

POLITECNICO DI TORINO



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il
Territorio

**Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti
nel bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)**

Relatore: Prof. Alberto Viglione **Candidato:** Emanuele Negrini

Correlatore: Prof. Daniele Ganora

Anno Accademico 2020/2021

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a
monte di Farigliano (CN)

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Sommario

INDICE DELLE FIGURE	6
INDICE DELLE TABELLE.....	9
ABSTRACT	12
INTRODUZIONE	14
VALUTAZIONE DELLE PIENE: L'IMPORTANZA DI INTEGRARE DATI PLUVIOMETRICI CON DATI RADAR	17
IL RADAR METEOROLOGICO.....	18
LIMITI DEL DATO RADAR	21
CARATTERIZZAZIONE EVENTI IN ESAME	22
EVENTO DEL 19-25 OTTOBRE 2019.....	22
<i>Analisi Meteorologica</i>	<i>22</i>
<i>Analisi pluviometrica.....</i>	<i>25</i>
<i>Analisi Idrometrica.....</i>	<i>26</i>
EVENTO DEL 22-26 NOVEMBRE 2019.....	27
<i>Analisi Meteorologica</i>	<i>28</i>
<i>Analisi pluviometrica.....</i>	<i>30</i>
<i>Analisi idrometrica</i>	<i>31</i>
EVENTO DEL 2-3 OTTOBRE 2020.....	32
<i>Analisi meteorologica</i>	<i>34</i>
<i>Analisi pluviometrica.....</i>	<i>36</i>
<i>Analisi idrometrica.....</i>	<i>37</i>
CARATTERIZZAZIONE RISPETTO A DATI STORICI	38
<i>Cenni di statistica.....</i>	<i>39</i>
<i>Il metodo dei quantili regolarizzati.....</i>	<i>43</i>
<i>Sovrapposizione con dati radar.....</i>	<i>44</i>
<i>Risultati e commenti</i>	<i>45</i>
IL BACINO DEL TANARO	47
CARATTERISTICHE GENERALI.....	47
CARATTERISTICHE GEOLOGICHE E LITOLOGICHE	48

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

CARATTERISTICHE IDROLOGICHE	49
<i>Eventi alluvionali principali</i>	49
MODELLO AFFLUSSI-DEFLUSSI	51
CARATTERISTICHE GENERALI.....	51
TIPOLOGIE DI MODELLI.....	55
METODO DEL SCS – CN	57
<i>Vantaggi e limiti del metodo</i>	62
CREAZIONE DEL MODELLO IN RSTUDIO	63
CALIBRAZIONE DEL MODELLO	68
<i>Evento di novembre 2019</i>	69
<i>Evento di ottobre 2019</i>	73
<i>Evento di ottobre 2020</i>	74
APPLICAZIONE DEL MODELLO AI SOTTOBACINI.....	79
ANALISI DI SENSITIVITÀ	82
SCENARIO A: OTTOBRE 2019 CON PRECIPITAZIONI DELL’ALESSANDRINO.....	84
SCENARIO B: NOVEMBRE 2019 CON PRECIPITAZIONI DEL VERSANTE LIGURE	87
CONCLUSIONI	91
ALLEGATI	93
ALLEGATO 1 – VALORI DELLE DISTRIBUZIONI DI GUMBEL DELLE STAZIONI PLUVIOMETRICHE	93
<i>Ormea Centrale</i>	93
<i>Colle San Bernardo</i>	93
<i>Ceva Centrale Mazzarelli</i>	93
<i>Pamparato</i>	94
<i>Perlo</i>	94
<i>Monte Berlino</i>	94
ALLEGATO 2 – CURVE DI POSSIBILITÀ PLUVIOMETRICA.....	95
<i>Ormea Centrale</i>	95
<i>Colle San Bernardo</i>	95
<i>Ceva Centrale Mazzarelli</i>	96
<i>Pamparato</i>	96
<i>Perlo</i>	97
<i>Monte Berlino</i>	97

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

ALLEGATO 3 – SOVRAPPOSIZIONE CPP E DATI RADAR	98
<i>Ormea Centrale</i>	98
<i>Colle San Bernardo</i>	98
<i>Ceva Centrale Mazzarelli</i>	99
<i>Pamparato</i>	99
<i>Perlo</i>	100
<i>Monte Berlino</i>	100
ALLEGATO 4 – SCRIPT R.....	101
<i>Estrazione, ritaglio del DTM e calcolo di direzioni di drenaggio, di distanze dalla sezione di chiusura e di distanze dall'asta fluviale</i>	101
<i>Ricostruzione di griglie coerenti dei dati radar di precipitazione</i>	103
<i>Ricostruzione serie temporali dei pluviografi considerati ed estrazione dei massimi per 1, 3, 6, 12 e 24 ore</i>	107
ALLEGATO 5 – OUTPUT DI R.....	117
<i>Valori dei CN</i>	117
<i>Dati radar di pioggia</i>	118
<i>Idrogrammi dei sottobacini</i>	120
<i>Novembre 2019</i>	120
<i>Ottobre 2020</i>	126
<i>Idrogrammi Scenario A: evento ottobre 2019 con pioggia dell'alessandrino</i>	132
<i>Idrogrammi Scenario B: novembre 2019 con precipitazioni del versante ligure</i>	138
BIBLIOGRAFIA	144
SITOGRAFIA	145

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Indice delle figure

FIGURA 1: SITUAZIONE SINOTTICA DEL 20/10/19 ALLE 12.00	23
FIGURA 2: STRUTTURA A V DELLA PERTURBAZIONE, ORE 15.00 DEL 21/10/19	24
FIGURA 3: PIOGGIA CUMULATA 19-24 OTTOBRE.....	25
FIGURA 4: SITUAZIONE DELLA PRESSIONE AL SUOLO DEL 23/11/19 ALLE 00.00.....	28
FIGURA 5: IMMAGINE SATELLITARE DEL 23/11/19 ALLE 12.00	29
FIGURA 6: PIOGGIA CUMULATA EVENTO 22-26/11/19	31
FIGURA 7: IMMAGINE DA SATELLITE IN CUI SI PUÒ NOTARE IL FORTE APPORTO DI TRASPORTO SOLIDO FINITO NELLE ACQUE LIGURI E FRANCESI.....	33
FIGURA 8: VISTA DA SATELLITE DELLA TEMPESTA ALLE 13.00 DEL 2/10/20.....	34
FIGURA 9: ANOMALIA DELLA TEMPERATURA SUPERFICIALE DEL MEDITERRANEO DURANTE IL MESE DI SETTEMBRE 2020	35
FIGURA 10: PIOGGE CUMULATE DURANTE L'EVENTO	36
FIGURA 11: LOCALIZZAZIONE DEL BACINO DEL TANARO CHIUSO A FARIGLIANO.....	47
FIGURA 12: CURVA IPSOGRAFICA DEL BACINO DEL TANARO CHIUSO A FARIGLIANO.....	48
FIGURA 13: SCHEMA DEI DIVERSI APPORTI AD UNA SEZIONE DI CHIUSURA.	51
FIGURA 14: SCHEMATIZZAZIONE IDROGRAMMA E SOVRAPPOSIZIONE CON UN PLUVIOGRAMMA	53
FIGURA 15: TIPOLOGIE DI RISPOSTA DEL BACINO RISPETTO ALLA FORMA DELL'IDROGRAMMA.....	55
FIGURA 16: RANGE DI VALORI DEL CN.....	61
FIGURA 17: QUOTA, DIREZIONI DI FLUSSO E DISTANZE CALCOLATE NEL BACINO IN ESAME.	65
FIGURA 18: DIREZIONI DI DRENAGGIO.	65
FIGURA 19: IDROGRAMMA DI RAPPORTO EVENTO ARPA EVENTO DI NOVEMBRE 2019	69
FIGURA 20: IDROGRAMMA EVENTO NOV19 OTTENUTO TRAMITE PRIMA SIMULAZIONE.	70
FIGURA 21: DATI DI CN3 NEL BACINO DI FARIGLIANO.	71
FIGURA 22: DATI DI CN2 NEL BACINO DI FARIGLIANO.	71
FIGURA 23: IDROGRAMMA PER L'EVENTO DI NOVEMBRE 2019 OTTENUTO TRAMITE SECONDA SIMULAZIONE. .	72
FIGURA 24: IDROGRAMMA DELL'EVENTO DAL 19 AL 24 OTTOBRE 2019	73
FIGURA 25: IDROGRAMMA DEL RAPPORTO EVENTO ARPA (2-3 OTTOBRE 2020).	74
FIGURA 26: PRIMA SIMULAZIONE DEL MODELLO (CN2).....	75
FIGURA 27: PROVA CON CN1 E VELOCITÀ AUMENTATE.	76
FIGURA 28: IDROGRAMMA SCELTO DOPO LA CALIBRAZIONE.....	76
FIGURA 29: IDROGRAMMA FINALE PER OTTOBRE 2019.	77
FIGURA 30: IDROGRAMMA FINALE PER NOVEMBRE 2019.	78

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

FIGURA 31: IDROGRAMMA FINALE PER OTTOBRE 2020.	78
FIGURA 32: POSIZIONE ED ESTENSIONE DEI SOTTOBACINI.	80
FIGURA 33: CONFRONTO TRA PIOGGIA REALE E PIOGGIA DOPO LO SPOSTAMENTO (OTTOBRE 2019).	84
FIGURA 34: CONFRONTO TRA SITUAZIONE REALE (SOPRA) E SCENARIO IPOTETICO (SOTTO).	85
FIGURA 35: CONFRONTO TRA OTTOBRE 2020 (SOPRA) E SCENARIO IPOTETICO PER OTTOBRE 2019 (SOTTO) A GARESSIO.	86
FIGURA 36: SITUAZIONE DELLA MATTINA DEL 3 OTTOBRE 2020 AL PONTE ODASSO, GARESSIO, LUNGO IL TANARO.	87
FIGURA 37: CONFRONTO TRA PIOGGIA REALE E PIOGGIA DOPO LO SPOSTAMENTO (NOVEMBRE 2019).	88
FIGURA 38: CONFRONTO TRA SITUAZIONE REALE (SOPRA) E SCENARIO IPOTETICO (SOTTO) A CORPM.	89
FIGURA 39: CONFRONTO TRA SITUAZIONE REALE (SOPRA) E SCENARIO IPOTETICO (SOTTO) PER L'ELLERO A MONDOVI.	90
FIGURA 40: CPP PER IL PLUVIOGRAFO DI ORMEA CENTRALE.	95
FIGURA 41: CPP PER IL PLUVIOGRAFO DI COLLE SAN BERNARDO.	95
FIGURA 42: CPP PER IL PLUVIOGRAFO DI CEVA CENTRALE MAZZARELLI.	96
FIGURA 43: CPP PER IL PLUVIOGRAFO DI PAMPARATO.	96
FIGURA 44: CPP PER IL PLUVIOGRAFO DI PERLO.	97
FIGURA 45: CPP PER IL PLUVIOGRAFO DI MONTE BERLINO.	97
FIGURA 46: SOVRAPPOSIZIONE DATI RADAR A CPP PER ORMEA CENTRALE.	98
FIGURA 47: SOVRAPPOSIZIONE DATI RADAR A CPP PER COLLE SAN BERNARDO.	98
FIGURA 48: SOVRAPPOSIZIONE DI DATI RADAR A CPP PER CEVA CENTRALE.	99
FIGURA 49: SOVRAPPOSIZIONE DI DATI RADAR A CPP PER PAMPARATO.	99
FIGURA 50: SOVRAPPOSIZIONE DI DATI RADAR A CPP PER PERLO.	100
FIGURA 51: SOVRAPPOSIZIONE DI DATI RADAR A CPP PER MONTE BERLINO.	100
FIGURA 52: GRIGLIATO DEL CN1 PER IL BACINO CONSIDERATO.	117
FIGURA 53: GRIGLIATO DEL CN2 PER IL BACINO CONSIDERATO.	117
FIGURA 54: GRIGLIATO DEL CN3 PER IL BACINO CONSIDERATO.	118
FIGURA 55: DATI RADAR DI PIOGGIA DELL'EVENTO DI NOVEMBRE 2019 PER IL BACINO CONSIDERATO.	118
FIGURA 56: DATI RADAR DI PIOGGIA DELL'EVENTO DI OTTOBRE 2019 PER IL BACINO CONSIDERATO.	119
FIGURA 57: DATI RADAR DI PIOGGIA DELL'EVENTO DI OTTOBRE 2020 PER IL BACINO CONSIDERATO.	119
FIGURA 58: BROMA.	120
FIGURA 59: CASMO.	120
FIGURA 60: CORFS.	121
FIGURA 61: CORPM.	121

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

FIGURA 62: CORTM	121
FIGURA 63: ELLMO.....	122
FIGURA 64: ELLRA	122
FIGURA 65: MONMO	122
FIGURA 66: NEGPO	123
FIGURA 67: PESCA.....	123
FIGURA 68:PESSB	123
FIGURA 69: TANCL	124
FIGURA 70: TANGA	124
FIGURA 71: TANNU	124
FIGURA 72: TANOR	125
FIGURA 73: TANPI	125
FIGURA 74: TANPN.....	125
FIGURA 75: BROMA	126
FIGURA 76: CASMO.....	126
FIGURA 77: CORFS	127
FIGURA 78: CORPM.....	127
FIGURA 79: CORTM.....	127
FIGURA 80: ELLMO.....	128
FIGURA 81: ELLRA	128
FIGURA 82: MONMO	128
FIGURA 83: NEGPO	129
FIGURA 84: PESCA.....	129
FIGURA 85: PESSB	129
FIGURA 86: TANCL	130
FIGURA 87: TANGA	130
FIGURA 88: TANNU	130
FIGURA 89: TANOR	131
FIGURA 90: TANPI	131
FIGURA 91: TANPN.....	131
FIGURA 92: BROMA MODIFICATO (OTT19).....	132
FIGURA 93: CASMO MODIFICATO (OTT19).....	132
FIGURA 94: CORFS MODIFICATO (OTT19).....	133
FIGURA 95: CORPM MODIFICATO (OTT19).....	133

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

FIGURA 96: CORTM MODIFICATO (OTT19).....	133
FIGURA 97: ELLMO MODIFICATO (OTT19).....	134
FIGURA 98: ELLRA MODIFICATO (OTT19).	134
FIGURA 99: MONMO MODIFICATO (OTT19).	134
FIGURA 100: NEGPO MODIFICATO (OTT19).	135
FIGURA 101: PESCA MODIFICATO (OTT19).....	135
FIGURA 102: PESSB MODIFICATO (OTT19).	135
FIGURA 103: TANGA MODIFICATO (OTT19).	136
FIGURA 104: TANNU MODIFICATO (OTT19).....	136
FIGURA 105: TANOR MODIFICATO (OTT19).	137
FIGURA 106: TANPN MODIFICATO (OTT19).	137
FIGURA 107: BROMA MODIFICATO (NOV19).	138
FIGURA 108: CASMO MODIFICATO (NOV19).....	138
FIGURA 109: CORFS MODIFICATO (NOV19).....	139
FIGURA 110: CORPM MODIFICATO (NOV19).....	139
FIGURA 111: CORTM MODIFICATO (NOV19).....	139
FIGURA 112: ELLMO MODIFICATO (NOV19).....	140
FIGURA 113: ELLRA MODIFICATO (NOV19).	140
FIGURA 114: MONMO MODIFICATO (NOV19).	140
FIGURA 115: NEGPO MODIFICATO (NOV19).	141
FIGURA 116: PESCA MODIFICATO (NOV19).....	141
FIGURA 117: PESSB MODIFICATO (NOV19).	141
FIGURA 118: TANCL MODIFICATO (NOV19).....	142
FIGURA 119: TANGA MODIFICATO (NOV19).	142
FIGURA 120: TANNU MODIFICATO (NOV19).	142
FIGURA 121: TANOR MODIFICATO (NOV19).....	143
FIGURA 122: TANPI MODIFICATO (NOV19).	143
FIGURA 123: TANPN MODIFICATO (NOV19).....	143

Indice delle tabelle

TABELLA 1: TIPOLOGIA EVENTO METEOROLOGICO IN FUNZIONE DEL DATO Z.....	20
TABELLA 2: NOMI E COORDINATE DELLE STAZIONI PLUVIOMETRICHE CONSIDERATE	38
TABELLA 3: ALCUNI DESCRITTORI DI BACINO DEL BACINO DEL TANARO A FARIGLIANO.....	48

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

TABELLA 4: CLASSIFICAZIONE DEI SUOLI SECONDO IL SCS.	60
TABELLA 5: VALORI DEL CN IN FUNZIONE DELL'USO DEL SUOLO.	60
TABELLA 6: CLASSE AMC SECONDO L'ALTEZZA DI PIOGGIA.	62
TABELLA 7: VALORI SCELTI CON LA CALIBRAZIONE.	77
TABELLA 8: SOTTOBACINI COMPRESI NEL BACINO CHIUSO A FARIGLIANO.	80
TABELLA 9: VALORI DELLA DISTRIBUZIONE DELLA CPP PER ORMEA CENTRALE	93
TABELLA 10: VALORI DELLA DISTRIBUZIONE DELLA CPP PER COLLE SAN BERNARDO	93
TABELLA 11: VALORI DELLA DISTRIBUZIONE DELLA CPP PER CAVA CENTRALE MAZZARELLI.....	93
TABELLA 12: VALORI DELLA DISTRIBUZIONE DELLA CPP PER PAMPARATO.....	94
TABELLA 13: VALORI DELLA DISTRIBUZIONE DELLA CPP PER PERLO	94
TABELLA 14: VALORI DELLA DISTRIBUZIONE DELLA CPP PER MONTE BERLINO	94

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a
monte di Farigliano (CN)

Abstract

Gli eventi alluvionali che hanno interessato il territorio Piemontese negli ultimi due anni hanno avuto un forte impatto sul territorio e sull'opinione pubblica, e si inseriscono in un trend ultradecennale di aggravamento degli eventi di pioggia e portata estrema. Questi eventi hanno colpito bacini idrografici montani e pedemontani di modeste dimensioni e la relativa scarsità di dati misurati di precipitazione al suolo e di portata nei corsi d'acqua rende difficoltosa la loro caratterizzazione spazio-temporale. È proprio nei bacini che presentano queste caratteristiche che i danni risultano spesso più gravosi, a causa della rapidità e dell'imprevedibilità della risposta del territorio all'evento stesso. Obiettivo di questa tesi è l'analisi spazio-temporale della risposta del bacino del fiume Tanaro, a monte di Farigliano (CN) ai tre eventi alluvionali tra il 19 e il 26 ottobre 2019, tra il 22 e il 25 novembre dello stesso anno e tra il 2 e il 3 ottobre del 2020. Dati radar di precipitazione a scala temporale oraria sono stati utilizzati insieme a misure di precipitazione e portata convenzionali. L'analisi consiste in una caratterizzazione meteorologica e statistica dei tre eventi e l'utilizzo di un modello afflussi-deflussi a scala di evento basato sui metodi SCS-CN e della corrivazione per ricavare gli idrogrammi generati su diciassette sottobacini. Il modello è stato calibrato rispetto agli idrogrammi registrati durante gli eventi in esame ed infine è stata svolta un'analisi di sensitività per valutare alcuni scenari possibili e fornire una traccia di come risponderrebbe il bacino in diverse condizioni. Due scenari ipotetici di eventi alluvionali, ottenuti muovendo i dati di pioggia dell'alessandrino nell'ottobre 2019 e del versante ligure nel novembre 2019 sul bacino in esame, determinano condizioni ancora più critiche di quelle osservate, soprattutto nel primo caso. Questi risultati forniscono una traccia qualitativa di come potrebbe essere la risposta del bacino del Tanaro se sottoposto ad eventi

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a
monte di Farigliano (CN)

alluvionali con caratteristiche “tropicali”, che il cambiamento climatico potrebbe rendere più frequenti.

Introduzione

L'intenso evento alluvionale che ha colpito più punti della regione Piemonte l'inizio ottobre scorso è solo l'ultimo esempio di una lunga serie di situazioni critiche a livello idrogeologico che hanno colpito il nostro territorio. Il 2 ottobre 2020, infatti, risulta il giorno mediamente più piovoso degli ultimi 60 anni in Piemonte, con un 70% in più di pioggia rispetto alla media giornaliera calcolata tra il 1958 e il 2010. Un altro dato che allarma è quello che vede, dal 2007 in avanti, il giorno più piovoso dell'anno rappresentato da un dato di pioggia sempre maggiore rispetto all'anno precedente (dati Arpa Piemonte).

Se ce ne fosse ancora bisogno, questi dati sottolineano una volta di più come sia importante spostare l'attenzione sulla fase di pianificazione piuttosto che su quelle di gestione e superamento dell'emergenza. Per questo, diventano centrali concetti quali previsione, prevenzione e mitigazione, attività da svolgere nel cosiddetto "tempo di pace", il periodo in cui non è in atto un'emergenza. Il fine ultimo di queste fasi della catena operativa è quindi fornire degli strumenti che abbassino l'eventuale rischio, causato da possibili scenari individuati come probabili.

Questa consapevolezza deve fare i conti con una realtà, quella del nostro Paese, che vede circa il 30% dei comuni collocati in territorio montano o pedemontano, che è sicuramente il territorio più vulnerabile dal punto di vista idrogeologico. È proprio in questa tipologia di regioni, i piccoli bacini idrografici, in cui la fase di pianificazione può essere critica, per mancanza di dati a disposizione, sia strumentale sia storica, o per difficoltà intrinseca nel prevedere il comportamento del territorio, dati i tempi di risposta molto rapidi e gli eventuali effetti di laminazione ridotti al minimo dall'orografia e dalla pendenza elevata dei versanti.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Per questi motivi, la scelta dell'applicazione del presente studio è ricaduta su un bacino che avesse sì subito dei danni durante gli eventi alluvionali esaminati, ma che presentasse le caratteristiche sopra citate. Il bacino analizzato infatti è quello del Tanaro a monte della sezione di Farigliano.

Questo studio si pone quindi come obiettivo l'individuazione di possibili scenari partendo da tre intensi eventi realmente accaduti: due nell'autunno 2019 e uno lo scorso ottobre. Alla base di qualsiasi operazione di prevenzione e mitigazione del rischio vi deve essere una più possibile corretta analisi e raccolta dei dati delle grandezze che concorrono alla creazione del danno. Nel nostro caso, queste ultime sono certamente le precipitazioni e le portate. Punto di partenza di questo testo, quindi, è l'individuazione della modalità di ricostruzione delle precipitazioni che ci metta nella situazione più vicina alla realtà possibile, ovvero quella dell'integrazione tra i dati pluviometrici e i dati radar. Successivamente, viene presentata una caratterizzazione degli eventi in analisi dapprima da un punto di vista prettamente meteorologico e poi da un punto di vista statistico e probabilistico. Risulta di grande importanza, infatti, inquadrare gli eventi rispetto a quelli passati, al fine di determinarne l'entità, attraverso strumenti come il tempo di ritorno e le Curve di Possibilità Pluviometrica.

A questo punto, lo studio portato avanti fornisce una ricostruzione degli eventi tramite la creazione di un modello afflussi-deflussi basato sui metodi del Soil Conservation Service-Curve Number e della corrivazione. Come risultato dell'applicazione del modello si ottengono gli idrogrammi di piena, risultato delle piogge implementate tramite dati radar. Il modello è stato calibrato sulla sezione di Farigliano, rispetto agli idrogrammi registrati da Arpa Piemonte, e poi, per quanto riguarda gli eventi più incidenti sul territorio in esame, cioè quelli di novembre 2019 e di ottobre 2020, è stato applicato a diciassette sottobacini compresi nel bacino del Tanaro chiuso a Farigliano. Così facendo è

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

stato possibile avere una fotografia più chiara dell'andamento delle curve di piena.

Ultimo passaggio di questo studio è stato proporre degli scenari per gli eventi che hanno avuto minore impatto sul bacino del Tanaro: quelli di ottobre e novembre 2019. In particolare, per quanto riguarda il primo, sono state spostate sul bacino in esame le precipitazioni cadute nella zona di Alessandria, per il secondo le piogge cadute sul vicino versante ligure.

Valutazione delle piene: l'importanza di integrare dati pluviometrici con dati radar

La stima dei valori di portata e di precipitazione assume un'importanza chiave nell'ottica della valutazione del rischio idrogeologico e della sua mitigazione. Come sottolineato in *Gabriele et al. (2017)* ancora oggi non viene data la giusta attenzione ai metodi necessari alla corretta valutazione dei parametri che stanno alla base degli eventi alluvionali che spesso colpiscono il nostro territorio. L'errore e la difficoltà nel reperire i dati di pioggia e di portata aumentano quando si valutano piccoli bacini idrografici, nei quali i tempi di risposta sono più piccoli e gli eventi presentano con più facilità carattere impulsivo.

Le problematiche sono molteplici:

- La scarsità di dati associati a valori di portata, sia per carenza di serie storiche sia per la difficoltà insita nella caratterizzazione di eventi rapidi ed impulsivi, a cui si aggiunge la complicatezza di eventuali misurazioni di valori di velocità in campo. Questi fattori concorrono ad una imprecisione diffusa nella costruzione delle scale di deflusso;
- L'incertezza intrinseca nelle misure di precipitazione, dovuta anche alle difficoltà nella reperibilità dei dati di portata elencati nel punto precedente, fa sì che l'output delle analisi idrologiche sia valutato mediante metodi indiretti, come i modelli afflussi-deflussi;
- La criticità rappresentata da eventi di tipo convettivo, in quanto presentano generalmente un'estensione spaziale e temporale limitata. Questi tipi di eventi sono spesso causa di fenomeni alluvionali e gravitativi, e sono quelli che mettono maggiormente in crisi gli attuali

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

sistemi di valutazione dei deflussi, affetti, in questi casi, da errori di sovrastima o sottostima.

La problematica comune a tutti questi aspetti è il carattere puntuale rappresentato dal dato pluviometrico. Le stazioni pluviometriche, infatti, rappresentano una singolarità di dato rispetto al territorio, che presenta una variabilità spaziale in alcuni casi molto elevata, come per esempio nel caso di eventi di tipo convettivo. L'applicazione di svariate tecniche di interpolazione del dato, per quanto ottimali, non consentono di arrivare alla precisione che i modelli richiederebbero.

La soluzione, ormai riconosciuta dalla comunità scientifica e proposta in *Gabriele et al. (2017)* è l'integrazione dei dati pluviometrici con i dati radar che ormai comprendono tutto il territorio nazionale e sono di facile fruizione attraverso al servizio del Dipartimento di Protezione Civile e tramite numerose associazioni e centri di ricerca.

Il radar meteorologico

Il radar meteorologico è uno strumento che tramite l'emissione di impulsi elettromagnetici e la successiva riflessione da parte dei corpi atmosferici presenti in quota, è in grado di stimare le caratteristiche di questi ultimi. Il parametro centrale delle misure prese dal sistema radar è la riflettività, Z , misurata in decibel [dBz]. Il segnale che torna all'antenna radar presenta un'informazione legata alla potenza, misurata appunto da Z , e una legata alla fase. Mentre la prima viene utilizzata per ricavare informazioni riguardo la composizione del corpo atmosferico, ovvero della sua densità, dimensione e contenuto d'acqua, rendendo così possibile caratterizzare fenomeni di pioggia,

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

neve o ghiaccio, il secondo dato, legato alla fase del segnale, fornisce informazioni riguardo la velocità relativa di questi corpi atmosferici. La divisione tra fenomeno liquido o solido, ovvero nevoso o ghiacciato, è possibile tramite la differente diffusione che la goccia d'acqua ha rispetto al fiocco di neve o alla stessa goccia ghiacciata. L'acqua, infatti, risulta più soggetta alla gravità, e presenta quindi una forma maggiormente allungata, riflettendo e diffondendo il segnale prevalentemente sul piano orizzontale. Il dato riguardante lo spostamento relativo dei fenomeni atmosferici è invece ricavabile utilizzando l'effetto Doppler.

Inoltre, conoscendo la posizione dell'antenna radar e la velocità di propagazione dell'impulso elettromagnetico, è possibile ricavare informazioni anche riguardo la posizione e la distanza dei corpi in atmosfera, registrando il tempo di ritorno del segnale.

Solitamente si parla comunque di stima radar delle precipitazioni, e non direttamente di misura, in quanto occorre applicare degli algoritmi per raccogliere i dati utili e per "pulirli" dai segnali riflessi da corpi non atmosferici, quali montagne o aerei.

L'utilizzo del segnale radar, quindi, non rappresenta una misura diretta del dato meteorologico. Per questo, al fine di ottenere un dato sulle precipitazioni, occorre necessariamente passare attraverso le relazioni empiriche presenti in letteratura. La più utilizzata è quella proposta in *Marshall and Palmer (1948)*:

$$z = aR^b \quad [1]$$

Dove:

- Z è la riflettività, espressa in mm^6m^{-3} ;
- a e b sono due parametri, assunti pari rispettivamente a 300 e 1.5;
- R è l'intensità di pioggia, espressa in mm/h.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Successivamente, il dato di z viene calcolato su scala logaritmica così da avere un valore di Z in dBz. In particolare, si possono distinguere le seguenti tipologie di eventi in funzione dei valori di Z e R :

Riflettività [dBz]	Precipitazione [mm/h]	Tipologia evento
-30	-	Nebbia o nuvole basse, senza precipitazioni
Tra -30 e 20	-	Nuvole più dense, senza precipitazioni
20	<1	Pioggia appena percettibile
30	3	Leggera pioggia
40	12	Pioggia di media intensità
50	50	Pioggia forte
55	100	Pioggia molto forte
Tra 55 e 75	-	Pioggia mista a grandine
75	-	Grandinata intensa

Tabella 1: Tipologia evento meteorologico in funzione del dato Z .

L'acquisizione del dato avviene ad intervalli regolari prefissati su superfici coniche ad altezze scelte. In particolare, in questo studio, i dati utilizzati sono stati raccolti secondo due modalità:

- Constant Altitude Plane Position Indicator, (CAPPI), dBz, mantenendo un'altezza costante e registrando le misure man mano con un angolo azimutale variabile;
- Surface Rainfall Intensity, (SRI), mm/h: ricostruendo l'intensità della pioggia al suolo.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Limiti del dato radar

Come abbiamo visto, l'utilizzo del dato radar presenta sicuramente il vantaggio di fornire una copertura continua su grandi aree e con una ottima risoluzione. Questa modalità di studio però presenta anche delle criticità.

Il dato ricavabile da questa procedura è una stima e non una misura, essendo infatti una procedura indiretta del calcolo della precipitazione. Inoltre, per ricavare il dato indiretto di pioggia bisogna applicare delle leggi empiriche di non immediata taratura. La raccolta del segnale è affetto in molti casi da interferenza di corpi artificiali e non atmosferici (clutter), da occlusione e da attenuazione. L'occlusione, o shielding, avviene soprattutto in casi in cui l'orografia è particolarmente complessa, mentre l'attenuazione del segnale può essere dovuta all'attraversamento dell'onda elettromagnetica di lenti di azoto o vapore acqueo presenti in atmosfera.

Per questi motivi, nell'ottica di una migliore ricostruzione e analisi dei dati di portata e di pioggia, occorre valutare i dati radar come complementari rispetto ai dati pluviometrici.

Caratterizzazione eventi in esame

Evento del 19-25 ottobre 2019

Tra il 19 e il 25 ottobre intense correnti umide hanno raggiunto il Piemonte, spinte da una perturbazione atlantica centrata inizialmente sulla Spagna. Gli effetti di questa condizione sono state precipitazioni molto intense, sia nel nord che nel sud della regione, con caratteristiche diverse. Infatti, mentre a nord il carattere delle piogge è stato di tipo avvevivo, nel sud è stato di tipo convettivo. A partire dal pomeriggio del 21 ottobre, l'evento ha interessato soprattutto l'Alessandrino, ma gli effetti della perturbazione ci sono stati anche altrove.

L'evento si può suddividere in due fasi: una prima fase, che va dal 19 al 22 ottobre, e una seconda fase, dal 22 al 25. Caratteristica comune ad entrambe le fasi è la risposta rapida del reticolo idrografico.

Analisi Meteorologica

Prima fase

A partire dal 19 ottobre, masse di aria umida di scirocco sono state convogliate sul nord ovest italiano, spinte da un'estesa area depressionaria centrata da prima sulle isole Britanniche, poi più avanti sulla penisola Iberica. Le precipitazioni del 19 e del 20 sono state forti e molto forti, a carattere temporalesco e avvevivo, ma hanno comunque fatto registrare picchi inusuali per la stagione. Lo spostamento del vortice di bassa pressione verso sud ha fatto sì che le masse di aria spostate verso nord presentassero caratteristiche sempre più umide e calde (Figura 1). Questo, unito alla condizione di alta pressione che in quei giorni persisteva sul resto della penisola, ha fatto sì che la perturbazione stazionasse sulle zone di confine tra Piemonte, Liguria e Lombardia.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

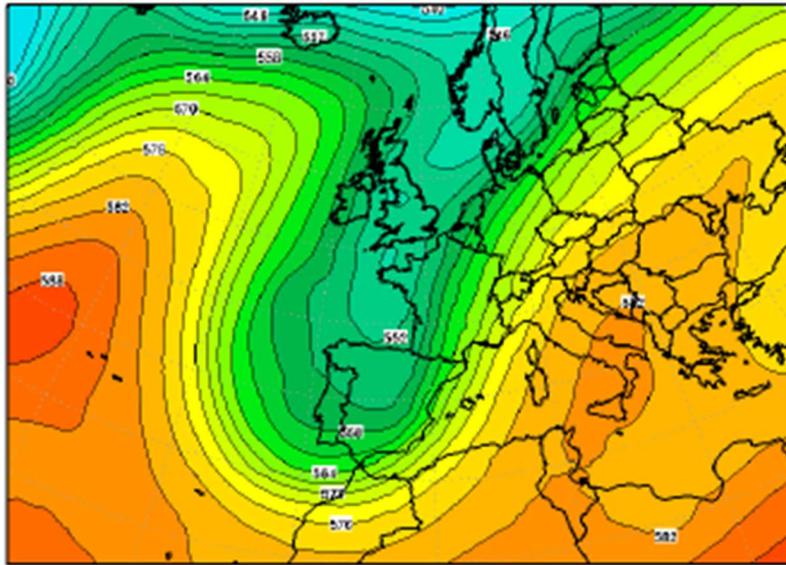


Figura 1: Situazione sinottica del 20/10/19 alle 12.00

Alcune stazioni pluviometriche, infatti, hanno registrato massimi su 24 ore soprattutto nel savonese e nell'alessandrino (Settepani (SV) 280 mm, Montenotte Inferiore (SV) 217 mm, Ponzone Cimaferle (AL) 84,2 mm).

Nelle prime ore del pomeriggio del 21 ottobre si forma una grossa struttura temporalesca a carattere convettivo sul golfo di Genova, favorito dallo scontro tra masse di aria calda e umida proveniente dal mare, e masse più fredde provenienti dalla terraferma. La struttura di questo sistema convettivo viene definita a V (Figura 2), e proprio a causa della sua forma, subisce uno spostamento molto rapido verso l'entroterra. Questa condizione persiste per circa le 12 ore successive, ed è responsabile di una serie di scrosci molto forti sia per quanto riguarda i valori cumulati che di picco.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

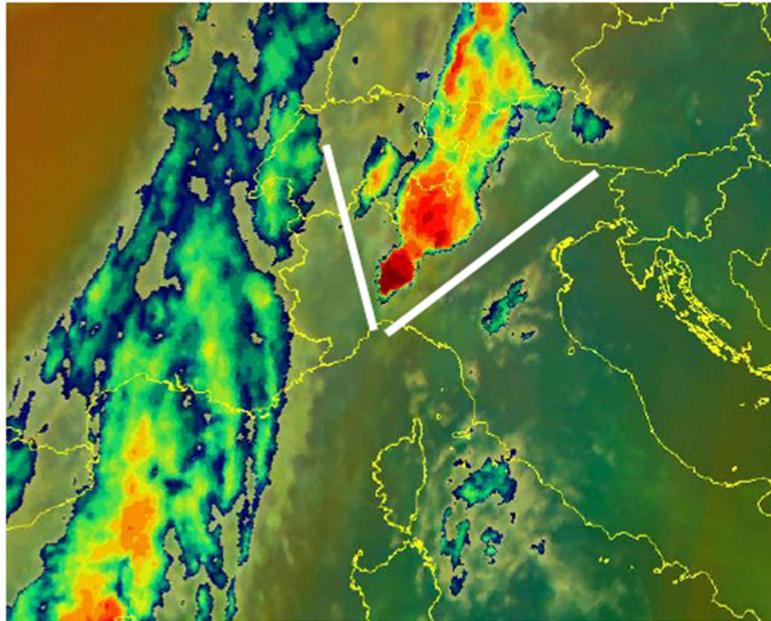


Figura 2: Struttura a V della perturbazione, ore 15.00 del 21/10/19

I valori eccezionali di precipitazione si concentrano in questa fase per lo più sull'alessandrino. Infatti, le stazioni di Arquata Scrivia (AL), di Bric Castellaro (AL), di Castellar Ponzano (AL) e di Sardigliano (AL) raggiungono tutte cumulate di oltre 300 mm.

Solo nelle prime ore del giorno successivo il sistema temporalesco si indebolisce, spostandosi nuovamente verso sud, per poi esaurirsi.

Seconda fase

Il 22 ottobre persiste la situazione di flussi umidi trasportati dall'Africa, attraverso il Mediterraneo, da parte del vortice formato dalla vasta area depressionaria presente ancora sulla penisola Iberica. L'elevata umidità unita alla presenza di barriere naturali fornite dal sollevamento orografico porta a moderate precipitazioni su tutta la parte montana e pedemontana settentrionale. Lungo il giorno seguente avviene un progressivo spostamento della zona a bassa pressione verso est. Questo comportamento viene

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

accompagnato da un innalzamento dei venti sia in quota sia al suolo: le masse di aria spostate sono ancora una volta a carattere caldo e umido. L'effetto è una nuova precipitazione che inizia nella tarda mattinata del 23 ottobre per poi intensificarsi nel pomeriggio, la quale interessa maggiormente l'area sudoccidentale della regione. La perturbazione perdura con diversa intensità fino alla serata del 24 ottobre, quando il flusso da sud si sposta verso le regioni centrali, garantendo un generale miglioramento del tempo ed un esaurimento di tutti i fenomeni.

Analisi pluviometrica

L'evento alluvionale ha caratterizzato maggiormente l'Alessandrino, soprattutto nella prima fase, e la parte settentrionale della regione.

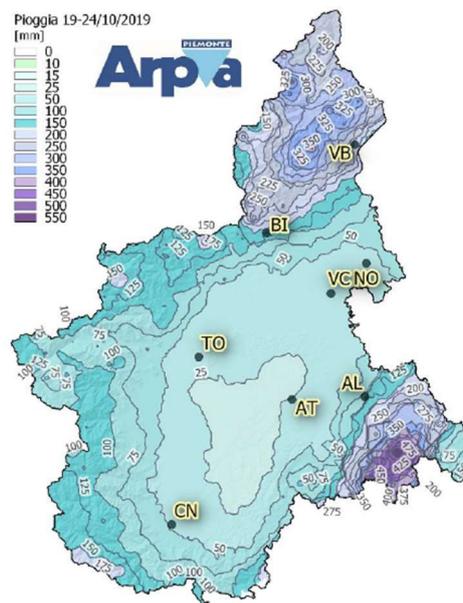


Figura 3: Pioggia cumulata 19-24 ottobre

Nella serata del 21 ottobre precipitazioni a carattere temporalesco portano, sul totale delle 12 ore pomeridiane, a valori intensi di picco. L'esempio più

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

eclatante è sicuramente il dato registrato in corrispondenza del pluviometro di Gavi (AL): 428 mm in 12 ore, record per la rete di misura regionale. Anche altre stazioni superano i 300 mm, localizzate sempre nella provincia di Alessandria (Sardigliano, Arquata Scrivia). Nelle prime ore del giorno successivo il sistema convettivo arretra verso la Liguria, dando vita ad una pausa che perdura fino al 24, giorno in cui riprendono le precipitazioni, con intensità anche elevate come nel caso del Canavese. In quest'ultima fase si registra anche un esteso innalzamento dei livelli idrici lungo l'asta principale del fiume Po.

Analisi Idrometrica

Le precipitazioni registrate durante l'evento hanno interessato soprattutto i bacini settentrionali orientali e quelli meridionali al confine con la Liguria.

In particolare, il fiume Toce ha raggiunto livelli di allerta tra il 21 e il 22 ottobre all'idrometro di Domodossola (VB) dove è passato con una portata di circa 1500 m³/s. Anche al sud, a partire dal 21 ottobre si iniziano a registrare dati vicini ai livelli di allarme: l'Orba fa registrare il record storico di 7.5 m di altezza idrica a Casalcermelli (AL), con una portata associata stimata tra i 2700 e 2800 m³/s, che, secondo il Piano per la valutazione e la Gestione del Rischio di Alluvioni, è caratterizzata da un tempo di ritorno di 500 anni. La piena dell'Orba ha alimentato la Bormida che raggiunge ad Alessandria il livello di 9.21 m, superando di 2 m il livello indicato come pericoloso. A valle, anche il Tanaro risente di questi numeri, registrando una portata di circa 3400 m³/s a Montecastello (AL).

