Centro Funzionale Regionale) ha registrato **un picco di 17,2 mm in soli 5 minuti**. La pioggia ha continuato a cadere, seppur con minor intensità, fino alle ore 1.00 di domenica 28 notte, per un totale finale di 210,7 mm. Il fronte freddo in transito tra le ore 3.00 e le ore 5.00 del mattino ha portato nuove precipitazioni di debole/moderata intensità, fino ad un **cumulato finale di 239,8 mm**. Il CFR ha calcolato che i tempi di ritorno per un evento del genere su Abbadia **siano superiori ai 50 anni**, anche se va detto che la serie storica dei dati pluviometrici inizia solamente nel 2010.

Dati pluviometrici rete CFR (Centro Funzionale Regionale):

Abbadia S.Salvatore 239,8 mm di cui 82,8 mm tra le ore 21 e le ore 22 (17,2 mm in 5 minuti)

Abbadia S.Salvatore Laghetto Verde 153,6 mm (37 mm in 15 minuti tra le 22 e le 22.15)

Vetta Amiata 161 mm (23 mm in 15 minuti tra le 22 e le 22.15).

L'evento meteorologico ha messo in crisi:

- l'imbocco del tombamento del fosso di fonte Risola (prima dell'adeguamento) che, tracimando, ha poi provocato parte dell'esondazione del laghetto "la Gora" presente nel paese alle spalle della piscina, con conseguente inondazioni dell'abitato a valle di questo, come da figura sottostante;
- il fosso Acqua Gialla (scolo del laghetto Verde) a monte del paese in prossimità della miniera e il fosso Sambuco (scolo laghetto Goroncino) che, non riuscendo a transitare nel tratto tombato sotto il capoluogo, hanno riversato verso il paese il loro contenuto di acqua, fango e massi.

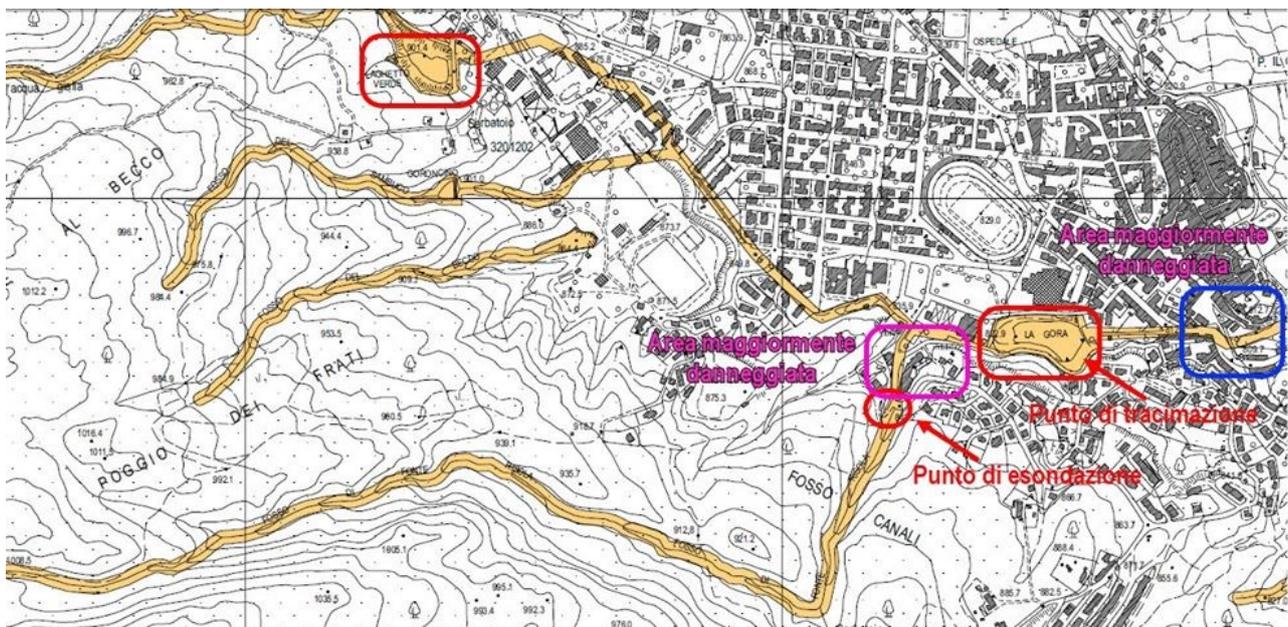


Figura 26- Elaborazione grafica fonte <https://magazine.meteosiena24.it/nubifragio-di-abbadia-salvatore-2019/>

Di seguito si riportano alcune fotografie dell'evento meteorico sopra descritto.



