



SOMMARIO

PREMESSA.....	2
CRITERI DI CONTERMINAZIONE DELLE AREE A PERICOLOSITA' IDRAULICA.....	3
UBICAZIONE DELLE SEZIONI DI VERIFICA.....	4
METODOLOGIA.....	5
BACINO IDROGRAFICO.....	8
IDROLOGIA.....	9
IDRAULICA.....	16
MODELLAZIONE DEL TERRENO.....	19
MAPPATURA DELLE AREE INONDABILI.....	22
TORRENTE CRESPINA.....	25
BACINO IDROGRAFICO.....	25
IDROLOGIA.....	26
IDRAULICA.....	26
TORRENTE ORCINA.....	28
BACINO IDROGRAFICO.....	28
IDROLOGIA.....	28
IDRAULICA.....	29
FOSSO REALE ZANNONE.....	30
CONCLUSIONI.....	31



PREMESSA

La presente relazione fa parte integrante dello studio idrologico-idraulico, redatto su incarico dell'Amministrazione Comunale di Crespina, per la valutazione delle condizioni di rischio idraulico del territorio comunale; il presente documento fornisce i risultati degli studi idrologico-idraulici condotti sui torrenti Crespina, Orcina e sul Fosso Reale Zannone nei tratti interessanti il territorio comunale.

Lo studio idraulico non ha preso in considerazione quei corsi d'acqua che, da studi precedenti, risultano non significativi per la definizione del rischio idraulico in zone interessate da sviluppo urbanistico (*Torrente Isola*) o le aste idriche minori nelle quali i fenomeni esondativi risultano conseguenti all'afflusso, nel loro alveo, delle acque di esondazione di altri corsi d'acqua (*Antifossetto di Crespina*).

Sia lo studio idrologico che quello idraulico, per i torrenti Crespina ed Orcina, sono stati condotti ex-novo rispetto allo studio idrologico-idraulico utilizzato per la redazione degli strumenti urbanistici attualmente in vigore; per la verifica idraulica del Fosso Reale Zannone sono stati utilizzati i dati di portata forniti dall'Autorità di Bacino del Fiume Arno e della Provincia di Pisa.

La redazione del presente studio si prefigge di fornire una diversificazione del rischio idraulico per portate di progetto con diverso tempo di ritorno, conforme a quanto previsto dal D.P.G.R. n°26/R; prevede, inoltre, di redigere una mappatura delle aree esondabili, diversificate per battente atteso, per le piene con tempo di ritorno ventennale, trentennale, centennale e duecentennale per il Torrente Crespina, il Torrente Orcina ed il Fosso Reale Zannone, nei rispettivi tratti compresi nel Comune di Crespina.

Le mappe di esondazione sono diversificate su tre fasce principali, in relazione alla lama d'acqua previste:

- da 0 a 30 cm di battente, per la fascia considerata a bassa pericolosità;
- da 30 a 60 cm di battente, per la fascia considerata a media pericolosità;
- oltre 60 cm di battente, per la fascia considerata ad elevata pericolosità.

La procedura adottata consente di formulare NTA più aderenti al quadro di rischio e tali da permettere lo sviluppo urbanistico del territorio in condizioni di sicurezza idraulica accettabile, in funzione della tipologia di utilizzo del suolo.



In Allegato alla presente relazione sono state redatte n° 4 tavole, in scala 1:10.000, che illustrano i risultati della valutazione del rischio idraulico del territorio:

- Perimetrazione aree allagabili per $Tr= 20$ anni
- Perimetrazione aree allagabili per $Tr= 30$ anni
- Perimetrazione aree allagabili per $Tr= 100$ anni
- Perimetrazione aree allagabili per $Tr= 200$ anni

CRITERI DI CONTERMINAZIONE DELLE AREE A PERICOLOSITA' IDRAULICA

Quando si parla di difesa idraulica del territorio e perimetrazione delle aree a rischio idraulico, si devono preliminarmente distinguere i tratti fluviali difesi da opere idrauliche (soprattutto arginature) da quelli in cui il corso d'acqua non presenta difese artificiali.

Il rischio idraulico, nelle due diverse schematizzazioni, pur derivando da fenomeni legati al flusso della acque, richiede metodologie e trattazioni diversificate in quanto, in presenza di difese arginali, risulta maggiormente incerta la determinazione degli effetti che la piena potrebbe causare sul territorio anche in considerazione della buona efficienza del manufatto.

I codici di calcolo utilizzati per la determinazione dei livelli idrometrici attesi, per vari tempi di ritorno, consentono di individuare eventuali insufficienze arginali ma nulla dicono circa la possibilità di rotture arginali.

D'altro canto è noto che la pericolosità idraulica connessa al verificarsi di cedimenti arginali dipende, oltre che dall'altezza del livello idrico, da numerosi altri fattori quali:

- evoluzione temporale e la durata del fenomeno di piena;
- caratteristiche geotecniche e geometriche del rilevato arginale;
- fenomeni di sifonamento, erosione al piede, carenze strutturali.

In conseguenza dell'estrema indeterminatezza circa la possibilità che si possa verificare un fenomeno di collasso arginale, si è deciso di valutare l'estensione delle aree potenzialmente allagabili solo in relazione ad un evento di tracimazione arginale, senza rottura del corpo dell'argine. Per ciascuno dei tratti critici sono state individuate, quindi, la massima altezza idrometrica localmente raggiunta dalla piena di progetto e la durata temporale nella quale la portata di progetto supera il valore della massima portata contenibile in alveo; dal calcolo risulta la determinazione del corrispondente volume esondato.



UBICAZIONE DELLE SEZIONI DI VERIFICA

Per la definizione geometrica del Torrente Crespina e del Torrente Orcina sono state commissionate, a cura dell'Amministrazione Comunale, operazioni di rilievo fluviale lungo tutta l'asta del corso d'acqua compreso nel territorio comunale. Sono stati, inoltre, acquisiti i rilievi fluviali del Fosso Reale Zannone e del Torrente Crespina, forniti dalla Provincia di Pisa.

Le verifiche idrauliche sono state condotte in corrispondenza di ogni sezione rilevata sull'asta del corso d'acqua; il criterio per la scelta delle sezioni da rilevare è stato determinato sia dalla distanza reciproca tra le varie sezioni, necessaria a consentire un buon funzionamento del programma utilizzato per le verifiche, sia in base alla determinazione di zone soggette a maggior rischio idraulico, caratterizzate cioè da:

- forme e andamenti plano-altimetrici particolari dell'alveo (curve e/o bruschi cambi di direzione, salti do fondo, strettoie ecc.);
- presenza di manufatti in grado di opporre resistenza al moto della corrente, causando rigurgiti e alterazioni significative del deflusso (ponti, tombinature ecc.).

Torrente Crespina

Sono state tracciate n. 24 sezioni da sottoporre a verifica idraulica.

Sezione N° 10c e 20c - confluenza con il Fosso Reale Zannone

- Sezione N° 30c – Superstrada FI-PI-LI
- Sezione N° 40c - loc. Campi Lunghi
- Sezione N° 50c e 60c - loc. Lavoria
- Sezione N° 70c e 80c - loc. Cenaia
- Sezione N° 90c e 100c – ponte S.P. delle Colline in loc. Cenaia
- Sezione N° 110c - loc. Cenaia
- Sezione N° 120c e 130c- loc. Casa Palloni
- Sezione N° 140c – loc. Volpaia
- Sezione N° 150c e 160c – ponte Molino delle Lame
- Sezione N° 170c – loc. Le Lame
- Sezione N° 180c – loc. La Tana
- Sezione N° 190c – ponte sulla Via Volpaia
- Sezione N° 200c – loc. Le Prata
- Sezione N° 210c - Ponte in loc. Minaccio
- Sezione N° 220c – loc. Il Nespolo



- Sezione N° 230c – loc. C. Bertacchi
- Sezione N° 240c – loc. Crespina

Torrente Orcina

Sono state tracciate n. 14 sezioni da sottoporre a verifica idraulica, ubicate principalmente in corrispondenza dei ponti:

- Sezione N° 10o - confluenza con il Canale Scolmatore
- Sezione N° 20o - Antifossetto di Crespina
- Sezione N° 30o - Superstrada FI-PI-LI
- Sezione N° 40o - loc. Lavoria
- Sezione N° 50o - ponte sulla S.P. Cucigliana Lorenzana
- Sezione N° 60o - ponte S.P. delle Colline in loc. Cimitero di Cenaia
- Sezione N° 70o e 80o– loc. Migliano
- Sezione N° 100o e 110o- loc. Strada
- Sezione N° 120o e 130o- loc. Stradiola
- Sezione N° 140o - loc. Villa Il Poggio

Fosso Reale Zannone

Sono state utilizzate n. 32 sezioni da sottoporre a verifica idraulica, ubicate a distanza costate dalla confluenza del Torrente Crespina al limite est del confine comunale.