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Evento del 22-26 novembre 2019

La situazione di maltempo diffusa presente sul Piemonte nel periodo tra il 22 e il 26 novembre ha nuovamente origine da una struttura depressionaria proveniente dalla regione atlantica. Le precipitazioni legate a questo evento hanno raggiunto valori cumulati in alcuni casi superiori ai 250 mm, ed hanno avuto carattere prevalentemente avvevivo. Proprio a causa di quest'ultima caratteristica delle piogge, durante l'evento ha avuto un ruolo importante l'orografia del territorio e la sua interazione con le masse d'aria. Non a caso i valori più elevati di precipitazione sono stati registrati in corrispondenza della zona prealpina della regione.

In questo caso, è importante sottolineare che l'evento alluvionale è stato favorito da due fattori pre-evento:

- I suoli erano molto vicini alla condizione di saturazione, in quanto era passato solo un mese dall'evento alluvionale precedente, nel mese di ottobre, del quale si è parlato nel precedente capitolo. Questa condizione è presente soprattutto nella zona di alessandria, più duramente colpita dall'evento di ottobre.
- Il secondo fattore è sempre legato alla vicinanza temporale con il precedente evento. Nel mese di ottobre, infatti, si erano innescati dei fenomeni di frane profonde, situazione che ha fatto sì che nell'evento successivo fossero esposti alle piogge strati di terreno che normalmente sono coperti, o comunque non esposti direttamente alle precipitazioni.

Nel nord e nel sud della regione la giornata che ha registrato i dati cumulati di pioggia maggiori è stata quella del 23 novembre, mentre per quanto riguarda i bacini occidentali l'evento è risultato più gravoso nella sua seconda metà, in particolare nella giornata del 25.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Un ulteriore elemento caratteristico di questo evento è stato quello legato alle nevicate. Queste ultime, infatti, sono state copiose a partire dal primo giorno, con valori che mediamente si attestano sui 100-130 centimetri a 2000 metri di altezza. Lungo la durata dell'evento, la quota delle nevicate si è alzata, facendo sì che il manto nevoso diventasse più umido e bagnato, e favorendo fenomeni valanghivi con caratteristiche sia di fondo sia più superficiali.

Analisi Meteorologica

L'evento si è innescato a seguito della formazione di una grande struttura a bassa pressione formatasi nella zona atlantica (Figura 4) che, spostandosi verso sud, ha iniziato a convogliare masse d'aria calda e umida nella zona nordoccidentale dell'Italia.

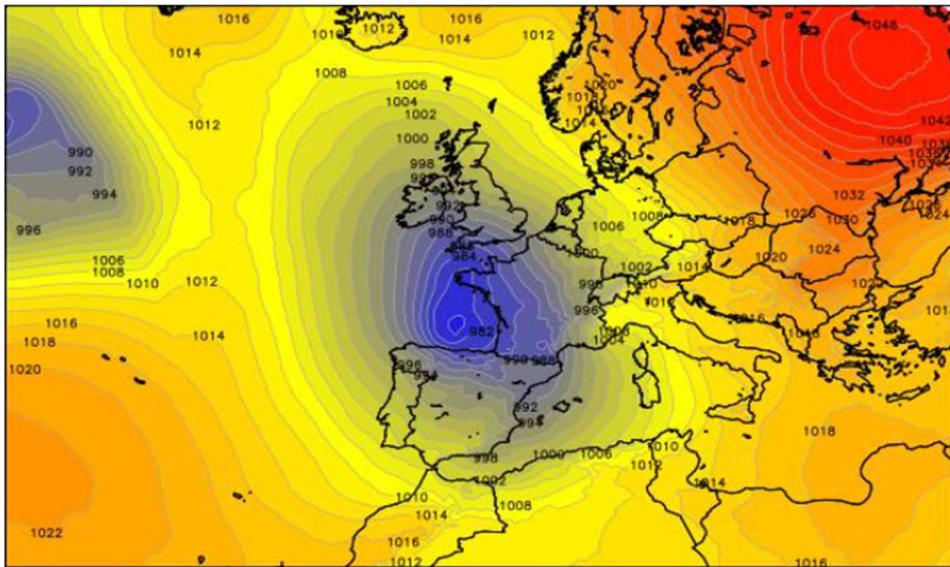


Figura 4: Situazione della pressione al suolo del 23/11/19 alle 00.00

La condizione di maltempo è perdurata sul territorio a causa della presenza della zona contrapposta a quella di bassa pressione che ha reso più lento lo spostamento della sacca depressionaria verso est.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Le prime piogge si presentano nella serata del 22 novembre, quando la bassa pressione convoglia venti di scirocco verso la Liguria, tradizionalmente caldi, che contrastano con le masse di aria fredda presenti nell'area. Nella giornata successiva questa situazione perdura, aggravata dalla formazione di un minimo di pressione secondario, formatosi nel sud della Francia a causa dell'interazione tra la zona depressiva e la catena montuosa dei Pirenei. Il risultato è un incremento dei venti e un maggiore contrasto tra correnti fredde e calde umide di scirocco provenienti dal mare.

Caratteristica peculiare di questo evento è infatti l'elevato valore di umidità presente nel nordovest italiano.

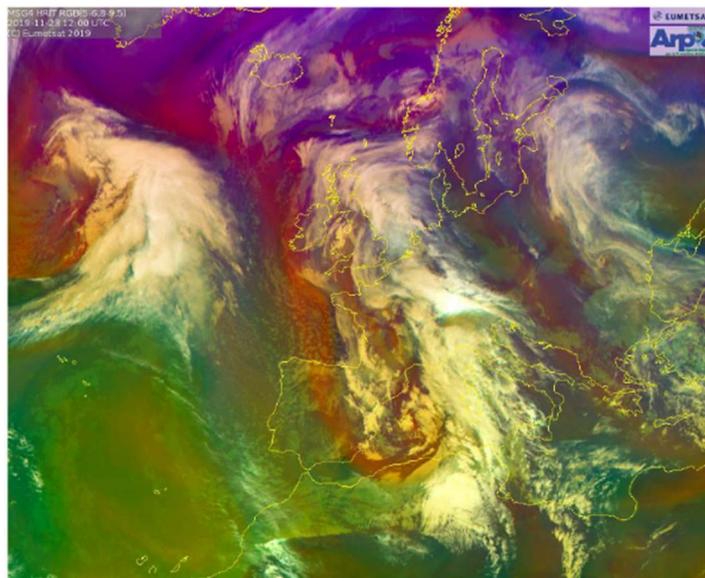


Figura 5: Immagine satellitare del 23/11/19 alle 12.00

La stazione di radiosondaggio di Cuneo ha infatti evidenziato una saturazione di umidità nell'aria superiore al 75%, proprio il 23 novembre alle 12.00.

Questa condizione, unita alle caratteristiche orografiche del territorio (Alpi Liguri), danno vita a precipitazioni avvelte molto forti nel Savonese,

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Genovese e Alessandrino. In questa fase il nordovest italiano è interessato dal fronte di masse di aria calda contrapposta al vortice depressivo che si trova sulla Francia. Questo spiega sia la presenza di aria calda subtropicale nella zona, sia l'innalzamento della quota neve che è risultato caratteristico di questo evento, che nella giornata del 23 novembre, infatti, si alza dai 1000 metri precedenti ai 1200-1300 metri.

Nella giornata del 24 novembre avviene una progressiva roto-traslazione della perturbazione verso sudest, spostando il minimo al suolo verso la Sardegna. Questo ha fatto sì che le precipitazioni su tutto il Piemonte fossero intense lungo l'arco della mattina, ma che ci fosse una forte attenuazione invece nel proseguo della giornata. Anche in questa giornata i valori di umidità nell'aria risultano molto elevati (di nuovo superiore al 75% a circa 7 km di altitudine) e la temperatura rimane elevata per le medie del periodo, innalzando lo zero termico mediamente di circa 200-300 metri su tutto l'arco alpino. Le precipitazioni continuano a presentare carattere avvevivo con valori più accentuati nei punti in cui l'orografia oppone delle barriere naturali.

Il 25 novembre il minimo al suolo trasla ulteriormente verso est, uscendo dal territorio nazionale, e ponendo fine ai fenomeni innescati nei giorni precedenti. Anche il tasso di umidità cala e le precipitazioni si esauriscono nelle ore centrali della giornata. Lo zero termico però continua a salire fino ai 2500 metri circa.

Analisi pluviometrica

Il 23 novembre è stata la giornata più gravosa per quanto riguarda i valori cumulati di pioggia nei bacini settentrionali e meridionali della regione, mentre il giorno successivo ha registrato picchi maggiori nei bacini occidentali. Le precipitazioni non si sono mai interrotte dalla mattina del 22 novembre fino

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

alla prima metà del 24: nel bacino del Po le piogge si sono prolungate anche fino alle prime ore del 25 novembre.

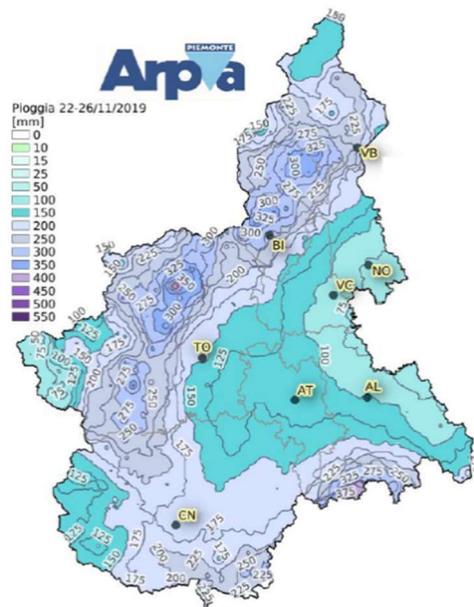


Figura 6: Pioggia cumulata evento 22-26/11/19

Il valore medio della pioggia cumulata risulta essere di 150 mm sulla totalità del territorio regionale. Si segnalano le stazioni del bacino del Tanaro per un tempo di ritorno superiore ai 50 anni per le durate maggiori.

Analisi idrometrica

Come è stato scritto in precedenza, il momento più gravoso è stato a cavallo tra il 23 e il 24 novembre. Proprio in corrispondenza di questa data numerosi fiumi si sono avvicinati o hanno superato i livelli di guardia: i torrenti Chisola e Malone rispettivamente agli idrometri di Vinovo (TO) e Brandizzo (TO), la Stura di Lanzo a Torino, il torrente Varaita nel cuneese nella sezione di Rossana (CN) e Polonghera (CN). La Bormida è stata interessata da un'importante piena lungo tutta la sua asta fluviale: sono stati superati anche i livelli di pericolo a

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

valle della stazione di Cassine (AL) per più di 24 ore, fino alla mattina del 25 novembre. Il colmo, passando per la sezione di Alessandria con un livello di 9.39 metri, ha raggiunto una portata di circa 3100 m³/s, valore associabile ad un Tempo di ritorno superiore ai 50 anni.

La piena della Bormida è stata la causa del superamento della soglia di pericolo per quanto riguarda il fiume Tanaro, in corrispondenza della sezione di Montecastello (AL).

Evento del 2-3 ottobre 2020

L'evento ha inizio con la creazione di un minimo barico nato sulla Gran Bretagna che rapidamente, nella giornata di venerdì 2 ottobre, si sposta verso il nord della Francia. Questa formazione depressiva convoglia masse di aria calda e umida sulle coste a sud della Francia, su Liguria e sul Piemonte, anche con innalzamento dei venti. Questa caratteristica come vedremo sarà peculiare dell'evento, tanto da farlo classificare come tempesta pseudo tropicale, in quanto presenta una singolarità meteorologica nell'area mediterranea.

L'aria calda richiamata verso il Piemonte dalla zona depressiva si sposta verso le Alpi e, a causa anche della risalita orografica che inevitabilmente occorre, inizia ad innescare delle precipitazioni che da subito presentano intensità molto elevate, già dal pomeriggio stesso del 2 ottobre. La prima zona fortemente colpita è il Cuneese, in particolare l'alto Tanaro. Durante il giorno successivo il fenomeno inizia ad interessare anche il Piemonte settentrionale. Una caratteristica da sottolineare è la straordinaria quota raggiunta dallo zero termico durante questo evento: infatti, a causa delle correnti calde ed umide convogliate nella zona, quest'ultimo raggiunge il valore di 3300-3500 metri.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Questo valore così anomalo ha ovviamente fatto sì che prevalesse la componente liquida delle precipitazioni, piuttosto che la neve.

I valori delle piogge risultano molto elevati in più zone, tra cui i bacini del Sesia, Cervo e Toce. L'area del Tanaro presenta, rispetto a questo evento, una caratteristica significativa, in quanto le piogge si sono sviluppate per lo più nella fascia alta del bacino. Questa caratteristica ha fatto sì che si innescasse una marcata attività torrentizia, con la conseguenza che la frazione di trasporto solido negli alvei fosse molto presente (Figura 7).



Figura 7: Immagine da satellite in cui si può notare il forte apporto di trasporto solido finito nelle acque Liguri e Francesi

Altra caratteristica peculiare dell'evento è stata una generalizzata risposta rapida dei reticoli idrografici.

In 24 ore è piovuta il 15% della pioggia che mediamente si registra in un arco temporale annuale, e il 2 ottobre 2020 è risultato il giorno mediamente più piovoso degli ultimi 60 anni in territorio piemontese.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Anche quest'aspetto è stato particolarmente marcato nel bacino del Tanaro: i valori di riferimento del 2016 sono stati superati a Ponte di Nava (CN) e Garessio (CN), ad Alba (CN) è stato superato il livello di pericolo.

Analisi meteorologica

L'evento è legato alla tempesta atlantica denominata "Alex", che già tra l'1 e il 2 ottobre aveva interessato la parte occidentale della Francia (Figura 8). La perturbazione presenta una zona depressionaria del tutto singolare rispetto al periodo dell'anno in cui si è verificata, a cui si sono affiancati venti forti al suolo.

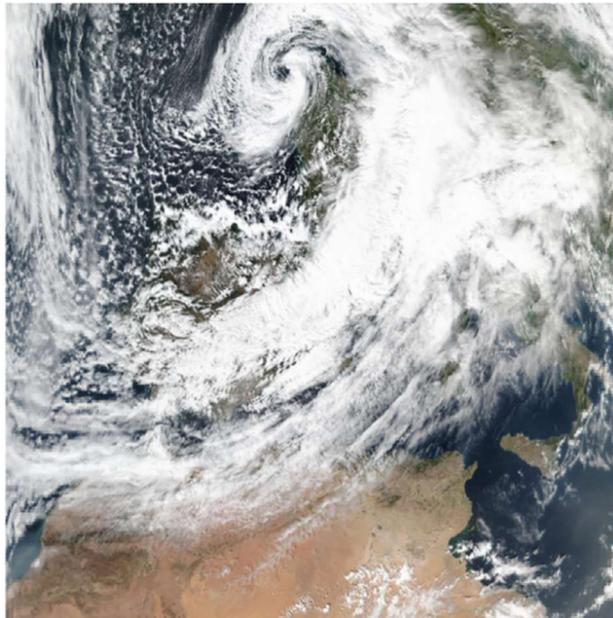


Figura 8: Vista da satellite della tempesta alle 13.00 del 2/10/20

Come visto nei precedenti paragrafi, il vortice creato dal minimo di pressione fa sì che masse di aria calda e umida presenti nell'area mediterranea vengano richiamate verso nord. Per questo motivo, per tutta la durata dell'evento, il territorio italiano interessato permarrà in una condizione di temperature elevate rispetto al periodo e di umidità significativa. Questa condizione di

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

temperature più alte rispetto alla media del periodo si può riscontrare anche nell'eccezione termica positiva registrata superficialmente nel Mar Mediterraneo: quest'ultimo, infatti, si trovava a fine settembre al di sopra della media di 2-3° C (Figura 9). Lo stesso discorso può essere fatto per quanto riguarda l'innalzamento dello zero termico: l'apporto importante di aria calda ha fatto sì che tra giovedì 1 e venerdì 2 ottobre si passasse da 2800 metri circa ai 3300 nei settori delle Alpi settentrionali, e dai 3200 metri ai 3600 circa in quelli meridionali.

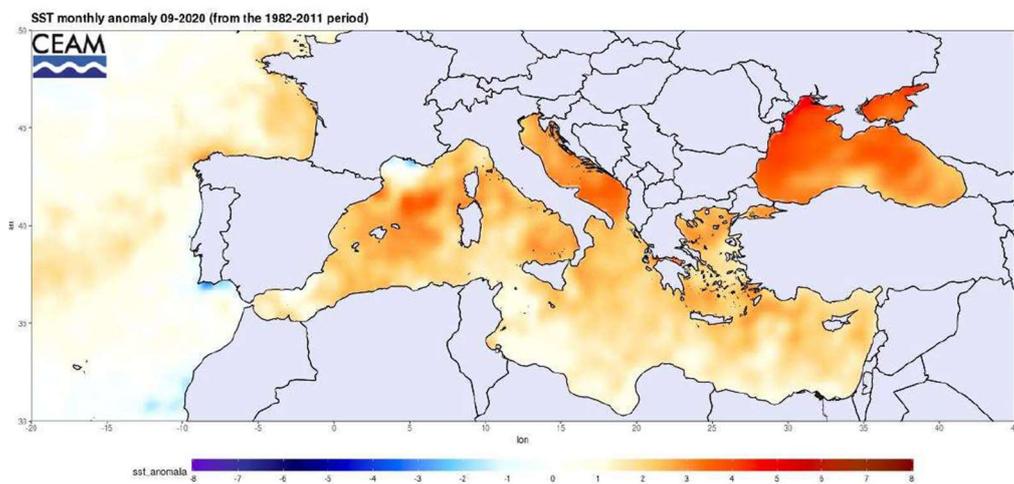


Figura 9: Anomalia della temperatura superficiale del Mediterraneo durante il mese di settembre 2020

Le masse di aria fredda da nord e calda umida da sud entrano in contatto, dando vita ai primi rovesci molto intensi, favoriti anche dalla barriera orografica naturale rappresentata dalle Alpi. Questa condizione caratterizza tutta la giornata di venerdì 2 ottobre, registrando valori record in molti pluviometri nelle piogge cumulate su 12 e 24 ore.

Nella notte tra il 2 e il 3 ottobre il minimo di pressione si sposta verso est, interessando maggiormente il territorio piemontese, portando ad una intensificazione delle precipitazioni proprio durante le ore notturne,

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

soprattutto nel cuneese e nell'astigiano. Nella giornata del 3 ottobre avviene un rapido miglioramento diffuso, favorito dal risucchio del minimo barico che si era spostato sul nordovest italiano verso la zona di depressione originale.

Analisi pluviometrica

Il 2 ottobre è la giornata che vede le piogge più intense, maggiormente nel Verbano, nel Biellese e nella parte alta della Val Tanaro (Figura 10). Le stazioni che hanno riportato i valori più estremi sono quelle del comune di Valstrona (VB), con oltre 650 mm, di Mergozzo (VB) e Limone Piemonte (CN) con circa 600 mm, e Garessio (CN) con oltre 400 mm. In generale le piogge cumulate per durate di 24 ore presentano intensità molto alte su tutto il territorio, con tempi di ritorno stimati per durate di 12 e 24 ore che in alcuni casi superano i 200 anni (Limone Piemonte (CN), Sambughetto (VB), Arpa Piemonte).

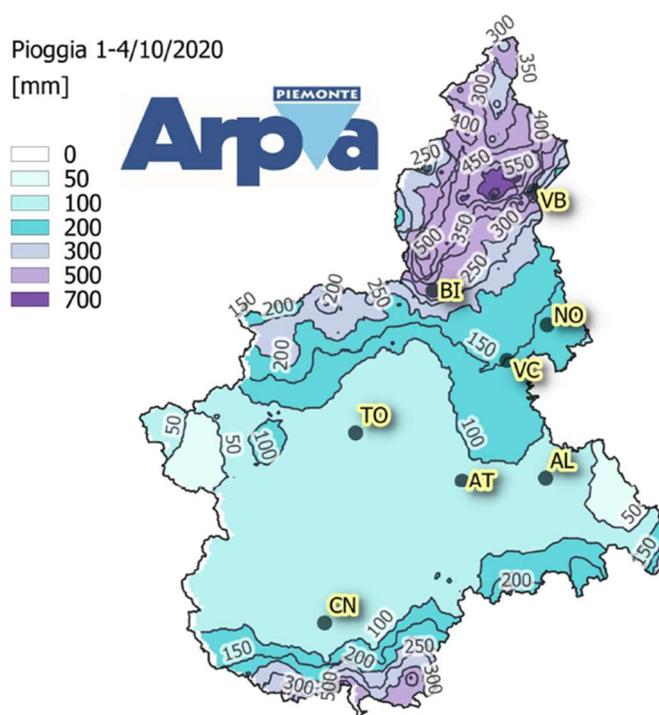


Figura 10: Piogge cumulate durante l'evento

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Analisi idrometrica

Anche per quanto riguarda i deflussi originati dalle precipitazioni, i valori registrati sono risultati eccezionali. Su tutto il territorio le variazioni di livelli e portate sono state molto rapide, a confermare il carattere impulsivo dell'evento. A Candoglia (VB) è stato superato il livello record registrato nel 2000, arrivano fino a 9.34 metri. Il fiume Sesia ha fatto registrare livelli mai raggiunti da quando sono attive le stazioni di misura, in particolare a Borgosesia (VC), arrivando ad una portata al colmo stimata di circa 5000 m³/s.

Il Tanaro ha registrato incrementi molto veloci sia lungo l'alveo principale sia su aste secondarie: a Garessio (CN) e Ponte di Nava (CN) sono stati superati i livelli della piena eccezionale del 2016, da Farigliano (CN) ad Alba (CN) è stato raggiunto e superato il livello di pericolo, con una portata al colmo di circa 2700 m³/s. All'interno del bacino del Tanaro il tempo di ritorno associabile è superiore ai 200 anni.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Caratterizzazione rispetto a dati storici

Una volta inquadrati e descritti gli eventi a livello qualitativo, in questo studio si è deciso di caratterizzarli anche rispetto alla serie di dati storici disponibili. Ottenere un andamento storico dei dati è utile per poter inquadrare l'entità dei valori raccolti per un singolo evento. I dati raccolti sono stati dati pluviometrici.

I dati ottenuti sono rispettivi a sei pluviometri dislocati all'interno del bacino idrografico del Tanaro, e riportano i massimi annuali di pioggia in intervalli temporali al di sotto del giorno. Le serie di dati hanno lunghezza variabile, a seconda della disponibilità della stazione stessa. Tipicamente i dati vengono raccolti rispetto a valori di 1, 3, 6, 12 e 24 ore. I pluviometri considerati sono i seguenti, con le coordinate x e y che, rispettivamente, rappresentano longitudine e latitudine espresse nel sistema di riferimento WGS84 UTM 32N (EPSG 32632):

Nome stazione	Longitudine	Latitudine
Ormea Centrale	415154	4889920
Colle San Bernardo	423980	4892286
Ceva Centrale Mazzarelli	423147	4914990
Pamparato	412659	4904107
Perlo	427006	4909165
Monte Berlino	414855	4895385

Tabella 2: Nomi e coordinate delle stazioni pluviometriche considerate

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

L'obiettivo è riportare con la maggiore precisione possibile le caratteristiche della popolazione di un dato, ovvero l'insieme dei valori che la variabile può assumere. Di seguito vengono riportati alcuni cenni di statistica utili per il proseguo dello studio.

Cenni di statistica

Si definisce probabilità di un evento la relazione che intercorre tra il numero di casi m in cui l'evento si verifica e il totale n dei casi possibili. In particolare:

$$p = \frac{m}{n} \quad [2]$$

Il calcolo e l'analisi di questa grandezza si basa su alcuni concetti:

- La probabilità di un evento è sempre compresa tra 0 e 1;
- Un evento certo ha probabilità pari ad 1;
- Un evento impossibile ha probabilità pari a 0.

Il valore di una variabile, discreta o continua, si può associare alla sua probabilità tramite la funzione di probabilità $p(x)$. In idrologia, e in generale quando si ha a che fare con variabili continue, è più corretto parlare di probabilità che il valore assunto dalla variabile ricada in un certo intervallo. È questo il caso della funzione di probabilità di non superamento $P(x)$, che associa, per ogni x , la probabilità che la variabile assuma un valore inferiore a x .

È possibile ragionare anche all'inverso, introducendo cioè la probabilità di superamento che non è altro che la grandezza complementare rispetto alla $P(x)$.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Se la variabile è continua, può essere utile ragionare in intervalli infinitesimi, e quindi passare ai differenziali. In questo caso si introduce il concetto di densità di probabilità che è definita da:

$$dP(x) = p(x)dx \quad [3]$$

Questa grandezza definisce la probabilità che la variabile x assuma un valore interno all'intervallo $(x, x + dx)$. Ricordandoci che un evento certo ha probabilità 1, deve valere:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} p(x)dx = 1 \quad [4]$$

Per questo, l'area sottesa alla funzione densità di probabilità deve essere sempre uguale ad 1, anche se può assumere diverse forme. Proprio per questo, esistono delle grandezze che descrivono le funzioni di distribuzione di probabilità. Queste grandezze sono chiamate momenti, e possono avere diversi ordini. In generale, il momento di ordine r -esimo:

$$\mu_r(x) = \sum_{i=1}^N (x_i - x_0)^r p(x_i) \quad [5]$$

Se si esprime il momento di ordine 1, calcolato rispetto all'origine, si ottiene la media aritmetica:

$$\mu(x) = \sum_{i=1}^N x_i p(x_i) \quad [6]$$

Per quanto riguarda i momenti di ordine superiore al primo, il valore di x_0 si fa coincidere con la media. Si ricava così il momento di secondo ordine, chiamato varianza:

$$\sigma^2(x) = \sum_{i=1}^N [x_i - \mu(x)]^2 p(x_i) \quad [7]$$

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Si definisce scarto quadratico medio la radice quadrata della varianza:

$$s = \sqrt{\sigma^2(x)} \quad [8]$$

Quest'ultima grandezza è molto utilizzata, in quanto definisce quanto la popolazione si disperda attorno al valore medio.

Inoltre, la varianza e lo scarto quadratico medio vanno a definire un ulteriore parametro che indica il grado di dispersione della popolazione, il coefficiente di variazione:

$$CV(x) = \frac{s}{\mu_x} \quad [9]$$

Il coefficiente di variazione può essere molto utile perché, essendo adimensionale, può fornire informazioni rispetto a variabili casuali diverse.

Un parametro fondamentale è il tempo di ritorno, T , definito come l'intervallo di tempo medio che deve passare perché si verifichi nuovamente un evento di una determinata entità. Il tempo di ritorno, dunque, è una misura della rarità dell'evento che si sta considerando, in particolare, più l'evento è raro ed eccezionale, maggiore sarà il valore di T . Questa grandezza, che si misura solitamente in anni, può essere calcolata rispetto alle grandezze scritte in precedenza attraverso la seguente espressione:

$$T(x) = \frac{1}{(1 - P(x))} \quad [10]$$

Nel caso di questo studio è particolarmente importante conoscere la legge di probabilità con cui sono distribuiti i massimi di una popolazione di grandezza N . Infatti, i dati a nostra disposizione in questo caso sono i valori massimi annuali di pioggia. Essendo $P_N(x)$ la distribuzione di probabilità dei massimi della popolazione di grandezza N , vale la seguente relazione:

$$P_N(x) = P(x)^N \quad [11]$$

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Seguendo la [11], risulta semplice ricavare la distribuzione dei massimi ogni volta che si conosce N. Per esempio, nel caso di un valore di massima precipitazione in un anno lungo un periodo temporale di venti anni: la probabilità di non superamento del valore in 20 anni risulterà uguale alla probabilità di non superamento della distribuzione del totale annuo elevato alla ventesima potenza.

Questo concetto porta alla volontà di cercare un comportamento verso il quale le distribuzioni di probabilità dei massimi valori tendano, ovvero al crescere del parametro N. A questo fine, si distinguono tre famiglie di distribuzioni:

- Distribuzioni asintotiche del I tipo: la funzione di probabilità è illimitata superiormente e tende a 1 con una legge esponenziale;
- Distribuzioni asintotiche del II tipo: la funzione di probabilità è sempre illimitata superiormente, ma tende ad 1 molto più lentamente rispetto ad un esponenziale;
- Distribuzioni asintotiche del III tipo: in questo caso la funzione di probabilità è limitata. Questa famiglia è la meno utilizzata nelle applicazioni idrologiche.

Con i dati pluviometrici usati in questo studio, cioè i massimi annui, è stata scelta una distribuzione del I tipo, ovvero la distribuzione di Gumbel. La caratteristica di quest'ultima è che la $P(x)$ si può approssimare, per valori elevati di x , con una funzione che tende ad 1 con legge esponenziale. Infatti, vale:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} P_N(x) = e^{-e^{-\alpha(x-u)}} \quad [12]$$

Dove α e u sono due parametri della distribuzione che verranno definiti più avanti.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Questo fa sì che, se la $P(x)$ ha carattere esponenziale, la distribuzione dei massimi valori può essere espressa indipendentemente dalla funzione di probabilità stessa, con un'approssimazione tanto migliore quanto elevata la numerosità del campione N . Quindi:

$$P(x) = e^{-e^{-\frac{(x-u)}{\alpha}}} \quad [13]$$

È possibile introdurre una variabile ridotta:

$$y = \frac{(x-u)}{\alpha} \quad [14]$$

Sostituendo la [14] nella [13] si ottiene:

$$P(y) = e^{-e^{-y}} \quad [15]$$

I momenti della distribuzione dei massimi valori di Gumbel sono i seguenti:

$$\mu(x) = \frac{0.5772}{\alpha} + u \quad [16]$$

$$s(x) = \frac{\pi\alpha}{\sqrt{6}} \quad [17]$$

Esplicitando i parametri della distribuzione si ottiene:

$$u = \mu(x) - 0.5772\alpha \quad [18]$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}s}{\pi} \quad [19]$$

Il metodo dei quantili regolarizzati

Utilizzando questi concetti teorici e queste formule, è stato possibile ottenere le curve di possibilità pluviometrica per i sei pluviometri presi in

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

considerazione. Il metodo utilizzato è quello dei quantili regolarizzati, che si basa sulla previsione dei quantili, ovvero di quei valori che se ordinati opportunamente dividono la distribuzione in intervalli ad ugual probabilità, fissando un certo tempo di ritorno T .

Fissati i tempi di ritorno T , è possibile calcolare il quantile $y(T)$ esplicitandolo dalla [15] e sostituendo la [10]:

$$y(T) = -\ln\left(\ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right) \quad [20]$$

A questo punto è stato possibile calcolare $x(T)$ invertendo la [13]:

$$x(T) = u + \alpha\left(-\ln\left(\ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right)\right) \quad [21]$$

Ottenendo i valori per le diverse durate di 1, 3, 6, 12 e 24 ore è stato possibile tracciare le curve di possibilità pluviometrica.

I valori e i grafici ad essi associati sono riportati negli Allegati 1 e 2 rispettivamente.

Sovrapposizione con dati radar

Una volta ottenute le curve di possibilità pluviometrica per le stazioni dell'area in esame, è stato possibile sovrapporle ai dati di pioggia ottenuti da dati radar, al fine di caratterizzare i tre eventi in esame.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

I dati a disposizione sono stati ordinati in griglie regolari di lato pari ad 1 chilometro, tramite il software RStudio. Così è stato possibile avere una griglia di pixel che riportasse punto per punto il dato di precipitazione. Per un corretto confronto rispetto alle stazioni considerate, è stato necessario risalire ai pixel corrispondenti, tramite confronto di coordinate. Una volta individuati i pixel, con il dato di pioggia associato, è stato possibile ricostruire le serie temporali per ogni singolo evento, e sono stati estratti i massimi orari per ogni stazione e per ogni evento considerato. Per questo ultimo passaggio è stata creata una finestra mobile che scorresse lungo la serie temporale di dati ed estraesse il valore massimo, variando di volta in volta la larghezza della finestra, da 1 ora fino a 24 ore.

I risultati della sovrapposizione sono riportati in Allegato 3.

Risultati e commenti

Il confronto tra i dati radar e le curve di possibilità pluviometrica ha confermato l'eccezionalità dell'evento del 2 e 3 ottobre 2020. In tutte le stazioni prese in considerazione, infatti, quest'ultimo è risultato il più gravoso, in alcuni casi anche con grandi differenze. I due eventi del 2019 si attestano invece sempre nella parte bassa del grafico: l'evento di novembre 2019 risulta praticamente sempre più gravoso di quello del mese precedente, ma comunque non vengono in nessun caso superati tempi di ritorno di 5 anni.

Analizzando i dati dell'evento dell'ottobre 2020 si può notare il suo carattere impulsivo e rapido: i tempi di ritorno associati a brevi durate risultano subito elevati per poi crescere meno velocemente. Due esempi sono il pluviografo di Colle San Bernardo e soprattutto Perlo, che per una durata di 3 ore presentano

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

rispettivamente un tempo di ritorno di circa 50 e 200 anni. Nel caso di Pamparato la rapida risalita della curva dura fino ad una durata di 12 ore, raggiungendo un tempo di ritorno di 500 anni, per poi attestarsi poco sotto a 50 anni per la durata di 24 ore. Nella stazione di Ceva il comportamento della curva risulta analogo, ma ancora più accentuato. Infatti, il tempo di ritorno associato alle 12 ore risulta maggiore a 500 anni, mentre quello relativo a 24 ore si attesta attorno ai 200 anni.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Il bacino del Tanaro

Caratteristiche generali

Il Tanaro rappresenta uno dei principali affluenti del Po, nasce dal Monte Marguareis a circa 2600 m. s. l. m. Il suo bacino supera di poco gli 8000 km², di cui più dell'80% ha caratteristiche montane e può essere diviso in tre tratti, Alto, Medio e Basso Tanaro. Quest'ultimo presenta le peculiarità di un alveo di pianura, cioè con piccola pendenza ed elevata presenza di meandri, e si sviluppa principalmente in direzione sud-nordest.

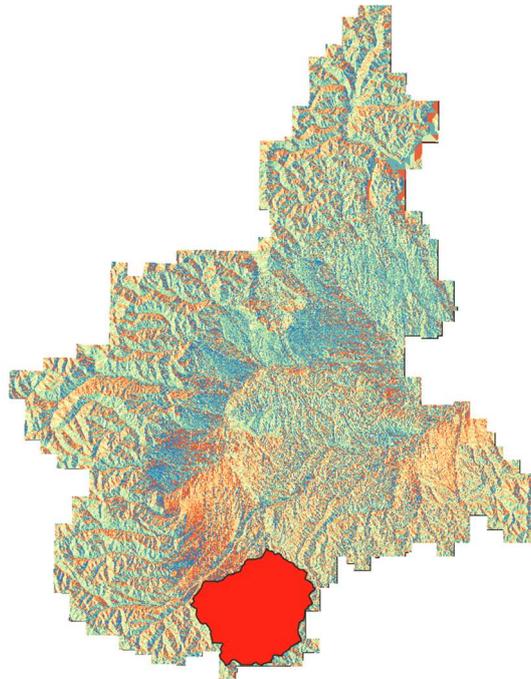


Figura 11: Localizzazione del Bacino del Tanaro chiuso a Farigliano

Le caratteristiche, come detto, sono per lo più montane, con valli molto approfondite e dove l'antropizzazione è presente per lo più a fondo valle, con i massimi centri abitati quali Garessio, Ceva e Farigliano. Più a valle la

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

conformazione del territorio muta, per spostarsi più nelle caratteristiche collinari, con un sottosuolo maggiormente erodibile e con presenza quindi di svariati terrazzamenti. Ancora più a valle il territorio diventa pressoché pianeggiante, con piccole variazioni altimetriche.

Descrittore	Area bacino [km ²]	Quota media [m]	Quota massima [m]	Quota minima [m]	Lungh. Asta principale [km]
Valore	1502	945	2625	237	102.214

Tabella 3: Alcuni descrittori di bacino del bacino del Tanaro a Farigliano

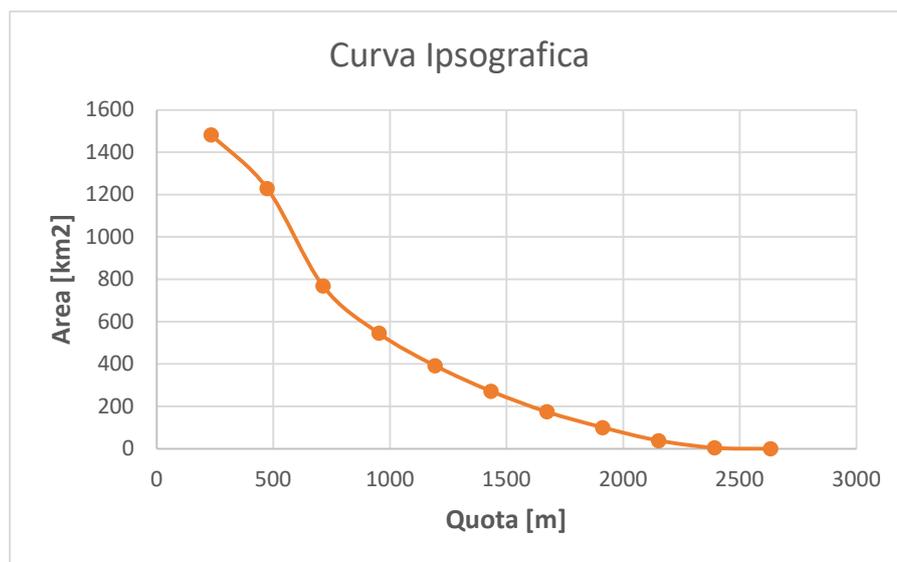


Figura 12: Curva Ipsografica del bacino del Tanaro chiuso a Farigliano

Caratteristiche geologiche e litologiche

La causa principale di dissesti all'interno dell'area è strettamente conseguenza dei litostrati superficiali. In particolare, i movimenti franosi avvengono con maggiore frequenza in corrispondenza di rocce tenere e di alternanze tra strati con differente comportamento meccanico. Le prime sono maggiormente

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

presenti nella porzione nord-occidentale del bacino, mentre le seconde si trovano principalmente nella porzione centro-meridionale.

Caratteristiche idrologiche

L'elevata quota media del bacino fa sì che una grossa porzione delle precipitazioni si presentino sotto forma di neve, non andando così direttamente a portare alcun apporto al deflusso. I massimi di piena sono, così come è caratteristico della zona alpina, generalmente concentrati nel periodo primaverile ed autunnale. L'importante presenza di neve fa sì che, proprio in primavera, il suo scioglimento contribuisca alle piene registrate nell'area, le quali spesso non coincidono temporalmente con forti precipitazioni. La posizione geografica del bacino è di per sé un elemento che espone l'area ad eventi meteorologici frequenti. L'area, infatti, si trova a ridosso delle Alpi Liguri e questo fa sì che entrino in gioco due elementi: l'orografia naturale dell'area, che fa sì che le masse d'aria risalendo si raffreddino e stazionino per più tempo nello stesso luogo, e l'apporto frequente di correnti calde e cariche di umidità provenienti dalla vicina area Mediterranea.

L'andamento della piena del Tanaro è fortemente condizionato dal comportamento dei suoi affluenti. In particolare, si segnala la confluenza tra Tanaro e Bormida subito a valle di Alessandria, nel Basso Tanaro. In questo caso le situazioni più critiche si hanno quando i picchi delle onde di piena dei due alvei raggiungono la confluenza in fase.

Eventi alluvionali principali

- Settembre 1948: Numerosi movimenti franosi e allagamento di Alba ed Asti dovuti ad una serie di eventi vicini tra loro tra il 3 e il 14 del mese. Resa inutilizzabile la ferrovia tra Alba ed Alessandria. Il Belbo raggiunge a Bergamasco $568 \text{ m}^3/\text{s}$;

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

- Novembre 1951: Viene colpito maggiormente l'Alto Tanaro e il sottobacino del Belbo, che ha il più alto numero di popolazione alluvionata. Il Tanaro esonda ad Alba, e raggiunge a Montecastello una portata di 3170 m³/s;
- Giugno 1957: Raggiunta la massima piena della Stura di Demonte, che a Gaiola raggiunge i 440 m³/s. La piana di Vinadio viene quasi completamente allagata;
- Novembre 1968: Esondano il Belbo in più punti dell'asta fluviale e la Bormida in minor parte. Diffusi fenomeni franosi nel sottobacino della Bormida. Il Belbo raggiunge a Canelli una portata di 300 m³/s;
- Novembre 1994: Evento più grave della storia del bacino. Vengono coinvolti maggiormente il Tanaro, il Belbo e la Bormida. Il primo raggiunge massimi lungo tutta l'asta fluviale, le aree inondate sono numerose e risulta chiaro che le aree golenali e le arginature non sono sufficienti. Il Belbo raggiunge a Castelnuovo circa 1000 m³/s, il Tanaro 4800 m³/s a Montecastello e 3800 m³/s a Farigliano.
- Aprile 2009: Viene registrata un'onda di piena eccezionale lungo il Tanaro che raggiunge un livello di 7.24 m a Montecastello, a cui è associabile una portata di circa 3200 m³/s. Il fiume esonda in più punti arrivando a far evacuare fino a 6000 abitanti.
- Novembre 2016: Copiose precipitazioni colpiscono il territorio a partire dal 20 novembre, fino ad arrivare al 24 novembre, quando il Tanaro raggiunge molto rapidamente livelli di pericolo. Avvengono esondazioni in più punti, in particolare a Ceva, Ponte di Nava e Garessio.

Modello afflussi-deflussi

Caratteristiche generali

Un modello idrologico si pone l'obiettivo di descrivere i complessi processi che sono alla base dell'interazione tra l'acqua, l'atmosfera e il suolo. In particolare, un modello afflussi deflussi cerca di fornire come risultato il deflusso generato ad una sezione di interesse, che generalmente è una sezione di chiusura di un bacino idrografico, a partire dalle precipitazioni (Figura 13).