Figura 27- Via del Fosso Canali subito a valle dell'imbocco del Fonte Risola



Figura 28- Alcune abitazioni nel paese



Figura 29- Rotatoria S.P. del Monte Amiata (punto più a valle del Centro Abitato di Abbadia)

Da quanto asserito dai tecnici del Comune di Abbadia, e da quanto è stato possibile riscontrare con le testimonianze sul posto e con la documentazione fotografica reperita, l'evento del 2019 ha confermato la "bontà" delle precedenti mappature del rischio idraulico del 2014.

La nuova analisi in moto bidimensionale ha corroborato e dettagliato ulteriormente le mappe di allagabilità, tenendo presente anche le modifiche apportate al Fosso di Fonte Risola dal progetto già realizzato e collaudato "Realizzazione del canale di by-pass idraulico dell'invaso del Muraglione **Lotto 4**".

8.3 Confronto con lo "Studio Castelli"

L'evento meteorico risalente al 27-28 luglio 2019 è stato anche indagato dall'Università di Firenze nell'ambito della "Convenzione di Ricerca tra Dipartimento di ingegneria Civile e Ambientale (DICEA- UNIFI) e Regione Toscana - Studio idrologico-idraulico degli allagamenti occorsi il 27-28 luglio 2019 nelle province di Arezzo e Siena" dal Prof. Ing. Fabio Castelli nel corso del 2020 (nel seguito anche *studio Castelli*).

Il confronto viene svolto solo in relazione ai modelli idrologici-idraulici del Capoluogo in quanto lo studio Castelli non ha indagato il comportamento dell'evento di pioggia in Val di Paglia.

Si evidenzia inoltre che l'analisi svolta da Castelli, non considera i recenti i lavori di adeguamento svolti sul tombamento del Fosso di Fonte Risola, in quanto antecedente gli stessi.

Dall'analisi idrologica svolta nello studio si evince che l'evento di luglio 2019 ha uguagliato o superato le portate duecentennali nella maggior parte del reticolo analizzato.

