

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE



DIREZIONE TECNICA

S.O. OPERE CIVILI

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA

POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE-FALCONARA

RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228-CASTELPLANIO

ELABORATI GENERALI

RELAZIONE IDROLOGICA

Studio idrologico del bacino del Fiume Esino

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

IR0F 00 R 09 RI ID0001 001 C

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	EMISSIONE DEFINITIVA	C. Cesali	ottobre 2021	F. Cabas	ottobre 2021	C. Urciuoli	ottobre 2021	A. Vittozzi novembre 2023
B	EMISSIONE DEFINITIVA	C. Cesali	novembre 2022	F. Cabas	novembre 2022	C. Urciuoli	novembre 2022	
C	EMISSIONE DEFINITIVA	C. Cesali	novembre 2023	F. Cabas	novembre 2023	C. Urciuoli	novembre 2023	

ITALFERR S.p.A.
U.O. Opere Civili e gestione delle varianti
Dot. Ing. Angelo Vittozzi
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
n° A.20783

File: IR0F00R09RIID0001001C

n. Elab.:

INDICE

1. PREMESSA	5
1.1 RIFERIMENTI NORMATIVI.....	6
2. INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO.....	7
3. IL BACINO IDROGRAFICO DEL FIUME ESINO	8
3.1 STUDI IDROLOGICI ESISTENTI DISPONIBILI.....	10
4. STUDIO IDROLOGICO DEL BACINO DEL FIUME ESINO	11
4.1 GENERALITÀ.....	11
4.2 METODOLOGIA VA.P.I. – REGIONE MARCHE.....	12
4.2.1. <i>Va.Pi.: regionalizzazione delle piogge</i>	12
4.3 ELABORAZIONE STATISTICA DELLE REGISTRAZIONI PLUVIOMETRICHE	19
4.4 CONFRONTO TRA LE CURVE DI POSSIBILITÀ PLUVIOMETRICA DISPONIBILI PER L'AREA DI STUDIO	24
4.5 EVENTI PLUVIOMETRICI E ALLUVIONALI PREGRESSI NELL'AREA DI INTERVENTO	26
4.6 MODELLO IDROLOGICO DEL BACINO DEL FIUME ESINO	32
4.6.1. <i>Calibrazione del modello</i>	37
4.6.2. <i>Determinazione degli idrogrammi di piena di progetto</i>	42
5. FIUME ESINO: DEFINIZIONE DELLA PORTATA DI RIFERIMENTO PER IL DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE PROVVISORIE IN ALVEO	46
6. EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SULLE PRECIPITAZIONI.....	48
7. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	53
ALLEGATO I – DATI PLUVIOMETRICI.....	54
ALLEGATO II – ANALISI DI STAZIONARIETÀ' DELLE SERIE STORICHE DEI DATI DI PIOGGIA	74
ALLEGATO III – APPROFONDIMENTI IDROLOGICI.....	78

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
	RELAZIONE IDROLOGICA	COMMESSA IROF	LOTTO 00 R 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0001 001	REV. C

INDICE DELLE FIGURE

<i>Fig. 1 – Inquadramento generale dell'area di studio.....</i>	<i>7</i>
<i>Fig. 2 – Bacino idrografico del Fiume Esino: sottobacini di interesse.....</i>	<i>9</i>
<i>Fig. 3 – Va.P.I.: compartimenti di Bologna, Pisa e Roma, sottozone omogenee.....</i>	<i>14</i>
<i>Fig. 4 – Isolinee delle altezze medie di pioggia massime annuali della durata di 1 giorno (a) e 1 ora (b).....</i>	<i>17</i>
<i>Fig. 5 – Sovrapposizione sottozone VAPI e bacini maggiori di riferimento.....</i>	<i>18</i>
<i>Fig. 6 – Stazioni pluviometriche (e relativi topoi) di riferimento per il sottobacino del Fiume Esino di interesse.....</i>	<i>20</i>
<i>Fig. 7 – Confronto tra le curve di possibilità pluviometrica (Tr = 200 anni) ricavate dalle differenti metodologie adottate.....</i>	<i>25</i>
<i>Fig. 8 – Evento del 10-13 novembre 2013: ietogrammi orari registrati presso le stazioni pluviometriche di Arcevia, Campodiegoli, Cantiano, Cingoli, Cupramontana, Esanatoglia.....</i>	<i>27</i>
<i>Fig. 9 – Evento del 10-13 novembre 2013: ietogrammi orari registrati presso le stazioni pluviometriche di Fabriano, Fonte Avellana, Moie, Pioraco, San Giovanni, Sassoferrato.....</i>	<i>28</i>
<i>Fig. 10 – Evento del 10-13 novembre 2013: ietogrammi orari registrati presso la stazioni pluviometrica di Serralta.....</i>	<i>29</i>
<i>Fig. 11 – Evento del 6-8 marzo 2017: ietogrammi orari registrati presso le stazioni pluviometriche di Arcevia, Campodiegoli, Cantiano, Cingoli, Cupramontana, Esanatoglia.....</i>	<i>30</i>
<i>Fig. 12 – Evento del 6-8 marzo 2017: ietogrammi orari registrati presso le stazioni pluviometriche di Fabriano, Fonte Avellana, Moie, Pioraco, San Giovanni, Sassoferrato.....</i>	<i>31</i>
<i>Fig. 13 – Evento del 6-8 marzo 2017: ietogrammi orari registrati presso la stazioni pluviometrica di Serralta.....</i>	<i>32</i>
<i>Fig. 14 – Costruzione del modello idrologico del sottobacino del Fiume Esino in esame in HEC HMS.....</i>	<i>33</i>
<i>Fig. 15 – Bacino del Fiume Esino: carta del Curve Number (AMC II).....</i>	<i>35</i>
<i>Fig. 16 – Fiume Esino: ubicazione idrometro di Camponoecchio.....</i>	<i>39</i>
<i>Fig. 17 – Fiume Esino: ubicazione idrometro di Moie.....</i>	<i>39</i>
<i>Fig. 18 – Modello idrologico del F. Esino, calibrazione (evento 2013): idrogrammi di piena a Camponoecchio e a Moie.....</i>	<i>40</i>
<i>Fig. 19 – Simulazione dell'evento del 2017: idrogrammi di piena registrato e da modello HecHMS.....</i>	<i>41</i>
<i>Fig. 20 – Fiume Esino: idrogrammi di piena di progetto per Tr = 50 anni.....</i>	<i>44</i>

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
	RELAZIONE IDROLOGICA	COMMESSA IROF	LOTTO 00 R 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0001 001	REV. C

<i>Fig. 21 – Fiume Esino: idrogrammi di piena di progetto per $Tr = 200$ anni.....</i>	<i>45</i>
<i>Fig. 22 – Fiume Esino: idrogrammi di piena di progetto per $Tr = 500$ anni.....</i>	<i>45</i>
<i>Fig. 23 – Precipitazione massima giornaliera (mm), scenario RCP4.5. Mappe delle variazioni previste dai modelli climatici per i tre orizzonti temporali 2021-2050 (prima riga), 2041-2070 (seconda riga), 2061-2090 (terza riga).</i>	<i>49</i>
<i>Fig. 24 – Precipitazione massima giornaliera (mm), scenario RCP8.5. Mappe delle variazioni previste dai modelli climatici per i tre orizzonti temporali 2021-2050 (prima riga), 2041-2070 (seconda riga), 2061-2090 (terza riga).</i>	<i>50</i>
<i>Fig. 25 – Stazioni pluviometriche di riferimento per il sottobacino del Fiume Esino in esame: serie storiche di dati di altezza di pioggia con durata pari a 24 ore (nel periodo climatologico 1971-2000).</i>	<i>51</i>

INDICE DELLE TABELLE

<i>Tab. 1 – Sottobacini di interesse del Fiume Esino: dati morfometrici.</i>	<i>9</i>
<i>Tab. 2 – Fiume Esino: valori di portata al colmo, per un tempo di ritorno di 200 anni, a Moie e a Mergo.</i>	<i>10</i>
<i>Tab. 3 – Fiume Esino: valori di portata al colmo, per un tempo di ritorno di 50 anni, alla confluenza di T. Sentino e T. Esinante.</i>	<i>10</i>
<i>Tab. 4 – Va.P.I.: valori dei parametri a e n della curva di possibilità climatica, per il sottobacino di interesse del Fiume Esino.</i>	<i>18</i>
<i>Tab. 5 – Stazioni pluviometriche di riferimento per il sottobacino del Fiume Esino di interesse.</i>	<i>19</i>
<i>Tab. 6 – Stazioni pluviometriche di riferimento: valori dei parametri a e n.</i>	<i>23</i>
<i>Tab. 7 – Valori del CN (II e III, AMC) per i sottobacini del Fiume Esino considerati.</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 8 – Valori del parametro SCS lag per i sottobacini del Fiume Esino considerati.</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 9 – Modello idrologico del Fiume Esino: caratteristiche dei tratti fluviali.</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 10 – Percentuali di superficie dei singoli sottobacini del Fiume Esino considerati ricadente nei topoi dei delle stazioni pluviometriche di riferimento.</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 11 – Fiume Esino: valori di portata al colmo per $Tr = 200$ anni: CPP Gumbel vs Va.P.I.</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 12 – Fiume Esino: valori di portata al colmo per $Tr = 200$ anni, Va.P.I., per diversi valori della durata di pioggia critica.</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 13 – Fiume Esino: valori di portata al colmo di progetto per vari tempi di ritorno.</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 14 – Valori medio e previsti dai quattro modelli meteo climatici di variazione di precipitazione massima giornaliera nell'area di intervento (ISPRA, 2015).</i>	<i>51</i>

1. **PREMESSA**

Il presente elaborato è parte integrante del Progetto di Fattibilità Tecnico Economica “*Potenziamento infrastrutturale Orte-Falconara. Raddoppio della tratta PM228-Castelplanio*”.

Tale progetto è suddiviso nei **3 Lotti Funzionali** di seguito elencati:

- Lotto 1: da PM228 a Bivio Nord Albacina da progressiva Km 0+00 (Km 228+014 della LS) alla progressiva Km 7+200 di progetto
- Lotto 2: da Bivio Nord Albacina a Serra San Quirico (i) da progressiva Km 0+00 (Km 237+589 della LS) alla progressiva Km 8+889 (Km 246+958 della LS)
- Lotto 3: da Serra San Quirico (e) a Castelplanio (e) da progressiva Km 0+00 a progressiva Km 6+272 (Km 252+578 della LS).

Nel 2003 era stato redatto da ITALFERR Spa il progetto preliminare nell’ambito della Legge Obiettivo che già teneva conto della suddivisione nei 3 Lotti Funzionali sopra descritti. Rispetto al tracciato previsto in tale Progetto, che non ha ricevuto alcuna approvazione da parte degli Enti, il tracciato del PFTE in oggetto è stato aggiornato per tenere conto degli aggiornamenti normativi intercorsi.

Da punto di vista idrologico-idraulico, la tratta ferroviaria in progetto si sviluppa interamente in affiancamento al Fiume Esino, attraversando quest’ultimo in vari punti, lungo il tracciato, in ognuno dei tre lotti previsti. È stato condotto quindi lo studio idrologico del bacino del Fiume Esino finalizzato alla valutazione delle portate al colmo di progetto e dei relativi idrogrammi di piena da imporre/assumere come condizione al contorno nei modelli numerici idraulici sviluppati.

Lo studio idrologico si compone delle seguenti fasi:

- analisi statistica delle registrazioni pluviometriche presso le stazioni di misura di riferimento per la definizione dell’altezza totale di precipitazione, nonché della precipitazione netta, ovvero la componente di precipitazione che partecipa al deflusso, al netto della perdite idrologiche (i.e. immagazzinamento superficiale, vegetazione, evaporazione, infiltrazione);
- applicazione delle procedure di regionalizzazione delle piogge (i.e. VA.P.I.) disponibili per l’area di studio;
- trasformazione *afflussi-deflussi* per il calcolo delle portate al colmo e delle caratteristiche delle corrispondenti onde di piena, per vari tempi di ritorno.

Le analisi sono state sviluppate nel rispetto della Pianificazione di Bacino attualmente in vigore, in particolare del PIANO STRALCIO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO dell'ex Autorità di Bacino della Regione Marche (ultimo aggiornamento con DCI n. 68 del 08/08/2016), nonché nel PIANO DI GESTIONE DEL RISCHIO ALLUVIONI (di recente emanazione) dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Centrale - P.G.R.A.A.C. (Il ciclo di pianificazione, agg. Dicembre 2019, Approvazione definitiva: dicembre 2021).

1.1 Riferimenti normativi

Il progetto è stato redatto nel rispetto delle seguenti norme:

- Direttiva Quadro Acque 2000/60/CE
- Direttiva Alluvioni 2007/60/CE
- D.Lgs. n. 152/2006 - T.U. Ambiente
- R.D. 25/07/1904, N. 523 "Testo unico delle disposizioni di legge intorno alle opere idrauliche delle diverse categorie"
- Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 17 gennaio 2018) e relativa circolare applicativa n.7/2019
- "*Manuale di Progettazione delle Opere Civili*" della Rete Ferroviaria Italiana (RFI);
- Piano di Assetto Idrogeologico - Regione Marche – Autorità di bacino regionale - Norme di Attuazione
- Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico dei bacini di rilievo regionale – Norme di Attuazione (elaborato d) – DCR n. 116 del 21/01/2004
- *Piano di Gestione del Rischio Alluvioni del Distretto Idrografico dell'Appennino Centrale*, adottato il 17 dicembre 2015 con deliberazione n. 6 dal Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino del Fiume Tevere e approvato il 3 marzo 2016, con deliberazione n. 9, dal Comitato Istituzionale ed il 27 ottobre 2016 dal Presidente del Consiglio dei Ministri con DPCM Pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 28 del 3 febbraio 2017 recante "approvazione del piano di gestione del rischio di alluvioni del distretto idrografico dell'Appennino Centrale".

2. INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO

La “nuova” tratta ferroviaria *PM228 - Castelplanio* si sviluppa interamente in affiancamento al Fiume Esino attraversando quest’ultimo alla progr. 6+600 del Lotto 1 (*PM228 - Bivio Nord Albacina*), alle progr. 1+100, 4+650 e 6+100 del Lotto 2 (*Bivio Nord Albacina – Serra San Quirico*), alle progr. 3+050, 3+600 e 4+150 del Lotto 3 (*Serra San Quirico - Castelplanio*). Nella figura seguente è riportato il tracciato della linea ferroviaria in progetto, con evidenziata l’area di studio.

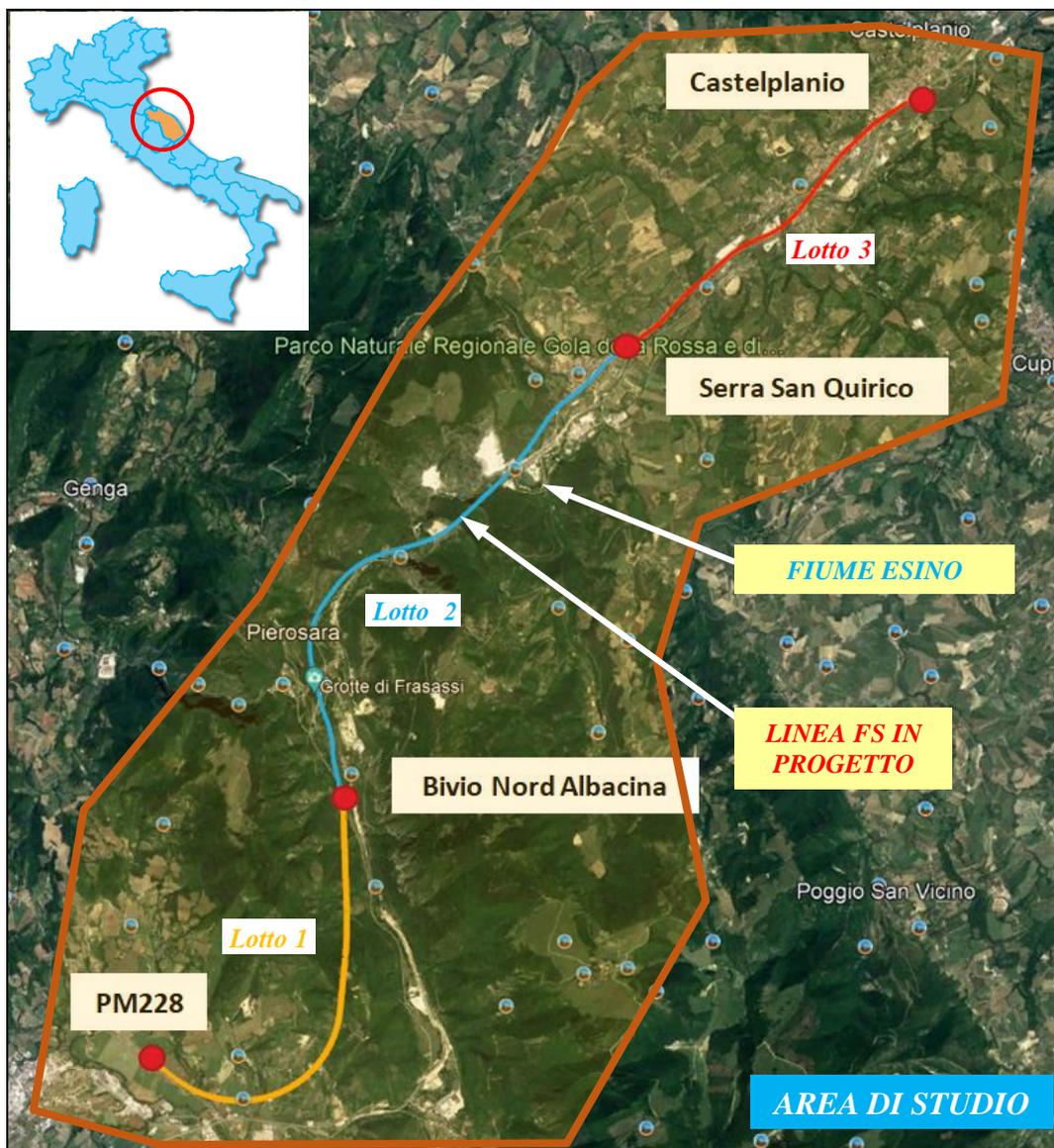


Fig. 1 – Inquadramento generale dell’area di studio.

3. IL BACINO IDROGRAFICO DEL FIUME ESINO

Il Fiume Esino è il principale corso d'acqua della *Provincia di Ancona*; il suo bacino imbrifero, che misura complessivamente 1.203 km², rientra con una parte apprezzabile nella provincia di Macerata e solo marginalmente nelle province di Pesaro e Perugia.

Nasce dal monte Cafaggio (1.116 m) ad Esanatoglia (MC) e sfocia, dopo circa 75 km a Falconara Marittima in località Fiumesino.

Il Fiume Esino ha caratteristiche del tutto particolari; a monte è caratterizzato da un regime tipicamente torrentizio, a valle e fino alla foce assomiglia molto di più ad un classico fiume di pianura. Nel tratto fluviale di studio, i suoi principali affluenti sono il Torrente Giano (che confluisce nel F. Esino nei pressi di Albacina), il Torrente Sentino (che confluisce nel F. Esino nei pressi di Genga), il Torrente Esinante (che confluisce nel F. Esino nei pressi di Castelplanio).

Il sottobacino idrografico di interesse, con sezione di chiusura collocata nei pressi di Castelplanio ricopre un'area di 764 km² circa (Fig. 2). All'interno di quest'ultimo, sono stati inoltre individuati ulteriori sottobacini con sezione di chiusura in nodi ritenuti di interesse in relazione all'idrografia (i.e. principali confluenze) e allo sviluppo del tracciato ferroviario di progetto (i.e. attraversamenti fluviali).

Sulla base di tale suddivisione ed in analogia a precedenti studi condotti dalla Provincia di Ancona e dal Consorzio di Bonifica delle Marche (rif. "*Studio per la mitigazione del rischio idrogeologico – Indagine condotta sui bacini idrografici dei fiumi Misa, Esino, Musone, Potenza, Chienti e Tenna*" Consorzio di Bonifica delle Marche in collaborazione con Università di Camerino; "*Manutenzione straordinaria biennale sui reticoli idrografici provinciali in aree P.A.I. a rischio R3 e R4. Bacino Idrografico Fiume Esino*" - Programma Operativo Regionale (POR) – Obiettivo "Competitività Regionale ed Occupazione" Regione Marche 2007/2013 cofinanziato dal Fondo Europeo di Sviluppo Regionale (FESR) – Asse 5 "Valorizzazione dei Territori" – Provincia di Ancona – Progetto Esecutivo), è stato quindi sviluppato il modello idrologico del sottobacino del F. Esino in esame (come descritto nei capitoli successivi).

I dati morfometrici (A = estensione; L = lunghezza dell'asta principale; H_{max} = quota massima, H_{min} = quota minima; H_{med} = quota media; P_{asta} = pendenza media dell'asta principale) dei sottobacini individuati sono riportati in Tab. 1. Per maggiori dettagli, si rimanda comunque agli elaborati grafici annessi al presente studio.

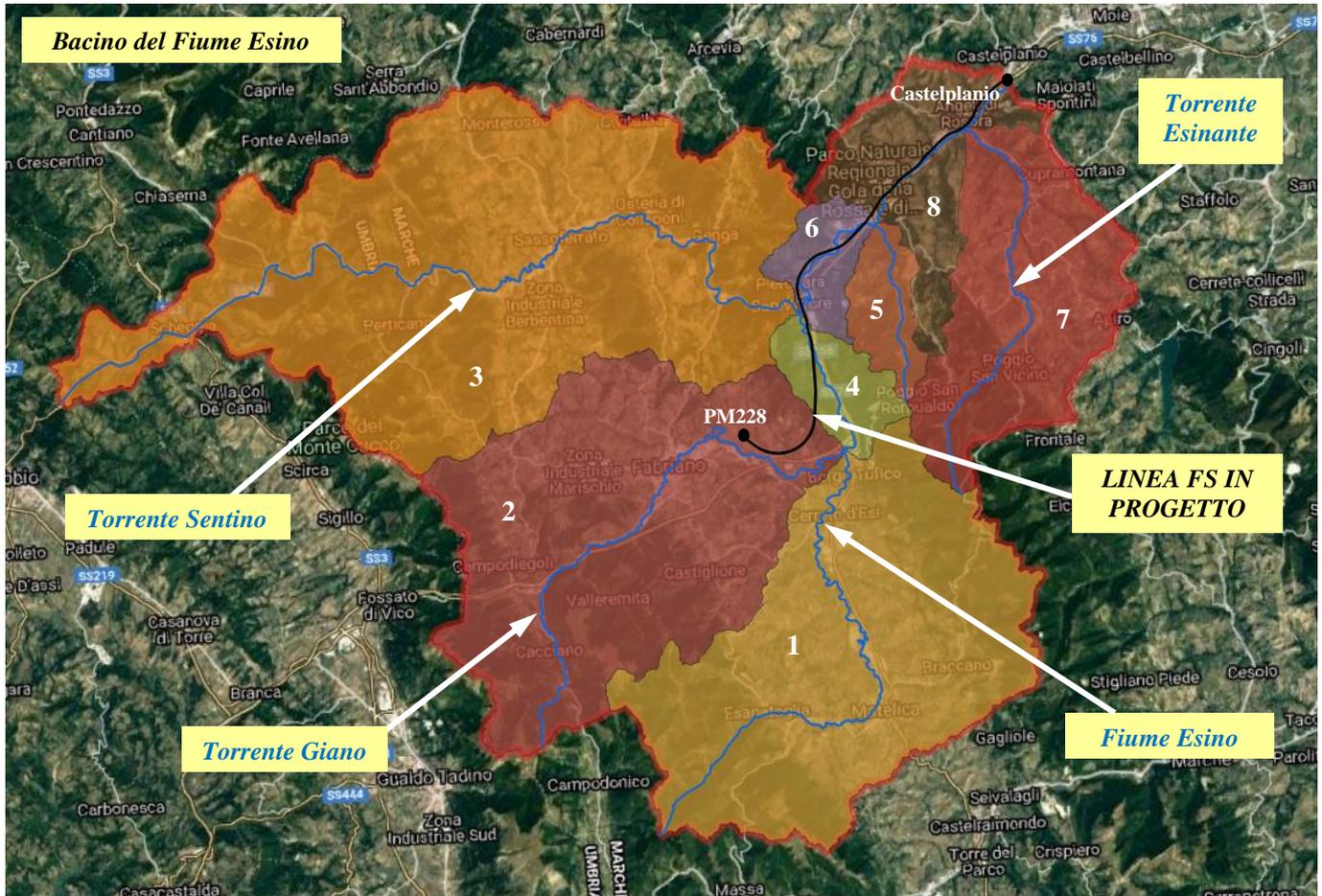


Fig. 2 – Bacino idrografico del Fiume Esino: sottobacini di interesse.

ID	Sottobacino	A (km ²)	H _{max} (m slm)	H _{min} (m slm)	H _{med} (m slm)	L (km)	P _{asta} (%)
1	F. Esino (a monte confluenza T. Giano)	165	1670	230	550	30.05	2.8
2	T. Giano	167.4	1380	226	580	29.5	3.4
3	T. Sentino	261	1050	193	510	37.2	1.6
4	F. Esino (tra T. Giano e T. Sentino)	17.3	1030	190	617	7.1	10.3
5	Fosso della Grotta	15.3	1060	159	550	7.2	10.8
6	F. Esino (tra T. Sentino e F. Grotta)	14.8	870	158	454	7.03	4.4
7	T. Esinante	78.7	1470	138	430	20.3	4.9
8	F. Esino (tratto finale)	44.2	1090	120	490	13.2	4.7
-	F. Esino totale (a Castelplanio)	763.7	1670	120	660	55.42	4.4

Tab. 1 – Sottobacini di interesse del Fiume Esino: dati morfometrici.

3.1 Studi idrologici esistenti disponibili

A titolo di confronto e verifica delle analisi idrologiche sviluppate nell'ambito del presente progetto, descritte nel capitolo successivo, nelle tabelle seguenti si riportano i valori di portata al colmo, per specifici tempi di ritorno (Tr) e in corrispondenza di particolari sezioni di chiusura o nodi idrologici, disponibili per il Fiume Esino, dedotti da studi condotti dalla Provincia di Ancona e dal Consorzio di Bonifica delle Marche (rif. "Studio per la mitigazione del rischio idrogeologico – Indagine condotta sui bacini idrografici dei fiumi Misa, Esino, Musone, Potenza, Chienti e Tenna" Consorzio di Bonifica delle Marche in collaborazione con Università di Camerino; "Manutenzione straordinaria biennale sui reticoli idrografici provinciali in aree P.A.I. a rischio R3 e R4. Bacino Idrografico Fiume Esino" - Programma Operativo Regionale (POR) – Obiettivo "Competitività Regionale ed Occupazione" Regione Marche 2007/2013 cofinanziato dal Fondo Europeo di Sviluppo Regionale (FESR) – Asse 5 "Valorizzazione dei Territori" – Provincia di Ancona – Progetto Esecutivo).

Nello specifico, con riferimento allo studio condotto dalla Provincia di Ancona, sono forniti/indicati i valori di portata al colmo del Fiume Esino, per un tempo di ritorno di 200 anni, in corrispondenza di Mergo (alla confluenza del Torrente Vallemanì ovvero prima della confluenza del T. Esinante) e a Moie (ovvero 4 km a valle di Castelplanio).

Sottobacino	Portata (m^3/s) – Tr_{200}
F. Esino a Mergo	997.53
F. Esino a Moie	1018.84

Tab. 2 – Fiume Esino: valori di portata al colmo, per un tempo di ritorno di 200 anni, a Moie e a Mergo.

Con riferimento invece allo studio condotto dal Consorzio di Bonifica delle Marche, sono forniti/indicati i valori di portata al colmo del Fiume Esino, per un tempo di ritorno di 50 anni, in corrispondenza delle confluenze del T. Sentino e del T. Esinante, nonché la portata Tr_{50} del Torrente Esinante stesso.

Nodo idrologico/bacino	Portata (m^3/s) – Tr_{50}
Confluenza del T. Sentino	666.50
Confluenza del T. Esinante	772.30
Bacino Torrente Esinante	117.09

Tab. 3 – Fiume Esino: valori di portata al colmo, per un tempo di ritorno di 50 anni, alla confluenza di T. Sentino e T. Esinante.

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</p>					
<p>RELAZIONE IDROLOGICA</p>	<p>COMMESSA IR0F</p>	<p>LOTTO 00 R 09</p>	<p>CODIFICA RI</p>	<p>DOCUMENTO ID0001 001</p>	<p>REV. C</p>	<p>FOGLIO 11 di 81</p>

4. STUDIO IDROLOGICO DEL BACINO DEL FIUME ESINO

4.1 Generalità

L'analisi delle precipitazioni intense è stata eseguita mediante il confronto dei risultati derivanti dall'applicazione di due metodologie:

- procedura *Va.P.I.* "Rapporto regionale per i compartimenti di Bologna, Pisa, Roma e zona emiliana del bacino del Po";
- elaborazione statistica delle registrazioni pluviometriche disponibili per l'area di studio mediante il metodo di Gumbel.

