

UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI SCIENZE

Corso di Laurea Magistrale in Analisi e Gestione dell'Ambiente

"Bombe d'acqua" ed eventi estremi: integrazione di metodi tradizionali con
tecniche GIS in un piccolo bacino pedecollinare

Tesi di laurea in Principi di gestione del territorio

Relatore

Prof. Giovanni Gabbianelli

Presentata da

Antonio Sartini

Correlatore

Dott. Geol. Cristiano Guerra

III Sessione

Anno accademico 2013/2014

Sommario

Capitolo 1.....	5
1 Introduzione.....	5
1.1 Cambiamenti climatici	6
1.2 Rischio e vulnerabilità.....	8
1.3 Precipitazioni.....	9
1.4 Eventi estremi.....	14
1.4.1 Criticità idraulica.....	18
1.5 Geographic Information System (GIS)	19
Capitolo 2.....	20
2 Obiettivi.....	20
Capitolo 3.....	21
3 Inquadramento geografico – ambientale del territorio considerato.....	21
3.1 Idrologia	23
3.2 Geologia	24
3.3 Meteorologia	25
3.3.1 Inquadramento dell’evento meteorologico estremo	27
3.4 Legislazione e normativa di riferimento	32
Capitolo 4.....	36
4 Metodi	36
Capitolo 5.....	38
5 Risultati	38
5.1 Dati pluviometrici.....	38
5.2 Analisi fisiografiche del bacino per il calcolo del coefficiente di deflusso.....	44
5.2.1 Definizione EPSG.....	46
5.2.2 Determinazione del coefficiente di acclività (Ca)	47
5.2.3 Determinazione del coefficiente di permeabilità (Cp).....	51
5.2.4 Determinazione del Coefficiente di copertura vegetale (Cv)	53
5.3 Calcolo della portata di piena (Q_{max}).....	55
5.4 Calcolo della portata smaltibile della sezione	58
5.5 Determinazione della portata generata dall’evento estremo	62
5.6 Valutazione e determinazione delle soglie di sicurezza.....	63
Capitolo 6.....	65
6 Discussione e conclusioni	65

Capitolo 7.....	70
7 Allegati: Dati Pluviometrici	70
7.1 Allegati: planimetria e sezione del canale Calastra.....	75
Bibliografia	76

Capitolo 1

1 Introduzione

I cambiamenti climatici stanno sempre più influenzando l'assetto territoriale ed ambientale della nostra società. Questo fatto si evince da eventi che riescono a sconvolgere le opere atte alla loro mitigazione; tali sistemi vengono progettati tenendo conto delle competenze acquisite in campo teorico e archivistico, ovvero la serie dei dati storici sui quali costruire dei modelli probabilistici che permettano di determinare il massimo grado di intensità che l'evento di interesse potrà generare. Questi *database*, però, conseguentemente ai cambiamenti ambientali cui stiamo avendo testimonianza diretta, risultano essere sempre meno affidabili allo scopo di impostare questi studi di tendenza.

Esempio di quanto detto sono le alluvioni, o le esondazioni dei corsi fluviali, generate da eventi meteorologici fuori dall'ordinario: queste situazioni, sempre più frequenti sul nostro territorio, oltre che subire l'influsso dei cambiamenti climatici, trovano un substrato favorevole nel quale attecchire, dovuto dall'alto grado di cementificazione. Molto spesso, questo dato si nota in zone dove il corso d'acqua poteva defluire liberamente fino, a qualche decennio fa, libero da impedimenti antropici e dalle problematiche pianificatorie e gestionali.

In questo ambito, rientrano quegli eventi che i media chiamano "bombe d'acqua" e più propriamente definite "*cloudburst*", le quali scaricano su un piccolo territorio una massiccia quantità di acque di precipitazione in un arco di tempo estremamente limitato. L'effetto principale è quello di mettere in crisi la rete idrologica della zona colpita, la quale non è stata progettata per sopportare eventi di tale magnitudo. Gli effetti avversi sul territorio possono essere importanti. Andando a esondare, il corso d'acqua danneggia i beni che incontra sul suo cammino; se l'evento è abbastanza duraturo o su ambiti territoriali adiacenti, possono crearsi eventi sinergici a valle degli stessi; se invece è coinvolto un centro cittadino, l'impossibilità dell'acqua di defluire nel suolo creerà tutta una serie di altre e nuove problematiche: dal collasso della rete fognaria, all'allagamento delle zone interrate. Se infine l'evento scatenante si verifica in una zona collinare/montagnosa, a ridosso dell'edificato ad esempio, possiamo avere degli smottamenti o delle imponenti colate di fango.

In questo lavoro di tesi, queste problematiche saranno trattate col fine ultimo di valutare delle soglie di precipitazioni, tali per cui, in caso di eventi meteorologici fuori dall'ordinario, sarà possibile allertare la popolazione localizzata nella zona soggetta a rischio idro-geologico. Questa analisi è stata condotta grazie ai dati reperiti per il Comune di Rimini, ed in modo più specifico, per un piccolo bacino pedecollinare, denominato bacino Calastra, localizzato nella frazione occidentale del Comune (Figura 1).

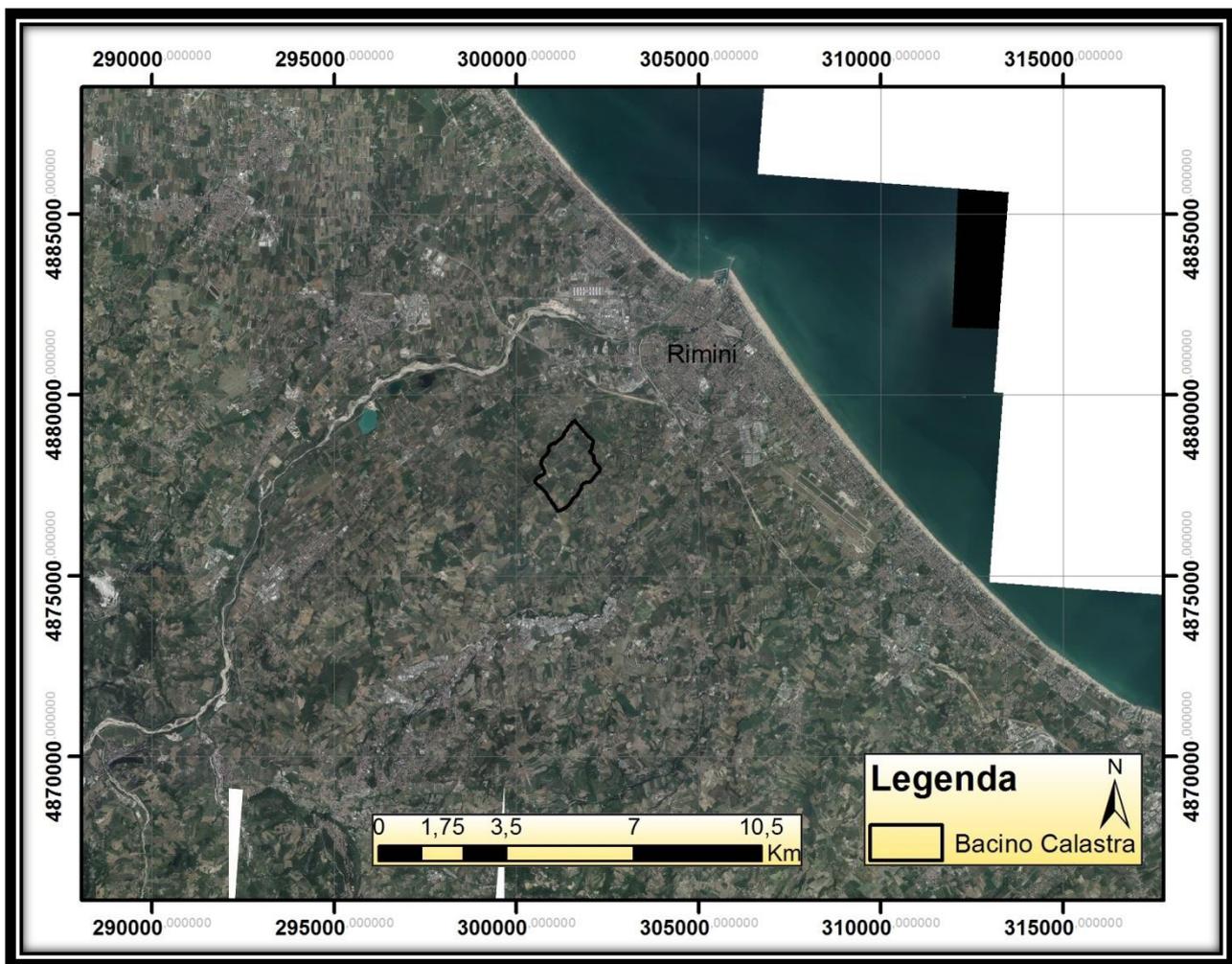


Figura 1 - Ambito territoriale di pertinenza del lavoro, scala 1:200000

1.1 Cambiamenti climatici

Indipendentemente dalle diverse spiegazioni che sono state elaborate negli ultimi decenni, si è ormai giunti ad sostanziale accordo sui cambiamenti climatici. Come evidenziato dall'ultimo rapporto IPCC, *International Panel on Climate Change*, di recente pubblicazione, (IPCC, 2014), il mutamento del clima e la sua incrementata variabilità sono e saranno una minaccia crescente per l'uomo: direttamente, attraverso mutati schemi meteorologici (eventi più intensi e/o frequenti) ed indirettamente attraverso il cambiamento della qualità dell'aria, dell'acqua, cambiamento negli ecosistemi, nelle forniture alimentari e conseguentemente dell'intero comparto socio-economico (APAT, 2007).

L'umanità fin dal suo albero ha modificato l'ambiente nel quale si stabiliva, dapprima con cambiamenti marginali e localizzati, ma poi con l'evoluzione delle tecnologie a disposizione, con intensità via via crescente. La svolta però, è da registrarsi durante la rivoluzione industriale, quando cioè le attività umane iniziarono ad incidere con peso crescente sulla composizione atmosferica, iniziando così a modificare il clima su scala globale.

Il forzante principale di questo cambiamento è dovuto all'immissione di particolari gas, definiti gas serra o GHG (*greenhouse gases*), i quali permettono il passaggio della radiazione solare in entrata al sistema terra, ma ne ostacolano l'uscita come energia infrarossa, andando così ad aumentare gradualmente la temperatura, come appunto in una serra. Questo effetto naturalmente presente sul nostro pianeta, garantirebbe una temperatura media di 14°C, favorevole quindi allo sviluppo della vita. Il problema si è creato con l'aumento antropico delle concentrazioni di questi gas, in particolar modo il diossido di carbonio (ma non solo, ricordiamo anche l'ossido di diazoto ed il metano ad esempio), che lentamente stanno portando ad un innalzamento delle temperature medie in tutto il globo. La concentrazione di questi gas, ha raggiunto ora livelli mai registrati negli ultimi 800mila anni. Ne è principale esempio la CO₂, la quale registra un valore corrispondente a 392 ppm (parti per milione), valore di gran lunga superiore al valore compreso tra 180 e 300, registrato da analisi di antichi ghiacciai (NOAA, 2012).

Nel 2012, l'*European Environmental Agency* (EEA) ha redatto un rapporto, intitolato "*Climate Change, Impacts and Vulnerability in Europe 2012*", nel quale viene stilata una lista degli impatti dovuti ai cambiamenti climatici per i vari compartimenti ambientali, vengono inoltre considerati diversi scenari futuri, proposti dall'*SRES (Special Report on Emissions Scenarios)* che ipotizzano l'andamento dell'impatto per i prossimi decenni.

Tra tutti gli impatti citati nel documento (*Climate Change, Impacts and Vulnerability in Europe, 2012*), ricordiamo:

- Temperatura Europea: per le zone continentali, la media per la decade 2002-2012 ha mostrato un incremento di +1.3°C rispetto a valori preindustriali. Sono previsti (sempre sotto possibili scenari probabilistici) successivi aumenti compresi tra +2.5°C e +4.0°C tra il 2071 e il 2100.
- Precipitazioni: modifiche nei pattern precipitativi mostrano una maggiore variabilità spaziale e temporale, con aumenti medi per le regioni settentrionali e diminuzioni per quelle meridionali. È previsto che questa "forbice" aumenterà il suo divario, complice anche un'intensificazione degli eventi precipitativi.
- Ghiacciai: la totalità dei ghiacciai Europei presentano ritmi di ritiro, quelli delle Alpi, ad esempio, hanno perso approssimativamente 2/3 del loro volume, rispetto al 1850 ed il tasso di scioglimento, ha incrementato ulteriormente il suo ritmo a partire dagli anni '80. Secondo lo scenario "*Business as usual*" (corrispondente al normale svolgimento delle operazioni funzionali in un organismo) è previsto un successivo scioglimento, compreso tra il 22 ed il 66%. Ovviamente anche la copertura nevosa e lo strato di permafrost stanno subendo gli effetti del riscaldamento globale.
- Ambiente marino e zona costiera: riscaldamento dei mari, diminuzione del pH e modifiche nella fenologia e distribuzione delle specie marine sono solo alcuni degli aspetti per i quali sono stati già registrati importanti cambiamenti. Per quanto riguarda la costa invece, già ad oggi è possibile osservare un aumento del livello marino, pari a 1.7mm/anno per tutto il XX secolo, con aumenti maggiori nelle ultime decadi (grazie a rilevamenti satellitare si è osservato un valore quasi doppio, pari a 3mm/anno per i passati venti anni). Come pure un aumento dell'erosione della linea di costa e

mareggiate di intensità maggiore rispetto ai livelli medi del secolo (nonostante questa variabile presenti alto livello di incertezza).

- Salute: è stato osservato un aumento della mortalità per determinati gruppi di popolazione, durante eventi di freddo estremo o ondate di calore. Queste ultime in accordo con diversi scenari ipotizzati dall'SRES, incrementeranno gli impatti generati, a seguito di maggior durata, frequenza ed intensità. Anche le alluvioni fluviali sono un problema noto per la salute pubblica (e per l'economia), infatti, gli effetti sul benessere delle popolazioni comprendono annegamenti, attacchi cardiaci, lesioni ed infezioni, ma anche conseguenze psicosociali ed ovviamente malfunzionamento della rete di servizi.

I cambiamenti ambientali citati, possono apparire esagerati, forse persino allarmistici, ma tenendo conto dei recenti avvenimenti cui abbiamo assistito, prime su tutte le numerose alluvioni verificate negli ultimi anni nel nostro paese (ricordiamo Genova, Milano, Olbia ad esempio), è ragionevole affermare che queste alterazioni sono già evidenti e diviene quindi sempre più opportuno accettarli e comprenderli, al fine di mettere in atto delle accurate strutture di mitigazione del rischio.

1.2 Rischio e vulnerabilità

Nel rapporto sugli impatti ambientali stilato dall'EEA (*Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012*, EEA 2012), sono spesso riportati due termini specifici: vulnerabilità e rischio. Essi sono utilizzati per descrivere i potenziali effetti negativi ed hanno avuto una grossa diffusione negli ultimi anni, perché sono intuitivi e quindi comprensibili ad un pubblico più vasto.

In generale l'uso di questi vocaboli non pone grosse difficoltà, perché sono applicati in modo generico e sfruttano la loro capacità univoca di essere ben comprensibili. Tuttavia, per meglio chiarire il loro significato e stabilirne un modo definitivo l'uso, l'IPCC nel suo quarto rapporto del 2007 (IPCC, 2007) ha definito la vulnerabilità come segue:

“Vulnerability is the degree to which a system is susceptible to, and unable to cope with, adverse effects of climate change, including climate variability and extremes. Vulnerability is a function of a character, magnitude and rate of climate change and variation of which a system is exposed, its sensitivity and its adaptive capacity”

In accordo con questa definizione, la vulnerabilità è una caratteristica intrinseca di un sistema, rappresentando la correlazione non lineare tra l'intensità di un evento di stress e il danno atteso che esso potrà generare. L'intensità o magnitudo invece, corrisponde al tasso di variazione del clima che può influire e danneggiare il sistema. Altre sue caratteristiche sono la sensibilità e la capacità di adattamento: la prima corrisponde alla soglia minima per la quale occorrono delle conseguenze negative, mentre la seconda corrisponde alla sua capacità di tornare ad uno stato funzionale dopo la perturbazione.

Per quanto concerne il “rischio”, la sua definizione ha subito diverse modifiche nel corso degli anni, nonostante questo però, il concetto iniziale proposto nel 1992 dall'*United Nations Department of Humanitarian Affairs* (UNDHA, 1992), resta un punto focale nell'argomento.

“Expected losses (of lives, persons injured, property damage and economic disrupted) due to a particular hazard for a given area and reference period. Based on mathematical calculations, risk is the productions of hazard and vulnerability”

Esso quindi rappresenta le perdite attese conseguenti ad un particolare fenomeno, che sia di origine naturale o antropica, ed è espresso come funzione di tre fattori:

$$\text{Rischio} = \text{Pericolosità} * \text{Vulnerabilità} * \text{Esposizione}$$

La pericolosità (o *hazard*) esprime la probabilità che un fenomeno dannoso, di particolare intensità, avvenga in una determinata area per un determinato periodo di tempo (questo concetto è rappresentato dal tempo di ritorno, e più precisamente esso rappresenta il tempo medio che intercorre tra il verificarsi di due eventi successivi aventi entità pari ad un determinato valore assegnato). Per alcune tipologie di eventi, come ad esempio le alluvioni, è possibile eseguire delle stime del tempo di ritorno che risultano essere abbastanza corrette, al contrario di altre tipologie (fenomeni franosi e terremoti ad esempio) per le quali valutazioni appropriate sono più complicate. La vulnerabilità invece, rappresenta la propensione dell'elemento, o degli elementi, che ricadono nell'area di rischio, a subire un danno conseguente all'intensità del fenomeno. In genere viene espressa in una scala da 0 (nessun danno) a 1 (massimo danno possibile). L'esposizione infine, rappresenta il valore economico dei beni (inteso nel suo senso più ampio e comprendente anche risorse naturali, servizi e capitale umano) che sono stati esposti all'evento dannoso (ISPRA, 2011).

1.3 Precipitazioni

Il pianeta Terra ha una riserva limitata di acqua, essa viene utilizzata e riciclata attraverso il ciclo dell'acqua. Detto anche ciclo idrologico, esso rappresenta la successione dei fenomeni che producono la circolazione dell'acqua all'interno dell'idrosfera, mediante scambi tra l'atmosfera, la terra, le acque superficiali e quelle sotterranee e gli organismi viventi. Il passaggio attraverso questi compartimenti, avviene grazie a diversi processi fisici: evaporazione, condensazione, precipitazione e evapotraspirazione.



Figura 2 - Ciclo dell'acqua, U.S. Geological Survey

In questo ciclo infinito (Figura 2), le nuvole rappresentano una riserva idrica da non sottovalutare, in grado di spostare queste immense masse d'acqua attraverso i continenti. Tale fenomeno meteorologico, definito al pari della pioggia o della neve un idrometeora, si forma quando l'aria saturata di umidità, generata per l'evaporazione delle masse d'acqua, risale in atmosfera raffreddandosi. A questo punto, l'acqua contenuta inizia a condensare formando milioni di micro particelle, che andranno a formare il "corpo fisico" della nube. Il processo di risalita dell'aria può verificarsi secondo quattro diversi processi:

- sollevamento orografico: i venti premono l'aria contro un ostacolo fisico, come una catena montuosa, permettendo all'aria di risalire in quota e di raffreddarsi.
- fronte meteorologico: masse di aria fredda si scontrano con masse a temperatura maggiore. Questo movimento, definito fronte freddo, porta la densa aria fredda a spingere verso l'alto quella calda, che al tempo stesso viene raffreddata, formando così delle nubi. Al contrario invece, un fronte caldo avviene quando l'aria calda collide e scorre sopra una massa di aria fredda ed anche in questo caso, risale verso l'alto.
- convergenza: il flusso dell'aria non è costante, può capitare che due masse d'aria si scontrino, parte di quest'aria viene quindi spinta verso l'alto, raffreddandosi e formando nuvole.
- convezione: come suggerisce il nome stesso, questo processo coinvolge i moti convettivi dell'aria, la quale nei livelli più bassi dell'atmosfera è riscaldata dal calore irradiato dal suolo. L'aria calda ed il vapore acqueo che in questo modo risalgono, sono definiti flussi termali e come per i processi precedenti, spostandosi verso l'alto si raffreddano e creano delle nuvole.

All'interno di queste neonate nubi, la sola presenza d'acqua non è garante di precipitazione sicura. Infatti, per piovere occorre che la forza peso di una singola gocciolina sia superiore alla resistenza generata dal moto di risalita dell'aria, che la tiene in sospensione. I

meccanismi principali di formazione delle precipitazioni sono l'accrescimento per coalescenza ed il processo di Wegener-Bergeron-Findeisen (Harper, 2007).

Il primo prevede che le goccioline, dapprima troppo leggere per precipitare al suolo, collidano e si scontrino tra loro, incrementando così la propria massa. Una volta raggiunto il diametro minimo di 200 μm , le correnti ascensionali non sono più in grado di mantenerle in sospensione e quindi iniziano a precipitare, incontrando sul loro cammino altre molecole di acqua e quindi ingrandendosi ulteriormente. Il processo di Bergeron (Fleisher, 2010; Testik et al., 2010) invece, prevede che le goccioline di vapore, presenti all'interno di una nuvola, siano attratte da micro particelle di ghiaccio (definite nuclei glaciogeni) grazie alla differente tensione di vapore tra acqua liquida e ghiaccio. Secondo questo processo si generano dei cristalli di ghiaccio la cui dimensione è sufficiente per precipitare dalla nube, se la temperatura però durante la discesa aumenta, il cristallo può sciogliersi e diventare una goccia di pioggia.

A livello globale, i più alti valori di precipitazione cumulate occorrono nella zona dei tropici, qui grazie al forte riscaldamento solare si genera un imponente fenomeno evaporazione e conseguentemente di flusso termico. Annualmente, per questo regime definito "tropicale", si verificano precipitazioni comprese tra i 2500 ed i 10000 mm, quest'ultimo valore si può raggiungere grazie ai monsoni, tipici delle regioni subtropicali, o in regioni aventi orografia particolare, dove cioè le catene montuose sono a ridosso degli oceani (Woodward, 1997).

Al contrario invece, i regimi polari localizzati oltre i 60° di latitudine, sono caratterizzati da pattern precipitativi molto bassi, in accordo con le rigide temperature che non permettono la creazione di nubi a causa della bassissima evaporazione. Infatti, alcune zone della regione Artica e Antartica presentano un clima analogo a quelli desertici, per i quali però, è l'alta pressione a limitare fortemente la creazione di formazioni nuvolose. Entrambi questi regimi presentano valori di precipitazioni cumulate che raramente superano i 250 mm/anno, ed anzi le piogge possono mancare anche per interi anni.

Le regioni temperate delle medie latitudini hanno moderati livelli di precipitazioni, la maggior parte di esse è associata con lo sviluppo di fronti depressionari che si formano allo scontrarsi delle masse di aria calda dai tropici contro quelle fredde delle regioni Artiche. Le precipitazioni in queste regioni variano molto, in base alla posizione geografica: sulla costa possiamo raggiungere valori cumulati pari a 2500 mm/anno, ma allontanandoci da essa, le precipitazioni diminuiscono molto, special modo per i continenti del Nord America e dell'Asia, dove l'aria si asciuga molto nell'entroterra.

La prossimità con tre diversi continenti, la complessa morfologia dell'area e l'indubbia presenza di fattori locali determinano, per la regione Mediterranea, una forte variabilità spaziale nella distribuzione delle precipitazioni totali e giornaliere. Annualmente sono stati registrati valori che possono oscillare dai 1200 mm/anno, principalmente per la zona est della costa mediterranea, a cumulate inferiori ai 400 mm/anno (per la costa nord Africana e il mediterraneo sud-orientale). Inoltre la stessa quantità di precipitazione annuale può essere

ottenuta secondo diversi pattern di distribuzione giornaliera (Peel et al., 2007). Per la valutazione dei livelli precipitativi, esistono due parametri molto importanti.

- NRS: *Number of rain spells*, ovvero il periodo di giorni consecutivi cui le precipitazioni hanno superato una determinata soglia (chiamata DRT, *Daily Rainfall Threshold*).
- RSY: *Rain spell yields*, che determina la quantità totale di precipitazione durante un periodo di giorni consecutivi di pioggia.