- Sezione N° 1 - confluenza con il Torrente Crespina
- Sezione N° 13 - Superstrada FI-PI-LI
- Sezione N° 32 - limite est del confine comunale

METODOLOGIA

La base di conoscenza su cui si è sviluppato lo studio prende atto della cartografia esistente, integrata da ulteriori elementi recepiti presso gli Enti interessati al controllo ed alla gestione del territorio.

In particolare, sono state condotte le seguenti attività:

- acquisizione della cartografia di base in scala 1:10.000 e 1:2.000 per la definizione del bacino idrologico e per la delimitazione delle aree inondabili;
- acquisizione della cartografia del Piano assetto Idrogeologico dell'Autorità di Bacino del Fiume Arno;
- acquisizione delle mappe delle aree esondate nell'evento del 1993, redatte dal Consorzio di Bonifica Ufficio dei Fiumi e Fossi di Pisa;



- esecuzione di una campagna di indagini topografiche con rilievo delle sezioni trasversali (prese sia ortogonalmente all'alveo di piena sia parallelamente alle opere d'arte), delle sommità spondali e/o arginali, dei manufatti in alveo e di attraversamento o sottopasso;
- sopralluoghi sulle aste fluviali per individuare i punti critici per l'esondazione, censire eventuali manufatti non presenti sulla cartografia di base non aggiornata, caratterizzazione dei coefficienti di resistenza al moto (documentando il grado di vegetazione dell'alveo e definendo il tipo di rivestimento eventualmente presente);
- esecuzione di una documentazione fotografica per evidenziare particolarità e punti di crisi delle aste fluviali.

La procedura adottata per la definizione del rischio idraulico nell'area comunale prevede che la perimetrazione delle aree inondabili venga condotta valutando, con le tecniche dell'idrologia statistica, la portata al colmo della piena di assegnato tempo di ritorno nelle sezioni di interesse del corso d'acqua e calcolando le corrispondenti quote di pelo libero della corrente a moto permanente. La perimetrazione delle aree allagabili consegue la valutazione dei processi di tracimazione arginale e di allagamento del territorio, sulla base di una modellazione del suolo descritta con DEM di adeguato dettaglio.

Lo studio relativo ai fenomeni di inondazione per il territorio comunale di Crespina è stato condotto affrontando due problematiche fondamentali:

- lo studio idrologico, che rappresenta la modellazione dell'evento di pioggia;
- lo studio idraulico, che definisce l'andamento delle onde di piena di riferimento all'interno dell'alveo.

Lo studio idrologico prevede che sia individuata la portata di massima piena con determinate probabilità di superamento; prendendo atto che il rischio idraulico potenziale delle aree limitrofe l'asta idrica dei corsi d'acqua è determinato essenzialmente dal tributo delle acque di pioggia, si è redatto lo studio dei bacini tributari provvedendo al calcolo dei dati di portata delle acque meteoriche scaturiti da un'elaborazione statistica di dati pluviometrici.

I dati pluviometrici derivano dall'elaborazione delle Linee Segnalatrici di Probabilità Pluviometrica fornite dall'Ufficio Idrografico e Mareografico di Pisa; sono state ricavate le curve relative ad eventi con tempo di ritorno di 200 anni, 100 anni, 30 anni e 20 anni.

Per la determinazione degli idrogrammi di piena in corrispondenza delle sezioni di chiusura si è utilizzato un modello matematico di trasformazione afflussi-deflussi basato sull'impiego dell'idrogramma sintetico del *Soil Conservation Service*.



Tale procedura è stata applicata mediante l'impiego del codice di calcolo HEC-HMS versione 2.2.2., progettato per simulare i processi relativi alla trasformazione afflussi-deflussi di sistemi idrografici con struttura ad albero.

Dal momento che i risultati dell'elaborazione con il codice di calcolo HEC-HMS forniscono dati decisamente sottostimati rispetto a quelli forniti dall'Autorità di Bacino del Fiume Arno, derivanti dall'utilizzo del modello ALTO, si è giunti alla determinazione dei dati di portata utilizzando un metodo meno sofisticato ma più cautelativo, in grado di fornire un dato di portata maggiorato rispetto a quello ottenibile dalla modellazione dell'asta idraulica nella quale l'apporto di ogni affluente viene computato in relazione al proprio tempo di corrivazione.

In mancanza di osservazioni idrometriche, le portate sono state stimate a partire dalle precipitazioni con la formula razionale, considerando una pioggia di durata pari al tempo di corrivazione e stimando il valore del coefficiente di afflusso con il metodo CN (Moisello, 1998).

Una volta calcolati gli idrogrammi di piena, sono stati costruiti i profili di rigurgito per mezzo del codice di calcolo HEC-RAS versione 3.1.3., che costituisce un metodo di verifica a moto permanente in grado di valutare che la massima portata di progetto defluisca in alveo con un opportuno franco. I valori dei coefficienti di Manning dalle sponde, sono stati dedotti:

- consultando la documentazione fotografica raccolta durante il rilievo topografico;
- sulla base di sopralluoghi;
- in funzione dei materiali d'alveo e delle sponde.

La scelta delle sezioni su cui effettuare la verifica è stata dettata dalla necessità di valutare con un buon grado di dettaglio il rischio di esondazione nel perimetro delle zone oggetto di intervento insediativo e/o di previsione nel R.U..

Per quanto riguarda il corso d'acqua esaminato, lo studio idrologico è stato condotto a livello di bacino, mentre le verifiche idrauliche hanno interessato la parte dell'asta che interessa le aree di progetto fino allo sbocco nel corso d'acqua recettore; la scelta è giustificata dal fatto che l'asta valliva di ogni corso d'acqua, all'interno del territorio comunale, risulta in assoluto la zona a più alta criticità idraulica, dal momento che gli alvei si sviluppano interamente in aree urbanizzate o nelle quali si prevede di realizzare insediamenti ad alta densità abitativa, con evidenti implicazioni sia per quanto riguarda la sicurezza delle persone sia per quanto riguarda la valenza economica dei potenziali danni materiali.



Secondo quanto descritto con maggior dettaglio nei paragrafi successivi, per l'intero tratto di ogni corso d'acqua esaminato, all'interno dei confini comunali, è stata condotta la verifica idraulica per il transito della piena 200-ennale, della piena 100-ennale, della piena 30-ennale e della piena 20-ennale.

Per quanto riguarda le caratteristiche dimensionali dell'alveo e dei manufatti con esso interferenti, si è fatto riferimento ad una serie di rilievi topografici, effettuati dagli Studi Tecnici dei Geom. F. Bacci, M. Baesso e D. Nardi di Cenaia. Tali rilievi sono stati integrati con quelli forniti dalla Provincia di Pisa sui tratti terminali del Torrente Crespina e del Fosso Reale Zannone.

In particolare sono state verificate le sezioni di tutte le tombature presenti e dei manufatti d'attraversamento; le dimensioni e le caratteristiche geometriche di ciascun manufatto sono state rilevate nel corso dei sopralluoghi effettuati durante la redazione dei rilievi topografici.

Per la delimitazione della aree di esondazione sono stati utilizzati alcuni schemi concettuali semplici nell'applicazione e fisicamente basati su oggettive considerazioni di carattere idraulico; in particolare si è fatto uso del metodo dei volumi statici. Nel *Metodo dei volumi statici* si valuta il volume d'acqua che fuoriesce dall'alveo nel tratto di esondazione e si determina il volume delle zone prossime al tratto esaminato ove l'acqua esondata si dispone staticamente.

Per la stima del volume di esondazione per ciascuno dei tratti critici sono state individuate, quindi, la massima altezza idrometrica localmente raggiunta dalla piena di progetto e la durata temporale nella quale la portata di progetto supera il valore della massima portata contenibile in alveo; dal calcolo risulta la determinazione del corrispondente volume esondato.

La valutazione della curva superfici-volumi è stata effettuata utilizzando il modello digitale del terreno ed il programma di calcolo ArcView.

Tutte le verifiche sono state effettuate nell'ipotesi di "fluido ideale", in assenza cioè di trasporto solido al fondo e/o di materiale galleggiante trascinato dalla corrente.

BACINO IDROGRAFICO

Delimitazione dei bacini idrografici

La determinazione dei bacini idrografici principali è stata effettuata in modo digitale, prendendo come base topografica la cartografia in scala 1:10.000 (C.T.R. della Regione Toscana). sono stati individuati anche i sottobacini più significativi che, con il loro apporto idrico, potevano influenzare i calcoli idrologici.



Ogni bacino è stato determinato individuando, sulla superficie terrestre, lo spartiacque superficiale, senza tenere conto che particolari formazioni geologiche potrebbero provocare, in profondità, il passaggio di volumi idrici da un bacino all'altro.