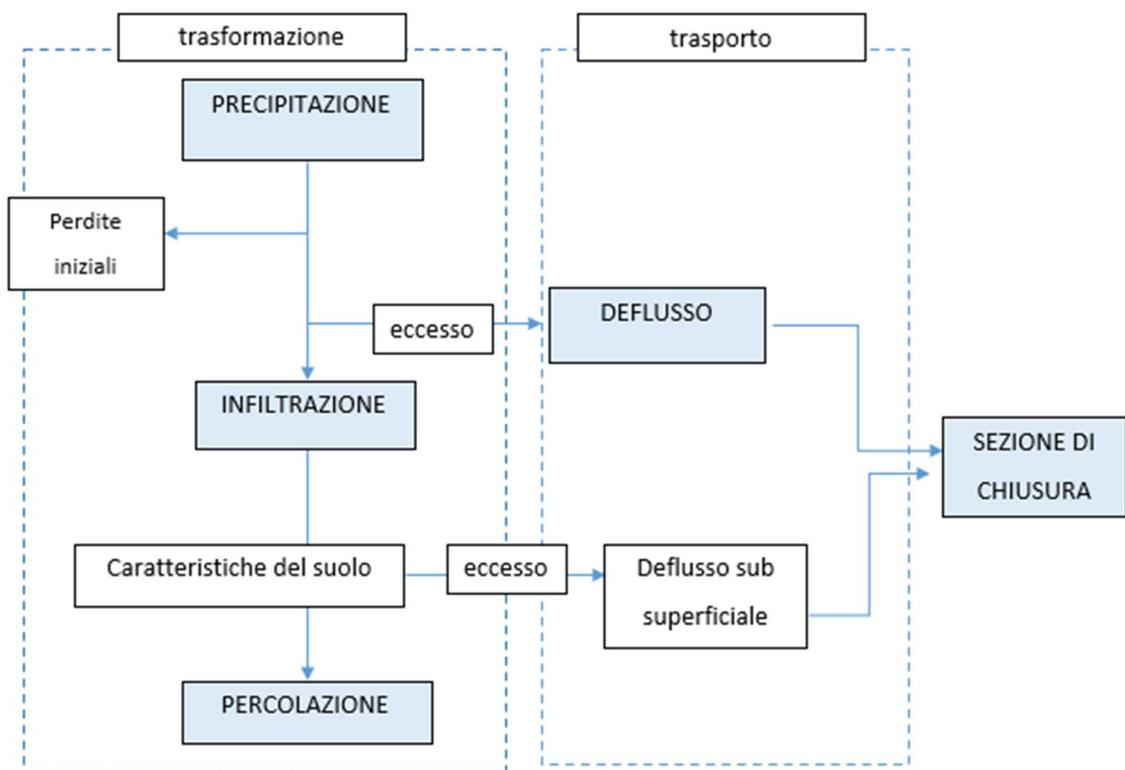


Figura 13: Schema dei diversi apporti ad una sezione di chiusura.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

I principali fattori che quindi entrano in gioco in questo tipo di modelli sono:

- Le PRECIPITAZIONI: avvengono a causa della condensazione di acqua attorno a particelle di aerosol, dovuta al raffreddamento di masse d'aria a causa della loro risalita in atmosfera. Quest'ultima può essere causata da movimenti di aria umida che spostano altre masse d'aria o da riscaldamento dovuto alla vicina superficie terrestre;
- Le PERDITE INIZIALI, I_a , ovvero la quota parte di pioggia che non entra a far parte del processo di deflusso, perché intercettata dalla vegetazione;
- L'EVAPOTRASPIRAZIONE: fenomeno che avviene attraverso i primi strati di terreno e attraverso la vegetazione stessa. È infatti il risultato dell'evaporazione dell'acqua dal suolo e della traspirazione dovuta alle piante;
- L'INFILTRAZIONE, F : flusso di acqua che penetra nel terreno con una certa velocità, o tasso di infiltrazione. I fattori che maggiormente influenzano questo parametro sono le condizioni di drenaggio del terreno, la sua conducibilità idraulica, la pendenza e la compattazione. Inoltre, via via che il terreno tende alla saturazione, il fronte umido si sposta e la capacità di infiltrazione diminuisce;
- La PERCOLAZIONE, R ;
- I flussi generati dalle precipitazioni, i quali si possono distinguere in FLUSSO SUPERFICIALE, FLUSSO SUB-SUPERFICIALE e FLUSSO DI BASE. Il primo, è il flusso che si genera all'interfaccia tra suolo ed atmosfera, dovuto a saturazione dello stesso o alle caratteristiche topografiche del versante. Il secondo avviene in seguito ad una prima infiltrazione, presenta quindi un certo ritardo rispetto al precedente, mentre l'ultimo è il flusso che garantisce i deflussi nei periodi di magra dei fiumi, o comunque nei periodi più secchi dell'anno.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Risulta quindi chiaro che per caratterizzare correttamente un evento e applicare un modello afflussi-deflussi è certamente importante partire dalle precipitazioni, ma concetti come copertura vegetale dell'area e condizioni e caratteristiche del terreno sono fondamentali. Infatti, un'area con maggior densità di vegetazione presenterà maggior capacità evapotraspirante, parallelamente, la maggior presenza di radici favorisce l'infiltrazione nei primi strati di suolo.

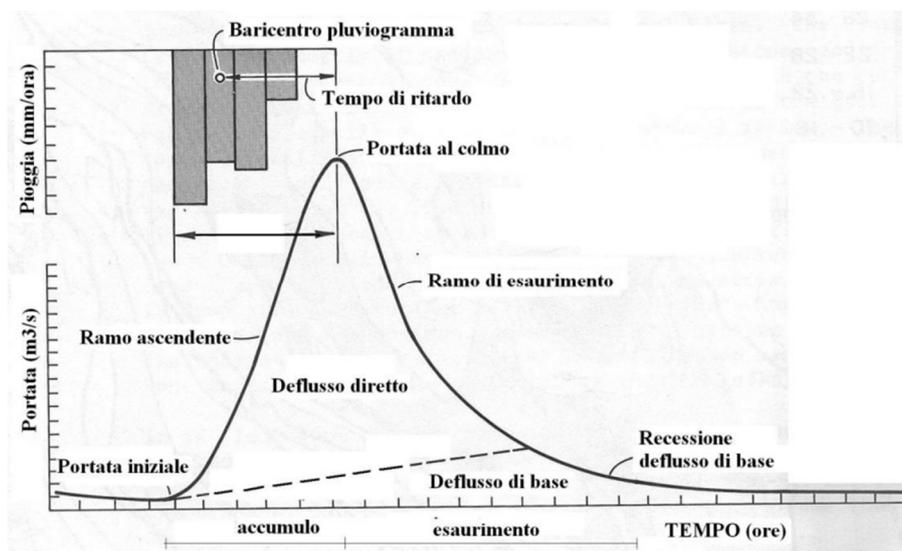


Figura 14: Schematizzazione idrogramma e sovrapposizione con un pluviogramma

In generale quindi vale:

$$P_{netta} = P - I_a - F \quad [22]$$

Un evento di piena si può quindi generare secondo quattro meccanismi, o con una combinazione di questi:

- Afflusso diretto: la precipitazione cade direttamente su una superficie liquida (fiumi o laghi);

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

- Deflusso superficiale: la componente di pioggia P risulta maggiore delle perdite iniziali e quindi avviene la generazione di un flusso superficiale con un ritardo, in genere nell'ordine dell'ora, dovuto ad intercettazioni dell'acqua e suo accumulo;
- Deflusso sub-superficiale: flusso che si genera nei primi strati del suolo, parallelo alla superficie e legato al flusso superficiale. Presenta un ritardo ancora maggiore rispetto al precedente in quanto l'acqua deve attraversare il terreno. Dipende dalle caratteristiche del suolo.
- Deflussi profondi: flusso di base, funzione delle caratteristiche geomorfologiche del bacino idrografico. Ha un ritardo ancora più elevato rispetto ai precedenti apporti, anche dell'ordine di mesi.

In base alle caratteristiche del terreno quindi, uno stesso evento può non generare deflussi uguali. Horton individua quattro tipologie principali di comportamento (Figura 15):

- L'evento non genera picchi nell'idrogramma (A);
- L'evento non genera picchi pur modificando le caratteristiche dell'acquifero: questo comportamento è proprio di bacini molto permeabili, in cui l'afflusso di acqua non viene trattenuto e ha quindi il tempo di alimentare la falda. In questo caso l'idrogramma subirà uno spostamento, ma come detto, senza presentare un picco (B);
- L'evento genera un picco. In questo caso l'area sottesa all'idrogramma risulta proporzionale all'afflusso. Dopo il picco l'idrogramma tende alla forma iniziale. Questo comportamento è tipico dei bacini a media-bassa permeabilità (C);
- L'evento genera un picco nell'idrogramma, il quale non torna più alla forma precedente, presentando quindi un deflusso di base maggiore rispetto al precedente caso (D).

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

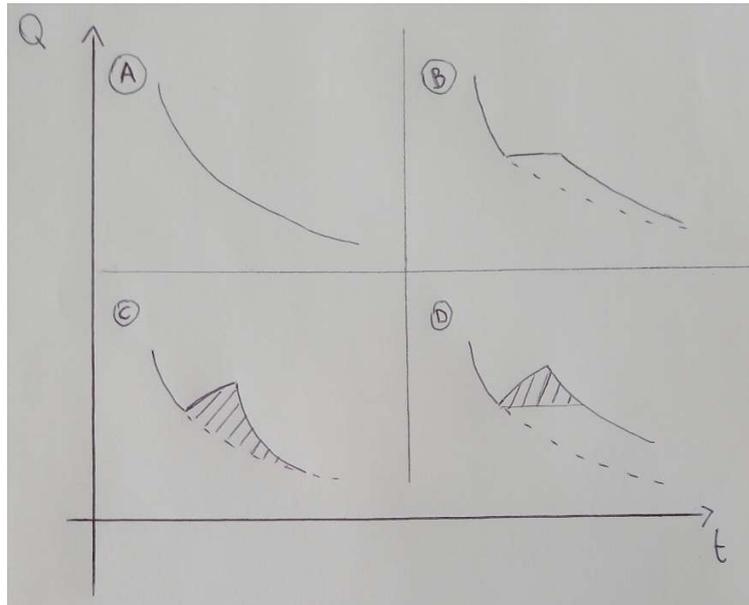


Figura 15: Tipologie di risposta del bacino rispetto alla forma dell'idrogramma

Tipologie di modelli

Un modello può innanzitutto essere di tipo deterministico o probabilistico. Mentre il primo considera valori univoci dei parametri presi in considerazione, il secondo considera i dati in termini di probabilità. Per quanto riguarda invece i processi matematici che stanno alla base dei modelli, si possono distinguere:

- Modelli empirici: non rappresentano i fenomeni fisici. Mettono in relazione dati di input, come per esempio in questo caso degli ietogrammi, e restituiscono dati di output, ad esempio degli idrogrammi;
- Modelli fisicamente basati: in questo caso il fenomeno fisico viene effettivamente descritto tramite formulazioni matematiche senza fare ricorso ad assunzioni o ipotesi semplificative;

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

- Modelli concettuali: descrivono il processo attraverso delle schematizzazioni dei fenomeni, senza la risoluzione delle equazioni fisiche.

I modelli possono distinguersi anche in funzione della caratteristica spaziale delle grandezze considerate. Infatti, possono essere considerati:

- Modelli distribuiti, se considerano l'eterogeneità spaziale delle piogge e del bacino idrografico;
- Modelli globali, se invece il bacino viene caratterizzato nel suo insieme, senza valutare la variabilità spaziale della precipitazione.

Si può individuare un'ultima distinzione in base alla relazione tra input e output del modello, cioè in funzione di come risponde la simulazione stessa rispetto ai dati inseriti. In particolare, si dicono:

- Modelli stazionari, in cui dati di input traslati temporalmente forniscono output congruenti;
- Modelli lineari, in cui è presente una combinazione lineare tra le funzioni in input che rimane la medesima per quelle in uscita. In questo caso è valido il principio di sovrapposizione degli effetti.

Un modello afflussi-deflussi non può essere considerato un modello di singolo processo, in quanto richiede la considerazione di numerose variabili e spesso di variazioni spaziali di grande entità. Anche la scala temporale, nella maggioranza delle applicazioni, risulta più estesa rispetto a quella necessaria per analizzare un singolo evento. Per questi motivi, il modello afflussi-deflussi si dice di tipo integrato.

In ultimo, si distingue tra:

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

- Modelli completi, che comprendono la totalità dei processi idro-morfologici del territorio analizzato, usando una scala temporale estesa;
- Modelli di piena, che si concentrano maggiormente su un breve periodo di tempo, al fine di analizzare un singolo evento. In questo caso non vengono presi in considerazione tutti i fenomeni che non sarebbero importanti per lo studio effettuato, e che invece sarebbe necessario includere se la scala dello studio fosse più estesa.

Metodo del SCS – CN

Il metodo utilizzato in questo studio è quello proposto dal Soil Conservation Service nel 1972, conosciuto con il nome di Curve Number. È un metodo empirico semplificato, di facile applicazione, che presenta, come vedremo, dei vantaggi ma anche delle limitazioni.

Il modello ha come punto di partenza la [22] come equazione di continuità utile al bilancio idrologico. In particolare, definisce:

$$P_{netta} = P - S' \quad [23]$$

In cui:

- P_{netta} è la precipitazione netta cumulata all'istante t ;
- P è la pioggia totale cumulata all'istante t ;
- S' è il volume specifico di acqua complessivamente perduto.

L'assunzione del metodo è che il rapporto tra il volume di acqua perso e quello che il suolo può ritenere come valore massimo, sia uguale al rapporto che intercorre tra la pioggia netta e quella totale. Cioè deve valere:

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

$$\frac{S'}{S} = \frac{P_{netta}}{P} \quad [24]$$

Dove S è il massimo volume d'acqua che il terreno può trattenere, ovvero la capacità di ritenzione in condizioni di saturazione.

Se si pone S' pari ad F , ovvero all'infiltrazione occorsa fino all'istante t per unità di superficie, e si introducono le perdite iniziali I_a da sottrarre alla pioggia P , la [24] può essere espressa come segue:

$$P_{netta} = \frac{(P - I_a)F}{S} \quad [25]$$

Ricavando dalla [22]:

$$F = P - I_a - P_{netta} \quad [26]$$

Sostituendo la [26] nella [25] si arriva ad esprimere la pioggia netta come:

$$P_{netta} = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)} \quad [27]$$

Fino a questo momento il metodo prevede la presenza di tre parametri da stabilire: il Curve Number, o CN, S e I_a . In realtà, il volume d'acqua complessivamente immagazzinabile dal terreno è funzione del CN stesso, come si evince dalla seguente relazione:

$$S = S_0 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad [28]$$

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

S_0 è un coefficiente di scala dipendente dall'unità di misura che si utilizza. Esprimendo tutti i parametri in mm, risulta pari a 254 mm, ovvero 10 pollici. Le perdite iniziali comprendono all'interno del parametro I_a più di un fenomeno, quali ad esempio l'ostruzione all'afflusso al suolo della pioggia dovuta alla vegetazione o la raccolta delle acque in zone depresse o per topografia naturale del terreno. Per questo, il parametro I_a risulta di difficile valutazione, e Soil Conservation Service stesso esprime il suo valore come percentuale di S:

$$I_a = cS \quad [29]$$

Con c che assume valori tra 0.1 e 0.2.

A questo punto l'unico parametro da valutare è il CN ed il metodo risulta quindi monoparametrico. Questo aspetto è sicuramente uno dei vantaggi del modello dell'SCS.

Il CN è un numero adimensionale che assume valori compresi tra 0 e 100, ed è funzione:

- Del grado di umidità del suolo precedente all'evento meteorologico in esame;
- Dell'uso del suolo nell'area analizzata;
- Della litologia del suolo.

L'SCS fornisce una classificazione dei suoli suddividendoli in quattro categorie, così definite:

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

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

Tabella 4: Classificazione dei suoli secondo il SCS.

Per questi gruppi vengono forniti dei valori del CN rispetto ai differenti usi del suolo:

Valori del parametro CN (adimensionale)	← Tipo idrologico Suolo →			
	A	B	C	D
↓ <i>Tipologia di Uso del Territorio</i>				
Coltivazioni, in presenza di pratiche di conservazione del suolo	62	71	78	81
Coltivazioni, in assenza di pratiche di conservazione del suolo	72	81	88	91
Terreno da pascolo: cattive condizioni	68	79	86	89
buone condizioni	39	61	74	80
Boschi, in presenza di copertura rada e senza sottobosco	45	66	77	83
Boschi e foreste, in presenza di copertura fitta e con sottobosco	25	55	70	77
Spazi aperti con manto erboso superiore al 75% dell'area	39	61	74	80
Spazi aperti con manto erboso compreso tra il 50 ed il 75% dell'area	49	69	79	84
Spazi aperti con manto erboso inferiore al 50% dell'area	68	79	86	89
Zone industriali (area impermeabile 72%)	81	88	91	93
Zone commerciali e industriali (area imperm. 85%)	89	92	94	95
Zone residenziali, lotti fino a 500 m ² (area imperm. 65%)	77	85	90	92
Zone residenziali, lotti di 500+1000 m ² (area imperm. 38%)	61	75	83	87
Zone residenziali, lotti di 1000+1500 m ² (area imperm. 30%)	57	72	81	86
Zone residenziali, lotti di 1500+2000 m ² (area imperm. 25%)	54	70	80	85
Zone residenziali, lotti di 2000+5000 m ² (area imperm. 20%)	51	68	79	84
Zone residenziali, lotti di 5000+10000 m ² (area imperm. 12%)	46	65	77	82
Parcheggi, tetti, autostrade,	98	98	98	98
Strade pavimentate o asfaltate, dotate di drenaggio	98	98	98	98
Strade con letto in ghiaia	76	85	89	91
Strade battute in terra	72	82	87	89

Tabella 5: Valori del CN in funzione dell'uso del suolo.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Il CN è inversamente proporzionale alla permeabilità del suolo. In particolare, se CN è pari a 0, significa che la superficie analizzata è completamente permeabile. Al contrario, per CN uguale a 100, il flusso superficiale risulta coincidente con la pioggia totale. In questo caso, cioè, risulta nullo il contributo dell'infiltrazione. Questo è il caso di superfici totalmente impermeabili. Queste valutazioni sono racchiuse nel grafico in Figura 16.

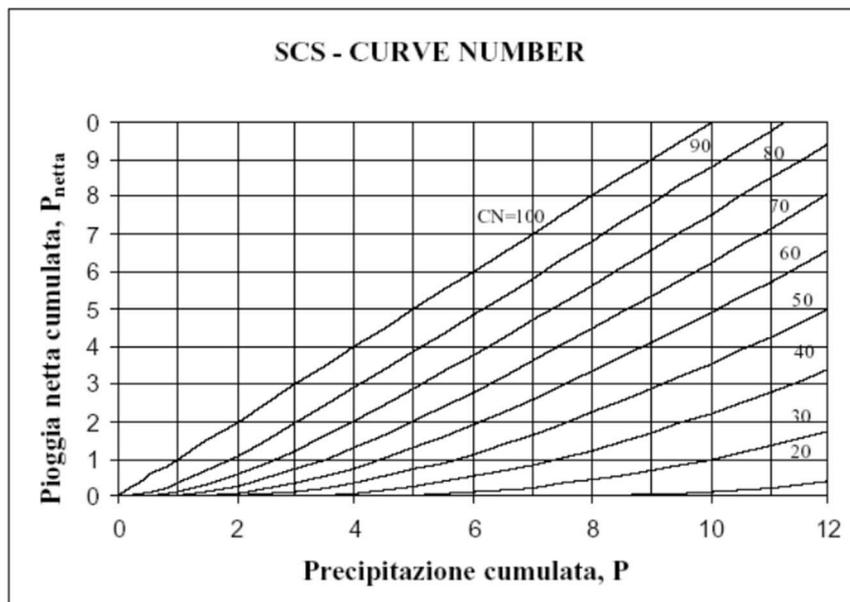


Figura 16: Range di valori del CN.

L'influenza dell'umidità del terreno invece, viene analizzata individuando tre classi, chiamate AMC I, II e III, dove AMC sta per Antecedent Moisture Condition. Le classi vengono individuate in funzione dell'altezza di pioggia raggiunta nei cinque giorni precedenti all'evento considerato. In particolare:

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

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

Tabella 6: Classe *AMC* secondo l'altezza di pioggia.

I range di altezza di pioggia individuati si riferiscono ad una condizione media di umidità del terreno, cioè sono relazionati ad una classe II. Per passare alle condizioni di classe I o III valgono:

$$CN(I) = \frac{CN(II)}{2.3 - 0.013CN(II)} \quad [30]$$

$$CN(III) = \frac{CN(II)}{0.43 + 0.0057CN(II)} \quad [31]$$

Vantaggi e limiti del metodo

Il metodo del Curve Number dell'SCS è largamente utilizzato, perché non particolarmente complesso. Presenta, infatti, dei punti di forza:

- È monoparametrico, quindi richiede la valutazione di una sola variabile;
- Le tabelle e gli abachi sono largamente utilizzati;
- Il deflusso calcolato è funzione diretta delle precipitazioni e non del tempo.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Di contro, ha sicuramente delle limitazioni. Le principali sono:

- La dipendenza del modello dalle condizioni di umidità è sì centrale, ma implicita;
- Al netto delle perdite iniziali I_a , qualunque precipitazione produce un deflusso. Questo aspetto già di per sé risulta limitante, a maggior ragione se si cerca di adattare il metodo ad un evento multipicco, tipico per esempio nelle fasce tropicali.

Creazione del Modello in RStudio

R è un insieme di funzioni software per gestione di dati, calcolo e funzioni grafiche. Fornisce tra le altre cose:

- Servizio di gestione di dati e loro archiviazione;
- Operatori di calcolo per gestire vettori e matrici;
- Strumenti integrati per analisi di dati;
- Funzioni per analisi grafica di dati;
- Un linguaggio di programmazione ('S').

Un grande vantaggio di lavorare con R è che tutte le funzioni e i dataset sono contenuti in "pacchetti", che possono essere installati e caricati al momento, e solo in quel caso il loro contenuto è disponibile. Questo sistema risulta molto efficiente, in quanto non avere i pacchetti già caricati fa sì che non si occupi memoria.

Nel caso di questo studio si è lavorato con il pacchetto "raster", che fornisce funzioni e strumenti per gestire dati spaziali e geografici in un formato, appunto, raster. Quest'ultimo, divide il dato in celle di lato regolare, dette

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

pixel, ognuna contenente un valore. Le celle formano una matrice che presenta una dimensione, quindi un numero di righe e di colonne. Un modello di dato raster può rappresentare punti, linee o aree. Nel primo caso il punto è rappresentato dal valore della singola cella, nel secondo caso la linea è formata da più celle connesse che presentano quindi una data lunghezza, mentre per quanto riguarda il dato areale le celle collegate vanno a costituire una forma vera e propria. Solitamente lavorando con questo tipo di dati il raster è georeferenziato, ovvero viene associato ad esso un'informazione relativa alla sua posizione geografica.

Questo pacchetto è particolarmente utile quando si utilizzano dataset con molte informazioni che non potrebbero essere caricati nella memoria del computer. Infatti, è possibile gestire e lavorare con i pacchetti raster senza effettivamente caricare tutti i valori in memoria.

Tramite il comando *library(raster)* è possibile richiamare il pacchetto desiderato: a questo punto è stato creato un file RasterStack che sovrapponesse sette layers, tra cui il file DTM (Digital Terrain Model), le direzioni di drenaggio e le distanze dalla sezione di chiusura del bacino (Figura 17). La matrice risulta di dimensioni 577x552 georeferenziata in coordinate WGS84 UTM 32N.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

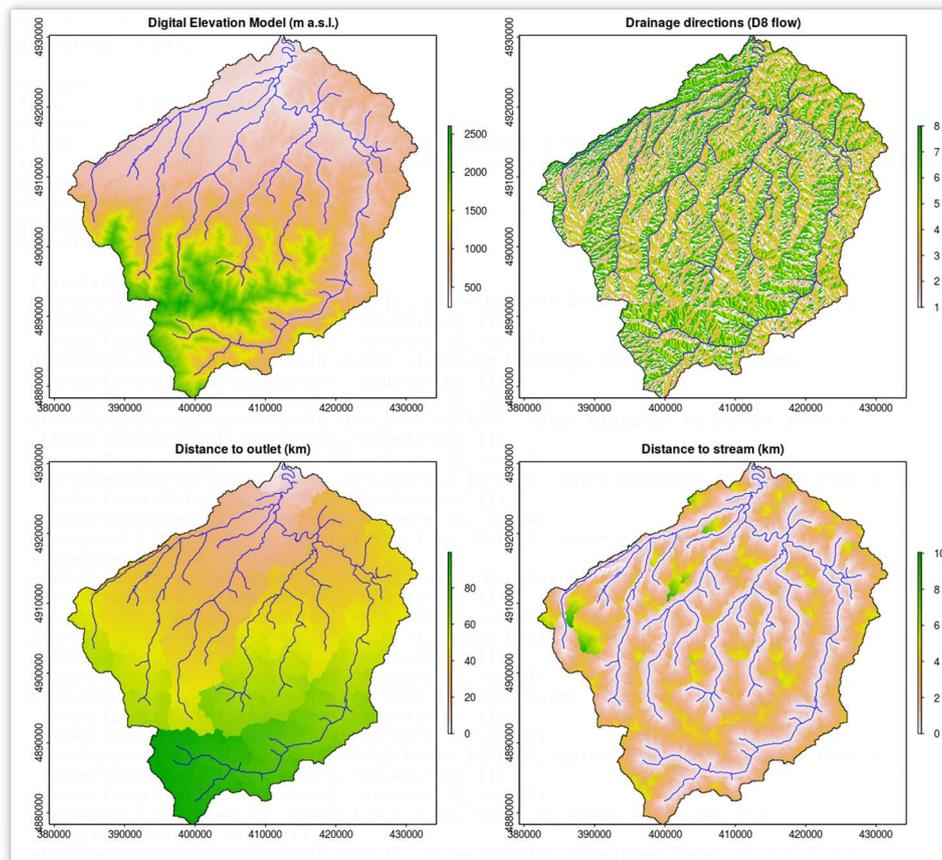


Figura 17: Quota, direzioni di flusso e distanze calcolate nel bacino in esame.

Come si vede, le direzioni di drenaggio prese in considerazione sono otto, secondo lo schema seguente. I colori invece fanno fede alla legenda in Figura 17.

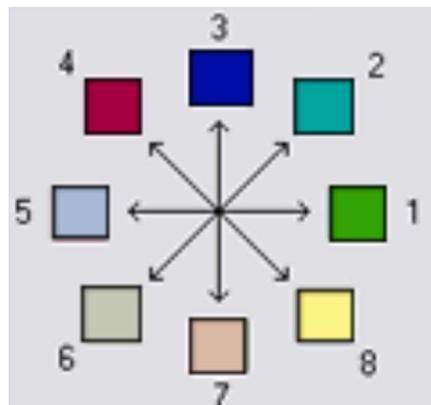


Figura 18: Direzioni di drenaggio.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

In particolare, le direzioni considerate sono:

- 1: est;
- 2: nord-est;
- 3: nord;
- 4: nord-ovest;
- 5: ovest;
- 6: sud-ovest;
- 7: sud;
- 8: sud-est.

Successivamente sono stati implementati i grigliati dei CN già preesistenti e sono stati riportati i dati radar dei tre eventi in esame rispetto alle posizioni di diverse stazioni pluviometriche. Il dettaglio degli script necessari per questi passaggi sono riportati in Allegato 4, mentre gli output ottenuti in R sono riportati in Allegato 5.

Il modello implementato in R ha come input una matrice P di dimensioni $N \times M$, dove M è il numero di pixel che formano il file raster utilizzato e N sono il numero di intervalli temporali in cui è stato suddiviso il tempo dello studio. Inoltre, come detto, il programma acquisisce un vettore di M valori associati al Curve Number per ogni pixel. Avendo a disposizione questi due dati, è possibile calcolare la Pioggia efficace per ogni pixel, creando quindi una nuova matrice chiamata P_{eff} facendo attenzione che abbia le stesse dimensioni di P . In questo passaggio sono state utilizzate le formule [27], [28] e [29], utilizzando la pioggia cumulata. A questo punto, il modello calcola la quantità d'acqua che, non infiltrandosi nel terreno, partecipa al deflusso. Quest'ultimo è governato da alcune grandezze, quali: la distanza del pixel dalla sezione di chiusura, la distanza del pixel dall'asta fluviale più vicina e le relative velocità nel percorrere queste due distanze. In questo studio si è scelto di considerare una velocità per

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

quanto riguarda il deflusso lungo i versanti, v_h , e una seconda velocità per quanto riguarda il deflusso lungo i canali, v_c . Queste velocità sono state considerate costanti lungo i tratti di competenza.

Il modello fornisce come output l'idrogramma nella sezione di chiusura considerata. Inizialmente sono stati scelti dei valori per le velocità e del CN, in particolare scelto di classe II, quindi intermedia, tra una situazione secca e una invece molto umida. Le due velocità invece sono state inizialmente settate a 0.1 m/s per quanto riguarda quella dei versanti e 1 m/s all'interno dei canali, valore tipico per corsi d'acqua di questo tipo durante gli eventi di piena. La modifica di questi valori è l'oggetto della calibrazione del modello.

Calibrazione del modello

Una volta scelto il modello è necessario calibrarlo attraverso la scelta di alcuni parametri. Questo problema si crea in quanto non è possibile stimare i valori dei parametri attraverso osservazioni o misurazioni, o anche se in alcuni casi si potesse, il risultato non risulta comunque soddisfacente.

Questo perché la scala della misurazione è di gran lunga minore rispetto a quella richiesta nel modello, oppure perché la scala spazio-temporale del dato raccolto attraverso la misura è differente rispetto a quella calcolata nella modellazione del processo. In questo caso si dice che le variabili risultano incommensurabili.

In questi casi si applica la cosiddetta ottimizzazione dei valori dei parametri scelti. Si cerca, cioè, di avvicinare il più possibile la simulazione operata dal modello ai valori osservati. Per fare questo esistono più modalità, manuali o con algoritmi, che però diano tutte lo stesso risultato, ovvero un “best fit” tra i valori osservati e la simulazione. Spesso si valuta la variabilità, per esempio, di due parametri rispetto ad una terza grandezza che viene chiamata funzione obiettivo, rappresentativa del best fitting. In questo caso l’algoritmo ricerca il massimo della “superficie risposta” creata in questo spazio a tre dimensioni, formato alla base dai valori dei due parametri scelti, e sulla verticale dalla funzione obiettivo stessa.

La calibrazione del modello di questo studio, come detto in precedenza, passa attraverso la scelta del valore di tre parametri:

- Il Curve Number;
- La velocità lungo i versanti v_h ;
- La velocità lungo il canale v_c .

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

In particolare, variando questi parametri, l'obiettivo è ottenere la forma dell'idrogramma il più possibile simile agli idrogrammi registrati durante gli eventi considerati.

Le velocità governano la posizione temporale del picco: maggiore è il valore, prima arriva il picco di piena, mentre il valore del Curve Number definisce il volume d'acqua complessivo. Nel caso dell'idrogramma questo si traduce nell'area sottesa alla curva della portata.

La calibrazione è stata fatta sul bacino chiuso a Farigliano, per disponibilità di dati, e quindi sul relativo idrogramma.

Evento di novembre 2019

L'idrogramma reale del rapporto evento Arpa a cui il modello deve tendere è il seguente:

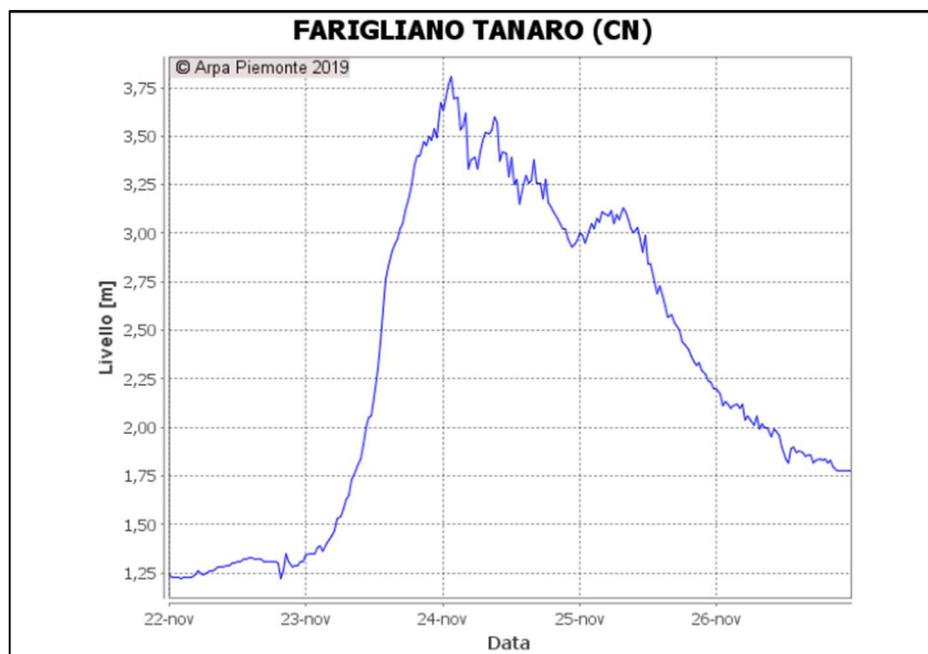


Figura 19: Idrogramma di rapporto evento Arpa evento di novembre 2019

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

L'idrogramma sale rapidamente e presenta più di un picco. Il primo giunge attorno alla mezzanotte del 24 novembre, quindi circa 48 ore dopo l'inizio dell'evento stesso. Il dato registrato in corrispondenza del massimo è di circa $1000 \text{ m}^3/\text{s}$.

La prima simulazione è stata svolta mantenendo i valori di velocità a 0.1 e 1 m/s, rispettivamente per velocità lungo i versanti e lungo i canali, inserendo però i valori di CN3 (Figura 21), in quanto l'evento di novembre 2019 ha risentito dell'umidità antecedente presente nel terreno, dovuta al recente evento occorso il mese precedente.

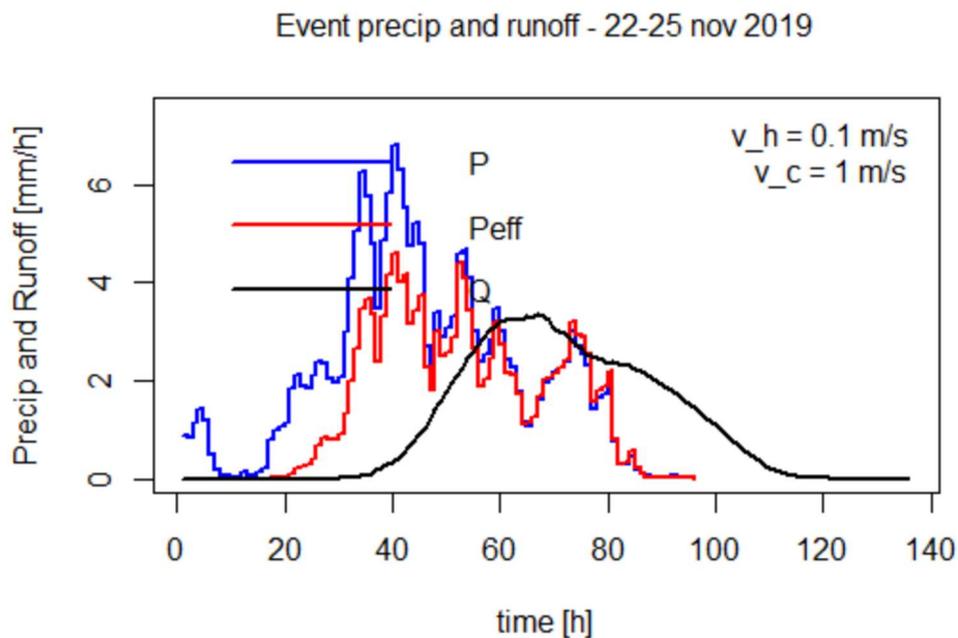


Figura 20: Idrogramma evento nov19 ottenuto tramite prima simulazione.

Il picco risulta giungere attorno alla sessantesima ora dall'inizio dell'evento, ed è quindi in ritardo, e in più il massimo di portata risulta sovrastimato. Infatti, il picco si attesta a circa 3.5 mm/h . Per avere il dato consistente, occorre

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

moltiplicare per l'area del bacino, che nel caso di Farigliano è pari a 1502.15 km². Quindi:

$$3.5 \frac{mm}{h} \cdot 1502.15 \text{ km}^2 \cong 1460 \frac{m^3}{s} \quad [32]$$

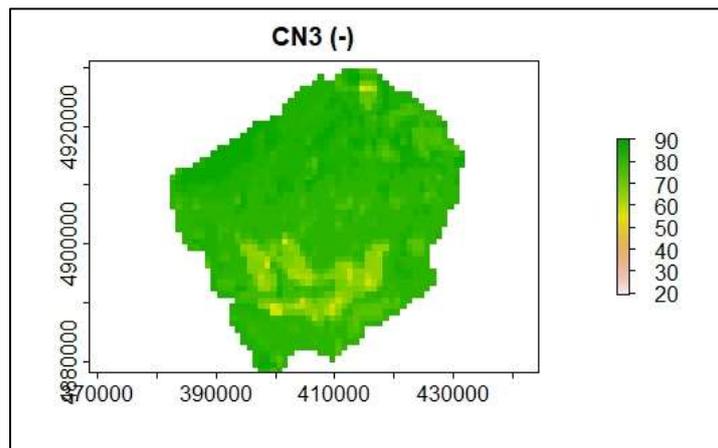


Figura 21: Dati di CN3 nel bacino di Farigliano.

La seconda simulazione, quindi, è stata effettuata inserendo i valori di CN2, che, come si vede in Figura 22 risultano minori, e aumentando le velocità. In particolare, v_h è stata inserita pari a 0.5 m/s, mentre v_c pari a 2 m/s.

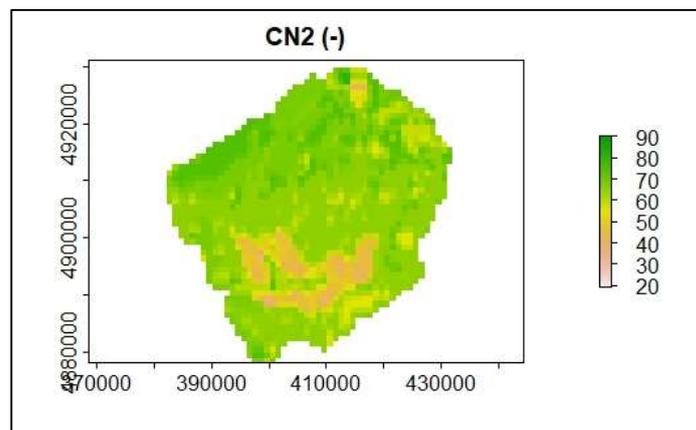


Figura 22: Dati di CN2 nel bacino di Farigliano.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Il risultato ottenuto è il seguente:

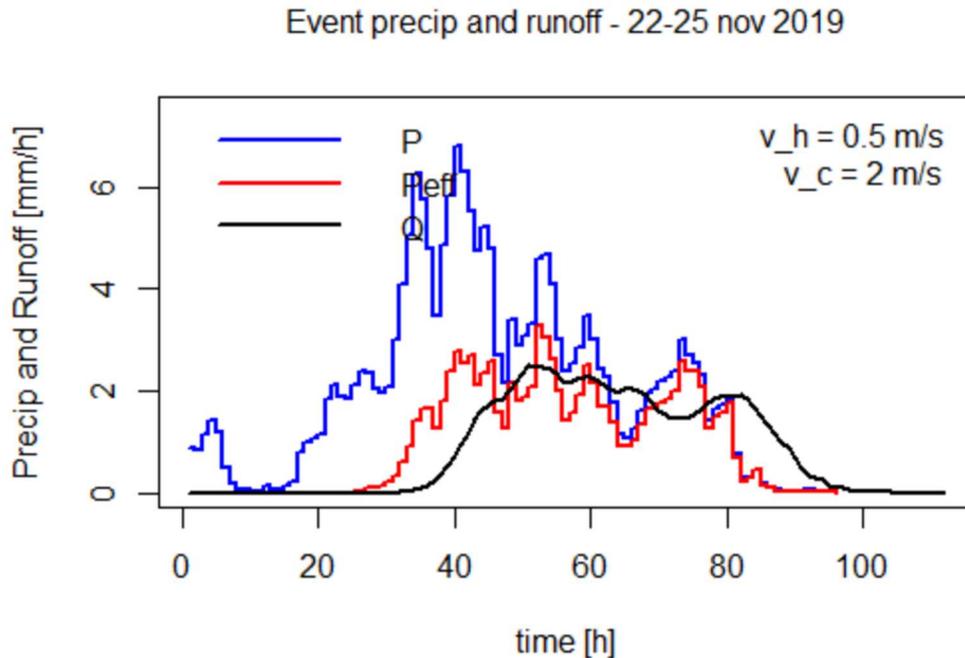


Figura 23: Idrogramma per l'evento di novembre 2019 ottenuto tramite seconda simulazione.