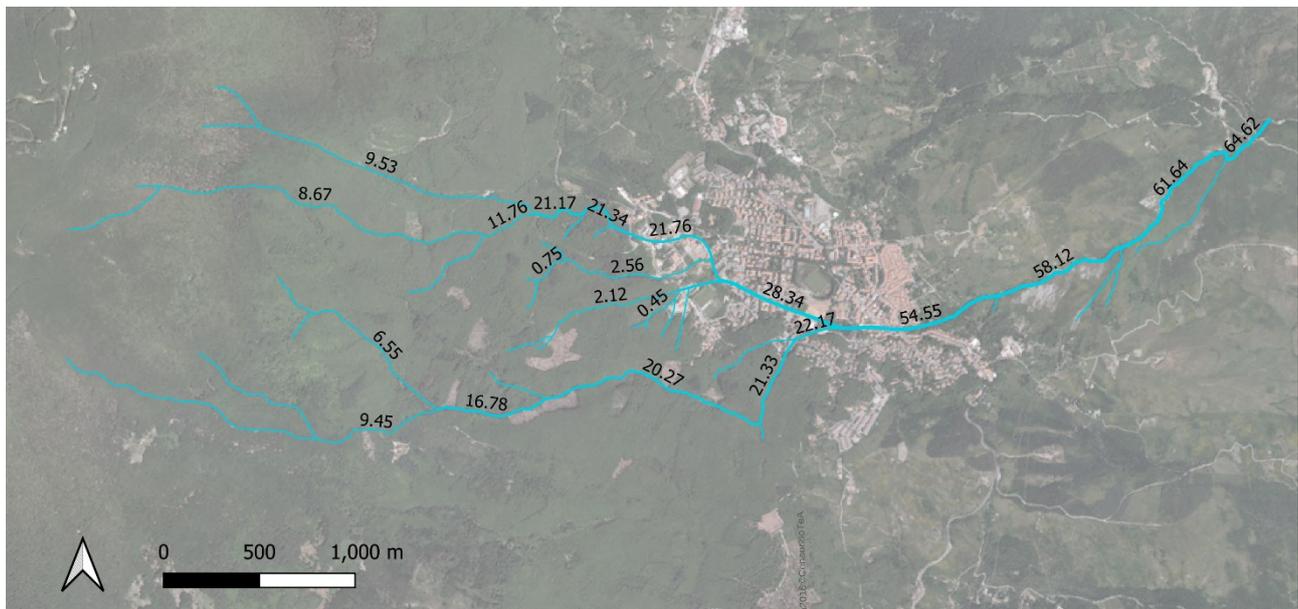


Figura 30- Valori di calcolo dello studio Castelli delle portate massime per tempo di ritorno 200 anni [mc/s] – Modello idrologico adottato MOBIDIC

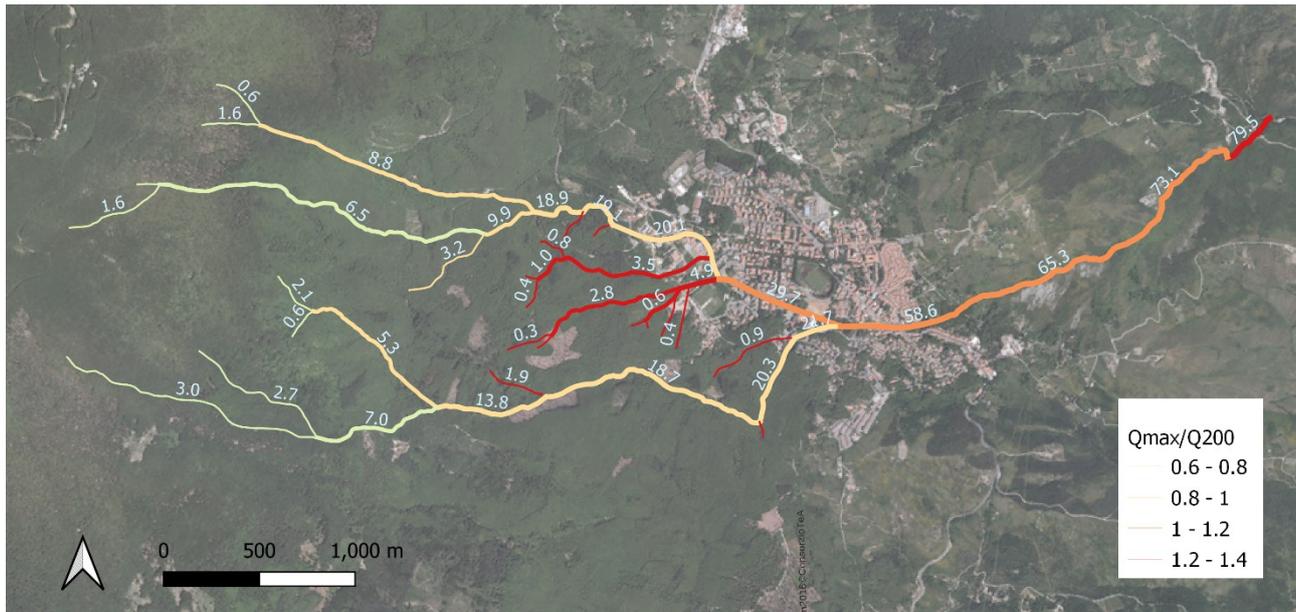


Figura 31- Mappa dei rapporti tra portate calcolate di evento e portata massima Tr 200 anni

Il confronto tra lo studio Castelli con la presente indagine idrologica appare possibile solo sui picchi e forme dell'idrogramma di piena in quanto i modelli idrologici utilizzati si discostano sensibilmente.

Lo studio Castelli viene infatti condotto con il modello a parametri distribuiti MOBIDIC (sviluppato dal DICEA sotto il controllo scientifico del Prof. Castelli) mentre l'indagine idrologica qui condotta fa riferimento alle indicazioni dell'Autorità di Bacino del Fiume Tevere metodo A.I.2 (ABT-A.I.2), anche in coerenza con i precedenti studi idraulici condotti dagli scriventi.

I risultati del modello MOBIDIC non consentono inoltre di verificare gli effettivi valori di permeabilità dei suoli utilizzati nell'indagine¹⁵, diversamente dal modello ABT-A.I.2 che è sostanzialmente riconducibile al modello SCS-CN.