La linea di spartiacque è stata individuata sulla base della morfologia desunta dall'andamento delle curve di livello (linee di cresta). Nelle zone pianeggianti e subpianeggianti è stata effettuata una estrapolazione della linea di demarcazione sulla base delle quote riportate nella cartografia.

Sull'intera estensione del bacino indagato si sono individuate alcune sezioni di chiusura necessarie alla discretizzazione delle portate. Generalmente il criterio scelto per il posizionamento delle sezioni risponde a diverse esigenze, quali:

- dividere le aree di competenza delle aste confluenti ai nodi di immissione più rilevanti, dove convergono corsi d'acqua per i quali, come minimo, sia stato assegnato un toponimo sulla C.T.R.;
- individuare sezioni di chiusura in zone per le quali risulta necessario o comunque interessante valutare la portata temibile, quali ingressi di zone abitate, imbocchi di tombature, ponti importanti.

Parametri fisici e morfologici dei bacini.

Per ciascun nodo di chiusura individuato sulle aste principali e secondarie dell'intero bacino, secondo i criteri suddetti, sono stati determinati i seguenti parametri:

- area sottesa A [km²], misurata dal limite dello spartiacque sino alla sezione di chiusura;
- lunghezza dell'asta principale L [km], che drena il bacino analizzato, sino alla sezione di chiusura;
- quota massima del bacino H_{max} [m s.l.m.], intesa come il dislivello rispetto al livello del mare del punto più elevato del bacino, solitamente una cima montuosa;
- quota della sezione di chiusura H_0 [m s.l.m.], che può essere la quota della sezione di sbocco del corso d'acqua nell'asta principale, nel caso di un affluente ovvero la sezione di controllo di un sottobacino secondario.

IDROLOGIA

Pluviometria

La scelta della stazione pluviometrica, su cui effettuare i calcoli idrologici, è stata condotta nell'ottica di individuare la stazione pertinente al bacino tributario che risulti comunque significativa per il bacino stesso; si è quindi deciso di esaminare la stazione pluviometrica di Casciana Terme, che fornisce i dati più cautelativi ai fini del calcolo della portata duecentennale.



Lo studio idrologico è stato condotto facendo riferimento Linee Segnalatrici di Probabilità Pluviometrica fornite dall'Ufficio Idrografico e Mareografico di Pisa, dalle quali sono state ricavate le curve relative ad eventi con tempo di ritorno di 200 anni, 100 anni, 30 anni e 20 anni.

Le piogge di massima intensità e breve durata sono le più aggressive dal punto di vista del territorio e sono quelle che determinano i più elevati valori di portata al colmo di piena; eventi di questo tipo si verificano con maggiore frequenza nei mesi autunnali, quando il terreno, sostanzialmente saturo, non presenta, a parità di altre condizioni (pendenza dei versanti, copertura vegetale, etc.), una significativa capacità di infiltrazione, che riduce a livelli trascurabili le funzioni di ritenzione e laminazione dei deflussi superficiali.

Il bacino esaminato, sia per la relativa estensione, sia per la pendenza dei versanti ha tempi di risposta piuttosto brevi ma superiori a quelli tipici degli scrosci; le elaborazioni hanno tenuto in conto, quindi, solamente le curve segnalatrici relative ai dati di pioggia registrati per durate superiori all'ora.

Per la stazione di Casciana Terme si ha:

$$h = 77,52 t^{0,279} \text{ per } Tr=200 \text{ anni}$$

$$h = 67,64 t^{0,279} \text{ per } Tr=100 \text{ anni}$$

$$h = 52,64 t^{0,279} \text{ per } Tr=30 \text{ anni}$$

$$h = 48,26 t^{0,279} \text{ per } Tr=20 \text{ anni}$$

Nella relazione precedente t risulta espresso in ore ed h in millimetri di pioggia.

Idrologia di piena.

Le elaborazioni pluviometriche hanno costituito la base per il calcolo delle massime portate temibili, alle quali si è giunti tramite una modellazione afflussi – deflussi operata secondo la metodologia ritenuta più appropriata e meglio applicabile allo studio del bacino considerato.

Nel caso specifico è stato adottato, per simulare le perdite di bacino, il metodo *SCS- CURVE NUMBER* che è basato sulle curve di precipitazione e perdita cumulate ed in cui in funzione del tipo di suolo, del suo uso e del grado di imbibizione dello stesso, viene calcolato, istante per istante, il quantitativo di pioggia che va a produrre il deflusso.



Metodologia di depurazione delle piogge (metodo CN-SCS).

Le perdite di bacino sono state simulate attraverso l'uso del metodo SCS-CURVE NUMBER, basato sulle curve di precipitazione e perdita cumulate, che permette di calcolare l'altezza di pioggia persa fino ad un dato istante, attraverso la valutazione dell'altezza di pioggia massima immagazzinabile nel suolo a saturazione (S) ed in cui il Curve Number è un parametro adimensionale decrescente in funzione della permeabilità intesa come caratteristica globale del tipo e dell'uso del suolo.

La sua determinazione del parametro CN è ottenuta in base al grado di umidità del terreno prima dell'evento meteorico esaminato, alla tipologia pedologica e litologica dei suoli ed all'uso del suolo. Il suo valore è compreso tra 0 e 100 ed è diffusamente tabulato specialmente nella letteratura scientifica americana come frutto dell'analisi di molti esempi applicativi.

Nell'applicazione del metodo sono previste tre classi, rispettivamente la I, la II, e la III del grado di umidità del terreno, in funzione dell'altezza di pioggia caduta nei 5 giorni precedenti l'evento esaminato (Antecedent Moisture Condition).

Poiché lo studio è rivolto al calcolo delle portate di piena di carattere eccezionale, e considerato che in occasione di queste ultime molto spesso il terreno del bacino in questione si presenta in condizioni di elevato imbibimento, si è preferito adottare il valore di CN corrispondente alla classe AMC-tipo III, legato a quella normale dalla relazione: $CN_{III} = CN_{II} / (0,43 + 0,0057 \cdot CN_{II})$

La classificazione dei tipi di suolo è funzione delle caratteristiche di permeabilità secondo la suddivisione proposta dal Soil Conservation Service che prevede quattro classi caratterizzate rispettivamente da potenzialità di deflusso scarsa (A), moderatamente bassa (B), moderatamente alta (C) e molto alta (D).

La suddivisione in base al tipo di copertura o uso del suolo comprende invece diverse situazioni di aree caratterizzate da differenti morfologie (pascoli, terrazzamenti, etc.) varie coperture vegetali (boschi, praterie, parchi), condizioni di conservazione e destinazione d'uso (coltivazioni, parcheggi, distretti industriali o altro).

La classificazione dei suoli secondo la natura del terreno da un punto di vista idrogeologico è riportata nella seguente *tabella 1*; una volta definito il tipo di suolo si determina il valore del CN corrispondente al tipo di copertura (vegetale e non) attraverso l'uso della *tabella 2*.

I valori riportati nella *tabella 2* sono relativi a condizioni medie di umidità del terreno antecedenti l'evento, definite attraverso il valore della precipitazione totale nei



cinque giorni precedenti l'evento stesso (Antecedent Moisture Condition classe II - che in sigla viene indicata come AMC II).

Tabella 1 - Classificazione litologica dei suoli secondo SCS

GRUPPO	DESCRIZIONE
A	Scarsa potenzialità di deflusso. Comprende sabbie profonde con scarsissimo limo e argilla, 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 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 della superficie.

Tabella 2 - Parametri CN relativi a AMC II per le quattro classi litologiche e per vari tipi di uso del suolo

	A	B	C	D
Terreno coltivato senza trattamenti di conservazione	72	81	88	91
Con interventi di conservazione	62	71	78	81
Terreno da pascolo cattive condizioni	68	79	86	89
Buone condizioni	39	61	74	80
Praterie				
Buone condizioni	30	58	71	78
Terreni boscosi o forestati				
Terreno sottile sottobosco povero senza foglie	45	66	77	83
Sottobosco e copertura buoni	25	55	70	77
Spazi aperti, prati rasati, parchi				
Buone condizioni con almeno il 75% con copertura erbosa	39	61	74	80
Condizioni normali con copertura erbosa 50%	49	69	79	84
Aree commerciali (impermeabilità 85%)	89	92	94	95
Distretti industriali (impermeabilità 72%)	81	88	91	93
Aree residenziali impermeabilità media 65%	77	85	90	92
38%	61	75	83	87
30%	57	72	81	86
25%	54	70	80	85
20%	51	68	79	84
Parcheggi impermeabilizzati, tetti	98	98	98	98
Strade pavimentate, con cordoli e fognature	98	98	98	98
Inghiaiate o selciate con buche	76	85	89	91
In terra battuta (non asfaltate)	72	82	87	89



Tabella 3 - Condizioni di umidità antecedenti individuate in base alla precipitazione totale nei 5 giorni precedenti (mm)

CLASSE AMC	STAGIONE DI RIPOSO	STAGIONE DI CRESCITA
I	< 12.7	< 35.5
I	12.7 -- 28.0	35.5 -- 53.3
III	>28.0	> 53.3

Tabella 4 – Tabella di conversione del CN

CLASSE AMC			CLASSE AMC			
I	II	III		I	II	III
100	100	100		40	60	78
87	95	98		35	55	74
78	90	96		31	50	70
70	85	94		22	40	60
63	80	91		15	30	50
57	75	88		9	20	37
51	70	85		4	10	22
45	65	82		0	0	0

L'individuazione della classe AMC viene effettuata con i valori riportati in *tabella 3*, mentre la *tabella 4* rappresenta la tabella di conversione dal valore del CN valido per AMC II (valore determinato attraverso la *tabella 1*) ai valori corrispondenti per AMC I o AMC III.