In questo caso il picco arriva dopo circa 48 ore dall'inizio dell'evento, quindi in accordo con l'idrogramma in Figura 19, e il picco di portata si attesta attorno a $960 \text{ m}^3/\text{s}$, partendo da un dato di circa 2.3 mm/h e applicando lo stesso calcolo svolto nella [32]. Rispetto quindi ai $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ il picco risulta leggermente sottostimato, ma lo scarto è accettabile, avendo applicato un modello semplificato.

Nella Figura 23 si apprezza il carattere multipicco dell'evento, riportato già nel rapporto di evento dell'Arpa.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Evento di ottobre 2019

Questo è l'evento che ha interessato meno il territorio in esame, come si evince anche dalle curve di possibilità pluviometrica riportate in Allegato 3, che riportano infatti valori di Tempo di ritorno più bassi rispetto agli altri due eventi. In questo caso, infatti, gli effetti maggiori si sono avuti nell'Alessandrino, e nel nord della regione. Per questo, non sono disponibili dati precisi sulla portata di picco a Farigliano, né il corrispettivo idrogramma. Si è scelto quindi, in questo studio, di utilizzare la stessa calibrazione scelta per l'evento di novembre 2019, in quanto i due fenomeni meteorologici sono avvenuti molto vicini nel tempo.

La calibrazione, quindi, prevede di utilizzare i valori del Curve Number 2, il valore della velocità lungo i versanti pari a 0.5 m/s mentre quella lungo i canali pari a 2 m/s.

L'evento si protrae per più giorni, gli effetti più significativi sono comunque quelli che il modello rileva dopo circa 100 ore dall'inizio dell'evento, quindi durante la giornata del 22 ottobre. Si riporta l'idrogramma ottenuto in Figura 24.

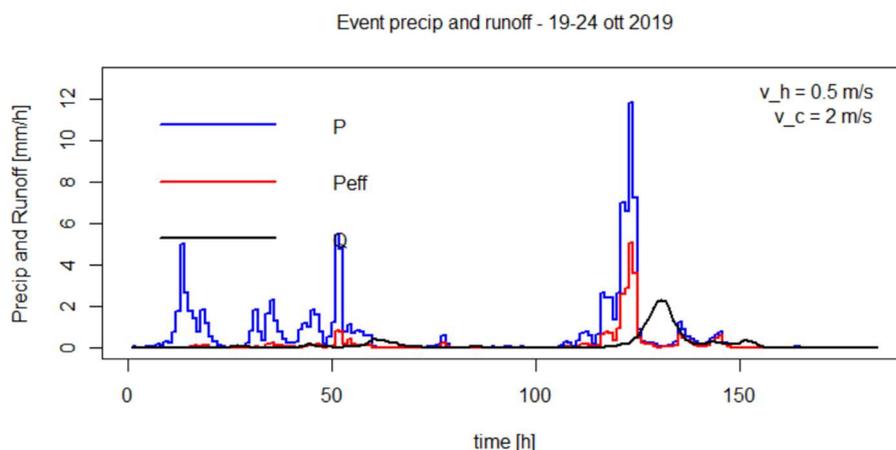


Figura 24: Idrogramma dell'evento dal 19 al 24 ottobre 2019

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Evento di ottobre 2020

Come scritto nei capitoli precedenti, questo è l'evento che ha fatto registrare gli effetti maggiori al suolo nel territorio preso in esame in questo lavoro, ed è anche quello che presenta le caratteristiche più marcate e insolite. L'idrogramma registrato a Farigliano dall'Arpa presenta una fase di crescita molto rapida, con un picco molto accentuato ed ugualmente una fase di decrescita molto repentina. In questa sezione sono stati superati sia il livello di guardia che quello di pericolo (Figura 25), ed il dato di picco di portata riportato dal rapporto di evento Arpa è di circa 2700 m³/s. Questo massimo viene registrato nelle prime ore della mattina del 3 ottobre, quindi dopo circa 30 ore dall'inizio dell'evento.

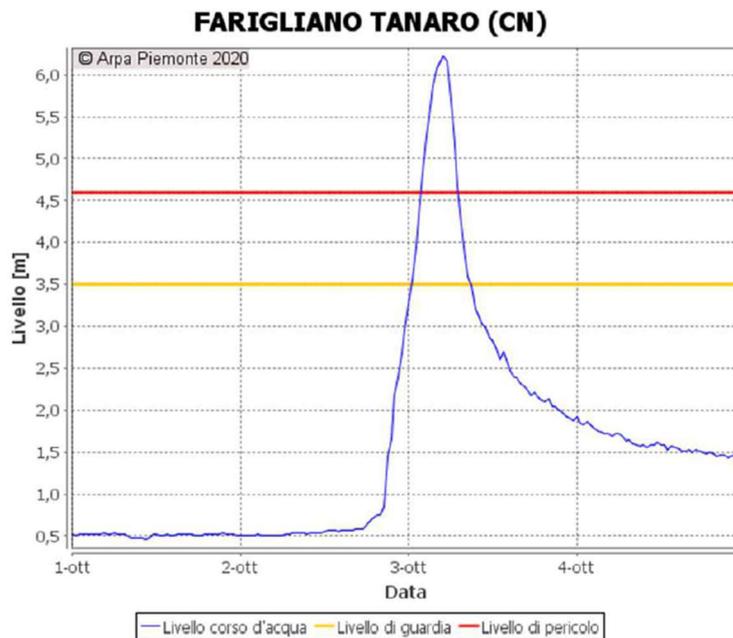


Figura 25: Idrogramma del rapporto evento Arpa (2-3 ottobre 2020).

Con i dati di pioggia inseriti e i valori iniziali delle velocità e del Curve Number, la simulazione ha restituito questo idrogramma:

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

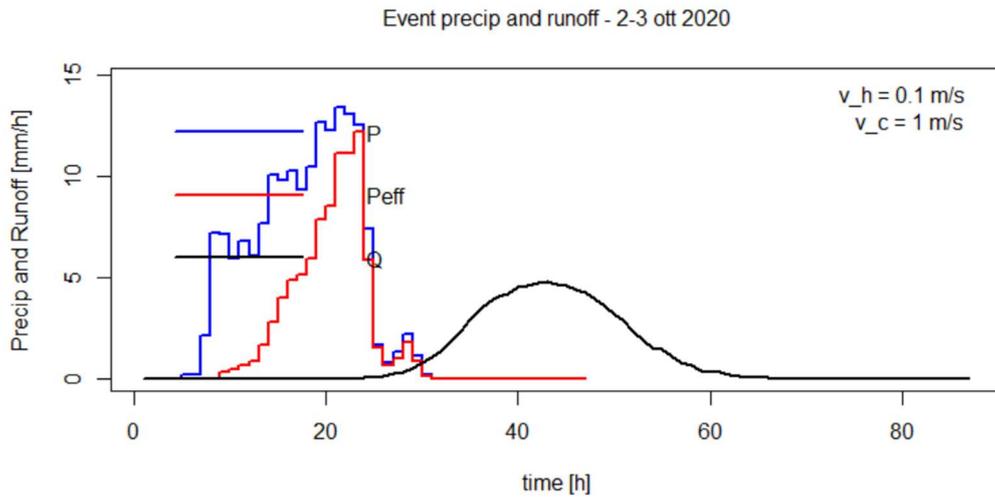


Figura 26: Prima simulazione del modello (CN2)

La forma dell'idrogramma risulta in questo caso molto più schiacciata e allargata, non facendo risaltare la caratteristica impulsiva che in realtà l'evento ha avuto. Inoltre, il picco risulta ritardato rispetto a quello reale di Figura 25. Il massimo, infatti, arriva solo dopo 40 ore dall'inizio. Applicando anche in questo caso il calcolo visto nella [32], la portata di picco risulta circa $2086 \text{ m}^3/\text{s}$, a fronte dei $2700 \text{ m}^3/\text{s}$ registrati nella stazione di Farigliano. Per questi motivi, nei tentativi successivi, sono stati provati valori maggiori delle velocità associati ai valori del Curve Number 1 e 2.

I valori scelti per quanto riguarda le velocità sono stati: v_h pari a 0.3 m/s , v_c pari a 2 m/s . Con questi ultimi dati, il picco giunge correttamente intorno alla trentesima ora, ma con CN1 l'idrogramma risulta ancora schiacciato e poco rappresentativo di quello reale (Figura 27).

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

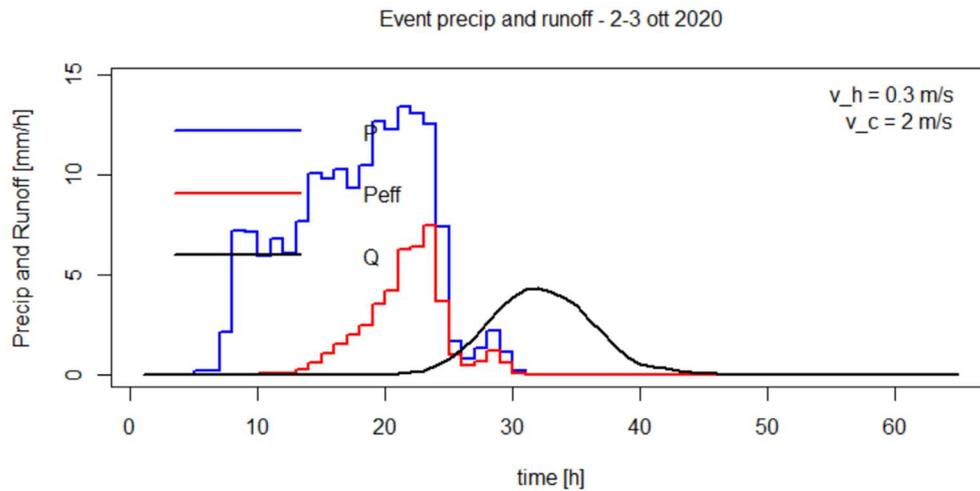


Figura 27: Prova con CN1 e velocità aumentate.

Mantenendo quindi gli stessi valori di velocità ma utilizzando i CN2 si è ottenuto il risultato migliore (Figura 28): il picco è impulsivo, la fase di crescita è più rapida rispetto ai tentativi precedenti e il valore della portata raggiunge e in questo caso supera anche il dato registrato. Infatti, applicando ancora una volta la [32], la portata di picco risulta pari circa a $2900 \text{ m}^3/\text{s}$.

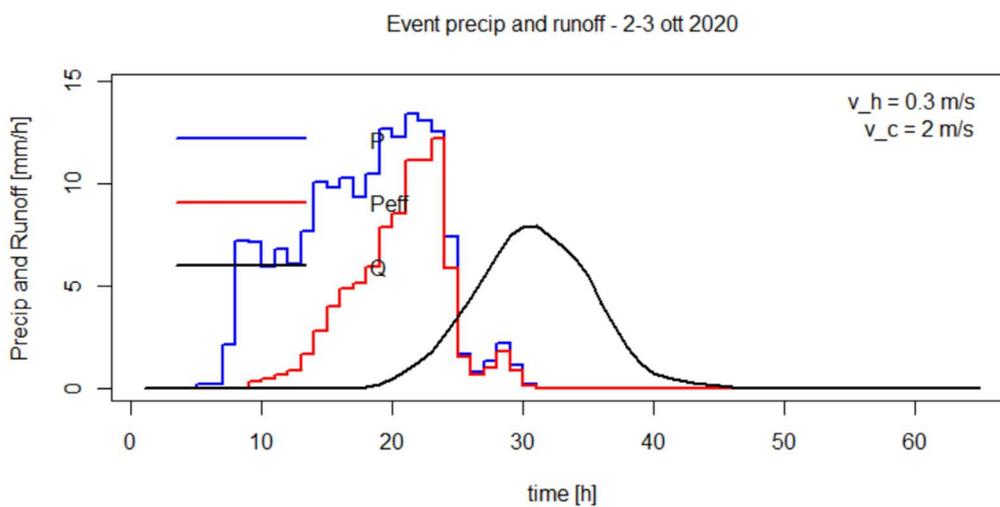


Figura 28: Idrogramma scelto dopo la calibrazione.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

I valori scelti dopo la calibrazione, per gli eventi meteorologici in esame sono dunque riassunti in Tabella 7:

Evento	v_h [m/s]	v_c [m/s]	CN
19-24 ottobre 2019	0.5	2	2
22-25 novembre 2019	0.5	2	2
2-3 ottobre 2020	0.3	2	2

Tabella 7: Valori scelti con la calibrazione.

Come si evince dalla Tabella 7, i valori sono molto simili tra loro. Si è scelto quindi di applicare una calibrazione consistente per tutti gli eventi, in modo che il modello lavorasse con gli stessi dati. I valori finali utilizzati sono quindi stati:

- $v_h = 0.4$ m/s, ovvero una media tra 0.3 e 0.5;
- $v_c = 2$ m/s;
- $CN = 2$.

Gli idrogrammi finali ottenuti sono i seguenti:

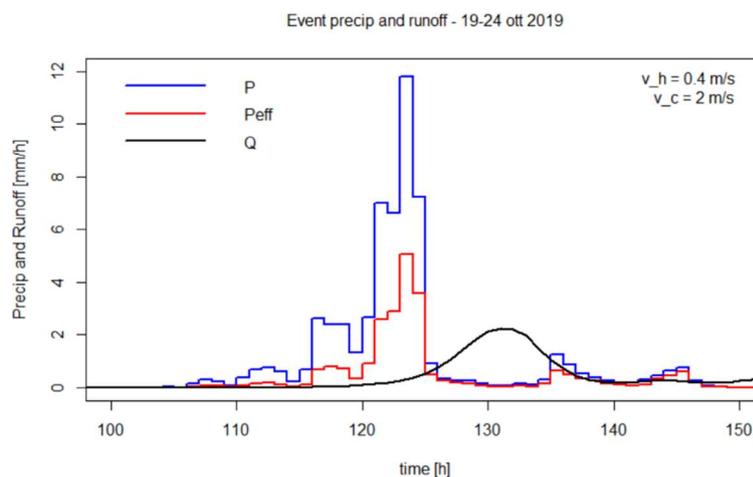


Figura 29: Idrogramma finale per ottobre 2019.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

In questo caso ci si è concentrati sull'evento principale, avvenuto tra la centesima e la centocinquantesima ora dall'inizio della registrazione dei dati.

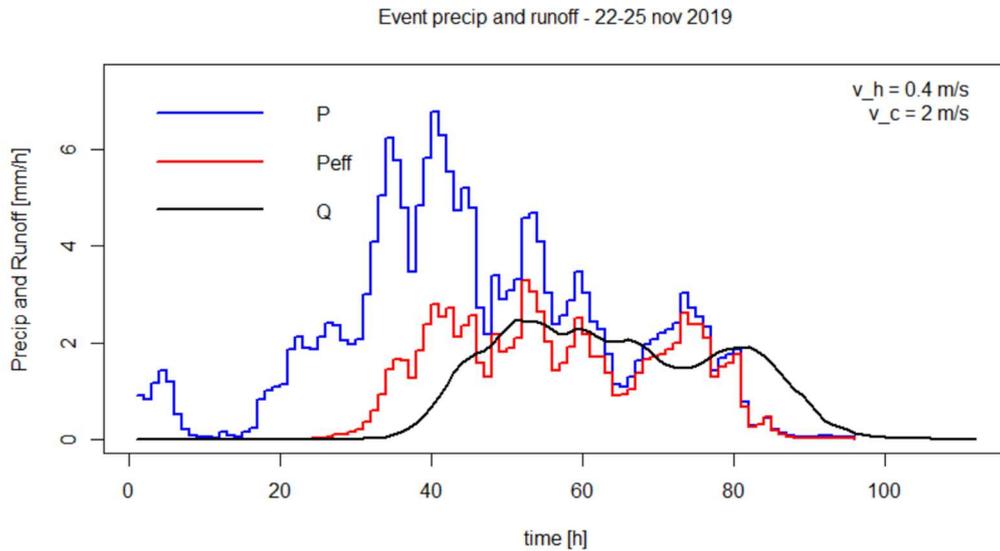


Figura 30: Idrogramma finale per novembre 2019.

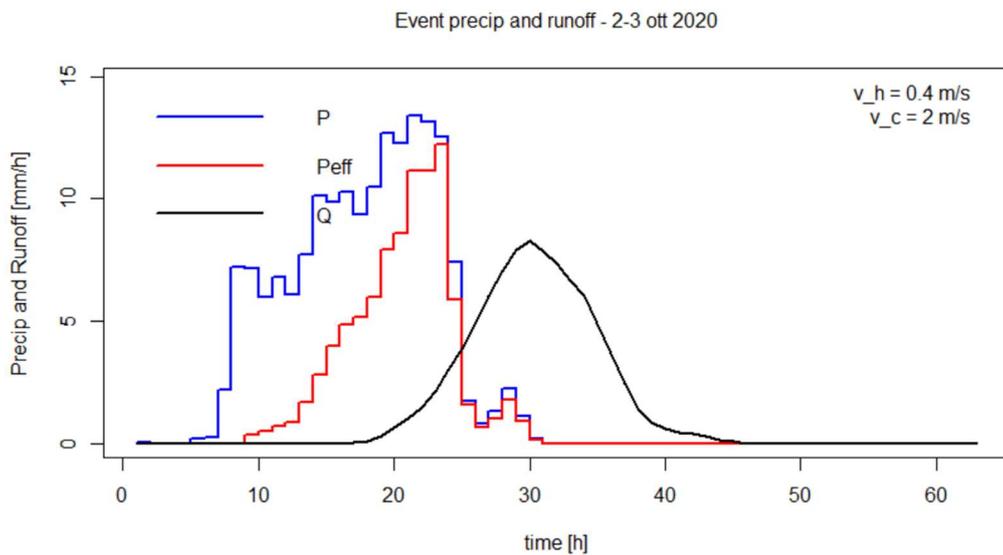


Figura 31: Idrogramma finale per ottobre 2020.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Applicazione del modello ai sottobacini

Una volta calibrato il modello rispetto alla sezione di chiusura di Farigliano, è stato possibile applicarlo ai sottobacini compresi nel bacino idrografico più esteso. Per prima cosa, quindi, è stato necessario estrarre tutti i sottobacini che rientravano nel bacino di Farigliano. Per farlo è stato caricato in R lo shapefile dei sottobacini, controllando che il sistema di riferimento coincidesse con quello del bacino idrografico di Farigliano, e poi successivamente controllando quali contorni ricadessero nell'area individuata dal bacino più grande (Figura 32).

Lo script ha così individuato 17 sottobacini con un relativo codice identificativo, legati ad un fiume e una località, ovvero la sezione di chiusura, a cui viene associata l'area del sottobacino (Tabella 8).

Codice	Denominazione	Area [km²]
BROMA	Brobbio a Margarita	127
CASMO	Casotto a Monasterolo	66
CORFS	Corsaglia a Frabosa Soprana	64
CORPM	Corsaglia a Centrale Molline	89
CORTM	Corsaglia a Torre Mondovì	140
ELLRA	Ellero a Rastello	43
ELLMO	Ellero a Mondovì	181
MONMO	Mongia a Mombasiglio	54
NEGPO	Negrone a Ormea	68
PESSB	Pesio a San Bartolomeo	57
PESCA	Pesio a Carrù	360
TANCL	Tanaro a Clavesana	1485
TANGA	Tanaro a Garessio	249

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

TANNU	Tanaro a Nucetto	375
TANOR	Tanaro a Ormea	176
TANPI	Tanaro a Piantorre	500
TANPN	Tanaro a Ponte di Nava	149

Tabella 8: Sottobacini compresi nel bacino chiuso a Farigliano.

Al fine del corretto funzionamento del modello applicato ai sottobacini è stato necessario creare un algoritmo che calcolasse la corretta distanza di ogni pixel rispetto alla sezione di chiusura del nuovo sottobacino e non del bacino chiuso a Farigliano. Per farlo, è stato trovato il pixel che riportasse il valore minimo di distanza rispetto alla chiusura a Farigliano, che quindi rappresenta la chiusura del sottobacino, e quel valore è stato sottratto a tutti i pixel del raster. Così facendo il pixel stesso assume il valore zero, mentre tutti gli altri riportano la distanza corretta al netto del valore precedente che sarebbe stato riferito al bacino più esteso di Farigliano.

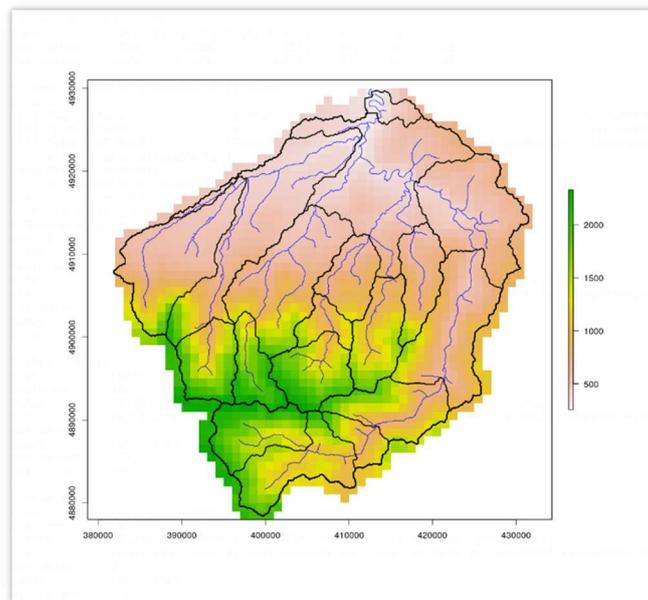


Figura 32: Posizione ed estensione dei sottobacini.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

L'applicazione del modello ai sottobacini è stata effettuata per gli eventi di novembre 2019 e ottobre 2020. I risultati sono riportati in Allegato 5 – Output di R.

Il modello si è dimostrato ben applicato ai sottobacini. La risposta è in linea con il comportamento che ci si aspetta: i bacini più a monte vedono arrivare il picco prima di quelli più a valle, mentre il volume d'acqua sotteso all'idrogramma aumenta spostandosi verso valle. I sottobacini più piccoli mostrano una risposta più rapida all'evento, in alcuni casi la portata di deflusso risulta essere quasi coincidente con la pioggia efficace, proprio a confermare la quasi inesistenza di ritardo nella risposta alla precipitazione. Esempi di questo comportamento sono i casi dell'Ellero a Rastello (Figure 57 e 74) e del Casotto a Monasterolo (Figura 52). Gli idrogrammi sono stati calcolati tutti con la stessa scala per lo stesso evento, così da facilitare il confronto.

Viene confermato il maggior impatto dell'evento di ottobre 2020: il massimo di pioggia si registra nei sottobacini del Casotto a Monasterolo e del negrone ad Ormea, dove si raggiungono circa i 40 mm/h. Per quanto riguarda invece l'evento di novembre 2019 è stato sufficiente limitare il grafico a circa 10 mm/h, in quanto i valori massimi di precipitazione si attestano attorno ai 9 mm/h, nel caso del Tanaro a Garessio (Figura 63) e nuovamente del Casotto a Monasterolo (Figura 52).

Analisi di sensitività

L'analisi di sensitività dei modelli afflussi-deflussi è uno studio sulla sensibilità degli output in funzione del variare dei valori dei parametri. È uno strumento che può essere utile anche per verificare l'impatto che possono avere altri elementi, quali condizioni iniziali o al contorno, sul modello stesso.

La letteratura individua due tipologie:

- L'analisi di sensitività svolta prima della calibrazione. In questo caso vengono individuati quali sono i parametri più importanti rispetto alla performance del modello stesso. Svolgere l'analisi prima della calibrazione può aiutare ad individuare quelli che sono i parametri meno importanti o non significativi, fissarli a dei valori adatti, così da diminuire l'onere della fase successiva;
- L'analisi di sensitività svolta dopo la calibrazione invece, permette di capire se i parametri sono stati identificati in maniera corretta o meno. In questo caso, per capirlo, occorre studiare la pendenza della "superficie risposta", introdotta nel precedente capitolo.

L'analisi di sensitività, inoltre, può essere locale, ovvero svolta cambiando un parametro per volta, o globale, cambiando tutti i parametri insieme.

Tutte queste valutazioni sono applicabili nel caso di modelli con un numero n di parametri. Nel caso di questo studio, come detto, i parametri soggetti a calibrazione sono solamente tre, il Curve Number e le velocità lungo i versanti e i canali. Per questo, la trattazione in senso stretto dell'analisi di sensitività perde di significato.

Piuttosto, il lavoro svolto è stato quello di studiare la sensibilità del modello creato rispetto agli input, ovvero rispetto alle precipitazioni. Infatti, in un

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

contesto nel quale il massimo annuale dell'intensità di pioggia aumenta da più di un decennio e in cui i cambiamenti climatici ci obbligano a immaginare scenari anche lontani da comportamenti attesi, in questo studio si è scelto di studiare la sensibilità del modello creato e del bacino idrografico cambiando i dati di pioggia di input.

In particolare, sono stati creati due scenari:

- Per quanto riguarda l'evento di ottobre 2019, si è scelto di spostare la pioggia caduta nella zona di Alessandria sul bacino del Tanaro.
- Per l'evento di novembre 2019 sono stati presi i dati di pioggia caduti sul versante ligure, più intensi rispetto a quelli del versante piemontese.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Scenario A: ottobre 2019 con precipitazioni dell'alessandrino

L'evento di ottobre 2019 è senza dubbio quello che ha registrato gli effetti minori sul bacino considerato, tra i tre eventi in esame. Di contro, come visto nel capitolo dedicato, questo evento ha fatto registrare i dati massimi nell'alessandrino. In questo scenario si è quindi scelto di spostare i dati di pioggia registrati nella zona di Alessandria sul bacino del Tanaro.

In particolare, è stato necessario spostare i dati di pioggia legati ai pixel di 70 km ad ovest e 40 km a sud (Figura 33).

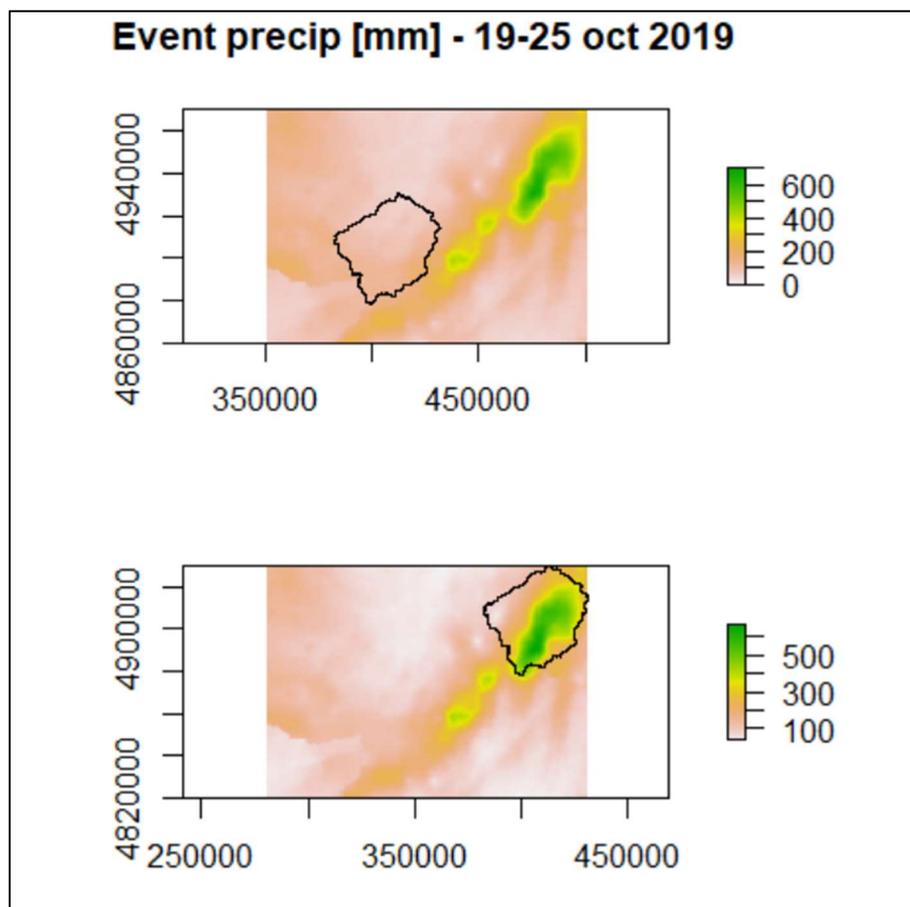


Figura 33: Confronto tra pioggia reale e pioggia dopo lo spostamento (ottobre 2019).

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

In generale, tutti gli idrogrammi, riportati in allegato 5, registrano un innalzamento dei massimi di pioggia e presentano un comportamento multipicco. Con qualche eccezione, i massimi di pioggia aumentano mediamente di due volte e mezzo, e la nuova posizione della precipitazione insiste maggiormente sui sottobacini del Corsaglia (Figure 89, 90 e 91, pagina 123) e su quello del fiume Negrone con sezione ad Ormea. È proprio quest'ultimo che registra la differenza maggiore rispetto alla situazione reale, passando da circa 11 mm/h a quasi 55 mm/h (Figura 34).

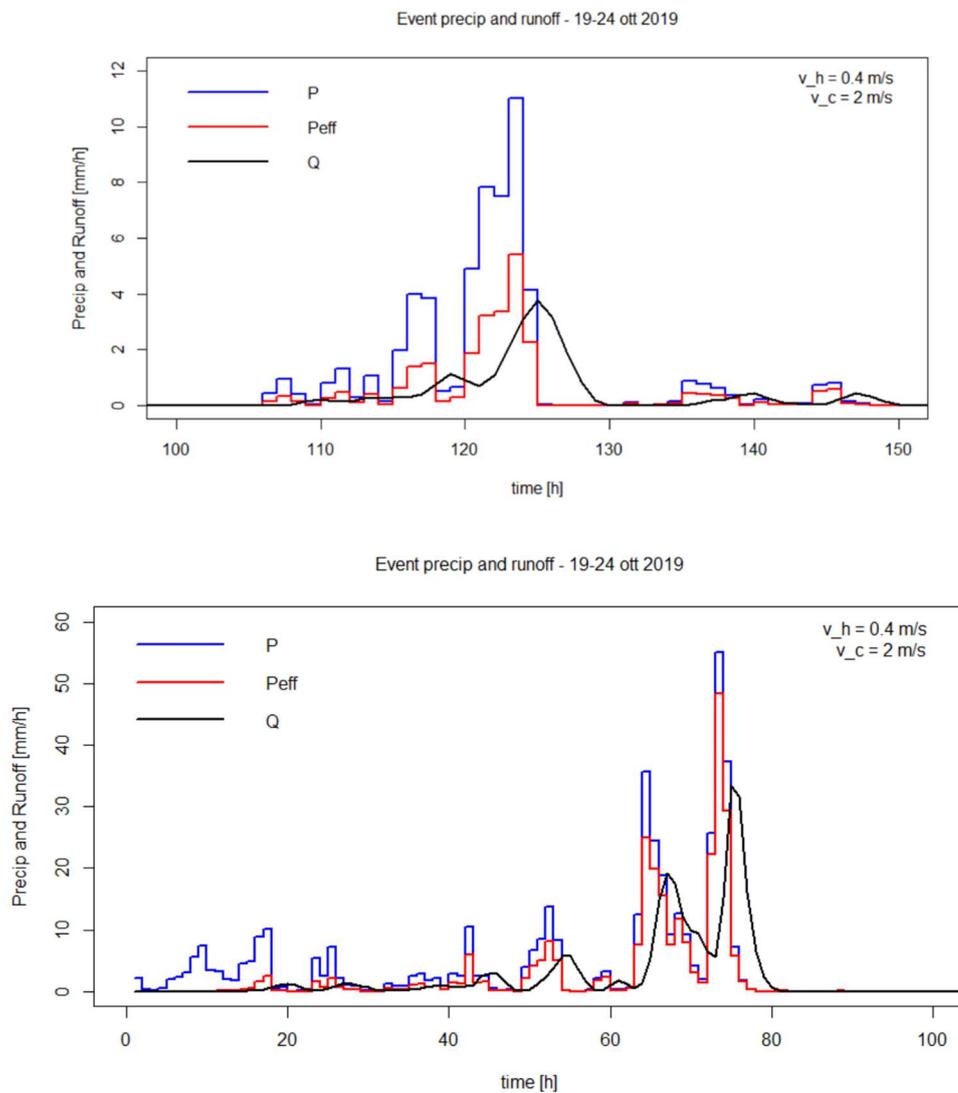


Figura 34: Confronto tra situazione reale (sopra) e scenario ipotetico (sotto).

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

I dati di pioggia e gli idrogrammi di piena ottenuti in questo scenario superano di gran lunga quelli reali calcolati in questo stesso studio per quanto riguarda l'evento dell'ottobre 2020. In quel caso sia il Corsaglia che il fiume Tanaro avevano fatto registrare livelli record e dissesti sul territorio. Può essere interessante confrontare l'idrogramma ottenuto a Garessio per ottobre 2020 rispetto a quello ipotetico ottenuto in questo scenario (Figura 35):

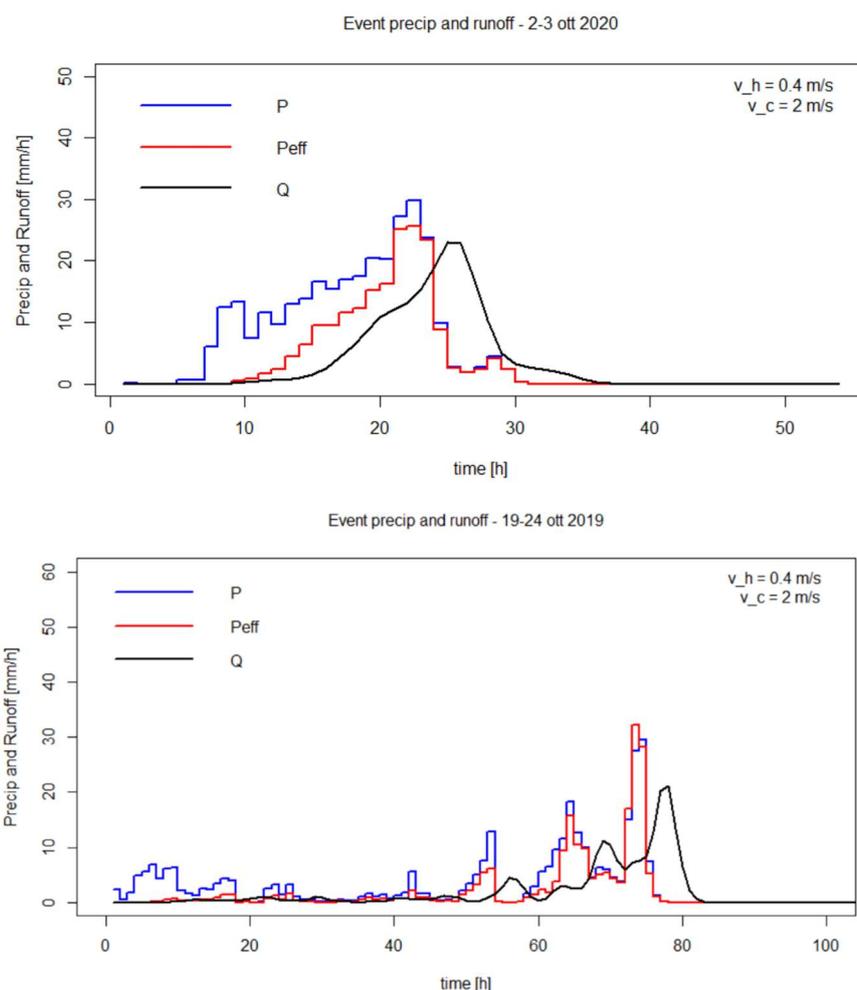


Figura 35: Confronto tra ottobre2020 (sopra) e scenario ipotetico per ottobre2019 (sotto) a Garessio.

Come si vede, i numeri sia per quanto riguarda la pioggia sia per quanto riguarda il picco di portata sono paragonabili, in questo caso. Nello scenario

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

ricreato però, sono presenti più picchi prima di quello massimo. È quindi del tutto ipotizzabile che le conseguenze di questo scenario possano essere quantomeno simili a quelle avute realmente nell'ottobre del 2020 (Figura 36).



Figura 36: Situazione della mattina del 3 ottobre 2020 al Ponte Odasso, Garessio, lungo il Tanaro.

In conclusione, se dovesse verificarsi una precipitazione con le caratteristiche di quella realmente avvenuta nella zona di Alessandria durante l'evento di ottobre 2019, le conseguenze sul bacino del Tanaro sarebbero molto critiche, e probabilmente peggiori di quelle verificatesi nell'ottobre 2020.

Scenario B: novembre 2019 con precipitazioni del versante ligure

In questo scenario sono stati spostati i dati di pioggia registrati sul versante ligure, i quali solitamente risultano avere un'intensità maggiore, anche a causa della risalita orografica a cui sono obbligate le masse di aria calda e umida provenienti dal mare.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

In particolare, i dati sono stati spostati di 50 km ad ovest e 5 km a sud (Figura 34).

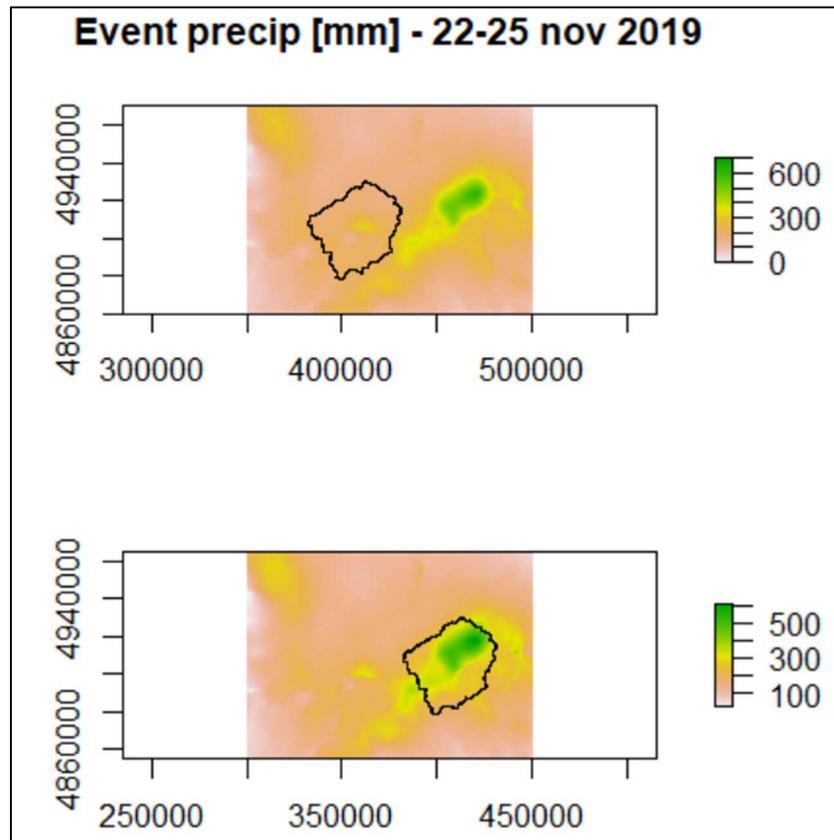


Figura 37: Confronto tra pioggia reale e pioggia dopo lo spostamento (novembre 2019).

Anche in questo caso il modello riporta correttamente un aggravio dei dati di pioggia e di portata. La nuova posizione della precipitazione insiste maggiormente sulla parte centro-nord del bacino, quindi è ragionevole che siano maggiormente soggetti a cambiamenti i bacini del Corsaglia e dell'Ellero, più centrali. Per lo stesso motivo dovrebbero risentire meno dei cambiamenti le sezioni relative al Tanaro e al Pesio, poste più a margine del bacino stesso.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Analizzando gli idrogrammi di output tutte queste considerazioni vengono effettivamente verificate. I sottobacini che risentono maggiormente delle condizioni di pioggia variate sono quelli del Corsaglia, con menzione particolare per quello del Corsaglia a Presa Centrale Molline, e quello dell'Ellero a Mondovì. Nel primo caso, infatti, si passa da circa 5 mm/h a più di 20 mm/h (Figura 38).

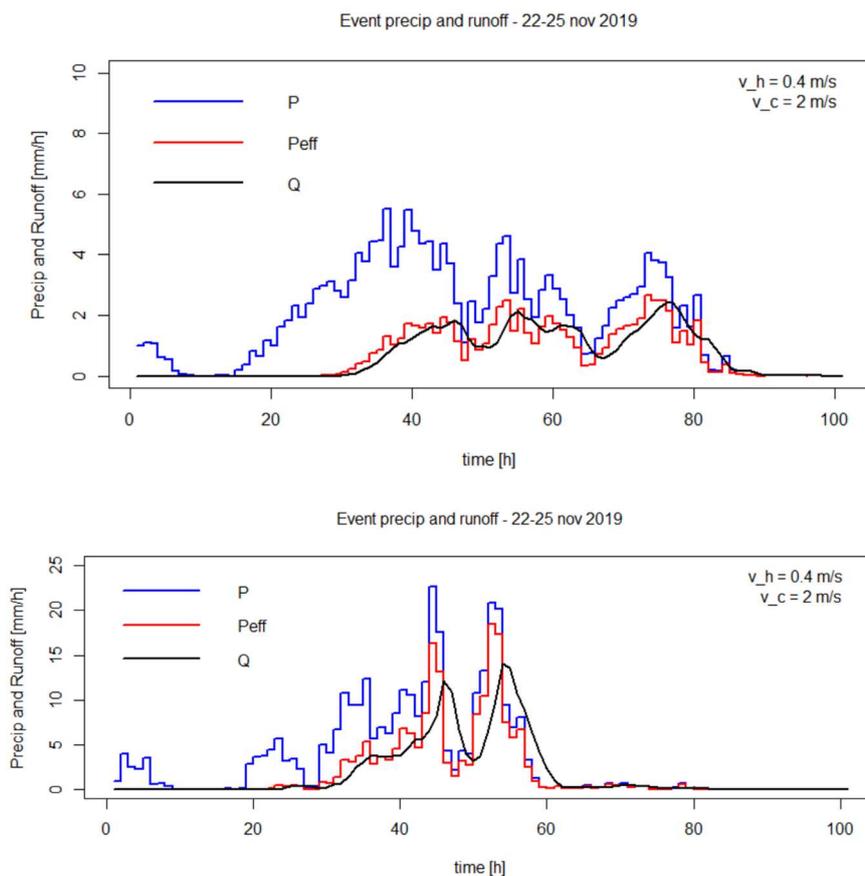


Figura 38: Confronto tra situazione reale (sopra) e scenario ipotetico (sotto) a CORPM.