Nello specifico, il metodo *Va.P.I.* si basa sull'impiego di piogge estreme regionalizzate nell'ambito degli studi del GNDCl (Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche) condotti tramite il modello probabilistico TCEV (Two - Component Extreme Value). I dati pluviometrici analizzati sono desunti dalle pubblicazioni del Servizio Idrografico Italiano (oggi SIMN) relative ai Compartimenti di Bologna, Pisa e Roma, e l'archivio dei dati pluviometrici, basato sulle citate pubblicazioni, e aggiornato agli anni '90.

L'elaborazione statistica mediante il metodo di Gumbel prende in esame le serie storiche dei dati di pioggia, aggiornate alle recenti registrazioni (fino al 2020), riferite alle stazioni pluviometriche di interesse, fornite dal Centro Funzionale Multirischi della Protezione Civile della Regione Marche.

La scelta dei tempi di ritorno di riferimento per il calcolo delle altezze di pioggia, e quindi delle portate, di progetto è stata effettuata in conformità a quanto previsto nel Manuale di Progettazione Ferroviaria (RFI, 2020), nelle Norme Tecniche delle Costruzioni (D.M. 17 Gennaio 2018), e nella relativa circolare esplicativa n. 7 del 21 gennaio 2019 "Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni", nonché nella pianificazione di bacino vigente (i.e. *P.G.R.A.A.C.*, 2019).

In particolare, per i corsi d'acqua principali, quali il Fiume Esino, e la verifica di compatibilità idraulica delle relative opere di attraversamento, è il tempo di ritorno di progetto è fissato in 200 anni. Sono presi in considerazione anche i tempi di ritorno di 50 e 500 anni, in accordo alla definizione delle classi di pericolosità idraulica riportata nel *P.G.R.A.A.C.*.

	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE IDROLOGICA	COMMESSA IR0F	LOTTO 00 R 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0001 001	REV. C	FOGLIO 12 di 81

4.2 Metodologia Va.P.I. – Regione Marche

Per il territorio di competenza dei Compartimenti del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (SIMN) di Bologna, di Pisa e di Roma non sono stati ancora pubblicati Rapporti Regionali specifici.

Ciononostante, sul territorio in questione sono stati eseguiti vari studi nel rispetto dei criteri del Progetto VAPI, ai differenti livelli della procedura gerarchica e per le differenti grandezze idrologiche, a cura dell'U.O. 1.31 (ENEL S.p.a. Unità di Idrologia di Mestre) e dell'U.O. 1.41 (DISTART Università di Bologna).

L'area di indagine, che comprende parte dell'Emilia-Romagna e l'intera regione Marche (SIMN Bologna), gran parte della regione Toscana (SIMN Pisa), l'intera regione Umbria e parte della regione Lazio (SIMN Roma), è stata inoltre recentemente estesa ad alcuni bacini idrografici di competenza dell'Ufficio Idrografico del Po di Parma, così da ricoprire totalmente la regione Emilia-Romagna.

Questi studi, integrati con ulteriori analisi attualmente in corso relativamente alla modellazione statistica degli eventi idrometrici massimi annuali osservati nei bacini idrografici compresi tra lo Scrivia (Emilia) ed il Tronto (Marche), costituiranno la base per la redazione del Rapporto Finale che sarà effettuato durante il prossimo triennio di attività del GNDCI, con coordinamento presso il DISTART dell'Università di Bologna a cura delle U.O. sopra menzionate e dell'U.O. attualmente in corso di istituzione presso la Facoltà di Ingegneria di Ferrara. In questa sede si cerca di sintetizzare i risultati salienti delle analisi prima menzionate, fornendone unicamente gli aspetti puramente operativi.

4.2.1. Va.Pi.: regionalizzazione delle piogge

L'area interessata dagli studi comprende i bacini idrografici affluenti in destra Po compresi tra lo Scrivia ed il Panaro (Ufficio Idrografico del Po di Parma), i bacini idrografici con foce in Adriatico compresi tra il fiume Reno ed il fiume Tronto (Compartimento SIMN di Bologna), nonché quelli con foce in Tirreno tra il Serchio e l'Albegna (Compartimento SIMN di Pisa) e tra il Marta a Nord ed il Tevere a Sud (Compartimento SIMN di Roma).

La rete pluviometrica cui si è fatto riferimento risulta composta da 1556 stazioni di misura con numerosità variabile da 1 a 72 anni, per 540 delle quali sono disponibili anche le osservazioni relative ai massimi annuali delle altezze di pioggia di durata inferiore al giorno, con numerosità variabile da 1 a 62 anni.

L'analisi statistica è stata condotta sulle stazioni con almeno 30 anni di osservazione, individuando così 792 stazioni di misura della precipitazione giornaliera (numerosità media campionaria 48 anni) e 240 delle piogge di durata 1-24 ore (numerosità media campionaria di 43 anni).

L'analisi pluviometrica inizialmente svolta da Franchini e Galeati [1994] in riferimento al compartimento SIMN di Bologna ha portato all'identificazione di 2 sotto zone omogenee (SZO), una zona costiera ed una zona appenninica, la cui omogeneità in senso statistico è stata confermata in un successivo studio da Brath et al. [1998]. Tale studio, come già precedentemente ricordato, si estende anche ai bacini idrografici di competenza dei SIMN di Pisa e Roma. Esso ha portato alla identificazione nell'ambito delle regioni Toscana, Umbria e Lazio di due ulteriori SZO: la prima include la zona tirrenica costiera e parte della vallata del Tevere, mentre la seconda i contrafforti appenninici lungo il versante tirrenico. Un più recente studio, che integra i precedenti dati pluviometrici con quelli relativi ai bacini idrografici in destra Po compresi tra lo Scrivia e il Panaro (cfr. Brath e Franchini, 1999), ha infine condotto ad una leggera modifica nella suddivisione delle 2 SZO omogenee individuate sul versante adriatico ed alla delimitazione di 3 ulteriori SZO nel territorio di competenza dell'Ufficio Idrografico del Po di Parma.

L'intero territorio indagato risulta in definitiva suddiviso in 7 SZO omogenee nei confronti delle precipitazioni intense, visualizzate nella figura seguente, le cui curve di crescita, che determinano in maniera univoca la relazione fra periodo di ritorno T e valore del coefficiente probabilistico di crescita K_T :

$$T = \frac{1}{1 - F_K(k)} = \frac{1}{1 - \exp(-\Lambda_1 e^{-\eta k} - \Lambda_* \Lambda_1^{1/\theta_*} e^{-\eta k/\theta_*})} \quad (*)$$

risultano completamente definite dai parametri riportati in tabella.

Sottozona	Λ_*	θ_*	Λ_1	η
A	0.109	2.361	24.70	4.001
B	1.528	1.558	39.20	5.335
C	1.528	1.558	25.70	4.913
D	0.361	2.363	29.00	4.634
E	0.044	3.607	30.45	4.135
F	0.144	2.042	33.03	4.321
G	0.221	3.322	30.78	4.628

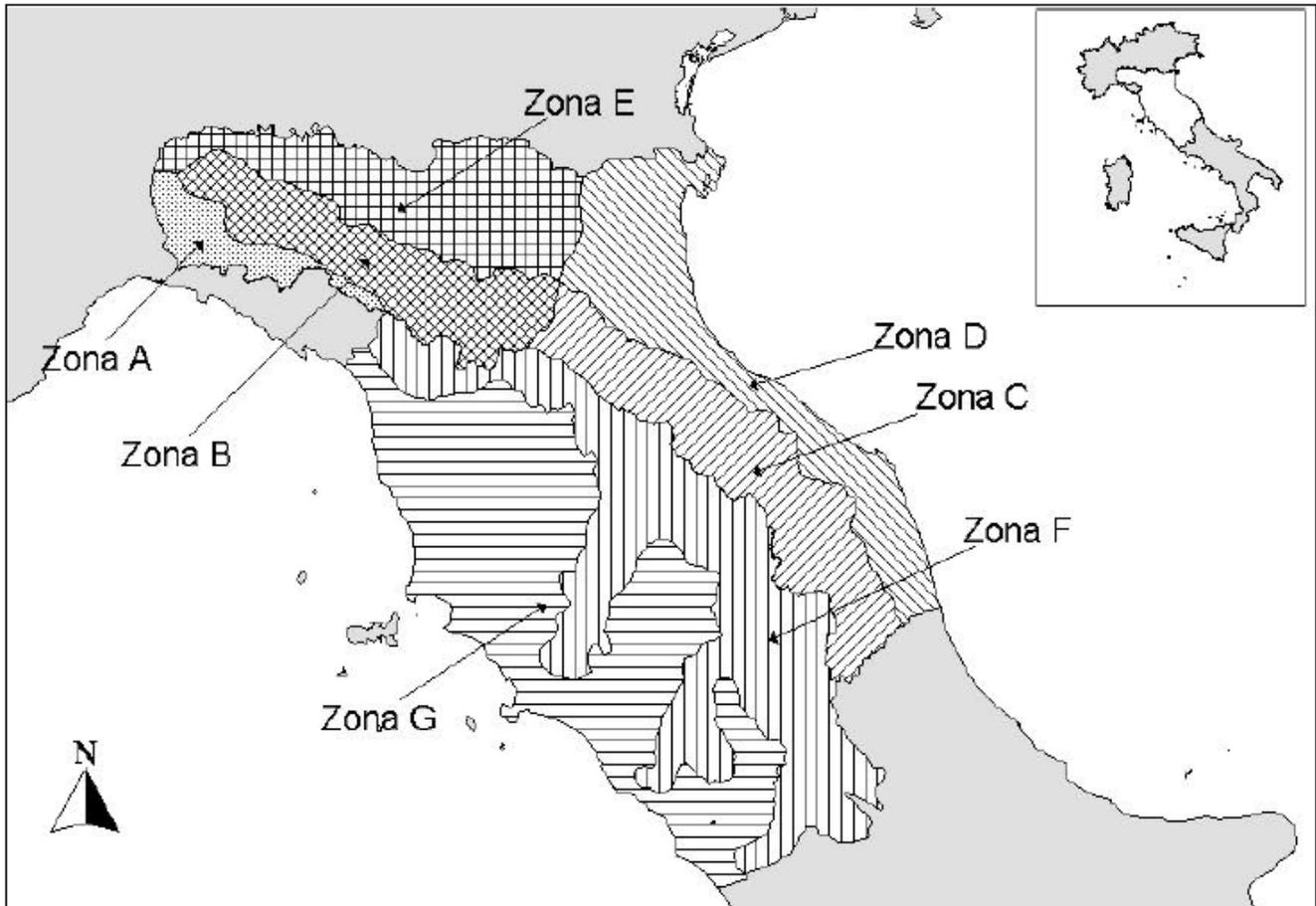


Fig. 3 – Va.P.I.: compartimenti di Bologna, Pisa e Roma, sottozone omogenee.

Per un agevole utilizzo operativo delle curve di crescita occorrerebbe disporre della forma inversa della precedente equazione (*) tramite la quale, fissato il valore T del periodo di ritorno di interesse, ricavare il corrispondente valore del coefficiente di crescita K_T .

Poichè per la distribuzione TCEV tale relazione non è analiticamente ottenibile, nella tabella seguente sono riportati i valori di K_T ottenuti numericamente dalla (*) per i valori del periodo di ritorno di maggior interesse pratico.

T (anni)	2	5	10	20	25	40	50	100	200	500	1000
SZO A	0.93	1.24	1.46	1.70	1.78	1.95	2.04	2.34	2.68	3.18	3.57
SZO B	1.01	1.30	1.51	1.71	1.77	1.90	1.97	2.17	2.37	2.63	2.83
SZO C	1.01	1.33	1.55	1.77	1.84	1.98	2.05	2.27	2.48	2.77	2.99
SZO D	0.87	1.19	1.44	1.72	1.82	2.02	2.13	2.45	2.79	3.23	3.57
SZO E	0.93	1.22	1.43	1.64	1.72	1.89	1.98	2.32	2.78	3.53	4.13
SZO F	0.93	1.23	1.43	1.65	1.72	1.87	1.95	2.20	2.47	2.86	3.17
SZO G	0.88	1.22	1.50	1.87	2.01	2.32	2.47	2.96	3.46	4.12	4.61

Nelle pratiche approssimazioni, è possibile anche fare riferimento ad una espressione semplificata del tipo:

$$K_T = \left(\frac{\theta_* \text{Ln } \Lambda_*}{\eta} + \frac{\text{Ln } \Lambda_1}{\eta} \right) + \frac{\theta_*}{\eta} \text{Ln } T$$

che, sostituendo gli opportuni valori dei parametri, conduce alle seguenti espressioni approssimanti, il cui uso comporta comunque per periodi di ritorno superiori a 50 anni errori sempre inferiori al 10%:

$$\text{SZO A: } K_T = -0.5064 + 0.590 \text{Ln } T$$

$$\text{SZO B: } K_T = 0.8115 + 0.292 \text{Ln } T$$

$$\text{SZO C: } K_T = 0.7952 + 0.317 \text{Ln } T$$

$$\text{SZO D: } K_T = 0.2071 + 0.510 \text{Ln } T$$

$$\text{SZO E: } K_T = -1.8986 + 0.872 \text{Ln } T$$

$$\text{SZO F: } K_T = -0.1064 + 0.473 \text{Ln } T$$

$$\text{SZO G: } K_T = 0.3431 + 0.718 \text{Ln } T$$

Le analisi dei massimi annuali delle piogge brevi (1-24 ore) rilevati alle 240 stazioni di misura disponibili hanno evidenziato che l'ipotesi solitamente assunta di un fattore probabilistico di crescita K_T costante al variare della durata di pioggia non risulta soddisfatto in 5 delle 7 SZO.

Basandosi sia su risultati di carattere statistico sia su considerazioni legate alla applicabilità, quali limitare il numero di parametri di stima e porsi comunque, nei casi incerti, in condizioni conservative, in queste 5 SZO sono stati stimati, per le diverse durate, tutti o alcuni dei parametri descrittivi delle relative curve di crescita. I parametri ottenuti sono riportati nella tabella seguente.

Sottozona	Λ^*	θ^*	Λ_1	η	durata (ore)		
A	0.109	2.361	24.70	4.001	Tutte		
B	1.528	1.558	13.65	4.280	1		
			19.35	4.629	3		
			26.20	4.932	6		
			39.20	5.335	≥12 e 1g		
C	1.528	1.558	13.65	4.280	1		
			14.70	4.354	3		
			20.25	4.674	6		
			25.70	4.913	≥12 e 1g		
D	0.361	2.363	29.00	4.634	Tutte		
E	0.044	3.607	13.60	3.329	1		
			19.80	3.704	3		
			23.65	3.882	6		
			30.45	4.135	≥ 12 e 1g		
F	0.073	1.406	21.01	3.713	1		
	0.144	2.042	33.03	4.321	≥ 3 e 1g		
G	0.131	1.820	16.28	3.571	1		
			0.770	2.391	24.71	5.140	3
			0.380	2.592	26.21	4.633	6
			0.303	2.799	30.01	4.680	12
			0.221	3.322	30.78	4.628	24 e 1g

La stima dei corrispondenti valori di K_T può essere dedotta dalla (*) oppure mediante le espressioni approssimanti (sopra introdotte) caratterizzate da un errore di stima inferiore al 10% per T maggiore di 50 anni.

Per ottenere il valore della precipitazione indice di durata d cui fare riferimento per calcolare il valore della precipitazione di assegnata durata e tempo di ritorno per la regione in esame si propone l'utilizzo di una formulazione analoga alla classica curva di possibilità climatica del tipo:

$$m(h_d) = m(h_1) \cdot d^n$$

$$n = (\text{Ln}[m(h_g)] - \text{Ln}[m(h_1)] - \text{Ln } r) / \text{Ln } 24$$

in cui:

- $m(h_d)$ = media del massimo annuale dell'altezza puntuale di precipitazione di durata d (ore);
- $m(h_g)$ = media del massimo annuale dell'altezza puntuale di precipitazione giornaliera;
- $m(h_1)$ = media del massimo annuale dell'altezza puntuale di precipitazione in 1 ora;
- $r = m(h_g) / m(h_{24}) = 0.89$ nella regione esaminata.

Per una pratica applicazione della curva di possibilità climatica vengono fornite le mappe isoparametriche di $m(h_1)$ e di $m(h_g)$ per l'intero territorio di indagine (vedi Brath e Franchini [1999] per le SZO A, B, C, D, E, e Brath et al. [1998] per le SZO G e F).

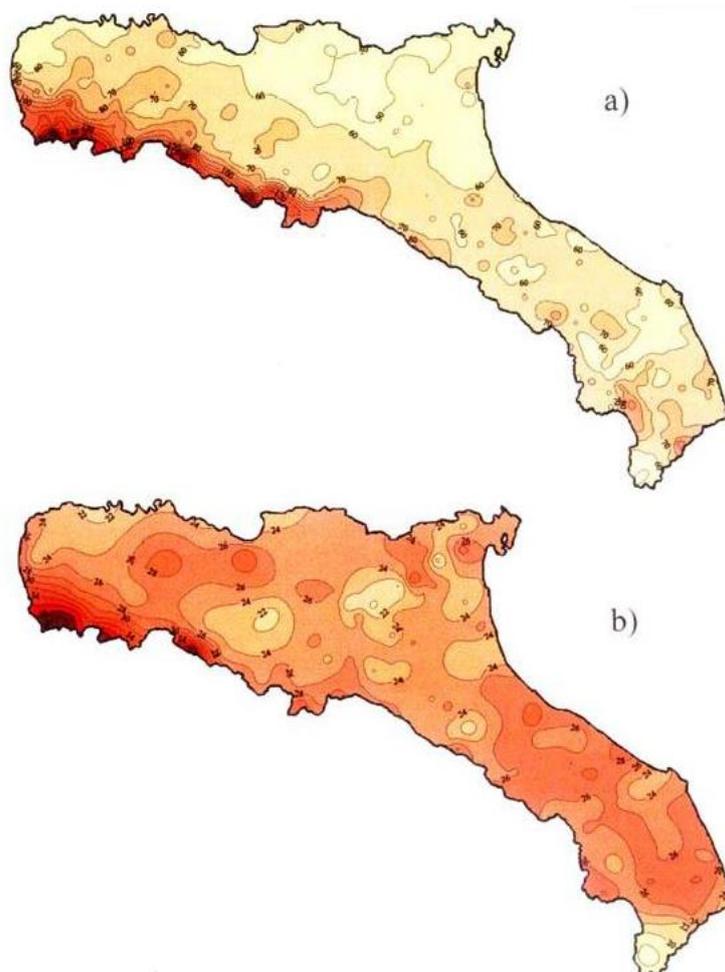


Fig. 4 – Isolinee delle altezze medie di pioggia massime annuali della durata di 1 giorno (a) e 1 ora (b).

La stima dell'altezza di precipitazione puntuale di durata d e tempo di ritorno T si ottiene moltiplicando il fattore di crescita opportuno per la precipitazione indice deducibile tramite la curva di possibilità climatica.

Per il sottobacino (totale) del Fiume Esino di interesse, ricadente nella "zona omogenea C", sono stati stimati valori dei parametri $m(h_1)$ e $m(h_g)$ pari rispettivamente a 25 e 60. Per una migliore identificazione della sottozona VAPI di riferimento nella figura seguente si riporta un estratto della Fig. 3 con sovrapposizione del bacino totale di interesse del Fiume Esino, chiuso a Castelplanio.

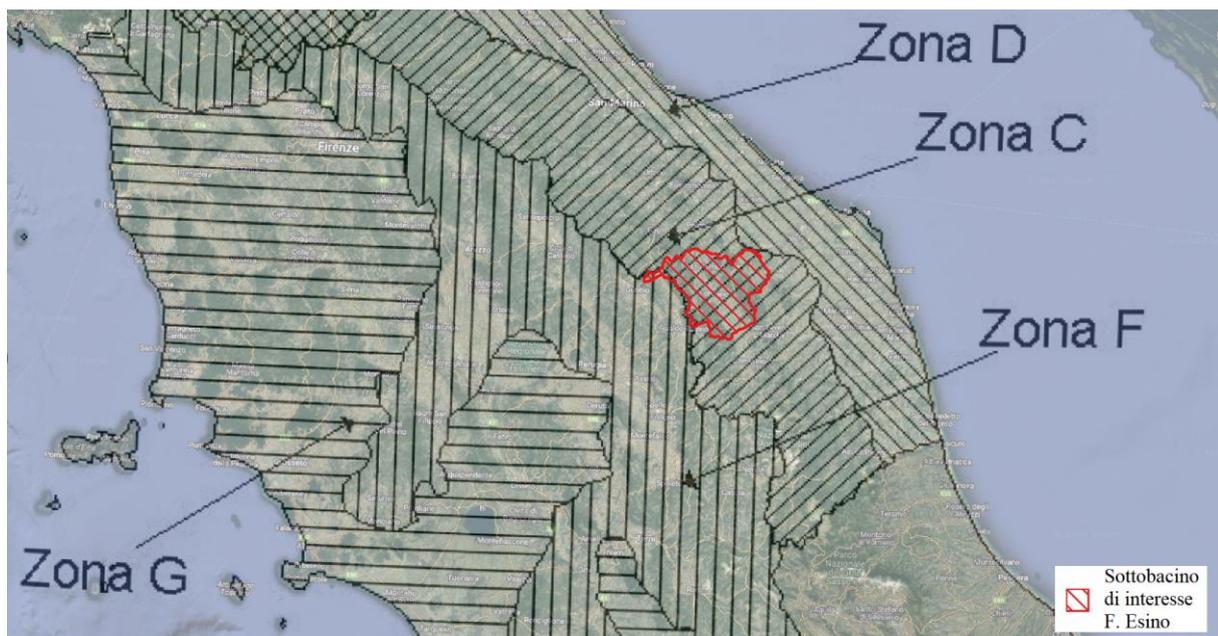


Fig. 5 – Sovrapposizione sottozona VAPI e bacini maggiori di riferimento

La tabella seguente riporta i valori calcolati per i parametri a e n delle leggi di pioggia per i diversi tempi di ritorno di riferimento considerati.

Tr (anni)	50	200	500
a	51.3	62.0	69.3
n	0.312	0.312	0.312

Tab. 4 – Va.P.I.: valori dei parametri a e n della curva di possibilità climatica, per il sottobacino di interesse del Fiume Esino.

4.3 Elaborazione statistica delle registrazioni pluviometriche

Sono prese in considerazione le registrazioni pluviometriche presso le stazioni di misura mostrate nella tabella e nella figura seguenti, di riferimento per il sottobacino del Fiume Esino di interesse (con almeno 20 anni di osservazioni).

Stazione	Periodo di osservazione	# osservazioni
Arcevia	1939-2021	83
Campodiegoli	1990-2021	32
Cantiano	1949-2021	73
Cingoli	1947-2021	69
Cupramontana	1991-2021	31
Esanatoglia	2001-2021	21
Fabriano	1935-2021	83
Fonte Avellana	1991-2021	30
Moie	1935-2021	87
Pioraco	1935-2021	83
San Giovanni	2001-2021	21
Sassoferrato	1991-2021	31
Serralta	1991-2021	29

Tab. 5 – Stazioni pluviometriche di riferimento per il sottobacino del Fiume Esino di interesse.

Tali registrazioni, fornite dal *Centro Funzionale Multirischi della Protezione Civile della Regione Marche*, sono riportate in allegato alla presente relazione (Allegato I).

Con deliberazione della Giunta Regionale n° 2748 del 20/11/2001, si è sancito un accordo tra il Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (SIMN) e la Regione Marche, nel quale è stato affidato al *Centro Funzionale Multirischi (CFM)* l'incarico di assolvere alle funzioni trasferite inerenti alla raccolta dei dati pluviometrici e alla pubblicazione degli Annali idrologici.

I dati pluviometrici considerati per il presente progetto sono validati; tuttavia, per quanto sopra, sono stati raccolti da operatori/soggetti istituzionali differenti (nel caso specifico, SIMN e CFM) e spesso i *Servizi Regionali* non sono tenuti a verificare la stazionarietà delle serie storiche delle registrazioni messe a disposizione.

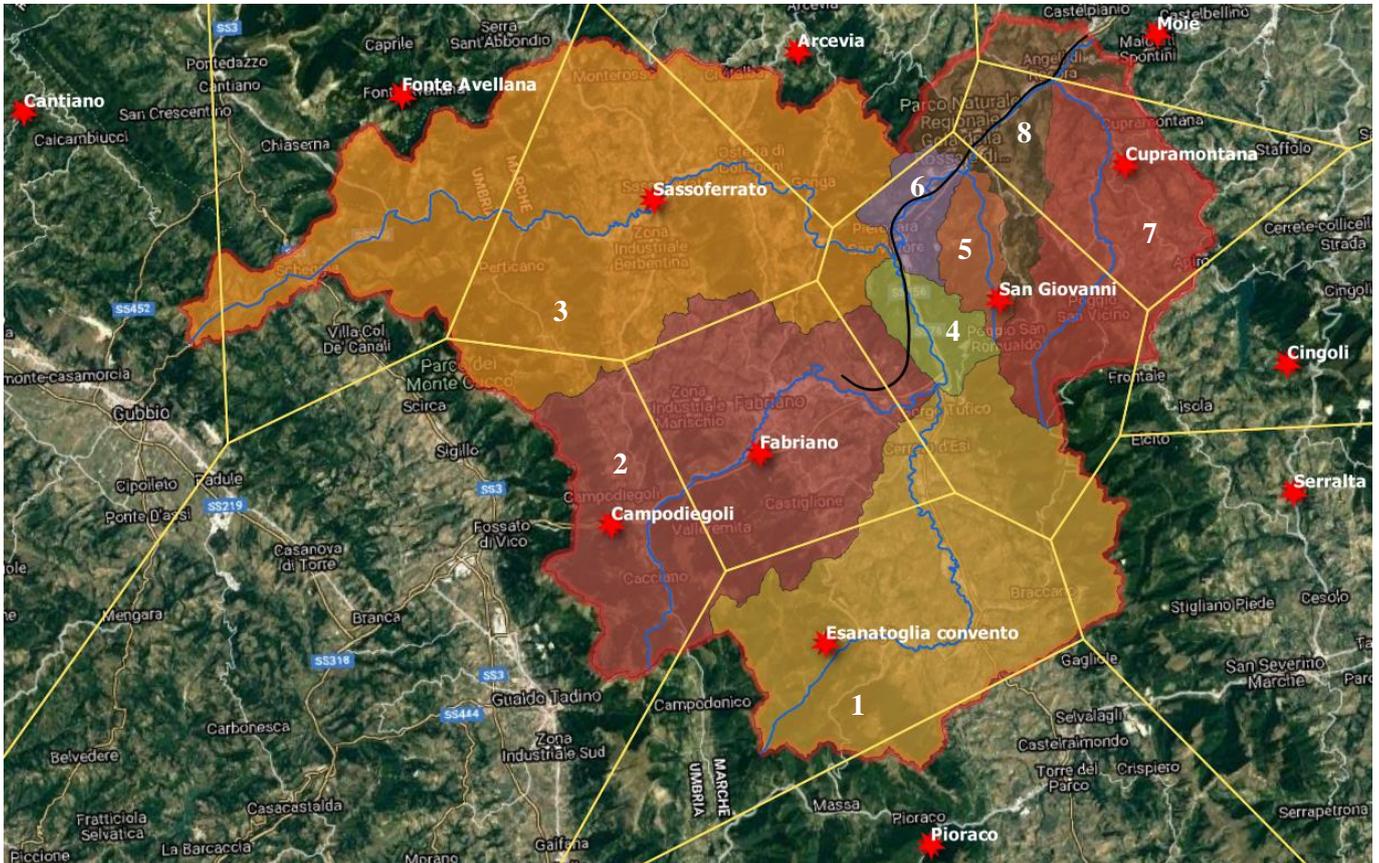


Fig. 6 – Stazioni pluviometriche (e relativi topoi) di riferimento per il sottobacino del Fiume Esino di interesse.

Pertanto, si è proceduto alla verifica di stazionarietà delle serie storiche considerate mediante specifiche elaborazioni statistiche per l'individuazione di eventuali discontinuità. Anche tale analisi è riportata in allegato alla presente relazione (Allegato II).

Si precisa inoltre che non sono stati presi in considerazione i dati registrati presso le stazioni pluviometriche di Colleponi, Poggio San Vicino e Scheggia in quanto caratterizzate da scarsa numerosità campionaria. Le serie storiche di altezza di pioggia per 1, 3, 6, 12, 24 ore, registrate e disponibili presso le stazioni di misura di riferimento sopra individuate, sono state quindi elaborate statisticamente secondo il modello di *Gumbel*. Tale metodo prevede l'applicazione della distribuzione doppio-esponenziale al campione di dati di precipitazione, intesi come variabili indipendenti. Nello specifico, la funzione di probabilità cumulata che la definisce è:

$$F(x) = P(X \leq x) = e^{-e^{-\alpha(x-u)}}$$

Introducendo la variabile ridotta y :

$$y = \alpha(x - u)$$

si ha la forma canonica:

$$F(y) = e^{-e^{-y}}$$

I parametri α e u sono legati alla media e alla varianza della popolazione. Sfruttando le informazioni contenute nel campione a disposizione si procede alla loro stima seguendo diversi metodi. Si otterranno parametri diversi per ogni durata di precipitazione.