Dai valori del parametro CN, per la determinazione della pioggia netta, è stata utilizzata l'espressione :

$$P_n = (P_g - I_a) \cdot 2 / (P_g - I_a + S)$$

dove :

P_n = pioggia netta in mm

P_g = pioggia grezza in mm

I_a = perdita iniziale in mm

S = altezza di pioggia massima immagazzinabile nel suolo in condizioni di saturazione (capacità di ritenzione potenziale) in mm

Il valore di S da introdurre viene determinato in funzione del parametro CN secondo l'espressione seguente:

$$S = 25.4 \left(\left(\frac{1000}{CN} \right) - 10 \right)$$

La perdita iniziale I_a è quella che si manifesta prima dell'inizio dei deflussi superficiali; nella letteratura tecnica è riconosciuta l'esistenza di una correlazione positiva fra la perdita iniziale I_a e la capacità di ritenzione potenziale S tramite la seguente espressione:

$$I_a = K S$$

dove K è un coefficiente adimensionale che varia fra 0.1 e 0.2 .



Nel caso in esame, ogni sottobacino scolante è stato analizzato suddividendo l'intera superficie, in base al tipo e all'uso del suolo, in zone omogenee caratterizzate dal medesimo valore del parametro stesso: si sono così ottenute varie sub-aree isoparametriche la cui somma fornisce la superficie complessiva del sottobacino. Per ogni sottobacino è stato ricavato poi un valore medio del parametro CN , ottenuto come "media pesata" dei valori singolari imposti sulle i -esime sub-aree.

Tempo di corrivazione

Il tempo di corrivazione t_c di un bacino è definito genericamente come il tempo che impiega una singola particella d'acqua a giungere alla sezione di controllo del bacino considerato dal punto più lontano del bacino stesso. Diversi Autori hanno fornito formule di origine empirica, che permettono di stimare tale valore e, naturalmente, ognuna di tali formule è nata sulla base di analisi di bacini campione, i quali possono avere caratteristiche più o meno analoghe, sia in termini di ampiezza che di morfologia e uso del suolo, a quello oggetto di studio. Alcune formule infatti tendono a sovrastimare ed altre a sottostimare il tempo di corrivazione. Si è quindi già effettuata una selezione dei metodi più frequentemente usati e ritenuti accettabili per i bacini di ampiezza contenuta (inferiore a 100 km²)

Con riferimento ai simboli dei parametri precedentemente descritti, il tempo di corrivazione t_c [minuti] di ciascun sottobacino è stato stimato, in prima approssimazione, attraverso la seguente formulazione:

$$T_c = L / 3,6 \text{ (formula di Viparelli)}$$

dove L [km] rappresenta la lunghezza dell'asta, ipotizzando una velocità media di percorrenza dell'asta assunta mediamente pari a 1 m/s. Tale valore rappresenta una media tra la celerità di percorrenza nella parte collinare del bacino e la velocità di transito nell'alveo sistemato della parte valliva, dove le sezioni appaiono più estese e minore la scabrezza.

La valutazione dei tempi di percorrenza, in ogni sottobacino, è stata comunque condotta anche con l'adozione di altre formule disponibili per la determinazione del tempo di corrivazione e riscontrabili facilmente in letteratura (Kirpich ecc. a seconda delle caratteristiche del bacino), ed è stato adottato il valore ritenuto più cautelativo.

Calcolo delle portate di piena

Il calcolo delle portate di piena è stato condotto secondo 2 differenti metodologie, al fine di stabilire l'entità delle portate di progetto maggiormente cautelative, con cui condurre le operazioni di verifica idraulica.



In fase preliminare, per la determinazione degli idrogrammi di piena in corrispondenza delle sezioni di chiusura si è utilizzato un modello matematico di trasformazione afflussi-deflussi basato sull'impiego dell'idrogramma sintetico del *Soil Conservation Service*; tale procedura è stata applicata attraverso l'uso del modello di calcolo automatico HEC-HMS River Analysis System, versione 3.1.0 realase may 2005, messo a punto dall'Hydrologic Engineering Center dell'U.S. Army Corps of Engineers.

La rappresentazione fisica delle caratteristiche del bacino idrografico viene configurata nel data set Basin Model ed i singoli elementi idrologici sono connessi in una rete ad albero. Per la modellazione delle perdite per infiltrazione, per la trasformazione afflussi-deflussi e per la simulazione della propagazione dei deflussi a pelo libero il software mette a disposizione diversi metodi di calcolo.

Ogni bacino oggetto di studio è stato suddiviso in sottobacini, ciascuno caratterizzato in media da proprietà idrauliche ed idrologiche omogenee e da una distribuzione spaziale delle precipitazioni poco variabile.

I risultati delle elaborazioni con il codice di calcolo HEC-HMS hanno fornito dati di portata scarsamente cautelativi e molto difforni da quelli adottati dall'Autorità di Bacino del Fiume Arno, derivanti dall'applicazione del modello ALTO; al fine della definizione delle portate da utilizzare nelle operazioni di verifica idraulica sono stati, quindi, adottati i valori derivanti da altra metodologia, meno sofisticata e maggiormente cautelativa, nella quale l'apporto idrico alla sezione di chiusura avviene considerando l'intero bacino scolante e vengono trascurati i ritardi dei singoli sottobacini.

Il metodo più conosciuto e generalmente adottato per il calcolo delle portate di piena è quello definito Metodo Razionale, secondo il quale la portata di piena di un corso d'acqua, nella sezione considerata, è funzione della pioggia netta avente tempo di ritorno prefissato, dell'estensione del bacino e del tempo di corrivazione.

La formulazione più conosciuta è la seguente:

$$Q = k c A h / T_c \text{ (mc/sec)}$$

dove k è un fattore di uniformità delle unità di misure adottate

c è il coefficiente di deflusso

A è l'estensione del bacino in kmq

T_c è il tempo di corrivazione

Per ogni corso d'acqua sono state calcolate le rispettive portate di piena derivanti da eventi meteorici che hanno tempo di ricorrenza di 20 anni, 30 anni, 100 anni e 200 anni.

*Calcolo dei profili di rigurgito*

Per ogni portata calcolata viene eseguito il tracciamento del profilo della superficie libera del corso d'acqua attraverso l'uso del modello di calcolo automatico HEC-RAS River Analysis System, versione 3.1.3 released May 2005, messo a punto dall'Hydrologic Engineering Center dell'U.S. Army Corps of Engineers.

Il modello è in grado di effettuare simulazioni di tipo monodimensionale del fenomeno di propagazione dell'onda di piena su corsi d'acqua, una volta fornite tutte le informazioni necessarie circa la geometria di un numero sufficiente di sezioni trasversali. Il programma consente, inoltre, di inserire sezioni trasversali fittizie, interpolando quelle rilevate.

La procedura di calcolo si basa sulla soluzione dell'equazione del moto permanente gradualmente variato, con un metodo alle differenze finite; si considera, quindi, il moto di una corrente a pelo libero, con variazioni graduali di sezione, ed eventualmente di direzione, in cui, in ogni sezione, la pressione può essere distribuita idrostaticamente; il calcolo condotto con tale *software* consente anche la valutazione degli effetti sulla corrente dovuti all'interazione con ponti, tombinature, briglie, stramazzi, aree golenali, ecc

Il tratto di alveo da studiare viene diviso in tronchi di lunghezza s , abbastanza corti da poter confondere i valori medi della sezione e della velocità, in ogni tronco, con i valori di un estremo; fatta questa premessa, l'equazione differenziale risulta essere la seguente:

$$[1] \quad dH/ds = -J \quad \text{con}$$

$$[2] \quad H = h + v^2/2g \quad \text{in cui}$$

H = carico totale della corrente nella sezione generica di ascissa s misurato rispetto ad un riferimento orizzontale

J = perdita di carico unitaria dovuta alle resistenze continue

h = quota del pelo liquido misurato rispetto ad un riferimento orizzontale

v = velocità media della corrente nella sezione generica di ascissa s

g = accelerazione di gravità

n = coefficiente di scabrezza

R = raggio idraulico della sezione

Per risolvere le iterazioni si procede alla realizzazione di una tabella in cui, con piccolo passo, si riportano i valori della funzione $H = H(h)$ in ogni sezione, per la portata assegnata.