Anche i picchi di portata, che nello scenario con la pioggia spostata risultano essere due, sono molto più accentuati e arrivano più velocemente rispetto al massimo presente nella situazione reale.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Il caso dell'Ellero a Mondovì può anche essere preso ad esempio. Nella situazione reale, infatti, l'altezza d'acqua ha sfiorato il livello di guardia, posto a 2.2 m, arrivando il 24 novembre a 2 m. Dal confronto tra i due idrogrammi si evince che tale livello sarebbe stato ampiamente superato (Figura 39).

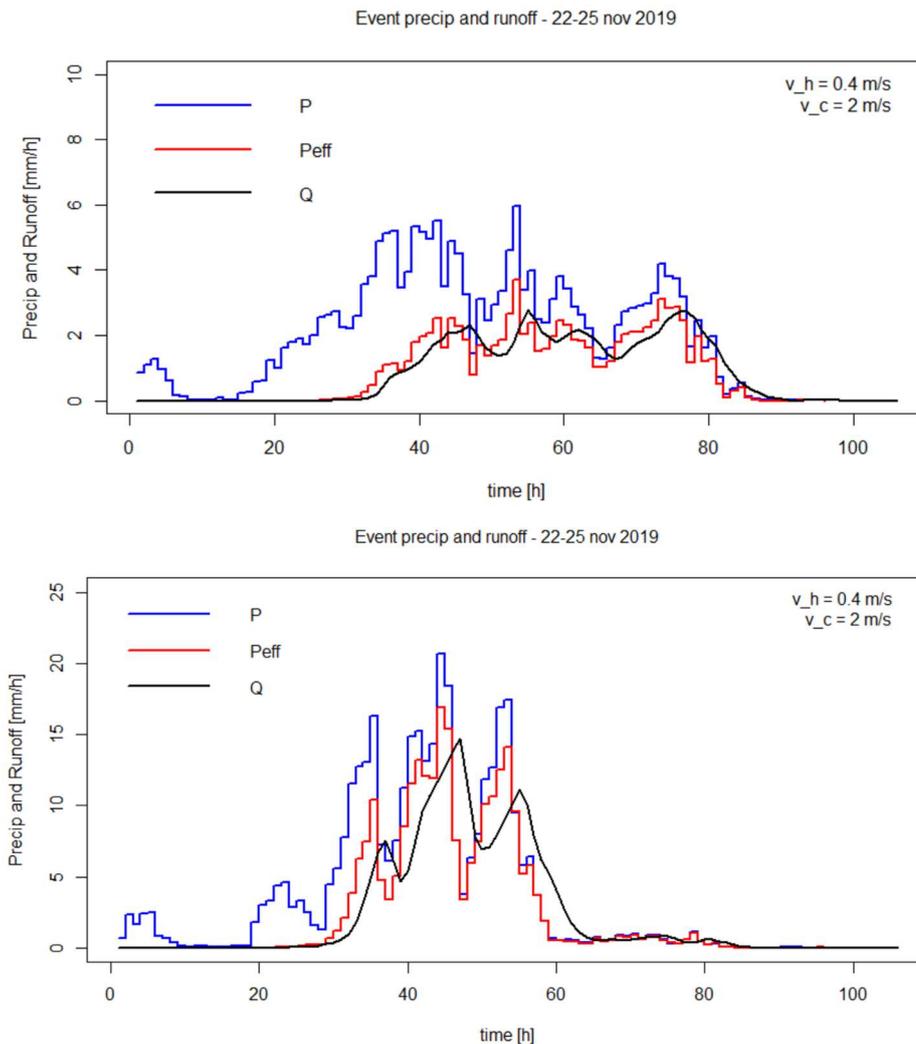


Figura 39: Confronto tra situazione reale (sopra) e scenario ipotetico (sotto) per l'Ellero a Mondovì.

L'evento risulta comunque di entità molto minore rispetto a quello creato per lo scenario A, fatta eccezione per il sopra citato sottobacino dell'Ellero a Mondovì.

Conclusioni

Il presente studio è nato con l'obiettivo di caratterizzare i recenti eventi alluvionali avvenuti sul territorio Piemontese, e valutare la risposta del bacino del Tanaro a monte della sezione di Farigliano. Per farlo, è stata svolta un'analisi di come avvenga la trasformazione tra la distribuzione spaziale delle precipitazioni e quella delle portate. È stato creato quindi un modello afflussi deflussi che in input ricevesse la distribuzione spazio-temporale delle piogge e restituisse in output la distribuzione spazio-temporale del deflusso prodotto e l'idrogramma di piena delle portate. Il modello scelto, dato dalla combinazione del SCS-CN e del metodo della corrivazione, è semplificativo dei fenomeni che governano la risposta idrologica alla precipitazione e non presenta un grado di complessità tale da poter riprodurre esattamente l'onda di piena. Una grossa semplificazione è quella dovuta alla considerazione dei parametri di velocità di risposta uniformi su tutto il bacino. Nella realtà, ogni sottobacino può rispondere in maniera differente e con diverse celerità, o addirittura ogni pixel all'interno dei sottobacini stessi potrebbe rispondere in modo differente. Questi sono aspetti di cui sicuramente occorre tener conto valutando i risultati. Tuttavia, il modello ha prodotto risultati ragionevolmente coerenti ai dati reali. Infatti, la calibrazione effettuata ha restituito degli idrogrammi consistenti rispetto a quelli registrati durante gli eventi in esame, soprattutto per ciò che concerne al tempo di arrivo del picco di portata. Per quanto riguarda il valore di picco dell'onda di piena il modello si è dimostrato più "rigido", in quanto la scelta è potuta ricadere solo su tre possibilità, ovvero le tre classi associate al Curve Number. Anche in questo caso, infatti, sono state necessarie delle approssimazioni. La suddivisione e l'ulteriore studio ai diciassette sottobacini hanno permesso di valutare la risposta del territorio in modo più dettagliato, aspetto che è stato molto utile per l'ultima fase del lavoro, ovvero la creazione

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

di due scenari ipotetici di eventi alluvionali, ottenuti muovendo i dati di pioggia dell'alessandrino nell'ottobre 2019 e del versante ligure nel novembre 2019 sul bacino in esame. I due scenari hanno restituito delle condizioni fortemente critiche, soprattutto nel primo caso. Questi risultati forniscono una traccia qualitativa di come potrebbe essere la risposta del bacino del Tanaro se sottoposto ad eventi alluvionali con quelle caratteristiche. Le peculiarità delle precipitazioni nell'alessandrino o sul versante ligure sono certamente differenti rispetto a quelle che si formano nell'alto Tanaro, tuttavia i cambiamenti climatici potrebbero far sì che le caratteristiche dei fenomeni di precipitazione esulino da quella che è la normalità. Non a caso, in questo stesso studio si è esaminato l'evento alluvionale dell'ottobre 2020, che ha riportato caratteristiche tropicali, non usuali nel nord ovest italiano e non proprie del periodo autunnale. I risultati ottenuti da questi scenari ipotetici possono essere considerati come una base di partenza dell'analisi di cosa potrebbe succedere in futuro, anche se è difficile stabilire quale sia la probabilità. Nella progettazione e l'adeguamento delle opere di difesa dalle alluvioni si deve infatti anche considerare la robustezza del loro funzionamento in scenari possibili, per quanto poco probabili.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Allegati

Allegato 1 – Valori delle distribuzioni di Gumbel delle stazioni pluviometriche

Ormea Centrale

T [anni]	wt	xt 1h [mm]	xt 3h [mm]	xt 6h [mm]	xt 12h [mm]	xt 24h [mm]
2	0.37	22.08	37.08	54.36	76.19	104.09
5	1.50	29.62	49.93	74.71	110.13	141.35
20	2.97	39.41	66.62	101.12	154.14	189.67
50	3.90	45.62	77.19	117.85	182.03	220.30
100	4.60	50.27	85.11	130.39	202.93	243.25
200	5.30	54.90	93.00	142.88	223.76	266.11
500	6.21	61.01	103.41	159.37	251.23	296.28

Tabella 9: Valori della distribuzione della CPP per Ormea Centrale

Colle San Bernardo

T [anni]	wt	xt 1h [mm]	xt 3h [mm]	xt 6h [mm]	xt 12h [mm]	xt 24h [mm]
2	0.37	27.34	47.28	66.28	91.46	123.62
5	1.50	37.90	64.66	91.79	128.56	178.55
20	2.97	51.61	87.19	124.88	176.68	249.81
50	3.90	60.29	101.47	145.85	207.18	294.96
100	4.60	66.79	112.17	161.56	230.03	328.80
200	5.30	73.28	122.83	177.22	252.80	362.52
500	6.21	81.83	136.90	197.87	282.84	407.00

Tabella 10: Valori della distribuzione della CPP per Colle San Bernardo

Ceva Centrale Mazzarelli

T [anni]	wt	xt 1h [mm]	xt 3h [mm]	xt 6h [mm]	xt 12h [mm]	xt 24h [mm]
2	0.37	21.79	31.18	40.11	55.10	73.27
5	1.50	29.42	41.94	51.06	69.41	96.84
20	2.97	39.32	55.90	65.27	87.97	127.41
50	3.90	45.59	64.74	74.27	99.74	146.79
100	4.60	50.29	71.37	81.02	108.55	161.31
200	5.30	54.98	77.98	87.74	117.34	175.77
500	6.21	61.16	86.69	96.60	128.93	194.86

Tabella 11: Valori della distribuzione della CPP per Cava Centrale Mazzarelli

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Pamparato

T [anni]	wt	xt 1h [mm]	xt 3h [mm]	xt 6h [mm]	xt 12h [mm]	xt 24h [mm]
2	0.37	27.56	40.16	54.44	70.74	97.57
5	1.50	37.40	53.16	73.12	97.62	143.84
20	2.97	50.15	70.03	97.35	132.47	203.86
50	3.90	58.23	80.72	112.71	154.57	241.90
100	4.60	64.29	88.73	124.22	171.12	270.40
200	5.30	70.33	96.71	135.68	187.61	298.80
500	6.21	78.29	107.24	150.81	209.37	336.27

Tabella 12: Valori della distribuzione della CPP per Pamparato

Perlo

T [anni]	wt	xt 1h [mm]	xt 3h [mm]	xt 6h [mm]	xt 12h [mm]	xt 24h [mm]
2	0.37	23.77	37.41	50.82	66.03	94.25
5	1.50	32.49	51.61	70.45	95.58	141.86
20	2.97	43.80	70.03	95.91	133.92	203.62
50	3.90	50.97	81.71	112.04	158.22	242.76
100	4.60	56.35	90.46	124.13	176.43	272.09
200	5.30	61.70	99.17	136.18	194.57	301.31
500	6.21	68.76	110.67	152.07	218.50	339.86

Tabella 13: Valori della distribuzione della CPP per Perlo

Monte Berlino

T [anni]	wt	xt 1h [mm]	xt 3h [mm]	xt 6h [mm]	xt 12h [mm]	xt 24h [mm]
2	0.37	25.32	45.31	66.71	96.18	136.37
5	1.50	34.30	65.56	97.95	141.74	203.48
20	2.97	45.96	91.84	138.47	200.85	290.53
50	3.90	53.35	108.49	164.14	238.31	345.70
100	4.60	58.88	120.97	183.38	266.38	387.04
200	5.30	64.40	133.40	202.56	294.35	428.23
500	6.21	71.67	149.80	227.85	331.25	482.57

Tabella 14: Valori della distribuzione della CPP per Monte Berlino

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Allegato 2 – Curve di possibilità pluviometrica

Ormea Centrale

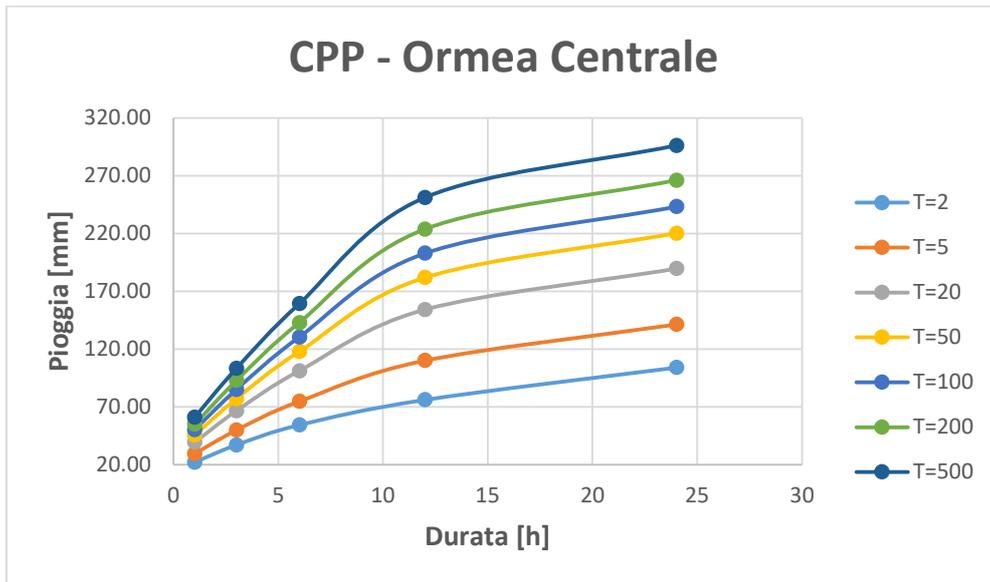


Figura 40: CPP per il pluviografo di Ormea Centrale

Colle San Bernardo

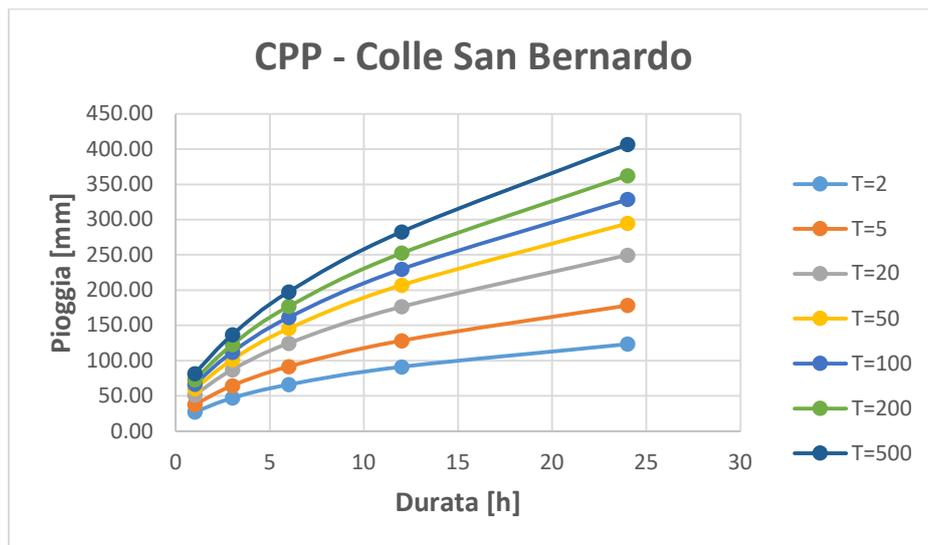


Figura 41: CPP per il pluviografo di Colle San Bernardo

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Ceva Centrale Mazzarelli

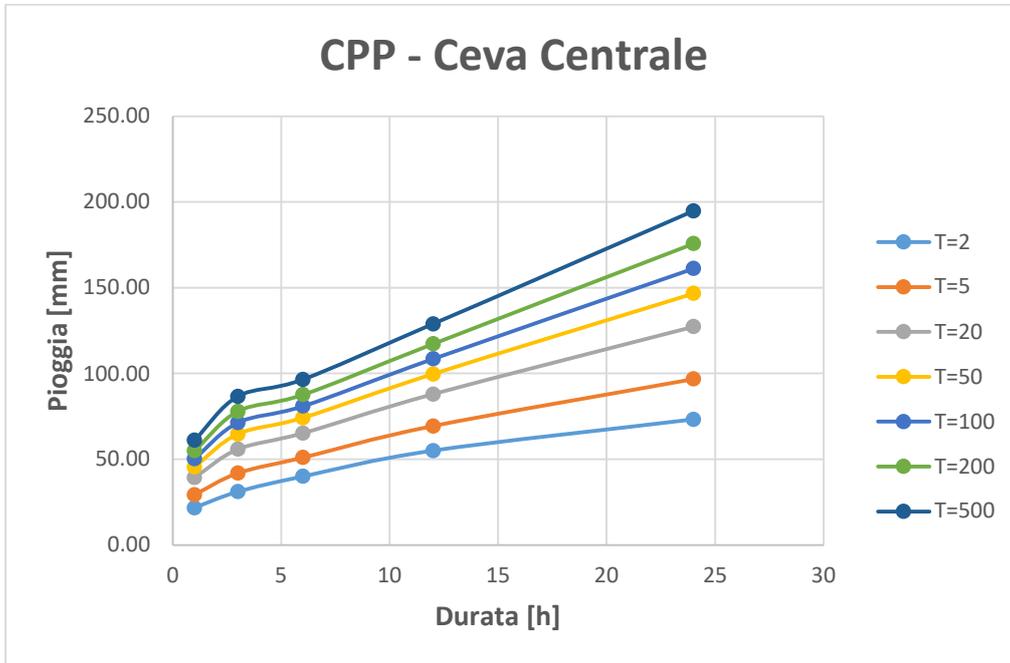


Figura 42: CPP per il pluviografo di Ceva Centrale Mazzarelli

Pamparato

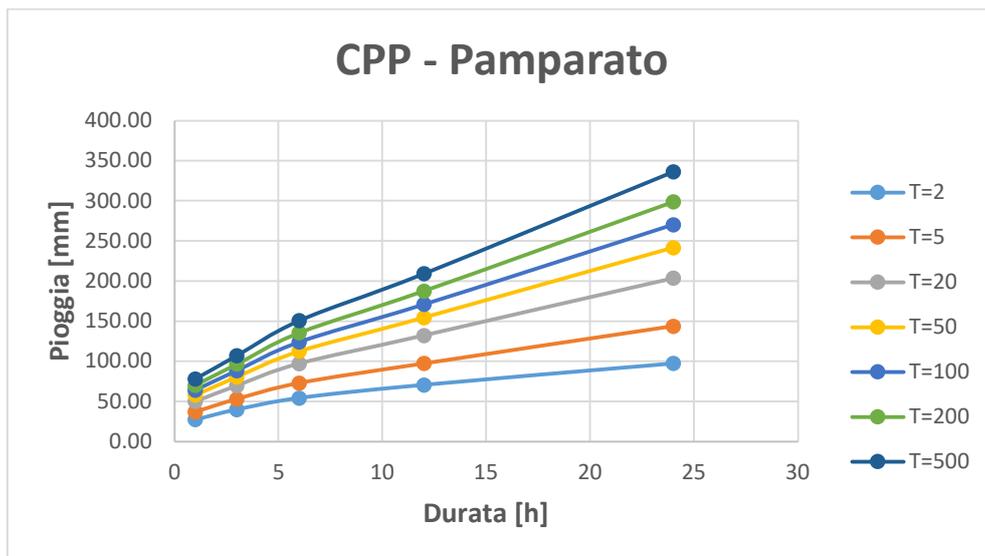


Figura 43: CPP per il pluviografo di Pamparato

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Perlo

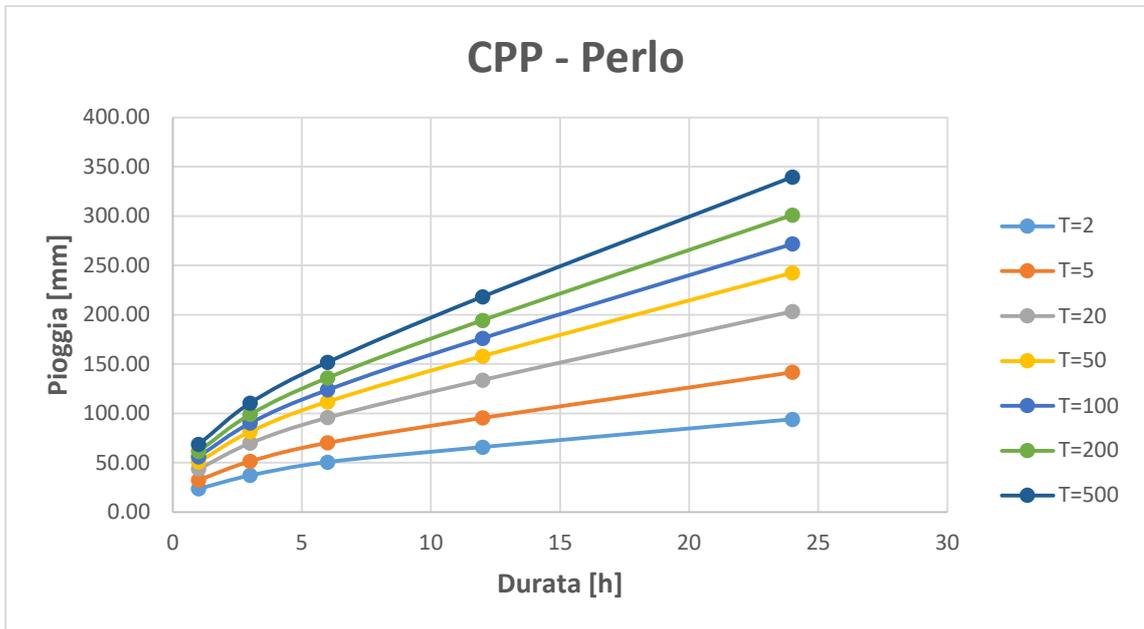


Figura 44: CPP per il pluviografo di Perlo

Monte Berlino

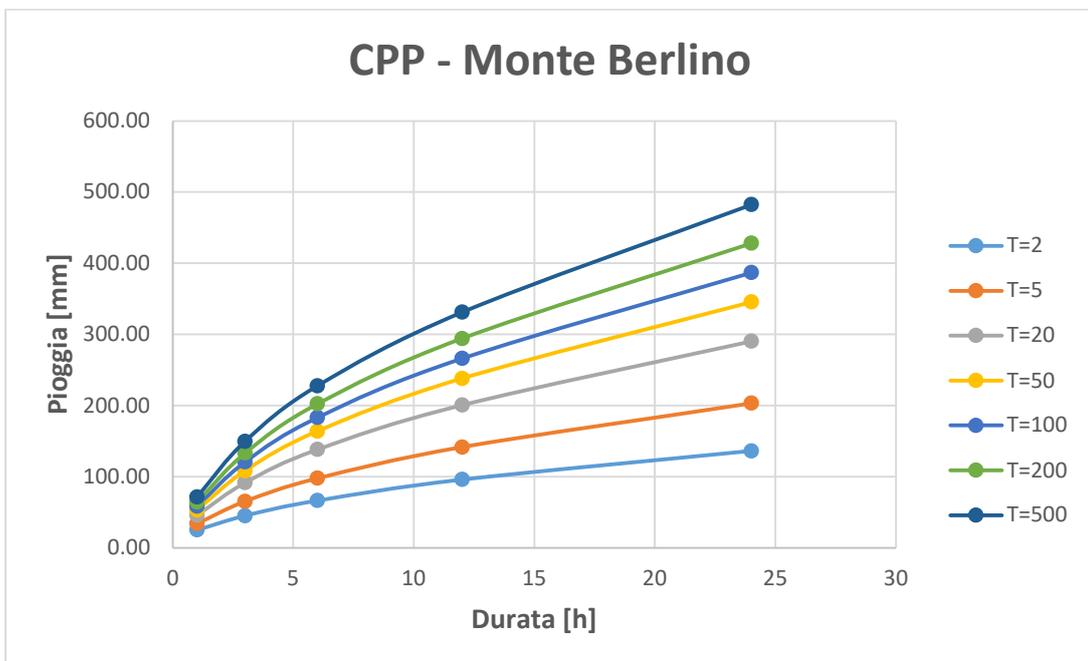


Figura 45: CPP per il pluviografo di Monte Berlino

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Allegato 3 – Sovrapposizione CPP e dati radar

Ormea Centrale

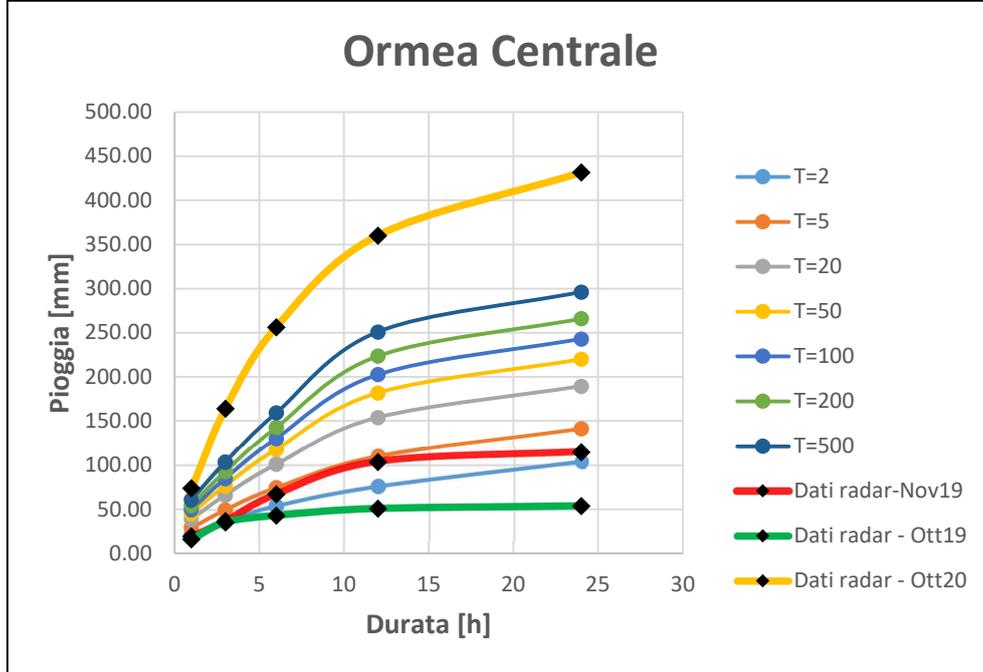


Figura 46: Sovrapposizione dati radar a CPP per Ormea Centrale

Colle San Bernardo

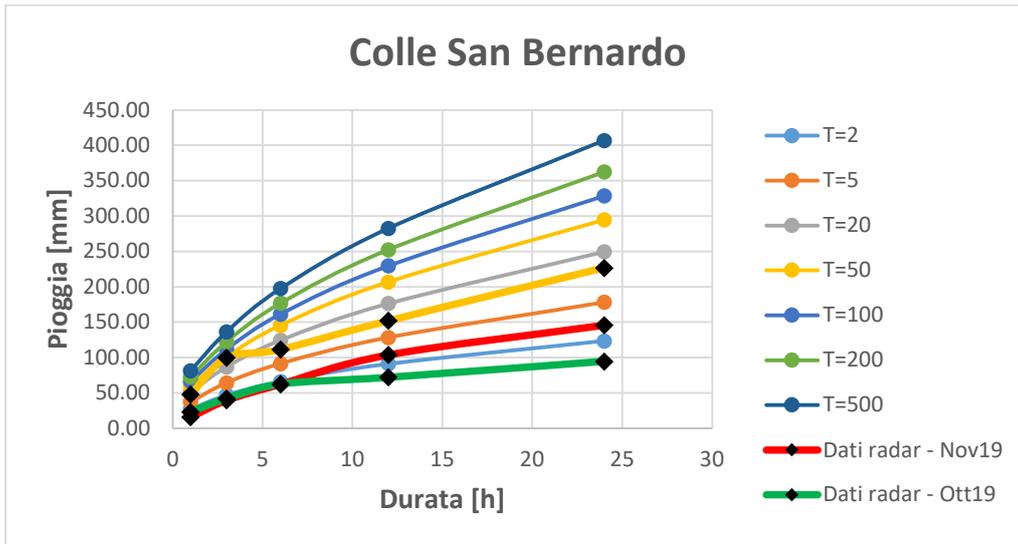


Figura 47: Sovrapposizione dati radar a CPP per Colle San Bernardo

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Ceva Centrale Mazzarelli

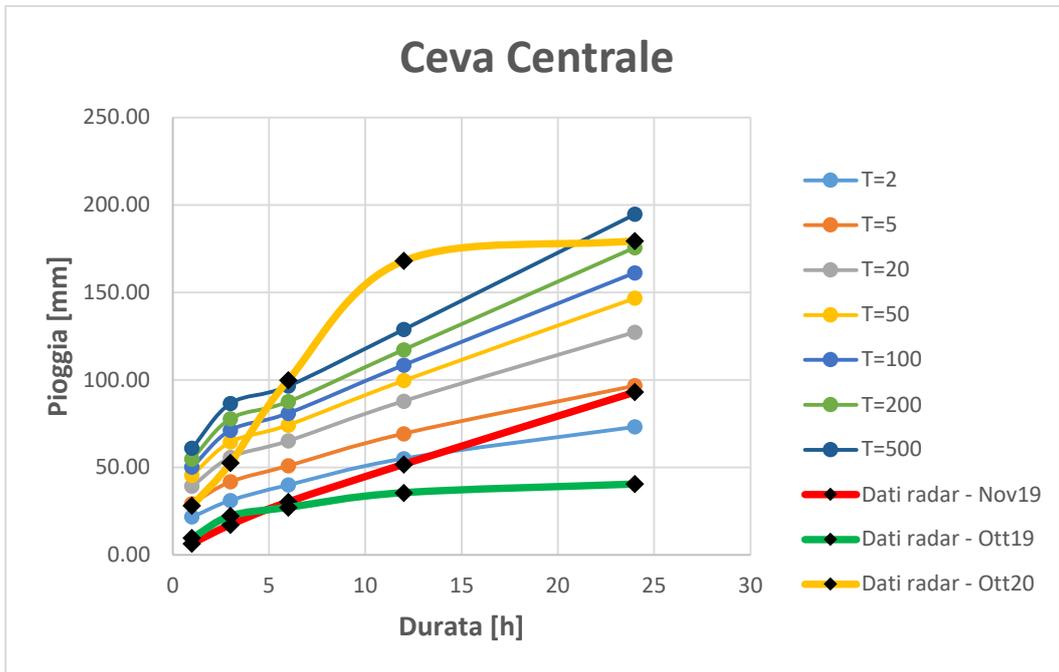


Figura 48: Sovrapposizione di dati radar a CPP per Ceva Centrale

Pamparato

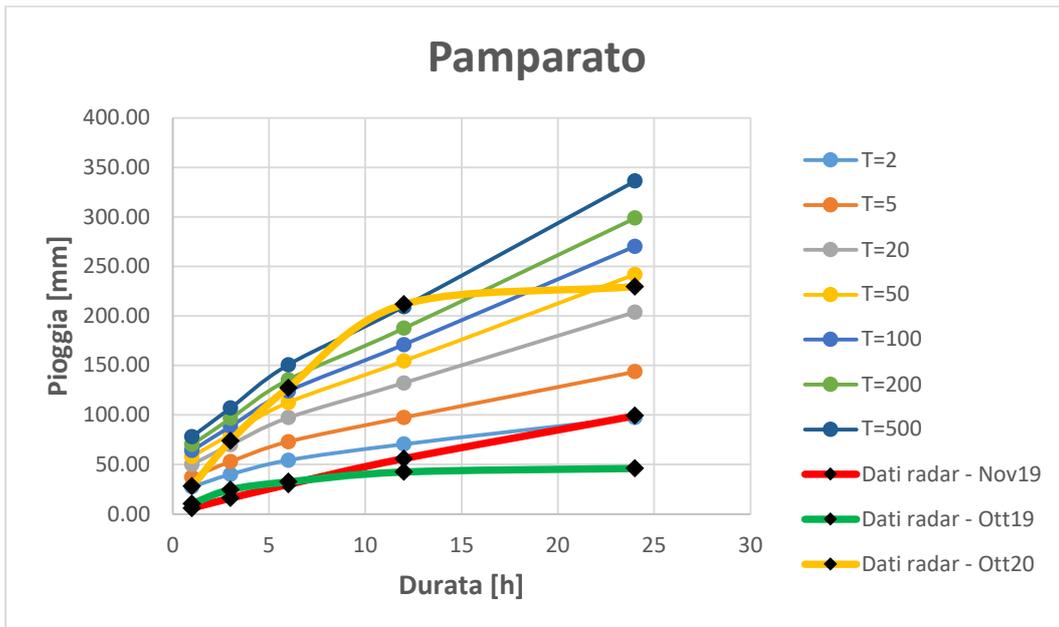


Figura 49: Sovrapposizione di dati radar a CPP per Pamparato

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Perlo

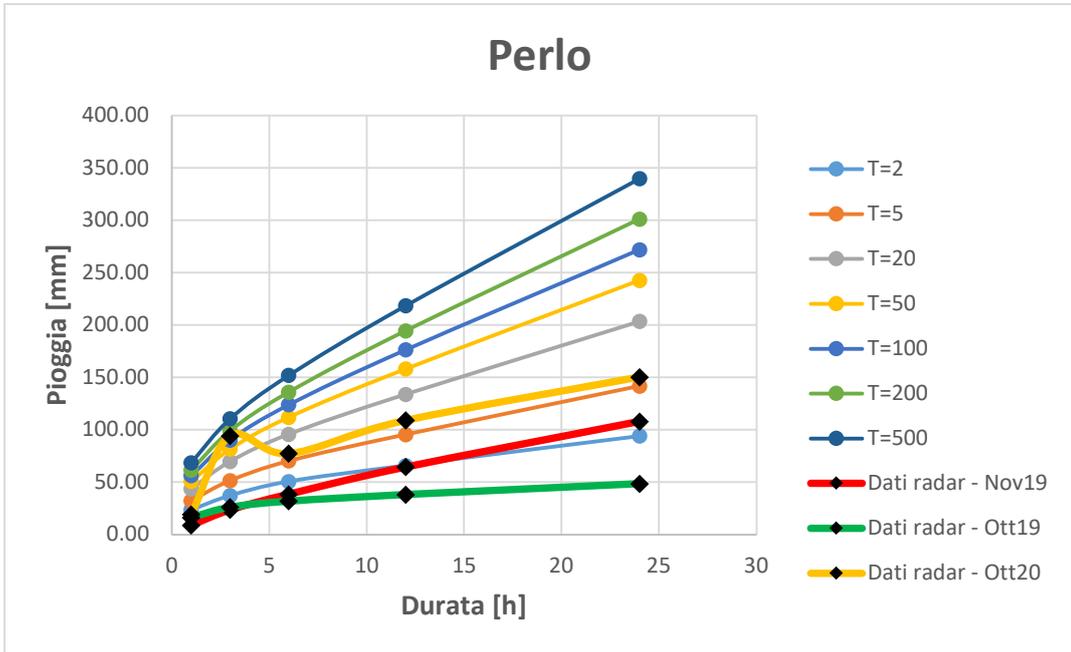


Figura 50: Sovrapposizione di dati radar a CPP per Perlo

Monte Berlino

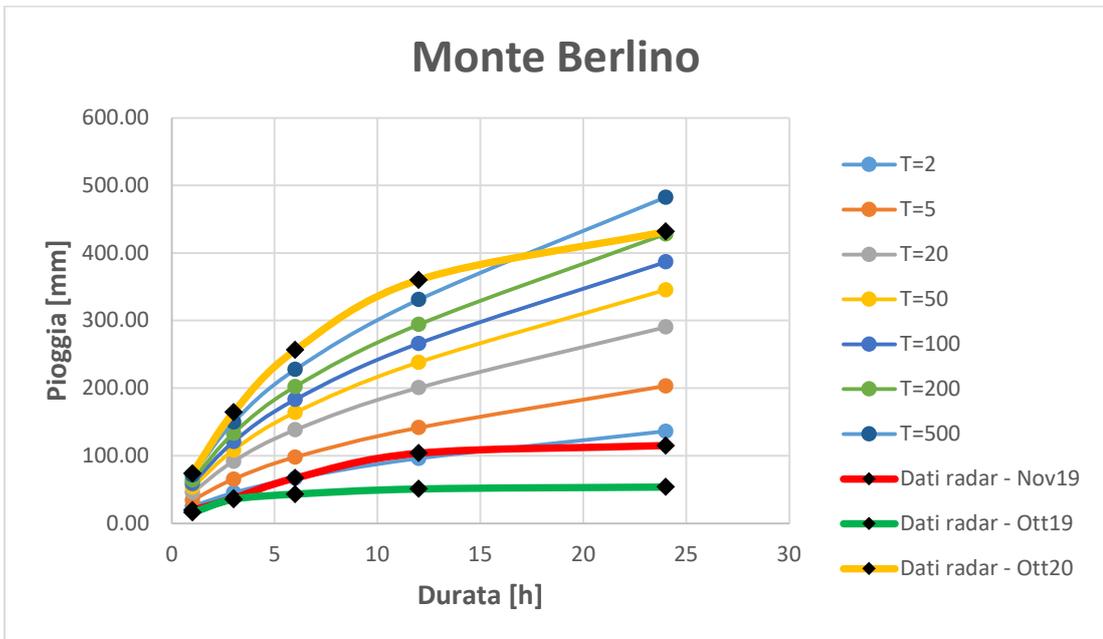


Figura 51: Sovrapposizione di dati radar a CPP per Monte Berlino

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Allegato 4 – Script R

Estrazione, ritaglio del DTM e calcolo di direzioni di drenaggio, di distanze dalla sezione di chiusura e di distanze dall'asta fluviale

```
load('TanaroFarigliano20210113.RData')
ls() # "TanaroFariglianoRaster"
"TanaroFariglianoVector"
library(raster)
TanaroFariglianoRaster
# class      : RasterStack
# dimensions : 577, 552, 318504, 7  (nrow, ncol,
ncell, nlayers)
# resolution : 90, 90  (x, y)
# extent      : 381953.6, 431633.6, 4878345,
4930275  (xmin, xmax, ymin, ymax)
# crs         : +proj=utm +zone=32 +datum=WGS84
+units=m +no_defs +ellps=WGS84 +towgs84=0,0,0
#
names        :      dtm,      drain,      accum,      bas
ins, dist2out, dist2stream, elev2stream
# min values
:      237,      1,      1,      2,
0,      0,      -23
# max values :      2605.00,      8.00,
186228.69,      212.00,      99448.82,      10047.56,      15
72.00
TanaroFariglianoVector
# $boundaries
# class      : SpatialPolygonsDataFrame
# features    : 1
```

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a
monte di Farigliano (CN)

```
# extent      : 381953.6, 431633.6, 4878345,  
4930275 (xmin, xmax, ymin, ymax)  
# crs        : +proj=utm +zone=32 +datum=WGS84  
+units=m +no_defs +ellps=WGS84 +towgs84=0,0,0  
# variables  : 2  
# names      : cat, label  
# value      : 1,  
#  
# $subcatchments  
# class      : SpatialPolygonsDataFrame  
# features   : 106  
# extent     : 381953.6, 431633.6, 4878345,  
4930275 (xmin, xmax, ymin, ymax)  
# crs       : +proj=utm +zone=32 +datum=WGS84  
+units=m +no_defs +ellps=WGS84 +towgs84=0,0,0  
# variables  : 2  
# names      : cat, label  
# min values : 2,  
# max values : 212,  
#  
# $network  
# class      : SpatialLinesDataFrame  
# features   : 106  
# extent     : 385238.6, 427898.6, 4881630,  
4929870 (xmin, xmax, ymin, ymax)  
# crs       : +proj=utm +zone=32 +datum=WGS84  
+units=m +no_defs +ellps=WGS84 +towgs84=0,0,0  
# variables  : 2  
# names      : cat, label  
# min values : 2,  
# max values : 212,
```

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

```
par(mar=c(3,3,2,2)+0.03, mgp=c(1.5,0.3,0), tcl=-.2,
xaxs='r', yaxs='r')
layout(matrix(1:4, nrow=2))
plot(TanaroFariglianoRaster[['dtm']], main='Digital
Elevation Model (m a.s.l.)')
lines(TanaroFariglianoVector[['boundaries']])
lines(TanaroFariglianoVector[['network']], col=4)
plot(TanaroFariglianoRaster[['drain']],
main='Drainage directions (D8 flow)')
lines(TanaroFariglianoVector[['boundaries']])
lines(TanaroFariglianoVector[['network']], col=4)
plot(TanaroFariglianoRaster[['dist2out']]/1000,
main='Distance to outlet (km)')
lines(TanaroFariglianoVector[['boundaries']])
lines(TanaroFariglianoVector[['network']], col=4)
plot(TanaroFariglianoRaster[['dist2stream']]/1000,
main='Distance to stream (km)')
lines(TanaroFariglianoVector[['boundaries']])
lines(TanaroFariglianoVector[['network']], col=4)
```