Per una data durata di precipitazione, si ordinano le N altezze di precipitazione in ordine crescente e si numerano da 1 ad N . Ad ogni altezza di precipitazione si associa la relativa frequenza cumulata di non superamento, calcolata con la formula di Weibull:

$$F_i = \frac{i}{N + 1}$$

A denominatore si ha $N+1$ in luogo di N per evitare che il più grande evento verificatosi sia caratterizzato da una frequenza cumulata di non superamento pari a 1: valore che rappresenta l'evento impossibile da superare. Il metodo di Gumbel per la stima dei parametri della distribuzione si basa sull'ipotesi di confondere la probabilità di non superamento di una certa altezza di precipitazione (relativa ad una popolazione) con la sua frequenza cumulata di non superamento (che si riferisce, invece ad un campione della popolazione suddetta), cioè:

$$F(h_i) \cong F_i$$

La variabile ridotta da associare ad ogni altezza di precipitazione viene quindi calcolata come:

$$F(h_i) = F_i = F(y) = e^{-e^{-y}} \quad \text{e} \quad F_i = \frac{i}{N + 1} \Rightarrow y_i = -\ln \left[-\ln \left(\frac{i}{N + 1} \right) \right]$$

Con questa assunzione, la variabile ridotta y dipende soltanto da h (= precipitazione) secondo la relazione lineare:

$$y = \alpha(h - u)$$

La stima dei parametri α e u si ottiene sfruttando il metodo dei momenti, in base al quale i parametri della distribuzione vengono ottenuti eguagliando la media campionaria alla media della distribuzione della popolazione. Si ottengono quindi per α e u le seguenti espressioni:

$$\alpha = \frac{1.283}{S_h} \quad u = m_h - \frac{0.577}{\alpha}$$

Richiamando il concetto di tempo di ritorno, T_r , cioè il tempo che mediamente trascorre tra la realizzazione di un evento e di un altro di entità uguale o superiore, si riesce ad ottenere l'espressione che esprime le altezze di precipitazione in funzione del tempo di ritorno:

$$T_r(h) = \frac{1}{1 - F(h)} \Rightarrow F(h) = \frac{T_r - 1}{T_r}$$

$$e^{-e^{-\alpha(h-u)}} = \frac{T_r - 1}{T_r} \Rightarrow h = u - \frac{1}{\alpha} \ln \left[-\ln \left(\frac{T_r - 1}{T_r} \right) \right]$$

E' stata quindi ricavata l'espressione analitica della funzione $h(T_r, \tau)$ che fornisce il valore di precipitazione (h) in funzione del tempo di ritorno per una prefissata durata di precipitazione.

Si vuole ora trovare un'espressione analitica che, per un dato tempo di ritorno, fornisca l'altezza di precipitazione in funzione della durata.

A questo scopo, si assegna alla funzione $h(T_r, \tau)$ la seguente forma:

$$h(T_r, \tau) = a(T_r) \tau^n$$

Queste equazioni, una per ogni prefissato tempo di ritorno, sono dette curve di possibilità pluviometrica (o climatica). L'intensità di precipitazione $j(T_r, \tau)$ è definita come l'altezza di precipitazione per unità di tempo ed ha la forma:

$$j(T_r, \tau) = \frac{h(T_r, \tau)}{\tau} = a\tau^{n-1}$$

Passando alla notazione logaritmica, l'equazione della curva di possibilità pluviometrica assume la forma lineare, e viene ottenuta interpolando i valori per regressione lineare ai minimi quadrati. Gli scarti da minimizzare sono quelli verticali, in quanto la misura di h soffre di maggiori incertezze rispetto a quella del tempo di precipitazione.

$$\log h = \log a + n \log \tau$$

Nella tabella seguente, sono dunque riportati i valori a e n (per durate di pioggia superiori all'ora), relativamente alle stazioni di misura considerate, per i tempi di ritorno (T_r) di riferimento adottati.

Stazione	$a(50)$	$n(50)$	$a(200)$	$n(200)$	$a(500)$	$n(500)$
Arcevia	47.38	0.275	57.08	0.268	63.46	0.265
Campodiegoli	48.22	0.310	56.78	0.312	62.42	0.313
Cantiano	47.30	0.380	56.41	0.379	62.40	0.379
Cingoli	54.15	0.292	65.46	0.292	72.90	0.291
Cupramontana	55.42	0.248	68.33	0.238	76.84	0.233
Esanatoglia	52.78	0.182	63.93	0.165	71.27	0.157
Fabriano	52.21	0.249	63.35	0.247	70.69	0.246
Fonte Avellana	61.29	0.308	74.22	0.301	82.74	0.298
Moie	46.69	0.319	55.74	0.322	61.70	0.324
Pioraco	45.37	0.334	54.24	0.337	60.07	0.338
San Giovanni	50.25	0.378	59.81	0.384	66.10	0.386
Sassoferrato	69.04	0.280	87.38	0.274	99.46	0.272
Serralta	65.10	0.226	81.14	0.209	91.72	0.201

Tab. 6 – Stazioni pluviometriche di riferimento: valori dei parametri a e n .

Con riferimento ai vari sottobacini del Fiume Esino individuati, l'altezza di pioggia (ragguagliata all'area del singolo sottobacino) può essere valutata mediante l'applicazione del metodo dei poligoni di Thiessen (o dei topoieti).

In particolare, il volume di pioggia (V_p) caduto all'interno di un poligono di Thiessen o topoieta è uguale all'altezza di precipitazione misurata nella relativa stazione pluviometrica per l'area del poligono.

Il volume di pioggia caduto sull'intero bacino sarà quindi fornito dalla somma dei prodotti di cui prima con l'avvertenza che, per quei topoieta che parzialmente ricadono fuori dalla regione in esame, si dovrà considerare solo l'area della porzione del poligono o del topoieta che appartiene al bacino:

$$V_p = \sum_{i=1}^N h_i (\Omega_i \cap S)$$

in cui i è il generico topoieta/poligono di Thiessen; N , il numero dei topoieta; h_i , l'altezza di pioggia misurata nella stazione; Ω_i è l'area del topoieta; S , la superficie del bacino. Quindi, l'altezza di pioggia (h) ragguagliata all'area può essere dedotta come $h = V_p/S$.

Per maggiori dettagli circa l'applicabilità e la bontà dei risultati restituiti dal metodo dei topoieta, si rimanda all'Allegato III.

4.4 Confronto tra le curve di possibilità pluviometrica disponibili per l'area di studio

Di seguito, si riporta il confronto tra le curve di possibilità pluviometrica (CPP), per un tempo di ritorno di 200 anni, ricavate dall'applicazione della metodologia Va.P.I. – Regione Marche ed elaborate per le stazioni pluviometriche di riferimento, come precedentemente descritto.

Si osserva che la CPP derivante dall'applicazione della metodologia Va.P.I. fornisce valori di precipitazione superiori rispetto a quelli forniti dalle CPP relative alle stazioni pluviometriche considerate, eccetto per le stazioni di Sassoferrato, Fonte Avellana, San Giovanni, Cantiano e Serralta (per durate inferiori a 12 ore) che restituiscono invece valori di precipitazione superiori e più cautelativi della metodologia Va.P.I. – Regione Marche.

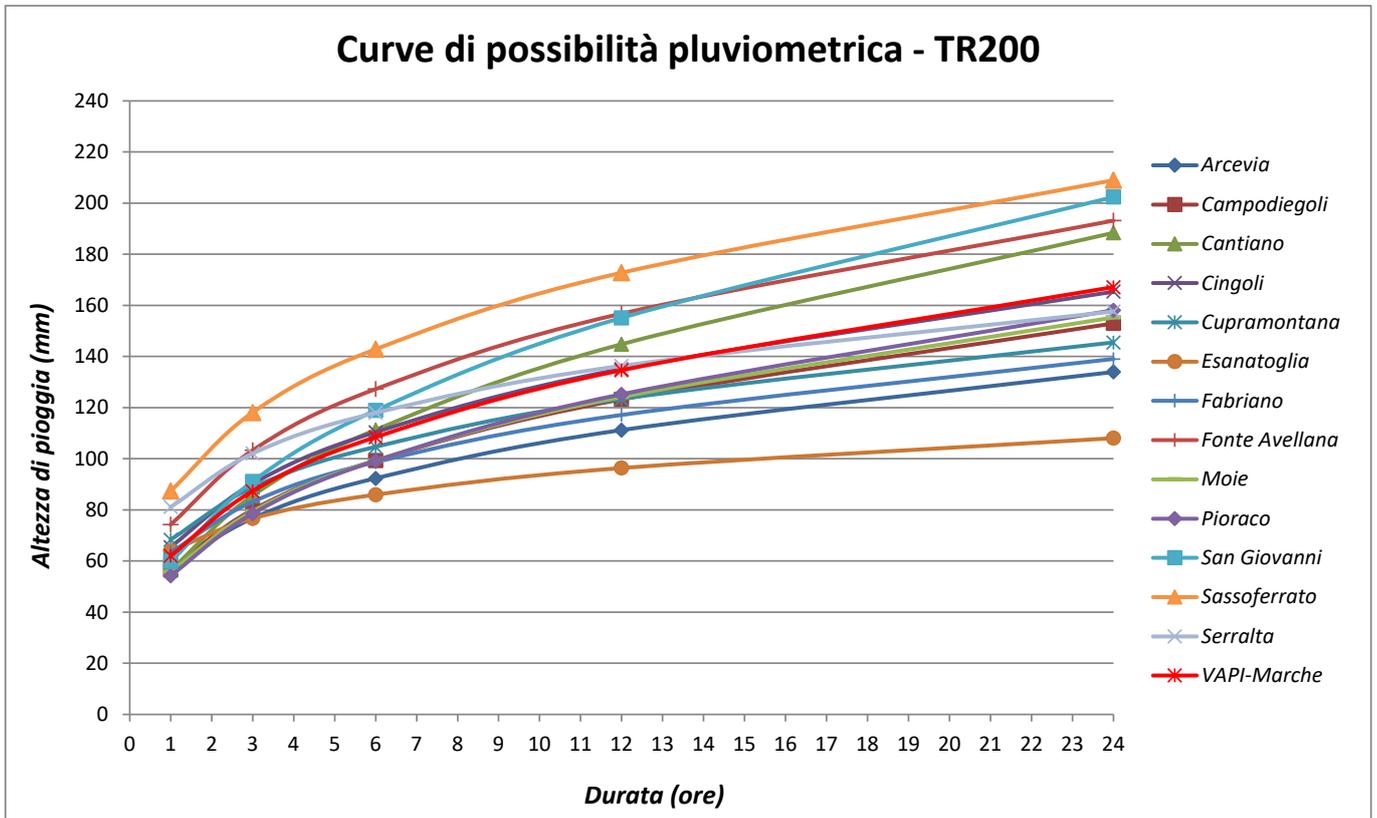


Fig. 7 – Confronto tra le curve di possibilità pluviometrica ($Tr = 200$ anni) ricavate dalle differenti metodologie adottate.

4.5 Eventi pluviometrici e alluvionali progressi nell'area di intervento

Nel presente paragrafo si riporta la descrizione degli eventi pluviometrici/alluvionali più significativi, verificatesi negli ultimi anni nell'area di intervento, presi come riferimento per la calibrazione del modello idrologico sviluppato, descritto nei paragrafi successivi.

Tra questi, di rilievo l'**evento del 10-13 novembre 2013**, con precipitazioni importanti che hanno interessato l'intero territorio regionale delle Marche.

Nella prima parte, dalla tarda serata di domenica fino alle ore centrali di lunedì 11 la zona maggiormente colpita è stata quella centrosettentrionale, poi, dal pomeriggio del lunedì fino a mercoledì 13, le precipitazioni sono state particolarmente persistenti nella restante porzione di territorio.

I venti forti, soprattutto nella giornata dell'11, hanno causato mareggiate lungo tutta la fascia costiera, causando l'abbattimento di numerosi alberi, l'interruzione di diverse tratte di linea elettrica e rendendo, inoltre, più difficile il naturale deflusso delle acque fluviali a mare.

Situazioni di criticità si sono verificate in tutta la regione. Per quanto riguarda la Provincia di Ancona, il Fiume Esino è andato in crisi, esondando non solo nella porzione montana del bacino (Fabriano, Genga, Serra San Quirico, Cerreto d'Esi, sia lungo l'asta principale che nel reticolo minore) ma anche nel tratto finale, a Chiaravalle e a Falconara, dove è uscito per l'erosione di un argine.

Anche nell'anconetano si sono verificate numerose frane, soprattutto nella porzione alto-collinare e montana, che hanno determinato diverse e importanti situazioni di criticità, sia nella viabilità stradale (chiusura SS 76, chiusura vecchia statale a Gola della Rossa, SP 15 nel tratto Villa Pera-Genga) che ferroviaria (circolazione ridotta ad un solo binario in numerosi punti).

Di seguito si riportano gli ietogrammi orari registrati durante l'evento **del 10-13 novembre 2013** presso le stazioni pluviometriche di riferimento per l'area di studio (fonte: *Centro Funzionale Multirischi della Protezione Civile della Regione Marche*), applicati successivamente nel modello idrologico ai fini della relativa calibrazione.

RELAZIONE IDROLOGICA

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IR0F	00 R 09	RI	ID0001 001	C	27 di 81

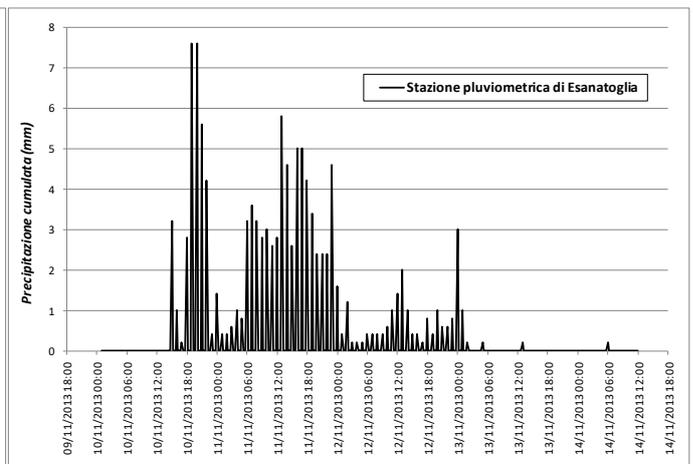
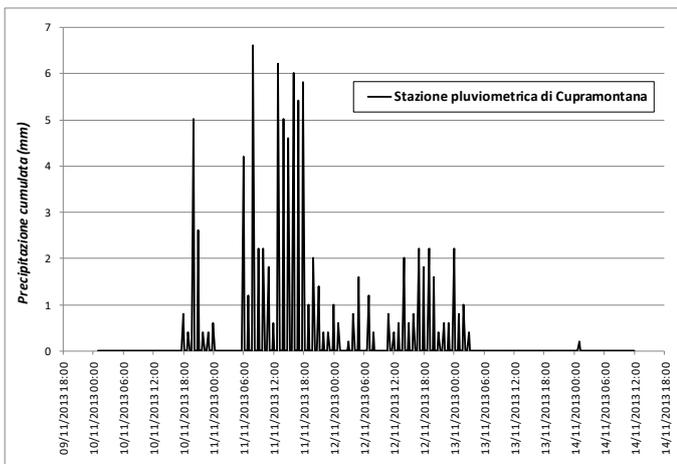
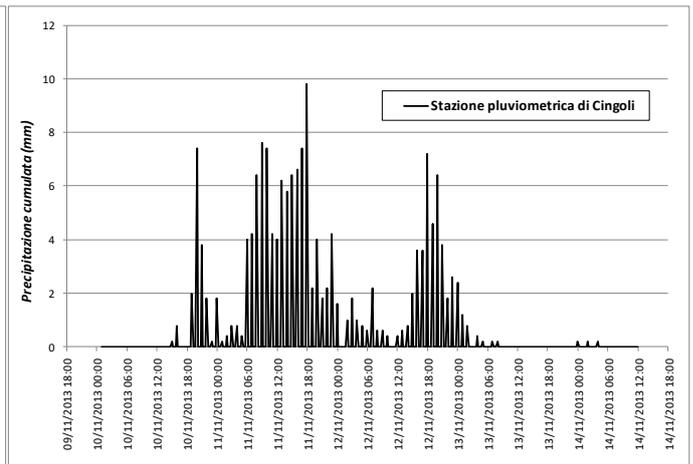
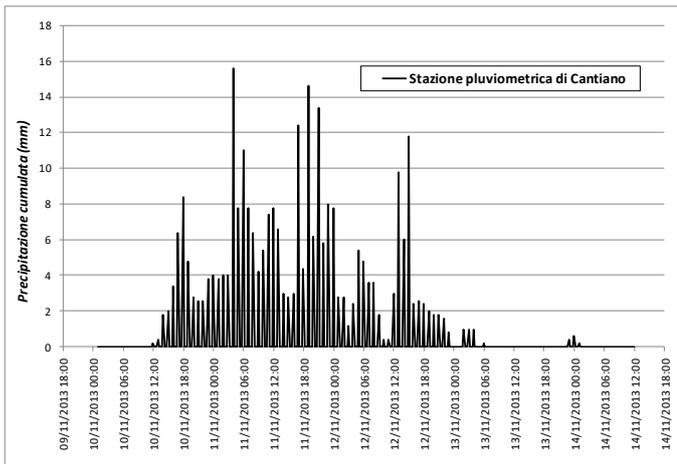
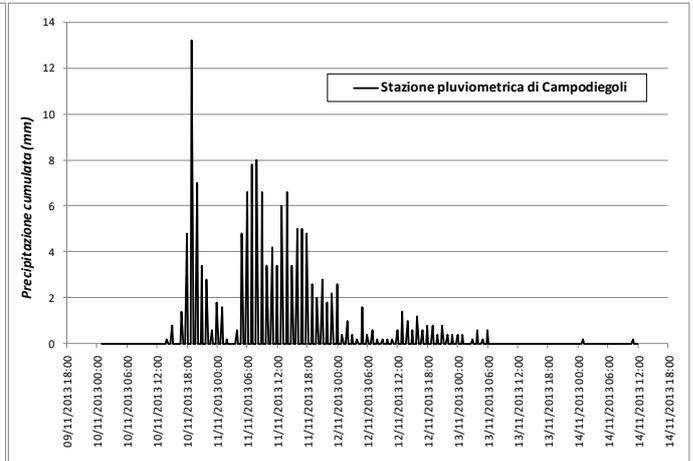
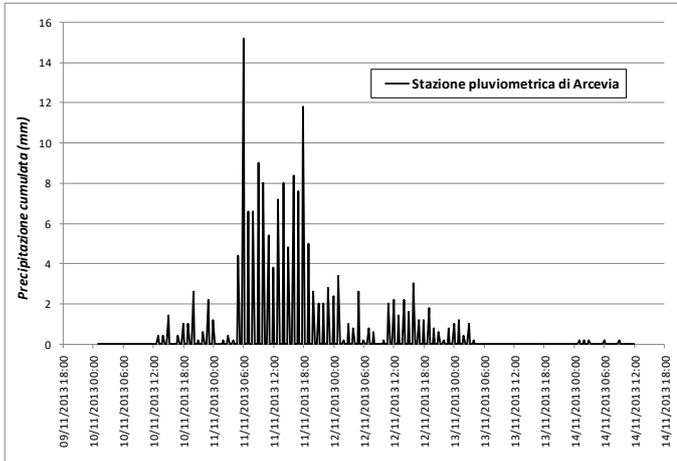


Fig. 8 – Evento del 10-13 novembre 2013: ietogrammi orari registrati presso le stazioni pluviometriche di Arcevia, Campodiegoli, Cantiano, Cingoli, Cupramontana, Esanatoglia.

RELAZIONE IDROLOGICA

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IR0F	00 R 09	RI	ID0001 001	C	28 di 81

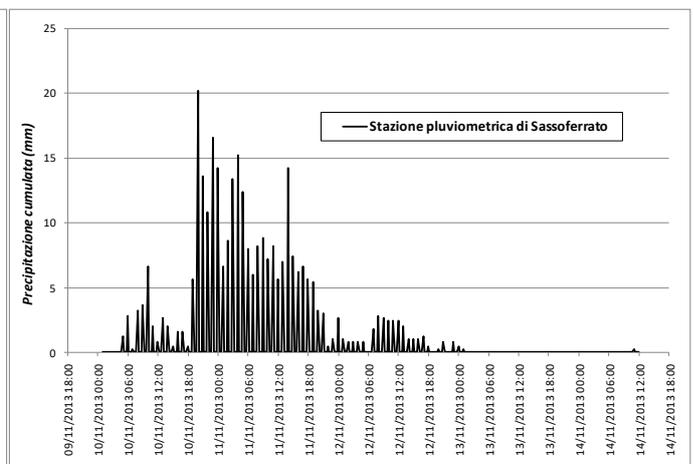
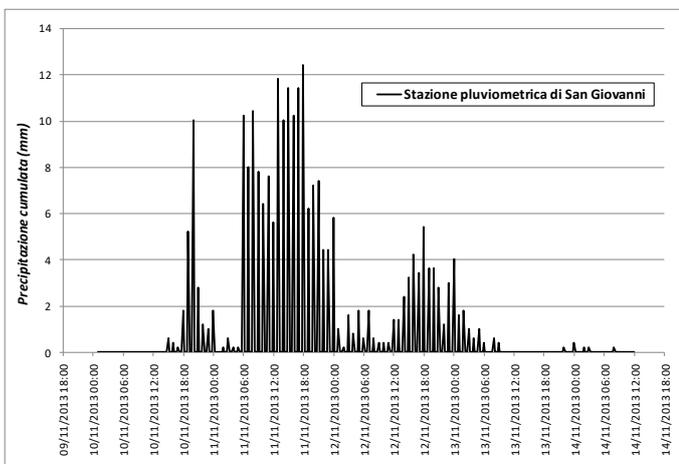
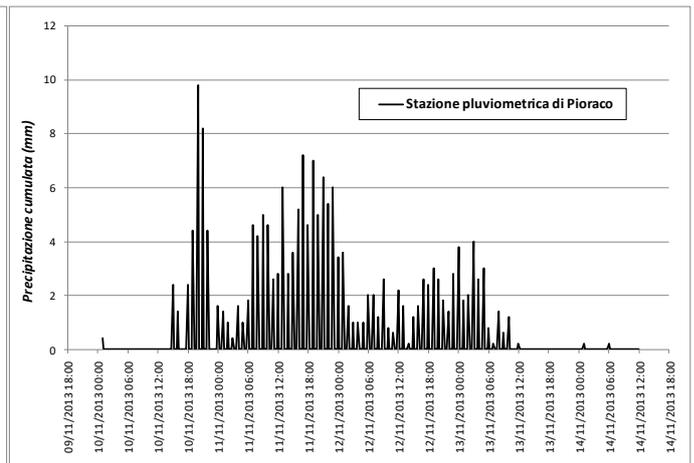
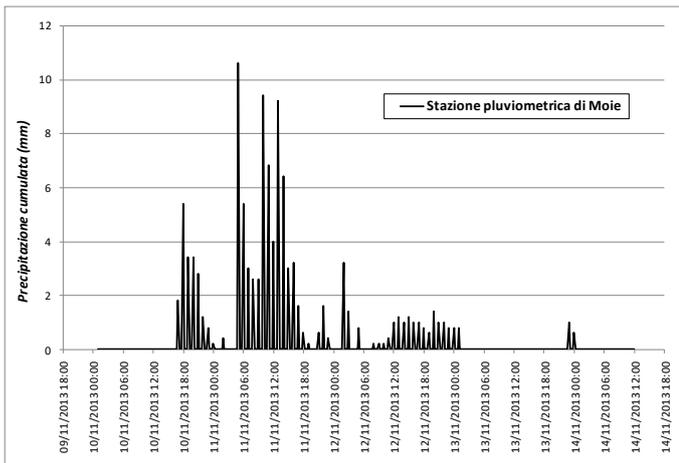
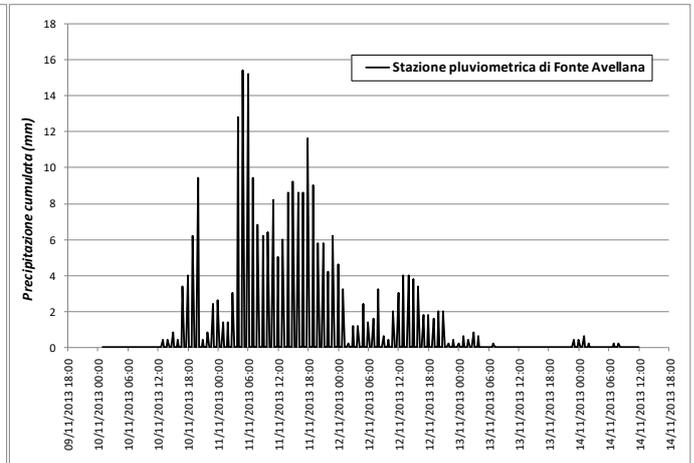
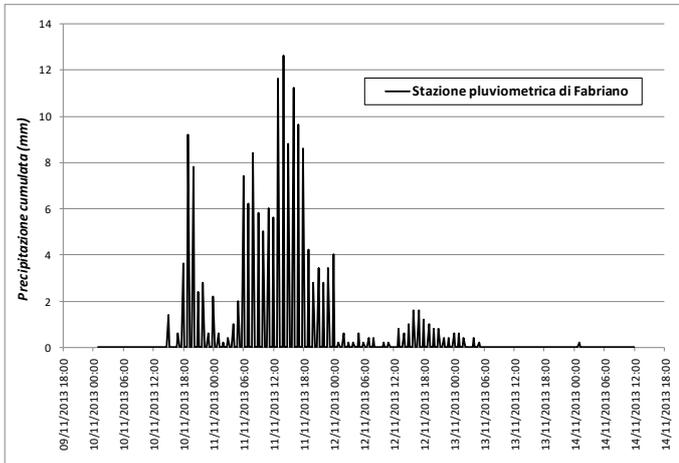


Fig. 9 – Evento del 10-13 novembre 2013: ietogrammi orari registrati presso le stazioni pluviometriche di Fabriano, Fonte Avellana, Moie, Pioraco, San Giovanni, Sassoferrato.

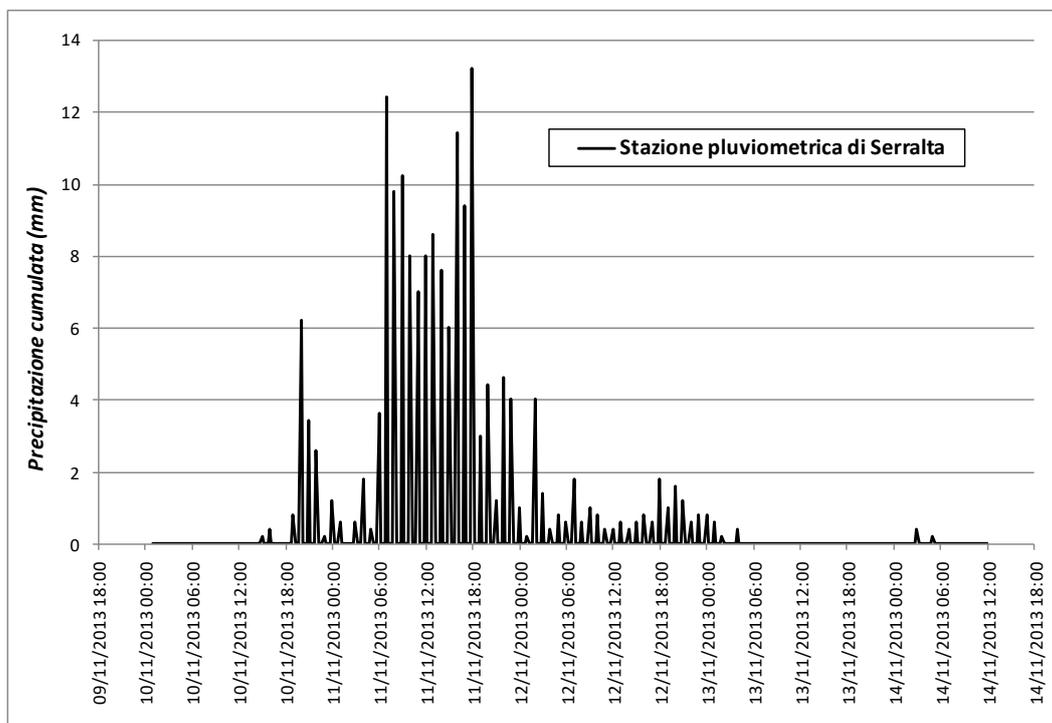


Fig. 10 – Evento del 10-13 novembre 2013: ietogrammi orari registrati presso la stazione pluviometrica di Serralta.