Questi due parametri sono stati correlati nel volume “*The Climate of the Mediterranean Region*” (Lionello, 2012), in cui troviamo un grafico (Figura 3) molto esplicativo delle precipitazioni totali per diverse città della zona mediterranea.

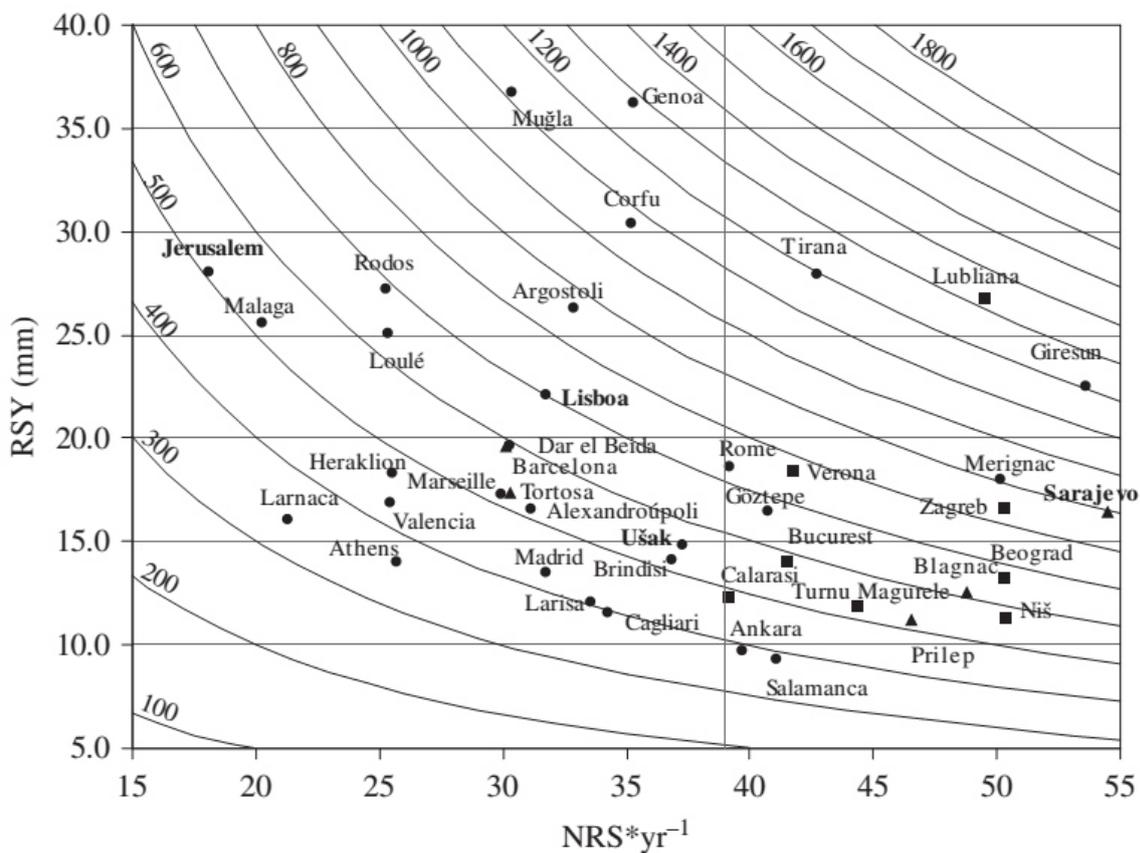


Figura 3 - Correlazione tra NRS e RSY per diverse città della regione Mediterranea, Lionello 2012

Ogni punto del grafico, rappresenta una stazione localizzata all'intersezione tra il valore annuale di NRS, il quale come detto rappresenta i giorni consecutivi di precipitazione e il valore medio di RSY, in altre parole la quantità di precipitazione per questi periodi consecutivi. Le curve invece indicano l'andamento delle precipitazioni totali annuali.

Osservando meglio l'immagine, possiamo notare come Genova e Cagliari siano dislocate alla stessa altezza di “*Number of Rain Spells*”, pari a circa 35 giorni consecutivi all'anno, ma presentino valori molto diversi di “*Rain spell yields*”, ciò è causato a precipitazioni totali molto diverse tra loro: Genova presenta valori totali annuali poco inferiori ai 1300 mm, mentre per Cagliari troviamo cumulate di poco inferiori ai 400 mm/anno.

Questa importante differenza, è dovuta al fatto che in Italia, le zone che presentano piogge massicce sono localizzate sulle Alpi Carniche e Giulie, nella fascia prealpina, sull'Appennino Ligure orientale sulle Alpi Apuane e nella zona dell'Appennino Tosco-Emiliano. Qui le precipitazioni cumulate possono sfiorare anche i 2500-3000 mm/anno, valori che possono essere equiparati a climi subtropicali. Allontanandoci dai rilievi per spostarci su zone di pianura, otteniamo precipitazioni tra i 700 ed i 1000 mm/anno, ed infine andando verso sud la situazione peggiora ulteriormente, con valori annui tra i 400 ed i 600 mm per le coste meridionali, special modo quelle sicule e sarde.

Il valore espresso in mm, chiamato altezza pluviometrica, rappresenta l'unità fondamentale per determinare la quantità di precipitazione caduta, e come abbiamo visto in precedenza, può essere rapportata al periodo annuale, anche se per studi scientifici più accurati, come ad esempio previsioni meteorologiche atte a calcolare il livello massimo di piena generato dalle precipitazioni, si tende monitorare anche il dato giornaliero (e sue frazioni) ed orario. Concettualmente, l'altezza pluviometrica, può essere intesa come una quantità d'acqua che ricopre una superficie, infatti, 1 mm di pioggia corrisponde ad un litro d'acqua che ricopre un metro quadrato (FAO, 1985). Ciò ci permette di misurare in maniera efficace i volumi di pioggia che cadono nei bacini: basterà conoscere i dati medi di pioggia, determinati in mm/ora e moltiplicare tale valore per l'estensione del bacino in esame, in modo da ottenere i metri cubi di acqua caduti nella zona e per il periodo di tempo indicati. Questo dato è d'importanza prioritaria per un territorio come il nostro, capace di saturarsi in poche ore e portare i punti aventi criticità maggiore, ad esondare, soprattutto in corrispondenza di opere ingegneristiche che ne limitano la portata.

Ma come vengono effettuate queste misurazioni delle precipitazioni? Lo strumento fondamentale, che prevede misura diretta delle piogge è il pluviometro, rispetto ad altre metodiche tecnologicamente più avanzate, come il telerilevamento ed il disdrometro, queste misure continuano ad essere il pilastro fondamentale nel settore, dato che sono ancora impiegate per le ricerche ed in campo operativo, specialmente quando una grossa mole di dati è richiesta. La forma basilare di questo apparecchio, è quella di un recipiente dalle dimensioni standardizzate, avente il compito di raccogliere le precipitazioni, che verranno poi analizzate da un tecnico. All'idea fondamentale, nel corso degli anni sono state apportate modifiche e migliorie, che hanno generato una vasta gamma di strumenti: ricordiamo il pluviometro manuale, quello che registra automaticamente le precipitazioni (pluviografo), il pluviometro a vaschette mobili, ma anche il pluviometro a pesatura o quello ottico. Il telerilevamento, o *remote sensing* invece, è una tecnica molto avanzata nata nel 1972 col lancio di una serie di satelliti (denominati *Landsat*), aventi come scopo unico quello di studiare l'ambiente ed i suoi cambiamenti, mediante appunto, questa neonata tecnologia. Lo studio del fenomeno o dell'ambiente di interesse, avviene mediante l'utilizzo di sensori passivi, i quali permettono il rilevamento a distanza (da cui il nominativo di questa tecnica) di specifiche bande dello spettro elettromagnetico. Nello specifico, per il settore meteorologico, grazie alla differente lunghezza d'onda della radiazione microonde (di circa 1 cm) e di quella infrarosso (circa un millesimo rispetto alla radiazione precedente), è possibile analizzare la superficie esterna ed interna delle nubi che stazionano sopra le masse oceaniche e quindi differenziare la radiazione ricevuta al sensore in modo da distinguere

l'oceano e le precipitazioni nelle nubi sopra di esso. Tale tecnica è denominata passiva, perché rileva passivamente le emissioni elettromagnetiche emesse dalle masse nuvolose e oceaniche, una sua variante, denominata telerilevamento attivo, prevede l'utilizzo di radar (in stazioni fisse o tramite voli aerei) che emettono e ricevono un segnale, che attraversando le masse nuvolose permette di quantificare la presenza e dimensione delle gocce d'acqua in differenti quote verticali. L'ultimo strumento evidenziato è il disrometro, esso permette di misurare la dimensione delle idrometeore in caduta e la loro velocità e viene spesso associato ai pluviometri per integrare la sua misura quantitativa (Testik et al., 2010).

Come abbiamo visto, per indicare la quantità di precipitazione si utilizza l'unità di misura dei millimetri, spesso abbinata ad un unità di tempo, che può andar dall'anno alla singola ora (o sua frazione), proprio quest'ultima indicazione ci fornisce anche un'altra informazione. Infatti, se la misura viene fatta partire dall'inizio dell'evento meteorologico, è possibile stabilirne, a posteriori, l'intensità secondo una determinata scala. Allo stato attuale però, non esiste una classificazione precisa e globalmente accettata.

Secondo l'*American Meteorological Society* (AMS, Glossary of Meteorology, 2012), istituto scientifico americano, che si occupa di ricerca e diffusione informazioni nei settori pertinenti alla meteorologia, l'oceanografia e l'idrologia; la classificazione secondo l'intensità delle piogge è articolata come segue.

- Pioggia leggera: quando si ha una soglia massima inferiore ai 2,5 mm/ora.
- Pioggia moderata: per precipitazioni comprese tra i 2,5 ed i 7,6 mm/ora.
- Pioggia pesante: se si superano i 7,6 mm/ora.
- Pioggia violenta: per valori superiori ai 50 mm/ora.

Un altro sistema invece, è proposto nel manuale "La meteorologia in mare" (Giuliaci et al., 2009), nel quale viene indicato:

- Piovigginne: quantità di precipitazione pari a 0,25 mm/ora.
- Pioggia leggera: valori compresi tra 2 e 4 mm/ora.
- Pioggia moderata: valori compresi tra 4 e 6 mm/ora.
- Pioggia forte: valori superiori a 6 mm/ora.
- Rovescio: precipitazioni superiori a 10 mm/ora.
- Nubifragio: quantità di precipitazione superiore a 30 mm/ora.

I due sistemi classificativi non si differenziano molto, nel secondo vengono aggiunte ulteriori classi ed abbassato il limite massimo. Questa soglia ad ogni modo, è sufficiente per causare dei danni al territorio, soprattutto se colpito da eventi sequenziali o sinergici.

1.4 Eventi estremi

In questo quadro di cambiamenti globali e conseguenti impatti ambientali, spiccano sulla panoramica italiana (ma non solo) gli eventi estremi: questi eventi, per definizione stocastici e rari, rappresentano una perturbazione dalla media locale di un determinato evento naturale, in special modo riguardano la sfera meteorologica, la quale a sua volta, può indurre grossi impatti successivi a compartimenti ambientali diversi.

Secondo il dossier “I costi del rischio idrogeologico” redatto da Legambiente (Legambiente, 2012), dove sono state prese in esame le serie storiche del periodo 1948 – 2011, riguardanti eventi alluvionali e franosi, durante gli ultimi 10 anni si è registrato un raddoppio di queste situazioni di emergenza, passando da un totale di 4 eventi annuali per regione (1948 – 2000) ad 8 (2000 – 2011).

L’elevata frequenza di queste situazioni ad alto rischio, spesso su un territorio vulnerabile, impoverito da un’elevata cementificazione e da pianificazioni territoriali vecchie di decenni, inadatte a contenere l’intensità di questi fenomeni meteorologici, ha posto lo Stato e le Regioni di fronte a spese nell’ordine di milioni di euro. Spese per il ripristino dei danni occorsi, per lo sviluppo di opere atte a mitigare emergenze future, per migliorare i piani di gestione/territoriali esistenti ma anche effettuare prevenzione con una maggiore informazione verso i propri cittadini. Sempre più spesso, quest’ultima categoria non rappresenta più solo un semplice fruitore del sistema infatti, ma una parte integrante ed attiva di esso, che se opportunamente informato e formato, può rappresentare il primo gradino nella scala del sistema di allerta.

Andando a monetizzare, sempre secondo il Dossier Legambiente (2012), risulta come per gli ultimi 10 anni, siano stati erogati circa 2 miliardi di euro, finalizzati ai soli interventi principali, indicati dai Piani di Assetto Idrogeologico (PAI), se volessimo mettere in sicurezza la totalità delle situazioni soggette a rischio, presentate da tutti i PAI redatti da tutte le Autorità di Bacino italiane, ci troveremmo dinnanzi ad una somma approssimativa di 40 miliardi di euro. Proseguendo su questa linea teorica ed ipotizzando lo sblocco di tale cifra, per lo svolgimento di tutte le operazioni necessarie però, ancora non sarebbe sufficiente: infatti si impiegherebbe il capitale per la risoluzione di eventi puntuali, senza considerare un quadro di miglioramento generale, finalizzato alla prevenzione del rischio.

Per quanto riguarda l’Emilia Romagna, durante l’anno 2010 è stato sottoscritto un accordo tra Ministero dell’Ambiente e Regione per la messa in sicurezza di 256 zone di interesse prioritario, per un totale di 144 milioni di euro (RER, 2014). Con questi fondi si intende quindi, garantire una manutenzione diffusa sul territorio, tramite azioni per la riduzione del rischio idrogeologico, dare risposta alle problematiche montane del dissesto mediante protocolli di mitigazione del rischio e adeguato controllo e manutenzione dei versanti; si intende inoltre porre soluzione alle criticità derivanti da diversi nodi idraulici dislocati in zone di pianura ed infine aumentare il numero di interventi per la messa in sicurezza del litorale per la difesa della costa.

Nonostante l’accordo citato ed i fondi correlati però, solamente nell’ultimo anno l’Emilia Romagna è stata soggetta a diversi e imponenti eventi alluvionali, che hanno messo in crisi tutti i settori economici dei territori colpiti. Che quindi non sono stati previsti ne tanto meno gestiti allo stato dell’arte. Grazie ai rapporti redatti da ARPA è possibile riassumere gli eventi principali.

- Modena 17 – 19 gennaio 2014: fin dalla giornata del 16 gennaio si sono susseguiti diversi eventi precipitosi sull’Italia settentrionale, concentrati special modo nelle Province di Reggio Emilia, Modena e Bologna, ma che hanno interessato anche la zona

dell'Appennino tosco-emiliano. Proprio su questa zona si sono scaricate con maggiore intensità le piogge, che hanno poi causato la piena fluviale del fiume Secchia e la sua rottura degli argini in corrispondenza della Bassa. Grazie alla particolare sinottica dell'evento, non dissimile da una tempesta estiva, che ha accentuato le precipitazioni sui crinali appenninici, la stazione ARPA, localizzata a Civago (RE) nel bacino del Secchia ha registrato nel solo giorno del 18 gennaio 169 mm di pioggia, 396 mm per i giorni 17-18-19 e ben 536 mm nella settimana dal 13 al 19 gennaio. I livelli registrati dalla stazione sono molto preoccupanti, ricordando che i valori medi di precipitazione annuale per la Regione oscillano tra i 600 e gli 800 mm (ARPA a, 2014).

- Ravenna e Faenza 30 - 31 maggio 2014: anche per questo evento, ci troviamo in una situazione di intense precipitazioni per l'intera Regione, che hanno avuto il loro apice durante la notte tra il 30 ed il 31. I danni maggiori sono stati registrati tra Faenza e Brisighella, dove l'ondata di maltempo ha fatto registrare alle diverse stazioni ARPA dislocate sul territorio, valori di precipitazione cumulata superiori ai 50 mm nell'arco di una sola ora, tra le 23 e le 00. Il fenomeno ha avuto poi ripercussioni su diversi affluenti del Po, sul Lamone e i Fiumi Uniti nel ravennate, l'Uso nel forlivese ed il Marecchia nel riminese (ARPA b, 2014).
- Imola 20 – 21 settembre 2014: le precipitazioni iniziano sulla zona appenninica il giorno 19, come nuclei isolati. Durante la notte dello stesso giorno si verificano diversi rovesci temporaleschi, anche con notevoli intensità nel breve e brevissimo periodo, ma di breve durata. Il sistema poi si sposta verso il forlivese dando luogo ad altre cumulate rilevanti, ma come nel caso precedente, assimilabili alle normali dinamiche temporalesche. Successivamente, tra le 01 e le 03 del 20 settembre, le formazioni presenti si fondono in un unico grande sistema convettivo. Le intense precipitazioni generate dall'evento meteorologico, hanno generato piene impulsive nei bacini del Santerno, Senio, Lamone e Montone, con livelli idrometrici al colmo di piena, che spesso hanno raggiunto i massimi storici. Il transito dell'onda di piena ha determinato poi allagamenti in zone non soggette alla normale espansione fluviale, causando danni alle abitazioni e a diverse imprese agricole. La stazione di Fiorenzuola, nell'alto Santerno, dove si è scaricato con maggior violenza l'evento, ha registrato piogge pari a 105 mm nelle 3 ore, 167 mm per 6 ore e 173 mm nell'arco delle 12 ore, le curve di probabilità pluviometrica calcolate da ARPA mostrano che tali tempi di ritorno, risultano pari o superiori a 200 anni (ARPA c, 2014).
- Parma 13 ottobre 2014: durante il periodo 9 – 13 ottobre sono state registrate pesanti precipitazioni per l'alta Emilia Romagna, il Piemonte e la Liguria. Grazie ad una relazione tecnica, redatta dall'AIPO (Agenzia Interregionale per il fiume Po) è stato possibile stabilire che le precipitazioni cumulate per la giornata del 13, hanno raggiunto valori superiori ai 350mm per il bacino del Tanaro, ed hanno causato l'esondazione di diversi torrenti della rete idrografica secondaria. Dopo aver interessato il versante ligure, la cella meteorologica ha colpito la zona appenninica spostandosi infine su Parma, dove le ingenti piogge, con cumulate di 200 mm in 6 ore, hanno causato un'eccezionale piena del torrente Parma e Baganza, quest'ultimo specialmente ha causato ingenti danni nella città di Parma, soprattutto a causa del materiale fluitato, come diversi container, che hanno provocato ingenti danni alle strutture edificate (AIPO 2014).

Le strategie messe in atto per la riduzione del rischio meteo-idrogeologico-idraulico, al fine di tutelare la popolazione da eventi come quelli riportati, operano secondo due scale disarticolate, una in tempo differito ed una in tempo reale.

La prima, nel tempo differito, consiste principalmente della pianificazione territoriale e del lavoro di tutti gli enti ad essa correlata, come ad esempio le Autorità di Bacino, le Regioni, e la Protezione Civile. Le azioni coordinate dai diversi enti convergono poi in specifici documenti che vengono analizzati ed implementati nella pianificazione a livello comunale. Queste attività atte a migliorare la conoscenza territoriale in specifici settori sono svolte secondo precise norme Statali, quale ad esempio il decreto legislativo 49/2010, il quale da attuazione alla direttiva Europea 2007/60/CE, relativa alla valutazione e alla gestione del rischio alluvioni. Documenti realizzati a questo scopo sono, ad esempio, il Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) redatto dalle Autorità di Bacino a livello nazionale, il quale rappresenta lo strumento giuridico che disciplina le azioni per la difesa idrogeologica del territorio, della rete idrografica e dei versanti a rischio dissesto, attraverso processi di gestione territoriale ed urbanistica. O ancora, il Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni, basato sul già menzionato D.lgs. 49/2010, disciplina le attività di valutazione e gestione del rischio in questo specifico settore, articolandosi in tre fasi: Valutazione preliminare del rischio di alluvioni, elaborazione di mappe della pericolosità e del rischio alluvione, predisposizione ed attuazione di piani di gestione del rischio di alluvione. La seconda strategia riguarda invece la cosiddetta gestione dei sistemi di *Early Warning*, ovvero quei sistemi che operano in tempo reale per la minimizzazione del rischio. Solitamente questa metodologia si basa sull'interazione congiunta di una rete tecnologica e di risorse umane per la sua gestione ed analisi, disposta sul territorio ed in grado di determinare il raggiungimento di specifiche soglie, superate le quali è molto probabile l'accadimento dell'evento dannoso. Si procede quindi a diramare un allerta al fine di tutelare la popolazione interessata. Il grado di prevedibilità varia in base alla tipologia di evento naturale, alla messa in opera della rete di monitoraggio e dalle conoscenze del sistema per il quale si sta tendendo di fare una previsione (Ecoscienza, 2013).

Per quanto riguarda il comparto meteo-idrogeologico, lo stato attuale delle tecnologie permette un buon livello di previsione, anche se molto spesso, alcuni eventi precipitativi particolari, definiti dai media "bombe d'acqua" e dalla comunità scientifica "*cloudburst*", sono ancora troppo rapidi nel loro decorso e complice anche la scala spaziale alla quale colpiscono, avente estensione massima di qualche decina di km², di difficile previsione. Gli effetti sul territorio di questo genere di eventi, viene definito alluvione lampo, o tramite termine inglese "*flash flood*".

La Società Meteorologica Americana definisce questo termine come segue: "*...flood that rises and falls quite rapidly with little or no advance warning, usually as the result of intense rainfall over a relatively small area*" (AMS, Glossary of Meteorology, 2012 a)

L'istituto americano NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) invece, utilizza una definizione diversa: "*A flood caused by heavy or excessive rainfall in a short period of time, generally less than 6 hours. Flash flood are usually characterized by raging torrents after heavy rains that rip through river beds, urban streets, or mountain canyons*

sweeping everything before them. They can occur within minutes or a few hours of excessive rainfall. They can also occur even if no rain has fallen, for instance after a levee or dam has failed, or after a sudden release of water by a debris or ice jam” (NOAA, 2010).

Quindi generalmente, questa condizione si verifica piuttosto rapidamente, nel giro di minuti o al massimo ore dall'evento precipitativo massiccio e interessano ambiti territoriali di poche decine di chilometri quadrati, anche se, a questa regola generale possono verificarsi eccezioni, dovute al sinergismo di più corsi d'acqua o ad esempio precipitazioni sequenziali.

1.4.1 Criticità idraulica

Il problema della fragilità del nostro territorio, è stato recentemente rimarcato da numerosi eventi (alcuni di essi riportati nel paragrafo precedente) che hanno portato ad una ribalta mediatica situazioni territoriali ad altissimo rischio idrogeologico. Complici le amministrazioni e le politiche di gestione territoriale passate, che non hanno avuto la lungimiranza di considerare i problemi sotto una maggiore estensione temporale e soprattutto senza un'ottica di sostenibilità, ci troviamo, secondo il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, con aree ad alta criticità idraulica aventi estensione pari a 12263 Km².