Per il calcolo delle perdite di carico si utilizza la *formula di Manning*:

$$[3] J = v^2 n^2 / R^{4/3} \quad \text{in cui}$$

L'equazione differenziale del profilo liquido, passando alle differenze finite ed applicata tra due sezioni a distanza prefissata s , si può leggere secondo la:

$$[4] H_2 - H_1 = - J_m \cdot s \quad \text{in cui}$$

H_1 = carico totale della corrente nella sezione iniziale;

H_2 = carico totale della corrente nella sezione finale;

J_m = perdita di carico unitaria, dovuta alle resistenze continue, media tra le due sezioni.

Tenendo conto della relazione [2], l'equazione [4] assume la seguente forma:

$$[5] h_1 + Q^2/2gA_1^2 - h_2 - Q^2/2gA_2^2 + \frac{1}{2} \left[\frac{Q^2 n^2}{A_1^2 R_1^{4/3}} \right] + \left[\frac{Q^2 n^2}{A_2^2 R_2^{4/3}} \right] \cdot s = 0$$

in cui:

Q = portata

A_1 = area liquida della corrente nella sezione iniziale

A_2 = area liquida della corrente nella sezione finale

Le caratteristiche geometriche di una sezione risultano essere funzione dell'altezza liquida, per cui la [5] consente la determinazione della quota liquida nella sezione terminale di un tronco di larghezza s quando risulti nota la quota liquida in corrispondenza della sezione iniziale.

In particolare, vista la natura e le caratteristiche dei corsi d'acqua in studio, si sono considerati come parametri preminenti il materiale del fondo alveo e delle sponde, l'irregolarità del fondo alveo e le variazioni della forma e delle dimensioni delle sezioni.

Ai fini del calcolo, nelle verifiche è stato assunto il valore del coefficiente n corrispondente alla situazione di alveo rilevata: naturale con presenza di ciottoli e ghiaia, sezioni di forma sostanzialmente regolare, presenza di ostruzioni in alveo quali pile di ponti, basamenti di tralicci ecc., scarsa o rilevante presenza di vegetazione. In particolare, la valutazione del coefficiente di scabrezza da utilizzare nella formula di Manning è stata condotta utilizzando la classificazione suggerita da Ven Te Chow "Open Channel Hydraulics".

Il modello idraulico adottato consente di suddividere la sezione in più zone in cui assegnare un valore diverso del parametro n di scabrezza; in particolare è possibile individuare tre zone principali: quella centrale dell'alveo inciso (*denominata main channel*) e due zone laterali golenali (*denominate right and left overbanks*).



Il programma consente la simulazione del deflusso attraverso ponti e tombinature (*culvert*) mediante la loro schematizzazione geometrica (impalcato, pile, setti, ecc.).

La procedura di calcolo utilizzata consente di simulare il deflusso a pelo libero al di sotto dell'impalcato, il deflusso in pressione al di sotto dell'impalcato e la combinazione del deflusso in pressione e del deflusso con scavalciamento dell'impalcato stesso (funzionamento a stramazzo).

Come condizione al contorno di valle, essendo la corrente lenta, è stato assunto un valore dell'altezza di moto uniforme avente un valore della pendenza della linea dell'energia calcolato per il Fosso Reale Zannone; per i torrenti Crespina ed Orcina è stato adottato il valore corrispondente al livello di massima piena del corso d'acqua recettore.

Il coefficiente di Manning è stato assunto pari a:

0.030 nei tratti di alveo rettilinei e puliti

0.035 in presenza di vegetazione e ghiaia

0.025 nei tratti con rivestimento spondale in muratura

0.017 nei tratti con rivestimento spondale in cemento in buone condizioni

0.100 nei tratti fuori alveo con vegetazione ed arbusti

Nel tratto studiato sono state individuate una serie di sezioni trasversali in funzione del numero di manufatti d'attraversamento (ponti, passerelle, coperture) e delle caratteristiche geometriche e morfologiche dell'alveo (larghezza, pendenza, depositi al fondo, vegetazione, ecc.).

I risultati della verifica sono riassunti in forma numerica e grafica nei seguenti elaborati:

- *profilo longitudinale* – tracciato in asse all'alveo, sul quale è riportato l'andamento del fondo, le quote arginali in sponda destra e sinistra, le eventuali coperture e tutti i manufatti presenti lungo il percorso (ponti, passerelle ecc.);
- *sezioni trasversali* - dove è riportata la traccia dell'alveo e delle sponde (arginate o naturali). In presenza di manufatti trasversali si è tracciata la sezione immediatamente a monte dell'opera, in modo da poter distinguere eventuali restringimenti bruschi;
- *tabella numerica* - sono indicate le principali grandezze geometriche (numero della sezione, quote di fondo, quote arginali), grandezze idrauliche (velocità della corrente, carico totale, livello idrico, numero di Froude ecc.)



MODELLAZIONE DEL TERRENO

Modellazione idraulica dei bacini del Torrente Crespina e del Torrente Orcina.

Di seguito vengono illustrate le fasi che hanno portato alla redazione delle cartografie allegare alla Relazione idraulica relativa allo studio dei Torrenti Crespina ed Orcina e del Fosso Reale Zannone.

La modellazione relativa allo studio idrologico è stata effettuata per i singoli bacini (Orcina e Crespina), ovvero realizzando delle analisi spaziali differenti per ogni insieme di quote, confrontando la congruenza solo nelle aree di confine poste nella pianura prossima al Canale Scolmatore.

Generazione del modello digitale di elevazione del terreno (Digital Elevation Model – DEM)

Lo sviluppo del DEM si è sviluppato per fasi di lavoro successive, che possono essere riassunte schematicamente nei seguenti punti:

- Definizione dei singoli bacini idrografici;
- Realizzazione di una griglia di riferimento di lato 100 m x 100 m, estesa su tutta l'area in studio;
- digitalizzazione dei punti quotati riportati sul CTR Toscana in scala 1:2.000 (privilegiato) e 1:10.000 (subordinato);
- Modellazione del terreno tramite gli applicativi Spatial Analyst (DEM) e 3D Analyst (TIN).

Realizzazione della griglia di riferimento

Per riportare in maniera puntuale le quote di modellazione sull'intero bacino è stata realizzata una griglia a maglie quadrate 100 m x 100 m per ogni bacino.

Determinazione dei punti quotati

In maniera puntuale al centro della griglia è stato attribuito un valore di elevazione del piano campagna ricavato da una media pesata dei valore di quota interni ad ogni singola maglia. L'uso della media pesata si è resa necessaria a causa del troppo elevato numero di punti riportato nella cartografia in scala 1:2.000 che avrebbe potuto determinare una ridondanza dei dati in fase di elaborazione spaziale. Per le aree non coperte dalla cartografia di dettaglio (scala 1:2.000) è stata utilizzata la cartografia in scala 1: 10.000, sempre pesando i valori riportati sulla base della topografia esistente.



Per cercare di avvicinarsi maggiormente alla situazione reale sono stati introdotti degli ulteriori punti quotati in corrispondenza:

- a) di aree con morfologia significativa
- b) in prossimità dell'alveo.

Nelle zone di adiacenza fra quote derivate dalla cartografia 1:2.000 e quote derivate dalla cartografia 1:10.000, è stata valutata la congruenza dei valori assegnati.

Modellazione del terreno

Il modello bidimensionale dei bacini è stato ottenuto interpolando fra loro i punti quotati, organizzati in un unico database per bacino. L'elaborazione è stata eseguita utilizzando una apposita funzione di interpolazione spaziale (*IDW – Inverse Distance Weighted*).

Per limitare l'area in studio è stata utilizzata una "linea di barriera" corrispondente alla linea coincidente con lo spartiacque.

L'uscita grafica ottenuta è un'immagine raster costituita da pixel di dimensioni prestabilite (nel caso in studio un pixel = 20 m). La funzione di interpolazione utilizzata attribuisce a ciascun pixel un valore di quota in uscita ottenuto dal confronto del valore x di ogni punto presente nel database con i valori assoluti di quota riportati dagli altri n valori dei punti di quota adiacenti (nel caso in esame sono stati considerati 25 punti), attribuendo un maggior peso a quelli più vicini.