Altro evento significativo, sebbene di minore entità rispetto a quello del 2013, è quello verificatosi il 6-8 marzo 2017, preso anch'esso in considerazione nell'ambito della calibrazione del modello idrologico del bacino del Fiume Esino sviluppato.

Di seguito, si riportano gli ietogrammi orari registrati durante l'evento **del 6-8 marzo 2017** presso le stazioni pluviometriche di riferimento per l'area di studio (fonte: *Centro Funzionale Multirischi della Protezione Civile della Regione Marche*), successivamente applicati.

RELAZIONE IDROLOGICA

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IR0F	00 R 09	RI	ID0001 001	C	30 di 81

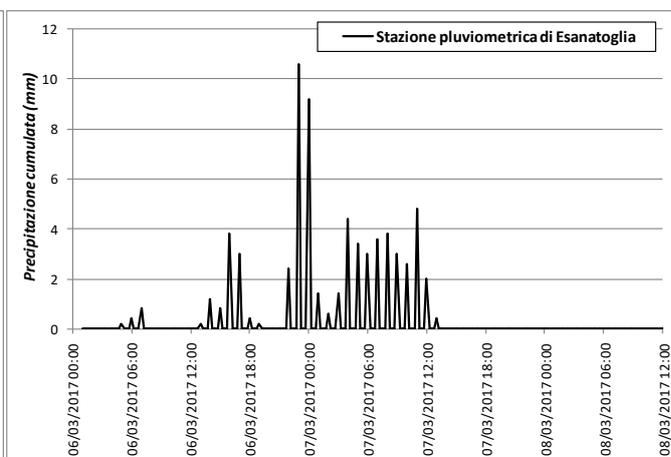
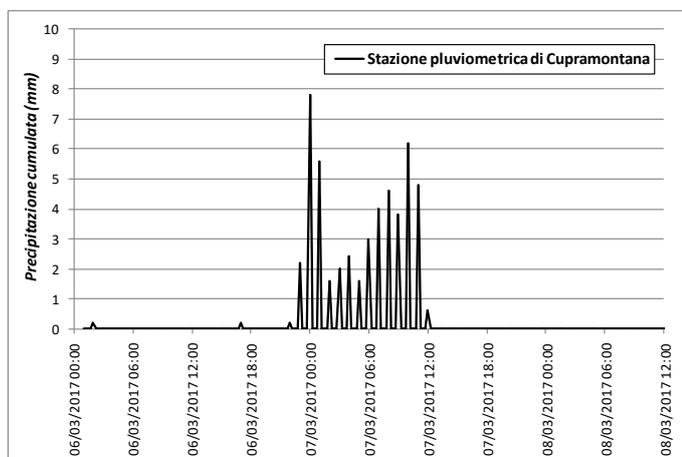
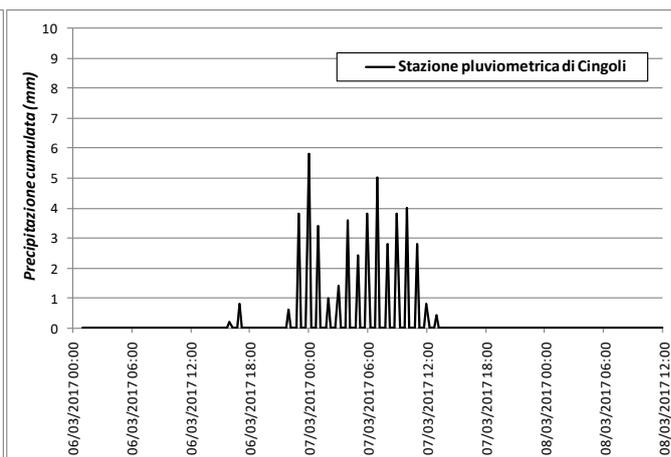
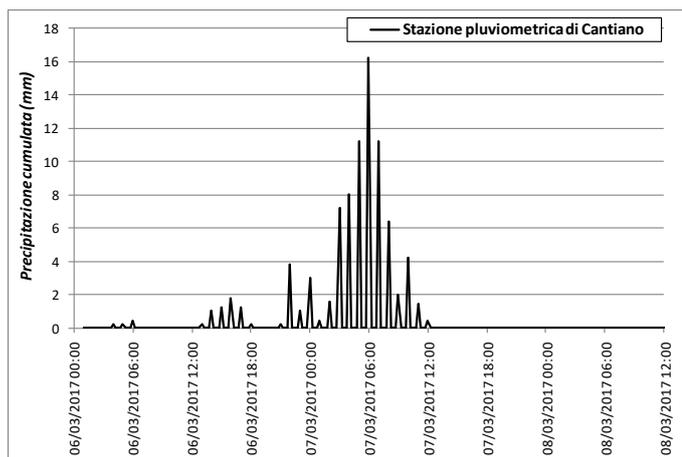
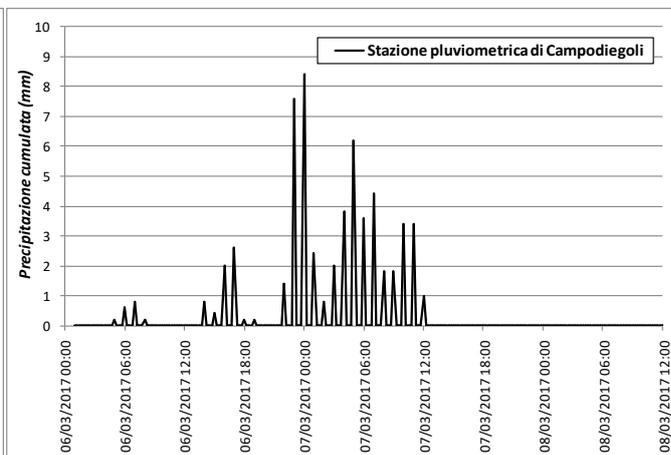
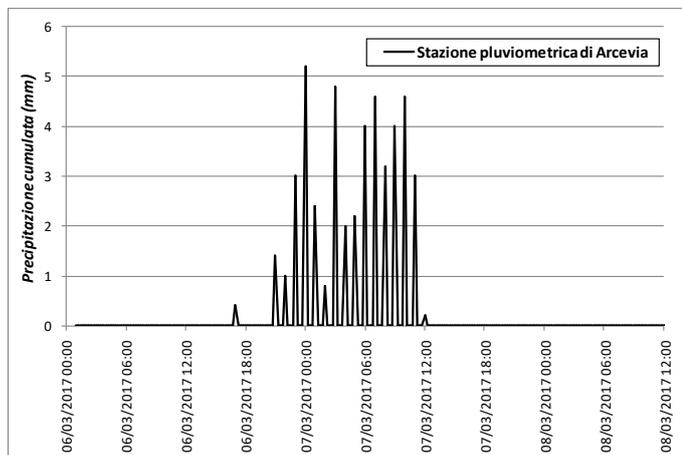


Fig. 11 – Evento del 6-8 marzo 2017: ietogrammi orari registrati presso le stazioni pluviometriche di Arcevia, Campodiegoli, Cantiano, Cingoli, Cupramontana, Esanatoglia.

RELAZIONE IDROLOGICA

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IR0F	00 R 09	RI	ID0001 001	C	31 di 81

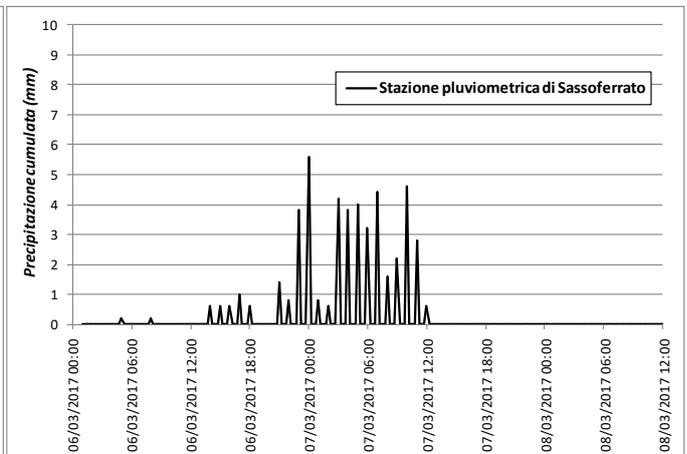
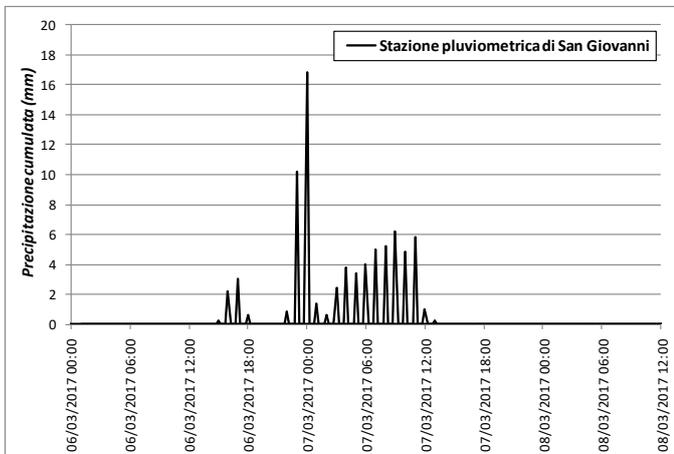
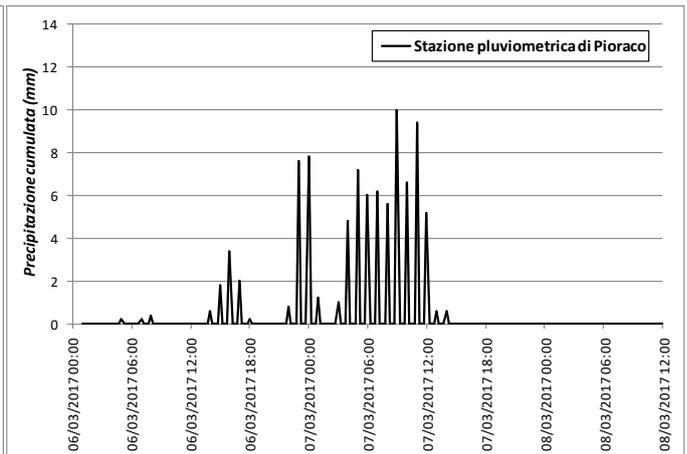
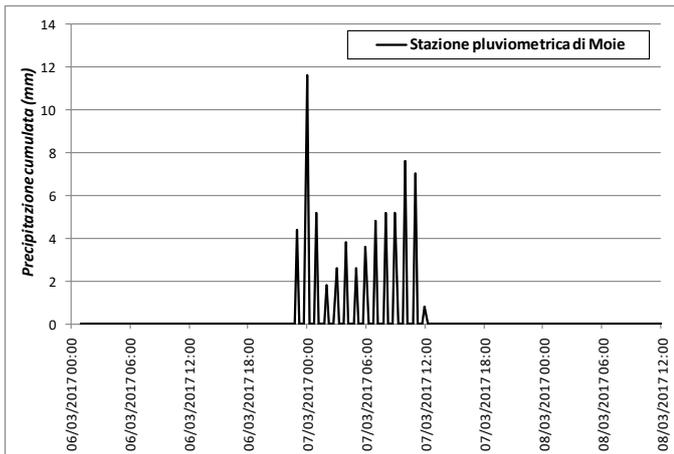
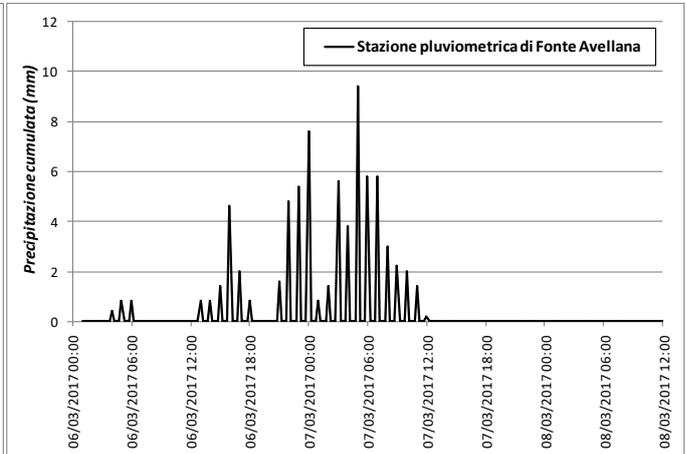
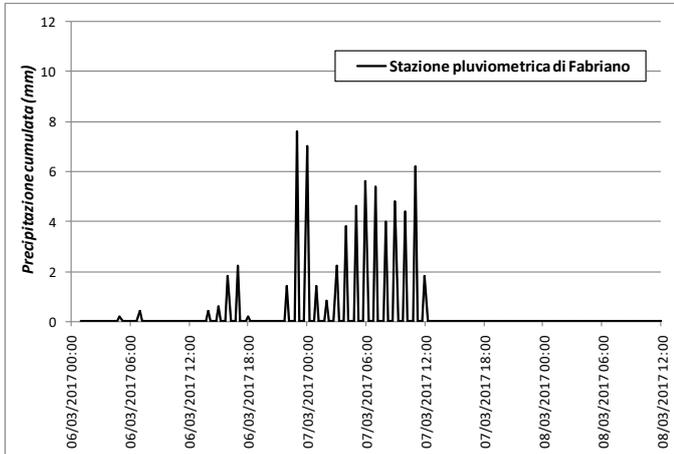


Fig. 12 – Evento del 6-8 marzo 2017: ietogrammi orari registrati presso le stazioni pluviometriche di Fabriano, Fonte Avellana, Moie, Pioraco, San Giovanni, Sassoferrato.

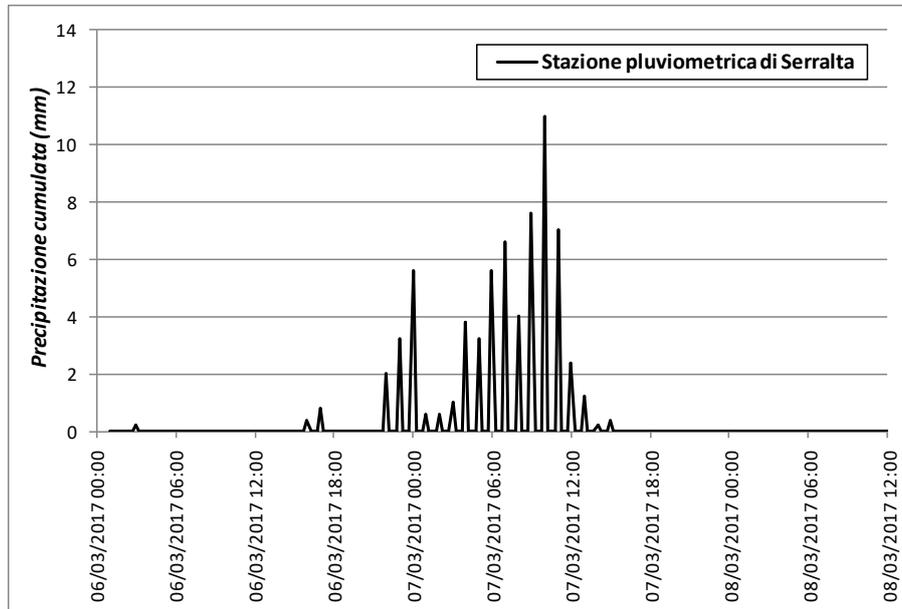


Fig. 13 – Evento del 6-8 marzo 2017: ietogrammi orari registrati presso la stazione pluviometrica di Serralta.

4.6 Modello idrologico del bacino del Fiume Esino

Il modello idrologico del bacino del Fiume Esino in esame, compresi i vari sottobacini precedentemente individuati, è stato costruito mediante il software HEC HMS (versione 4.9), sviluppato dall'U.S. Army Corps of Engineers, in analogia a quanto sviluppato nello studio condotto dal Consorzio di Bonifica delle Marche (rif. “*Studio per la mitigazione del rischio idrogeologico – Indagine condotta sui bacini idrografici dei fiumi Misa, Esino, Musone, Potenza, Chienti e Tenna*”).

Ogni sottobacino è schematizzato attraverso l'opzione “*sub basin creation tool*” all'interno del quale sono inseriti i dati relativi a: estensione del bacino, metodo di trasformazione afflussi-deflussi, metodo per il calcolo della pioggia efficace. I nodi idrologici (ovvero le confluenze) sono schematizzati attraverso l'opzione “*junction creation tool*”. I tratti fluviali, che uniscono i vari nodi idrologici, sono schematizzati attraverso l'opzione “*reach creation tool*”, all'interno del quale deve essere definito il metodo di propagazione della piena (*routing method*).

Nella figura seguente, si riporta il modello idrologico così costruito.

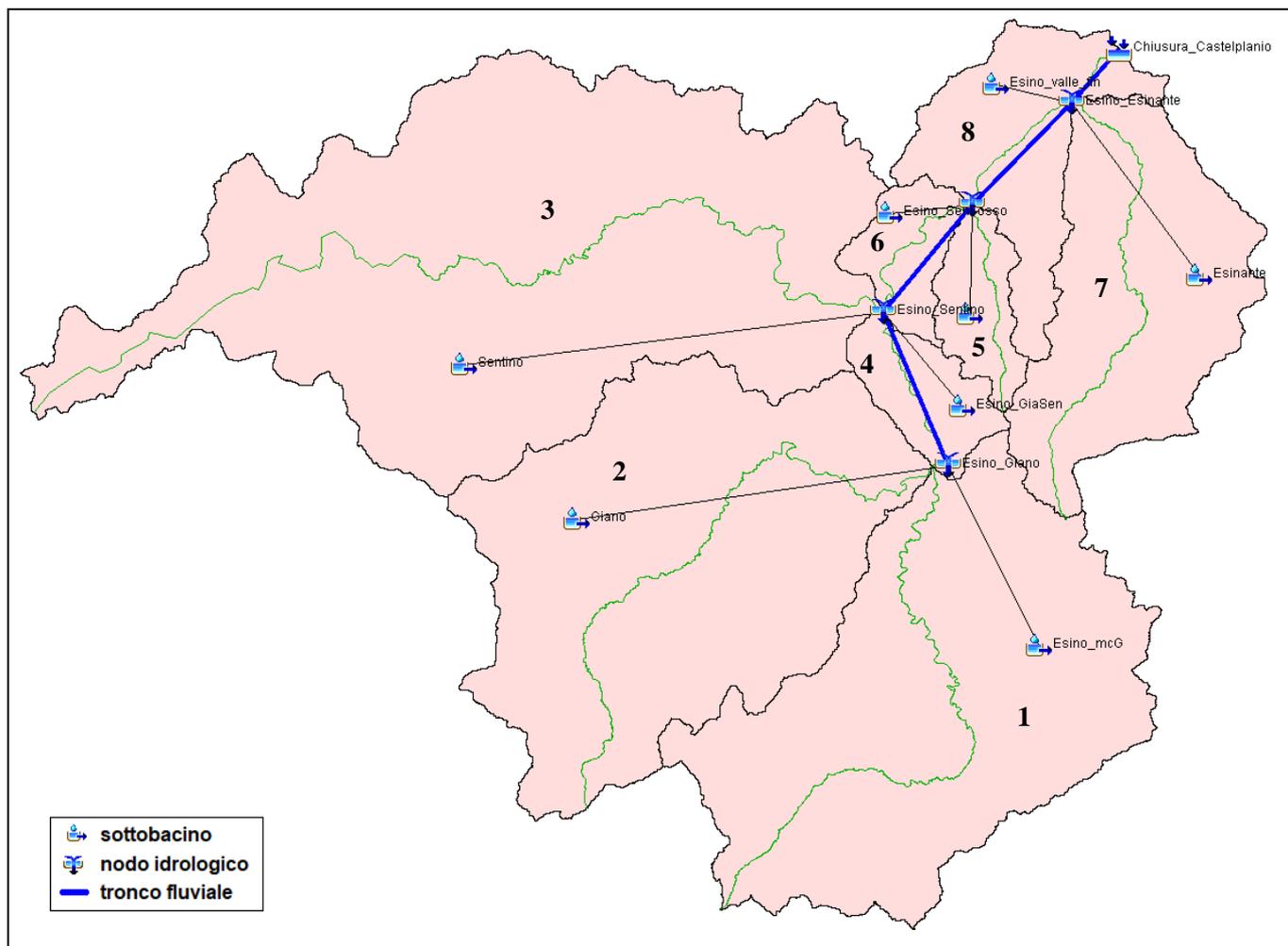


Fig. 14 – Costruzione del modello idrologico del sottobacino del Fiume Esino in esame in HEC HMS.

Nel dettaglio, il modello idrologico HEC-HMS sviluppato si compone di:

- 8 sottobacini
- 5 nodi idrologici
- 4 tronchi fluviali principali (che collegano i nodi idrologici)

Nel primo nodo idrologico A, rappresentante la confluenza del T. Giano nel F. Esino, si combinano i contributi idrologici dei sottobacini di T. Giano (2) e F. Esino (1), a monte della confluenza.

Nel secondo nodo idrologico B, rappresentante la confluenza del T. Sentino nel F. Esino, si combinano i contributi idrologici relativi al sottobacino del T. Sentino (3), a quello del Fiume Esino compreso tra le confluenze di T. Sentino e T. Giano (4), nonché quello del nodo idrologico precedente (A) per mezzo del tronco fluviale di collegamento tra i nodi A e B.

Nel terzo nodo idrologico C, rappresentante la confluenza del Fosso della Grotta nel F. Esino, si combinano i contributi idrologici relativi al sottobacino del Fosso della Grotta (5), al sottobacino del Fiume Esino compreso tra le confluenze di T. Sentino e F. della Grotta (6), nonché quello del nodo idrologico precedente (B) per mezzo del tronco fluviale di collegamento tra i nodi B e C.

Nel quarto nodo idrologico D, rappresentante la confluenza del T. Esinante nel F. Esino, si combinano i contributi idrologici relativi al sottobacino del T. Esinante (7), al sottobacino del Fiume Esino compreso tra la confluenza del F. della Grotta e la fine dell'intervento (8, escluso quello del T. Esinante), nonché quello del nodo idrologico precedente (C) per mezzo del tronco fluviale di collegamento tra i nodi C e D.

Nel quinto e ultimo nodo idrologico E è trasferita infine l'onda di piena risultante nel nodo idrologico precedente (D) per mezzo del tronco fluviale di collegamento tra i nodi D ed E.

Per il calcolo della pioggia netta o efficace ovvero del quantitativo di pioggia che partecipa effettivamente al deflusso, si è fatto riferimento al metodo del *Soil Conservation Service* (SCS) che, utilizzando i valori del cosiddetto *Curve Number* (CN), permette di calcolare il volume di acque trattenuto nel terreno in funzione del tipo di copertura e uso del suolo e del tipo di suolo.

Il CN varia da 0 a 100; più alto è il valore, maggiore è il deflusso prodotto a parità di precipitazione. Il CN dipende da: classificazione della permeabilità del suolo secondo quattro gruppi idrologici del suolo (A, B, C, D); classificazione dell'uso del suolo e sistemazione della superficie (i.e. solchi dritti, solchi a reggipoggio, terrazzamenti,...); condizioni di drenaggio; condizioni iniziali di saturazione dei suoli (AMC). Per la suddivisione in classi di suolo si è fatto riferimento alla "*Carta delle Province pedologiche*" della Regione Marche. Le differenti tipologie di suolo sono state inizialmente accorpate in 18 macrogruppi sulla base delle caratteristiche tessiturali, granulometriche e litologiche; ad ognuna di esse sono state poi assegnate, in percentuale, le quattro classi di permeabilità (A, B, C, D). Per la classificazione del territorio in base all'uso del suolo è stato invece utilizzato il Corine Land Cover 2018 al 4° livello (fonte: ISPRA). Il valore del CN così ottenuto corrisponde alla condizione II delle *Antecedent Moisture Conditions* (AMC), ovvero a quella che prevede terreni mediamente saturi.



Fig. 15 – Bacino del Fiume Esino: carta del Curve Number (AMC II).

Tale valore iniziale è stato modificato secondo la seguente relazione assimilandolo alla condizione III delle AMC:

$$CN(III) = \frac{CN(II)}{0.43 + 0.0057 \times CN(II)}$$

Per ogni sottobacino individuato del Fiume Esino è stato quindi valutato il valore medio del CN (III).

ID	Sottobacino	CN (III)
1	F. Esino (a monte confluenza T. Giano)	81
2	T. Giano	81
3	T. Sentino	60
4	F. Esino (tra T. Giano e T. Sentino)	81
5	Fosso della Grotta	73

ID	Sottobacino	CN (III)
6	F. Esino (tra T. Sentino e F. Grotta)	77
7	T. Esinante	79
8	F. Esino (tratto finale)	80

Tab. 7 – Valori del CN (II e III, AMC) per i sottobacini del Fiume Esino considerati.

La scelta del metodo di formazione della piena è ricaduta su quello dell'idrogramma unitario del Soil, Conservation Service che prevede il calcolo del cosiddetto *tempo di ritardo* (SCS Lag), stimato attraverso la formula di Mockus (SCS, 1972):

$$t_{lag} = 0.342 \cdot L^{0.8} s^{-0.5} \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}$$

in cui L è la lunghezza dell'asta principale (km); s , la pendenza media dell'asta principale (%); CN, il Curve Number; t_{lag} , il tempo di ritardo in ore.

Relativamente al metodo di propagazione della piena lungo i tronchi presenti nella schematizzazione di bacino, si è fatto riferimento al metodo del "tempo di ritardo" (*lag time*), stimato attraverso la relazione L/v con v = velocità media della corrente in alveo, assunta pari a 2 m/s.

Nelle tabelle seguenti, si riportano i valori del tempo di ritardo adottati per ognuno dei sottobacini in esame, nonché per ognuno dei tratti fluviali considerati.

ID	Sottobacino	SCS lag (ore)	SCS lag (minuti)
1	F. Esino (a monte confluenza T. Giano)	7.2	433
2	T. Giano	6.5	387
3	T. Sentino	2.0	120
4	F. Esino (tra T. Giano e T. Sentino)	1.2	72
5	Fosso della Grotta	1.8	105.6
6	F. Esino (tra T. Sentino e F. Grotta)	2.03	121.8
7	T. Esinante	4.2	250
8	F. Esino (tratto finale)	2.9	177

Tab. 8 – Valori del parametro SCS lag per i sottobacini del Fiume Esino considerati.

<i>Tratto fluviale</i>	<i>Lunghezza (km)</i>	<i>Lag time (minuti)</i>
<i>Tra confluenza del T. Giano e del T. Sentino</i>	7.2	60
<i>Tra confluenza del T. Sentino e del F. della Grotta</i>	7.0	58
<i>Tra confluenza del F. della Grotta e del T. Esinante</i>	5.5	46
<i>Tra confluenza del T. Esinante e sezione finale</i>	3.2	27

Tab. 9 – Modello idrologico del Fiume Esino: caratteristiche dei tratti fluviali.

Per la valutazione degli idrogrammi di piena di progetto ($Tr = 50, 200, 500$ anni) si è scelto di adottare lo ietogramma di tipo Chicago (triangolare). Rispetto ad altri, questo rappresenta meglio alcune caratteristiche degli ietogrammi osservati, come la presenza del picco di intensità, le precipitazioni antecedenti e seguenti l'istante del picco e i volumi totali.

Nello ietogramma Chicago, la massima altezza di precipitazione cumulata su qualsiasi durata t è sempre pari all'altezza di precipitazione dedotta dalla CPP per la medesima durata t .

4.6.1. Calibrazione del modello

Implementato il modello idrologico nel software Hec HMS, si è proceduto alla sua calibrazione considerando un evento critico avvenuto in passato e ben documentato. A tale scopo è stato scelto come rappresentativo l'evento del 10-13 novembre 2013, che (come precedentemente descritto) ha interessato la quasi totalità del territorio regionale, con dissesti e fenomeni di esondazione.

Per la taratura del modello sono stati quindi utilizzati i valori di altezza di pioggia (ovvero gli ietogrammi) registrati durante l'evento (riportati nelle figure precedenti) presso le stazioni pluviometriche di riferimento, forniti dal Centro Funzionale Multirischi della Protezione Civile della Regione Marche.

Nello specifico, gli ietogrammi registrati presso i pluviometri considerati sono stati assegnati e distribuiti sui singoli sottobacini individuati mediante il metodo dei poligoni di Thiessen (o topoieti).

Nella tabella seguente, per ogni sottobacino considerato, si riportano le percentuali di superficie ricadente nei topoieti delle singole stazioni pluviometriche di riferimento.