Ricostruzione di griglie coerenti dei dati radar di precipitazione

```
load('TanaroFariglianoEvents2019-
2020res1km20210120.RData')
library(raster)
ls()
# "precNOV2019" "precOTT2019" "precOTT2020"
# "stprecNOV2019" "stprecOTT2019"
"stprecOTT2020"
# "TanaroFarigliano"
```

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

```
TanaroFarigliano
# class      : RasterStack
# dimensions : 53, 51, 2703, 6  (nrow, ncol, ncell,
nlayers)
# resolution : 1000, 1000  (x, y)
# extent     : 381000, 432000, 4878000,
4931000  (xmin, xmax, ymin, ymax)
# crs       : +proj=utm +zone=32 +datum=WGS84
+units=m +no_defs +ellps=WGS84 +towgs84=0,0,0
# names     : dtm, dist2out,
dist2stream,  cn1,  cn2,  cn3
# min values
: 256, 1288, 127, 19, 34, 53

# max values
: 2329, 99125, 8074, 75, 82, 90

precNOV2019[[1:5]]
# class      : RasterBrick
# dimensions : 110, 150, 16500, 5  (nrow, ncol,
ncell, nlayers)
# resolution : 1000, 1000  (x, y)
# extent     : 350000, 500000, 4860000,
4970000  (xmin, xmax, ymin, ymax)
# crs       : +proj=utm +zone=32 +datum=WGS84
+units=m +no_defs +ellps=WGS84 +towgs84=0,0,0
# source     : memory
# names     : X201911220000, X201911220100,
X201911220200, X201911220300, X201911220400
# min values
```

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

```
:           0,           0,           0,
           0,           0
# max values
:           11.25,           73.32,           59.57,
           48.54,           41.45

stprecNOV2019[,1:4]
# class      : SpatialPointsDataFrame
# features   : 211
# extent     : 344346.6, 507421.5, 4855693,
4975058 (xmin, xmax, ymin, ymax)
# crs       : +proj=utm +zone=32 +datum=WGS84
+units=m +no_defs +ellps=WGS84 +towgs84=0,0,0
# variables  : 4
# names     : 201911220000, 201911220100,
201911220200, 201911220300
# min
values  :           0.0001,           0.0001,           0.0001,
           0.0001
# max
values  :           2.8001,           4.6001,           4.6001,
           7.2001

par(mar=c(3,3,2,4)+0.03, mgp=c(1.5,0.3,0), tcl=-.2,
xaxs='r', yaxs='r')
layout(matrix(1:9, nrow=3))
plot(TanaroFarigliano[['dtm']], main='Digital
Elevation Model (m a.s.l.)')
plot(TanaroFarigliano[['dist2out']]/1000,
main='Distance to outlet (km)')
plot(TanaroFarigliano[['dist2stream']]/1000,
```

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

```
main='Distance to stream (km)')

plot(TanaroFarigliano[['cn1']], main='CN1 (-)',
zlim=c(19,90))
plot(TanaroFarigliano[['cn2']], main='CN2 (-)',
zlim=c(19,90))
plot(TanaroFarigliano[['cn3']], main='CN3 (-)',
zlim=c(19,90))

TotP <- apply(values(precOTT2019), 1, sum,
na.rm=T) # mm
values(r) <- TotP
plot(r, main='Event precip [mm] - 19-25 oct 2019',
zlim=c(0,700))
plot(stprecOTT2019, add=T)
TotP <- apply(values(precNOV2019), 1, sum,
na.rm=T) # mm
values(r) <- TotP
plot(r, main='Event precip [mm] - 22-25 nov 2019',
zlim=c(0,700))
plot(stprecNOV2019, add=T)
TotP <- apply(values(precOTT2020), 1, sum,
na.rm=T) # mm
values(r) <- TotP
plot(r, main='Event precip [mm] - 2-3 oct 2020',
zlim=c(0,700))
plot(stprecOTT2020, add=T)
```

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a
monte di Farigliano (CN)

Ricostruzione serie temporali dei pluviografi considerati ed estrazione dei
massimi per 1, 3, 6, 12 e 24 ore

#evento Nov19

22-01-2021 - Ormea

```
dist <- coordinates(stprecNOV2019) - t(c(415154, 4889920) %*% t(rep(1,  
211)))
```

```
which.min(sqrt(dist[,1]^2 + dist[,2]^2)) # n. 46 a 5 km
```

```
pioggeOrmea <- as.numeric(stprecNOV2019@data[46,])
```

```
max1h <- max(pioggeOrmea); max1h # 19.4 mm
```

```
max3h <- max(filter(pioggeOrmea, rep(1, 3)), na.rm=T) # 37.0 mm
```

```
max6h <- max(filter(pioggeOrmea, rep(1, 6)), na.rm=T) # 67.2 mm
```

```
max12h <- max(filter(pioggeOrmea, rep(1, 12)), na.rm=T) # 104.0 mm
```

```
max24h <- max(filter(pioggeOrmea, rep(1, 24)), na.rm=T) # 115.0 mm
```

```
r <- precOTT2019[[1]]
```

```
TotP <- apply(values(precNOV2019), 1, sum, na.rm=T) # mm
```

```
values(r) <- TotP
```

```
plot(r, main='Event precip [mm] - 22-25 nov 2019', zlim=c(0,700))
```

#Colle San Bernardo

```
dist <- coordinates(stprecNOV2019) - t(c(423980, 4892286) %*% t(rep(1,  
211)))
```

```
which.min(sqrt(dist[,1]^2 + dist[,2]^2)) #n.40
```

```
pioggeCSB <- as.numeric(stprecNOV2019@data[40,])
```

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

```
max1h <- max(pioggeCSB);#16 mm

max3h <- max(filter(pioggeCSB, rep(1, 3)),na.rm=T)#39.99 mm

max6h <- max(filter(pioggeCSB, rep(1, 6)),na.rm=T)#62.6 mm

max12h <- max(filter(pioggeCSB, rep(1, 12)),na.rm=T)#104 mm

max24h <- max(filter(pioggeCSB, rep(1, 24)),na.rm=T)#146 mm

#Ceva

dist <- coordinates(stprecNOV2019) - t(c(423147, 4914990) %*% t(rep(1,
211)))

which.min(sqrt(dist[,1]^2 + dist[,2]^2)) #n.85

pioggeCeva <- as.numeric(stprecNOV2019@data[85,])

max1h <- max(pioggeCeva);#6.6 mm

max3h <- max(filter(pioggeCeva, rep(1, 3)),na.rm=T)#17.4 mm

max6h <- max(filter(pioggeCeva, rep(1, 6)),na.rm=T)#30.4 mm

max12h <- max(filter(pioggeCeva, rep(1, 12)),na.rm=T)#51.8 mm

max24h <- max(filter(pioggeCeva, rep(1, 24)),na.rm=T)#93.20 mm

#Pamparato

dist <- coordinates(stprecNOV2019) - t(c(412659, 4904107) %*% t(rep(1,
211)))

which.min(sqrt(dist[,1]^2 + dist[,2]^2)) #n.57
```

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a
monte di Farigliano (CN)

```
pioggePamp <- as.numeric(stprecNOV2019@data[57,])

max1h <- max(pioggePamp);#6.0 mm

max3h <- max(filter(pioggePamp, rep(1, 3)),na.rm=T)#16.2 mm

max6h <- max(filter(pioggePamp, rep(1, 6)),na.rm=T)#30.0 mm

max12h <- max(filter(pioggePamp, rep(1, 12)),na.rm=T)#56.0 mm

max24h <- max(filter(pioggePamp, rep(1, 24)),na.rm=T)#99.4 mm

#Perlo

dist <- coordinates(stprecNOV2019) - t(c(427006, 4909165) %*% t(rep(1,
211)))

which.min(sqrt(dist[,1]^2 + dist[,2]^2)) #n.72

pioggePerlo <- as.numeric(stprecNOV2019@data[72,])

max1h <- max(pioggePerlo);#9.0 mm

max3h <- max(filter(pioggePerlo, rep(1, 3)),na.rm=T)#23.8 mm

max6h <- max(filter(pioggePerlo, rep(1, 6)),na.rm=T)#38.6 mm

max12h <- max(filter(pioggePerlo, rep(1, 12)),na.rm=T)#64.6 mm

max24h <- max(filter(pioggePerlo, rep(1, 24)),na.rm=T)#108.0 mm

#Monte Berlino

dist <- coordinates(stprecNOV2019) - t(c(414855, 4895385) %*% t(rep(1,
211)))

which.min(sqrt(dist[,1]^2 + dist[,2]^2)) #n.46
```

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a
monte di Farigliano (CN)

```
pioggeMonte <- as.numeric(stprecNOV2019@data[46,])

max1h <- max(pioggeMonte);#19.4 mm

max3h <- max(filter(pioggeMonte, rep(1, 3)),na.rm=T)#37.0 mm

max6h <- max(filter(pioggeMonte, rep(1, 6)),na.rm=T)#67.2 mm

max12h <- max(filter(pioggeMonte, rep(1, 12)),na.rm=T)#104.0 mm

max24h <- max(filter(pioggeMonte, rep(1, 24)),na.rm=T)#115.0 mm

#evento Ott19

#Ormea

dist <- coordinates(stprecOTT2019) - t(c(415154, 4889920) %*% t(rep(1,
211)))

which.min(sqrt(dist[,1]^2 + dist[,2]^2)) # n. 46 a 5 km

pioggeOrmea <- as.numeric(stprecOTT2019@data[46,])

max1h <- max(pioggeOrmea); max1h # 16.2 mm

max3h <- max(filter(pioggeOrmea, rep(1, 3)), na.rm=T) # 35.6 mm

max6h <- max(filter(pioggeOrmea, rep(1, 6)), na.rm=T) # 43.2 mm

max12h <- max(filter(pioggeOrmea, rep(1, 12)), na.rm=T) # 51.0 mm

max24h <- max(filter(pioggeOrmea, rep(1, 24)), na.rm=T) # 54.0 mm

#CSB
```

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

```
dist <- coordinates(stprecOTT2019) - t(c(423980, 4892286) %*% t(rep(1, 211)))
```

```
which.min(sqrt(dist[,1]^2 + dist[,2]^2)) #n.40
```

```
pioggeCSB <- as.numeric(stprecOTT2019@data[40,])
```

```
max1h <- max(pioggeCSB); #23.6 mm
```

```
max3h <- max(filter(pioggeCSB, rep(1, 3)),na.rm=T) #42.4 mm
```

```
max6h <- max(filter(pioggeCSB, rep(1, 6)),na.rm=T) #62.8 mm
```

```
max12h <- max(filter(pioggeCSB, rep(1, 12)),na.rm=T) #72.4 mm
```

```
max24h <- max(filter(pioggeCSB, rep(1, 24)),na.rm=T) #94.8 mm
```

```
# Ceva
```

```
dist <- coordinates(stprecOTT2019) - t(c(423147, 4914990) %*% t(rep(1, 211)))
```

```
which.min(sqrt(dist[,1]^2 + dist[,2]^2)) #n.85
```

```
pioggeCeva <- as.numeric(stprecOTT2019@data[85,])
```

```
max1h <- max(pioggeCeva); #9.8 mm
```

```
max3h <- max(filter(pioggeCeva, rep(1, 3)),na.rm=T) #22.4 mm
```

```
max6h <- max(filter(pioggeCeva, rep(1, 6)),na.rm=T) #27.2 mm
```

```
max12h <- max(filter(pioggeCeva, rep(1, 12)),na.rm=T) #35.6 mm
```

```
max24h <- max(filter(pioggeCeva, rep(1, 24)),na.rm=T) #40.6 mm
```

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a
monte di Farigliano (CN)

Pamparato

```
dist <- coordinates(stprecOTT2019) - t(c(412659, 4904107) %*% t(rep(1, 211)))
```

```
which.min(sqrt(dist[,1]^2 + dist[,2]^2)) #n.57
```

```
pioggePamp <- as.numeric(stprecOTT2019@data[57,])
```

```
max1h <- max(pioggePamp); #10.6 mm
```

```
max3h <- max(filter(pioggePamp, rep(1, 3)),na.rm=T) #24.8 mm
```

```
max6h <- max(filter(pioggePamp, rep(1, 6)),na.rm=T) #32.6 mm
```

```
max12h <- max(filter(pioggePamp, rep(1, 12)),na.rm=T) #42.6 mm
```

```
max24h <- max(filter(pioggePamp, rep(1, 24)),na.rm=T) #46.2 mm
```

Perlo

```
dist <- coordinates(stprecOTT2019) - t(c(427006, 4909165) %*% t(rep(1, 211)))
```

```
which.min(sqrt(dist[,1]^2 + dist[,2]^2)) #n.72
```

```
pioggePerlo <- as.numeric(stprecOTT2019@data[72,])
```

```
max1h <- max(pioggePerlo); #16.4 mm
```

```
max3h <- max(filter(pioggePerlo, rep(1, 3)),na.rm=T) #26.2 mm
```

```
max6h <- max(filter(pioggePerlo, rep(1, 6)),na.rm=T) #32.0 mm
```

```
max12h <- max(filter(pioggePerlo, rep(1, 12)),na.rm=T) #38.2 mm
```

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a
monte di Farigliano (CN)

```
max24h <- max(filter(pioggePerlo, rep(1, 24)),na.rm=T) #48.6 mm
```

```
# Monte Berlino
```

```
dist <- coordinates(stprecOTT2019) - t(c(414855, 4895385) %*% t(rep(1,  
211)))
```

```
which.min(sqrt(dist[,1]^2 + dist[,2]^2)) #n.46
```

```
pioggeMonte <- as.numeric(stprecOTT2019@data[46,])
```

```
max1h <- max(pioggeMonte); #16.2 mm
```

```
max3h <- max(filter(pioggeMonte, rep(1, 3)),na.rm=T) #35.6 mm
```

```
max6h <- max(filter(pioggeMonte, rep(1, 6)),na.rm=T) #43.2 mm
```

```
max12h <- max(filter(pioggeMonte, rep(1, 12)),na.rm=T) #51.0 mm
```

```
max24h <- max(filter(pioggeMonte, rep(1, 24)),na.rm=T) #54.0 mm
```

```
# Evento Ott20
```

```
#Ormea
```

```
dist <- coordinates(stprecOTT2020) - t(c(415154, 4889920) %*% t(rep(1,  
212)))
```

```
which.min(sqrt(dist[,1]^2 + dist[,2]^2)) # n. 46 a 5 km
```

```
pioggeOrmea <- as.numeric(stprecOTT2020@data[46,])
```

```
max1h <- max(pioggeOrmea); max1h # 74 mm
```

```
max3h <- max(filter(pioggeOrmea, rep(1, 3)), na.rm=T) # 164.4 mm
```

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a
monte di Farigliano (CN)

```
max6h <- max(filter(pioggeOrmea, rep(1, 6)), na.rm=T) # 256.6 mm  
max12h <- max(filter(pioggeOrmea, rep(1, 12)), na.rm=T) # 360.4 mm  
max24h <- max(filter(pioggeOrmea, rep(1, 24)), na.rm=T) # 431.8 mm
```

#CSB

```
dist <- coordinates(stprecOTT2020) - t(c(423980, 4892286) %*% t(rep(1,  
212)))
```

```
which.min(sqrt(dist[,1]^2 + dist[,2]^2)) #n.40
```

```
pioggeCSB <- as.numeric(stprecOTT2020@data[40,])
```

```
max1h <- max(pioggeCSB); #48.4 mm
```

```
max3h <- max(filter(pioggeCSB, rep(1, 3)),na.rm=T) #100 mm
```

```
max6h <- max(filter(pioggeCSB, rep(1, 6)),na.rm=T) #111.8 mm
```

```
max12h <- max(filter(pioggeCSB, rep(1, 12)),na.rm=T) #152.4 mm
```

```
max24h <- max(filter(pioggeCSB, rep(1, 24)),na.rm=T) #227.0 mm
```

Ceva

```
dist <- coordinates(stprecOTT2020) - t(c(423147, 4914990) %*% t(rep(1,  
212)))
```

```
which.min(sqrt(dist[,1]^2 + dist[,2]^2)) #n.85
```

```
pioggeCeva <- as.numeric(stprecOTT2020@data[85,])
```

```
max1h <- max(pioggeCeva); #28.2 mm
```

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a
monte di Farigliano (CN)

```
max3h <- max(filter(pioggeCeva, rep(1, 3)),na.rm=T) #52.8 mm
max6h <- max(filter(pioggeCeva, rep(1, 6)),na.rm=T) #100 mm
max12h <- max(filter(pioggeCeva, rep(1, 12)),na.rm=T) #168.2 mm
max24h <- max(filter(pioggeCeva, rep(1, 24)),na.rm=T) #179.6 mm

# Pamparato

dist <- coordinates(stprecOTT2020) - t(c(412659, 4904107) %*% t(rep(1,
212)))

which.min(sqrt(dist[,1]^2 + dist[,2]^2)) #n.57

pioggePamp <- as.numeric(stprecOTT2020@data[57,])

max1h <- max(pioggePamp); #28.2 mm

max3h <- max(filter(pioggePamp, rep(1, 3)),na.rm=T) #74 mm
max6h <- max(filter(pioggePamp, rep(1, 6)),na.rm=T) #127.6 mm
max12h <- max(filter(pioggePamp, rep(1, 12)),na.rm=T) #211.8 mm
max24h <- max(filter(pioggePamp, rep(1, 24)),na.rm=T) #229.8 mm

#Perlo

dist <- coordinates(stprecOTT2020) - t(c(427006, 4909165) %*% t(rep(1,
212)))

which.min(sqrt(dist[,1]^2 + dist[,2]^2)) #n.72

pioggePerlo <- as.numeric(stprecOTT2020@data[72,])

max1h <- max(pioggePerlo); #19.4 mm
```

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a
monte di Farigliano (CN)

```
max3h <- max(filter(pioggePerlo, rep(1, 3)),na.rm=T) #94.4 mm  
max6h <- max(filter(pioggePerlo, rep(1, 6)),na.rm=T) #77.4 mm  
max12h <- max(filter(pioggePerlo, rep(1, 12)),na.rm=T) #109.2 mm  
max24h <- max(filter(pioggePerlo, rep(1, 24)),na.rm=T) #150.4 mm
```

#Monte Berlino

```
dist <- coordinates(stprecOTT2020) - t(c(414855, 4895385) %*% t(rep(1,  
212)))  
which.min(sqrt(dist[,1]^2 + dist[,2]^2)) #n.46  
pioggeMonte <- as.numeric(stprecOTT2020@data[46,])  
max1h <- max(pioggeMonte); #74 mm  
max3h <- max(filter(pioggeMonte, rep(1, 3)),na.rm=T) #164.4 mm  
max6h <- max(filter(pioggeMonte, rep(1, 6)),na.rm=T) #256.6 mm  
max12h <- max(filter(pioggeMonte, rep(1, 12)),na.rm=T) #360.4 mm  
max24h <- max(filter(pioggeMonte, rep(1, 24)),na.rm=T) #431.8 mm
```

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Allegato 5 – Output di R

Valori dei CN

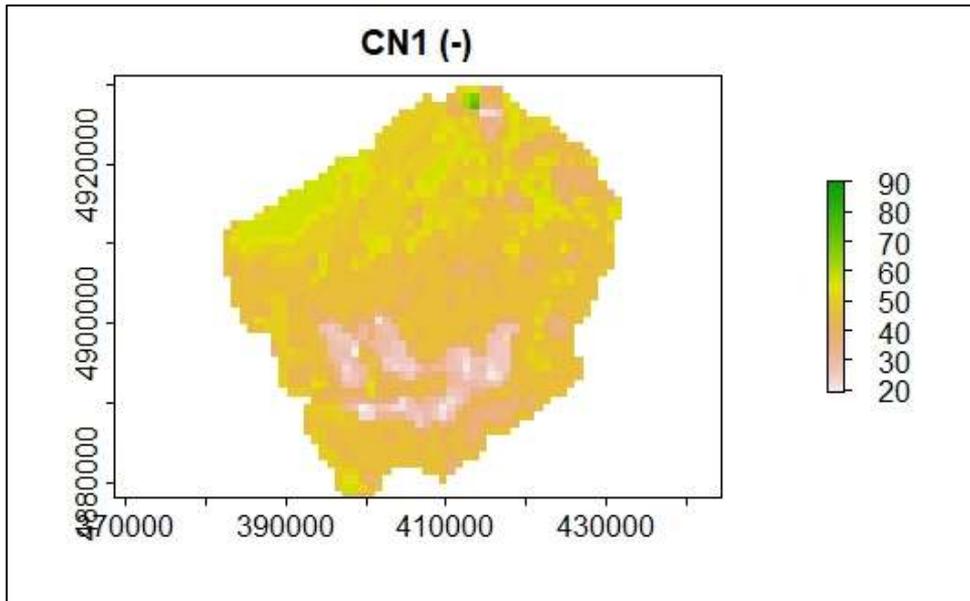


Figura 52: Grigliato del CN1 per il bacino considerato.

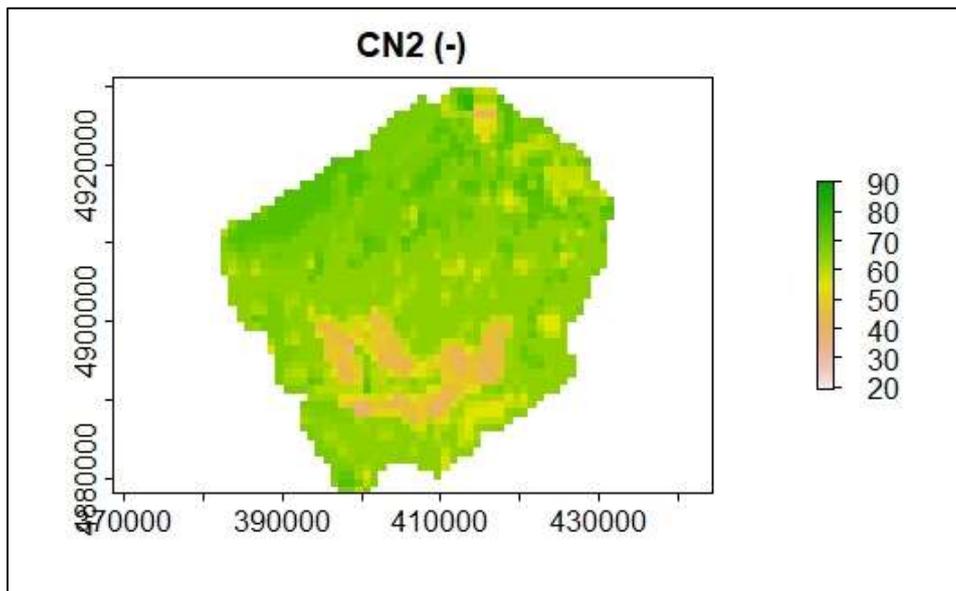


Figura 53: Grigliato del CN2 per il bacino considerato.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

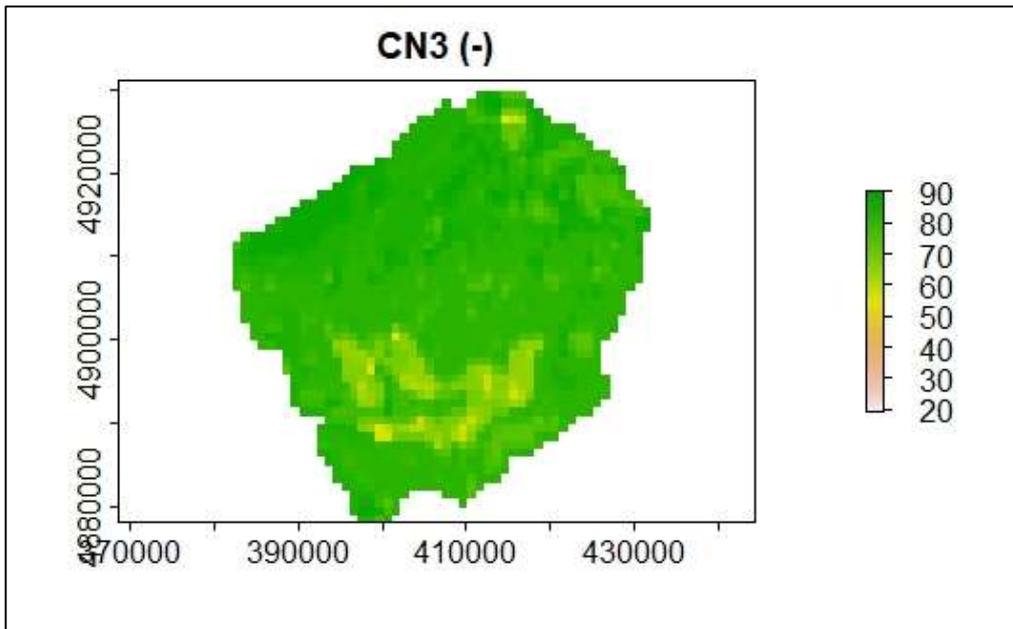


Figura 54: Grigliato del CN3 per il bacino considerato.

Dati radar di pioggia

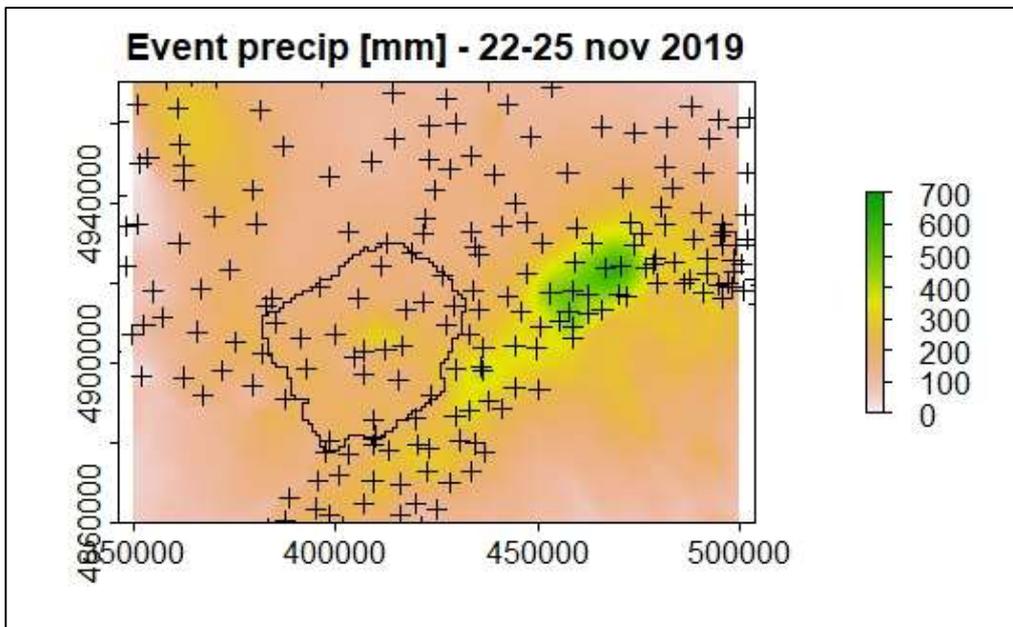


Figura 55: Dati radar di pioggia dell'evento di novembre 2019 per il bacino considerato.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

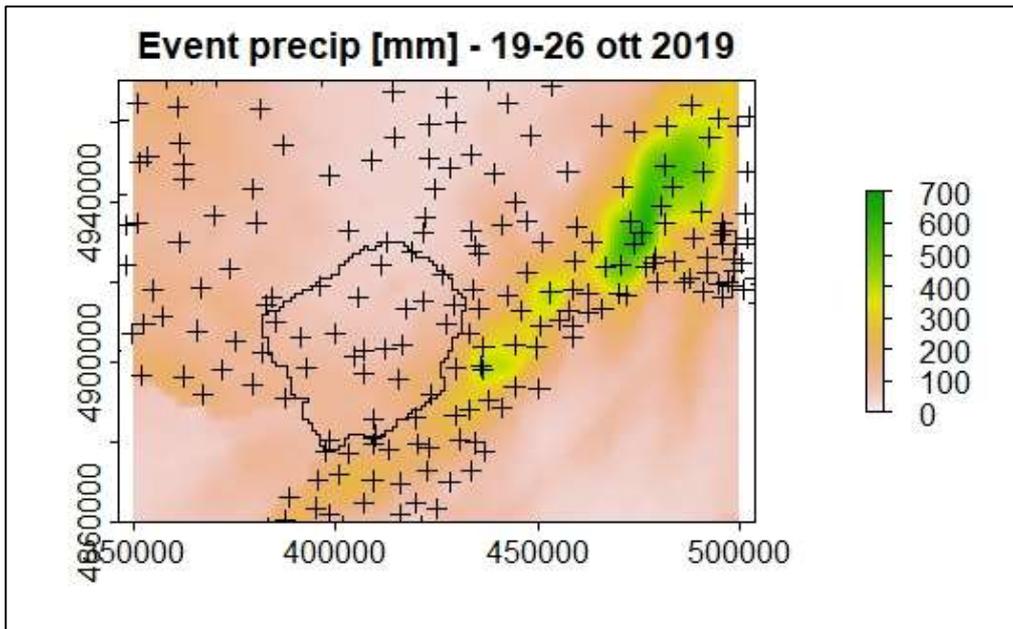


Figura 56: Dati radar di pioggia dell'evento di ottobre 2019 per il bacino considerato.

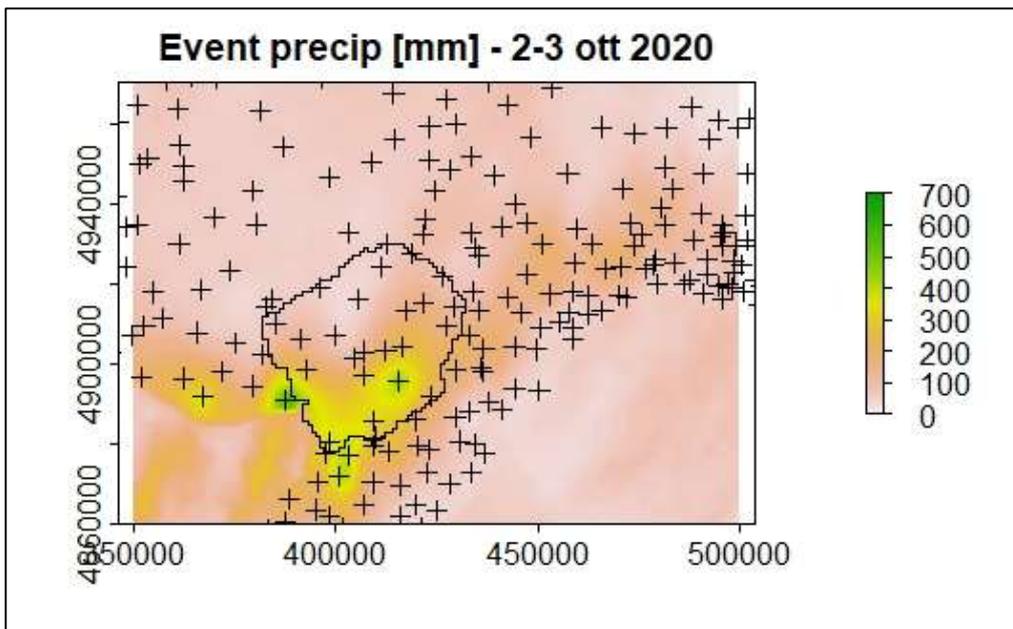


Figura 57: Dati radar di pioggia dell'evento di ottobre 2020 per il bacino considerato.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Dalle figure precedenti si evince che gli eventi del 2019 presentano i valori massimi delle precipitazioni al di fuori del bacino del Tanaro chiuso a Farigliano. Questo spiega l'andamento delle curve sovrapposte alle CPP che si attestano su valori di tempi di ritorno di circa 5 anni. L'evento di ottobre 2020 invece risulta maggiormente centrato sul bacino di interesse, con valori di circa 400 mm concentrati nell'alta valle Tanaro.