Questo valore complessivo, comprende aree a pericolosità da alluvione elevata e molto elevata, aree a rischio da alluvione elevata e molto elevata, aree d'alveo, aree golenali e in generale, tutte le aree con tempi di ritorno minori o uguali a 200 anni, perimetrare nei Piani di Assetto Idrologico (PAI) stilati dalle Autorità di Bacino. Oltre a queste aree, sono inoltre da conteggiare anche quelle aventi tempi di ritorno fino ai 500 anni, che possono presentare maggiori criticità, le quali aggiungono altri 23903 Km² ai precedenti dodicimila erotti (Figura 4, ISPRA, 2014)

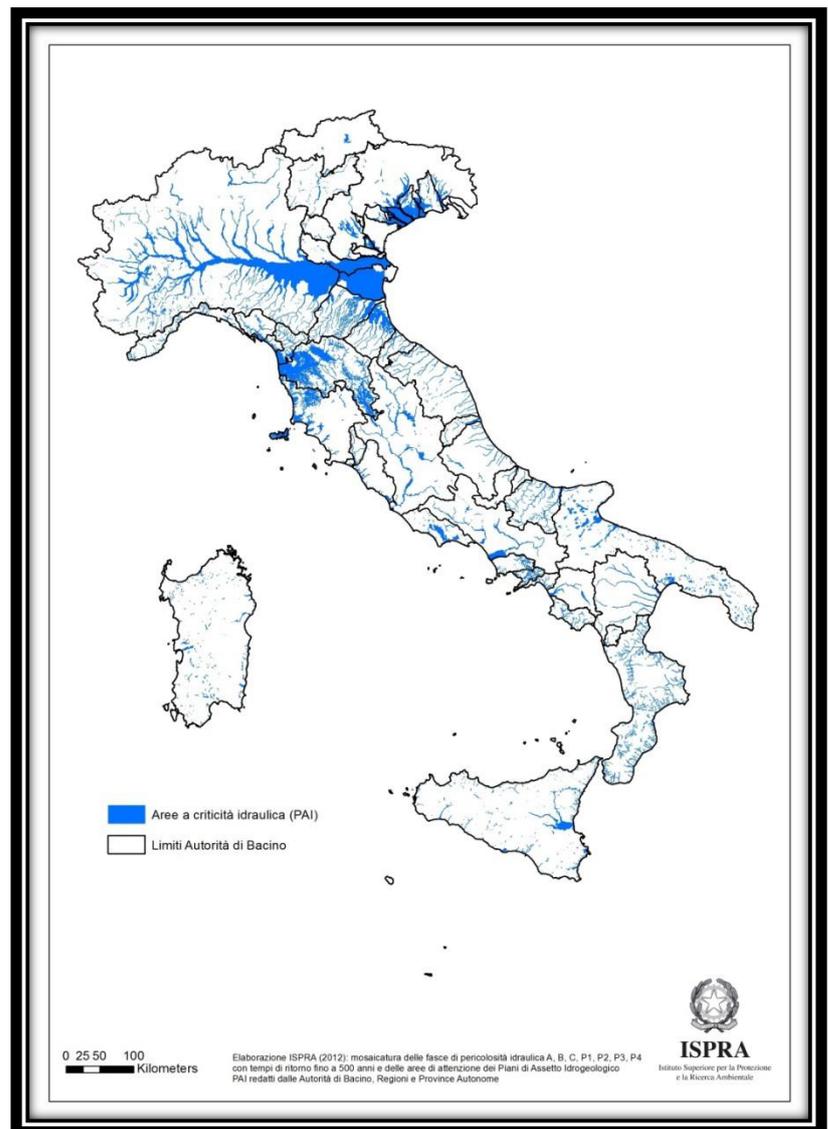


Figura 4 - Aree ad alta criticità idraulica, ISPRA

1.5 Geographic Information System (GIS)

Uno strumento per l'elaborazione e l'analisi dei dati meteo, ma anche di quelli idrogeologici e territoriali è il GIS. Un sistema informativo geografico, è un sistema computerizzato designato all'ottenimento, immagazzinamento, manipolazione, analisi e gestione dei dati geografici in formato digitale (Figura 5; USGS, 2007).

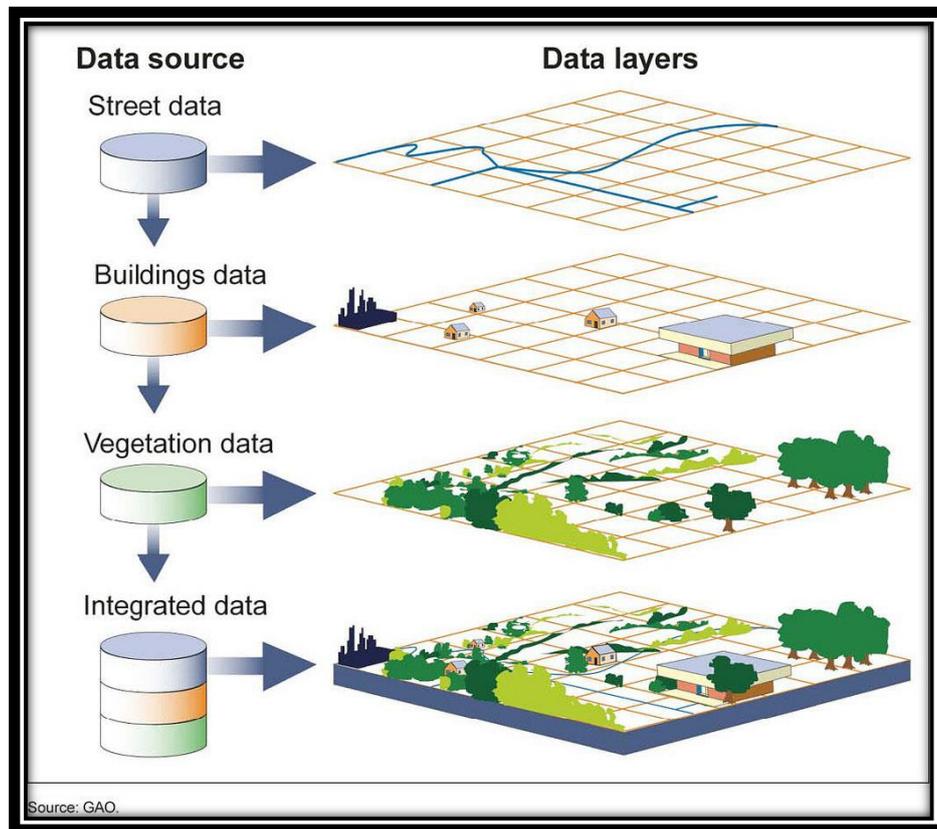


Figura 5 - Rappresentazione schematica del funzionamento GIS fonte: U.S. General Accounting Office

Per lavorare in questo settore, sono impiegati specifici software, che possono essere dotati di licenza o essere *open source*, quindi liberamente utilizzabili, i quali permettono all'utente di lavorare in modo integrato al fine di analizzare le informazioni spaziali, anche in modo molto specifico e settoriale, tramite determinati *plug-in* (ad esempio per l'idrologia), modificare ed aggiornare la cartografia, effettuare delle *query* (delle interrogazioni) sui database relativi alle informazioni geografiche, ma anche collegare tra loro dati che apparentemente non hanno correlazioni, oltre la localizzazione geografica, in modo da creare uno scenario più completo e dettagliato per le analisi successive. Queste sono solo alcune delle possibilità, che queste tipologie di software mettono a disposizione all'utente, ogni nuova versione rilasciata, implementa nuove *features* e ottimizzazioni sulle funzionalità precedenti che vanno a migliorare tutto il comparto GIS ed i risultati che permette di ottenere.

Capitolo 2

2 Obiettivi

In un contesto come quello evidenziato, in cui le amministrazioni si stanno rendendo conto solo ora, che le problematiche idrologiche stanno avendo un impatto sempre maggiore sulle casse comunali, come pure sull'opinione pubblica dei loro cittadini; l'applicazione di uno strumento che risulti sufficientemente accurato ed al contempo poco costoso, per valutare lo stato idrologico di un bacino e l'ipotetico rischio ad esse correlato, potrebbe essere di importanza prioritaria.

Tramite l'utilizzo di una rete di pluviometri elettronici, ad esempio, si potrebbero esaminare le piogge in tempo reale ed in caso di superamento di specifica soglia, stabilita a priori sulle caratteristiche geomorfologiche della zona, diramare un avviso di allerta alla popolazione o mandare degli addetti nelle zone a criticità maggiore, per iniziare un arginamento contenitivo preventivo

Con questo lavoro di tesi, si intende sviluppare un metodo, che permetta la determinazione di due soglie di valori di precipitazioni, la soglia di attenzione e la soglia di pericolo, tali per cui il bacino di interesse possa mantenersi ancora funzionale, fornendo del tempo per attivare le misure di mitigazione del rischio (nel qual caso l'intensità delle precipitazioni consegua il superamento della soglia di pericolo). Questi limiti, denominati altezza di pioggia massima (h), sono dei parametri stimabili grazie ad un lavoro di *back analysis*, ovvero tramite l'applicazione di diverse metodologie idrologiche, tali per cui sarà possibile ricostruire a posteriori la soglia in esame, partendo dalle serie storiche delle precipitazioni e da un evento di intensità importante che ha messo in crisi il bacino Calastra.

Capitolo 3

Al fine di meglio comprendere il lavoro di analisi successivo, in questo capitolo si definirà il quadro generale territoriale per la zona indagata, le sue caratteristiche morfologiche, idrologiche e geologiche, l'andamento meteorologico ed il comparto normo-legislativo applicato in Italia.

3 Inquadramento geografico - ambientale del territorio considerato

L'area del bacino dei Padulli, è localizzata, quasi per tutta la sua totalità, all'interno dei limiti amministrativi del Comune di Rimini, tale superficie è piuttosto irregolare ma limitata nella sua parte orientale, da un segmento del canale artificiale del torrente Ausa, nel quale confluiscono tutte le acque raccolte da questo territorio. Esso continua poi, superando l'asta autostradale per circa cinque chilometri nell'entroterra, fino a intrecciarsi col Comune di Sant'Arcangelo per una minima frazione. La sua estensione supera di poco i quindici chilometri quadrati (15.2 per la precisione).

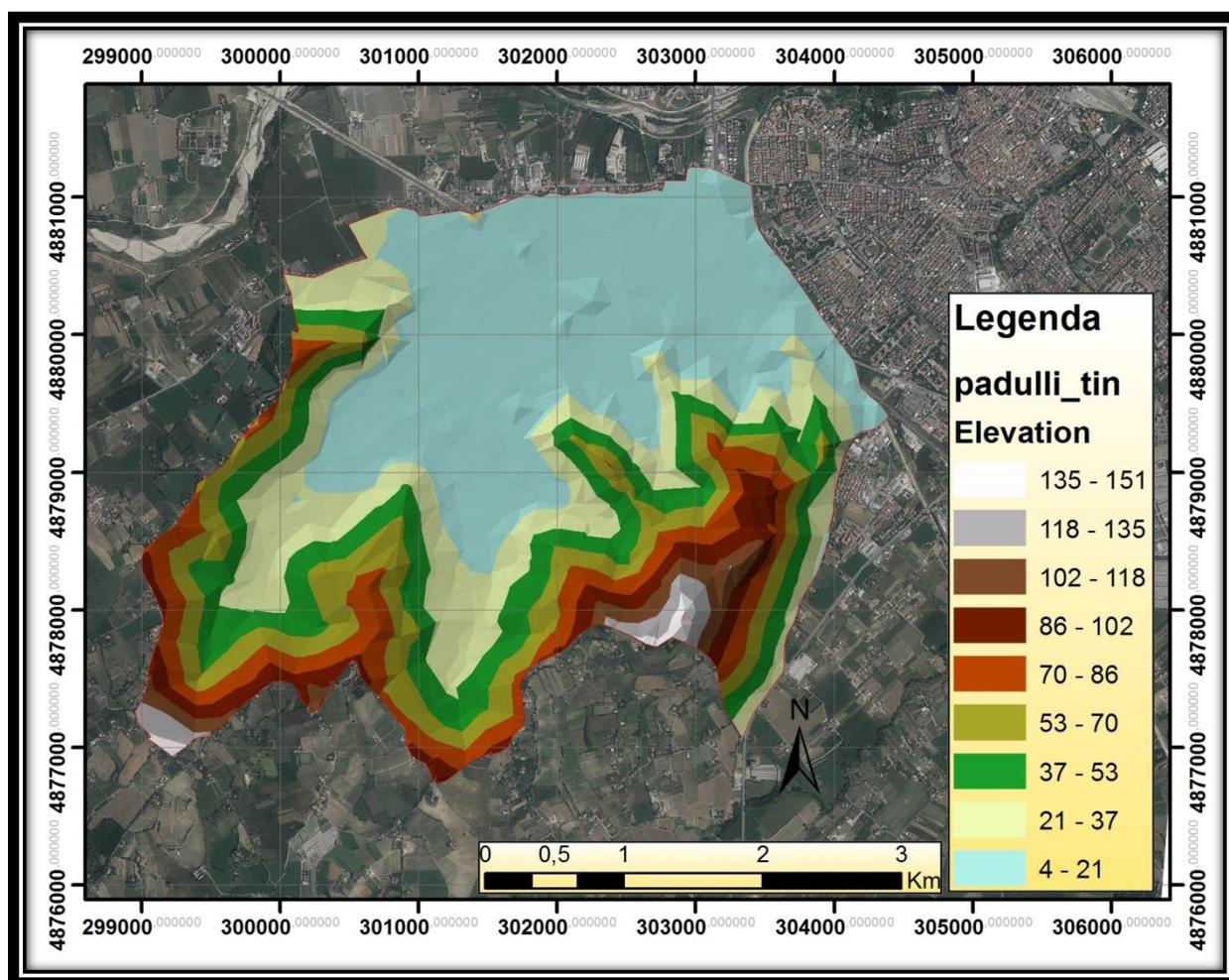


Figura 6 - Modello di elevazione del Bacino, "Triangulated Irregular Network"

Morfologicamente (in Figura 6 un modello digitale realizzato tramite il metodo "triangulated Irregular Network, TIN), l'area è piuttosto eterogenea: presenta una sorta di vallata che la percorre per i 2/3 della sua lunghezza, in questa parte, il territorio ha un'elevazione poco

significativa, che varia tra i 10 ed i 18 metri sopra il livello del mare. Quest'area è incorniciata a sud e a est dalle colline, tipiche della bassa Romagna, aventi una pendenza compresa tra i 5, ed i 25° nelle aree più acclivi. La quota invece, parte dai 25 metri s.l.m. per poi raggiungere i 100 metri; solamente nella regione meridionale, in corrispondenza della Strada Statale 72 che porta a San Marino, assistiamo a colline più aspre, le quali raggiungono i 150 metri sopra il livello del mare.

Per quanto riguarda invece, il territorio soggetto alle elaborazioni, esso consiste di una porzione di tale bacino: a partire dalla definizione del punto di chiusura (per il quale, il Consorzio di Bonifica della Romagna ha fornito delle foto indicative dell'evento meteo 24/06/2013, Figura 27) e risalendo lungo le linee di spartiacque, spesso usando anche le strade provinciali a tal file.

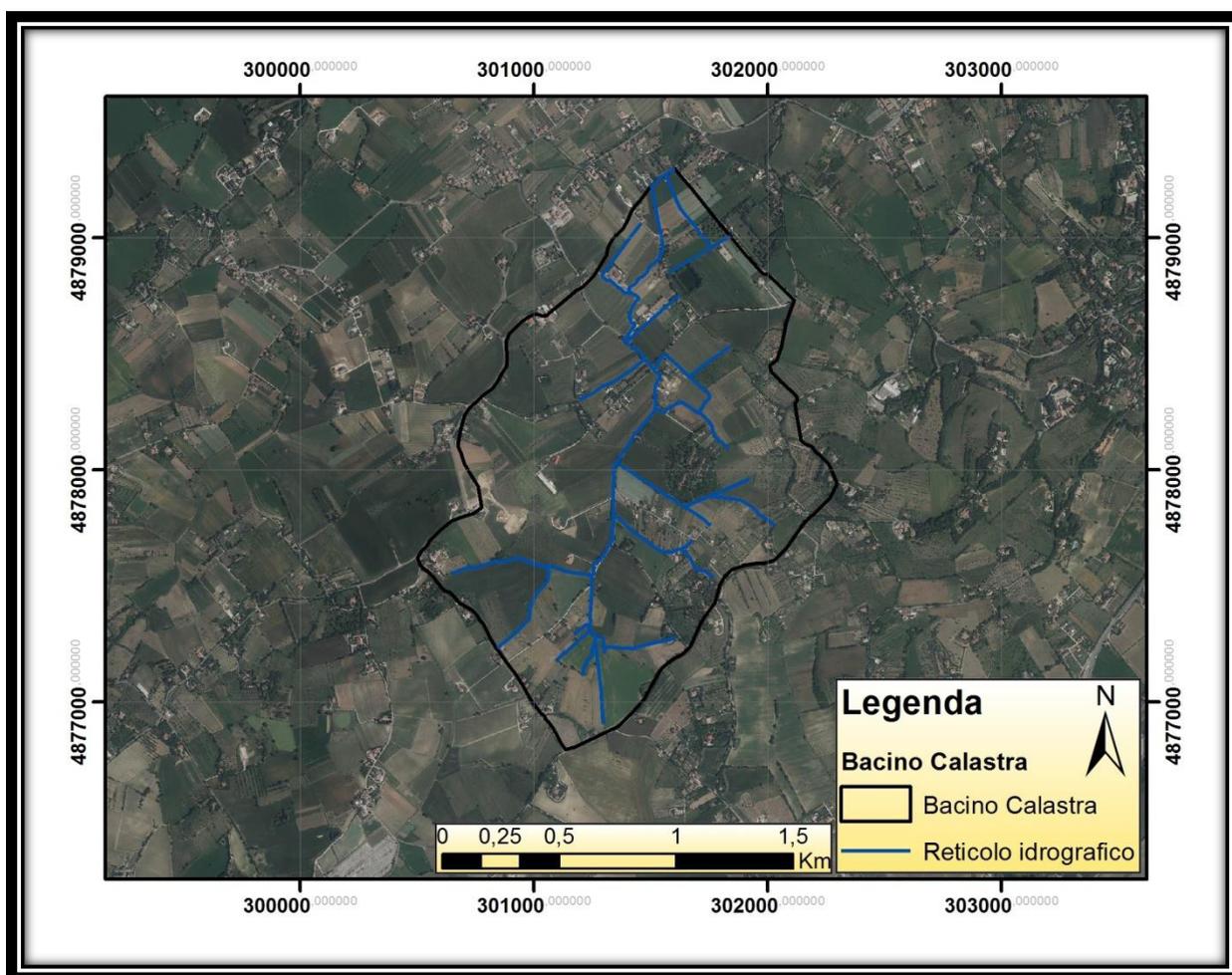


Figura 7 - Bacino Calastra

Il bacino, denominato Calastra, conseguentemente alla via in cui si trova la sezione di chiusura, presenta un'area di 2.4 km², un perimetro di 6.7 km ed una lunghezza, dalla sezione di chiusura al punto più lontano di 2.5 km. La quota massima corrisponde a 120m, mentre quella minima è poco superiore ai 14m s.l.m. Come possiamo notare dall'immagine presentata (Figura 7), esso presenta quasi totalmente suoli di tipo agricolo, poco edificato ed ovviamente la rete stradale, composta anche da strade sterrate.

3.1 Idrologia

Il bacino Padulli, non presenta una tipica formazione fluviale, infatti, l'unico verso corso è rappresentato dal canale artificiale che scorre sul lato Est del bacino, con una lunghezza di due chilometri, esso rappresenta solo una parte del torrente Ausa, che scorre per una lunghezza complessiva di 17.2 km, nascendo da calanchi argillosi presenti nelle prime formazioni collinari del Monte Titano, sul quale sorge la Repubblica di San Marino, per sfociare nell'Adriatico. Originariamente il flusso del torrente tagliava di netto il centro cittadino, passando vicino all'Arco d'Augusto, accanto alla stazione e sfociando in mare, all'altezza di quella che ora è Marina Centro, per motivi di sicurezza e comodità però, all'inizio del secolo scorso fu costruito un canale artificiale in cemento per il tratto finale, in corrispondenza del casello autostradale attuale, in sinistra idrografica, che ne deviò il corso facendolo confluire all'interno del fiume Marecchia, a circa 2km dalla foce di quest'ultimo. Il corso originario è ben visibile grazie alla rigogliosa vegetazione ancora presente, la vecchia asta fluviale, infatti, è stata trasformata in un parco (prima parco Giovanni Paolo II e poi verso il mare parco Alcide Cervi), il quale mette in collegamento il litorale, dove appunto sfociava l'Ausa, con la zona più interna. L'Ausa presenta un regime idraulico tipicamente torrentizio, caratterizzato da portate basse per la stagione estiva e picchi in inverno imputabili alle precipitazioni, e quando presenti, lo scioglimento delle nevi sulle zone collinari della bassa Romagna.

L'importanza del canale artificiale sopra citato, consiste nel fatto che esso rappresenta la sezione di chiusura per il tale bacino. Con questo termine si vuole indicare il luogo di convergenza di tutte le acque drenate dal bacino in esame, usualmente viene identificata tramite l'intersezione della linea di spartiacque, la quale identifica il bordo del bacino, con l'asta fluviale di ordine superiore o con la foce. L'importanza strategica e idraulica di questo punto è fondamentale, esso infatti presenta la quota più bassa e dato che in esso si concentra tutto il volume canalizzato, viene spesso usato come punto di misura per indagini ambientali o ingegneristiche, al fine di determinare un valore di portata complessivo.

Il bacino Calastra (Figura 7), come per quello di ordine superiore (Figura 6), non presenta la tipica geometria fluviale, esso è formato da una serie di canali, spesso formanti angoli molto netti tra loro, aventi dimensione e portate molto variabili. Per questa loro funzione, è possibile che ve ne siano di nuovi, non inseriti nella cartografia utilizzata per le elaborazioni, ma nonostante questo, il lavoro si focalizzerà sull'utilizzo e l'elaborazione dei dati reperiti (presso la Provincia di Rimini, Il Consorzio di Bonifica della Romagna e l'Autorità di Bacino Marecchia-Conca) senza tenere conto quindi, di eventuali modifiche più recenti. L'estensione della rete idrologica, determinata allo stato attuale, è pari a 9.2 km, dei quali, 2.7 solo per l'asta principale, che corre mediamente lungo l'asse centrale del bacino. I 6.5 km restati, sono determinati da canali agricoli di ordine inferiore.

3.2 Geologia

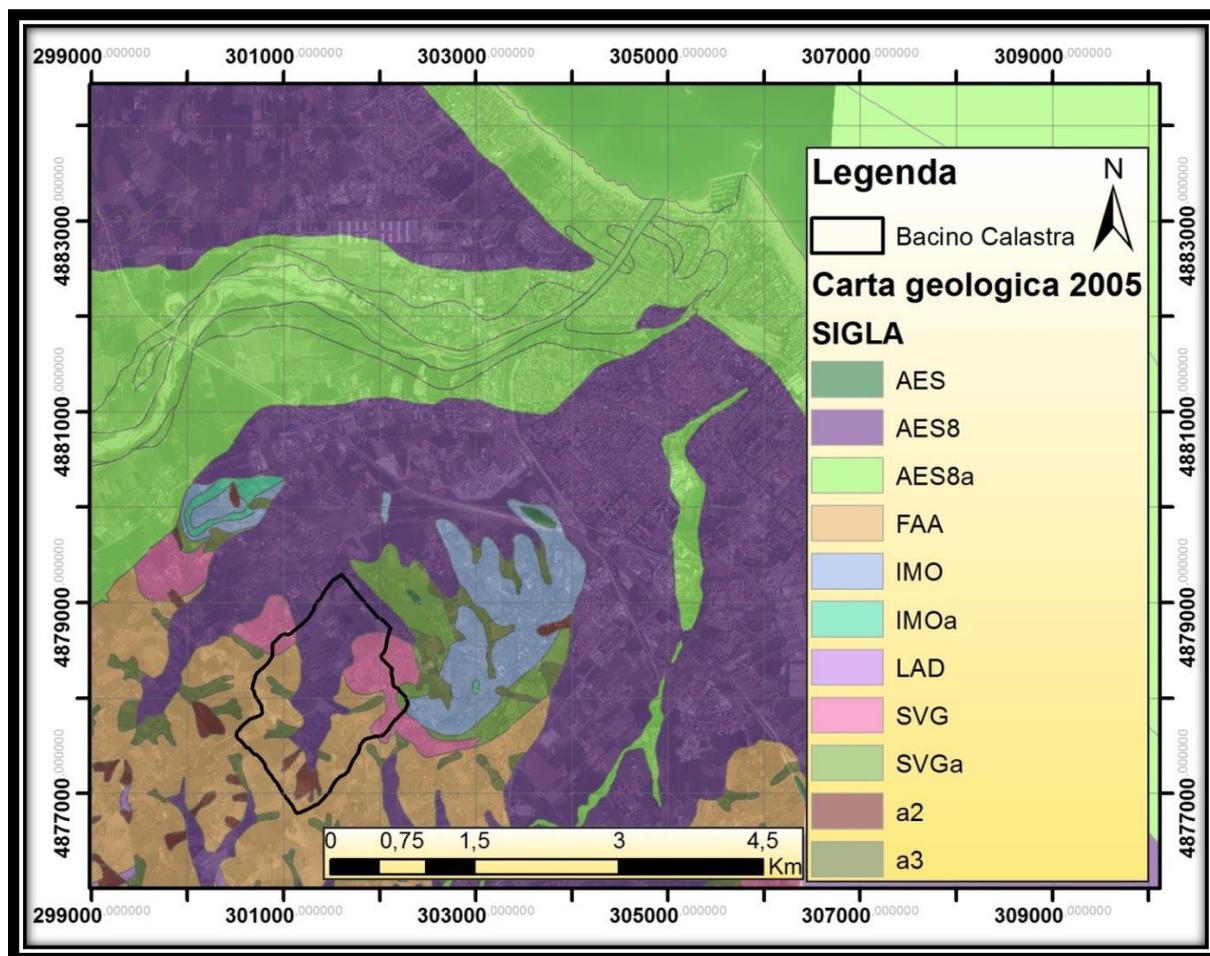


Figura 8 - Carta geologica 2005, stralcio Provincia di Rimini, scala 1:75000

Il territorio comunale di Rimini presenta una caratterizzazione geomorfologica (Figura 8) molto particolare, determinata dalla sua localizzazione: tra l'Appennino e la costa. La parte sud-occidentale è costituita dal margine appenninico-adriatico e dai suoi rilievi collinari, la zona centrale invece, figura come piana alluvionale, generata dall'afflusso di materiale a valle, dai fiumi appenninici, principalmente il Marecchia, a nord-est invece, abbiamo la fascia costiera, con un'ampiezza di diverse centinaia di metri in alcuni punti, costituita dai depositi litoranei.