In particolare, confrontando le portate definite da Castelli in situazione di suolo asciutto e suolo saturo con le portate calcolate dal presente studio (in suolo saturo), si evince come le prime siano sempre inferiori.

Corso d'acqua	Q Evento 2019 suolo asciutto	Q Evento 2019 suolo saturo	Q ₂₀₀ - Studio Castelli	Q ₂₀₀ -Studio Neroni -Sorbi
Fosso dell'Acqua Gialla	23.33	31.12	24.02	40.00
Fosso del Becco	2.80	4.93	2.18	8.23
Fosso di Fonte Risola	20.31	26.4	21.33	34.26
Fosso delle Acque Bianche	0.915	0.95	0.735	1.70

Tabella 2. Portate di evento con suolo asciutto e saturo e duecentennale – valori in mc/sec

¹⁵ MOBIDIC valuta, infatti, la permeabilità dei suoli sulla base di parametri regionalizzati di capacità e conducibilità idraulica dei suoli

Discorso diverso è per i volumi di idrogramma che si riscontrano, per Castelli, generalmente superiori a quelli derivati dal modello idrologico ABT-A.1.2.

La particolare morfologia dei terreni del capoluogo, con significative pendenze e scarse aree di accumulo, è tuttavia sensibile ai picchi di piena e non fornisce apprezzabili scostamenti nei risultati in funzione dei volumi degli idrogrammi.

Caso particolare di quanto sopra analizzato è costituito dall'imbocco del tombamento del Fosso del Becco dove, secondo lo studio Castelli, si verifica una modesta tracimazione a fronte di portate di picco significativamente inferiori a quelle del presente studio.

Ciò per la forma dell'idrogramma che nello studio Castelli vede un volume di portata complessiva in arrivo di circa 40.000 mc.

Si evidenzia tuttavia che, da testimonianze locali, anche durante l'evento 2019 non si sono verificate tracimazioni in corrispondenza dell'imbocco del tombamento del Fosso del Becco.

In ultima analisi le aree allagate risultanti dei modelli dell'esondazione distribuita sviluppati da Castelli e dagli scriventi, in occasione del presente studio e dello studio del 2014, appaiono tra loro confrontabili¹⁶ come dimostrato dalla seguente immagine qualora confrontata con le tavole ID03 e ID05.