Stazione\ID sottobacino	1	2	3	4	5	6	7	8
Arcevia	0	0	12%	0	0	7%	0	14%
Campodiegoli	0	36%	5%	0	0	0	0	0
Cantiano	0	0	1%	0	0	0	0	0
Cingoli	0	0	0	0	0	0	2%	0
Cupramontana	0	0	0	0	0	0	58%	40%
Esanatoglia	66%	5%	0	0	0	0	0	0
Fabriano	5%	52%	2%	0	0	0	0	0
Fonte Avellana	0	0	26%	0	0	0	0	0
Moie	0	0	0	0	0	0	1%	27%
Pioraco	3%	0	0	0	0	0	0	0
San Giovanni	19%	5%	3%	100%	100%	93%	39%	19%
Sassoferrato	0	2%	51%	0	0	0	0	0
Serralta	7%	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 10 – Percentuali di superficie dei singoli sottobacini del Fiume Esino considerati ricadente nei topoi di riferimento delle stazioni pluviometriche di riferimento.

La procedura di calibrazione è basata su valori di portata o idrogrammi registrati in specifiche sezioni durante l'evento. In particolare, è noto il valore di portata del Fiume Esino a Camponocchie (595 mc/s, fonte: "Rapporto di evento 10-13 novembre 2013, Centro Funzionale della Protezione Civile delle Regione Marche"), subito dopo la confluenza del T. Sentino, e l'idrogramma di piena del Fiume Esino a Moie (fonte: Consorzio di Bonifica delle Marche "Studio per la mitigazione del rischio idrogeologico – Indagine condotta sui bacini idrografici dei fiumi Misa, Esino, Musone, Potenza, Chienti e Tenna"), quindi in uscita dal modello idrologico.

La taratura ha riguardato principalmente i valori di velocità media da assumere lungo i vari tratti fluviali considerati (valore finale = 2 m/s, come precedentemente introdotto) nonché le percentuali di superficie impermeabile (i.e. "impevious") da considerare nei vari sottobacini (valori fino al 50%, soprattutto per i sottobacini montani, ovvero quelli relativi al Torrente Giano e al Fiume Esino prima della confluenza del T. Giano stesso; per i restanti sottobacini è stato mantenuto il valore di *default*, 0%).



Fig. 16 – Fiume Esino: ubicazione idrometro di Camponoecchio.

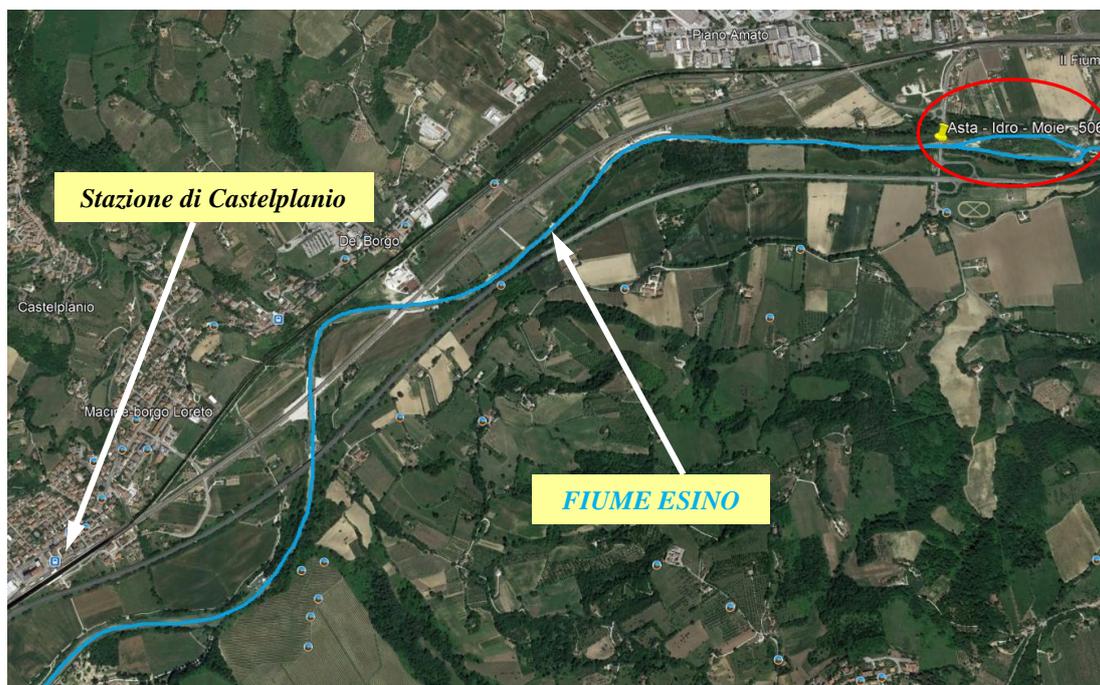


Fig. 17 – Fiume Esino: ubicazione idrometro di Moie.

Di seguito, i risultati del processo di calibrazione in termini di idrogrammi di piena (associati all'evento del 2013) nelle due sezioni sopra considerate, a Camponoecchio (nel nodo idrologico alla confluenza del T. Sentino) e a Moie (in uscita dal modello idrologico).

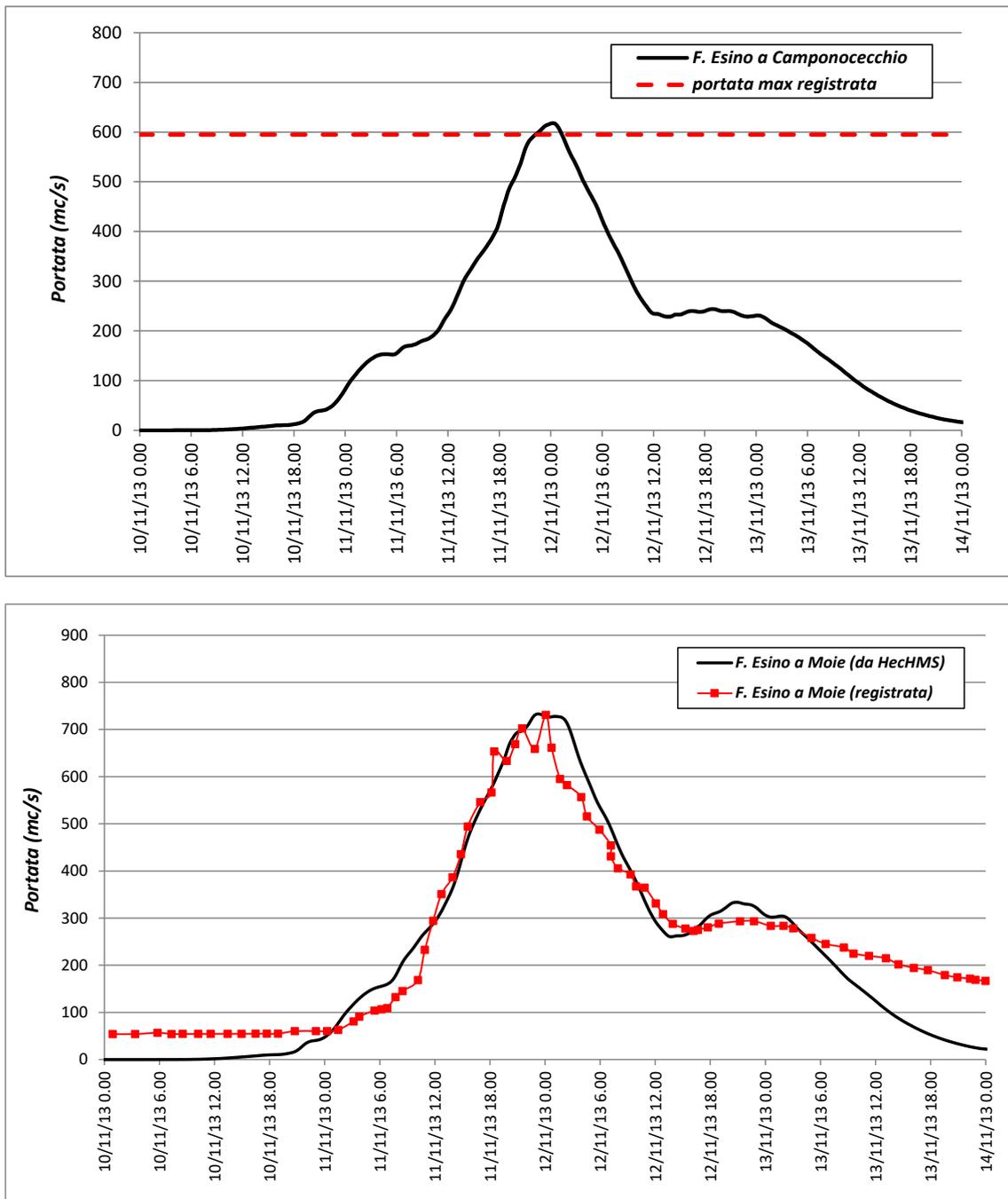


Fig. 18 – Modello idrologico del F. Esino, calibrazione (evento 2013): idrogrammi di piena a Camponoecchio e a Moie.

Si osserva una buona corrispondenza tra registrazioni e output del modello idrologico, con riferimento all'evento scelto (10-13.11.2013) e alle sezioni considerate.

Come controprova, il modello idrologico così calibrato è stato utilizzato per simulare un altro evento. A tal scopo, è stato considerato l'evento del 6-8 marzo 2017, sopra descritto. Sono stati quindi applicati gli ietogrammi registrati durante tale evento (riportati nelle figure precedenti) presso le stazioni pluviometriche di riferimento, forniti dal Centro Funzionale Multirischi della Protezione Civile della Regione Marche, secondo la distribuzione sui singoli sottobacini individuati ottenuta mediante il metodo dei poligoni di Thiessen o topoieti (Tab. 10).

Di seguito, si riportano i risultati della simulazione dell'evento del 2017 in termini di idrogramma di piena a Camponocchie (unico registrato e disponibile).

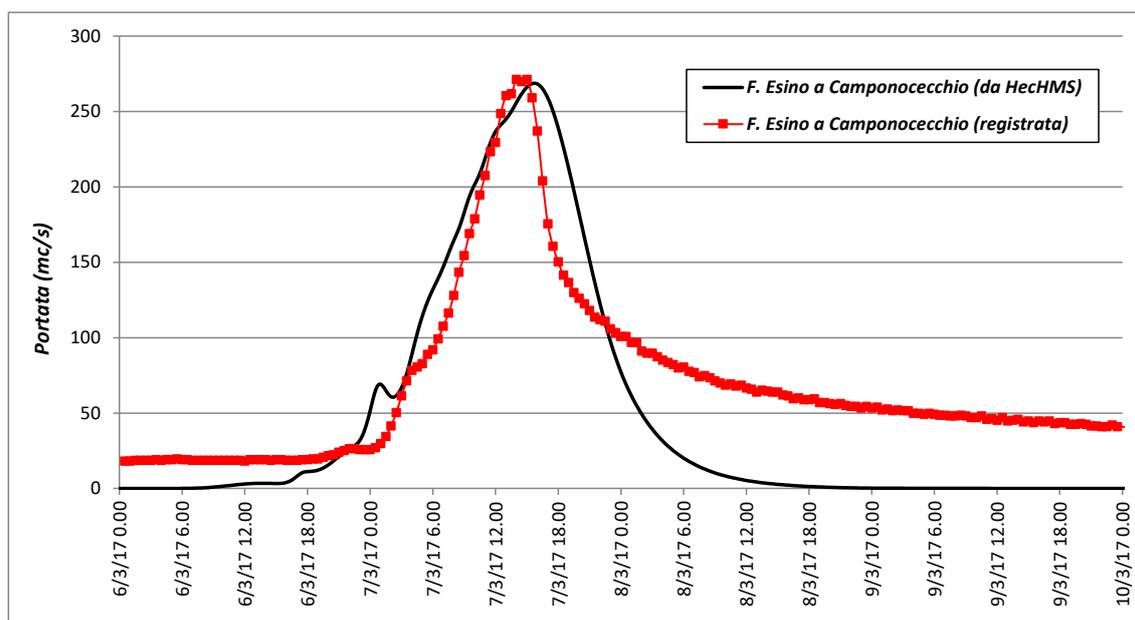


Fig. 19 – Simulazione dell'evento del 2017: idrogrammi di piena registrato e da modello HechMS.

Anche in questo caso, il modello idrologico (HechMS) costruito e calibrato (sull'evento del 2013) restituisce risultati, in termini di idrogrammi di piena, che riproducono abbastanza bene i dati registrati.

4.6.2. Determinazione degli idrogrammi di piena di progetto

Calibrato il modello idrologico, si è proceduto alla determinazione degli idrogrammi di piena di progetto, per i tempi di ritorno di riferimento ($Tr = 50, 200, 500$ anni).

Dapprima, sono stati applicati gli ietogrammi di tipo Chicago (triangolare) costruiti assumendo una durata (critica) di pioggia pari a 12 ore (in analogia allo studio condotto dal Consorzio di Bonifica delle Marche: “Studio per la mitigazione del rischio idrogeologico – Indagine condotta sui bacini idrografici dei fiumi Misa, Esino, Musone, Potenza, Chienti e Tenna”) e adottando le curve di possibilità pluviometrica con $Tr = 200$ anni derivanti dall’elaborazione statistica (Gumbel, Tab. 6) delle registrazioni presso le stazioni di misura considerate (distribuiti poi sui singoli sottobacini individuati mediante il metodo dei poligoni di topoi, Tab. 10) e dall’applicazione della procedura Va.P.I. – Regione Marche (stesso ietogramma applicato su tutti i sottobacini individuati, Tab. 4).

Di seguito, i risultati in termini di portate al colmo ($Tr = 200$ anni) afferenti ai sottobacini considerati, ottenute applicando i due set di curve di possibilità pluviometrica (i.e. CPP Gumbel vs Va.P.I.).

ID	Sottobacino	Q200 (mc/s) Gumbel (12h)	Q200 (mc/s) Va.P.I. (12h)
1	F. Esino (a monte confluenza T. Giano)	338.0	421.1
2	T. Giano	405.4	459.6
3	T. Sentino	229.9	164.7
4	F. Esino (tra T. Giano e T. Sentino)	96.5	81.5
5	Fosso della Grotta	59.8	48.2
6	F. Esino (tra T. Sentino e F. Grotta)	58.6	49.0
7	T. Esinante	214.2	210.9
8	F. Esino (tratto finale)	129.3	139.3

Tab. 11 – Fiume Esino: valori di portata al colmo per $Tr = 200$ anni: CPP Gumbel vs Va.P.I..

Confrontando i valori riportati nella tabella precedente, si evince che gli ietogrammi derivanti dall’applicazione della metodologia Va.P.I. tendono a massimizzare le portate al colmo afferenti ai sottobacini con ID = 1, 2 e 8; mentre per i rimanenti sottobacini le CPP derivanti dall’elaborazione statistica secondo Gumbel dei dati pluviometrici registrati restituiscono valori di portata al colmo superiori.

Pertanto, per la determinazione degli idrogrammi di piena di progetto, per i sottobacini con ID = 1, 2, 8 si è deciso di applicare le CPP derivanti dalla metodologia *Va.P.I. – Regione Marche*; per i rimanenti sottobacini con ID = 3, 4, 5, 6, 7 sono state applicate invece le CPP derivanti dall'elaborazione statistica secondo Gumbel dei dati pluviometrici registrati.

Definite le CPP di riferimento, sono stati costruiti gli ietogrammi di tipo Chicago (triangolare) assumendo altri valori della durata di pioggia, nello specifico 6 e 24 ore, al fine di verificare se effettivamente la durata di 12 ore possa ritenersi “critica” per il sottobacino del Fiume Esino in esame. Applicando tali ietogrammi nel modello idrologico, si ottengono i seguenti risultati (in termini di portata al colmo con $Tr = 200$ anni).

Bacino/tratto fluviale	Q200 (mc/s) Va.P.I. (12h)	Q200 (mc/s) Va.P.I. (6h)	Q200 (mc/s) Va.P.I. (24h)
<i>Torrente Giano</i>	459.6	413.2	413.8
<i>F. Esino (a monte della confluenza del T. Giano)</i>	421.1	369.0	391.9
<i>F. Esino tra confluenze del T. Giano e del T. Sentino</i>	876.9	778.6	803.9
<i>Torrente Sentino</i>	229.9	158.4	121.1
<i>F. Esino a Camponocchie (confluenza T. Sentino)</i>	1072.0	898.8	943.3
<i>Torrente Esinante</i>	214.2	193.8	186.1
<i>Sezione chiusura finale</i>	1242.9	969.0	1189.5

Tab. 12 – Fiume Esino: valori di portata al colmo per $Tr = 200$ anni, Va.P.I., per diversi valori della durata di pioggia critica.

Si osserva che la durata di pioggia pari a 12 ore tende a massimizzare i valori di portata al colmo nel tratto fluviale del Fiume Esino oggetto di studio. Pertanto, è confermata l'assunzione di durata di pioggia critica pari a 12 ore per il sottobacino in esame (vedasi anche Allegato III).

A questo punto, si è proceduto alla determinazione delle portate al colmo e dei corrispondenti idrogrammi di piena del Fiume Esino anche per i tempi di ritorno di 50 e 500 anni. Di seguito si riportano i valori di portata al colmo e gli idrogrammi di piena “finali”, di progetto, assunti nelle successive modellazioni numeriche idrauliche (rif. IR0F00R09RIID0002001), relativi ai sottobacini individuati e ai nodi idrologici in corrispondenza della confluenza del T. Sentino e del T. Esinante.

Con riferimento alle analisi idrologiche disponibili per l'area di intervento, i valori di portata al colmo ottenuti nel presente studio, per $Tr = 50$ e 200 anni, sono conformi, ovvero leggermente superiori, a quelli indicati in Tab. 2 e Tab. 3, ad ulteriore conferma della adeguata calibrazione del modello idrologico sviluppato.

ID	Sottobacino	Q50 (mc/s)	Q200 (mc/s)	Q500 (mc/s)
1	F. Esino (a monte confluenza T. Giano)	332.4	421.1	480.6
2	T. Giano	362.7	459.6	524.5
3	T. Sentino	147.4	229.9	289.4
4	F. Esino (tra T. Giano e T. Sentino)	77.0	96.5	109.3
5	Fosso della Grotta	44.9	59.8	69.9
6	F. Esino (tra T. Sentino e F. Grotta)	44.4	58.6	68.2
7	T. Esinante	161.3	214.2	249.8
8	F. Esino (tratto finale)	103.8	139.3	163.3
-	Alla confluenza del T. Sentino	817.5	1072.0	1245.8
-	Alla confluenza del T. Esinante	941.1	1242.9	1450.1

Tab. 13 – Fiume Esino: valori di portata al colmo di progetto per vari tempi di ritorno.

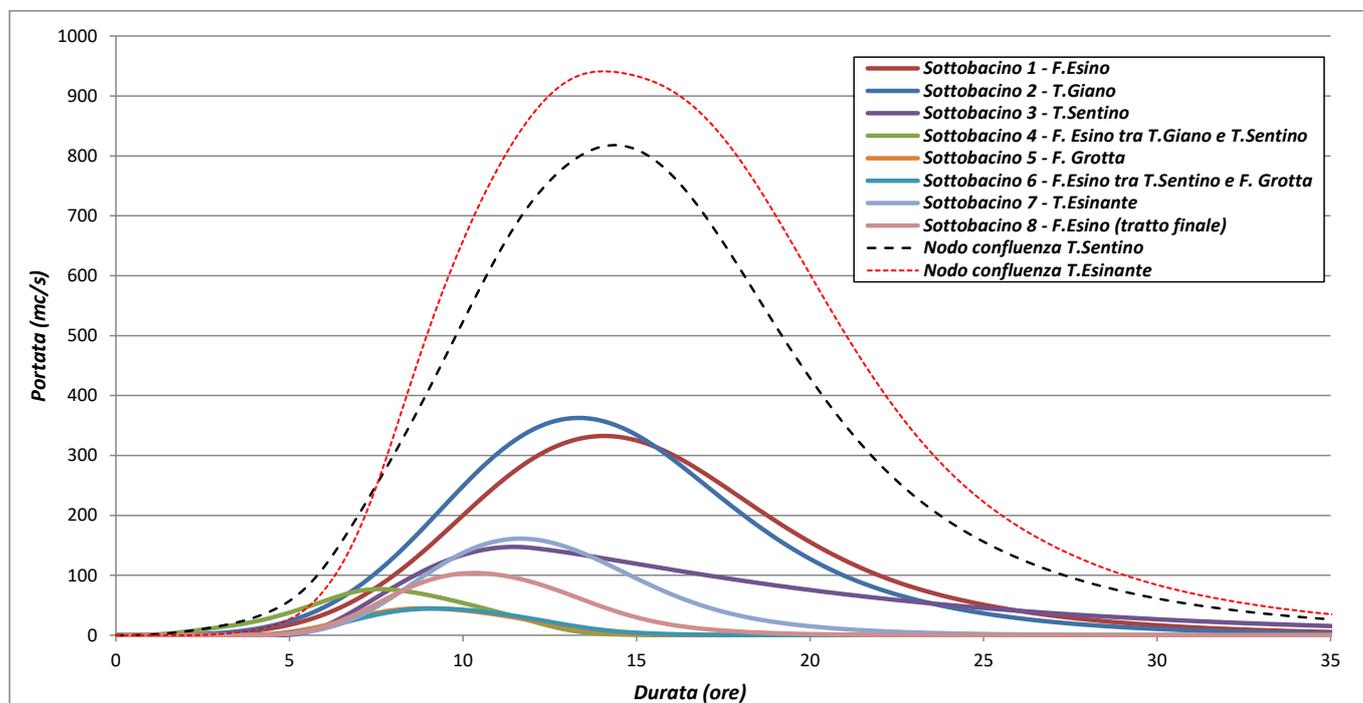


Fig. 20 – Fiume Esino: idrogrammi di piena di progetto per $T_r = 50$ anni.

RELAZIONE IDROLOGICA

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IR0F	00 R 09	RI	ID0001 001	C	45 di 81

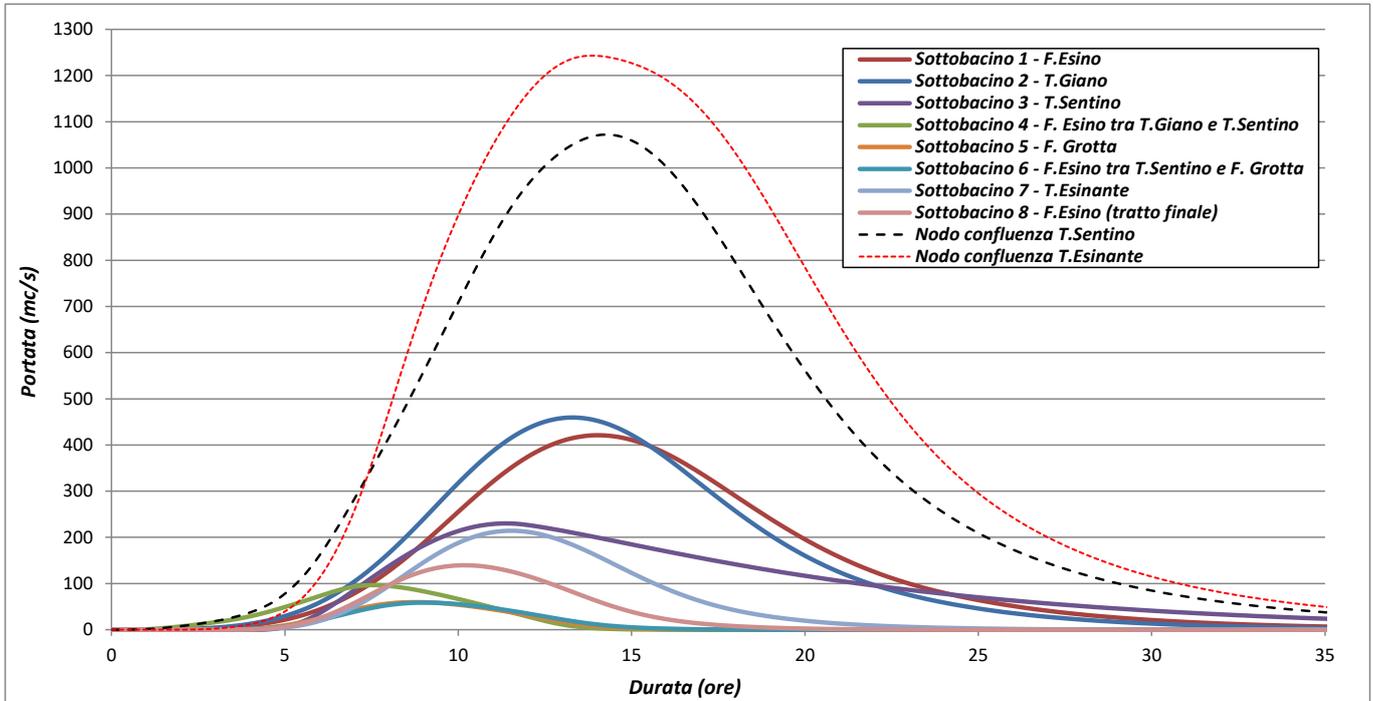


Fig. 21 – Fiume Esino: idrogrammi di piena di progetto per $Tr = 200$ anni.

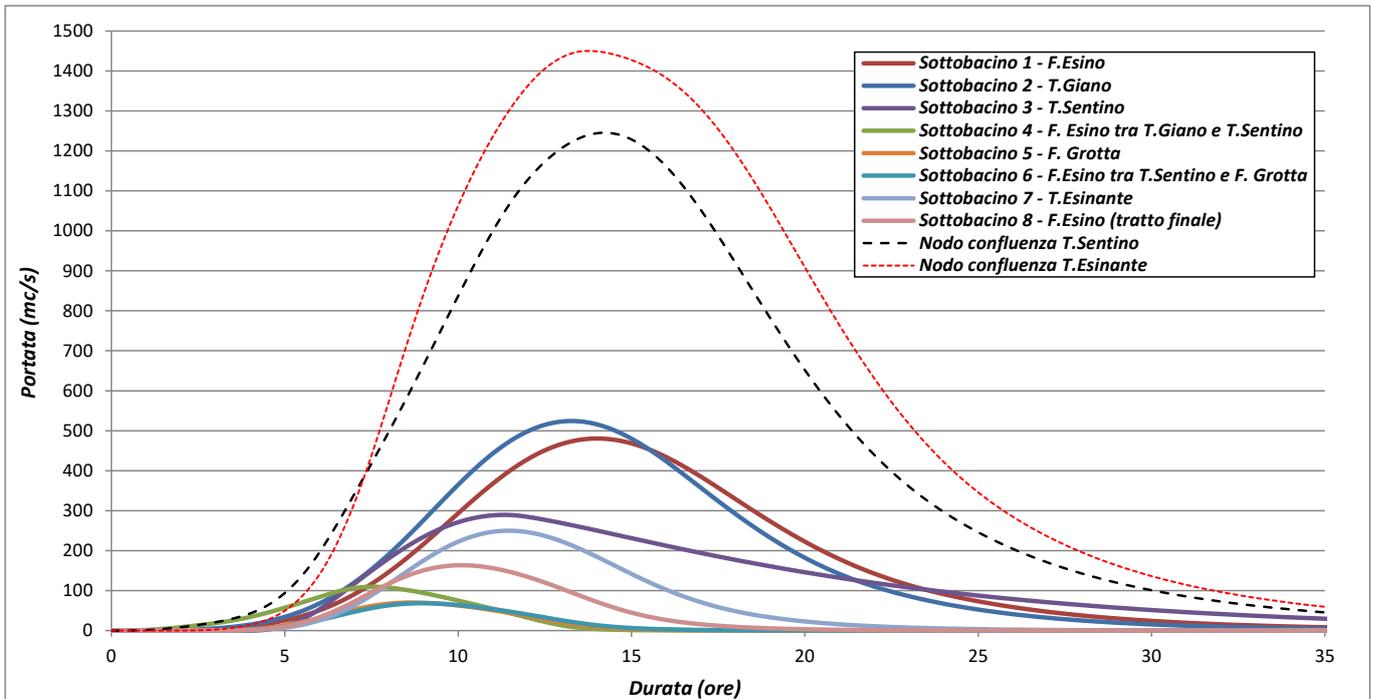


Fig. 22 – Fiume Esino: idrogrammi di piena di progetto per $Tr = 500$ anni.

5. FIUME ESINO: DEFINIZIONE DELLA PORTATA DI RIFERIMENTO PER IL DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE PROVVISORIALI IN ALVEO

Durante la costruzione delle opere di attraversamento fluviale con pile in alveo/golena (nel caso specifico dei nuovi viadotti previsti sul Fiume Esino) o comunque di opere limitrofe ad un corso d'acqua, cioè prima che le stesse abbiano raggiunto il loro assetto definitivo, si pone il problema della definizione della portata di riferimento per il dimensionamento delle eventuali opere provvisorie da prevedersi in alveo/golena nel periodo transitorio.