La zona collinare appartiene per lo più alla Successione Post-Evaporitica del Margine Padano, costituita dalle Argille Azzurre (FAA), di età pliocenica e pleistocenica, a cui si alternano vari livelli di arenarie (spessi anche diverse decine di metri), accumuli di frane sottomarine, dalle Arenarie e Argille di Savignano (SVG) e delle Sabbie di Imola (IMO)(PSC Rimini, 2011).

La formazione delle Argille Azzurre, predominante nel sistema, è un insieme di depositi sedimentari detritici, originati nel fondale marino tra il Pliocene ed il Pleistocene inferiore, quindi tra 5,3 e 1 milione di anni fa. Formate da argille, argille marnose e marne siltose generalmente grigie e grigio-azzurre, talora scure, in strati sottili, con stratificazione poco marcata o assente (RER, 2005), questi depositi, sono poco consolidati ed estremamente

erodibili, ad esempio grazie l'azione delle precipitazioni, che dilavano lo strato superficiale di questa roccia, denudando quello sottostante, impermeabile, andando così a formare i crinali tipici della zona del riminese e del forlivese (ISPRA, quaderno 7).

Nella successione stratigrafica, sopra lo strato di Argille Azzurre (FAA), spesso anche diverse centinaia di metri, troviamo dei livelli di Arenarie ed Argille di Savignano (SVG), formazione costituita da alternanza di argille sottili, grigie chiare, beige all'alterazione, e arenarie sottili e molto sottili, fini e finissime, poco cementate a piani paralleli, come per i precedenti depositi, anche questi trovano la loro origine durante il Pleistocene Inferiore. Il passaggio agli ultimi depositi infine, specialmente per l'area litorale, è segnato dalla presenza di sabbie di spiaggia e cordoni dunali, note alla letteratura come Sabbie di Imola (IMO). Esse sono caratterizzate da arenarie e sabbie da medie a finissime, generalmente poco cementate, giallastre all'alterazione, in strati spessi e molto spessi, mal definiti e amalgamati tra loro. All'interno di questi strati, è frequente trovare, qualora affiorino in superficie, formazioni caratteristiche, definite *ripples*, che si originano in condizioni di flusso marino, nella regione a basso regime di corrente (RER, 2005).

La parte centrale, come detto è caratterizzata da depositi alluvionali (AES), aventi spessore variabile, mediamente esso aumenta spostandoci da sud verso nord, e da ovest verso est, superando in queste zone i 200 metri (PSC, Rimini 2011). Essi sono distribuiti in un ampio areale, andando a formare anche nelle zone collari pianure intravallive, di fiumi e torrenti che partendo dai rilievi appenninici, solcano la fascia di pianura fino alla costa, costituendo la parte sud-orientale della Pianura Padana, e proseguendo fino nel fondale marino dell'Adriatico, sopra questi depositi alluvionali, lungo la fascia costiera, troviamo uno strato dello spessore di 8-10 metri, di sabbie marine recenti, deposte quindi in un tempo inferiore ai 20.000 anni (RER, 2005).

3.3 Meteorologia

L'Emilia Romagna è una regione avente clima tipicamente continentale, il Mar Adriatico infatti, essendo poco esteso e poco profondo, incide marginalmente sul clima. Altro fattore che influenza fortemente il clima di questa regione, sono le catene montuose (Appennino Tosco-Emiliano) che ostacolano i flussi provenienti da sud e da ovest, permettendo invece il passaggio di quelli provenienti dal nord e dalle zone orientali.

Le precipitazioni hanno andamenti piuttosto irregolari: mediamente abbiamo un *range* compreso tra i 600 e 800 mm annui, questi valori però possono cambiare notevolmente in base alla zona in cui ci troviamo: nella zona del Delta del Po, ad esempio, la piovosità risulta molto bassa, qui non sempre si raggiungono i 600 mm annui, sui rilievi Appenninici invece, abbiamo una situazione opposta, con precipitazioni annue che possono superare i 1000 mm, in particolare per la zona che quasi raggiunge il Tirreno, questo valore viene ampiamente superato. La stagionalità delle precipitazioni è tipica del clima italiano, con massimi in primavera e autunno e minimi in estate, che possono essere interrotti da intensi rovesci estivi, i quali stanno gradualmente incrementando di intensità e frequenza (CMT 2012).

Le analisi condotte da ARPA (Cacciamani e Tibaldi 2008; Figura 9) attestano la riduzione delle precipitazioni medie annue ad un -20% rispetto l'ultimo trentennio, con una

diminuzione complessiva degli eventi e, concomitante, un aumento degli eventi estremi; anche le idrometeorie nevose invernali risultano avere un calo sostanziale, con riduzione delle coperture nevose, conseguente alla riduzione dei periodi di accumulo.

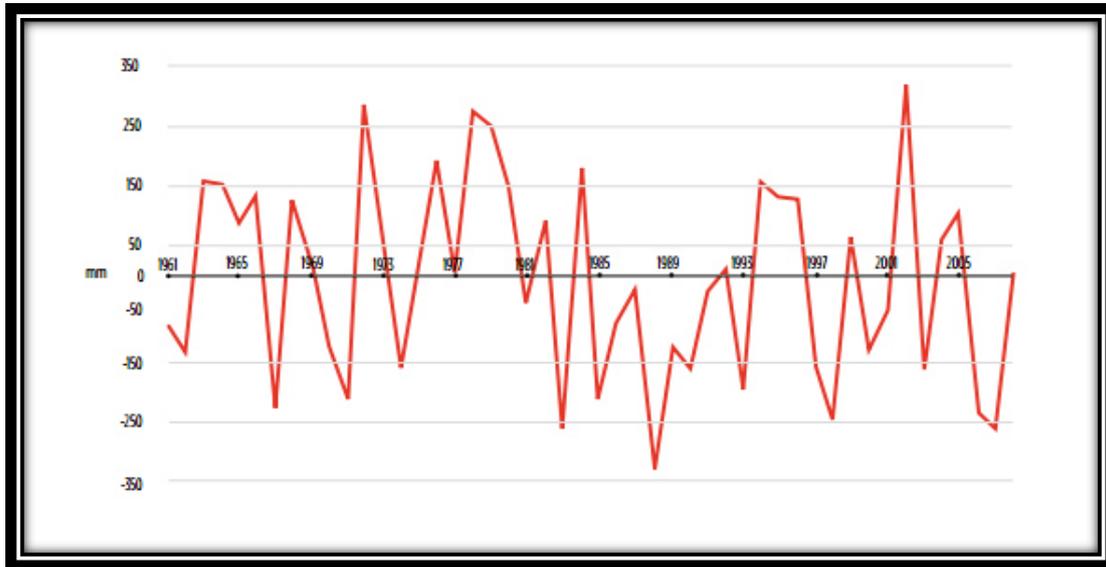


Figura 9 - Andamento delle anomalie di precipitazioni in ER negli ultimi 40 anni, Cacciamani et al. 2010

Per quanto riguarda le temperature invece, la regione è soggetta a forti escursioni termiche, dovute principalmente alla presenza del vicino Mar Adriatico. In estate si ha il superamento dei 30°C con facilità; in casi particolari, definiti “ondate di calore” è possibile raggiungere e superare anche i 35°C. L’inverno invece, presenta temperature che possono andare sotto i 0°C, con massime che difficilmente superano i 10° e, in corrispondenza di episodi di gelo intenso, sono stati registrati picchi negativi inferiori a -20°C.

Come già detto in precedenza, le temperature mostrano un trend di crescita dagli anni '80, ed anche l’Emilia-Romagna non fa eccezione: come evidenziato dall’ARPA (Cacciamani et al, 2010) è stato registrato un incremento corrispondente a 2°C per gli ultimi 40 anni, quindi 0.5°C ogni decade (Figura 10), con incrementi ancora superiori per gli ultimi 20 anni, i quali risultano i più caldi per l’intera serie.

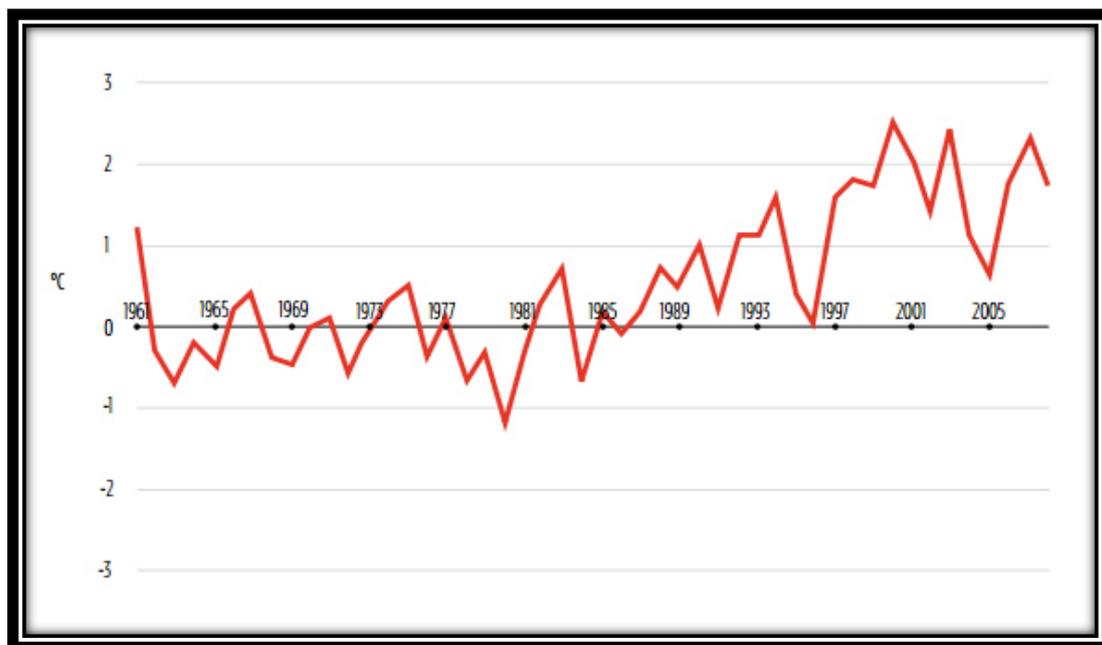


Figura 10 - Andamento delle temperature massime giornaliere in ER, Cacciamani et al. 2010

3.3.1 Inquadramento dell'evento meteorologico estremo

All'interno del quadro climatico appena presentato, si innesta l'evento di precipitazione estrema avvenuto il 24 giugno 2013 nella zona di Rimini (Figura 11). L'evento grazie a valori di precipitazioni cumulate molto elevate per un breve periodo, ha causato ingenti danni, con allagamenti e disagi, prolungati anche nei giorni seguenti.



Figura 11 - Fronte nuvoloso dell'evento estremo del 23/06/2013

L'evoluzione generale dell'evento, ad un'analisi a macroscale, indica la presenza di un'ampia seccatura sull'Europa centro-settentrionale, estesa fino al Mediterraneo. Questa zona a bassa umidità, è delimitata ad ovest dal promontorio di origine africana che richiama aria

subtropicale alle medie latitudini, mentre da est, l'area anticiclonica a bassa pressione trasporta aria di origine polare sull'Europa centrale. Questo scontro tra masse d'aria aventi caratteristiche opposte, si sviluppa sopra l'Italia centro-settentrionale (ARPA, 2013).

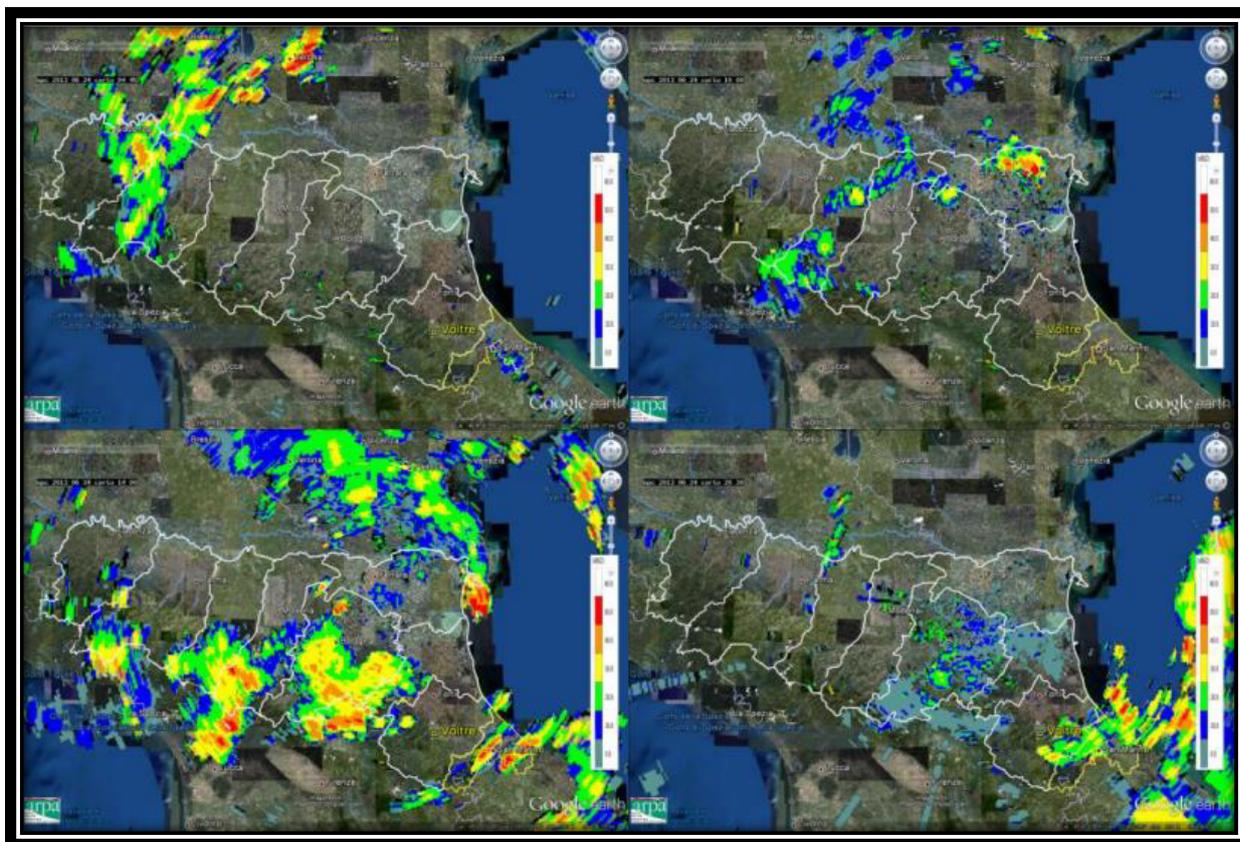


Figura 12 - Mappe di riflettività del 24/06/13 alle 04:45 UTC (alto sx), 10:00 UTC (alto dx), 14:00 UTC (basso sx) 20:00 UTC (basso dx), fonte ARPA 2013

Concentrandosi ora a livello di mesoscala (Figura 12), possiamo notare dei nuclei di precipitazioni sulle zone occidentali per le prime ore della giornata. I fenomeni più intensi si concentrano sul ferrarese (10:00 UTC), nelle ore centrali della giornata le precipitazioni si spostano sui rilievi ed in Romagna, fino a colpire il riminese (14:00 UTC corrispondenti alle ore 16:00 ora locale).

Nelle immagini seguenti (Figura 13, Figura 14 e Figura 15), sono riportate le mappe di riflettività per la zona di Rimini ordinate ogni 15 minuti, per il periodo in cui l'evento meteorologico si è scaricato sul territorio.

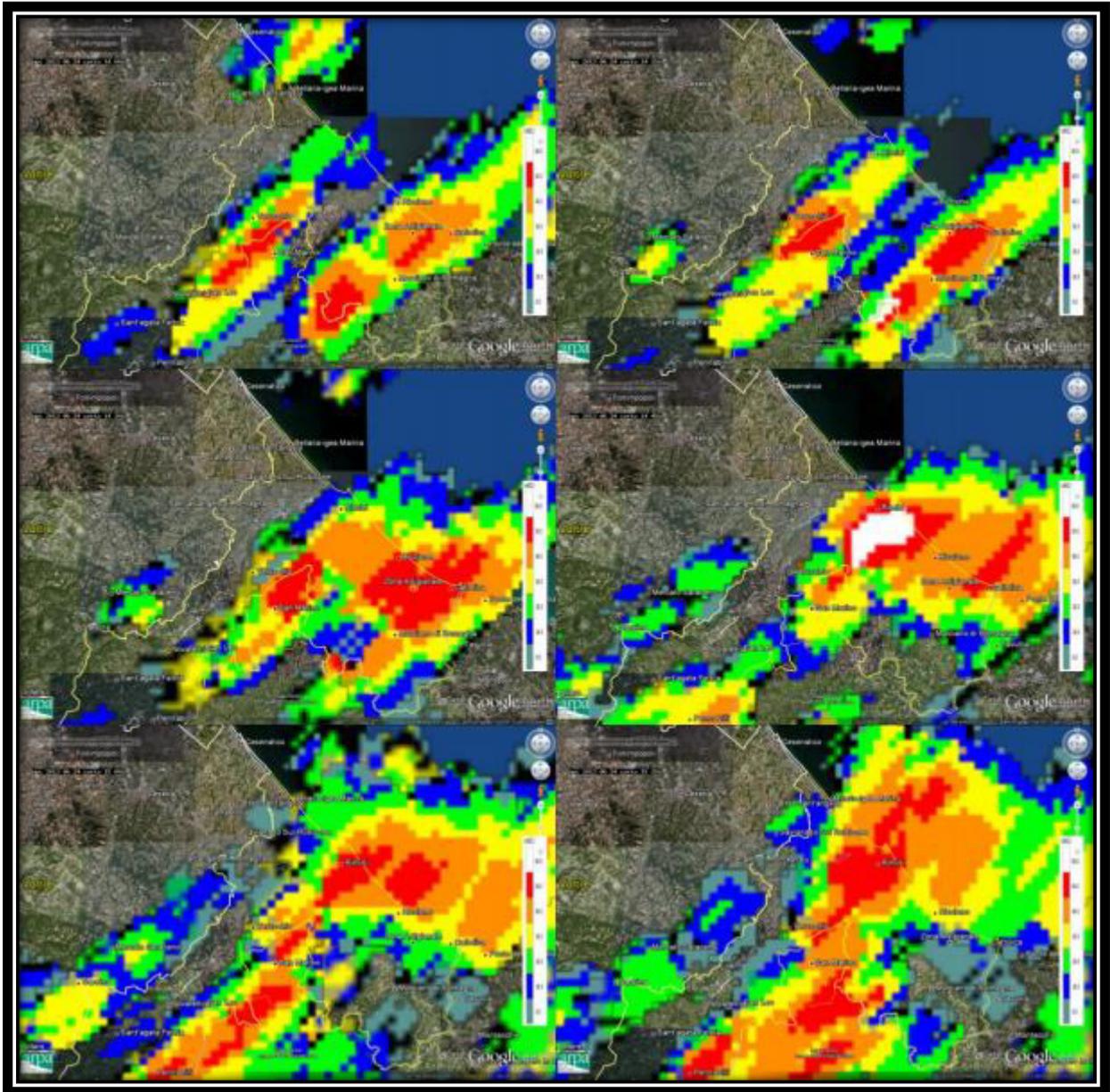


Figura 13 - Mappe riflettività dell'evento 24/06/13 alle 14:00 UTC (alto sx), 14:15 UTC (alto dx), 14:30 (centro sx), 14:45 (centro dx), 15:00 (basso sx), 15:15 (basso dx), fonte ARPA 2013

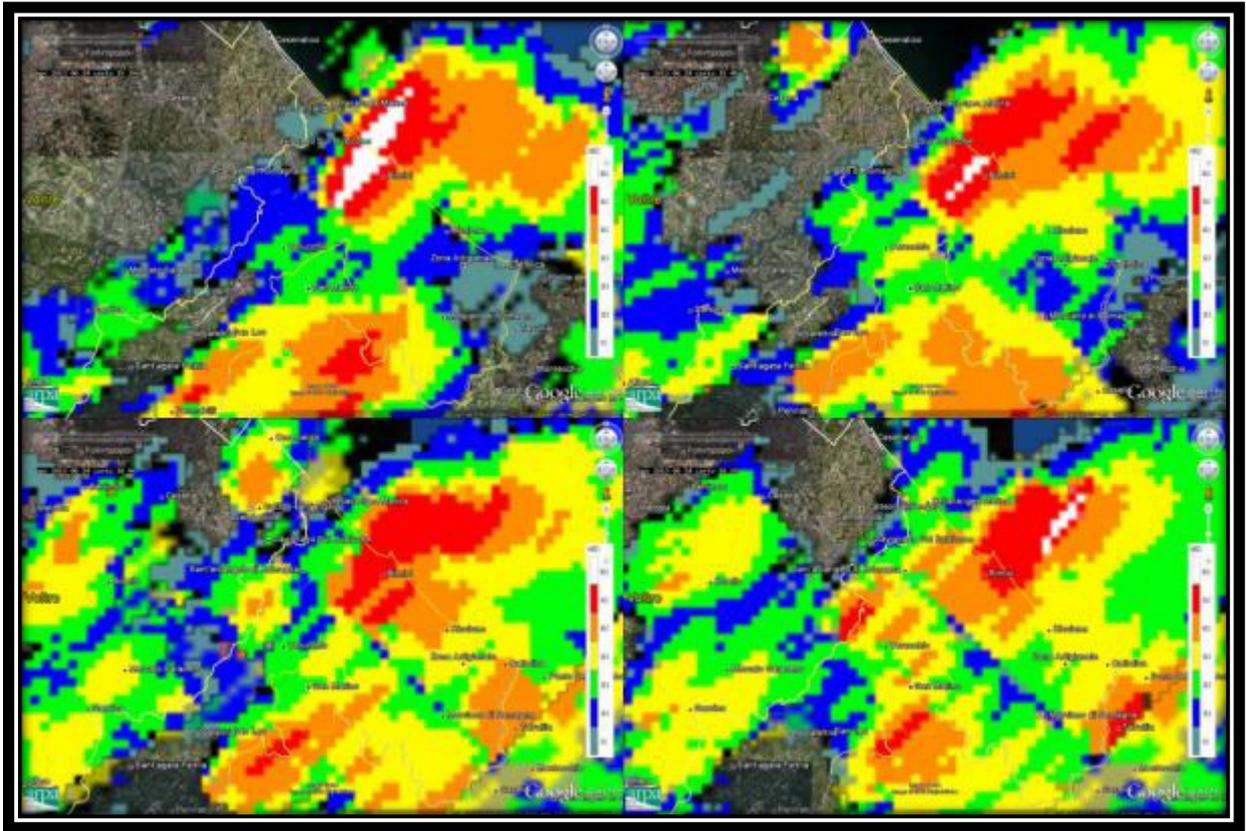


Figura 14 - Mappe riflettività dell'evento 24/06/13 alle 15:30 UTC (alto sx), 15:45 UTC (alto dx), 16:00 (basso sx), 16:15 (basso dx), fonte ARPA 2013