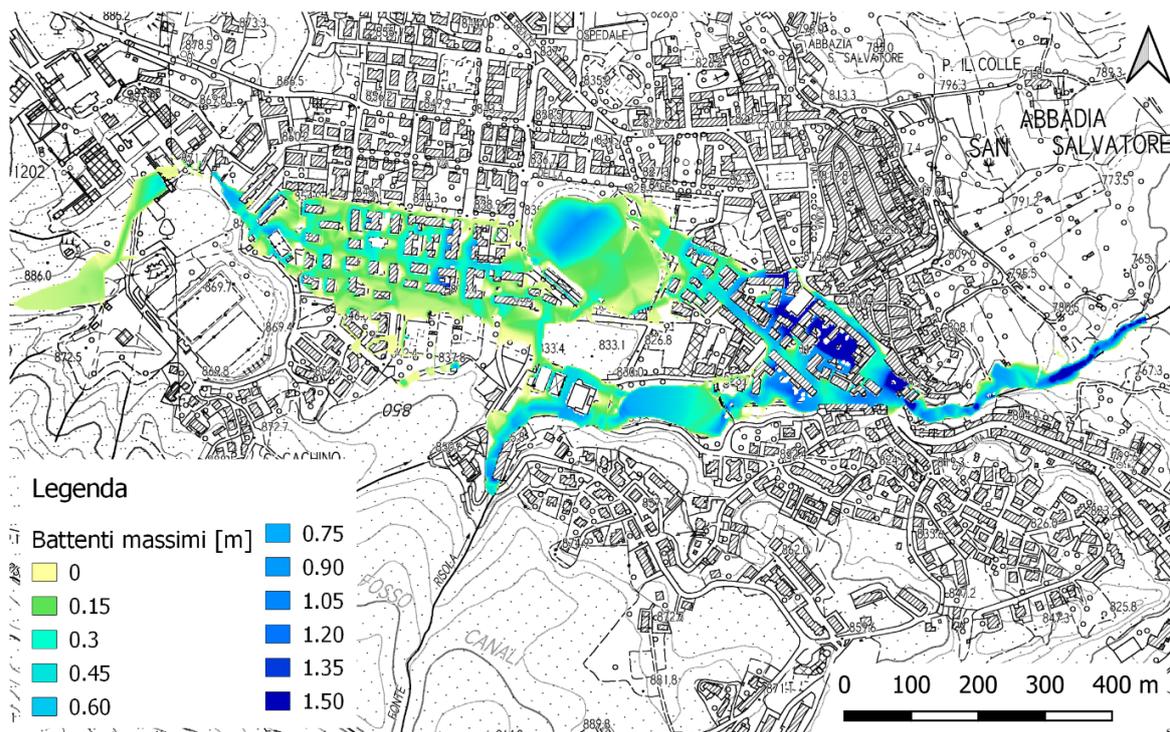


Figura 32- Estratto studio Castelli. Mappa dei battenti massimi. Evento 27/28 Luglio 2019 con l'ipotesi di suolo saturo

¹⁶ Annotato peraltro dallo stesso prof. Castelli nella sua relazione

8.4 Considerazioni sui tratti tombati

La geometria dei tratti tombati indagati è stata fornita dall'Amministrazione Comunale a seguito di rilievo celerimetrico e fotografico condotto dallo studio Extrò nel novembre 2014. I dati sono riferiti esclusivamente alla geometria dei condotti e non analizzano, se non per via fotografica, lo stato di conservazione e la capacità strutturale dei medesimi.

Nella presente indagine si considera la presenza dei tratti tombati per definire le fasce di assoluto rispetto del corso d'acqua.

Ai fini della modellazione idraulica i tratti tombati sono tenuti in conto per la valutazione della portata in ingresso che va a decurtare i picchi degli idrogrammi di piena da distribuire sul territorio.

In tale ottica si è considerato addirittura una limitazione alla portata in ingresso al tombamento per massimizzare, in via cautelativa, gli effetti dell'alluvione sul terreno sovrastante.

Sotto questa ipotesi di modello il tombamento non viene sollecitato da pressioni interne durante il transito delle piene e per di più le portate ipotizzate transitare nei tratti tombati sono inferiori a quelle limite¹⁷ individuate dallo studio Castelli.

Tale situazione di modello idraulico può tuttavia differire dalla realtà dove la portata all'interno del tombamento, se non limitata da ostruzioni dell'imbocco e in concomitanza di piene eccezionali, transiterà in pressione.

Stante il carattere del presente studio non si è ritenuto opportuno in questa sede, approfondire il comportamento strutturale dei tombamenti sollecitati da pressione idraulica.

Tali valutazioni appaiono infatti maggiormente pertinenti all'ambito del Piano di Protezione Civile che potrà prendere spunto dai risultati preliminari già prodotti dallo Studio del Prof. Ing. Fabio Castelli nell'anno 2020 in merito al transito delle portate di piena nella rete dei canali tombati.

Lo Studio citato, per la parte pertinente (pagine da 52 a 62), è da considerarsi, ancorché fisicamente non allegato, parte integrante al presente studio conoscitivo.

¹⁷ Lo studio Castelli definisce infatti, attraverso un'indagine idraulica dei tombamenti condotta con il *software* SWMM, le portate massime smaltibili dai canali senza rigurgito sui nodi di monte, cioè senza che i livelli idrici immediatamente a monte delle condotte superino il livello del cielo delle condotte stesse. Tali portate sono sempre superiori a quelle ipotizzate transitare nei tratti tombati nel presente modello idraulico.

9. Restituzione cartografica

9.1 Territorio aperto

Per il territorio comunale di Abbadia San Salvatore, esternamente alle aree studiate in dettaglio, è stata definita la pericolosità idraulica sulla base degli elementi conoscitivi pregressi e dei dati geometrici.

In particolare, sono stati definiti:

- le aree di assoluto rispetto dei corsi d'acqua definite ai sensi dell'art. 96 del R.D. 523/1904 nonché ai sensi dell'art. 3 della L.R. 41/2018. In tali aree l'edificazione è vietata fatto salvo quanto previsto dal citato articolo della legge regionale ovvero, in sintesi non esaustiva, interventi di natura idraulica, reti di servizi essenziali, opere di derivazione, itinerari ciclopedonali, interventi di riqualificazione ambientale, conservazione e manutenzione dei manufatti esistenti legittimi senza frazionamenti o cambi di destinazione d'uso, interventi di adeguamento delle infrastrutture esistenti;
- gli ambiti territoriali di fondovalle posti in situazione morfologicamente sfavorevole suscettibili di alluvionamento, individuate come le zone poste a quota inferiore a 2 m dal piede esterno dell'argine (ovvero del ciglio di sponda), riferibili quindi al paragrafo B4, allegato A) delibera C.R.T. n. 31/2020;
- fascia "A" del Piano Stralcio di Assetto Idrogeologico (PAI) per il Fiume Tevere recepito dall'Autorità di bacino distrettuale dell'Appennino Centrale (ADAC). La fascia rappresenta le aree assoggettate a inondazione con tempi di ritorno di 50 anni e viene assimilata pericolosità equivalente P3 "area a pericolosità idraulica per alluvioni frequenti" ai sensi della L.R. 41/2018;
- Piano Gestione Rischio Alluvioni (PGRA) dell'Autorità di bacino distrettuale dell'Appennino Settentrionale (ADAS), che vede la presenza delle fasce di pericolosità idraulica da alluvione P1 bassa, P2 media e P3 elevata che trovano preciso riscontro nella L.R. 41/2018;
- In particolare, in merito alle aree a pericolosità da alluvione P1 bassa, interessate potenzialmente da eventi esondativi per tempi di ritorno superiori a 200 anni, visto il tenore della relativa disciplina d'uso previsto dalla normativa vigente (sostanzialmente di Protezione Civile) non è stata effettuata la modellazione idraulica esplicita per $T_r=500$ anni.

9.2 Zone di dettaglio

Nelle zone di dettaglio già descritte, grazie ai modelli idraulici bidimensionali sviluppati, sono stati ottenuti i seguenti strati informativi:

- aree interessate dalle alluvioni frequenti con tempo di ritorno 50 anni (P3) e dalle alluvioni poco frequenti con tempo di ritorno 200 anni, riportate nella **Carta dei vincoli idraulici e della pericolosità da alluvione**. La carta comprende anche i vincoli e le pericolosità individuate per il territorio aperto;
- battenti idraulici per le aree P3 e P2 riportati nelle relative **Carte dei battenti di esondazione**;

- velocità dell'esonazione nelle aree P3 e P2 riportati nelle **Carte delle velocità dell'esonazione**;

Dalla combinazione dei dati di cui sopra relativi alle aree P2 è stata ottenuta la **Carta della magnitudo idraulica**, questa meglio definita alla lettera h) comma 1) dell'art. 2 come:

h) *“magnitudo idraulica”*: la combinazione del battente e della velocità della corrente in una determinata area, associata allo scenario relativo alle alluvioni poco frequenti:

h1) *“magnitudo idraulica moderata”*: valori di battente inferiore o uguale a 0,5 metri e velocità inferiore o uguale a 1 metro per secondo (m/s). Nei casi in cui la velocità non sia determinata, battente uguale o inferiore a 0,3 metri;

h2) *“magnitudo idraulica severa”*: valori di battente inferiore o uguale a 0,5 metri e velocità superiore a 1 metro per secondo (m/s) oppure battente superiore a 0,5 metri e inferiore o uguale a 1 metro e velocità inferiore o uguale a 1 metro per secondo (m/s). Nei casi in cui la velocità non sia determinata, battente superiore a 0,3 metri e inferiore o uguale a 0,5 metri;

h3) *“magnitudo idraulica molto severa”*: battente superiore a 0,5 metri e inferiore o uguale a 1 metro e velocità superiore a 1 metro per secondo (m/s) oppure battente superiore a 1 metro. Nei casi in cui la velocità non sia determinata battente superiore a 0,5 metri;

Di seguito si riassume la definizione di magnitudo idraulica in forma grafica:

CON VELOCITA' DETERMINATA		
	$V \leq 1$ m/s	$V > 1$ m/s
$Y \leq 0.5$ m	MAGNITUDO IDRAULICA MODERATA	MAGNITUDO IDRAULICA SEVERA
$0.5 \text{ m} < Y \leq 1$ m	MAGNITUDO IDRAULICA SEVERA	MAGNITUDO IDRAULICA MOLTO SEVERA
$Y > 1$ m	MAGNITUDO IDRAULICA MOLTO SEVERA	MAGNITUDO IDRAULICA MOLTO SEVERA

Tabella 11 - Magnitudo idraulica con velocità determinata

10. Conclusioni

10.1 Fattibilità idraulica

Per il territorio comunale sono state definite le fasce di pericolosità idraulica coerenti con le norme della Regione Toscana (RT) DPGR n.5/R/2020, Regolamento di attuazione dell'art. 104 della LR n.65/2014 e LR n.41/2018.