Per la determinazione del tempo di ritorno dell'evento di riferimento da considerare nel dimensionamento delle opere provvisorie, è ragionevole assumere una probabilità di accadimento, nel periodo di esistenza/permanenza in alveo, compresa tra il 5% ed il 10% (rif. Da Deppo et al. 2004). Come è noto, la probabilità di accadimento $R_{n,Tr}$ del verificarsi in un numero n di anni dell'evento $X(T_r)$ caratterizzato da frequenza di superamento $P[X(T_r)] = 1/T_r$ è, per la probabilità di eventi statisticamente indipendenti, ottenibile come segue:

$$R_{n,Tr} = 1 - P[X(T_r)]^n = 1 - (1 - 1/T_r)^n \quad [1]$$

Fissato il valore $R_{n,Tr} = 0.05 \div 0.10$ e il numero di anni (n) di permanenza delle opere in alveo, è immediato dalla [1] definire il tempo di ritorno dell'evento a base del progetto delle opere provvisorie.

Nella tabella seguente, fissato $R_{n,Tr} = 0.10$, sono indicati i tempi di ritorno di riferimento per alcuni valori della durata di permanenza in alveo delle opere provvisorie.

Durata	Tr (anni)
1 mese	1
2 mesi	2
6 mesi	5
1 anno	10
2 anni	20

Applicando la medesima metodologia adottata per le analisi idrologiche descritte nei capitoli precedenti, sono quindi valutati i valori delle portate al colmo del Fiume Esino associate a tali tempi di ritorno, per i tratti fluviali "confluenza T. Sentino – confluenza Fosso della Grotta" e "confluenza Fosso della Grotta – Castelplanio", significativi per le opere di attraversamento principali previste in progetto.

Nella tabella seguente sono riepilogati i valori di portata al colmo di riferimento da adottare per il dimensionamento delle opere provvisionali in alveo.

<i>Tr</i> (anni)	Tratto “confluenza T. Sentino – confluenza Fosso della Grotta” Q (mc/s)	Tratto “confluenza Fosso della Grotta – T. Esinante” Q (mc/s)	Tratto “confluenza T. Esinante – Castelplanio” Q (mc/s)	Torrente Esinante Q (mc/s)
1	89.9	102.2	141.6	15.7
2	218.5	230.2	286.0	41.6
5	388.8	401.4	486.4	76.7
10	517.6	527.9	621.9	102.1
20	646.4	656.1	766.5	128.1

Per maggiori dettagli circa la configurazione delle eventuali opere provvisionali ed il corrispondente dimensionamento, si rimanda alle relazioni idrauliche annesse.

6. EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SULLE PRECIPITAZIONI

La conoscenza delle variazioni climatiche sul territorio italiano, in corso e previste, è il presupposto fondamentale per la valutazione degli impatti e della strategia nazionale di adattamento ai cambiamenti climatici (SNAC - MATTM, 2015). Mentre la conoscenza del clima presente e passato e delle variazioni in corso si fonda sulla osservazione delle variabili climatiche e sull'applicazione di metodi e modelli statistici di riconoscimento e stima delle tendenze in corso, la conoscenza del clima futuro si basa sulle proiezioni dei modelli climatici.

Secondo la definizione della *World Meteorological Organization* (WMO), le proiezioni climatiche forniscono la probabilità con cui determinate variazioni del clima possono verificarsi nei prossimi decenni, in relazione a diverse possibili evoluzioni dello sviluppo socio-economico globale.

Tali condizioni (scenari) comportano, in particolare, diversi andamenti delle emissioni di gas climalteranti in atmosfera. A tale proposito, l'*Intergovernmental Panel for Climate Change* (IPCC) ha recentemente ridefinito gli scenari futuri a scala globale (*Representative Concentration Pathways* – RCP), allo scopo di fornire informazioni sulla probabile evoluzione delle diverse componenti della forzante radiativa (emissioni di gas serra, inquinanti e uso del suolo), da utilizzare come input per i modelli climatici.

Gli scenari RCP sostituiscono i precedenti scenari pubblicati dall'IPCC nello *Special Report on Emission Scenarios* (SRES). I quattro nuovi RCP includono uno scenario di mitigazione, che stima un valore molto basso della forzante radiativa al 2100 (2.6 W/m² - RCP2.6), due scenari intermedi (4.5 W/m² - RCP4.5 e 6 W/m² - RCP6) e uno scenario caratterizzato da un'elevata emissione e da un elevato valore della forzante radiativa (8.5 W/m² - RCP8.5). Proprio l'IPCC ha introdotto una definizione più specifica del termine "*proiezione climatica*", riferendola alla stima delle variazioni del clima futuro che viene fornita dai modelli climatici. Questi ultimi possono essere classificati in due categorie, *globali* e *regionali*, che contraddistinguono la diversa scala spaziale delle simulazioni del clima futuro. I modelli regionali ("*Regional Climate Models*", RCM) rispondono alla necessità di fornire una migliore rappresentazione dei fenomeni a scala locale. Tali modelli, innestandosi su un modello globale da cui vengono acquisite le condizioni iniziali e al contorno, producono le proiezioni climatiche su una specifica area di interesse, ad una risoluzione più elevata (fino a una massima risoluzione orizzontale di 10-50 km). Recentemente l'ISPRA (rif. "*Il clima futuro in Italia: analisi delle proiezioni dei modelli regionali*", 2015) ha condotto l'analisi e il confronto tra le proiezioni climatiche in Italia più aggiornate prodotte da diversi modelli.

Dall'insieme degli output dei modelli climatici disponibili, sono state estratte e analizzate le proiezioni di precipitazione cumulata annuale fino al 2100 di quattro modelli, negli scenari di emissione RCP4.5 e RCP8.5. Nello specifico, sono stati selezionati i dati che ricoprono l'intero territorio nazionale e per tre orizzonti temporali, rappresentati da periodi di 30 anni (2021-2050, 2041-2060 e 2061-2090), sono stati calcolati sia i valori medi che gli indici rappresentativi degli estremi di precipitazione. Nelle figure seguenti, si riportano le mappe delle variazioni della precipitazione massima giornaliera (in 24 ore) previste da quattro modelli climatici (ALADIN, GUF, CMCC, LMD), nonché la variazione "media d'insieme" (ENSEMBLE MEAN), con riferimento ai tre orizzonti temporali considerati: 2021-2050; 2041-2070; 2061-2090, per i due scenari RCP4.5 e RCP8.5.

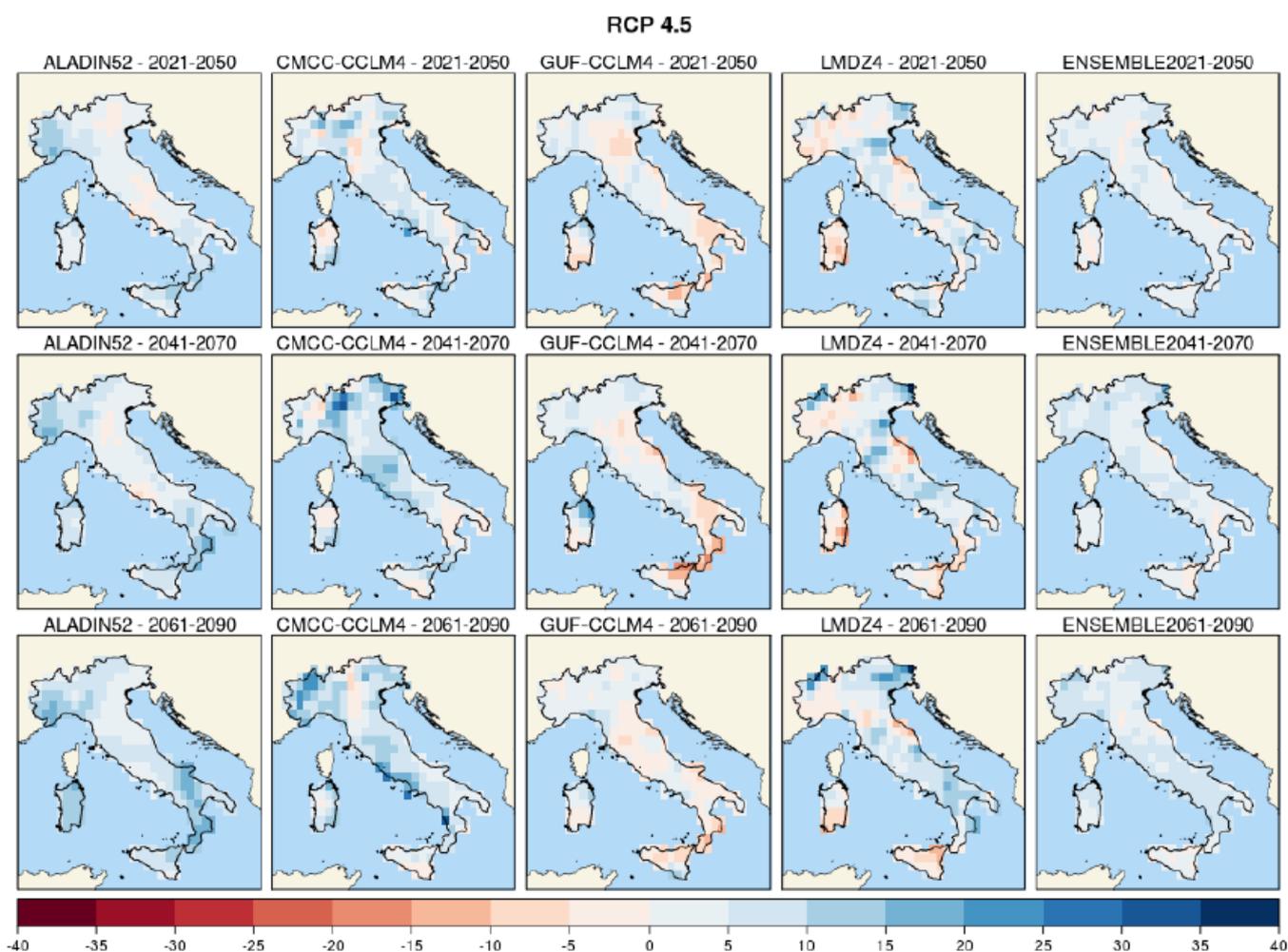


Fig. 23 – Precipitazione massima giornaliera (mm), scenario RCP4.5. Mappe delle variazioni previste dai modelli climatici per i tre orizzonti temporali 2021-2050 (prima riga), 2041-2070 (seconda riga), 2061-2090 (terza riga).

In entrambi gli scenari, due modelli climatici indicano un aumento delle precipitazioni massime giornaliere su quasi tutto il territorio nazionale, di entità generalmente modesta (inferiore a 10 mm) e punte superiori a 20 mm in alcune zone.

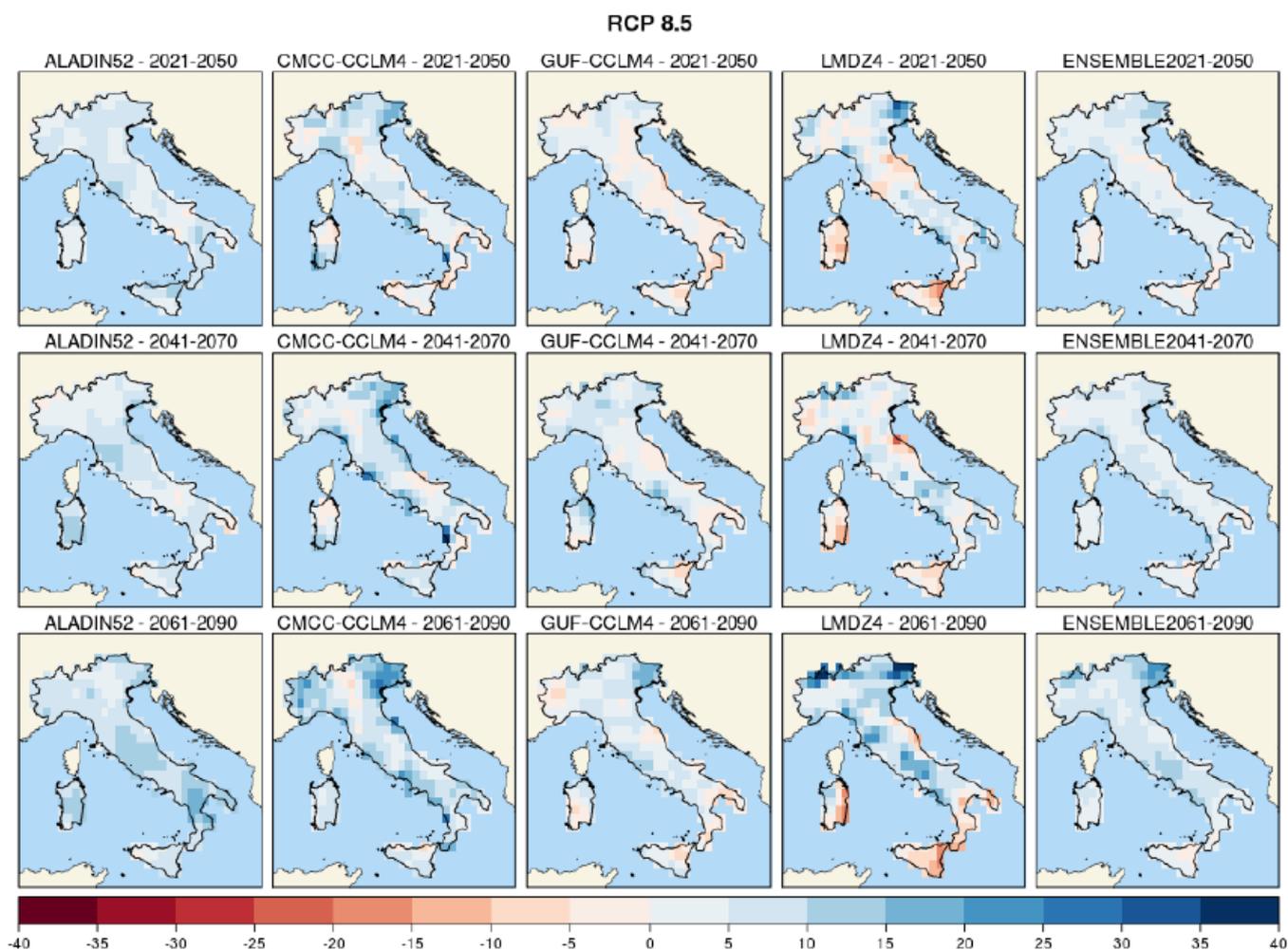


Fig. 24 – Precipitazione massima giornaliera (mm), scenario RCP8.5. Mappe delle variazioni previste dai modelli climatici per i tre orizzonti temporali 2021-2050 (prima riga), 2041-2070 (seconda riga), 2061-2090 (terza riga).

Nella tabella seguente, si riportano i valori di variazione, “media di insieme” (ENSEMBLE MEAN) e prevista dai quattro modelli meteo climatici adottati/considerati, di precipitazione massima giornaliera (h24) (rispetto al valore medio nel periodo climatologico di riferimento 1971-2000), prevista nell’area di

intervento, per l'orizzonte temporale 2061-2090, con riferimento alla scenario "massimo" di emissione RCP8.5, dedotti dalle mappe sopra descritte.

Periodo	Variazione media (Emsemble mean) h_{24} (RCP8.5)	Variazione da modello ALADIN52 h_{24} (RCP8.5)	Variazione da modello CMCC-CCLM4 h_{24} (RCP8.5)	Variazione da modello GUL-CCLM4 h_{24} (RCP8.5)	Variazione da modello LMDZ4 h_{24} (RCP8.5)
2061-2090	+0÷5 mm	+5÷10 mm	+15÷20 mm	-5÷0 mm	+0÷5 mm

Tab. 14 – Valori medio e previsti dai quattro modelli meteo climatici di variazione di precipitazione massima giornaliera nell'area di intervento (ISPRA, 2015).

Con riferimento alle analisi idrologiche sopra descritte, ed in particolare ai dati di pioggia registrati presso le stazioni di misura di riferimento, il valore medio di precipitazione massima giornaliera (h_{24}), nel periodo climatologico di riferimento 1971-2000, ammonta a **64.90 mm**.

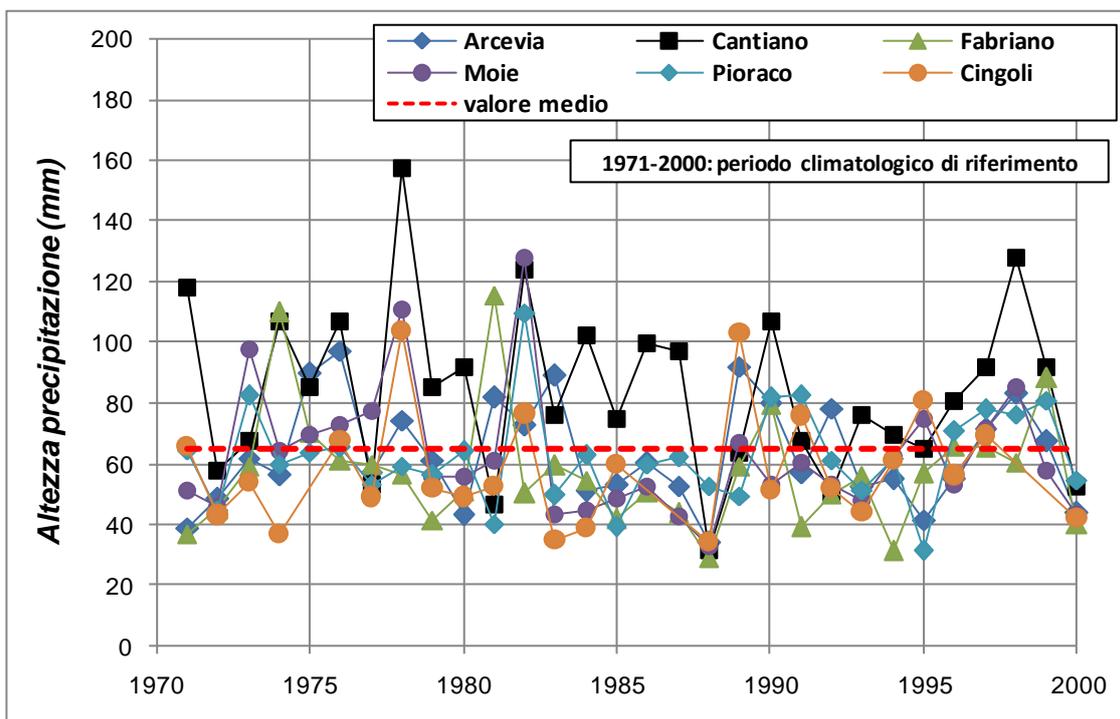


Fig. 25 – Stazioni pluviometriche di riferimento per il sottobacino del Fiume Esino in esame: serie storiche di dati di altezza di pioggia con durata pari a 24 ore (nel periodo climatologico 1971-2000).

Prendendo tale valore come riferimento, la variazione massima prevista, ossia +15-20 mm nel trentennio 2061-2090 secondo il modello meteo climatico più cautelativo (i.e. CMCC-CCLM4), corrisponderebbe ad un incremento della precipitazione massima giornaliera del 23-31%.

Analogamente, la variazione media prevista, ossia +0-5 mm nel trentennio 2061-2090 secondo la “media di insieme” (ENSEMBLE MEAN) dei risultati dei quattro modelli meteo-climatici adottati, corrisponderebbe ad un incremento della precipitazione massima giornaliera dell’ 8%.

Quest’ultimo valore di incremento previsto è sicuramente il più rappresentativo delle proiezioni climatiche disponibili previste anche dagli altri modelli meteo-climatici (e.g. il modello GUL-CCLM4 prevede addirittura una riduzione della precipitazione massima giornaliera).

Applicando (impropriamente) tali incrementi all’altezza di pioggia di progetto, riferita ad una specifica durata, ne deriva un contestuale aumento delle portate al colmo, della medesima entità.

Le considerazioni sopra esposte saranno prese come riferimento nelle analisi idrauliche a corredo del presente progetto per lo sviluppo di ulteriori verifiche di compatibilità sia delle opere di attraversamento (ponti/viadotti/tombini) sia dei sistemi di drenaggio della piattaforma stradale e ferroviaria (che saranno definiti con maggiore dettaglio nella successiva fase progettuale), nei confronti quindi anche di eventuali variazioni (nello specifico, incrementi) delle precipitazioni per effetto dei cambiamenti climatici.

In particolare, sulla base delle portate incrementate per effetto del cambiamento climatico, si è proceduto a verificare se le opere di attraversamento fluviale e di drenaggio previste in progetto consentano il transito delle portate di riferimento (a pelo libero, senza specifico franco minimo) nell’ipotesi di incremento delle precipitazioni, dedotto dalle proiezioni più cautelative (massimo scenario di emissione, massima variazione prevista, modello meteo-climatico più gravoso, massimo orizzonte temporale) ad oggi disponibili. In mancanza di una specifica normativa o linea guida di riferimento (a livello nazionale e/o locale) sul tema, si ritiene che tale criterio di verifica sia ragionevole e conforme alle indicazioni riportate nella Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (MATTM, 2015).

I risultati di tali verifiche saranno forniti nelle relazioni idrauliche a corredo del progetto.

7. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

AA. VV. *Manuale di Ingegneria Civile e Ambientale*, Zanichelli ESAC, Bologna, 2003.

Bai J., 1994. *Least Squares Estimation of a Shift in Linear Processes*, Journal of Time Series Analysis, 15, 453-472.

Bai J., 1997a. *Estimating Multiple Breaks One at a Time*, Econometric Theory, 13, 315-352.

Bai J., 1997b. *Estimation of a Change Point in Multiple Regression Models*, Review of Economics and Statistics, 79, 551-563.

Bai J., Perron P., 1998. *Estimating and Testing Linear Models With Multiple Structural Changes*, Econometrica, 66, 47-78.

Da Deppo L., Datei C., *Fognature*, Edizioni Libreria Cortina, Padova, 2005.

Easterling, D.R., Peterson T.C.. *A new method for detecting undocumented discontinuities in climatological time series*. Int. J. Climatol., 15, 369-377, 1995.

Ferro V., *La sistemazione dei bacini idrografici*, McGraw-Hill, Milano, 2006.

Maione U., *Appunti di idrologia 3. Le piene fluviali*, La Goliardica Pavese, 1977

Marani M., *Processi e modelli dell'Idrometeorologia*, Dispense, 2005.

Rossi F., Fiorentino M., Versace P., *Two component extreme value distribution for Flood Frequency Analysis*, Water Resources Research, Vol. 20, N.7, 1984.

Surendra, K. M., Vijay., P. S. *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology*. Springer, pp. 84-146, 2003.

ALLEGATO I – DATI PLUVIOMETRICI

Stazione di Arcevia					
Anno/ore	1	3	6	12	24
1939	21.4	43.6	47.8	50.8	91
1940	57.8	63.2	63.4	72.6	114.8
1941	28.8	38.4	38.4	48.6	53
1942	24.6	30.2	35.8	44.4	48.2
1943	15.6	20	25.8	35.6	43.8
1944	25	44.8	72	97.6	107
1945	19.6	24.2	27	31.6	35.8
1946	16.6	30	36	49	76.6
1947	12	17.8	31.8	50.4	61.8
1948	17.8	25.2	32	36	49.4
1949	16	30.8	49.4	68	78.8
1950	14.2	15	22.4	24.8	34
1951	27	51	58.6	62.8	62.8
1952	19	22.8	27.2	45.4	50.6
1953	33.6	60.2	68.2	76	78.6
1954	20	28.4	30	41.4	46.2
1955	46.8	47.4	47.4	47.4	64.8
1956	17.2	26.8	26.8	37	51
1957	27	27	40.2	48	64.4
1958	22.4	24.2	30.2	39	48.6
1959	33.4	33.4	33.4	49.2	49.6
1960	33	41.8	52	53.2	74.8
1961	19	23.6	33.4	43	55.4
1962	25.8	26.2	45	67.8	89.6
1963	14.4	19.8	33.2	42.6	55.8
1964	22.6	34	40	52.2	68.8
1965	29.2	30.2	33	61.2	71.8
1966	20	22.2	31	46.2	63.6
1967	22.6	26.4	27.4	32.2	46.6
1968	20	30	41.8	57.6	91.2
1969	17.6	22.4	31	52	56.2
1970	17	23.8	23.8	28	40.4
1971	17.2	18.4	20.6	29.4	39.2
1972	20.8	35.4	36.6	47.6	48.6
1973	22.8	32.6	33	44.8	62

Stazione di Arcevia					
Anno/ore	1	3	6	12	24
1974	25.2	33.4	41.4	56	56.4
1975	35	42.2	66.2	72.2	90
1976	32	38	56.4	76	97.4
1977	14.8	22	40	56	57.6
1978	24.6	27.8	42.4	53.4	74.6
1979	35	49.8	52.4	52.4	61.4
1980	13	16	21.4	30	43.6
1981	52	73.4	75.2	78.2	82
1982	30	36.8	42.6	59	73
1983	45.8	58.6	62.4	89.4	89.4
1984	28	33.4	34.2	41.8	51.4
1985	37.8	41	42	49.6	53.2
1986	32	33.8	37.6	43.8	60.6
1987	28	28	30.6	45.4	53
1988	20.2	23.6	26.2	27.6	34.4
1989	34.4	49.4	49.6	61	92.2
1990	24.6	29.2	31.2	51.0	80.0
1991	18.2	28.2	39.8	52.4	57.0
1992	18.0	40.4	48.6	69.6	78.4
1993	15.8	28.4	34.0	39.8	52.4
1994	25.8	31.0	33.2	41.6	55.2
1995	26.8	32.4	33.8	36.0	41.8
1996	13.4	20.4	30.8	44.6	55.4
1997	17.6	38.0	44.8	45.0	71.4
1998	31.8	41.6	42.0	58.6	83.2
1999	28.0	35.0	45.6	59.6	67.6
2000	35.0	38.8	38.8	44.0	44.0
2001	22.0	42.6	58.2	69.8	87.6
2002	45.6	50.8	52.8	63.4	84.6
2003	29.4	48.0	52.2	58.6	58.8
2004	23.0	32.6	39.8	40.2	40.2
2005	16.6	27.2	44.6	62.8	76.6
2006	20.2	22.6	35.2	56.4	66.2
2007	13.8	25.2	26.4	26.8	32.8
2008	37.4	50.4	61.4	65.8	65.8
2009	13.6	22.0	31.2	45.4	59.6
2010	30.4	31.2	32.8	54.0	62.2
2011	11.2	18.6	27.4	39.2	64.8

Stazione di Arcevia					
Anno/ore	1	3	6	12	24
2012	13.0	25.4	30.2	49.2	70.8
2013	20.2	29.2	52.6	91.8	130.6
2014	28.4	45.8	54.2	57.0	58.2
2015	33.4	43.6	60.4	102.0	134.4
2016	35.6	44.8	52.2	59.2	64.2
2017	27.8	27.8	33.8	42.0	56.2
2018	17.4	23.0	25.8	38.6	59.8
2019	15.6	30.2	42.6	65.8	90.2
2020	23.8	28.6	33.6	45.8	65.6
2021	22.8	42.8	54.8	68.0	86.0

Stazione di Campodiegoli					
Anno/ore	1	3	6	12	24
1990	24.6	50.6	57.2	80.4	99.2
1991	32.2	34.6	34.6	34.6	47
1992	42.2	54.2	55.2	55.2	67.2
1993	18	29.4	42	53.2	76
1994	24	31.8	32	32.4	32.8
1995	24	39.8	48.8	49.6	50.6
1996	18.8	28.4	34.8	64	121.8
1997	38.2	47.8	47.8	66.6	86.6
1998	17.6	24.4	37.4	66	79.8
1999	31.6	41.6	65.6	78.2	78.4
2000	25.4	39	46.2	46.2	59.8
2001	44	58	72	91.8	100.8
2002	28.6	55	68.8	70	98
2003	32.4	55.8	59.8	59.8	59.8
2004	32.2	41.6	44.2	45	82.4
2005	15.2	34.6	52.2	69	108.6
2006	17.6	35.6	39	39	39.4
2007	24.6	43.4	43.4	43.4	43.4
2008	19.6	26.2	35.6	39.6	41.2
2009	43.8	67.2	68	68	74.8
2010	37.4	47.4	56.8	73.6	87.8
2011	20.8	24.6	35	40	42.6
2012	26.8	28	32.4	46.4	82.8

Stazione di Campodiegoli					
Anno/ore	1	3	6	12	24
2013	27.2	34	52	66.4	107
2014	22.8	48.2	79.2	91	91.4
2015	39	48	48	60.8	85.8
2016	25.2	31.2	38.6	39.2	44.4
2017	17	25.6	33.4	52.6	58.2
2018	20	31.8	37	45.4	58.4
2019	30.8	35	35	40	51.2
2020	28.6	54.4	62	67	101.4
2021	25.2	29.8	45.4	64.6	82.6