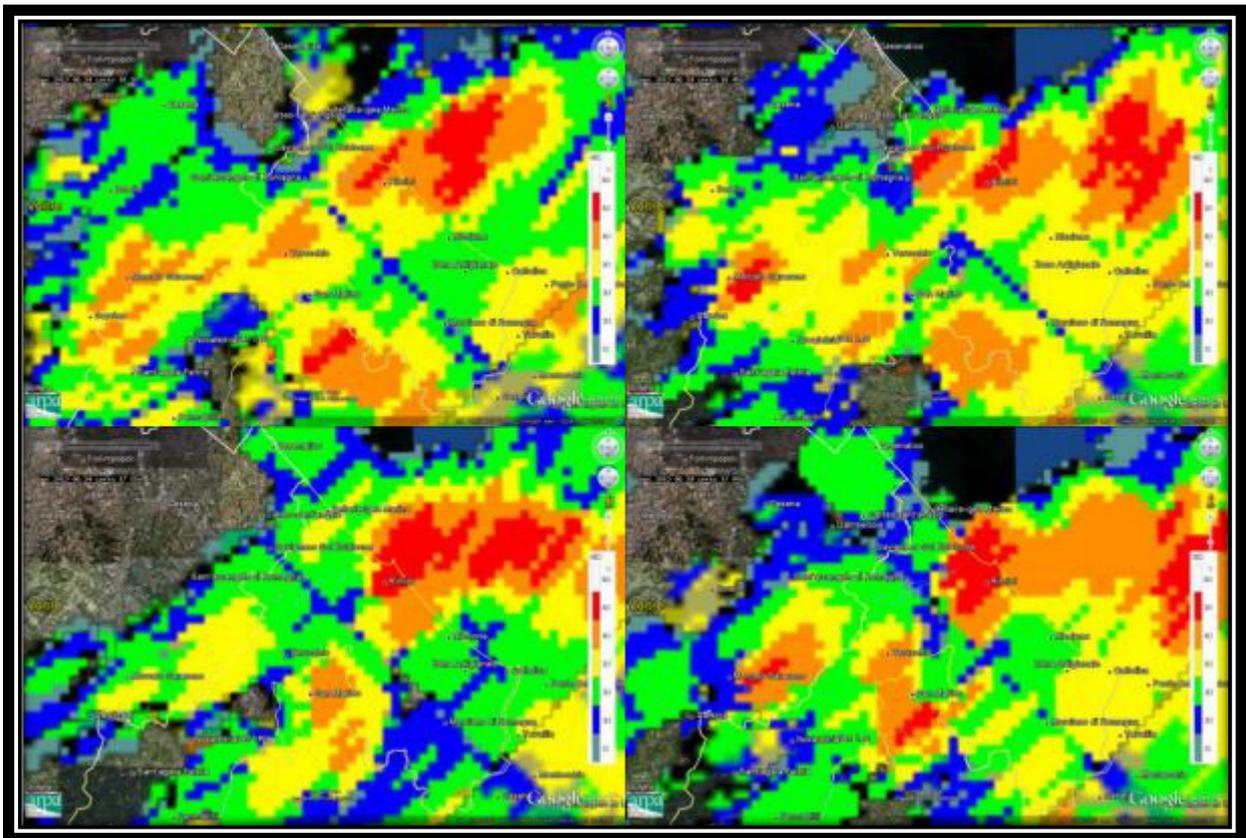


Figura 15 - Mappe riflettività dell'evento 24/06/13 alle 16:30 UTC (alto sx), 16:45 UTC (alto dx), 17:00 (basso sx), 17:15 (basso dx), fonte ARPA 2013

Le immagini radar presentate, sono state determinate con l'ausilio di due radar meteo, uno posto a Gattatico (RE) ed uno a San Pietro (BO) (ARPA, 2014 d), questi strumenti restituiscono delle mappe a riflettività, cioè la frazione energetica inviata dalle idrometeorie verso l'antenna del radar, la quale viene poi interpretata, per definire la quantità di pioggia nella zona scansionata. Tipicamente viene utilizzato come unità di misura il dBZ, (decibel della riflettività Z) e ad ogni mm/h di pioggia, corrispondono circa 23 dBZ (NOAA, 2005).

Classificazione dei valori di riflettività (ARPA d, 2014).

- < 10 dBZ = < 0.2 mm/h (assente), colore azzurro
- 10-20 dBZ = 0.2 mm/h (a tratti), colore blu
- 20-35 dBZ = 1.6 mm/h (debole), colore verde
- 35-45 dBZ = 6-25 mm/h (media), colore giallo
- 45-55 dBZ = 25-100 mm/h (forte), colore rosso
- > 55 dBZ = > 100 mm/h (intensa), colore bianco

L'evento è stato misurato prevalentemente da 4 stazioni, con valori di precipitazioni cumulate molto intensi (Tabella 1).

Tabella 1 - Precipitazioni cumulate evento fonte DEXTER

Giorno	Stazione	Precipitazione cumulata (mm)
24 giugno 2013	Rimini Ausa	148
24 giugno 2013	Rimimi Urbana	91.2
24 giugno 2013	Vergiano	69.8
24 giugno 2013	Cattolica	88.2

Tenendo presente che le precipitazioni si sono concentrate con maggior violenza tra le ore 16.12 e 18.04 (ARPA, 2013) e poi continuato fino quasi le ore 22 (ma presentando intensità nella norma), possiamo concentrare l'attenzione sui seguenti intervalli temporali (Tabella 2).

Tabella 2 - Cumulate pioggia per la stazione Rimini Ausa

Periodo di accumulo	1 min	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min
Ora locale	17:45-17:46	17:43-17:48	17:38-17:48	17:34-17:56	17:26-17:56	17:21-18:21
Mm cumulati	4.4	19.6	35.8	53.8	92.6	123.6

3.4 Legislazione e normativa di riferimento

Il contesto normativo italiano, nel quale si innestano le problematiche territoriali-ambientali rappresentate dalle alluvioni, indipendentemente da come esse siano originate, è molto variegato ed inizia il suo percorso sul finire degli anni '60:

- Conferenza Nazionale delle Acque: questa conferenza, tenuta a Roma nel dicembre del '68, ebbe come obiettivo quello di regolamentare l'uso delle risorse idriche e valutare la disponibilità ed il fabbisogno del nostro paese, in modo da tutelare il patrimonio idrico, inteso da questo momento in avanti, come risorsa.
- Commissione De Marchi: istituita a Roma nel 1970, in risposta alle alluvioni del novembre del 1966 che hanno interessato la zona del fiorentino, ebbe come obiettivo principale quello di porre rimedio all'assetto idraulico ed idrogeologico del territorio, compresa anche la difesa del suolo. Questo nuovo concetto, fu inteso come difesa fluvio-idraulica e idraulico-forestale, fu introdotto inoltre, il concetto di Piano di Bacino, inteso come insieme delle opere (idrauliche e forestali) atte alla sistemazione e messa in sicurezza dei corsi d'acqua, dalle zone di sorgente fino a quelle di foce.
- Decreto del Presidente della Repubblica n.616 del 1977: questo DPR, non prettamente inerente al dissesto idrogeologico o a problemi di tipo fluviale, fu comunque molto importante, infatti permise un massiccio trasferimento di funzioni dallo Stato alle Regioni ed agli Enti Locali, modificando l'assetto del potere pubblico, mettendo in luce le Autonomie Locali e valorizzando il ruolo dei cittadini. Grazie a questo Decreto quindi, si tracciarono le linee guida che permisero successivamente, di definire la pianificazione a livello di bacino.
- Legge 183/1989 "Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo": questa legge fu il risultato di una serie di eventi che posero maggiore attenzione al comparto idrologico Italiano, l'alluvione del Polesine del 1951, il disastro del Vajont del 1963 e la già citata alluvione di Firenze del 1966 ad esempio, furono i catalizzatori di questa rivoluzione legislativa. Questa legge, nata con lo scopo di tutelare il suolo, risanare la qualità delle acque, migliorare l'utilizzo razionale delle risorse idriche e tutelare gli aspetti ambientali connessi allo sfruttamento della risorsa acqua, individuò come prima cosa un'unità fondamentale nella quale realizzare azioni organiche di tutela del territorio e salvaguardia ambientale: stiamo parlando del bacino idrografico. Esso fu definito come "*Il territorio dal quale le acque pluviali o di fusione delle nevi e dei ghiacciai, defluendo in superficie, si raccolgono in un determinato corso d'acqua, ivi compresi i suoi rami terminali, con le foci in mare ed il litorale marittimo prospiciente*" (art. 3). Un altro punto fondamentale di questa legge, fu l'istituzione di una struttura di coordinamento, un soggetto autonomo di diritto pubblico, avente composizione mista e sede sul territorio delle funzioni statali, regionali e provinciali; con l'istituzione dell'Autorità di Bacino per la prima volta, si affidano i compiti della pianificazione e programmazione a un ente delineato da criteri geomorfologici ed ambientali, non più su base politica. A livello nazionale ne sono state così definite sei (del Po, Adige, Alto Adriatico,

Arno, Tevere, Liri-Gariagliano e Volturno), mentre a livello interregionale sedici, cinque sul versante tirrenico e undici su quello adriatico, dove ricade anche l'Autorità di Bacino Marecchia-Conca, comprendente la zona di interesse di questo lavoro di tesi.

Il principale strumento dell'azione di pianificazione e programmazione di queste neonate istituzioni, è costituito dal Piano di Bacino, mediante il quale furono *“pianificate e programmate le azioni e le norme d'uso finalizzate alla conservazione, alla difesa e alla valorizzazione del suolo e alla corretta utilizzazione delle acque, sulla base delle caratteristiche fisiche e ambientali del territorio interessato”* (art. 17 comma 1).

- Durante gli anni 90, furono emanati diversi decreti ed integrazioni, atte al miglioramento e finalizzazione dell'istituto di Autorità di Bacino, tra queste ricordiamo:
 - Legge 256/1990: Modifica ed integrazione alla 183 del 1989, la quale introduce alcune misure organizzative atte a migliorare le operazioni condotte dalle Autorità di Bacino.
 - D.P.C.M. 23 marzo 1990: *“Atto di indirizzo e coordinamento ai fini della elaborazione e della adozione degli schemi previsionali e programmatici di cui all'art. 31 della legge 18 maggio 1989 n. 183, recante norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo.”*
 - D.P.R. 7 gennaio 1992: *“Atto di indirizzo e coordinamento per determinare i criteri di integrazione e di coordinamento tra le attività conoscitive dello Stato, delle Autorità di Bacino e delle Regione per la redazione dei Piano di Bacino di cui alla legge 8 maggio 1989, n. 183, recante norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo”.*
 - Legge 493/1993: che pone un rafforzamento ai poteri di controllo, intervento e direttiva delle AdB e dispone che *“i piani di bacino possono essere redatti ed approvati anche per stralci relativi a settori funzionali e/o per sottobacino”*, questo passaggio è molto importante, perchè in tal modo, si permette di aggiungere componenti al Piano di Bacino senza la necessità di redigerlo da capo, ma appunto, per stralci.
 - D.P.R. 14 aprile 1994: *“Atto di indirizzo e coordinamento in ordine alle procedure ed ai criteri per la delimitazione dei bacini idrografici di rilievo nazionale e interregionale”.*
 - D.P.R. 18 luglio 1995: *“Approvazione dell'atto di indirizzo e coordinamento concernente i criteri per la redazione dei piani di bacino”.*
 - Legge 267/1998: Conseguentemente all'alluvione di Sarno e Quindici che nel 1998 provocò la morte di 160 persone, fu emanata questa legge per la prevenzione del rischio idrogeologico, inoltre tramite questa legiferazione, venne permessa l'adozione dei Piani Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (PAI), aventi come obiettivo principale la riduzione del rischio idrogeologico entro valori compatibili agli usi del

suolo in atto, in modo da poter salvaguardare l'incolumità delle persone e ridurre al minimo eventuali danni ai beni esposti.

- Decreto Legislativo 3 aprile 2006 n. 152: con l'art. 175 del Codice dell'Ambiente, viene abrogata la 183/89, infatti la Parte III così titola "Norme in materia di difesa del suolo e lotta alla desertificazione, di tutela delle acque dall'inquinamento e di gestione delle risorse idriche" (art. 53-176). Con questo nuovo decreto ed i suoi richiami alla passata legge 183/89, si intendono stabilire le disposizioni relative alla difesa del suolo, le quali sono volte ad assicurare la tutela ed il risanamento idrogeologico del territorio, inteso come sommatoria delle sue due componenti "suolo" e "sottosuolo". Inoltre con questo Decreto si è operato, in conformità alla Direttiva Quadro sulle Acque 2000/60/CE, un riassetto degli ambiti territoriali, in otto Distretti Idrografici (Alpi Orientali, Padano, Appennino Settentrionale, Serchio, Appennino Centrale, Appennino Meridionale, Sardegna, Sicilia), prevedendo inoltre, secondo l'art. 63, l'istituzione delle Autorità di Bacino Distrettuali, responsabili della redazione del Piano di Gestione (art. 117), il quale costituisce stralcio del Piano di Bacino Distrettuale.
- Decreto Legislativo 23 febbraio 2010 n. 49: con l'emanazione di questo Decreto, si è data attuazione alla Direttiva 2007/60/CE riguardante la valutazione e la gestione dei rischi di alluvioni, la cosiddetta "Direttiva Alluvioni". Questa direttiva comunitaria, nata con lo scopo di disciplinare le attività di valutazione e di gestione dei rischi di alluvioni, si pone come obiettivo quello di ridurre le conseguenze negative per la salute umana, il territorio, i beni, l'ambiente, il patrimonio culturale e le attività socioeconomiche. Col decreto 49/2010 però, si è voluto anche tenere ben presente la normativa nazionale, nello specifico quella contenuta nel D.Lgs 152/2006 ed il sistema di Protezione Civile relativo al rischio idrogeologico (D.P.C.M. 27 febbraio 2004). I Piani di Gestione, di cui al D.Lgs 49/2010 devono comprendere misure per la gestione del rischio alluvioni per tutte quelle zone cui possa sussistere un rischio potenziale ritenuto significativo, attraverso l'attuazione prioritaria di interventi non strutturali e di azioni per la riduzione della pericolosità, tramite attività di previsione e monitoraggio, sorveglianza ed allertamento; presidio territoriale idraulico, finalizzato dalle Regione e della Province; attivazione di piani urgenti di emergenza (previsti dall'art. 67 comma 5 del D.Lgs 152/2006). In particolare, questa direttiva prevede quattro passaggi fondamentali: la valutazione preliminare del rischio di alluvioni (art. 4), l'aggiornamento e realizzazione delle mappe della pericolosità da alluvione quelle del rischio di alluvioni (art. 6), l'ultimazione e la pubblicazione dei piani di gestione del rischio di alluvione (art. 7) ed infine degli aggiornamenti alla situazione definita precedentemente, in periodi successivi.
- D.Lgs 10 dicembre 2010 n. 219: col presente Decreto, viene attribuito alle Autorità di Bacino di rilievo nazionale ed alle Regioni, il compito di provvedere all'adempimento degli obblighi previsti dal D.Lgs citato precedentemente (23 febbraio 2010 n. 49). Inoltre ai fini della predisposizione degli strumenti di

pianificazione le Autorità di bacino nazionali, svolgono la funzione di coordinamento nell'ambito del distretto idrografico di appartenenza.

Riassumendo quindi, la legislazione attuale (D.Lgs 49/2010) prevede che le Autorità di Bacino Distrettuali si occupino della redazione delle mappe di pericolosità e del rischio, ai fini di predisporre il Piano di Gestione del Rischio Alluvioni in riferimento al distretto idrografico di pertinenza, alle Regioni invece, spetta il coordinamento col Dipartimento della Protezione Civile, per la predisposizione dei Piani di Gestione del sistema di allertamento nazionale, statale e regionale per il rischio idraulico.

Capitolo 4

4 Metodi

In questo breve capitolo, saranno elencate le operazioni condotte per la determinazione delle soglie di altezza di pioggia massima; tale lavoro, definito nel capitolo precedente *back analysis*, prevede l'applicazione di diverse metodologie idrologiche:

- Sviluppo delle curve di possibilità climatica, basate su serie storiche per le stazioni del riminese.
- Applicazione del metodo Kennesey per la stima del coefficiente di deflusso.
- Applicazione del metodo razionale per la determinazione della portata massima di piena e dell'altezza di pioggia critica, in relazione a determinati tempi di ritorno.
- Determinazione della portata smaltibile dalla sezione di chiusura del bacino.
- Determinazione dell'onda di piena generata dall'evento meteorologico 24/06/13.
- Determinazione di una soglia critica di precipitazione per il bacino Calastra.

Come si evince meglio dal diagramma seguente (Diagramma 1), si procederà alla determinazione della portata massima (stimata in m^3/s) che una data pioggia determinerà, per un dato bacino idrologico in una sezione specifica di controllo. In altre parole, sarà determinato il valore di portata massima di piena, calcolato sulla base del tempo di corrivazione stimato per il bacino Calastra (il tempo di corrivazione presenta carattere ambiguo, che verrà trattato in seguito, ma da una delle definizioni di letteratura corrisponde al tempo che un'ipotetica goccia impiega per raggiungere la sezione di chiusura dal punto più lontano del bacino) e confrontato con la capacità di smaltimento della sezione in esame. Tale capacità, sarà stabilita in base alle sue caratteristiche geometriche e ad un coefficiente di scabrezza, che è influenzato dai materiali degli argini, del letto, ma anche dalla vegetazione presente.

Stabiliti questi coefficienti, si passerà a stimare una soglia di precipitazione, la cui intensità è determinata a priori, essendo a conoscenza della portata massima, tale per cui il canale esonderà (come successo durante l'evento di precipitazione estrema indicato in precedenza). L'importanza di questo valore critico, è data dal fatto che esso può essere utilizzato come stimatore della situazione del bacino: collocando sul territorio una rete di pluviometri elettronici per il monitoraggio delle precipitazioni, ed essendo a conoscenza della soglia di sicurezza (specifica per il bacino soggetto a criticità), sarebbe possibile, in caso di superamento della stessa, allertare in tempo la popolazione ed attivare i piani di gestione del rischio, pianificati dall'ente preposto.

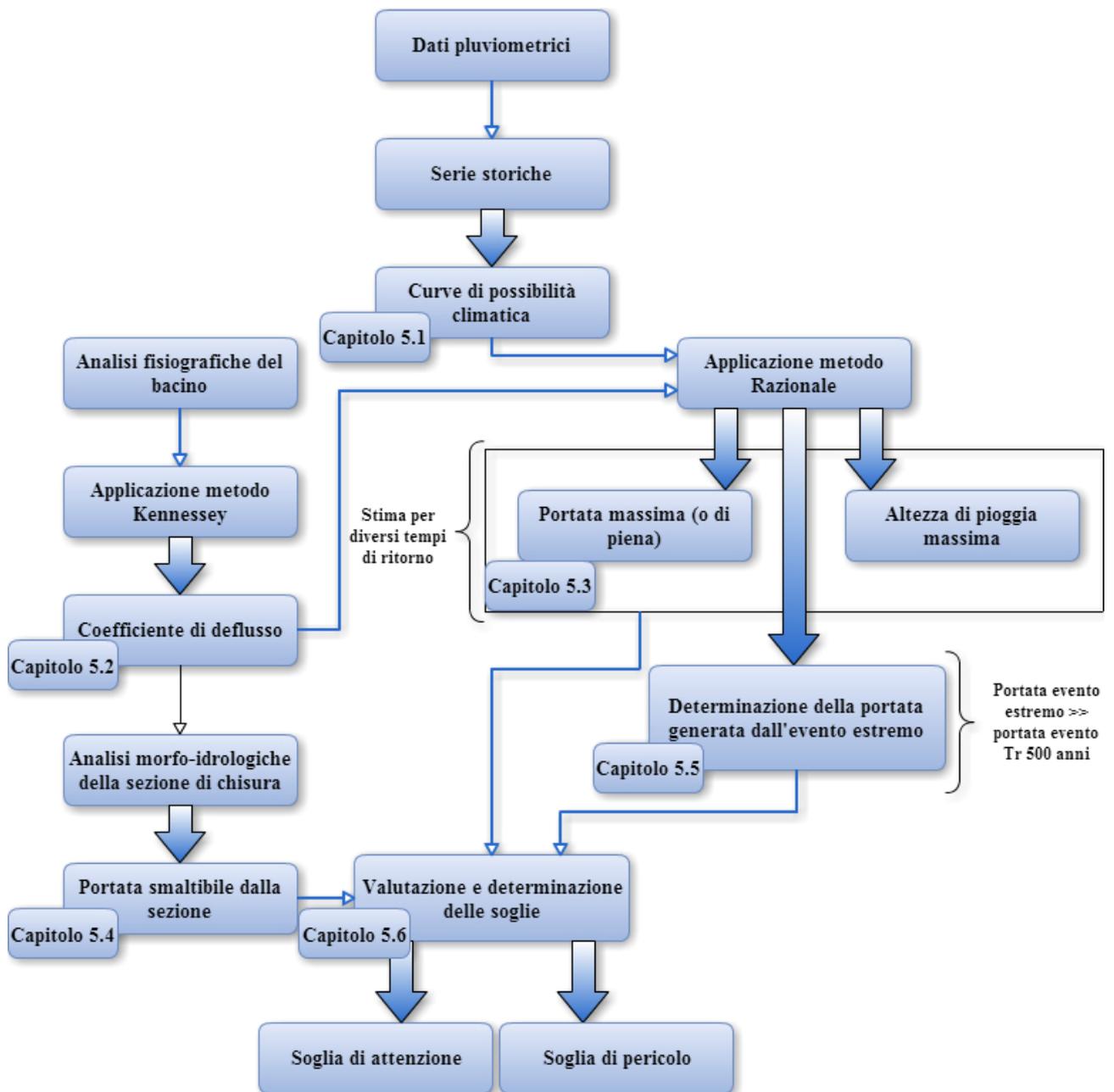


Diagramma 1 - Schema dei passaggi necessari alla determinazione delle soglie di precipitazione

Capitolo 5

5 Risultati

Nei seguenti paragrafi, saranno applicate le metodiche illustrate nel capitolo precedente (Diagramma 1), le descrizioni dei metodi utilizzati, i calcoli necessari ed i risultati ottenuti.

5.1 Dati pluviometrici

Il primo e fondamentale passaggio è rappresentato dalla raccolta di dati pluviometrici per la Provincia di Rimini. Tali dati sono di primaria importanza, infatti grazie a essi è possibile ricostruire l'andamento storico delle precipitazioni, il quale a sua volta permette di determinare la curva di possibilità climatica, o pluviometrica.

I dati pluviometrici sono stati reperiti grazie all'utilizzo di un portale cartografico digitale, DEXTER; l'ufficio Unità Climatologica e Previsioni Agrometeo di Lungo Periodo (Arpa Bologna); e presso lo Studio Geologico ITS di San Marino.

- Arpa DEXTER: portale online gestito dal servizio Idrometeoclima di Arpa Emilia-Romagna, che permette di visualizzare su base cartografica attiva, la posizione di tutte le stazioni idrometeorologiche dislocate sul territorio. È inoltre possibile consultare e prelevare i dati di interesse, organizzati secondo diverse variabili (dipendenti dal tipo di stazione). Il servizio è operativo dal 2006, quindi a parte rari casi di stazioni aventi importanza storica, i dati prelevati dal portale iniziano nell'anno indicato.

Le stazioni per le quali sono stati scaricati i dati pluviometrici (maggio 2006 - maggio 2014) sono riportate nella tabella seguente (Tabella 3).

Tabella 3 - Stazioni DEXTER

Stazione	Latitudine	Longitudine	Quota s.l.m.
Rimini Urbana	44.059194	12.573538	16
Rimini AUSA	44.056513	12.545488	10
Vergiano	44.034557	12.5005	36
Ponte Verucchio	43.981046	12.405812	116
San Marino	43.93753	12.446493	680

Di seguito, è presentata la dislocazione geografica delle stazioni soprindicate (Figura 16) ed un esempio dei dati forniti dal portale online (Tabella 4).