Il D.E.M. così ottenuto è una modellazione parametrica in due dimensioni del suolo, dove il valore z (quota) viene mediato sulla base di tutti i valori presenti nel database considerato.

Carta del battente idraulico

La seconda parte del lavoro ha avuto come scopo la determinazione del battente idraulico e la delimitazione delle aree secondo classi di battente prestabilite.

Per ottenere il valore dello spessore della lama d'acqua in corrispondenza di ciascun punto quotato è stato necessario costruire un modello digitale tridimensionale del terreno attraverso un'apposita funzione di interpolazione 3D, il TIN (*Triangular Interpolation Nodes*). Nella funzione TIN i vari nodi, rappresentati dall'insieme dei punti quotati, vengono uniti a quelli adiacenti in modo da formare delle superfici triangolari solide.



Poiché ciascun nodo è corredato di un valore Z rappresentativo della quota assoluta, l'accostamento delle varie superfici triangolari restituisce in uscita un modello tridimensionale rappresentativo del bacino. In funzione del numero dei punti analizzati e della loro densità si possono realizzare modelli 3D molto prossimi alla realtà.

In questa fase il database è stato più volte aggiornato con nuovi punti ausiliari in zone morfologicamente critiche.

Il modello tridimensionale del terreno è stato elaborato sia a livello di bacino complessivo che a livello di sezione fluviali, considerando due sezioni fluviali consecutive ove si verificano esondazioni. Dove le sezioni risultano molto ravvicinate sono stati effettuati degli accorpamenti. Per ottenere il TIN fra sezioni d'alveo consecutive sono stati isolati i punti quotati presenti fra le sezioni considerate: l'elaborazione è stata effettuata solo fra tali punti.

Effettuata questa trasposizione 3D dei dati presenti nel database, tramite un'elaborazione elementare è stato possibile valutare il volume di storage, ovvero il volume in mc immagazzinabile internamente al DEM 3D, per vari valori di quota crescenti.

Determinazione del battente idraulico

Lo studio idrologico idraulico svolto ha permesso di valutare il volume d'acqua esondante da ciascuna sezione. Il parametro da valutare è il battente idraulico, ovvero lo spessore raggiunto dalla lama d'acqua esondata rispetto al piano campagna.

Il volume d'acqua calcolato in fase di studio è stato confrontato con quello compreso fra la superficie digitale del rilievo ed una superficie orizzontale posta ad una quota superiore rispetto a quella minima della porzione di bacino considerata. L'altezza della lama d'acqua in quota assoluta, approssimata per eccesso rispetto al volume d'acqua esondato, è stata determinata per tentativi successivi.

All'altezza della lama d'acqua è stata sottratta la quota di ciascun punto considerato, imponendo il risultato uguale a zero solo in caso di differenza negativa (ossia quota assoluta del punto maggiore di quello della lama d'acqua). Su ciascun punto quotato si ottiene in questo modo un valore corrispondente al battente idraulico.

La procedura è stata replicata a tutti i TIN costruiti a livello di sezione.



Elaborazione della carta dei battenti idraulici

Per ottenere la carta delle aree allagate a livello di bacino è stata effettuata una interpolazione spaziale 2D utilizzando il database relativo ai soli battenti idraulici. La funzione di interpolazione utilizzata è la funzione IDW (Inverse Distance Weighted), impostata in modo da essere limitata al bacino considerato, e restituire in uscita un cella (pixel) di 20 m di lato.

L'elaborazione è stata effettuata sui database relativi alle piene con tempi di ritorno di 20, 30, 100 e 200 anni.

Il raster ottenuto è stato riclassificato ottenendo le tre classi di battente convenzionali: $h < 30$ cm, $30 \text{ cm} < h < 60$ cm e $h > 60$ cm.

Per dettagliare ulteriormente l'elaborato è stata effettuata una verifica sistematica delle aree allagate, facendo riferimento sia a dati di letteratura quali la distanza laterale massima di propagazione dell'acqua rispetto all'alveo in aree di pianura, che dati reali immessi nel database quali la quota della lama d'acqua, i punti quotati disponibili e l'andamento della morfologia.

L'ultimo step di lavoro svolto è stata la verifica di coerenza fra i dati in ingresso (quota s.l.m.m. del pelo libero dell'acqua) e quelli in uscita in rapporto alla morfologia ed ai fattori antropici presenti (ostacoli non sormontabili dalle acque, strade, rilevati ecc.). Ove necessario sono state apportate modifiche manualmente.

MAPPATURA DELLE AREE INONDABILI

La mappatura è attività complessa ed articolata che mira a simulare la propagazione dei volumi d'acqua esondati sulle aree prossime al corso d'acqua interessato. L'attività di mappatura, anche se sviluppata attraverso metodologie semplificate che non si avvalgono di modelli matematici sofisticati di propagazione dei volumi esondati, che avrebbero necessitato di dati oggettivi su esondazioni avvenute per la taratura del modello, deve comunque prefigurare scenari di evento in grado di definire le possibili dinamiche di inondazione.

L'analisi idraulica, ampiamente trattata nei capitoli precedenti, ha consentito di individuare il livello di criticità dei diversi tratti di alveo in relazione al deflusso di portata di piena per diversi tempi di ritorno, caratterizzando la dinamica del deflusso attraverso il calcolo dei profili di rigurgito in moto permanente; le verifiche hanno portato ad individuare i tratti di alveo insufficienti lungo i quali si verifica esondazione.



Nei corsi d'acqua che attraversano zone vallive incassate, le aree inondabili sono state individuate in prima approssimazione estendendo alle zone limitrofe adiacenti il corso d'acqua, le altezze idrometriche calcolate attraverso le verifiche.

L'analisi dei risultati, unitamente alla conoscenza della topografia ed alla distribuzione sul territorio delle principali strutture ed infrastrutture, hanno consentito di formulare alcune ipotesi sulla dinamica dell'esondazione e sulla conseguente modalità di propagazione dei volumi d'acqua esondati.

In base ai risultati delle verifiche è stato individuato, per i tronchi esaminati, il grado di criticità in funzione della probabilità di accadimento della portata che dà luogo ad esondazione (portata limite smaltibile).

Non potendo ricorrere a modelli più complessi e sofisticati che simulano la diffusione dei volumi esondati attraverso un'analisi bi e tridimensionale del fenomeno, in mancanza di dati per la taratura del modello e viste le caratteristiche e la tipicità del territorio in esame, si ritiene che i risultati della mappatura siano, in prima approssimazione, più che soddisfacenti ed esaustivi delle problematiche in gioco. La cartografia delle aree realmente allagate nell'evento del 1993 (*fornita dal Consorzio di Bonifica Ufficio dei Fiumi e Fossi di Pisa*) non è utilizzabile per la taratura di un modello, dal momento che prende in considerazione anche aree allagate per rottura arginale e per sifonamento alla base dei rilevati arginali.

La simulazione del fenomeno esondativo si basa inoltre sulle seguenti ipotesi:

1. I volumi idrici di inondazione si generano esclusivamente per tracimazione delle sommità arginali del corso d'acqua. Non sono considerati altri fenomeni quali, ad esempio, il collasso delle strutture arginali o fenomeni di rigurgito diversi da quelli già considerati nel presente studio; anche gli elementi infrastrutturali delimitanti le aree di potenziale inondazione, quali rilevati stradali, ferroviari, etc, si considerano, al pari degli argini fluviali, tracimabili senza collasso;
2. Le aree suscettibili di inondazione sono preventivamente delimitabili sulla base delle caratteristiche morfologiche e infrastrutturali del territorio;
3. L'identificazione delle aree potenzialmente inondabili si basa sull'analisi delle sezioni fluviali e della cartografia 1:10.000.

In ogni caso la modellazione idraulica adottata necessita della conoscenza delle caratteristiche geometriche di tali aree al fine di simularne correttamente il comportamento idraulico; in linea di massima, per ovvi motivi di ordine morfogenetico, risultano potenzialmente inondabili tutte le pianure alluvionali fino all'inizio della zona pedecollinare.



In particolare è stato possibile caratterizzare la dinamica del deflusso attraverso il calcolo dei profili di rigurgito in moto permanente. Attraverso i risultati ottenuti dal tracciamento dei profili di corrente relativi ai periodi di ritorno di 200 anni, 1000 anni, 30 anni e 20 anni, sono stati individuati i tratti di corso d'acqua in corrispondenza dei quali si verifica una insufficienza idraulica delle sezioni trasversali.

Le aree inondabili sono state individuate in prima approssimazione estendendo alle zone limitrofe adiacenti il corso d'acqua, le altezze idrometriche calcolate attraverso le verifiche. Questo criterio è stato applicato al solo tratto di corso d'acqua in territorio pedecollinare, nel quale questo tipo di schematizzazione fornisce un risultato attendibile, se pure cautelativo.