Stazione di Cantiano					
Anno/ore	1	3	6	12	24
1949	35.2	43.6	47.8	67.2	70.2
1950	28.2	44.6	44.6	46.8	47.2
1951	20	38.6	65	90.4	161
1952	32	35.8	50.6	73.4	82
1953	36.8	41	42.8	48.4	90.8
1954	15.4	30.6	41	62	70.6
1955	20	28.8	42.8	54	81
1956	18.4	22	36.2	55.4	77.8
1957	18.2	31	48.6	57.8	60.2
1958	41	42.6	43.4	74	79.2
1959	45.6	49	49	56.4	65.4
1960	28.4	51	59.2	92.4	128
1961	20.4	36.4	56	85	111.2
1962	19	35.2	44.6	56.6	68.8
1963	25.8	26.8	34.4	41	65.8
1964	30	41.4	55.8	80.4	84.4
1965	22.2	40	45.6	72	134.6
1966	20	30.4	45	60.8	79.8
1967	18	31	34.6	42	44
1968	37.6	49	52.8	69.6	91.2
1969	21	47.6	63.2	67.6	67.6
1970	14.2	19	21.8	28.8	50
1971	36.6	38	38	73.6	118.2
1972	25.8	28	38	39	58

Stazione di Cantiano					
Anno/ore	1	3	6	12	24
1973	16	30.6	37.6	50.6	67.8
1974	17.4	26	45	70.2	107.2
1975	23.2	25.6	38	46	85.4
1976	28	36.8	62	79.8	107.2
1977	18.6	38.4	42	44	53.4
1978	26.2	43	57	102.2	157.2
1979	19	27	42.4	67	85.2
1980	19.2	35.8	53	70.8	92.2
1981	16	24.2	30	34.6	46.8
1982	40	66.8	82	98	123.8
1983	24.6	44.4	51	76.6	76.6
1984	40	84	100	102.4	102.6
1985	19.8	21.8	29.4	38.4	75
1986	27.6	46	70	96	99.8
1987	35	52.6	93.6	97.2	97.2
1988	18.6	20.4	27.8	29.4	31.6
1989	27.2	31.4	31.6	45.4	63.6
1990	18.6	26.4	35.2	57.2	107.2
1991	20.6	49.6	60.6	66	67.6
1992	34	37.4	38.2	48.8	50.4
1993	40.8	42.8	42.8	67.8	76.6
1994	19.2	28.6	45.2	66.4	69.8
1995	23	33.6	46.6	58.8	65
1996	27.2	29.6	32.8	56.6	81
1997	20	23.2	34.6	56.2	92.2
1998	51.2	74.2	79	84	128
1999	28.6	31.2	39.2	61.8	92.2
2000	17.4	30.2	45.4	52.2	52.8
2001	23	29.2	41.6	66.4	89.8
2002	38	53.2	53.4	79.4	130.8
2003	31	32.2	32.2	44.8	45.4
2004	23.4	33.2	52.2	70.8	83.2
2005	17	30.8	49.8	80.8	134.2
2006	28.8	44.6	53	54.6	72.4
2007	26.4	32.6	42	58	62
2008	41.4	44	44.2	58.4	78
2009	31.4	32.2	40.2	45.2	73.6
2010	25.2	38	60.2	81	99.6

Stazione di Cantiano					
Anno/ore	1	3	6	12	24
2011	18.2	26.8	33.4	54.6	80.2
2012	23	27.8	51	83	131.8
2013	21.2	36.2	57.4	90.2	173.6
2014	32.6	48.2	59.8	103.8	132.6
2015	17.4	36.4	63.8	108	133.2
2016	34	51.2	51.2	54	59.8
2017	63.6	63.8	63.8	87.8	98.8
2018	23.6	34.4	34.4	40.4	68.4
2019	22.2	40.4	72	120.2	149.2
2020	26.6	35.6	45.6	61.4	78.6
2021	21.4	37.8	67.6	103	157.8

Stazione di Cingoli					
Anno/ore	1	3	6	12	24
1947	34.4	49.6	56	56.4	66.6
1948	31	39.8	40.2	40.4	40.4
1949	52	47.8	88.8	107.2	130.4
1950	15.8	17.6	23.2	26	32.2
1951	20.8	47	61.2	61.4	62.8
1952	27.8	31.4	37.2	55.8	58
1953	22	41	51	65.6	109.6
1954	15.2	22	34.8	49	63.4
1955	38.8	41	44.8	65.4	116.2
1956	11.8	18.6	19.4	28.2	41.4
1957	20.8	29	33.6	49	71.8
1958	23.4	53.2	91.2	116.8	142
1959	33.4	86	103.8	127.6	129.6
1960	30.2	34.4	45	69.2	109.2
1961	12.8	22.4	40.4	62	82.8
1962	56	60.6	60.6	97	115.4
1963	39.2	48	51.6	51.6	57.2
1964	18	21.4	23.4	30.8	51.4
1965	29.6	41	44.4	56.6	75
1966	25.6	31	49.6	59.4	61
1967	37.8	43.2	49	56.2	62.2
1968	30.6	34	34.4	44	62.4

Stazione di Cingoli					
Anno/ore	1	3	6	12	24
1969	27.4	33	33	33	41.2
1970	33.2	58.6	66.4	67.8	67.8
1971	22.2	37	37.2	46	65.8
1972	25.2	28.2	30.2	30.2	43.2
1973	21.2	25.4	32.6	46.6	54
1974	20	20.4	33.2	37	37.2
1976	37	45	54	63.4	67.8
1977	30.8	36	38.6	46	49.2
1978	23.4	24	42.8	71.2	104
1979	20	35	47.8	47.8	52.2
1980	10	14.2	28.2	29.4	49.2
1981	30.6	36.8	41	48.6	53
1982	16.6	33	47	68.6	76.8
1983	25	29	35	35	35
1984	17.8	19.4	20	30	39.2
1985	25	26	36	45.6	60
1988	14.8	16.4	17.6	23	34.4
1989	32.4	40.6	56.8	73.6	103.2
1990	30.2	39.8	40	41.6	51.4
1991	30.4	41.4	66.2	73.8	76
1992	28.6	37.2	37.6	37.6	52
1993	16.4	20	27.4	35.8	44.4
1994	37.6	61	61.4	61.4	61.4
1995	66.2	81	81	81	81
1996	43.4	53.8	53.8	56.4	56.4
1997	7.6	15.4	23.6	44	69.6
2000	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4
2001	23	51.2	56.4	64.2	64.2
2002	29	50	51.8	56.8	86.8
2003	17.6	38	56.4	64.2	64.2
2004	27.4	34.4	34.4	40	58.2
2005	11.8	23.4	33.6	36.4	57.6
2006	30.2	58.6	58.6	58.6	65.8
2007	21	23.4	33.4	39.8	53.8
2008	28.6	35.6	44.2	63.2	101.4
2010	34	42.8	46	60.8	69.4
2011	29.8	32.6	32.6	36.8	45.8
2012	22.8	33.2	57	79.6	127

Stazione di Cingoli					
Anno/ore	1	3	6	12	24
2013	41.2	62.6	63.4	76.6	101
2014	24.2	36.2	60.2	67.6	72.6
2015	22.8	41	71.4	101.4	111
2016	34.2	40.8	43.8	46.4	61.8
2017	32.6	41.6	43.4	43.6	66.2
2018	26.4	50	54.6	55.6	56.6
2019	17.2	23.4	40.6	60	92.4
2020	25.6	26.4	31.2	38.6	61
2021	18.2	37	57	91.2	111.8

Stazione di Cupramontana					
Anno/ore	1	3	6	12	24
1991	18.4	46.8	72.4	85.6	85.6
1992	13.2	24.8	37.8	40.0	54.4
1993	9.2	17.8	27.4	37.6	42.2
1994	42.4	55.8	60.0	60.0	69.6
1995	15.8	30.8	45.4	47.4	65.2
1996	19.6	30.4	36.0	44.2	67.6
1997	27.8	35.4	35.4	46.0	64.2
1998	19.8	43.0	48.0	77.6	95.4
1999	11.4	25.0	39.8	48.4	67.0
2000	36.2	60.2	60.2	60.2	60.2
2001	11.8	22.0	28.8	38.0	50.6
2002	23.6	34.4	34.4	55.2	72.4
2003	12.4	19.6	33.2	42.6	42.6
2004	17.6	22.2	27.6	34.4	52.6
2005	18.8	27.4	31.0	45.4	54.4
2006	47.2	58.2	58.8	58.8	58.8
2007	13.4	17.0	21.8	25.0	37.8
2008	42.4	62.8	96.4	97.6	98.8
2009	12.8	21.2	37.8	52.8	65.8
2010	19.0	24.8	33.6	44.4	53.2
2011	13.2	17.2	23.0	28.4	33.6
2012	38.0	46.6	50.4	73.6	92.0
2013	26.0	26.0	33.0	47.8	61.8
2014	17.4	30.4	38.6	44.0	50.4

Stazione di Cupramontana					
Anno/ore	1	3	6	12	24
2015	38.6	45.0	69.8	110.2	127.2
2016	26.6	53.2	53.2	53.4	72.4
2017	31.2	33.0	33.0	47.4	62.8
2018	19.8	23.6	31.4	35.0	45.0
2019	47.2	57.6	63.2	70.4	77.2
2020	24.2	25	29	38.8	46.2
2021	43	49.2	51.8	81	95.8

Stazione di Esanatoglia convento					
Anno/ore	1	3	6	12	24
2001	23.8	35.6	37.4	54.6	62
2002	27	52.2	64.2	66.2	67.8
2003	21.8	47.6	48	59	59.2
2004	17.8	24	29.2	32.8	42
2005	37.8	46.8	52.6	60	87.8
2006	24.6	31.8	34.8	43.8	53.8
2007	21.4	25	25.8	38	46
2008	14.2	22.8	33.4	45.6	52.8
2009	8.6	14.8	20	29.8	31
2010	16.4	21.4	30.8	49.8	61.6
2011	24.6	27.8	39.6	43.8	48.8
2012	36.4	47.0	48.2	52.8	77.2
2013	28.8	50.2	59.0	59.0	79.0
2014	26.8	40.4	53.2	60.4	61.8
2015	24.4	31.6	43.4	66.6	80.2
2016	26.2	26.4	35.0	38.2	43.2
2017	23.8	34.8	53.8	58.8	66.0
2018	50.6	56.2	56.2	56.2	56.2
2019	26.0	31.2	43.0	57.2	67.0
2020	20.4	24.2	31.2	37.8	54.6
2021	47.4	50.6	50.8	52.4	66.2

Stazione di Fabriano					
Anno/ore	1	3	6	12	24
1935	26	38	46.4	64.2	69.2
1937	21.4	44.2	64.2	83.2	92.6
1938	32.8	42.2	50.2	50.4	52.4
1939	19.6	29.8	30.8	33	48
1940	48.2	50.8	53.6	53.6	54
1941	28	30	49.6	51.6	51.6
1942	25.2	39	57.2	60.8	61.2
1943	17.4	28.8	31.4	45	49
1946	15	22	33	40.8	46.4
1947	24.4	32.4	35	35.2	44
1948	19.2	23	25.2	30.8	52.6
1949	26.2	27.4	40.8	47.6	47.8
1950	14.4	20.2	28	28.8	31
1952	35	42.8	42.8	42.8	43.2
1953	22.4	24.4	31.2	43.2	47.2
1954	19	21.4	31.2	44.9	45.4
1955	16.4	21	24.4	40.6	58.4
1956	11.2	19	28.4	31	40.6
1957	40	43	53	73.2	103.8
1958	38	42.6	43.6	50.8	50.2
1959	58.2	82.8	89.6	121.8	126.4
1960	33	58.2	63.6	63.6	63.6
1961	21	33.4	33.4	33.4	54.8
1962	18.4	18.6	23	32	42.6
1963	24.8	27.6	31.6	43	62.6
1964	22.2	25	32.2	39.4	49
1965	48	48	48	63.6	81.2
1966	33.2	36	39.2	49.6	51
1967	34.2	38.6	39.2	52.6	65.2
1968	33.6	37.6	37.6	49.4	59.6
1969	28	35.4	35.6	35.6	42.6
1970	19.4	29	36	37.2	39.8
1971	10.8	19	21.6	35.2	37
1972	19	26.2	36	36.4	45.2
1973	13.6	35	45.5	54.2	59.4
1974	62.6	88	96.6	109.8	110.2
1975	23	35	36.8	50.2	70.6

Stazione di Fabriano					
Anno/ore	1	3	6	12	24
1976	29	33.4	45.2	45.2	61.4
1977	21.2	41.4	46.6	53.4	60.2
1978	26.6	33.8	40.2	46.2	56.8
1979	18.4	22.4	26.6	27.6	41.6
1980	19.6	25.2	30	37.6	51.2
1981	47	62	105.8	109.4	115.6
1982	31	40	43.6	43.6	50.4
1983	24	29.8	39.8	39.8	59.6
1984	22	25	26	41	54.8
1985	17.6	22.6	26.8	30.8	42
1986	18.8	23.6	26.8	42	50.8
1987	36	41	41.4	41.8	44
1988	13.6	16.2	17.4	27.8	29.2
1989	18.4	24	35.2	43.2	59.4
1990	14.2	30	32.2	55.6	79.8
1991	26.8	28.2	28.2	33.4	39.4
1992	17	27	32.2	44.2	50
1993	13.4	25.8	33.8	42.8	55.8
1994	22.4	29.2	29.8	29.8	31.6
1995	30.2	41.6	54.6	56.4	57
1996	17	22.6	31.6	48.8	66
1997	19.6	32.2	35	42.8	65.6
1998	19.8	20.2	31.2	43.6	60.8
1999	33.4	69	85.6	87.4	88.4
2000	18.4	24.8	30.2	31	40.4
2001	32.6	54	61	80.4	91.6
2002	24.8	28.6	30.4	30.4	43.2
2003	15.8	24.6	39.8	51.6	51.8
2004	17	25	31.2	35.8	55
2005	23	27.2	34.4	44	68.6
2006	24.6	27.8	27.8	38.8	44
2007	17.6	37.4	37.6	39.2	39.6
2008	29.2	37	37.2	48.8	54.2
2009	34.6	51.2	52.2	52.8	56.2
2010	38	51.6	51.6	57.6	57.6
2011	21.4	21.4	27.6	29.6	32.4
2012	30.6	39.8	40.6	40.6	49.2
2013	21.8	34.2	62.6	99.8	136.4

Stazione di Fabriano					
Anno/ore	1	3	6	12	24
2014	26.8	43.2	60.6	65	65.8
2015	26.2	29	38.2	58.2	80.8
2016	36.2	40	40	40.2	43.2
2017	12	20	30.4	52	66.2
2018	26.8	30.8	31	31	50.6
2019	26.8	30.6	33	42	49
2020	39.6	48.6	60.6	72.2	100.6
2021	23.4	33.6	55	70.4	85.8

Stazione di Fonte avellana					
Anno/ore	1	3	6	12	24
1991	35	76.6	97	97	98.4
1992	49.6	52	58.4	70.2	75
1993	23.6	45.8	67	67.6	68
1994	29.2	41.4	56.4	57.4	57.8
1995	19.4	34	48.8	71.8	83.6
1996	23.4	28.8	40.2	52	59.2
1997	21	38.6	42.2	59.8	72.4
1999	19.6	23.4	38.2	60	93.4
2000	17.8	27.2	38.6	49.4	66.2
2001	23.8	24.6	31.2	41.6	57
2002	28.8	44.4	45.4	76.6	117
2003	29.4	40	41.2	57.4	60.4
2004	32.2	57.8	69.6	73.4	73.4
2005	29.4	39.8	64.8	90	164.4
2006	25.8	33.8	41.6	54	77.4
2007	78.8	115.8	117.2	117.2	127
2008	22.2	34.8	56	76.2	92.4
2009	31.4	33.2	36.2	50.4	72.2
2010	34.2	45	50.6	85.6	116.8
2011	21.6	25	35.4	52.8	68.8
2012	31	50	56.2	78.8	124.6
2013	40.2	59.4	65.8	110.2	181.6
2014	38.2	52	57.2	75	112.2
2015	30.2	41	54.2	91	125
2016	27	50.8	61.4	72.8	87.6

Stazione di Fonte avellana					
Anno/ore	1	3	6	12	24
2017	47.6	48.6	48.6	67.2	74.4
2018	26.4	47	48	52	90.8
2019	27.4	38.4	68.8	109	138.6
2020	32	42.4	55.8	67.8	91.8
2021	35.8	35.8	41.2	56	74.4

Stazione di Moie					
Anno/ore	1	3	6	12	24
1935	14.8	24.2	27.2	27.2	29.8
1936	17.6	24	38	66	86.8
1937	18.6	18.6	24.8	36.4	63.4
1938	48.4	55.2	55.4	55.4	57.6
1939	21.4	27.6	35.6	47.2	57
1940	35.6	48	80	130	179.4
1941	33.8	37.2	37.6	56.8	58
1942	33.6	41.8	42	42.2	56
1943	26	34.2	34.2	41.4	50.8
1944	54	56.8	56.8	71.8	89.6
1945	20.2	27	27.2	27.4	29.4
1946	36	51.8	62	62	70.8
1947	18.6	31.2	40.4	54.2	56.4
1948	21.4	55	62.6	62.6	62.6
1949	21.2	40	46.4	65.2	124
1950	22	28	34.2	40.8	55.8
1951	22.4	36.4	44	48	61.8
1952	31.8	33.6	33.6	39.4	48
1953	23.2	27.2	46.8	65.2	80
1954	21	40.6	43.4	46.8	47
1955	25	71.4	79.2	79.8	79.8
1956	16	18	29.6	34.4	49
1957	20	44.4	49.6	66.6	83.4
1958	20.8	31	42.8	60.6	70.6
1959	31.4	35	37.4	46	59.8
1960	37.6	55	70	70	73.8
1961	11.8	27.4	46.4	66.4	112.8
1962	41.4	46.8	46.8	57	79.6

Stazione di Moie					
Anno/ore	1	3	6	12	24
1963	38.6	40	40	40	46.6
1964	23.8	30	30.4	30.4	40.8
1965	29.6	29.6	29.6	39.8	54.2
1966	38.8	50.8	99	131.8	149
1967	20	27.4	30	36.2	49.6
1968	27	30.8	44.8	52.2	48.6
1969	21.4	31.8	31.8	52.6	60
1970	27	28.8	29	34.4	35.4
1971	23	25.4	28.8	50.4	51.4
1972	25.2	27.8	31.6	35.2	46
1973	35.6	36	46.6	70.2	98.2
1974	24.4	37.2	53.6	64.2	64.4
1975	20	29	35.8	51.4	69.8
1976	34	35	43	52.6	73
1977	25	43.6	44.8	49.8	77.8
1978	18	20.2	33.2	56	110.8
1979	20.2	26.6	41.6	46.6	56.2
1980	11.4	20	27.85	41.6	56
1981	42.2	47.6	52	54.8	61
1982	32	60	80	118	128
1983	22.2	31.8	35.8	43.6	43.6
1984	18.8	20.4	23	34.8	44.6
1985	17.4	18.6	26	32.6	49
1986	29.6	38.6	43.4	50.8	52.4
1987	26.2	32.8	33.2	36.2	43
1988	12.8	18.4	28.4	31.4	32.8
1989	32	55.2	62	62.6	66.8
1990	20.4	22	33.8	43.6	53.2
1991	15.4	32.4	48.4	60.6	60.6
1992	17.2	28.8	33.6	52.8	53.2
1993	17	38.2	39.6	41.2	48.2
1994	39.2	53.8	59	59	62.8
1995	35.6	50.8	71.6	74.6	75
1996	18.2	22.6	30	34	53.6
1997	19	30.4	38.6	43.2	71.6
1998	13.6	22	31.2	59.6	85.2
1999	20.8	26.8	27.8	42.6	58.2
2000	22.6	23.6	34	43.6	43.6

Stazione di Moie					
Anno/ore	1	3	6	12	24
2001	11	21.4	33	38.8	44.6
2002	28.4	30	30	44	56.4
2003	20.2	37.6	50.4	52.2	52.2
2004	19.6	30.8	36	36	36
2005	35.4	51.6	51.6	51.6	51.6
2006	19.8	25.2	34.4	49.6	54.6
2007	21.4	29.2	29.4	29.6	43
2008	31.4	48.2	52.2	59.4	72.6
2009	10.4	22.6	30.2	40.4	53.2
2010	16.2	27.2	32.4	50.6	64
2011	17	25.2	37.6	58	88.6
2012	19.6	28	40.4	69.8	89.2
2013	34.4	36	41	66.2	86.8
2014	34.4	40	44.4	55.8	63
2015	32.4	55	71.8	100.4	122
2016	33.2	54.2	63	63.4	68.8
2017	18.6	21.8	33.6	63	66.2
2018	27.2	40.6	49	53.4	54.4
2019	32.4	36.2	38.2	40.8	51.4
2020	25.2	35.8	42.4	48	54
2021	26.4	30	48.2	74.2	86.6

Stazione di Pioraco					
Anno/ore	1	3	6	12	24
1935	14.2	21.6	25.6	29.6	38.4
1937	56	95.2	133	141.2	162.4
1938	31	32	32.2	42.6	42.6
1939	34.2	34.8	40.2	41.8	55
1940	29	32.4	32.4	40.8	58.6
1941	30	32	35.2	42.2	42.4
1942	19.4	23.6	23.6	27.2	34.4
1943	20	26.6	38	42.8	59.8
1944	38	40.4	48.2	54.6	96.8
1945	23.8	25.2	31.8	31.8	32
1946	25.6	28.4	33.4	42.4	60.8
1947	20.2	34.4	34.4	34.4	42

Stazione di Pioraco					
Anno/ore	1	3	6	12	24
1948	14.6	32.8	36.8	43.4	48.4
1952	16.4	21.4	26.2	42	58.4
1953	12	28	36.4	36.8	40
1954	15.6	21.6	31.6	41.8	46.4
1955	20	29	40	46.4	85.6
1956	13.6	21	23.2	25.2	30.4
1957	37.6	47.6	51.6	54.6	90.6
1958	22	45.8	46	51.4	54.2
1959	30.2	44.4	44.6	45.4	45.4
1960	19.6	28.6	37	58.6	70.4
1961	24.2	32.4	46.4	96.2	113.6
1962	16.2	20.6	28.6	42.2	47.8
1963	20.8	26.6	29.4	41	59.2
1964	20.2	31.4	34	44.4	60.6
1965	16.8	28.6	29.6	35.4	60
1966	28.2	30.6	44	48	52.6
1967	22	32.6	61.6	88.4	100.6
1968	31	44.4	45.6	58.2	72.2
1969	24	25.2	25.2	33.6	48
1970	22	39.4	39.4	50.2	57.2
1971	19.4	29.6	37.6	59.2	64.4
1972	23.2	24.6	38.6	38.6	45
1973	14	19.8	34	49.4	82.6
1974	38.6	48.8	57.2	60.2	60.2
1975	17	30	30.8	38	64
1976	31	35	42.8	50.8	65.6
1977	15.4	23.2	37.4	46.6	53.4
1978	22.6	27.2	39	49	59.2
1979	35	46.2	46.2	46.2	56.4
1980	22.8	24	45	45	64.2
1981	20.8	27	37	40.4	40.4
1982	30	62	65	88.2	109.6
1983	25.8	35	42.6	44.8	49.8
1984	28.4	34.2	48	54.6	63
1985	22	34.4	34.6	34.8	39.4
1986	26	29.4	30.6	37	60
1987	31	48.8	57.4	57.4	62.4
1988	32	32	34.4	46.2	52.6

Stazione di Pioraco					
Anno/ore	1	3	6	12	24
1989	23.2	33.4	36.4	44	49.6
1990	16	29.6	48	59.4	82
1991	25.4	35	56.8	80.2	82.6
1992	20.6	30	37.8	47.2	61.4
1993	12.2	20.6	33.6	42.8	51.6
1994	37	45.4	46.6	58.6	61.8
1995	9.8	16.2	19	30.8	31.4
1996	21.2	34.6	44.4	57.4	70.8
1997	18	28	39.2	62.6	78
1998	21.8	28.4	36	52	76.2
1999	37	45.8	49.2	63.2	81
2000	27.6	43.2	53.4	53.4	54.6
2001	19.8	29.8	42.6	53.4	68.6
2002	19.8	37	44.6	53.8	63.2
2003	30.2	37.6	52	57.6	57.6
2004	20	45.8	51	51.2	62.2
2005	28.4	34.4	49.6	53.2	58.6
2006	27.6	31.4	35.8	58.8	58.8
2007	26.6	32.6	32.6	37.4	38.6
2008	16.2	29.4	44.2	62.6	72.4
2009	22.6	36.2	36.2	43.2	75
2010	14.8	18.2	27	42.2	70.4
2011	16	33.6	52.4	73.8	116.6
2012	15.4	32.8	54.8	82	117.2
2013	19.8	39.4	70	120.4	173.2
2014	25.8	39	50.2	54.4	59.8
2015	39.6	43.6	66	90	101.6
2016	23.6	27.2	33.8	42.2	66.8
2017	32.8	74.4	88.6	88.6	89.4
2018	31.4	31.4	37.4	42.4	69.4
2019	45	48.4	48.4	57.4	78
2020	36.6	42.2	49.2	74	88.2
2021	13.8	30	50.2	77	95.2

Stazione di San Giovanni					
Anno/ore	1	3	6	12	24
2001	22.8	25.8	31	41.8	51.2
2002	29.2	64.4	84	99.2	134
2003	21.8	23.8	26.8	38.6	39.6
2004	22	30	34.8	38.4	61.6
2005	31.8	33.8	43.6	51.6	78.4
2006	60.2	67.8	67.8	67.8	68.4
2007	43.4	53.2	56.4	56.6	56.6
2008	34.6	37.4	46.2	67.6	100.4
2009	28	28.2	39.4	71	100
2010	21.4	25.2	37	54	66.8
2011	26.2	28.2	29.8	35.6	43.4
2012	26	44.6	55.4	92.8	125.6
2013	18.4	35.2	67.2	114.2	164
2014	21	38	47.6	54.6	69.4
2015	27	36.6	68	104.2	127
2016	38.4	51.4	51.4	51.6	75.8
2017	17.8	28.6	35.4	65	77.6
2018	36.4	40.2	40.2	40.2	52.6
2019	22	29.4	33.2	39.6	50.2
2020	33.2	38.4	71	87	107.2
2021	23.2	44.8	64.2	105.8	135.4

Stazione di Sassoferrato					
Anno/ore	1	3	6	12	24
1991	26.6	35.6	35.6	45.0	45.0
1992	16.2	35.2	45.0	73.2	75.6
1993	13.0	27.8	43.4	52.8	56.0
1994	26.0	32.2	36.4	36.4	42.2
1995	20.2	24.8	30.4	33.8	46.2
1996	15.8	23.0	27.8	43.2	78.6
1997	31.6	33.0	36.8	47.6	81.8
1998	16.6	30.2	33.8	47.6	55.6
1999	20.8	28.2	39.4	41.0	58.6
2000	19.0	21.0	23.6	31.8	41.8
2001	28.6	32.2	35.4	53.6	58.6

Stazione di Sassoferrato					
Anno/ore	1	3	6	12	24
2002	21.2	23.8	29.4	42.8	52.2
2003	22.8	26.8	34.2	47.2	47.8
2004	9.0	21.6	30.4	35.2	46.4
2005	12.0	16.8	27.2	39.6	73.6
2006	15.4	22.2	29.4	44.4	50.0
2007	20.0	22.8	23.8	24.6	32.0
2008	65.6	125.2	141.4	143.0	143.0
2009	18.4	22.0	27.4	40.2	43.8
2010	16.2	23.0	30.4	50.4	61.6
2011	17.8	25.4	41.6	51.2	61.8
2012	24.8	52.2	65.2	76.0	110.2
2013	39.8	52.2	83.0	146.6	237.4
2014	35.6	60.6	74.4	92.2	92.4
2015	93.6	110.2	110.2	110.2	115.0
2016	34.2	44.0	59.6	63.8	75.4
2017	23.2	27.8	28.6	39.2	47.8
2018	26.8	28.6	30.4	50.0	74.0
2019	23.4	24.4	34.8	49.2	65.0
2020	20.4	27.6	44.2	62.8	75.2
2021	22.6	24.6	35.0	53.2	67.0

Stazione di Serralta					
Anno/ore	1	3	6	12	24
1991	27.8	35.4	60.8	78.6	79.6
1992	14.6	24.4	28	45	65.2
1993	10.8	18	29.4	44	65.4
1994	18.8	35.8	38.2	70.8	84.8
1995	33.2	45.2	49.2	62.4	87.8
1996	19.4	27	41.4	66.6	73.2
1997	70.4	104.4	105.8	105.8	105.8
1998	17.4	37.4	60.6	92	113.2
1999	19	24.2	37.4	59.8	88
2000	31.8	46	49	57.6	57.6
2003	8.6	12.4	14.6	22.2	24.4
2004	24.8	34	35.4	57	93.6

Stazione di Serralta					
Anno/ore	1	3	6	12	24
2005	17.2	26.6	32	49.4	75
2006	29	33	33	33	40.4
2007	17.6	18.8	24.8	40.6	45
2008	31.2	33.4	47.2	67	84
2009	26	26.8	26.8	42.8	72
2010	24	35.8	40.4	56.2	67
2011	53.6	54.8	54.8	61.8	82.4
2012	27.6	29.2	44.6	62.2	115.6
2013	31	38.8	56.4	111.6	141.2
2014	35.8	35.8	49.8	70	86.6
2015	16.8	35	61.6	87.6	95.6
2016	56.8	57.4	57.8	64	78.4
2017	38.6	38.6	42	56.8	67.2
2018	64.8	65.4	68	69.6	70.8
2019	20.8	26	38.4	53.8	80.6
2020	26.6	33.8	42.8	42.8	61.8
2021	22.6	27.6	41.2	80.8	99.8

	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
	RELAZIONE IDROLOGICA	COMMESSA IR0F	LOTTO 00 R 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0001 001	REV. C

ALLEGATO II – ANALISI DI STAZIONARIETA' DELLE SERIE STORICHE DEI DATI DI PIOGGIA

Una delle principali cause di discontinuità nelle serie storiche riguarda senz'altro i cambiamenti nella tecnica osservativa ovvero la sostituzione della strumentazione di misura per obsolescenza tecnologica o per variazione del soggetto deputato alla raccolta dei dati misurati. Anche i cambiamenti climatici in atto possono causare/determinare discontinuità nelle serie storiche di variabili ad essi strettamente correlate (e.g. temperatura, precipitazione,...).