Idrogrammi dei sottobacini

Novembre 2019

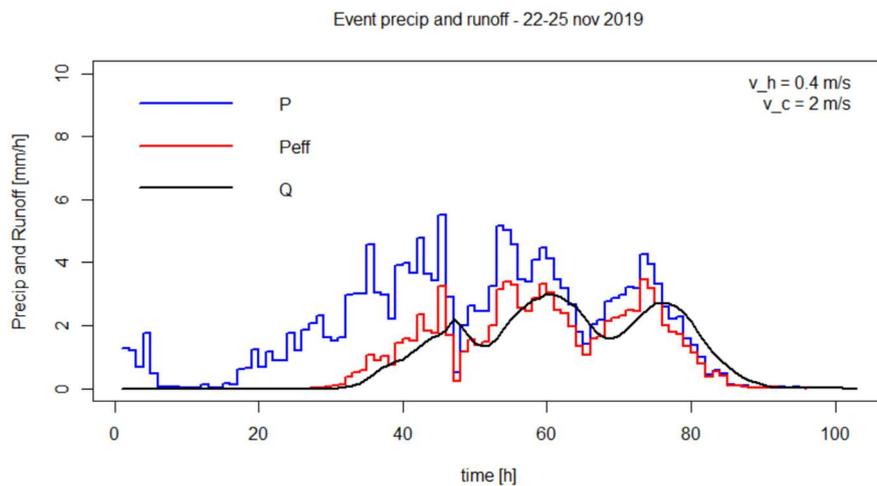


Figura 58: BROMA

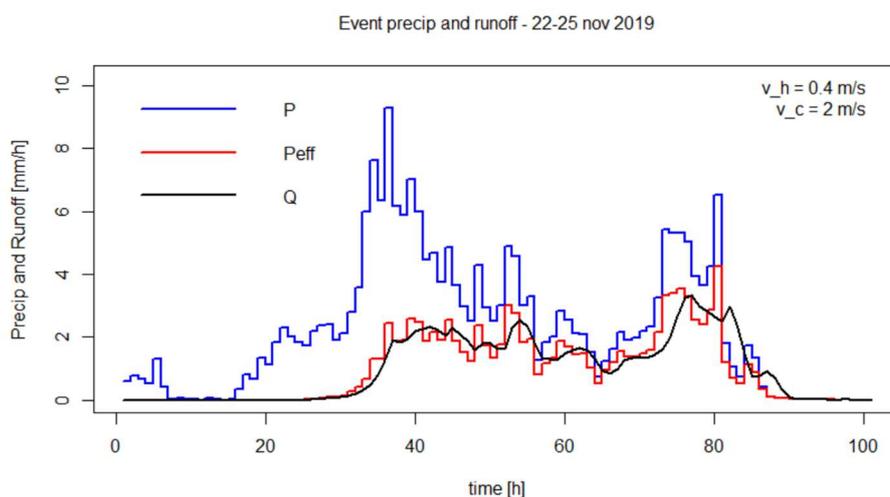


Figura 59: CASMO

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

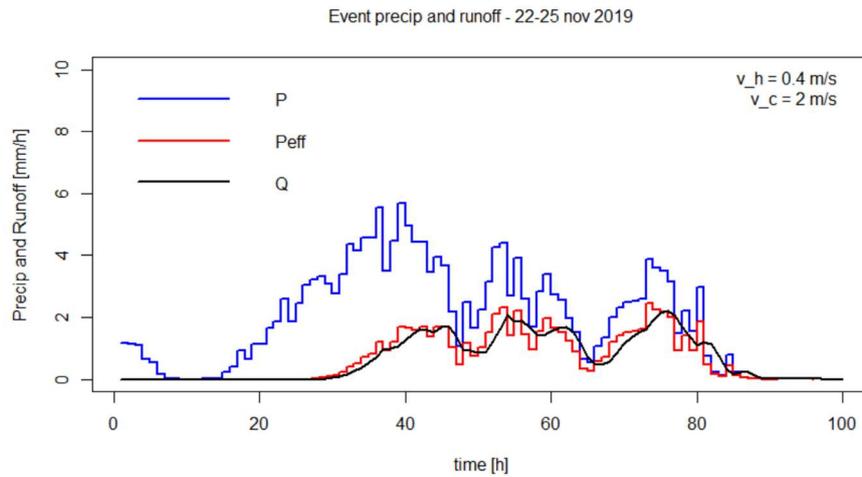


Figura 60: CORFS

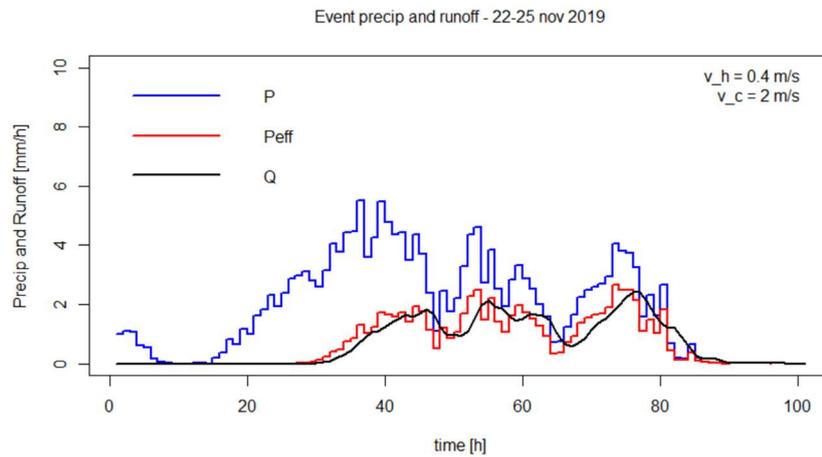


Figura 61: CORPM

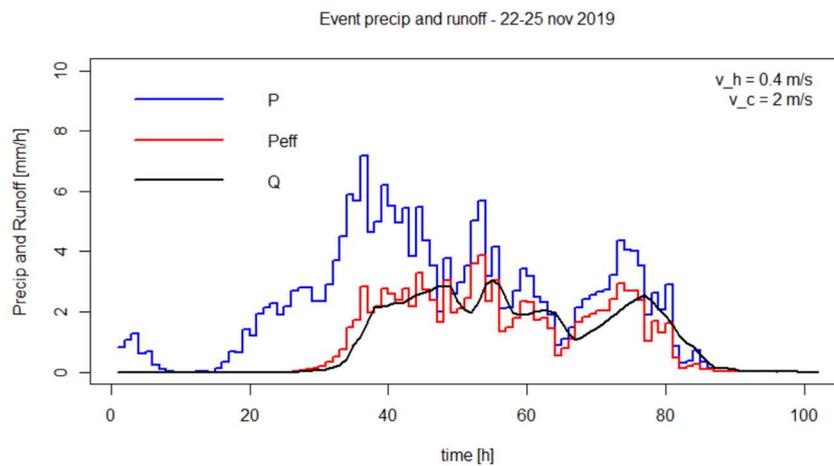


Figura 62: CORTM

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

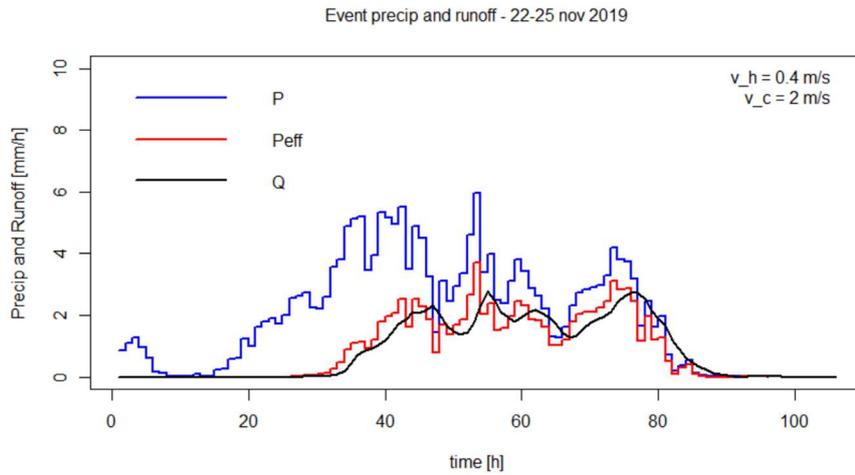


Figura 63: ELLMO

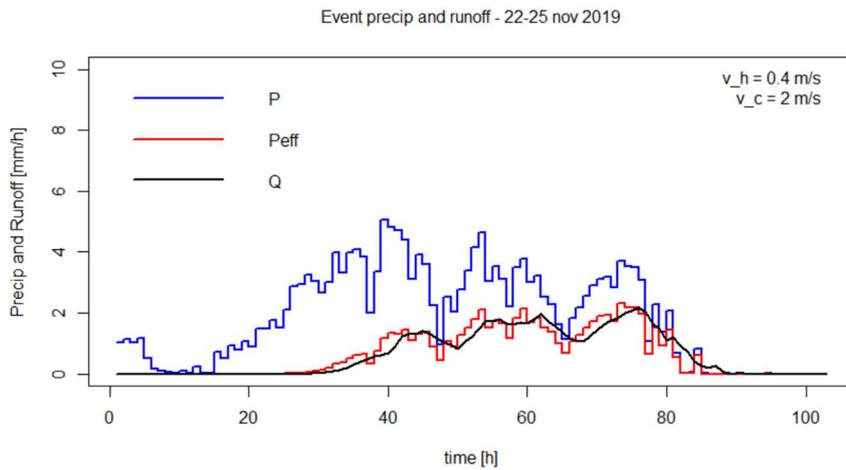


Figura 64: ELLRA

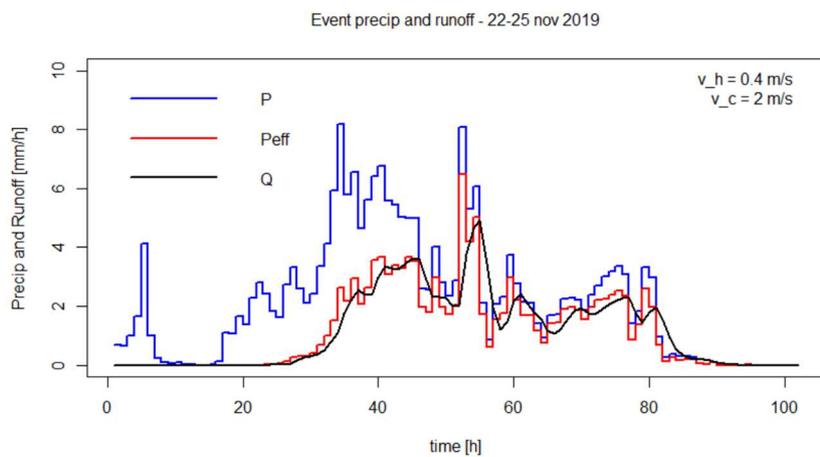


Figura 65: MONMO

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

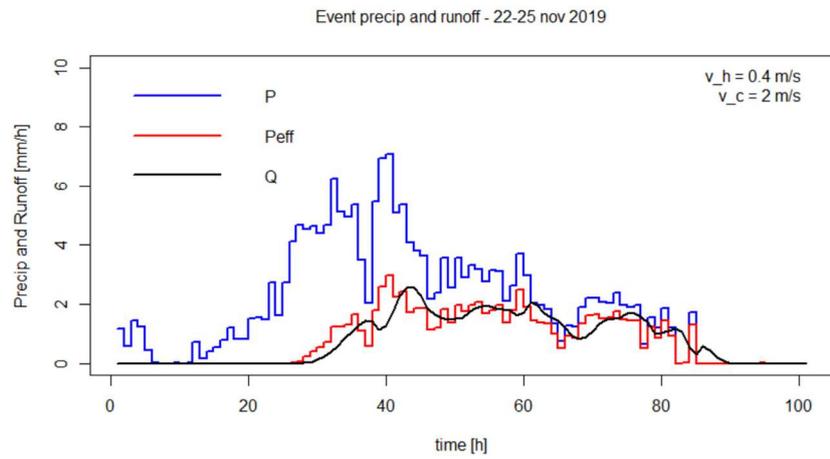


Figura 66: NEGPO

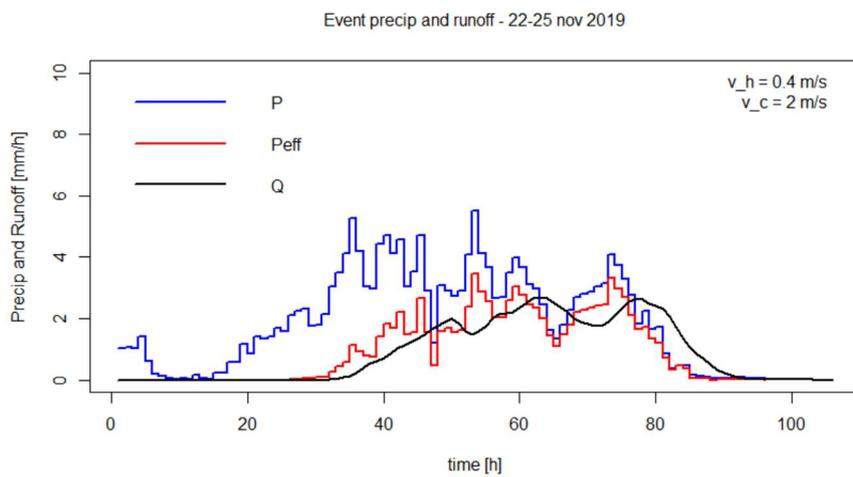


Figura 67: PESCA

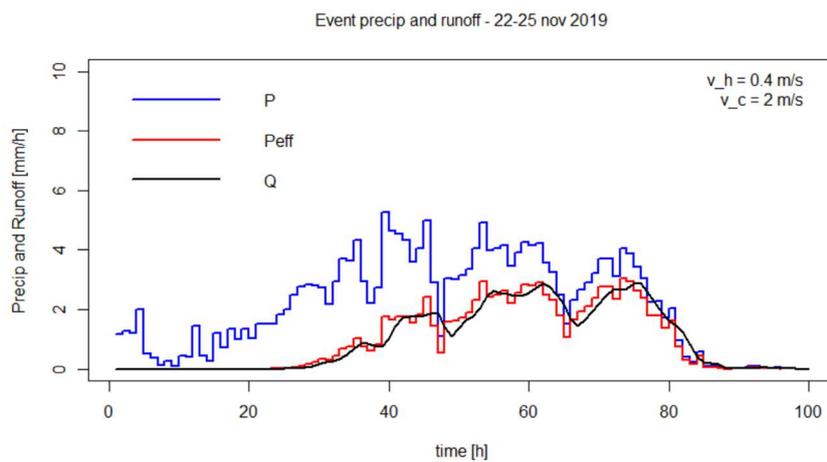


Figura 68: PESSB

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

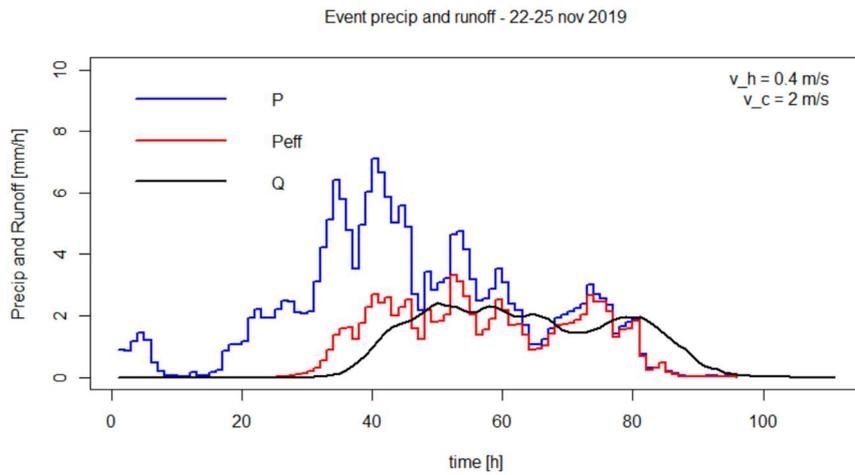


Figura 69: TANCL

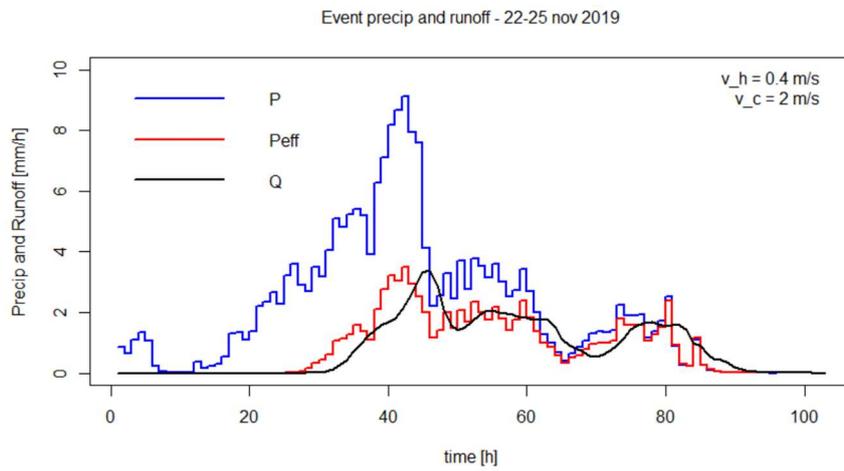


Figura 70: TANGA

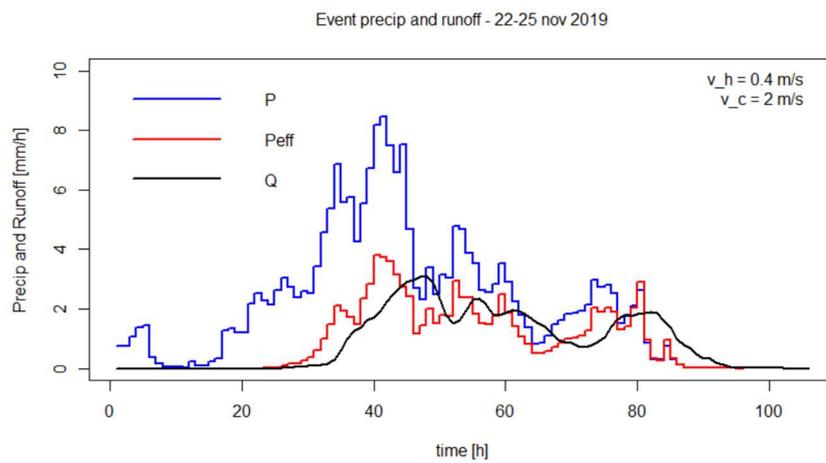


Figura 71: TANNU

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

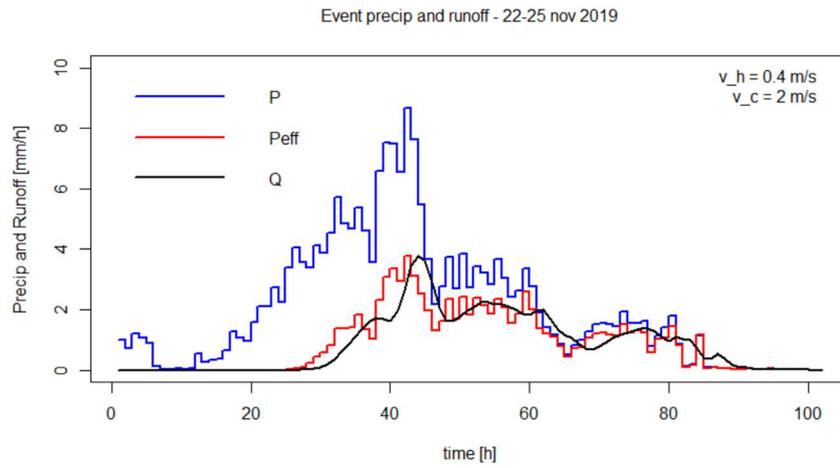


Figura 72: TANOR

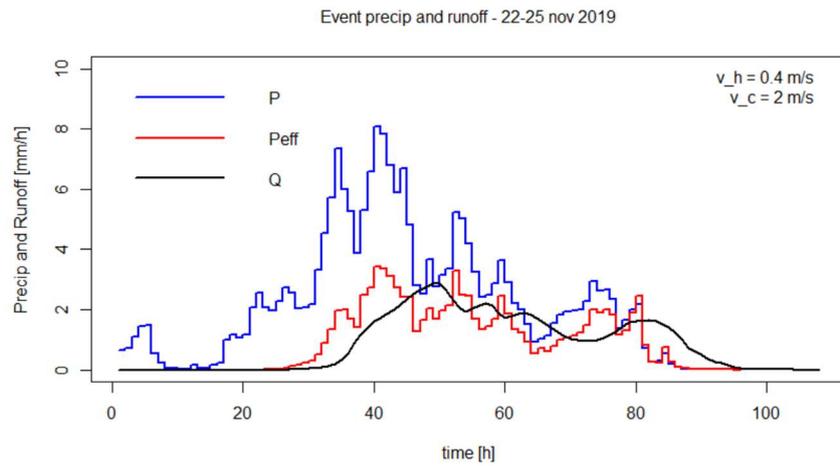


Figura 73: TANPI

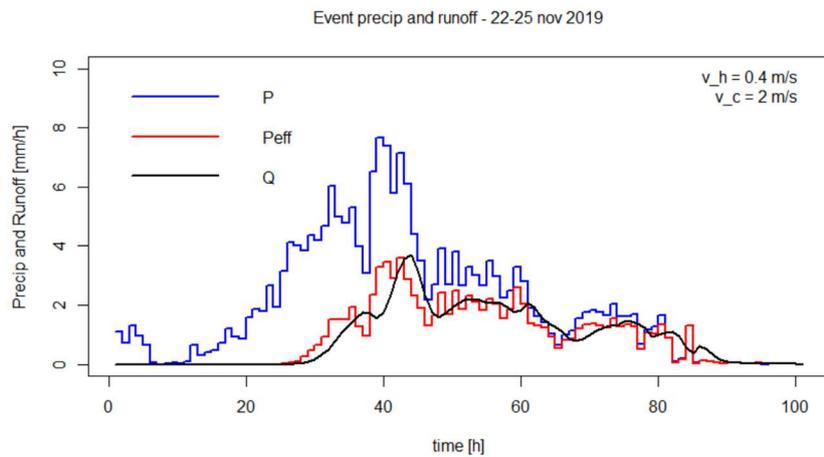


Figura 74: TANPN

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Ottobre 2020

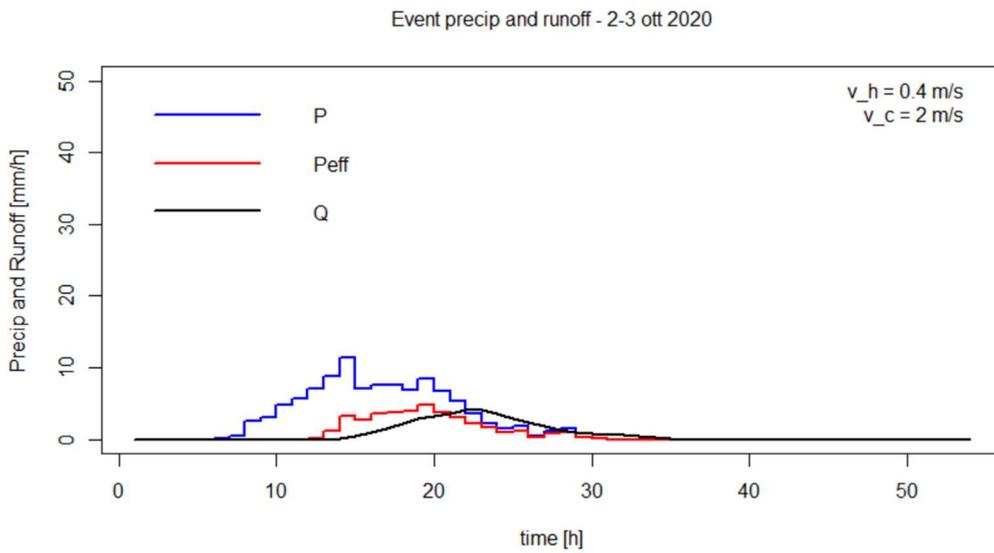


Figura 75: BROMA

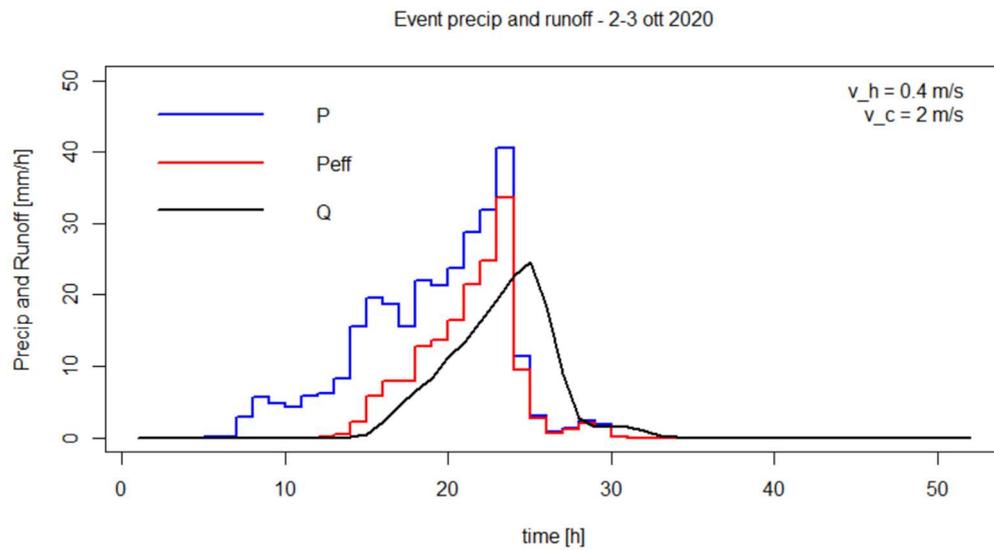


Figura 76: CASMO

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

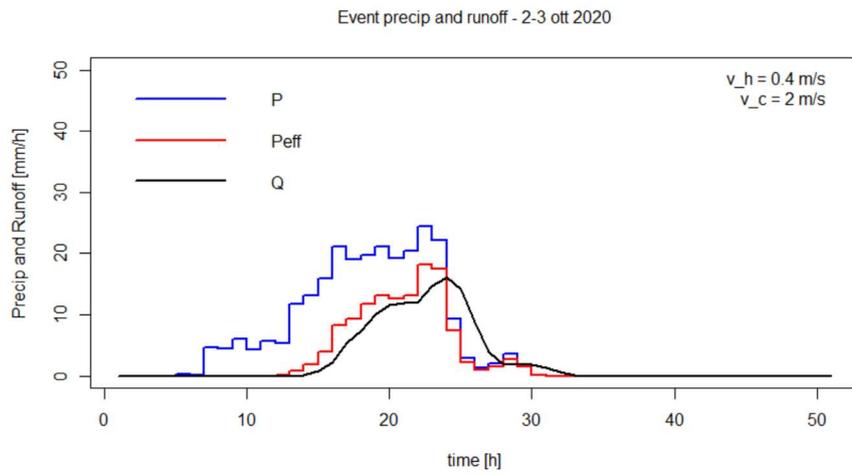


Figura 77: CORFS

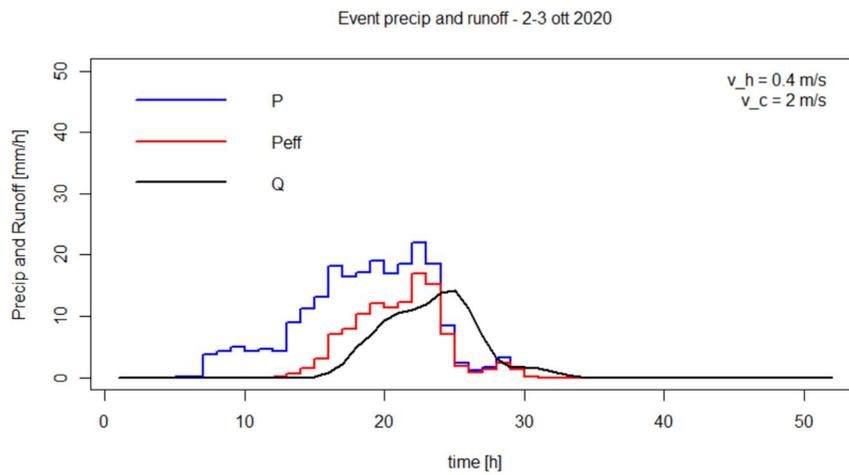


Figura 78: CORPM

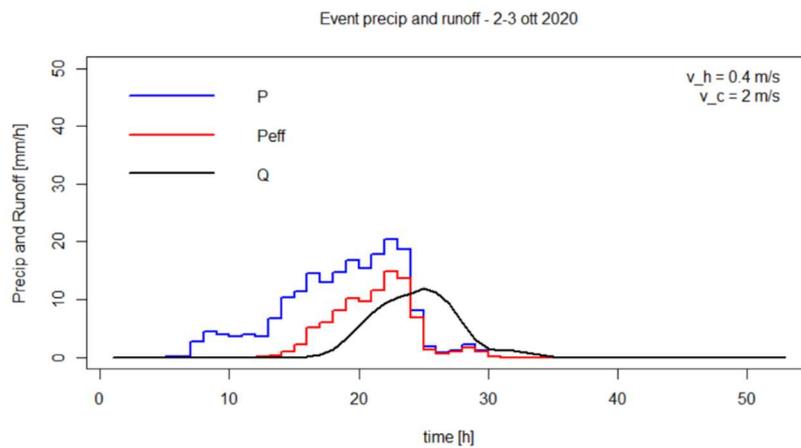


Figura 79: CORTM

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

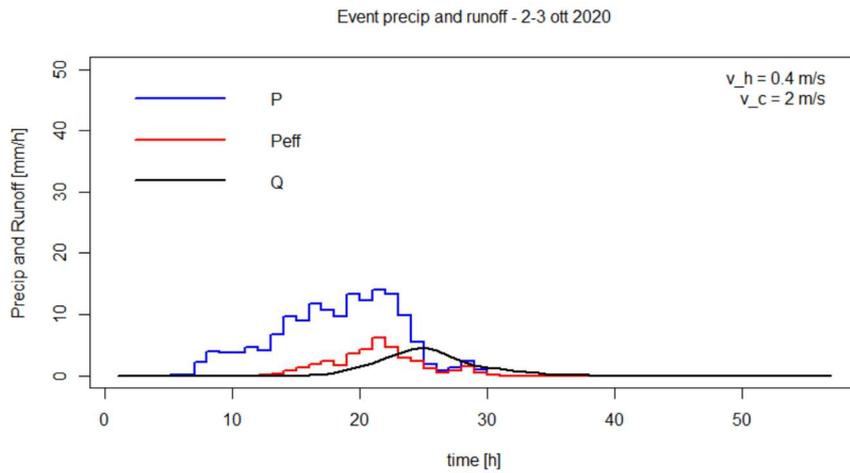


Figura 80: ELLMO

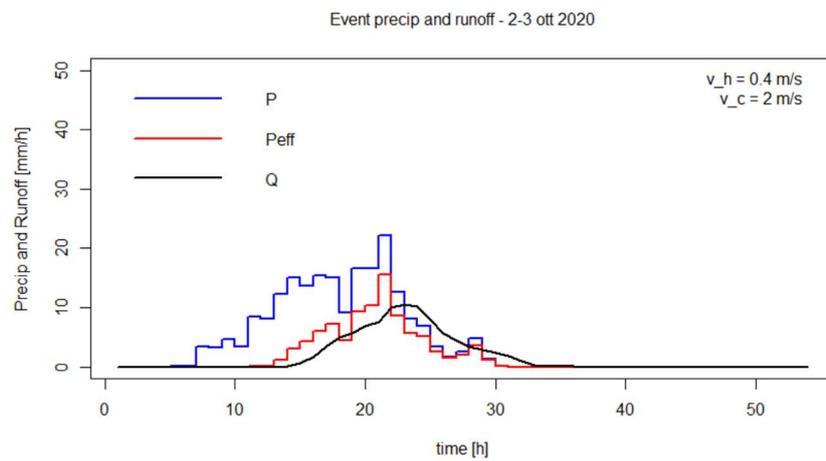


Figura 81: ELLRA

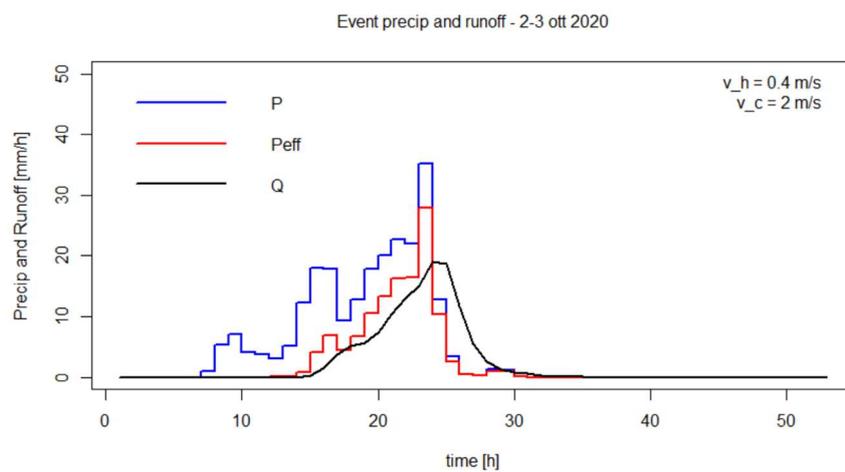


Figura 82: MONMO

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

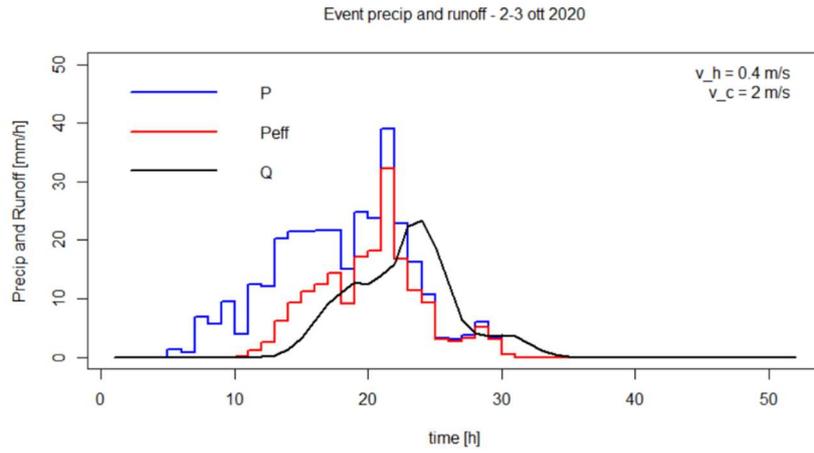


Figura 83: NEGPO

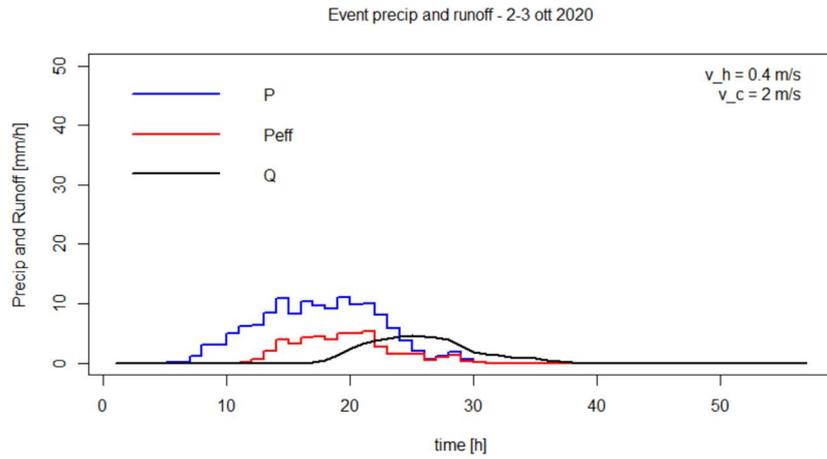


Figura 84: PESCA

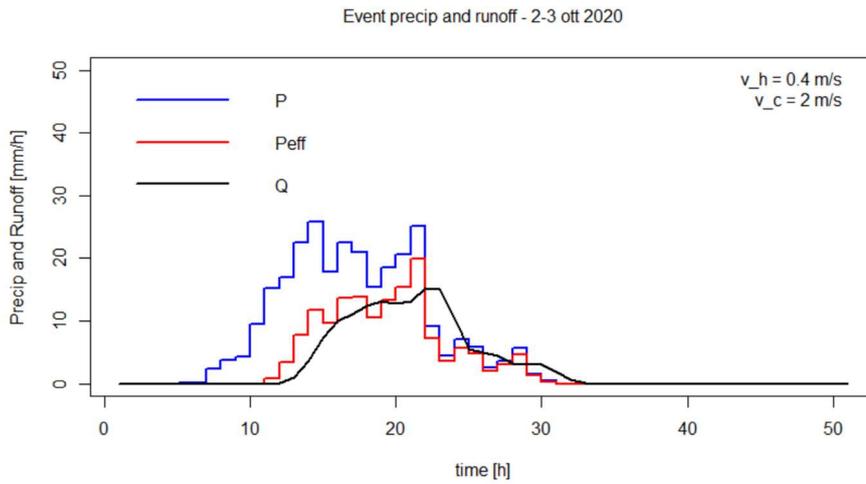


Figura 85: PESSB

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

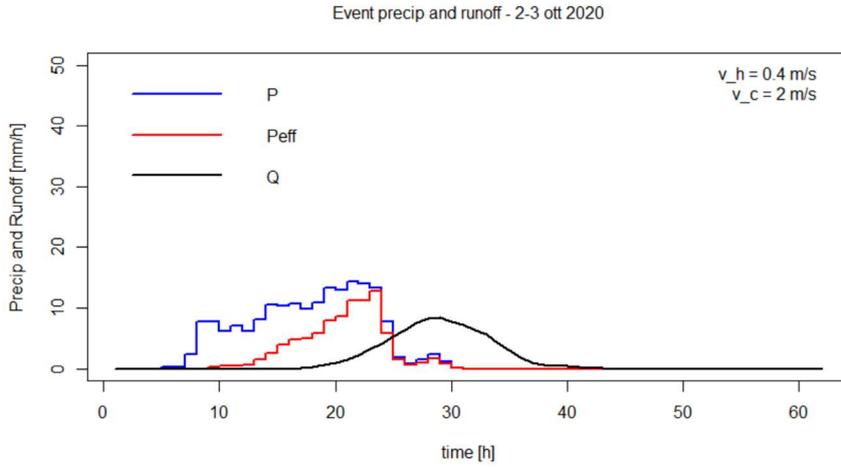


Figura 86: TANCL

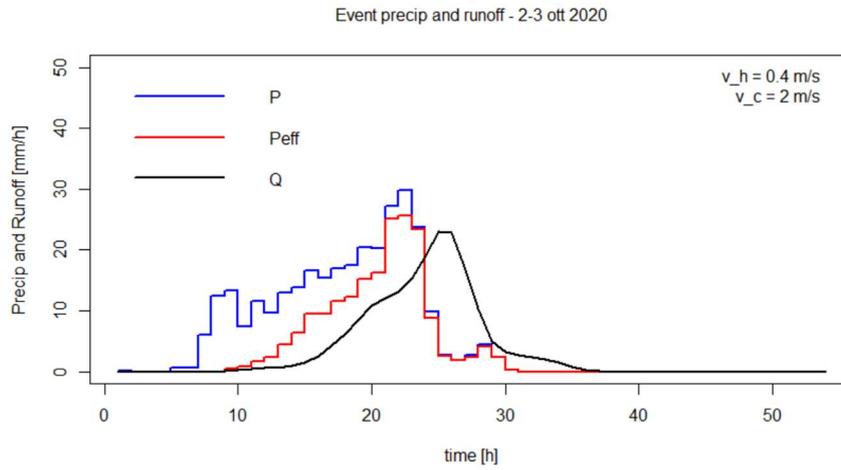


Figura 87: TANGA

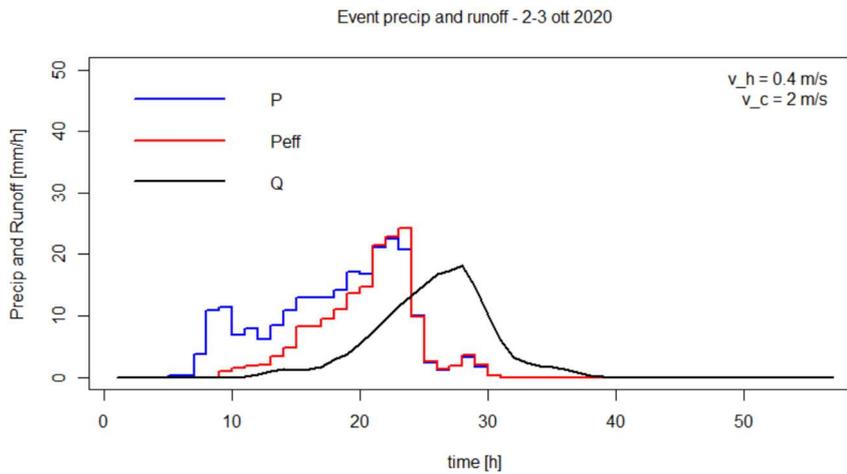


Figura 88: TANNU

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

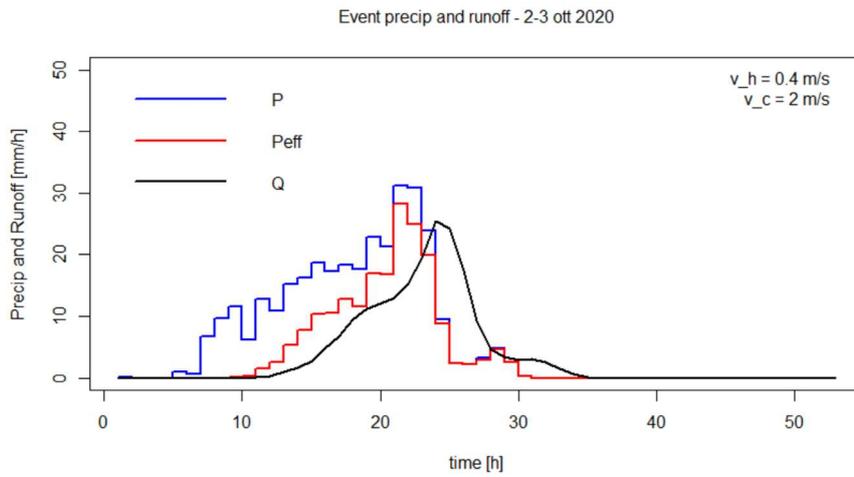


Figura 89: TANOR

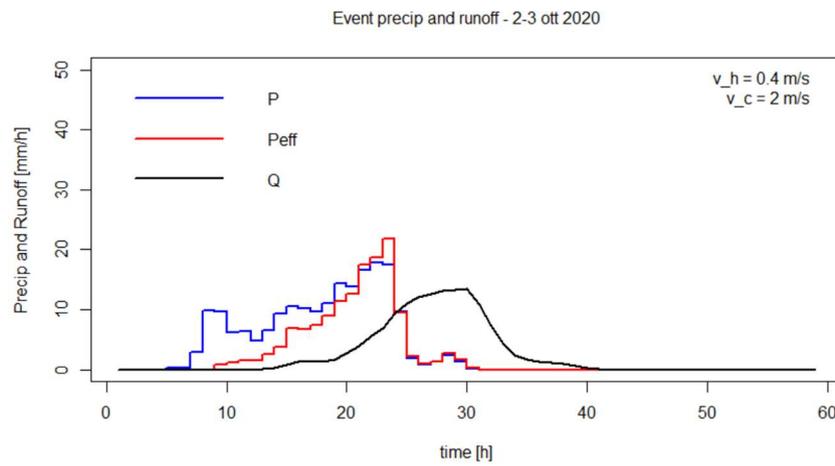


Figura 90: TANPI

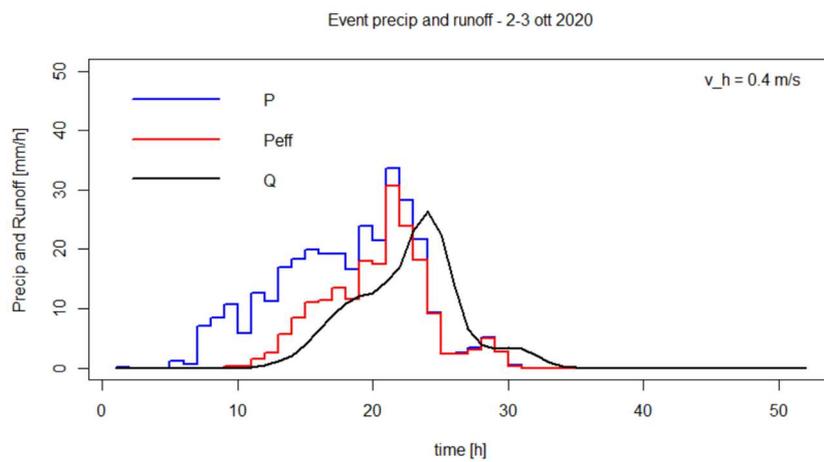


Figura 91: TANPN

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Idrogrammi Scenario A: evento ottobre 2019 con pioggia dell'alessandrino

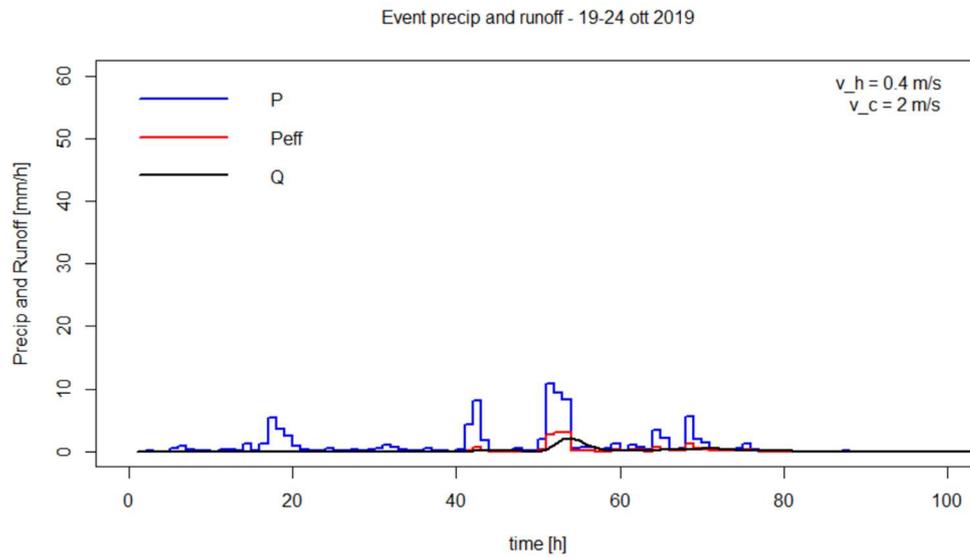


Figura 92: BROMA modificato (ott19).

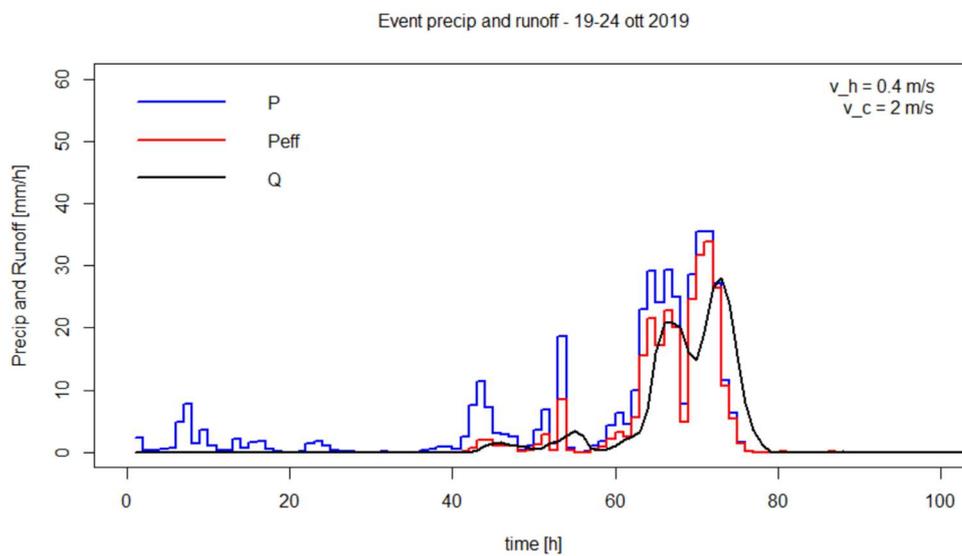


Figura 93: CASMO modificato (ott19).

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

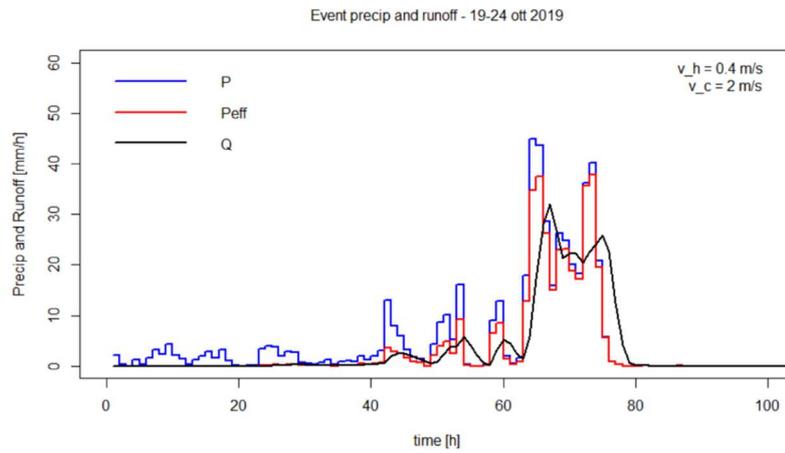


Figura 94: CORFS modificato (ott19).

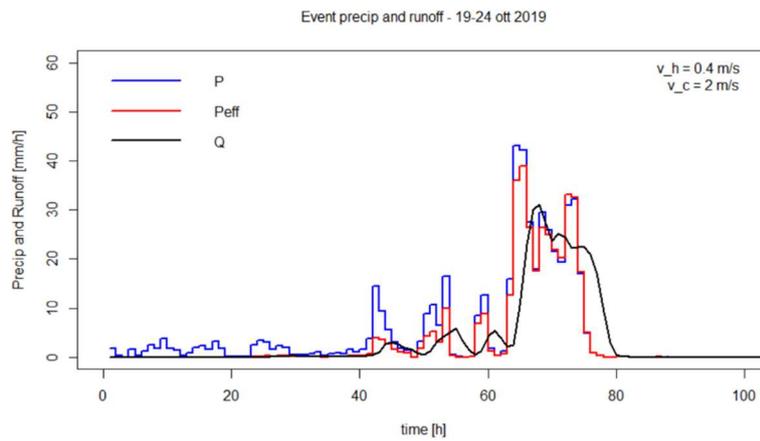


Figura 95: CORPM modificato (ott19).