Nei tratti di pianura di tutti i corsi d'acqua è stato adottato il *Metodo dei volumi statici*, descritto nel paragrafo che illustra l'approccio metodologico del presente studio.

In ogni caso, nel rispetto dell'ipotesi di moto permanente ed a favore di sicurezza, non vengono considerati fenomeni di laminazione della piena dovuti ad esondazione nei tratti precedenti quello esaminato; secondo questa metodologia, la mappatura delle aree inondabili, per diversi tempi di ritorno, viene ad essere costituita dall'involuppo delle aree potenzialmente inondabili, ipotizzando il transito della massima piena temibile a moto permanente, per diversi tempi di ritorno, in ogni sezione. Questa metodologia presuppone che l'apporto dei volumi idrici e dei conseguenti livelli sia costante ed inesauribile nel tempo, mentre nella realtà si verifica che, nel caso di esondazione per insufficienza d'alveo in un determinato tratto di corso d'acqua, la portata ed i livelli nel tratto successivo potrebbero essere ridotti.

Ai fini dell'analisi del grado di rischio e della mappatura delle aree potenzialmente soggette ad inondazioni, nell'ambito della pianificazione urbanistica, la suddetta ipotesi ritenuta prudenziale appare del tutto accettabile e conforme al tipo di analisi di rischio che la Provincia di Pisa richiede in sede di dimensionamento delle opere idrauliche di attraversamento dei corsi d'acqua.

In particolare sono state delimitate le zone di accumulo "statico" dei volumi esondati completando la perimetrazione con l'analisi dei presumibili percorsi di inondazione e dall'analisi delle caratteristiche morfologiche del territorio. L'allagamento di un'area può derivare pertanto dal transito, come sopra ipotizzato, dei volumi che si trasferiscono da una zona all'altra e/o dall'accumulo di volumi idrici.



Le conseguenti aree inondabili possono, in qualche caso, distribuirsi su terreni laterali all'alveo che, pur essendo protetti da argini sufficientemente alti, risultano raggiungibili da acque fuoriuscite dai punti di esondazione singolari situati più a monte.

I volumi disponibili in pianura, impiegati per l'analisi delle esondazioni secondo i criteri descritti, sono stati determinati a partire dall'interpretazione della cartografia in scala 1:10.000 e, ove disponibile, implementata dai dati della cartografia 1:2.000. Sono state individuate alcune celle nettamente delimitate da ostacoli (ad es. rilevati o argini) ed aree omogenee ove si può ipotizzare che l'acqua scorra senza particolari limiti, seguendo le pendenze del piano di campagna.

Con il calcolo effettuato, è possibile ottenere un quadro indicativo piuttosto preciso delle aree potenzialmente interessate ad esondazioni di assegnato tempo di ritorno. I limiti (che sono margini cautelativi) del metodo sono legati al fatto che si considera potenzialmente esondato l'intero idrogramma di progetto per la parte eccedente l'officiosità della sezione.

L'ipotesi di trascurare che, a monte, possano già essersi verificate esondazioni che comportano la progressiva riduzione dei volumi transitati in alveo è considerata ragionevole dal momento che, ai fini della pianificazione, il fatto di intervenire in un tratto non rende automaticamente adeguati anche gli altri tratti a valle; quindi è legittimo considerare che le esondazioni a monte, che renderebbero meno critico un tratto a valle, in futuro potrebbero non esserci più.

TORRENTE CRESPINA

BACINO IDROGRAFICO

Assetto morfologico

Il calcolo del bacino tributario del Torrente Crespina è stato condotto individuando, come sezione idraulica di chiusura, quella in corrispondenza dell'altezza della Strada Provinciale delle Colline; dai calcoli condotti è risultato, come valore complessivo, un'area scolante pari a 14,60 km².

La parte a maggior quota del bacino raggiunge il valore di 190 m s.l.m., nella parte più a sud del bacino si attesta su valori prossimi a 20 m s.l.m.

Rete idrografica

La sezione di chiusura del bacino è in prossimità della località La settembrina, ove inizia il tratto arginato.



Nel bacino del Torrente Crespina sono stati individuati gli apporti dei seguenti affluenti:

- Rio di San Rocco
- Botro di Vecchiana e Rio Malvento
- Fosso di Sessanta-Fosso Crespina

Ai fini della modellazione con il software HEC-HMS, il bacino del Torrente Crespina è stato suddiviso in 4 sottobacini:

- sottobacino D, parte collinare del Torrente Crespina (area complessiva 5,76 Km² e lunghezza pari 4,3 km);
- sottobacino C, parte valliva del Torrente Crespina (area complessiva 5,69 Km² e lunghezza pari 4,1 km);
- sottobacino B, contributo dell'affluente in destra idrografica (area complessiva 2,50 Km² e lunghezza pari 2,8 km);
- sottobacino A, contributo dell'affluente in sinistra idrografica (area complessiva 0,41 Km² e lunghezza pari 1 km).

IDROLOGIA

Le perdite di bacino sono state simulate attraverso l'uso del metodo SCS-CURVE NUMBER, basato sulle curve di precipitazione e perdita cumulate. Il valore complessivo del parametro CN adottato nel calcolo è pari a 83, nella condizione AMC III.

Tempo di corrivazione

Con riferimento alla metodologia illustrata in precedenza, il tempo di corrivazione t_c [minuti] del bacino è stato stimato in $T_c = 3,42$ ore.

Calcolo delle portate di piena

Applicando la formula razionale con i dati a disposizione, si ottengono i seguenti valori delle portate di verifica, per diversi tempi di ritorno:

$$Q_{20} = 43,22 \text{ mc/sec} \quad Q_{30} = 48,88 \text{ mc/sec}$$

$$Q_{100} = 69,23 \text{ mc/sec} \quad Q_{200} = 83,19 \text{ mc/sec}$$

IDRAULICA

Calcolo dei profili di rigurgito

Per ogni portata calcolata viene eseguito il tracciamento del profilo della superficie libera del corso d'acqua attraverso l'uso del modello di calcolo automatico HEC-RAS River Analysis System, versione 3.1.3 realase may 2005, messo a punto dall'Hydrologic Engineering Center dell'U.S. Army Corps of Engineers.



Come condizione al contorno di valle è stato assunto il valore dell'altezza di moto permanente del Fosso Reale Zannone.

I risultati della verifica idraulica sono riassunti in forma numerica e grafica nei seguenti elaborati:

- Profili longitudinali
- Sezioni trasversali di calcolo
- Tabella riassuntiva dei risultati

Sezioni di verifica

Per comodità di lettura, le sezioni evidenziate sulla mappa delle aree allagabili riportano una numerazione differente da quella utilizzata per condurre le verifiche idrauliche utilizzando il modello di calcolo automatico HEC-RAS River Analysis System. Di seguito si riporta la tabella di conversione tra le sezioni individuate nella mappa e quelle utilizzate nella modellazione.

N° sezione	Hec-Ras	N° sezione	Hec-Ras
10c	1	130c	17
20c	3	140c	18
30c	6	150c	20
40c	7	160c	21
50c	8	170c	22
60c	9	180c	23
70c	10	190c	25
80c	10.5	200c	26
90c	12	210c	28
100c	13	220c	29
110c	15	230c	30
120c	16	240c	31

Sintesi dei risultati

Dalla lettura degli elaborati di calcolo, risultano le principali criticità:

- la portata avente tempo di ritorno pari a 20 anni, di entità pari a $Q_{20} = 43,22 \text{ m}^3/\text{sec}$, non risulta contenuta nei rilevati arginali in tutto il tratto compreso tra la sezione 240c e la sezione 90c, ove esonda sia in destra sia in sinistra idraulica;
- la portata avente tempo di ritorno pari a 30 anni, di entità pari a $Q_{30} = 48,88 \text{ m}^3/\text{sec}$, non risulta contenuta nei rilevati arginali in tutto il tratto compreso tra la sezione 240c e la sezione 90c, ove esonda sia in destra sia in sinistra idraulica;
- la portata avente tempo di ritorno pari a 100 anni, di entità pari a $Q_{100} = 69,23 \text{ m}^3/\text{sec}$, non risulta contenuta nei rilevati arginali in tutto il tratto compreso tra la sezione 240c e la sezione 90c, ove esonda sia in destra sia in sinistra idraulica; esonda nuovamente a partire dalla sezione 30c sino allo scocco nel Fosso Reale Zannone;



- la portata avente tempo di ritorno pari a 200 anni, di entità pari a $Q_{200} = 83,19 \text{ m}^3/\text{sec}$, non risulta contenuta nei rilevati arginali in tutto il tratto compreso tra la sezione 240c e la sezione 90c, ove esonda sia in destra sia in sinistra idraulica; esonda nuovamente a partire dalla sezione 30c sino allo scocco nel Fosso Reale Zannone.