L'individuazione di discontinuità nelle serie storiche è generalmente affidata ad appositi test statistici che nella letteratura tecnica sono indicati come *change point tests*. Test largamente diffusi per l'individuazione di discontinuità nelle serie storiche sono stati proposti da Easterling e Peterson (1995), Siegel e Castellan (1988) e Bai (1994).

Alcuni di questi sono implementati in software di dominio pubblico, come ad esempio "R" (<http://cran.rproject.org>) che consente l'impiego di un vastissimo, ben documentato e costantemente aggiornato, set di funzioni statistiche che permettono a loro volta la risoluzione di una vastissima gamma di problemi.

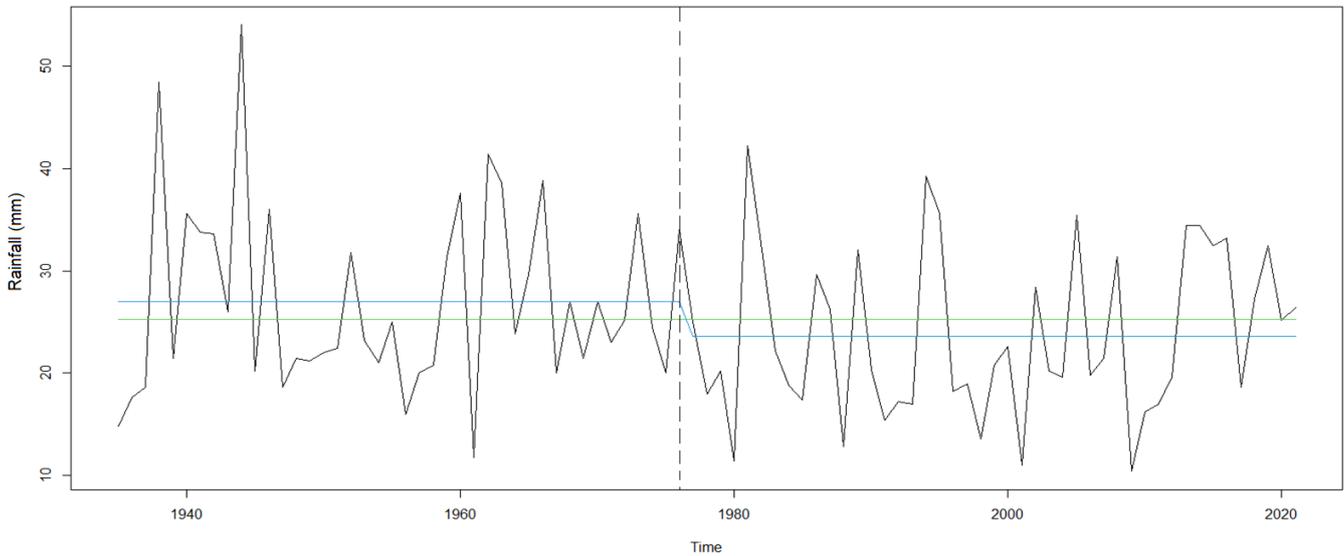
Nello specifico, l'individuazione dei *change points* può essere condotta impiegando l'algoritmo di analisi di *change point* presente nella libreria STRUCCHANGE di "R" e descritto in Zeileis et al. (2003). Tale algoritmo si fonda sul metodo di stima delle discontinuità in modelli di regressione su serie storiche descritto in Bai (1994) ed esteso all'individuazione simultanea di *change points* multipli da Bai (1997ab) e Bai & Perron (1998). La funzione di distribuzione utilizzata per gli intervalli di confidenza è descritta in Bai (1997b).

Tale algoritmo è stato applicato ai dati pluviometrici considerati nel presente progetto. Di seguito, si riportano i risultati ottenuti per le serie storiche delle altezze di pioggia per 1, 3, 6, 12, 24 ore registrate presso la stazione pluviometrica di Moie (periodo osservazione: 1935-2021).

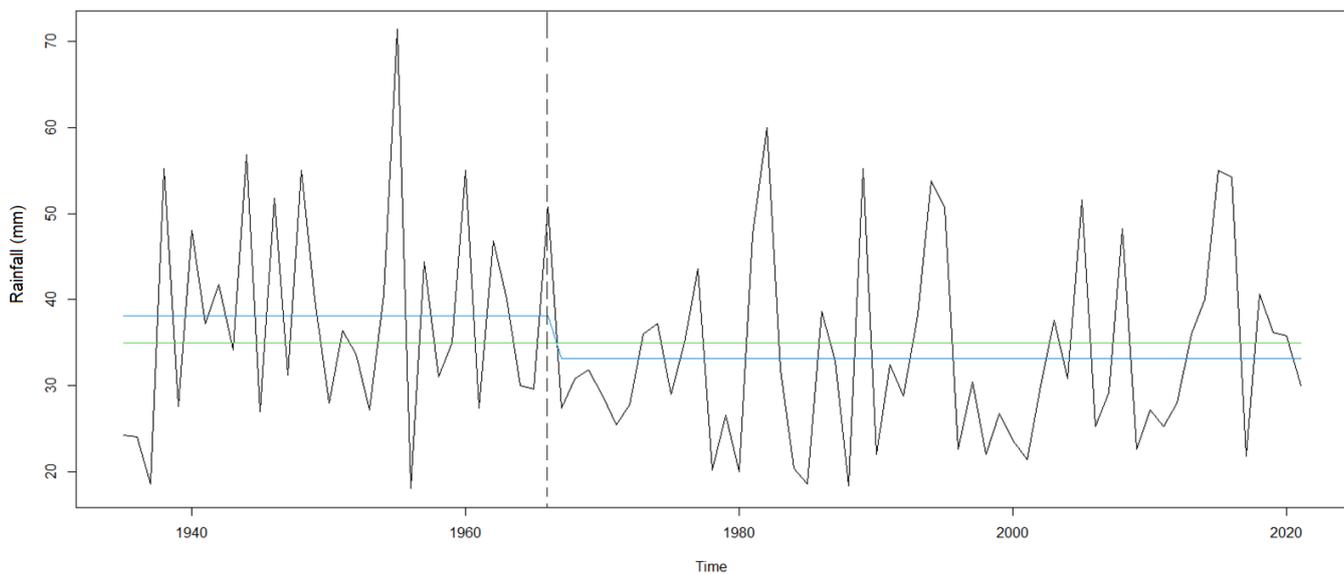
In particolare, sono stati individuati i seguenti *change points*: 1976 per la serie delle altezze di pioggia con durata pari a 1 ora; 1967 per la serie delle altezze di pioggia con durata pari a 3 e 6 ore; 2008 per la serie delle altezze di pioggia con durata pari a 12 ore; 1982 per la serie delle altezze di pioggia con durata pari a 24 ore.

RELAZIONE IDROLOGICA

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IR0F	00 R 09	RI	ID0001 001	C	75 di 81



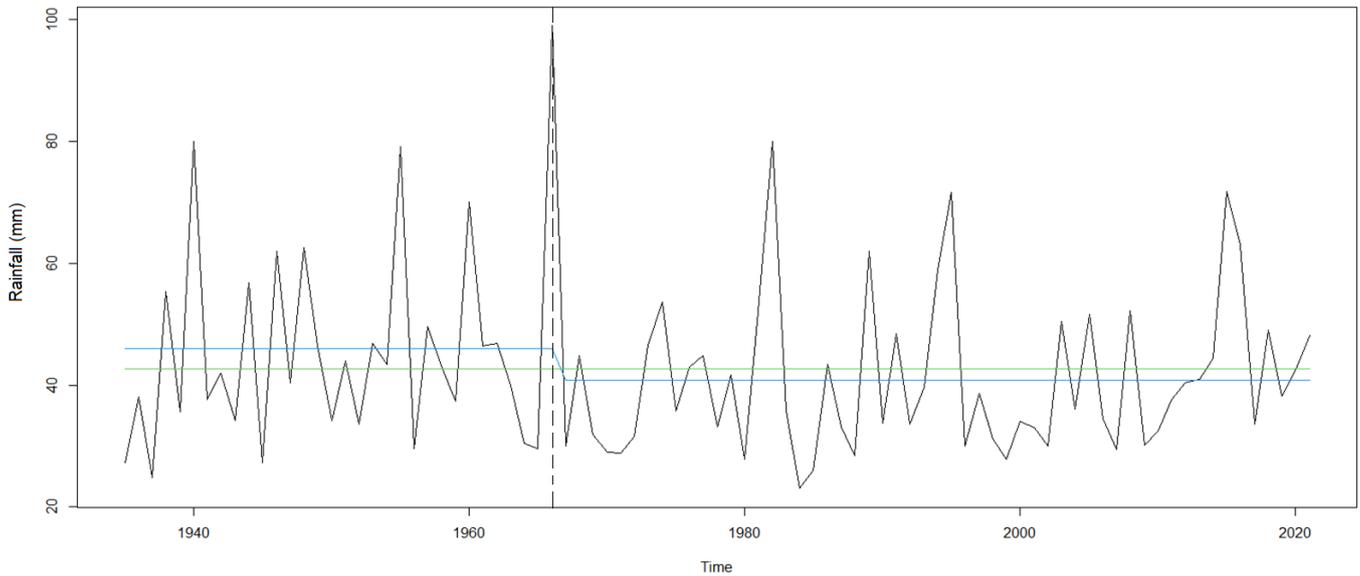
Stazione pluviometrica di Moie: andamento delle altezze di pioggia (massime annuali) con durata pari a 1 ora. La linea tratteggiata mostra il change point stimato (si tratta del 1976). Le tre linee orizzontali sovrapposte alla spezzata che collega i valori rappresentano rispettivamente la media dell'intero periodo e le medie del periodo che precede e che segue il change point.



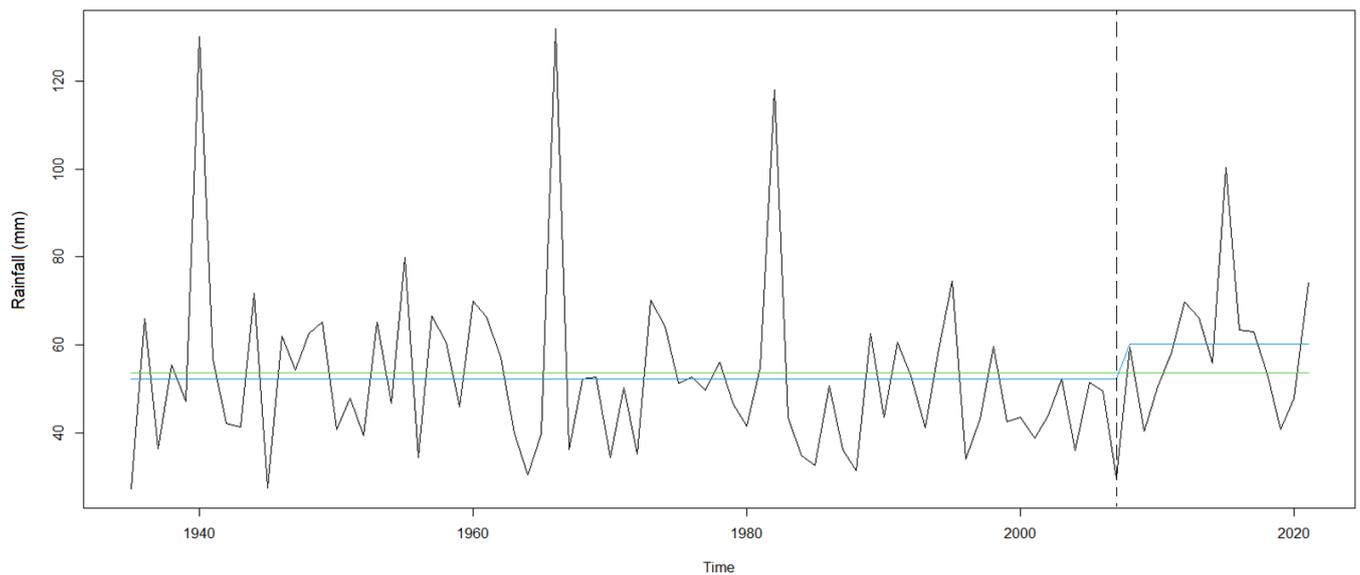
Stazione pluviometrica di Moie: andamento delle altezze di pioggia (massime annuali) con durata pari a 3 ore. La linea tratteggiata mostra il change point stimato (si tratta del 1967). Le tre linee orizzontali sovrapposte alla spezzata che collega i valori rappresentano rispettivamente la media dell'intero periodo e le medie del periodo che precede e che segue il change point.

RELAZIONE IDROLOGICA

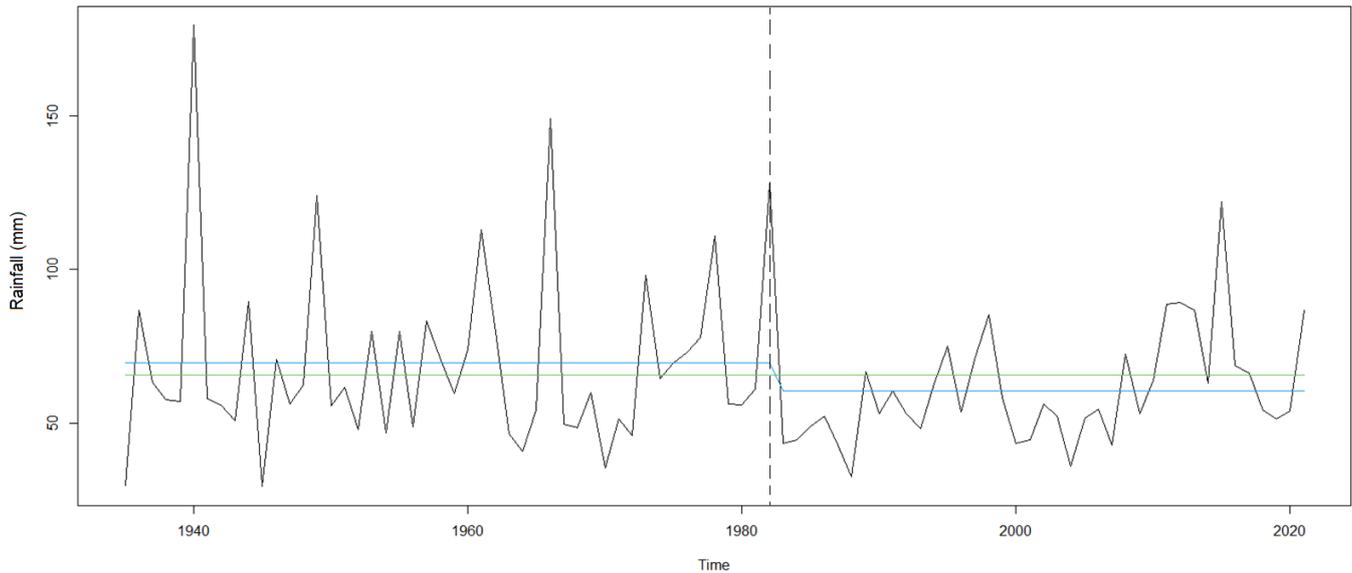
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IR0F	00 R 09	RI	ID0001 001	C	76 di 81



Stazione pluviometrica di Moie: andamento delle altezze di pioggia (massime annuali) con durata pari a 6 ore. La linea tratteggiata mostra il change point stimato (si tratta del 1967). Le tre linee orizzontali sovrapposte alla spezzata che collega i valori rappresentano rispettivamente la media dell'intero periodo e le medie del periodo che precede e che segue il change point.



Stazione pluviometrica di Moie: andamento delle altezze di pioggia (massime annuali) con durata pari a 12 ore. La linea tratteggiata mostra il change point stimato (si tratta del 2008). Le tre linee orizzontali sovrapposte alla spezzata che collega i valori rappresentano rispettivamente la media dell'intero periodo e le medie del periodo che precede e che segue il change point.



Stazione pluviometrica di Moie: andamento delle altezze di pioggia (massime annuali) con durata pari a 24 ore. La linea tratteggiata mostra il change point stimato (si tratta del 1982). Le tre linee orizzontali sovrapposte alla spezzata che collega i valori rappresentano rispettivamente la media dell'intero periodo e le medie del periodo che precede e che segue il change point.

In questa sede sono riportati per semplicità soltanto i risultati ottenuti per la stazione pluviometrica di Moie; risultati analoghi sono stati ottenuti anche per i dati registrati presso le altre stazioni di misura considerate.

I punti di discontinuità individuati ricadono in periodi in cui non si ha evidenza di cambiamenti di strumentazione o variazioni dei soggetti deputati alla raccolta delle misurazioni (il trasferimento delle funzioni/attività dal SIMN al Centro Funzionale della Protezione Civile della Regione Marche è avvenuto nel 2001). Sono pertanto dovuti presumibilmente al cambiamento climatico o ad altre cause esterne.

Di fronte a serie che presentino una discontinuità, si può procedere trattando separatamente il periodo a monte rispetto a quello a valle della discontinuità; è anche possibile eventualmente eliminare la discontinuità introducendo un fattore di correzione delle serie a monte piuttosto che di quella a valle.

Poiché le discontinuità individuate sembrano essere dovute a cause di origine naturale/esterna, nonché per evitare di modificare dati comunque ufficiali e validati, le serie storiche dei dati di pioggia raccolte sono state comunque interamente considerate nelle analisi idrologiche sviluppate per il presente progetto.

ALLEGATO III – APPROFONDIMENTI IDROLOGICI

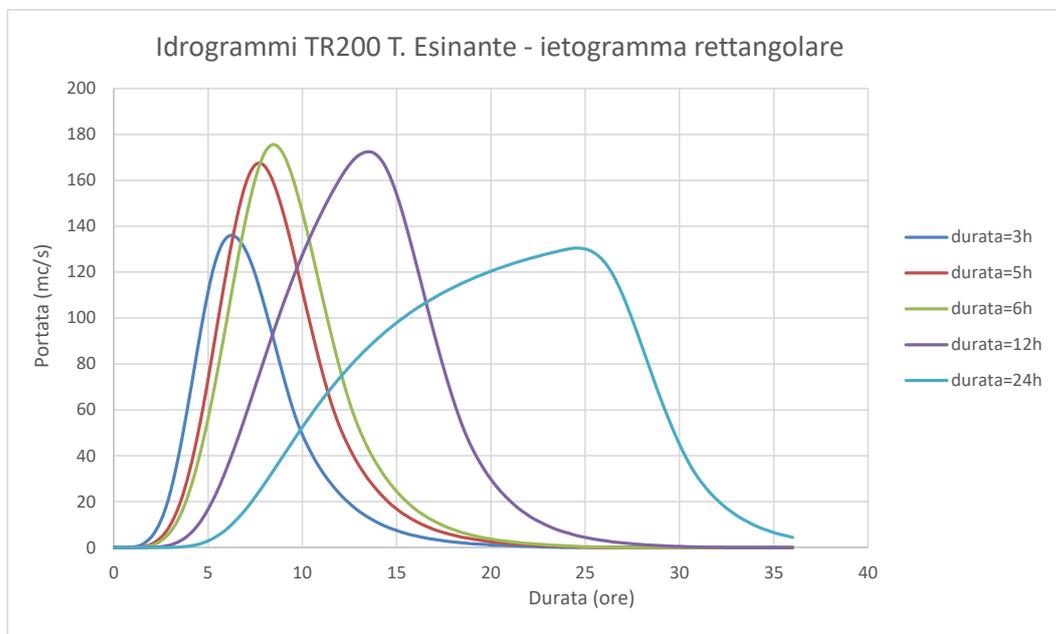
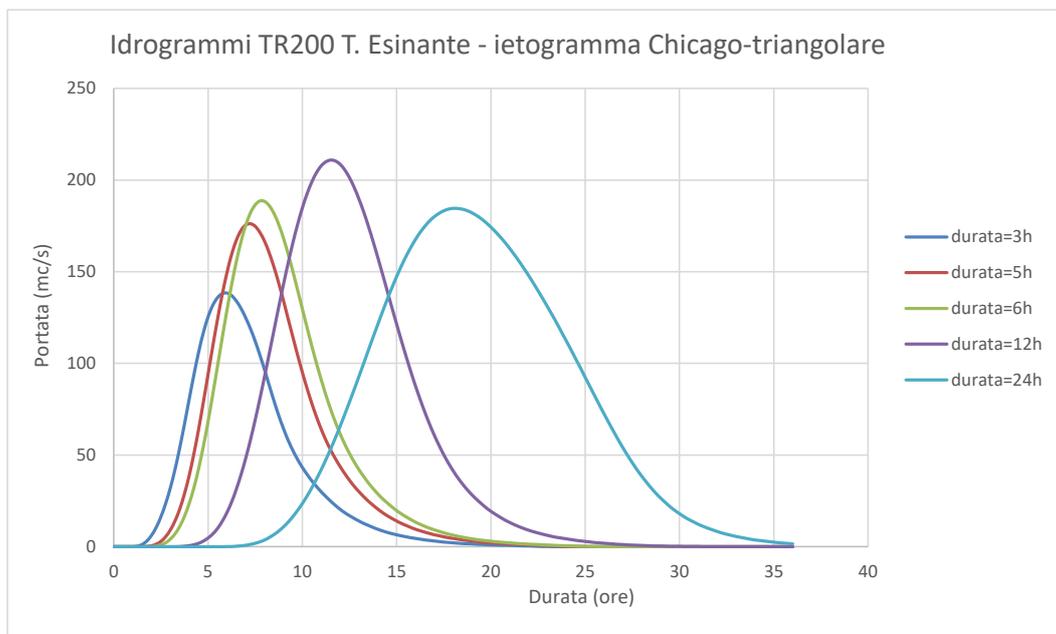
In tale annesso sono affrontate nel dettaglio le seguenti due tematiche:

- a) la durata delle precipitazioni individuata come “critica” (12 ore) per i sottobacini in esame
- b) l'utilizzo dei poligoni di Thiessen per la determinazione degli afflussi in ambiti morfologicamente complessi come quelli in esame

Per quanto concerne, la tematica di cui al punto a), con riferimento alla Tab.12, sembrerebbe che effettivamente la durata di 12 ore massimizzi le portate di piena anche degli affluenti del Fiume Esino considerati nel modello idrologico generale, in quanto le relative portate per 6 ore (durata inferiore a 12 ore) e 24 ore (durata superiore a 12 ore) risultano essere inferiori a quelle stimate per la durata scelta di 12 ore.

Tuttavia, è stato condotto un approfondimento su un bacino di particolare interesse, ovvero quello del Torrente Esinante (tributario del Fiume Esino in quel di Castelplanio), unico tra gli affluenti del Fiume Esino, considerati nel modello idrologico sviluppato, ad essere attraversato (oltre al Fiume Esino stesso) dalla nuova linea ferroviaria in progetto. Nello specifico, per il bacino del Torrente Esinante, circa 79 km² (cfr. Tab. 1), si è proceduto dapprima alla stima del tempo di corrivazione (T_c), tramite la ben nota formula di Giandotti ($T_c = (4\sqrt{S} + 1.5 \cdot L) / (0.8 \cdot \sqrt{H_m - H_0})$), S = superficie; L = lunghezza asta principale; H_m = quota media del bacino; H_0 = quota sezione di chiusura). In particolare, per tale bacino si ha $T_c \sim 5$ ore, effettivamente inferiore a 12 ore. Si è proceduto quindi a generare gli ietogrammi (tipo Chicago - triangolare) di progetto (Tr200) per durate inferiori a 6 ore, ovvero per 5 e 3 ore. Per semplicità ed in analogia a quanto riportato nella Tab. 12, per queste analisi si è fatto riferimento alla (unica) curva di possibilità pluviometrica (Tr200) derivante dalla metodologia VAPI.

Nella figura seguente si riportano gli idrogrammi di piena Tr200 del Torrente Esinante ottenuti per le varie durate considerate: 3, 5, 6, 12, 24 ore. La durata “critica” che massimizza il colmo di piena risulta essere proprio **12 ore**. Il medesimo esercizio è stato ripetuto applicando uno ietogramma di tipo rettangolare. In questo caso, la durata che massimizza il colmo di piena risulta essere invece pari a 6 ore, circa pari al tempo di corrivazione del bacino. Tuttavia, il colmo di piena nonché il volume sotteso dall'idrogramma risultano essere inferiori a quelli derivanti dall'applicazione dello ietogramma di tipo Chicago – triangolare con durata critica pari a 12 ore.



Alla luce di quanto sopra evidenziato, in relazione alle metodologie di calcolo applicate, si ritiene plausibile e corretto considerare una durata critica pari a 12 ore anche per i bacini degli affluenti del Fiume Esino. Per quanto riguarda il Torrente Esinante nello specifico, le portate stimate sono inoltre conformi, anzi superiori, a quelle indicate in studi disponibili sul territorio (cfr. Tab.3).

Relativamente alla tematica b), in alternativa al metodo dei poligoni di Thiessen o topoieti, si può ricorrere a tecniche di interpolazione spaziale che affrontano il problema mediante approcci numerici. Tali tecniche possono essere sostanzialmente distinte in due grandi gruppi: *Metodi Deterministici* e *Metodi Geostatistici*.

I metodi deterministici considerano il legame fra punti vicini in funzione di una legge i cui parametri hanno significato fisico. Tra questi si citano: *Metodo della Media mobile*; *Inverso delle distanze (Inverse Distance Weighted-IDW)*; *Interpolazioni Polinomiali (Spline)*. In generale, tali metodi, non considerano le proprietà statistiche dei punti misurati, ma assegnano un valore univoco, alla funzione in esame, in virtù delle variazioni di parametri di tipo fisico, nel dominio di studio. Ciò implica sufficienti conoscenze sulla superficie da modellare. Altro aspetto rilevante è che essi non effettuano stime di errore sui risultati ottenuti. I metodi geostatistici (kriging) si basano invece sulla misura dell'autocorrelazione spaziale dei valori, prescindendo dal possibile significato fisico, ed includono una valutazione dell'errore di previsione. In questa fase, è stata eseguita una analisi a livello del sottobacino del Fiume Esino chiuso a Castelplanio, applicando uno dei metodi deterministici disponibili per "spazializzare" i valori dei parametri a e n (per $Tr = 200$ anni), presso le stazioni pluviometriche di riferimento, determinati nella presente relazione, sull'area di studio di interesse. In particolare, è stato applicato il metodo *Inverso delle distanze (Inverse Distance Weighted-IDW)*.

Nelle figure seguenti, le mappe dei valori a e n ($Tr200$) così ottenuti per l'area di studio. Operando la media sull'area del bacino di riferimento (Fiume Esino chiuso a Castelplanio), si ha: $a = 66.35 \text{ mm/h}^n$, $n = 0.278$. Considerando una durata di pioggia pari a 12 ore (di cui al precedente punto a) e applicando tali parametri si ottiene un'altezza di precipitazione di progetto $Tr200$ pari a 132.4 mm.

Applicando invece il metodo dei topoieti alle stazioni pluviometriche di riferimento, le cui percentuali di influenza sull'area del bacino in esame sono: Arcevia=5.1%; Campodiegoli=9.6%; Cantiano=0.3%; Cingoli=0.2%; Cupramontana=8.2%; Esanatoglia=15.4%; Fabriano=13.2%; Fonte Avellana=8.9%; Moie=1.7%; Pioraco=0.7%; San Giovanni=17.4%; Sassoferrato=17.9%; Serralta=1.4%, si ottiene una pioggia ($Tr200$) con durata di 12 ore, mediata (in peso) sull'area del bacino stesso, pari a 135.4 mm, leggermente superiore a quella precedentemente determinata.

Rispetto ai metodi deterministici, numerici, il metodo dei topoieti può ritenersi valido per l'area di studio; nella successiva fase progettuale potranno essere svolti ulteriori approfondimenti.

RELAZIONE IDROLOGICA

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IR0F	00 R 09	RI	ID0001 001	C	81 di 81