Sono definite le seguenti fasce di pericolosità di pericolosità idraulica:

Fascia	Nomenclatura RT	Tempo di ritorno (Tr)
P3	aree a pericolosità per alluvioni frequenti	Tr ≤ 50 anni
P2	aree a pericolosità per alluvioni poco frequenti	50 < Tr ≤ 200 anni
P1	aree a pericolosità da alluvione bassa	200 < Tr ≤ 500 anni

Tabella 12 – Definizione delle fasce di pericolosità idraulica

Aree soggette ad alluvioni frequenti (P3): aree interessate da allagamenti per eventi con $Tr \leq 50$ anni. Fuori dalle aree di dettaglio rientrano in tale categoria:

- a) La Fascia A dell'Autorità di Bacino del Fiume Tevere;
- b) La pericolosità idraulica da alluvione elevata (P3) definita dall'Autorità Distretto Appennino Settentrionale

Aree soggette ad alluvioni poco frequenti (P2): aree interessate da allagamenti per eventi compresi tra $50 < TR \leq 200$ anni. Fuori dalle aree di dettaglio si fanno rientrare in tale categoria:

- a) La pericolosità idraulica da alluvione media (P2) definita dall'Autorità Distretto Appennino Settentrionale;
- b) Le aree di fondovalle cartograficamente individuate ovvero le aree per le quali ricorra almeno una delle seguenti condizioni:
 - vi sono notizie storiche di inondazioni;
 - sono morfologicamente in condizione sfavorevole di norma a quote altimetriche inferiori rispetto alla quota posta a metri 2 sopra il piede esterno dell'argine o, in mancanza, sopra il ciglio di sponda.

Aree a pericolosità idraulica bassa (P1): aree collinari o montane prossime ai corsi d'acqua per le quali ricorrono le seguenti condizioni:

- a) non vi sono notizie storiche di inondazioni;
- b) sono in situazioni favorevoli di alto morfologico, di norma a quote altimetriche superiori a metri 2 rispetto al piede esterno dell'argine o, in mancanza, al ciglio di sponda.

Per tali aree si è omessa specifica mappatura.

10.2 Indirizzi idraulici per gli strumenti urbanistici

10.2.1 Criteri generali

Si dovranno rispettare i seguenti indirizzi:

- restituire ai corsi d'acqua, anche se canalizzati, le funzioni di sistema naturale complesso e non considerarli come semplici collettori idraulici;
- garantire che le nuove localizzazioni insediative ed infrastrutturali nel fondovalle siano in sicurezza idraulica almeno per piene con tempo di ritorno duecentennale;
- favorire interventi di sistemazione idraulica, idraulico-agraria e idraulico-forestale finalizzati a contenere i picchi di piena, aumentando i tempi di corrivazione e riducendo il coefficiente di deflusso e la produzione di sedimenti;
- vietare interventi che possano arrecare danno alla qualità dei corpi idrici superficiali e sotterranei favorendone invece il miglioramento;
- favorire interventi volti all'adeguamento dei tratti coperti dei corsi d'acqua preferendone, ove possibile, la riapertura ovvero la delocalizzazione di strutture ed edifici che interferiscono con il corso d'acqua stesso. Nelle more della realizzazione di tali interventi per i corsi d'acqua tombati dovranno essere stabilite le misure di prevenzione volte a gestire le situazioni di rischio in relazione alle attività di cui al DPCM 27/02/04 (Piano di protezione civile).

Tutti gli interventi che direttamente o indirettamente vanno a modificare lo stato di efficienza del reticolo idraulico minore dovranno garantire un'efficacia almeno pari a quella posseduta dallo schema idraulico preesistente. In particolare:

- le superfici destinate ad attività agricola nelle aree pianeggianti sono da dotare di un'adeguata rete di fossi e capifossi allo scopo di aumentare la capacità d'invaso e di eliminare i fenomeni di ristagno;
- per gli interventi che vadano ad impermeabilizzare aree di estensione significativa sono da intraprendere studi idrologici e idraulici che dimostrino l'invarianza idraulica dell'intervento rispetto all'assetto originario.