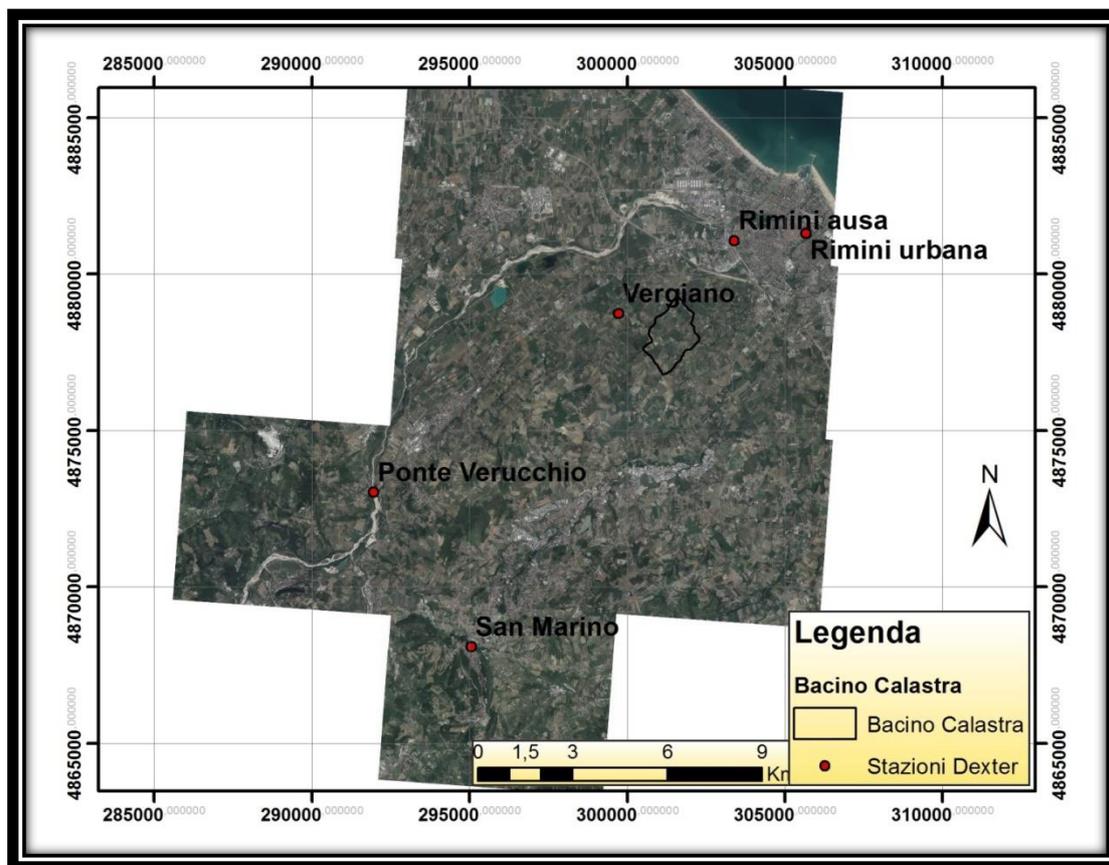


Figura 16 - Disposizione geografica delle stazioni DEXTER

Tabella 4 – Dati pluviometrici 24/06/13 fonte DEXTER

Rimini Ausa	
Data e Ora (Fuso Orario: GMT+01:00)	Precipitazione Nell'Ora (Idro) (Millimetri)
24/06/2013 00:00	0
24/06/2013 01:00	0
24/06/2013 02:00	0
24/06/2013 03:00	0
24/06/2013 04:00	0
24/06/2013 05:00	0
24/06/2013 06:00	0
24/06/2013 07:00	0
24/06/2013 08:00	0
24/06/2013 09:00	0
24/06/2013 10:00	0
24/06/2013 11:00	0
24/06/2013 12:00	0
24/06/2013 13:00	0

24/06/2013 14:00	0
24/06/2013 15:00	0
24/06/2013 16:00	0
24/06/2013 17:00	108
24/06/2013 18:00	33.6
24/06/2013 19:00	5
24/06/2013 20:00	0.4
24/06/2013 21:00	0
24/06/2013 22:00	0
24/06/2013 23:00	0.2

Dall'esempio presentato in Tabella 4, i dati forniti dal portale Arpa, sono disposti in ordine cronologico, ad intervalli di precipitazione oraria, quest'ultima avete unità di misura in mm.

- Unità Climatologica e Previsioni Agrometeo di Lungo Periodo (Arpa Idrometeoclima): per ottenere ulteriori informazioni ci si è rivolti direttamente all'ufficio Arpa preposto, grazie al quale sono state ottenuti numerosi dati pluviometrici per le seguenti stazioni: Badia Tedalda, Monte Colombo, Novafeltria, Pennabilli, Rimini, San Marino. Questi dati presentano informazioni per archi temporali piuttosto lunghi, per alcune stazioni si risale ai primi anni del '900, ma risultano essere molto frammentati. I dati sono stati forniti nel formato tipico: la precipitazione massima nell'anno indicato, per i 30 minuti, 1,3, 6, 12 e 24 ore. La raccolta dati in questa fase era ancora piuttosto generale, e quando il lavoro di tesi ha preso una direzione ben precisa, con la definizione del bacino Calastra come area di lavoro, questi dati sono stati abbandonati.
- Studio Geologico ITS (RSM): questo studio geologico operante nella zona della Repubblica di San Marino (e territori limitrofi) ha gentilmente fornito delle serie temporali di dati pluviometrici per due stazioni, una a San Marino ed una a Rimini, entrambe coprono il significativo arco temporale 1935-2012. Questo archivio storico pluviometrico, è stato reso possibile grazie alle tabelle degli Annali Storici (liberamente disponibili dal sito Arpa), grazie a Dexter e, per la stazione di San Marino, periodi 1947-1958, '63-'64 e 1973-1989 a seguito di una ricostruzione per regressione da dati di stazioni pluviometriche vicine (Novafeltria e Monte Colombo). Vista la completezza di questi dati ed il loro utilizzo in studi tecnici eseguiti dallo Studio Geologico, si è deciso di adoperare questo set per le elaborazioni successive (Capitolo 6, Allegati: Dati pluviometrici).

Come detto in precedenza, le informazioni pluviometriche raccolte servono a definire una serie storia. Con questo termine, si intende una sequenza di osservazioni puntuali rappresentanti un carattere quantitativo del fenomeno che si vuole indagare, tipicamente costituite da misure effettuate ad intervalli di tempo regolari. La manipolazione di questi dati, comprende metodi per l'analisi di serie temporali al fine di estrarre statistiche

significative, ed altre caratteristiche ritenute rilevanti al fine dello studio. Esse permettono anche di realizzare modelli predittivi, dell'andamento del fenomeno misurato, in modo da poter valutarne una ipotetica evoluzione (Imdabullah, 2013).

Le curve di possibilità climatica invece, definite anche *Intensity-Duration-Frequency Curve*, vengono determinate sulla base di una notevole mole di informazioni, solitamente ci si basa su almeno 20-30 anni di dati provenienti da serie storiche, in modo da fornire un'informazione rappresentativa del fenomeno ricercato.

Tipicamente queste curve, forniscono una rappresentazione grafica ed una relazione diretta tra l'altezza di pioggia massima h (espressa in mm) e la loro durata d (ore), per un determinato valore di tempo di ritorno. Per aumentarne la rappresentatività, spesso non viene tracciata una singola curva, ma un fascio di esse, per diverse serie di tempi di ritorno, così da porre il lettore una visione più completa. Ad esempio per il Grafico 1 indicante le curve di possibilità climatica realizzate, notiamo che variando il tempo di ritorno da 50 a 500 anni, abbiamo un aumento dell'altezza di precipitazione quasi del 40%.

Per descrivere la relazione tra h e d , solitamente viene utilizzata una legge di potenza monomia, tipicamente:

$$h = a \cdot d^n$$

In cui a ed n sono dei coefficienti che dipendono dal tempo di ritorno e sono stimati alla fine del procedimento di determinazione delle curve.

Il passo successivo è quello di stabilire la distribuzione di probabilità che meglio rappresenta la distribuzione vera dei dati pluviometrici. Per studi di importanza ambientale, che ad esempio riguardano l'analisi di variabili come massimi mensili ad annuali, di precipitazioni giornaliere o di portata di fiumi, da letteratura (Oosterbaan, 1994; Burke et al., 2010) viene impiegata la distribuzione di Gumbel, definita anche distribuzione di Fisher-Tippett di tipo I.

Gumbel ha dimostrato che lo stimatore $r/(n+1)$ per la probabilità di un evento (dove r è il numero di rango del valore osservato nella serie di dati, e n è il numero totale di osservazioni) è uno stimatore corretto della probabilità cumulata della moda della distribuzione. Pertanto questo stimatore, è spesso utilizzato come plotting position (cioè l'assegnazione di una famiglia di distribuzioni di frequenze ad un set di dati, per determinare una funzione di frequenza cumulata) del Q-Q plot (Gumbel, 1954).

La funzione di distribuzione di Gumbel è la seguente.

$$p(h) = e^{-e^{\alpha(h-u)}}$$

In cui, i parametri α e u dipendono dalla media e dalla deviazione standard della serie storica, e valgono.

$$\alpha = \frac{1.2825}{S_p}$$

$$u = \mu_p - 0.450 \cdot S_p$$

Nella seguente tabella saranno inseriti i valori di questi parametri, determinati per un tempo di ritorno corrispondente a 500 anni e per determinati intervalli orari (Tabella 5).

Tabella 5 - Calcolo dei parametri di Gumbel, definito il tempo di ritorno a 500 anni

Osservazioni	Durata delle piogge massime (ore)					
66	1	3	6	12	24	
Media	29.009	40.532	48.831	60.130	74.613	
Deviazione standard	7.693	11.240	14.272	16.746	22.506	
Parametri di Gumbel	α	0.167	0.114	0.090	0.077	0.057
	u	25.548	35.473	42.409	52.594	64.485

Successivamente, avendo definito i parametri α e u e fissato T_r , usualmente 10, 20, 50, 100, 200 o 500 anni, si determina il valore h di altezza di pioggia massima (Tabella 6)

$$h = u - \frac{1}{\alpha} \cdot \ln\left(\ln\left(\frac{T_r}{T_r - 1}\right)\right)$$

Tabella 6 - Calcolo altezza di pioggia massima

Tempo di ritorno (anni)	Durata delle piogge massime (ore)				
500	1	3	6	12	24
Altezza di pioggia massima h (mm)	62.8	89.91	111.53	133.7	173.48

Per verificare che la distribuzione stabilita, rappresenti correttamente il campione di dati, è stato effettuato il test statistico di Kolmogorov-Smirnov: un test non parametrico alla cui base si trova un'idea intuitiva, poiché

$$\hat{F}_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{X^{(i)} \leq x}$$

stima la "vera" funzione di ripartizione $F(x)$ è logico basarsi su un qualche tipo di distanza tra $\hat{F}_n(x)$ e $F_0(x)$. Se le due popolazioni sono quindi vicine, cioè sufficientemente simili, si accetta l'ipotesi nulla, corrispondente a $H_0 : F(x) = F_0(x), \forall x$, mentre la si rifiuta se le due funzioni risultano essere lontane, o dissimili tra loro. Per determinare la distanza si utilizza la seguente formulazione.

$$D_n = \sup_{-\infty < x < +\infty} |\hat{F}_n(x) - F_0(x)|$$

Che rappresenta la massima differenza tra la funzione empirica $\hat{F}_n(x)$ e la funzione ipotizzata come vera $F_0(x)$.

In questo caso, secondo la frequenza cumulata del valore di Gumbel, abbiamo che $D_n = 0.10179937$, il quale è ampiamente inferiore rispetto al valore testato, pari a 0.166173513 , per cui possiamo affermare che la distribuzione di probabilità designata, rappresenta idoneamente il nostro campione dei dati.

Ultimo step per la realizzazione della curva di possibilità climatica è il calcolo numerico degli indici a e d (Tabella 7). Come prima cosa è stato necessario determinare i logaritmi naturali di h e d per le 5 durate di pioggia massima.

Tabella 7 - Determinazione parametri a e d

Curva possibilità climatica		$h = a * d^n$		$\ln(h) = a + n * \ln(d)$		
Durata delle piogge massime (ore)		1	3	6	12	24
Ln h		4.13995507	4.49880917	4.71429361	4.89559848	5.15606232
Ln d		0	1.09861229	1.79175947	2.48490665	3.17805383
Media (Ln h)	4.680943732	Ln a = 4.143767961				a = 63.04
Media (Ln d)	1.710666448					n = 0.31
$h = 63.04 * d^{0.31}$						

Il valore $n = 0.31$ è stato ricavato tramite regressione lineare (funzione di excel) dei Ln di h e d .

Ripetendo queste operazioni per i diversi tempi di ritorno stabiliti, corrispondenti a 10, 20, 50, 100, 200 e 500 anni, per le classiche durate (1, 3, 6, 12 e 24 ore) sono state ricavate le altezze di pioggia massima h seguenti (Tabella 8). Sono inoltre inseriti i valori pertinenti all'evento meteo del 24 giugno 2013, sulla base dei dati orari presentati dalla stazione Rimini Ausa di DEXTER.

Tabella 8 - Altezze di pioggia massima per i dati tempi di ritorno

	1	3	6	12	24
10	39.04	55.19	67.44	81.97	103.96
20	43.36	61.50	75.45	91.36	116.59
50	48.94	69.66	85.81	103.52	132.93
100	53.13	75.78	93.58	112.64	145.18
200	57.30	81.87	101.32	121.72	157.38
500	62.80	89.91	111.53	133.70	173.48
Evento	108.00	141.60	147.00		

Da cui:

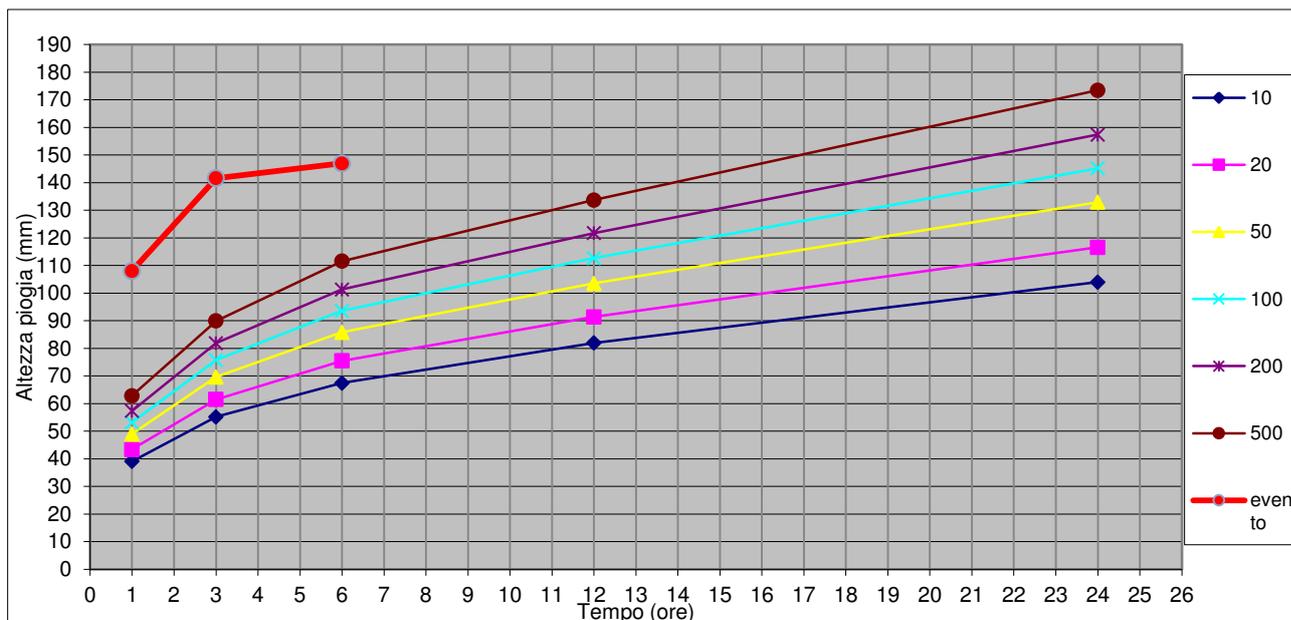


Grafico 1 - Curva di possibilità climatica 1935-2012 ed evento estremo 24 giugno 2013

Come è possibile osservare dal Grafico 1 appena presentato, l'evento meteorologico del 24 giugno 2013, viene rappresentato (dai punti rossi) totalmente oltre ogni curva i cui tempi di ritorno sia stato possibile calcolare.

5.2 Analisi fisiografiche del bacino per il calcolo del coefficiente di deflusso

In assenza di misure dirette, il calcolo del coefficiente di deflusso, necessario alla determinazione della portata massima di piena, è stato determinato avvalendosi del metodo Kennessey (Kennessey, 1930), internazionalmente accettato ed utilizzato anche in Italia (Tardi & Vittorini, 1977) e ripreso più volte successivamente (Barazzuoli et al., 1986; Colombetti & Mattioli, 1991).

Questo metodo, applicabile prevalentemente a bacini di piccole dimensioni, prevede la caratterizzazione dello stesso, sulla base di dati fisiografici e climatici; secondo le indicazioni dell'autore (Kennessey, 1930), il valore del coefficiente medio annuo stimato, è funzione di tre caratteristiche: l'acclività dei versanti (C_a), la permeabilità dei terreni (C_p) e la copertura vegetale (C_v). Questi parametri, descritti tramite classi quantitative, generano un contributo numerico che va a formare il coefficiente di deflusso C_d .

$$C_d = C_a + C_p + C_v$$

La determinazione di ogni valore parziale, avviene mediante la realizzazione di carte tematiche digitali, sfruttando le potenzialità degli strumenti GIS, grazie alle quali questo lavoro diviene abbastanza rapido e soprattutto poco costoso.

L'autore originariamente, propose 3 varianti nei valori numerici per ciascun indice (Tabella 9), il cui utilizzo era subordinato a diversi possibili regimi climatici, ma omise qualsiasi riferimento o descrizione a questi ipotetici regimi. In mancanza quindi, di direttive specifiche, Tardi e Vittorini (Tardi & Vittorini, 1977) hanno indicato con l'Indice di Aridità

“Ia” (valutato secondo il metodo De Martonne, 1926) il parametro discriminante in base al quale determinare la scelta.

$$Ia = \frac{\left[\frac{P}{T + 10} + \frac{12p}{t} \right]}{2}$$

In cui P corrisponde al valore di precipitazione media annua (in mm), T alla temperatura media annua, p e t, rispettivamente, sono la precipitazione e la temperatura del mese più arido.

Basandoci sul trentennale (1971-2000) di dati meteorologici, della stazione meteorologica dell'aeroporto di Rimini, a cura del Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare (SMAM, 2000) è stato calcolato l'Indice di aridità.

- P: Precipitazione media annua = 655 mm
- p: Precipitazione media del mese più arido = 41.8 mm
- T: Temperatura media annua = 13.5 °C
- t: Temperatura media del mese più arido = 23.1 °C

$$Ia = 24.79$$

In base al valore ottenuto, utilizzeremo la prima categoria di valori tabulati da Kennessey (Tabella 9), per il calcolo dei tre coefficienti successivi, Ca, Cp e Cv.

Tabella 9 - Coefficienti parziali

Coefficiente di Acclività (Ca)		Ia < 25	25 ≤ Ia ≤ 40	Ia > 40
Ca 1	> 35%	0.22	0.26	0.30
Ca 2	10% - 35%	0.12	0.16	0.20
Ca 3	3.5% - 10%	0.01	0.03	0.05
Ca 4	< 3.5%	0.00	0.01	0.03
Coefficiente di Permeabilità (Cp)		Ia < 25	25 ≤ Ia ≤ 40	Ia > 40
Cp 1	Molto bassa	0.21	0.26	0.30
Cp 2	Bassa	0.17	0.21	0.25
Cp 3	Mediocre	0.12	0.16	0.20
Cp 4	Buona	0.06	0.08	0.10
Cp 5	Elevata	0.03	0.04	0.05
Coefficiente di copertura Vegetale (Cv)		Ia < 25	25 ≤ Ia ≤ 40	Ia > 40
Cv 1	Roccia nuda	0.26	0.28	0.30
Cv 2	Pascoli	0.17	0.21	0.25
Cv 3	Terra coltivata, boscata	0.07	0.11	0.15
Cv 4	Bosco d'alto fusto	0.03	0.04	0.05

Come detto in precedenza, la determinazione dei tre coefficienti è stata basata sulle tecniche GIS, inserendo quindi nel quadro operativo, i tematismi ritenuti necessari e processati attraverso funzioni inserite all'interno del programma ArcMAP utilizzato.

5.2.1 Definizione EPSG

Prima di svolgere una qualsiasi operazione in ambito GIS, è fondamentale stabilire un riferimento spaziale con cui lavorare. Per fare questo ci si affida a delle sigle numeriche, definite EPSG, dal nome della *European Petroleum Survey Group*, una organizzazione scientifica (assorbita nel 2005 dalla *International Association of Oil & Gas Producers*) specializzata in lavori applicati di geodesia, cartografia e sondaggi petroliferi. Questo codice permette di identificare due informazioni ben precise:

- Ellissoide e datum: A causa delle irregolarità gravitazionali, la terra non può essere considerata una sfera, per questo in cartografia si lavora solitamente con un ellissoide di riferimento, utilizzato come modello di approssimazione. Esso è definito dal suo semiasse maggiore e dall'eccentricità rispetto quello minore, mentre il centro e l'orientamento vengono definiti datum.
- Proiezione: consiste di una trasformazione, tramite formule geometriche e matematiche, della terra o di parti di essa, su piano. Ne esistono innumerevoli tipi (azimutali, gnomoniche, stereografiche, coniche, cilindriche ed altre ancora) che permettono di rappresentare con maggiore o minore fedeltà l'oggetto tridimensionale che è il nostro pianeta su un piano.

Per questo lavoro di tesi, si è deciso di utilizzare l'EPSG 32633, il quale corrisponde a WGS84 UTM fuso 33. La sigla WGS84 identifica il World Geodetic System 1984, e rappresenta l'ellissoide di riferimento, sviluppato per soppiantare le precedenti versioni (WGS60, WGS66 e WGS72) divenute obsolete con l'avvento di nuove tecnologie (tra cui nuovi armamenti, come ad esempio missili balistici). I parametri che descrivono questo ellissoide sono (NIMA 2000):

- Semiasse maggiore: $a = 6378137.0$ m
- Semiasse minore: $c = 6356752.314245$ m
- Schiacciamento: $1/f = 298.257223563$
- Costante gravitazionale geocentrica: $u = 3986005 \times 10^{18} \text{ m}^3/\text{s}^2$

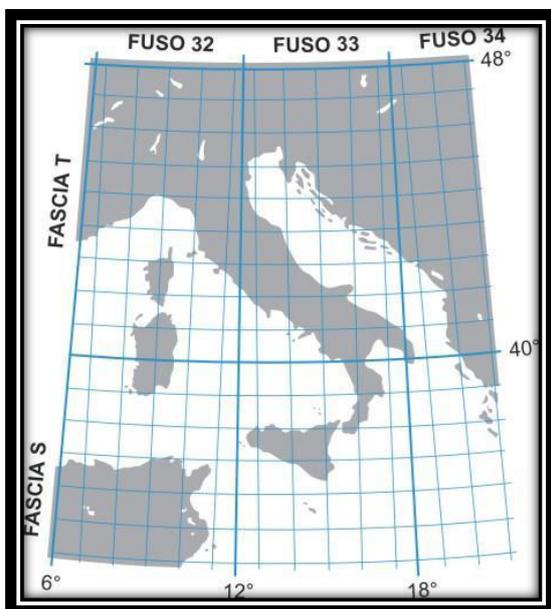


Figura 17 - Griglia UTM per la zona italiana

Il WGS84 viene usato in tutto il mondo, nei sistemi GPS ed anche Google lo utilizza per i suoi servizi cartografici (Maps e Earth), rendendolo quindi estremamente compatibile e di facile utilizzo.

La seconda parte dell'EPSG è costituita dal tipo di proiezione, in questo caso come detto, è stato utilizzato l'UTM fuso 33. La proiezione Universale Trasversa di Mercatore consiste in un adattamento della proiezione di Mercatore standard. In questa variante, globalmente accettata ed utilizzata, anche dall'Istituto Geografico Militare italiano, abbiamo 60 fusi, di 6° ciascuno e sono

numerati a partire dal meridiano di Greenwich, che funge da meridiano centrale per tale fuso. Il territorio Italiano ricade all'interno dei fusi 32, 33 ed per minima parte 34, come illustrato in Figura 17. La regione Emilia-Romagna utilizza un sistema di proiezione realizzato appositamente, denominato UTM-RER, che estende il fuso 32 anche alla zona costiera facente parte del fuso 33, questo sistema però è alquanto complesso e prevede la conversione dei file qualora non fossero nel formato adeguato, a causa di questa problematica, si è deciso di utilizzare direttamente il fuso 33.