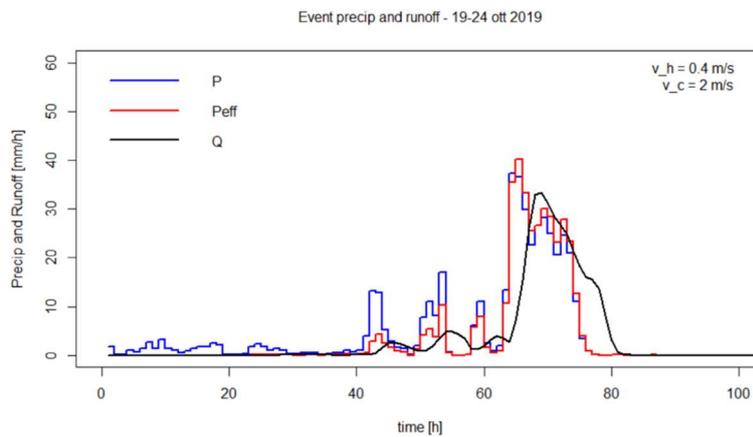


Figura 96: CORTM modificato (ott19).

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

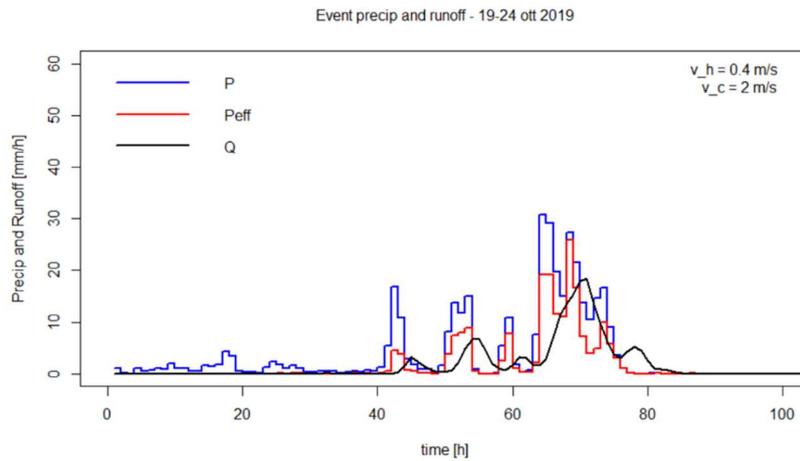


Figura 97: ELLMO modificato (ott19).

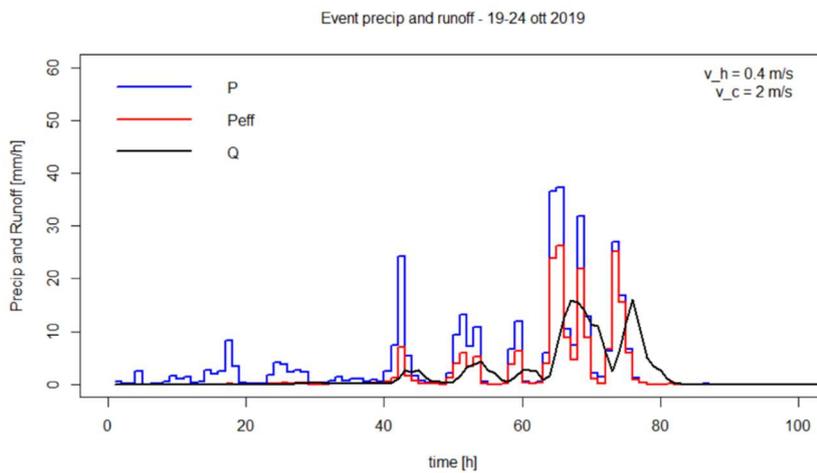


Figura 98: ELLRA modificato (ott19).

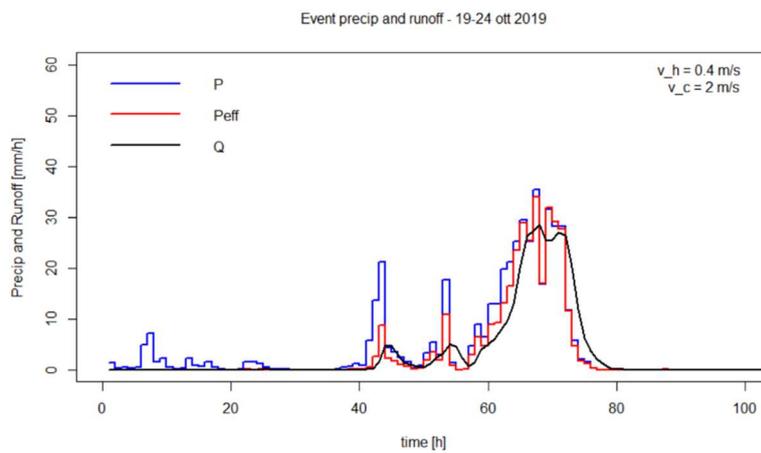


Figura 99: MONMO modificato (ott19).

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

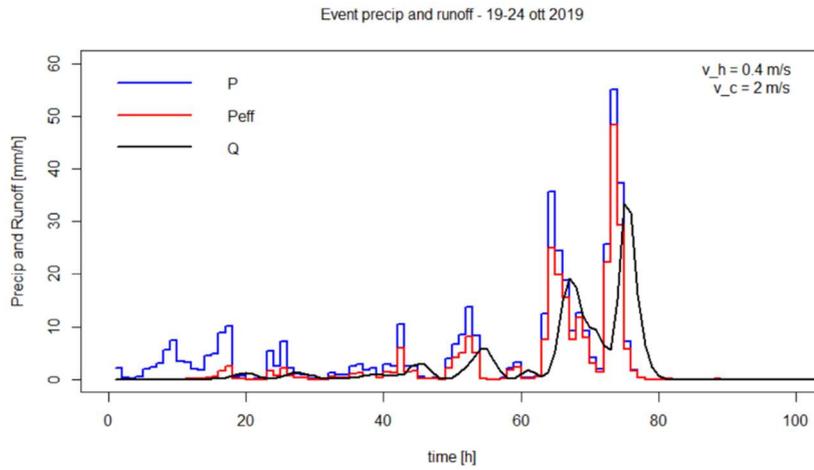


Figura 100: NEGPO modificato (ott19).

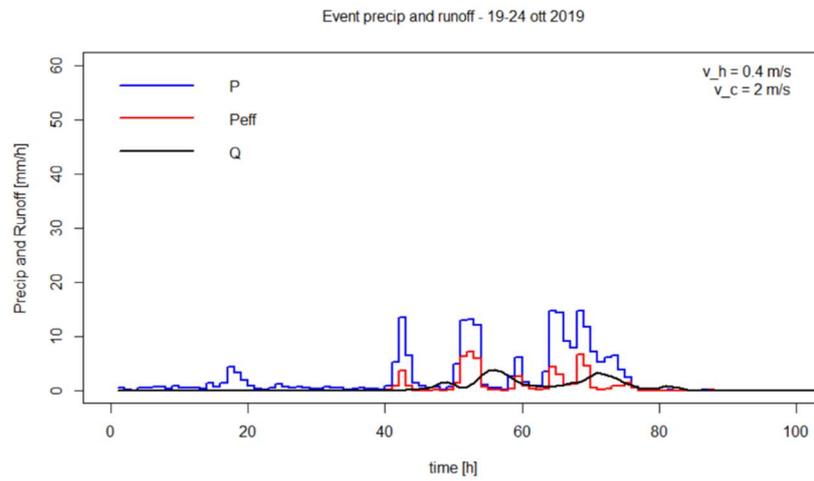


Figura 101: PESCA modificato (ott19).

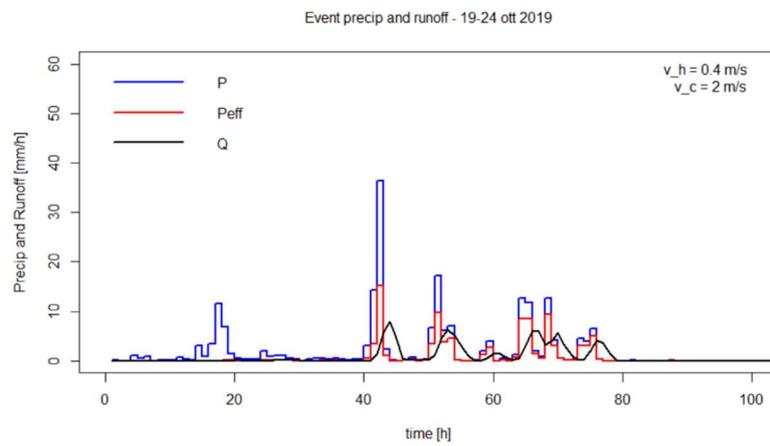


Figura 102: PESSB modificato (ott19).

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

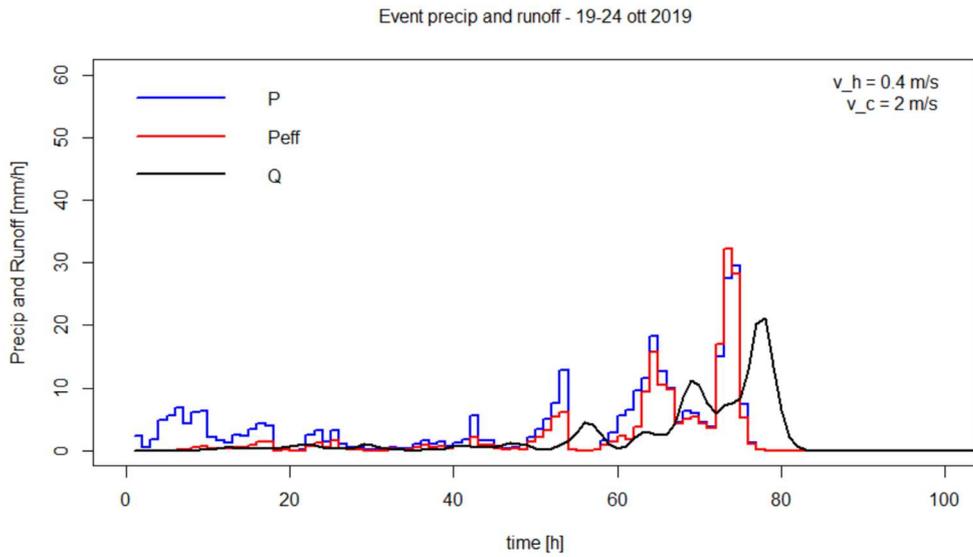


Figura 103: TANGA modificato (ott19).

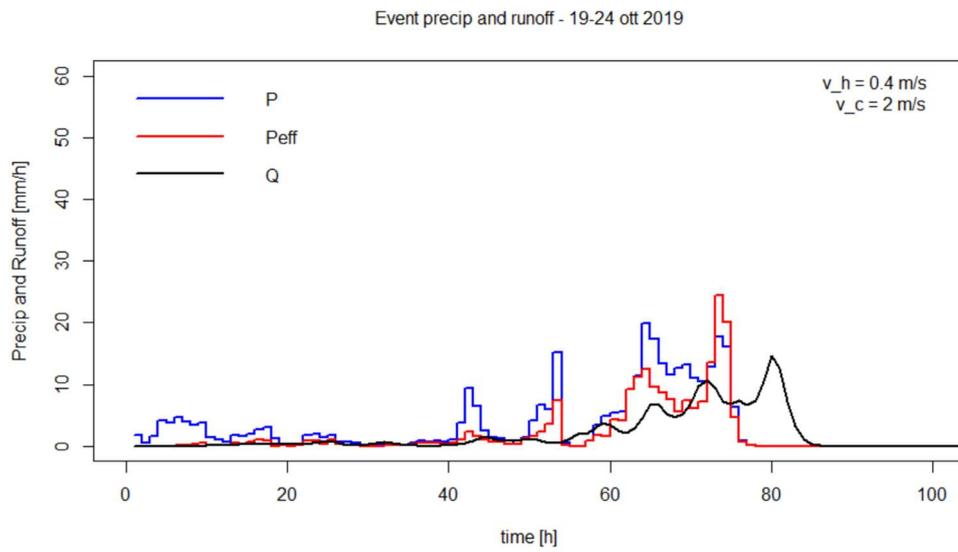


Figura 104: TANNU modificato (ott19).

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

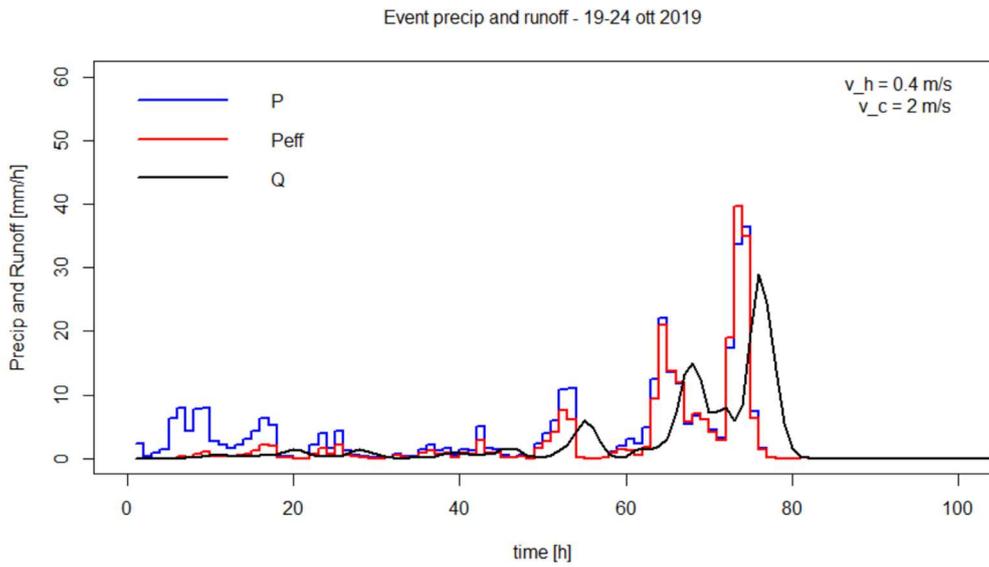


Figura 105: TANOR modificato (ott19).

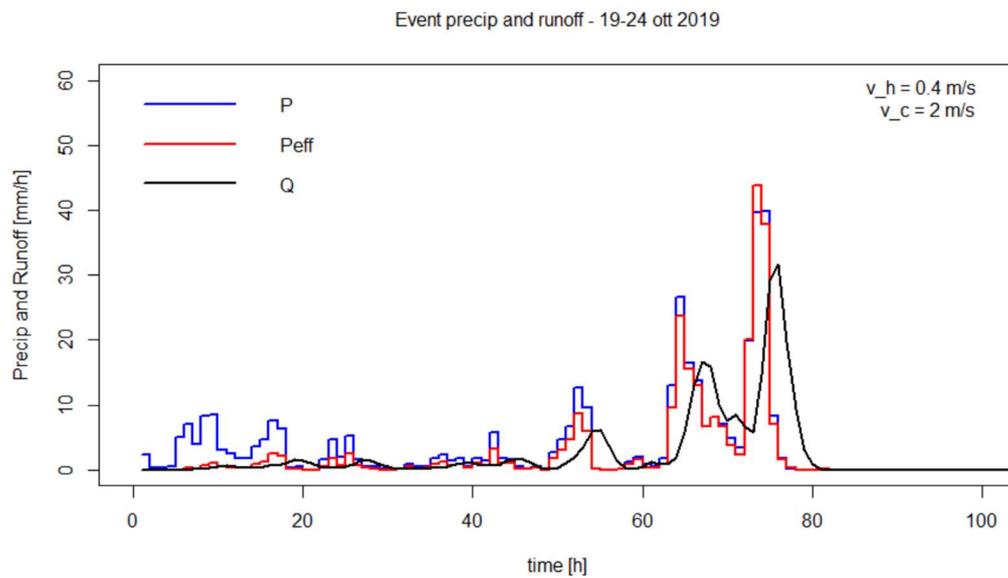


Figura 106: TANPN modificato (ott19).

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Idrogrammi Scenario B: novembre 2019 con precipitazioni del versante ligure

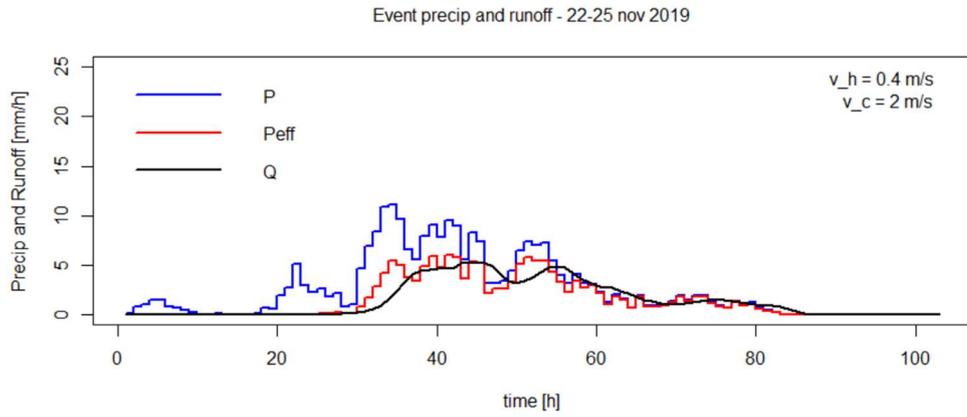


Figura 107: BROMA modificato (nov19).

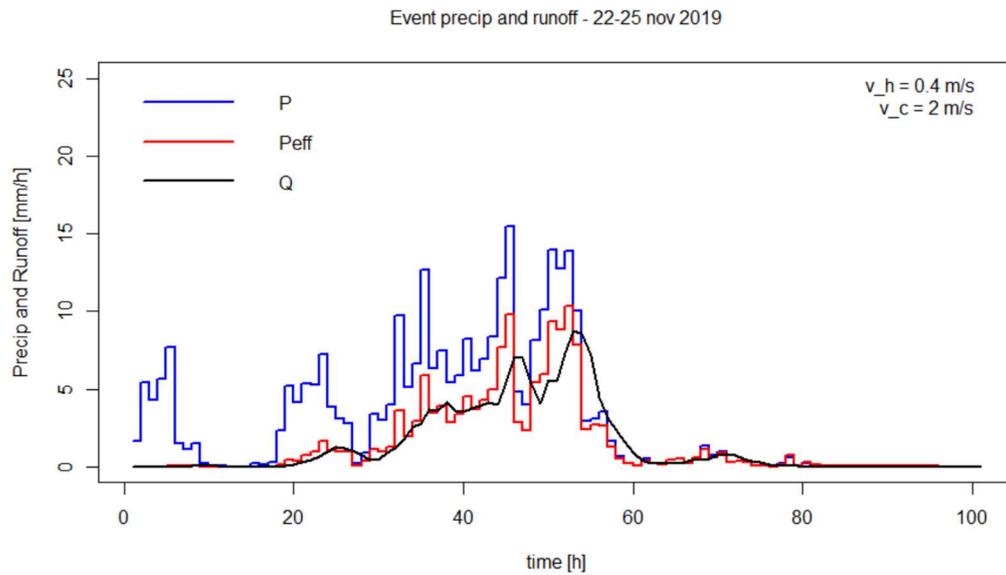


Figura 108: CASMO modificato (nov19).

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

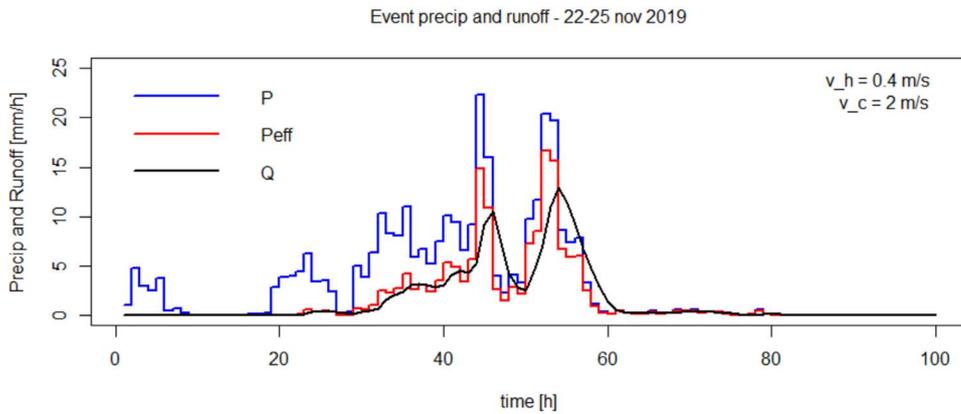


Figura 109: CORFS modificato (nov19).

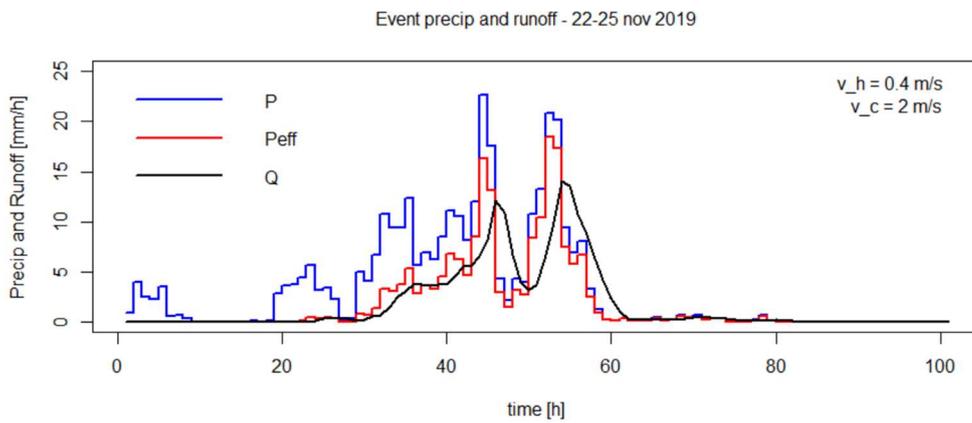


Figura 110: CORPM modificato (nov19).

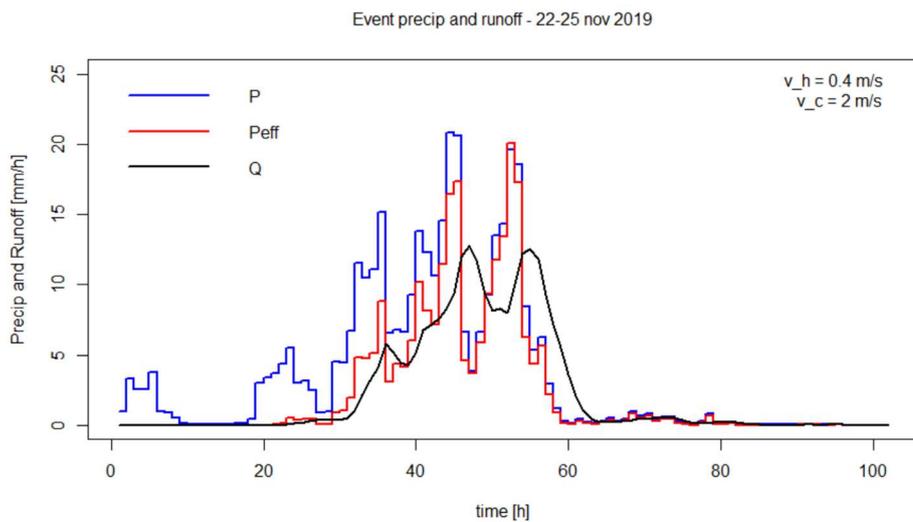


Figura 111: CORTM modificato (nov19).

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

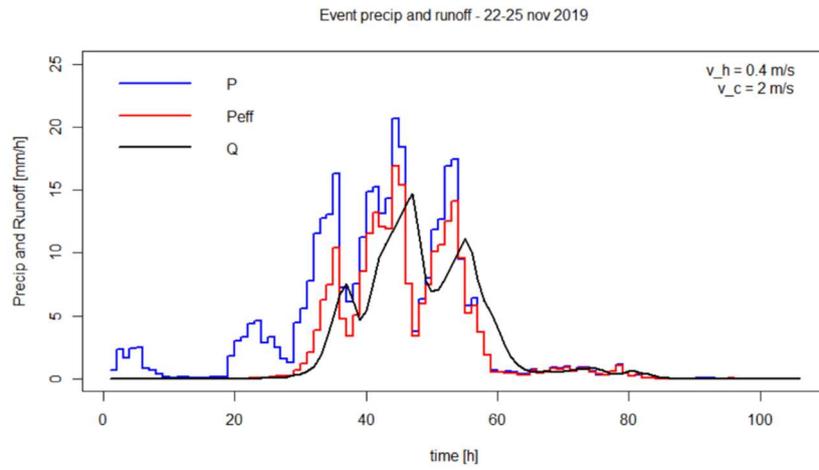


Figura 112: ELLMO modificato (nov19).

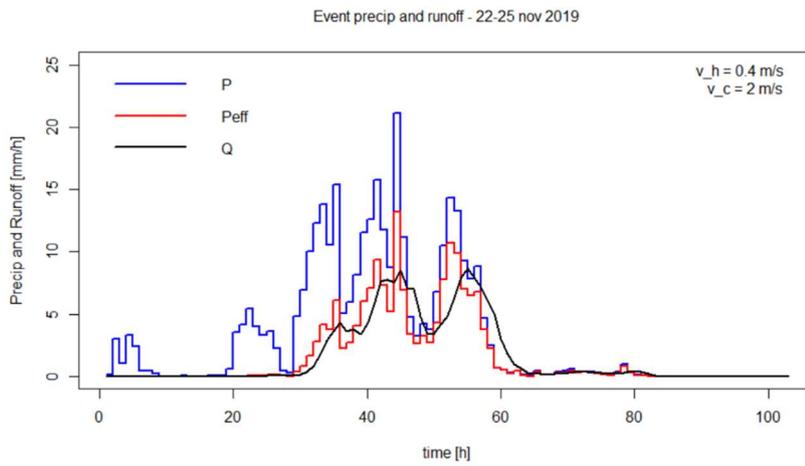


Figura 113: ELLRA modificato (nov19).

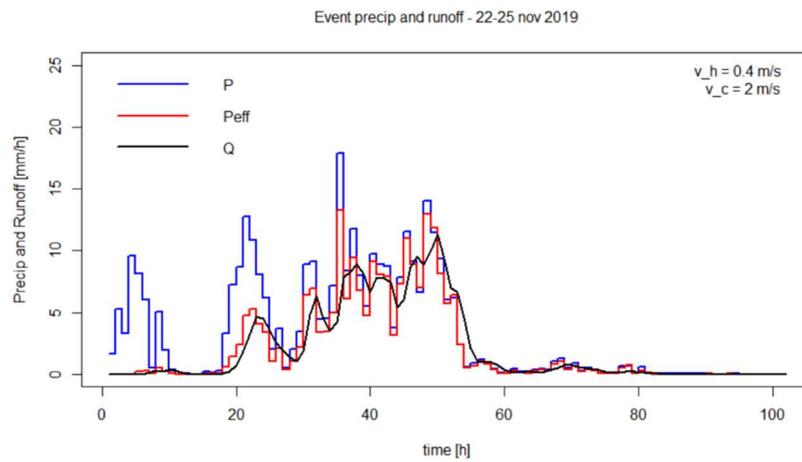


Figura 114: MONMO modificato (nov19).

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

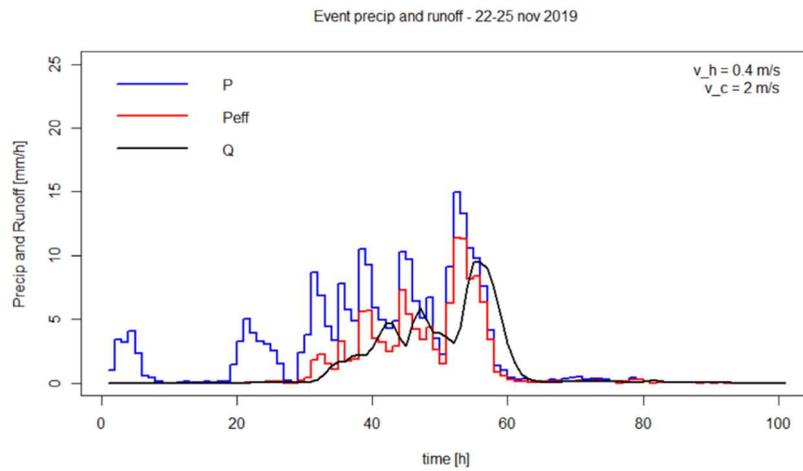


Figura 115: NEGPO modificato (nov19).

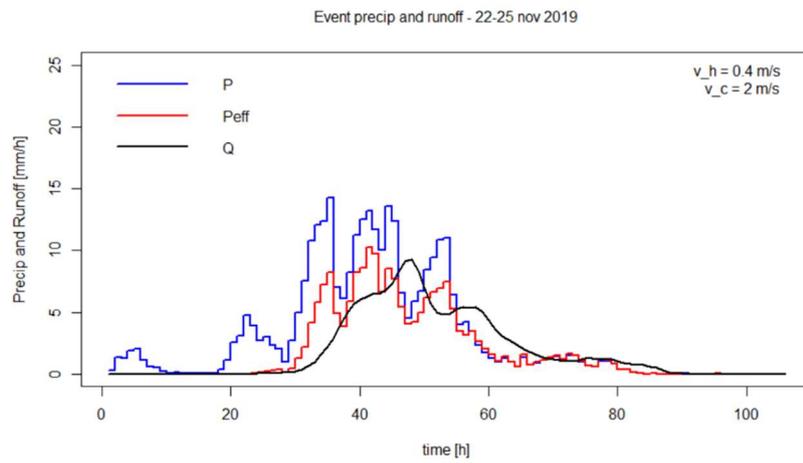


Figura 116: PESCA modificato (nov19).

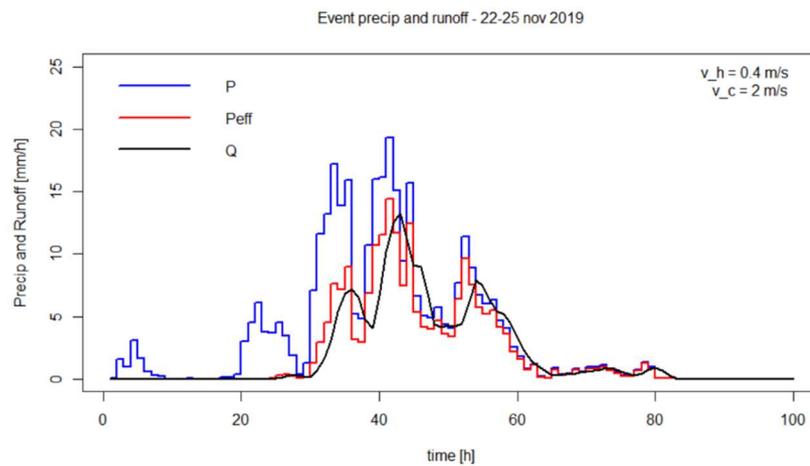


Figura 117: PESSB modificato (nov19).

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

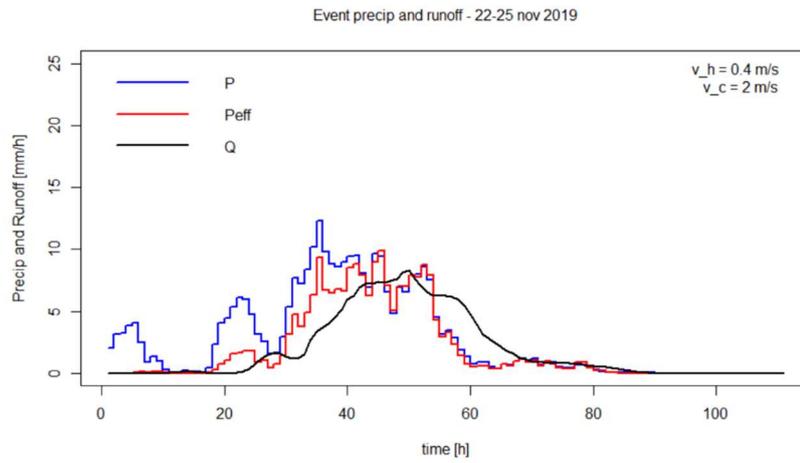


Figura 118: TANCL modificato (nov19).

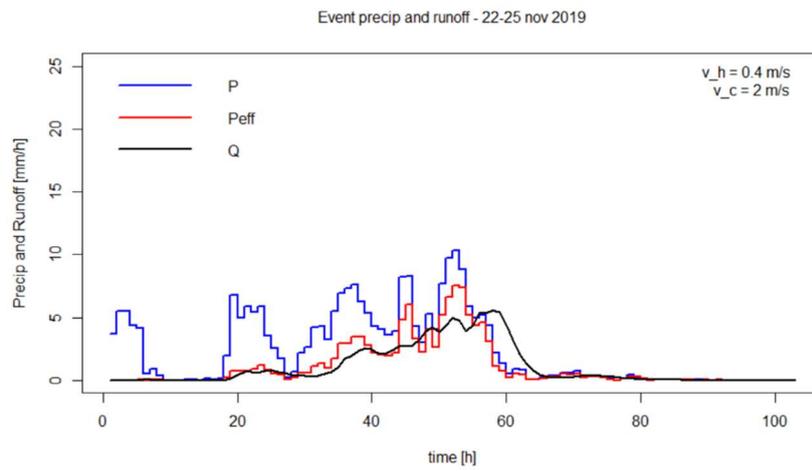


Figura 119: TANGA modificato (nov19).

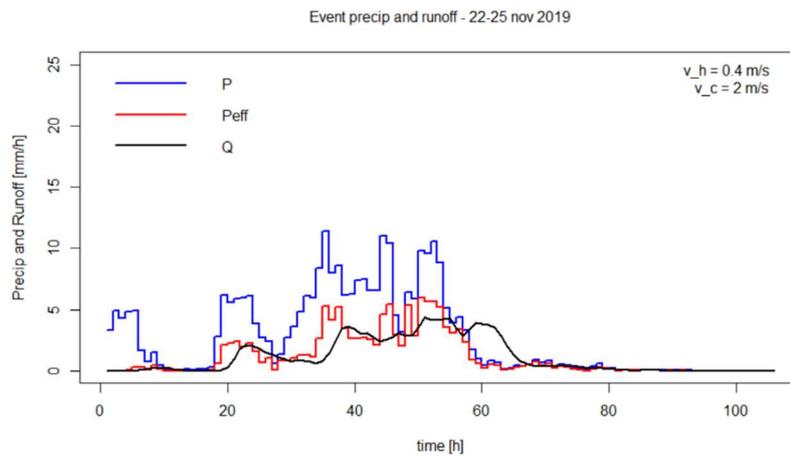


Figura 120: TANNU modificato (nov19).

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

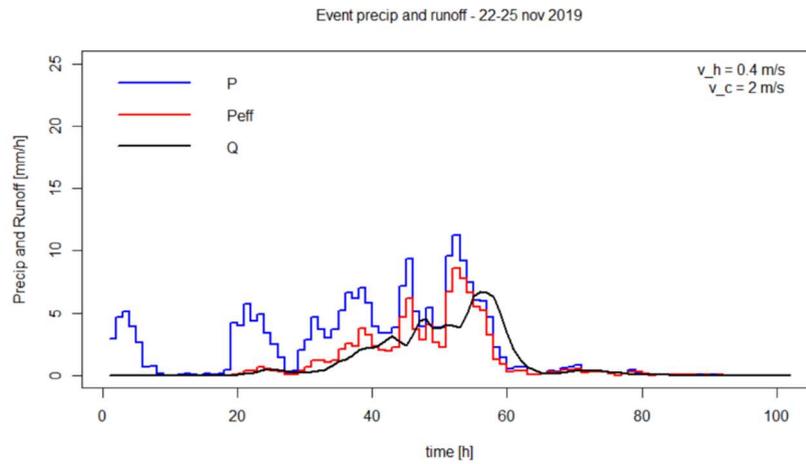


Figura 121: TANOR modificato (nov19).

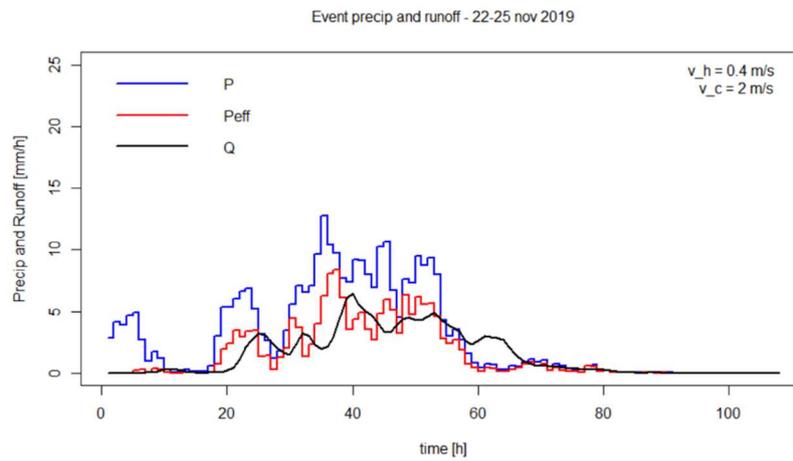


Figura 122: TANPI modificato (nov19).

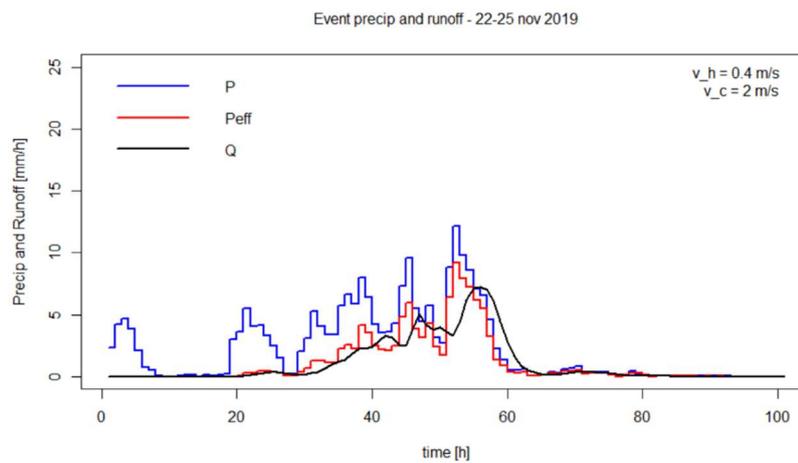


Figura 123: TANPN modificato (nov19).

Bibliografia

- *Atlante dei bacini imbriferi piemontesi*;
- *Autorità di bacino del fiume Po: "Linee generali di assetto idrogeologico e quadro degli interventi. Bacino del Tanaro"*;
- *"Costruzione di un modello idrologico di stima di disponibilità idrica in area pedemontana"*, Corrado Patta, *Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, 2018*;
- D. Zoccatelli, M. Borga, F. Zanon, B. Antonescu, G. Stancalie: "Which rainfall spatial information for flash flood response modelling? A numerical investigation based on data from the Carpathian range, Romania", *Journal of Hydrology* 394 (2010) 148–161;
- G. Blöschl, T. Nester, J. Komma, J. Parajka, and R. A. P. Perdigão: "The June 2013 flood in the Upper Danube Basin, and comparisons with the 2002, 1954 and 1899 floods", *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 5197–5212, 2013;
- Keith J. Beven, "Rainfall-Runoff Modelling: The Primer", *Seconda edizione, John Wiley and Sons, Incorporated, 2012*.
- Marshall, J. and W. Palmer, 1948: *The distribution of raindrops with size. Journal of Meteorology* 5, 165-166;
- *Rapporto evento ARPA: Eventi Idrometeorologici dal 19 al 24 ottobre 2019, parte 1*;
- *Rapporto evento ARPA: Eventi Idrometeorologici dal 22 al 25 novembre 2019, revisione 1*;
- *Rapporto evento ARPA: Evento del 2-3 ottobre 2020*;
- S. Gabriele, F. Chiaravalloti, A. P. (2017). *La valutazione delle piene nei piccoli bacini. Un problema ancora aperto/Floods Evaluation in Small Catchments. A Yet Open Question. Rivista L'Acqua, n. 5-2017*;
- Thorsten Wagener, Hoshin V Gupta, and Howard S Wheater: "Rainfall-runoff Modelling In Gauged And Ungauged Catchments", *World Scientific Publishing Company, 2004*.

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

- U. Maione, U. Moisello: "Elementi di statistica per l'idrologia";

Sitografia

- https://www.ultrasoft3d.net/Conversione_Coordinate.aspx
- <https://earth.google.com/web/>
- http://www.geoin.it/coordinate_converter/
- <http://www.arpa.piemonte.it/pubblicazioni-2/relazioni-tecniche/analisi-eventi>
- [Approfondimenti » Meteo » Strumenti di osservazione » Radar \(arpa.piemonte.it\)](http://www.arpa.piemonte.it/Approfondimenti_Meteo_Strumenti_di_osservazione_Radar)
- <http://www.nimbus.it/eventi/2020/201005AlluvioneItaliaNW.htm>
- [Spiegazione mappe radar \(inf.it\)](#)

Caratterizzazione degli eventi alluvionali recenti nel Bacino del Tanaro a monte di Farigliano (CN)

Grazie a mamma e papà, sempre pronti ad appoggiare ogni mia scelta e a comprendere i miei tempi. Grazie a mia sorella, fonte di ispirazione inconsapevole e continua. Grazie ad Ambra: la persona che ha scritto questo testo è quella che è anche grazie a te, mi hai accompagnato più di quanto si possa pensare. Grazie a Livia, il nostro rapporto che ha superato così tante difficoltà mi ha dato forza. Grazie ad Erika, compagna di vita ed amica inaspettata, ed infine grazie a Simona e Renata, quando si dice “le persone giuste al momento giusto”.