Su ambedue le sponde dei corsi d'acqua facenti parte del reticolo idrografico di interesse (individuato ai sensi della LR 79/2012, e come aggiornato dai successivi decreti) è istituita una fascia di assoluto rispetto di larghezza minima pari a 10 ml a partire dal piede dell'argine per i corsi d'acqua incanalati e a partire dal ciglio di sponda per i corsi d'acqua non arginati come previsto dall'art. 3 della L.R. 41/2018.

Questa fascia oltre a garantire la conservazione delle funzioni biologiche caratteristiche dell'ambito ripariale serve a garantire la piena efficienza delle sponde, la funzionalità delle opere idrauliche e a facilitare le operazioni di manutenzione.

Per la costruzione delle nuove strutture di attraversamento dei corsi d'acqua si dovrà evitare il restringimento della sezione dell'alveo assicurando il mantenimento di una luce libera di deflusso pari a quella posta a monte dell'attraversamento stesso; la base dell'impalcato dovrà sempre svilupparsi ad una quota superiore rispetto alle sommità arginali o ai cigli di sponda e comunque tale da consentire un agevole passaggio dei materiali flottanti in caso di piena così come prescritto dalle NTC 2018.

Per la disciplina relativa ai tombamenti si rinvia a quanto stabilito dagli artt. 4 e 5 dalla LR 41/2018 "Disposizioni in materia di rischio di alluvione e di tutela dei corsi d'acqua in attuazione al D.lgs. 49/2010. Modifiche alla LR 80/2015 e LR 60/2014"

In genere la sicurezza idraulica dovrà essere conseguita nei confronti del livello di inondazione di riferimento prevedendo un franco di almeno 30 centimetri.

10.2.2 Aree soggette ad alluvioni frequenti (P3):

- a) sono da evitare le previsioni di:
 - nuove opere pubbliche e di interesse pubblico riferite a servizi essenziali;
 - nuovi impianti di cui all'allegato VIII alla parte seconda del decreto legislativo 152/2006;
 - sottopassi e volumi interrati
- b) sono da subordinare, se non diversamente localizzabili, al rispetto delle condizioni di gestione del rischio, le previsioni di
 - nuove infrastrutture e opere pubbliche o di interesse pubblico;
 - interventi di ampliamento della rete infrastrutturale primaria, delle opere pubbliche e di interesse pubblico riferite a servizi essenziali e degli impianti di cui all'allegato VIII alla parte seconda del decreto legislativo 152/2006;
 - nuovi impianti di potabilizzazione e depurazione;
 - nuove edificazioni.
- c) sono da subordinare al rispetto delle condizioni di gestione del rischio le previsioni di interventi di ristrutturazione urbanistica;
- d) sono da privilegiare le previsioni di trasformazioni urbanistiche tese al recupero della funzionalità idraulica, alla riqualificazione e allo sviluppo degli ecosistemi fluviali esistenti, nonché le destinazioni ad uso agricolo, forestale, a parco e ricreativo – sportive.

10.2.3 Aree soggette ad alluvioni poco frequenti (P2):

- a) sono da subordinare, se non diversamente localizzabili, al rispetto delle condizioni di gestione del rischio, le previsioni di:
 - nuove opere pubbliche e di interesse pubblico riferite a servizi essenziali;
 - nuovi impianti di cui all'allegato VIII alla parte seconda del decreto legislativo 152/2006;
 - sottopassi e volumi interrati
- b) sono da subordinare al rispetto delle condizioni di gestione del rischio le previsioni di:
 - nuove infrastrutture e opere pubbliche o di interesse pubblico;
 - interventi di ampliamento della rete infrastrutturale primaria, delle opere pubbliche e di interesse pubblico riferite a servizi essenziali e degli impianti di cui all'allegato VIII alla parte seconda del decreto legislativo 152/2006;

- nuovi impianti di potabilizzazione e depurazione;
 - nuove edificazioni
- c) sono da privilegiare le trasformazioni urbanistiche tese al recupero della funzionalità idraulica alla riqualificazione e allo sviluppo degli ecosistemi fluviali esistenti, nonché le destinazioni ad uso agricolo, forestale, a parco e ricreativo – sportive.

Firenze, luglio 2023

I tecnici incaricati

ing. Andrea Sorbi – Ing. Niccolò Neroni

firme assolute in forma digitale

1 – Idrogrammi di piena

2 – Geometria dei modelli HEC RAS