Il materiale digitale impiegato nell'analisi GIS per la determinazione del coefficiente di deflusso (Cd), è stato reperito presso la Provincia di Rimini, ufficio Difesa del Suolo e SITUA (Sistema Informativo Territoriale Urbanistico ed Ambientale):

- Ortofoto AGEA 2011 della Provincia di Rimini
- Shape file dei punti quotati isolati al suolo, scala 1:10000, intero territorio provinciale, rilevamento 2009
- Shape file delle curve di livello (5m), scala 1:10000, intero territorio provinciale, rilevamento 2009
- Carta Geologica d'Italia, foglio 256 (Rn), scala 1:50000, scansione digitale della versione cartacea
- Shape file della rete idrologica provinciale

5.2.2 Determinazione del coefficiente di acclività (Ca)

Per prima cosa, utilizzando i due shape file con le quote del territorio (punti quotati e curve di livello) è stato creato, tramite apposita funzione "Create TIN" all'interno del toolbox "3D Analyst tool", una approssimazione della struttura morfologica del territorio del bacino Calastra. Questa funzione, *Triangular Irregular Networks*, permette appunto, la realizzazione di una superficie morfologica digitale, formata da dati geografici vettoriali che determinano una rete di triangoli irregolari, aventi per vertici le quote (coordinata Z) dei dati inseriti nel processo. Ai triangoli vengono poi sovrapposte delle "facce" colorate secondo scale cromatiche definite dall'utente, che permettono un colpo d'occhio sull'andamento morfologico della zona inquadrata. Il processo di generazione consiste di un'interpolazione lineare, quindi se i dati iniziali presentano degli errori o sono disposti in modo non omogeneo, il TIN ne risentirà, e così è successo in due zone distinte (nord-ovest e sud-est), dove le curve di livello presentavano dei piccoli errori (delle leggere sovrapposizioni e un errore nell'assegnazione di una quota) e sono state quindi necessarie delle modifiche, basate sulle curve adiacenti (che variano di 5m in 5m).

Il risultato dell'operazione è il seguente (Figura 18).

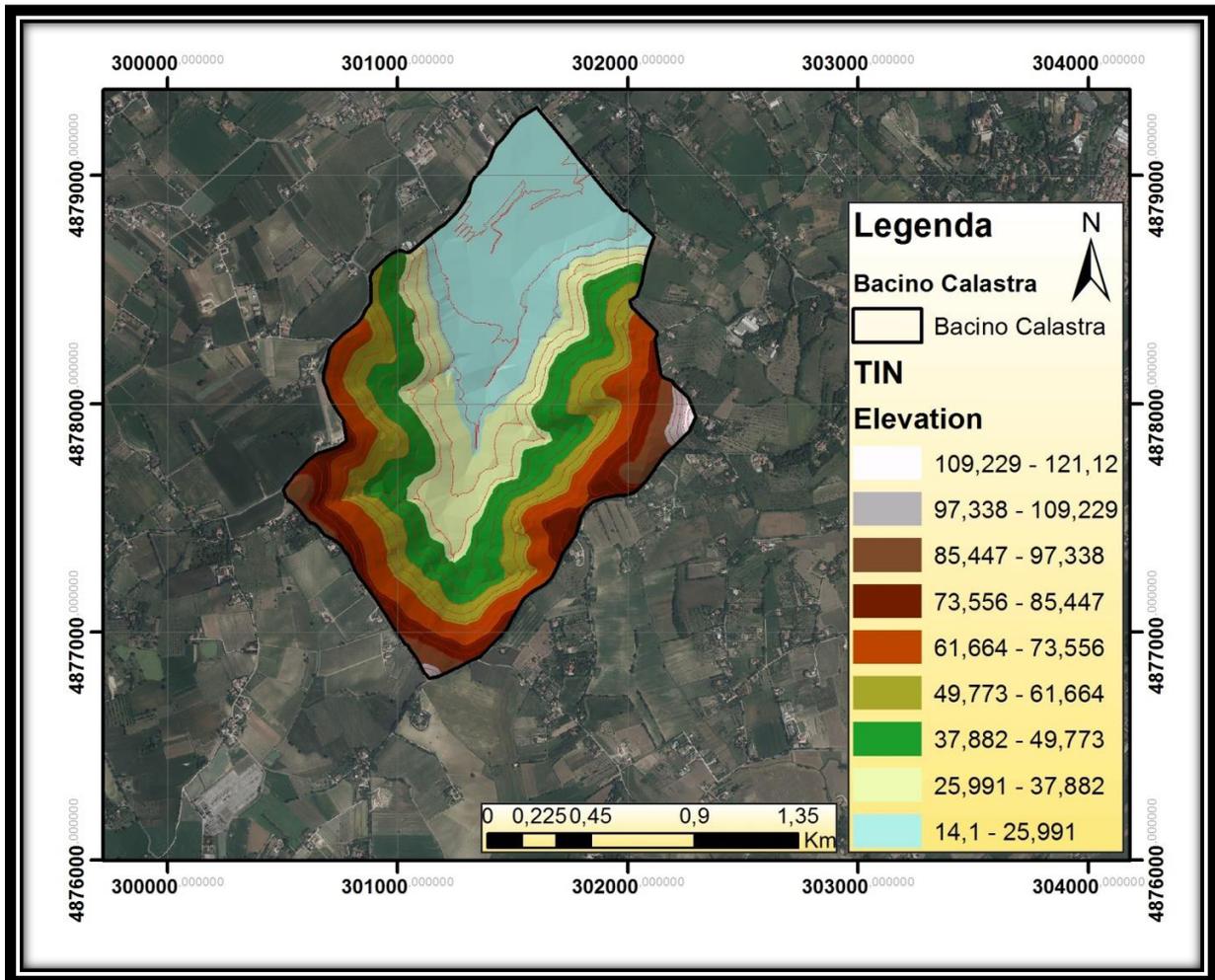


Figura 18 - TIN bacino Calastra

Successivamente si è proceduto alla conversione del TIN, formato vettoriale, in un raster che mantenga le caratteristiche altimetriche; per fare questo si è utilizzata la funzione “*TIN to Raster*” che ha permesso di generare il DEM (Figura 19), un modello digitale di elevazione. Qui l’informazione rilevante è contenuta all’interno del pixel, quindi per conoscerne l’esatta elevazione è sufficiente interrogare l’immagine.

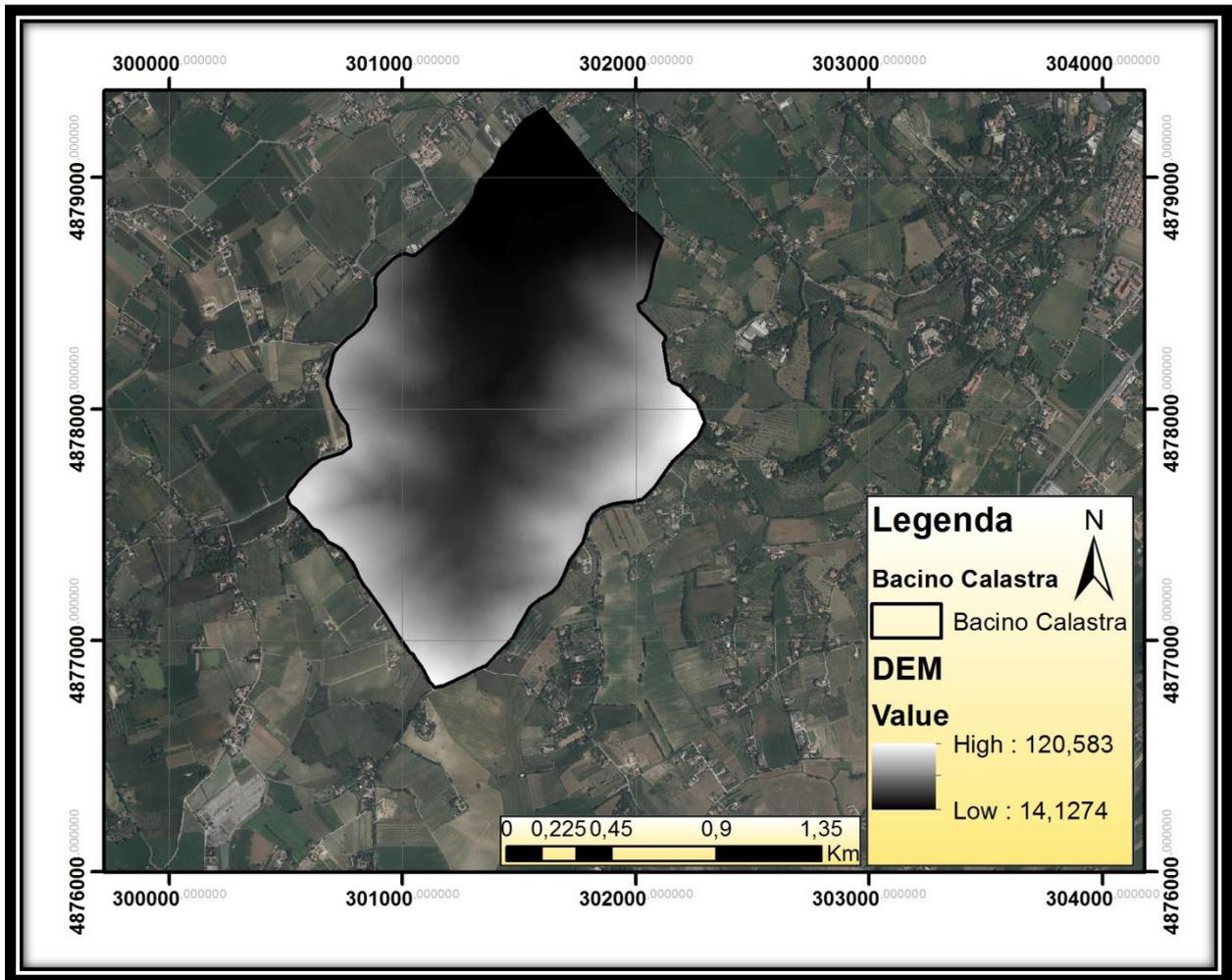


Figura 19 - DEM bacino Calastra

Per la determinazione dei valori di pendenza, partendo dal DEM appena generato il software permette, utilizzando la funzione “*slope*”, di realizzare una seconda immagine raster suddivisa per classi di pendenza (in valore %). Il software presenta vari metodi di definizione delle classi (intervallo uguale, quantile, intervallo definito e altre ancora), ma visto che la metodologia Kennessey fornisce i valori precisi (Tabella 9), è stata adoperata una classificazione manuale con le soglie stabilite, corrispondenti a:

- < 3.5%
- 3.5 – 10 %
- 10 – 35 %
- > 35 %

La classe Ca 1, corrispondente ad una pendenza superiore al 35% nel caso di studio è assente, in quanto la pendenza % massima si attesta poco sotto il 30% (Grafico 2).

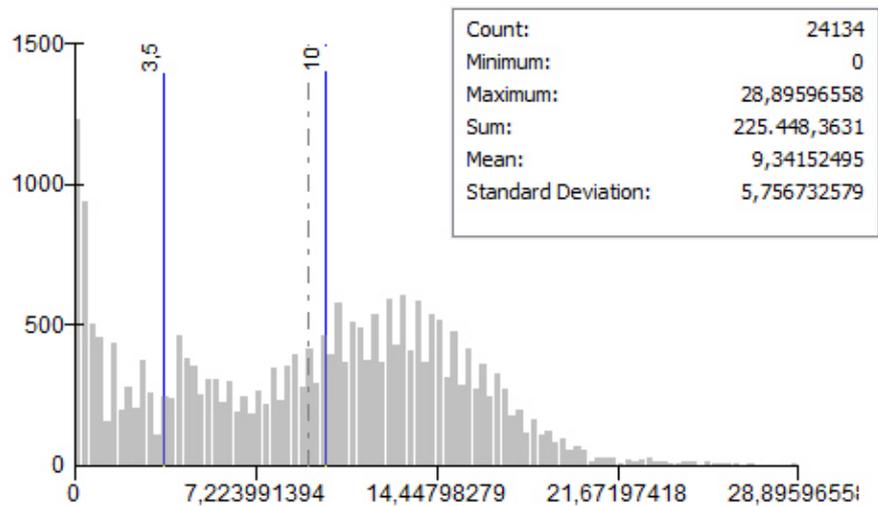


Grafico 2 – distribuzione dei valori di pendenza generati da ArcMap

Il risultato complessivo di questa operazione è rappresentato in Figura 20.

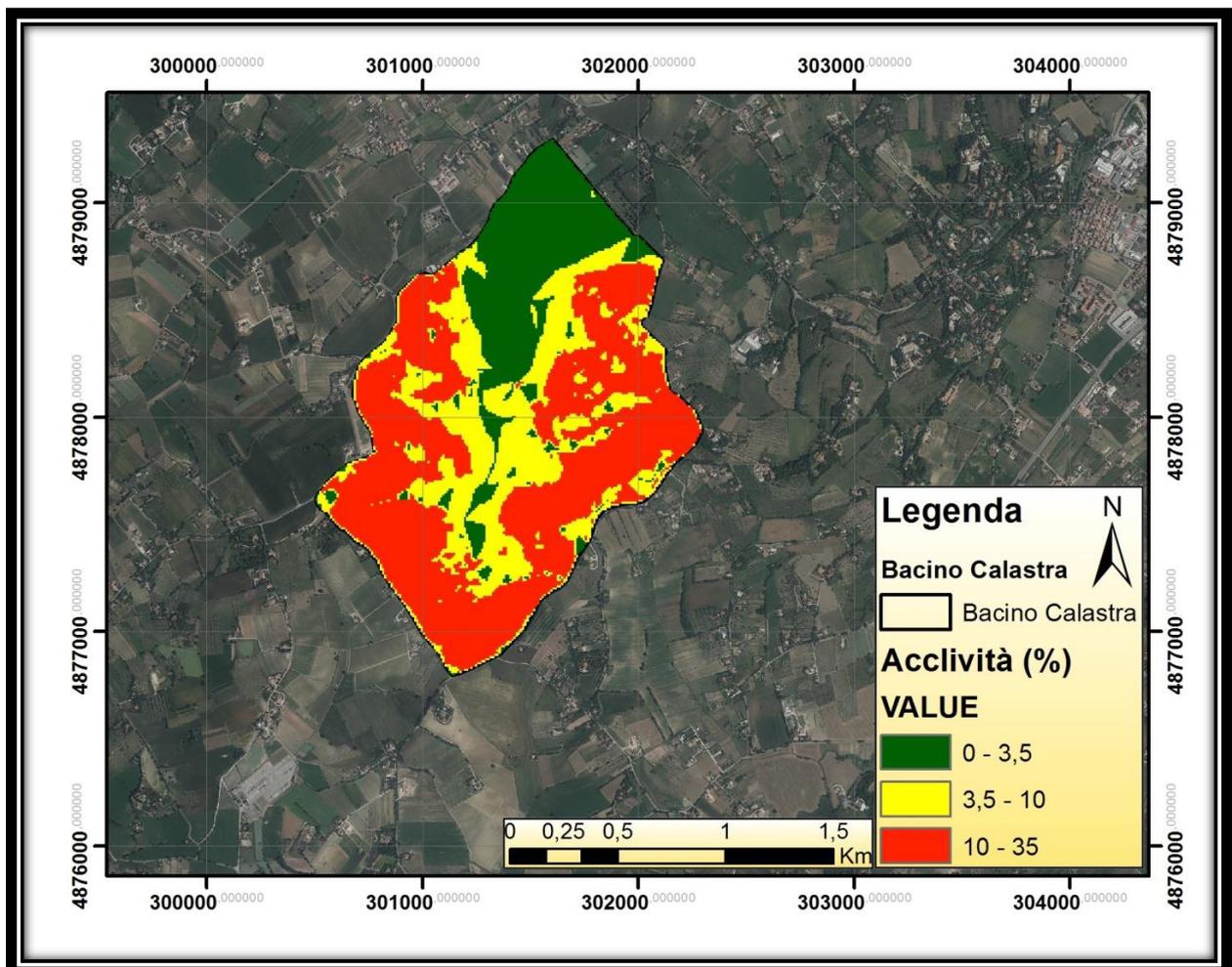


Figura 20 - Classificazione del bacino Calastra secondo i valori di pendenza % indicata

Per calcolare l'area delle tre classi di pendenza, raffigurate precedentemente, è stata impiegata la funzione "Zonal Statistics as Table" integrata nel software GIS.

I valori così ottenuti sono stati convertiti in % rapportata al totale e moltiplicati, caso per caso, al coefficiente preposto dal metodo stesso, ottenendo così quattro coefficienti parziali di acclività. Per ottenere l'indice di acclività (Ca) completo, questi coefficienti parziali sono stati semplicemente sommati tra loro (Tabella 10)

Tabella 10 - Coefficiente di acclività (Ca)

Acclività %	Area (m ²)	% di classe	la < 25	Coefficiente Ca parziale
0-3,5%	5122.00	21.22%	0.0	0.000
3,5-10%	6691.00	27.72%	0.1	0.061
10-35%	12321.00	51.05%	0.12	0.003
>35%	0.00	0.00%	0.22	0.000
Totale	24134.00	100.00%	Ca	0.064

5.2.3 Determinazione del coefficiente di permeabilità (Cp)

Per ottenere questo secondo coefficiente, è stata utilizzata la Carta Geologica in scala 1:10000 della Regione Emilia-Romagna, il foglio 256 che riguarda la Provincia di Rimini ed in particolare la sezione 150 della zona di San Fortunato (Figura 21).

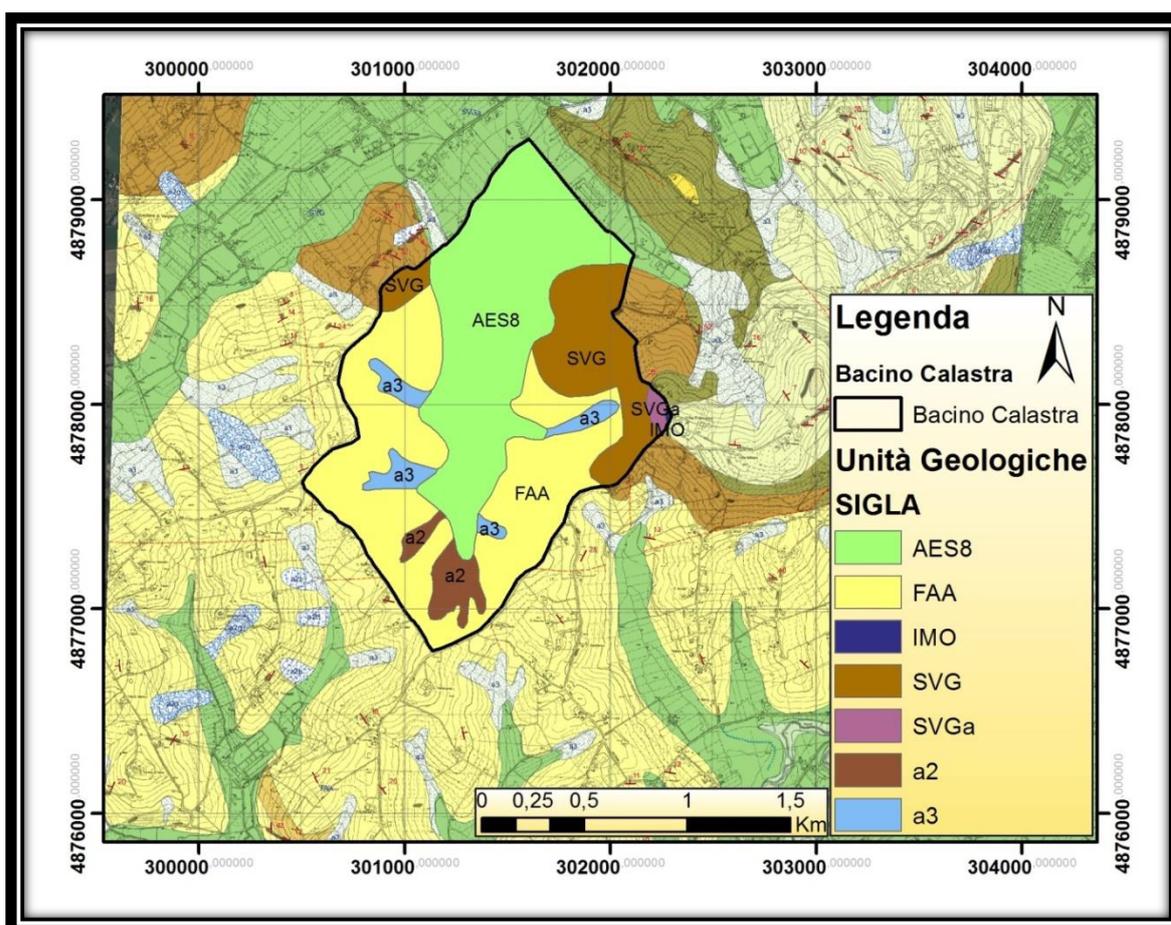


Figura 21 - Stralcio della carta geologica 1:10000

Le sigle raffigurate nell'immagine sovrastante, rappresentano diverse tipologie di formazioni geologiche, con le quali è stato possibile determinare i valori di permeabilità del bacino Calastra. Il significato delle sigle, tratto dalle Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia, foglio 256 (RER, 2005), è il seguente:

- AES8: subsistema di Ravenna, unità alluvionale con depositi di conoide e depositi intravallivi terrazzati.
- FAA: formazione delle Argille Azzurre, depositi argillosi subappenninici.
- IMO: sabbie di Imola, strato sedimentario (sabbie, ghiaie e peliti) di origine pleistocenica.
- SVG: arenarie e argille di Savignano, comprendenti arenarie poco cementate e argille.
- SVGa: litofacies sabbiosa della Grotta Rossa, rispetto al gruppo SVG in questo caso abbiamo un aumento di arenarie netto, che ne permette una classe a parte.
- a2, a3: rispettivamente frana quiescente e detrito di versante

Sulla base delle informazioni appena descritte e tenendo conto delle superfici cementate, quali ad esempio il reticolo stradale e l'edificato, sono state stabilite le seguenti classi di permeabilità:

- Molto bassa: in questa classe è stata inserita la rete stradale che percorre il bacino Calastra, infatti il conglomerato bituminoso usato la rete stradale, se non realizzato con particolari tecniche che aumentano la permeabilità, presenta grado di percolazione quasi nullo, in modo tale da proteggere gli strati inferiori (che inoltre, hanno subito operazioni di compattazione) dalle intemperie e dall'azione dell'acqua.
- Bassa: in questa categoria sono stati inseriti i terreni comprendenti gli edificati e zone limitrofe, che hanno quindi subito compattazione o opere di cementificazione del suolo.
- Mediocre: in base alla carta appena presentata (Figura 21), lo strato di argille azzurre (FAA) ed i piccoli corpi di frane (a2 e a3) presenti, sono stati raggruppati in questa categoria.
- Buona: basandoci nuovamente sulle informazioni della carta delle unità geologica, questa classe comprende la zona pedevalliva, in cui domina la formazione del subsistema di Ravenna (AES8) ed i suoi margini collinari, formati dalle argille ed arenarie di Savignano (SVG, SVGa).

In base ai criteri appena stabiliti, sono stati tracciati i poligoni corrispondenti e tramite apposita funzione "*Calculate Geometry*" sono state determinate le aree, cui è seguito il processo indicato precedentemente finalizzato alla determinazione del coefficiente di permeabilità (C_p) (Tabella 11).

Tabella 11 - Coefficiente di permeabilità (Cp)

Classi permeabilità Cp	Area (m ²)	% di classe	la < 25	Coefficiente Cp parziale
Molto Bassa	35577.84	1.47%	0.21	0.003
Bassa	165824.29	6.87%	0.17	0.012
Mediocre	1066585.48	44.18%	0.12	0.053
Buona	1146248.26	47.48%	0.06	0.028
Elevata	0.00	0%	0.03	0.000
Tot.	2414235.87	100%	Cp	0.096

Il risultato GIS della fase di determinazione del Cp è indicato nella seguente figura (Figura 22).