TORRENTE ORCINA

BACINO IDROGRAFICO

Assetto morfologico

Il calcolo del bacino tributario del Torrente Orcina è stato condotto individuando, come sezione idraulica di chiusura, quella in corrispondenza dell'altezza della Strada Provinciale delle Colline; dai calcoli condotti è risultato, come valore complessivo, un'area scolante pari a $5,23 \text{ km}^2$.

La parte a maggior quota del bacino raggiunge il valore di 70 m s.l.m., nella parte più a sud del bacino si attesta su valori prossimi a 14 m s.l.m. nella sezione di chiusura.

Rete idrografica

La sezione di chiusura del bacino è in prossimità del Cimitero di Cenaia, ove inizia il tratto arginato.

Il bacino del Torrente Orcina è stato suddiviso in 2 sottobacini:

- Torrente Gamberonci;
- Fosso Orcina

Ai fini della modellazione con il software HMS, il bacino del Torrente Orcina è stato suddiviso in 2 sottobacini:

- sottobacino A, contributo dell'affluente in destra idrografica (*area complessiva $2,85 \text{ Km}^2$ e lunghezza pari $4,44 \text{ km}$*);
- sottobacino B, contributo dell'affluente in sinistra idrografica (*area complessiva $2,38 \text{ Km}^2$ e lunghezza pari $3,74 \text{ km}$*).

IDROLOGIA

Le perdite di bacino sono state simulate attraverso l'uso del metodo SCS-CURVE NUMBER, basato sulle curve di precipitazione e perdita cumulate. Il valore complessivo del parametro CN adottato nel calcolo è pari a 84, nella condizione AMC III.

Tempo di corrivazione

Con riferimento alla metodologia illustrata in precedenza, il tempo di corrivazione t_c [minuti] del bacino è stato stimato in $T_c = 1,23$ ore.



Calcolo delle portate di piena

Applicando la formula razionale con i dati a disposizione, si ottengono i seguenti valori delle portate di verifica, per diversi tempi di ritorno:

$$Q_{20} = 28,63 \text{ mc/sec} \quad Q_{30} = 33,08 \text{ mc/sec}$$

$$Q_{100} = 47,83 \text{ mc/sec} \quad Q_{200} = 59,12 \text{ mc/sec}$$

IDRAULICA

Calcolo dei profili di rigurgito

Per ogni portata calcolata viene eseguito il tracciamento del profilo della superficie libera del corso d'acqua attraverso l'uso del modello di calcolo automatico HEC-RAS River Analysis System, versione 3.1.3 realase may 2005, messo a punto dall'Hydrologic Engineering Center dell'U.S. Army Corps of Engineers.

Nel tratto studiato sono state individuate una serie di sezioni trasversali in funzione del numero di manufatti d'attraversamento (ponti, passerelle, coperture) e delle caratteristiche geometriche e morfologiche dell'alveo (larghezza, pendenza, depositi al fondo, vegetazione, ecc.); i risultati della verifica, riportati in Appendice N°6, sono riassunti in forma numerica e grafica nei seguenti elaborati:

- Profili longitudinali
- Sezioni trasversali di calcolo
- Tabella riassuntiva dei risultati

Sezioni di verifica

Per comodità di lettura, le sezioni evidenziate sulla mappa delle aree allagabili riportano una numerazione differente da quella utilizzata per condurre le verifiche idrauliche utilizzando il modello di calcolo automatico HEC-RAS River Analysis System. Di seguito si riporta la tabella di conversione tra le sezioni individuate nella mappa e quelle utilizzate nella modellazione.

N° sezione	Hec-Ras	N° sezione	Hec-Ras
10o	1.5	80o	20
20o	4	90o	21
30o	5	100o	23
40o	7	110o	24
50o	8	120o	26
60o	13	130o	28
70o	15	140o	29

*Sintesi dei risultati*

Dalla lettura degli elaborati di calcolo, risultano le principali criticità:

- la portata avente tempo di ritorno pari a 20 anni, di entità pari a $Q_{20} = 28,63 \text{ m}^3/\text{sec}$, non risulta contenuta nei rilevati arginali in tutto il tratto compreso tra la sezione 140o e la sezione 60o, ove esonda sia in destra sia in sinistra idraulica; esonda nuovamente a partire dalla sezione 20o sino allo scocco nel Canale Scolmatore;
- la portata avente tempo di ritorno pari a 30 anni, di entità pari a $Q_{30} = 33,08 \text{ m}^3/\text{sec}$, non risulta contenuta nei rilevati arginali in tutto il tratto compreso tra la sezione 140o e la sezione 60o, ove esonda sia in destra sia in sinistra idraulica; esonda nuovamente a partire dalla sezione 20o sino allo scocco nel Canale Scolmatore;
- la portata avente tempo di ritorno pari a 100 anni, di entità pari a $Q_{100} = 47,83 \text{ m}^3/\text{sec}$, non risulta contenuta nei rilevati arginali in tutto il tratto compreso tra la sezione 140o e la sezione 60o, ove esonda sia in destra sia in sinistra idraulica; esonda nuovamente a partire dalla sezione 30o sino allo scocco nel Canale Scolmatore;
- la portata avente tempo di ritorno pari a 200 anni, di entità pari a $Q_{200} = 59,12 \text{ m}^3/\text{sec}$, non risulta contenuta nei rilevati arginali in tutto il tratto esaminato.

FOSSO REALE ZANNONE*Portate di piena*

Ai fini della verifica idraulica sono state adottate le portate fornite dall'Autorità di Bacino del Fiume Arno (Q_{30} , Q_{100} e Q_{200}) e dalla Provincia di Pisa (Q_{20}).

$$Q_{20} = 52,00 \text{ mc/sec}$$

$$Q_{30} = 67,00 \text{ mc/sec}$$

$$Q_{100} = 84,00 \text{ mc/sec}$$

$$Q_{200} = 96,00 \text{ mc/sec}$$

Calcolo dei profili di rigurgito

Per ogni portata calcolata viene eseguito il tracciamento del profilo della superficie libera del corso d'acqua attraverso l'uso del modello di calcolo automatico HEC-RAS River Analysis System, versione 3.1.3 realase may 2005, messo a punto dall'Hydrologic Engineering Center dell'U.S. Army Corps of Engineers.

Come condizione al contorno di valle è stato assunto il valore dell'altezza di moto uniforme, considerata maggiormente cautelativa.

I risultati della verifica sono riassunti in forma numerica e grafica nei seguenti elaborati:

- Profilo longitudinale
- Sezioni trasversali di calcolo
- Tabella riassuntiva dei risultati

*Sintesi dei risultati*

Dalla lettura degli elaborati di calcolo, risultano le principali criticità:

- la portata avente tempo di ritorno pari a 20 anni, di entità pari a $Q_{20} = 52,00$ m³/sec, non risulta contenuta nei rilevati arginali, in sinistra idraulica, in corrispondenza delle sezioni 32, 30, 26, 4;
- la portata avente tempo di ritorno pari a 30 anni, di entità pari a $Q_{30} = 67,00$ m³/sec, non risulta contenuta nei rilevati arginali, in sinistra idraulica, in corrispondenza delle sezioni 32, 30, 26, 20, 16, 14, 10, 6, 4;
- la portata avente tempo di ritorno pari a 100 anni, di entità pari a $Q_{100} = 69,23$ m³/sec, non risulta mai contenuta nei rilevati arginali, in sinistra idraulica;
- la portata avente tempo di ritorno pari a 200 anni, di entità pari a $Q_{200} = 53,84$ m³/sec, non risulta mai contenuta nei rilevati arginali, in sinistra idraulica.

CONCLUSIONI

Quale sintesi dei risultati ottenuti si può osservare che il tratto più critico dell'intera asta idrica, sia per il Torrente Crespina sia per il Torrente Orcina, è quello compreso tra l'origine ed il tratto arginato, per piene con tempo di ritorno di 20 e 30 anni, sia a causa della sezione ristretta degli attraversamenti presenti sia per insufficienza della sezione d'alveo.

Tutti i corsi d'acqua esaminati non risultano verificati per eventi con tempo di ricorrenza duecentennale, in tutto il tratto verificato.

Si precisa che le elaborazioni statistiche sui dati pluviometrici risultano attendibili nel caso in cui non si verificano sostanziali modifiche del regime delle piogge all'interno del bacino idrografico, dovute a cambiamenti climatici.

La validità delle conclusioni è legata all'ipotesi in cui non vengano apportate modifiche all'attuale conformazione morfologica del bacino e non s'intervenga alterando la conformazione dell'alveo, delle golene o degli argini.