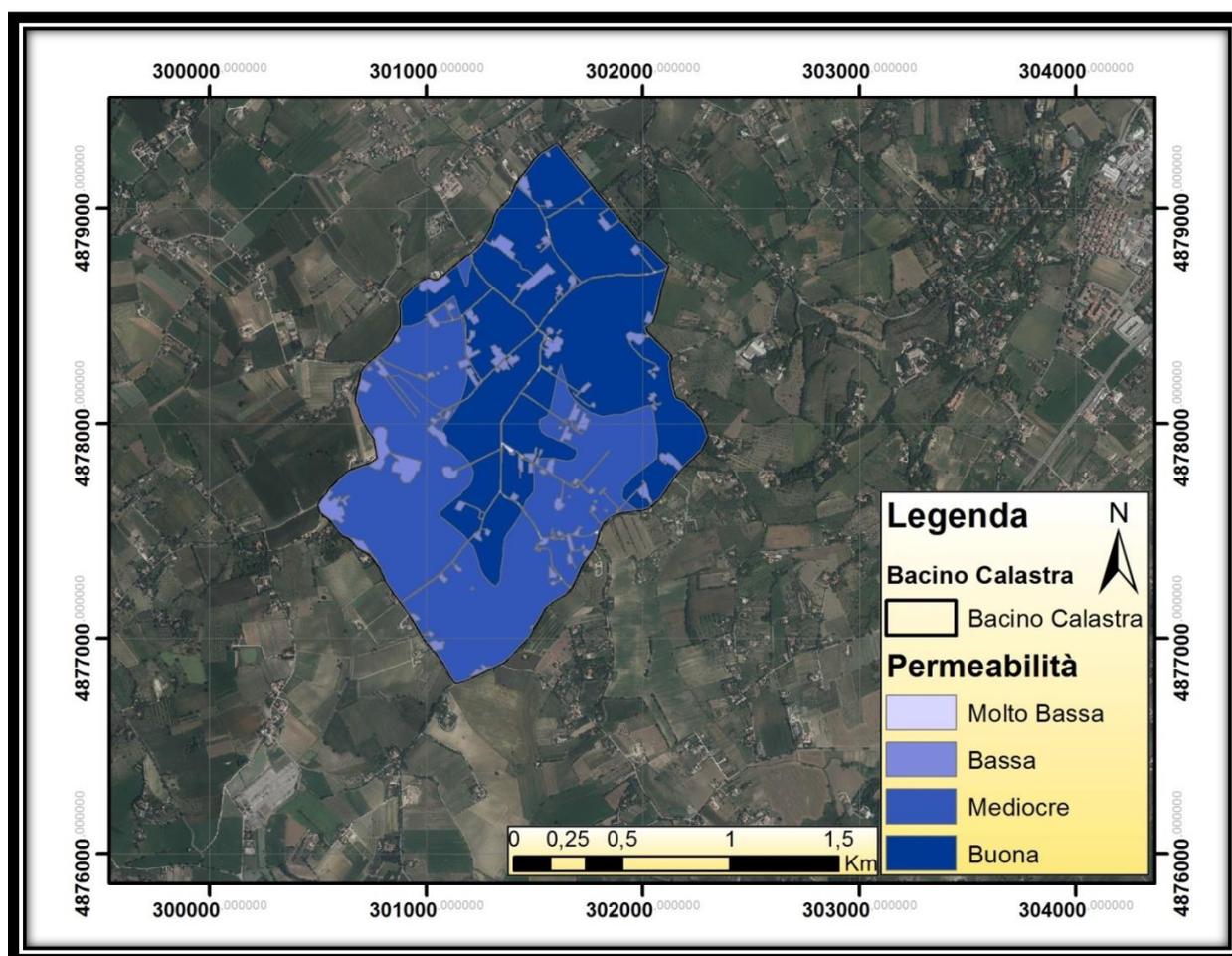


Figura 22 - Permeabilità del bacino Calastra

5.2.4 Determinazione del Coefficiente di copertura vegetale (Cv)

Per questo coefficiente, la formulazione di Kennessey definisce le classi in modo piuttosto specifico (roccia nuda, pascoli, terra coltivata/boscata, bosco d'alto fusto); quindi è stato sufficiente associare al bacino queste informazioni e stabilirne l'area occupata. Per fare ciò, inizialmente si è cercato di operare tramite cartografia ufficiale: l'uso del suolo della regione alla scala 1:25000, però ci si è presto resi conto che a tale scala la carta risultava di scarsa rilevanza, con dettagli grossolani e del tutto inefficienti alla definizione della copertura vegetale. Si è quindi deciso di realizzare un nuovo *shape file*, specifico per l'utilizzo necessario, che tenesse conto espressamente delle classi proposte dal metodo Kennessey.

I poligoni digitali sono stati realizzati su base cartografia AGEA 2011, la quale ha permesso di stabilire, tramite analisi visiva, l'uso del suolo delle zone di interesse. Le uniche modifiche apportate alle classi sopraindicate, riguardano le superfici stradali e degli edificati, che sono stati assimilati alla classe "roccia nuda", e i pascoli, alla cui classe sono stati associati i terreni incolti. È interessante notare come il valore finale di tale parametro sia estremamente suscettibile a cambi di uso del suolo, quindi se in futuro sussisteranno delle variazioni notevoli (come ad esempio la costruzione di un PEEP) sarà necessario in ricalcolo dell'indice.

Il risultato di questa operazione è indicato in Figura 23.

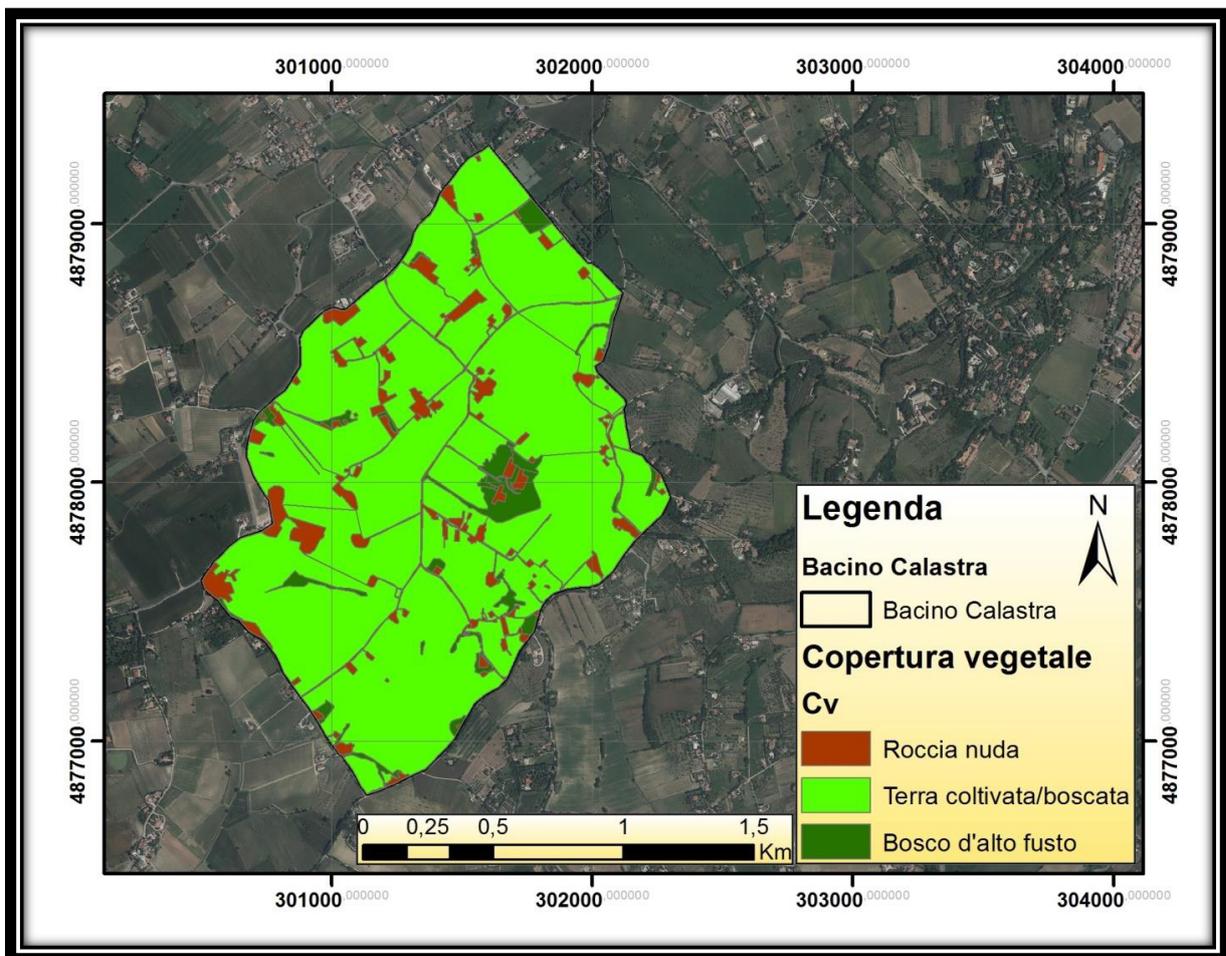


Figura 23 - Copertura vegetale bacino Calastra

Da cui, come per i due coefficienti determinati in precedenza (Tabella 12)

Tabella 12 - Coefficiente di copertura vegetale (Cv)

Classi copertura vegetale	Area (m ²)	% di classe	Ia < 25	Coefficiente Cv parziale
Roccia nuda	206756.84	8.56%	0.26	0.022
Pascoli	0.00	0.00%	0.17	0.000
Terra coltivata/boscata	2102026.67	87.06%	0.07	0.061
Bosco d'alto fusto	105666.60	4.38%	0.03	0.001
Totale	2414450.11	100.00%	Cv	0.085

A questo punto, avendo determinato tutti i fattori necessari, è possibile determinare il Coefficiente di deflusso, calcolato come sommatoria dei tre indici parziali.

$$C_d = C_a + C_p + C_v$$

$$C_d = 0.064 + 0.096 + 0.088;$$

$$C_d = 0.248$$

Il valore ottenuto è concorde con la tipologia del bacino, aventi medio-basso grado di cementificazione, ma un buon livello vegetazione (seppur a livello agricolo e quindi soggetta a forte antropizzazione) e un substrato mediamente permeabile, dato dal sottofondo di depositi alluvionali.

5.3 Calcolo della portata di piena (Q_{max})

Avendo stabilito il coefficiente di deflusso (C_d), è ora possibile determinare il valore della portata di piena (Q_{max}); usualmente per calcolare tale parametro, si utilizza la formula Razionale (Furcolo et al., 1998; Gioia et al., 2004), la quale è basata sull'ipotesi che la portata di picco, derivi da una pioggia netta e uniforme (h), caduta per un determinato periodo di tempo (T_c) che è pari al tempo critico del bacino in esame. Se quindi, la durata della pioggia t è minore di T_c , non tutto il bacino contribuirà alla formazione del deflusso; alla fine della precipitazione (istante t) tutte le parti più distanti del bacino non avranno ancora contribuito al deflusso della sezione di controllo e quando questo avverrà (all'intervallo di tempo $T_c - t$) le zone più vicine alla sezione di chiusura avranno cessato di impegnare la stessa. Al contrario invece, se la pioggia ha una durata $t > T_c$ tutto il bacino contribuirà al deflusso in cui la portata resterà costante e pari al valore massimo. Tale valore di portata è calcolata secondo la formula seguente:

$$Q_{max} = \alpha \frac{C_d \cdot h \cdot S}{T_c}$$

In cui:

- Q_{max} : rappresenta il valore della portata massima, determinato in m³/s.
- α : è un fattore di conversione, pari a 1/3.6, il quale permette di ottenere un valore di portata nell'unità di misura sopra indicata.
- C_d : coefficiente di deflusso, stimato in precedenza.
- h : altezza di pioggia critica, stimata su serie storiche evidenziate in precedenza.

- S : estensione del bacino in esame, in Km².
- T_c : tempo di corrivazione, esistono svariate formule per la sua determinazione, in funzione della dimensione del bacino e delle sue caratteristiche morfologiche.

L'adozione del metodo Razionale, presuppone che sia noto il valore T_c, tale valore non è conosciuto a priori, ma viene stimato grazie ad una specifica equazione matematica, della quale come detto, esistono molteplici versioni, che possono dare risultati anche molto vari fra loro.

Di seguito sono presentati i dati del bacino Calastra e della sua asta principale (Tabella 13), necessari alle elaborazioni seguenti, ed il calcolo del tempo di corrivazione secondo diverse metodologie (Tabella 14)

Tabella 13 - Dati idrografici per il calcolo del tempo di corrivazione

Dati idrografici			
bacino	Superficie	S	2.41 Km ²
	Quota massima	H _{max}	120 m s.l.m.
	Dislivello max al punto di chiusura	D = H _{max} -H _o	105.05 m s.l.m.
	Altitudine media su chiusura	$H_{m,o} = \frac{1}{S} \cdot \int_0^S h \cdot dS$	173.27 m s.l.m.
	Lunghezza bacino	L _{max}	2.54 km
	Pendenza media bacino	i _{mb} = (D*L)/S	0.111 tg
corso d'acqua	lunghezza asta	L	2.754 km
	Quota "sorgente"	H _s	80.22 m s.l.m.
	Quota chiusura	H _o	14.95 m s.l.m.
	Pendenza media	I = (H _s -H _o)/L	0.024 tg

Tabella 14 - Tempo di corrivazione secondo diversi metodi di calcolo

Tempo di corrivazione		
Metodo di calcolo	Formula	Tc (ore)
Kirpich	$T_c = 0.0003245 \cdot \left(\frac{1000 \cdot L \cdot \sqrt{1000 \cdot L}}{\sqrt{H_{max} - H_o}} \right)^{0.77}$	0.508
Giandotti	$T_c = \frac{4 \cdot \sqrt{S} + 1.5 \cdot L}{0.8 \cdot \sqrt{H_m - H_o}}$	1.262
Ventura	$T_c = 0.1272 \cdot \sqrt{\frac{S}{i}}$	1.284
Puglisi	$T_c = 6 \cdot L^{2/3} \cdot (H_{max} - H_o)^{-1/3}$	2.498
Pezzoli	$T_c = 0.055 \cdot \frac{L}{\sqrt{i}}$	0.984
Ongaro	$T_c = 4.32 \cdot \sqrt[3]{S \cdot L}$	8.123
F.A.O.	$T_c = \frac{L^{1.15}}{15 \cdot D^{0.36}}$	0.036

Tournon	$T_c = 0.396 \cdot \frac{L}{\sqrt{i}} \cdot \left(\frac{S}{L^2} \cdot \frac{\sqrt{i}}{\sqrt{i_{mb}}} \right)^{0.72}$	1.785
Pasini	$T_c = \frac{0.108}{\sqrt{i}} \cdot \sqrt[3]{(S \cdot L)}$	1.319
Pasini modificata	$T_c = 0.0864 \cdot \frac{\sqrt[3]{S \cdot L} \cdot (1000 \cdot L_{max})}{D}$	3.928

Approcci molto utilizzati nel nostro paese, sono la formula di Kirpich (Kirpich, 1940) sperimentata per bacini di modeste dimensioni e valida fino a qualche ettaro, e Giandotti (Giandotti, 1934) sperimentata e valida per bacini più grandi, fino a quasi 200km². Tali metodologie, presentano equazioni risolutive molto specifiche, al contrario invece, del procedimento che ha portato alla loro determinazione, nello specifico, in riferimento a quali eventi di precipitazione-portata (Grimaldi et al., 2010).

Viste le piccole dimensioni del bacino Calastra (2.41 Km²) e l'assenza, nonostante ampia ricerca, di informazioni inerenti ad eventuali discriminanti per l'applicazione delle formule indicate in Tabella 14, si è deciso di tentare un approccio sfruttando il metodo di Kirpich, il quale presenta un tempo di corrivazioni pari 0.508 ore, equivalenti a circa 30 minuti.

Basandoci sulla seguente formula, sono state quindi calcolate le altezze di pioggia massima (mm) secondo diversi tempi di ritorno:

$$h_{(mm)} = a \cdot T_c^n$$

In cui a ed n , sono fattori stimati in precedenza, durante la determinazione della curva di possibilità climatica (Tabella 7). Combinando la formula appena riportata, per il calcolo dell'altezza di pioggia massima, con quella per la determinazione della portata massima, richiamata di seguito.

$$Q_{max} = \alpha \frac{C_d \cdot h \cdot S}{T_c}$$

Otteniamo i seguenti valori (Tabella 15), corrispondenti alle altezze di pioggia massima e le portate per i tempi di ritorno tabulati.

Tabella 15 - Altezze di pioggia massima per determinati tempi di ritorno

Tempo di ritorno (anni)	h (mm)	Qmax (m³/s)
10	31.85	10.46
20	35.33	11.60
50	39.82	13.08
100	43.19	14.18
200	46.54	15.29
500	50.97	16.74

5.4 Calcolo della portata smaltibile della sezione

Abbiamo quindi determinato il valore di portata massima che eventi meteorologici di varia intensità possono generare, ma quanta acqua è in grado di smaltire, la sezione di chiusura del canale Calastra?

Per la determinazione della portata smaltibile è stata impiegata la formulazione di Gauckler-Strickler (Gauckler, 1867):

$$Q_s = K_s \cdot A \cdot R_i^{2/3} \cdot \sqrt{i}$$

In cui Q_s rappresenta la nostra portata smaltibile, K_s indica il coefficiente di scabrezza di Gauckler-Strickler, R_i il raggio idraulico della sezione, A l'area della sezione, o area bagnata ed i , l'inclinazione di fondo. Tutti questi parametri sono stati definiti come segue.

Il primo tentativo nel determinare la pendenza di fondo i , è stato fatto sfruttando gli strumenti GIS in nostro possesso. Come illustrato in Figura 24, sono stati sovrapposti i *layer* delle curve di livello e dei punti quotati, al fine di trovare sperimentalmente tale variabile.

I punti utilizzati (evidenziati in rosso) presentano le quote di 14.50 metri e 15.00 metri e sono disposti subparallelamente al canale, da essi è stato ricavato un valore di pendenza corrispondente al 0.18%.

$$p\% = \frac{\text{dislivello}}{\text{lunghezza}} \cdot 100 = \frac{0.50}{275} \cdot 100 = 0.18\%$$

Le pendenze delle sponde (pdx e psx) sono invece state calcolate matematicamente, impiegando le formule:

$$\text{Pendenza sponda destra} = \arctan\left(\frac{H}{s}\right) \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$\text{Pendenza sponda sinistra} = \arctan\left(\frac{H}{B - s - b}\right) \cdot \frac{180}{\pi}$$

Stabilito poi un franco di sicurezza (f) pari a 0.01 m e dei depositi sul fondo (F) aventi spessore 0.10 m, è stato calcolato il valore del tirante idrico, ovvero lo spessore massimo che la tavola d'acqua può raggiungere senza straripare la sezione in esame, definito semplicemente per differenza tra l'altezza del canale, il franco di sicurezza ed i depositi sul fondo, e corrisponde a:

$$T = H - f - F = 3.50 - 0.01 - 0.10 = 3.39 \text{ m}$$

I seguenti due parametri, l'area bagnata (A) in m² ed il contorno bagnato (C) in metri lineari, rappresentano rispettivamente l'area della sezione di massimo afflusso d'acqua ed il perimetro di tale sezione, come indicato nell'esempio della presente figura (Figura 25):

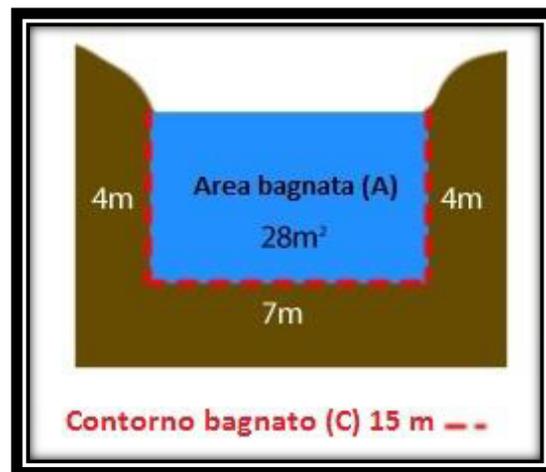


Figura 25 - Esempio area e contorno bagnato

Per determinare questi due valori sono state impiegate le seguenti equazioni matematiche:

$$A = \left[(B - f \tan(pdx) - f \tan(psx) + b) \cdot \frac{H-f}{2} \right] - \left[(b + F \tan(pdx) + F \tan(psx) + b) \cdot \frac{F}{2} \right];$$

$$C = (b + F \tan(pdx) + F \tan(psx)) + \left(\frac{T}{\cos(pdx)} + \frac{T}{\cos(psx)} \right)$$

Le variabili per la determinazione di tali equazioni sono indicate in Tabella 16 ed i loro risultati corrispondono a:

$$A = 15.50 \text{ m}^2$$

$$C = 13.10 \text{ m}$$

Grazie ad essi è ora possibile determinare il raggio idraulico R_i , il quale fornisce informazioni sulla resistenza al flusso data dalla forma della sezione ed è determinato facendo il rapporto tra l'area ed il contorno bagnato:

$$R_i = A/C = 15.50/13.10 = 1.18 \text{ m}$$

Il valore K_s infine, corrispondente al coefficiente di scabrezza, è un parametro utilizzato nello studio del flusso nelle condotte idriche, nei canali e nei corsi d'acqua naturali, utilizzato per la prima volta nella formula di Chézy, del tardo '700 e poi impiegato nella formula di Manning. Nell'ambito di questo lavoro, il suo scopo consiste nel valutare la resistenza al moto del flusso d'acqua, generata dai materiali e dallo stato dall'alveo (Tabella 17).

Tabella 17 - Coefficienti di scabrezza k_s per la formula di Gauckler-Strickler per canali, Cornellini et al., 2006

Tipo di alveo	Coefficiente di scabrezza K_s ($\text{m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$)
Pareti di cemento perfettamente lisciate, di legno piallato, di metallo senza risalti nei giunti.	100-85
Pareti di cemento non perfettamente lisciate; muratura di mattoni molto regolare; metallo con chiodatura.	85-75
Pareti di cemento in non perfette condizioni; muratura ordinaria più o meno accurata; pareti di legno grezzo, eventualmente con fessure.	70-65
Pareti di cemento solo in parte intonacate; qualche deposito di fondo; muratura irregolare o di pietrame; terra regolarissima senza vegetazione.	65-50
Terra abbastanza regolare; muratura vecchia, in condizioni non buone, con depositi di limo sul fondo.	50
Terra pulita, dopo prolungata esposizione.	45 (56-40)
Terra con erba sul fondo.	40
Ghiaia, sezione uniforme, pulita.	40 (45-33)
Erba corta, pochi cespugli.	37 (45-30)
Canali scavati o dragati senza vegetazione.	35 (40-30)
Terra in cattive condizioni.	35

Fondo in terra e sponde in pietrisco.	33 (36-29)
Canali in abbandono con grande vegetazione.	30
Fondo in pietrame e sponde in cespugli.	29 (40-25)
Canali in roccia.	29 (40-20)
Cespugli o piante acquatiche in canali profondi.	29 (33-25)
Fondo in ciottoli e sponde pulite.	25 (33-20)
Canali scavati o dragati con cespugli sulle sponde.	20 (25-12)
Canali senza manutenzione, con fondo pulito e cespugli sulle sponde.	20 (25-12)
Canali senza manutenzione, con sterpaglia densa e alta quanto il tirante idrico.	20 (12-8)
Canali senza manutenzione, con sterpaglia e cespugli densi e acque profonde.	10 (12-7)

Stimando 20, *Canali scavati o dragati con cespugli sulle sponde*, per il fondo e vista la vegetazione, 37, *Erba corta pochi cespugli*, per ambo le sponde, il coefficiente di scabrezza equivalente è stato determinato come segue:

$$K_{s,eq} = \left(\frac{C}{\frac{T}{\frac{\cos(pdx)}{K_{s,DX}^{3/2}} + \frac{\cos(psx)}{K_{s, SX}^{3/2}} + \frac{b + F \tan(pdx) + F \tan(psx)}{K_{s,FOND}^{3/2}}} } \right)^{3/2}$$

In cui troviamo oltre ai valori di pendenza delle due sponde (pdx e psx) anche il contorno bagnato C ed i tre valori di K_s citati in precedenza e corrispondenti al fondo ed alle due sponde del canale.

Il coefficiente di scabrezza equivalente ($K_{s,eq}$) corrisponde a $32.7 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$.

Avendo determinato ora tutte le componenti, è possibile applicare la formula di Gauckler-Strickler per determinare la portata smaltibile.

$$Q_s = K_s \cdot A \cdot R_i^{2/3} \cdot \sqrt{i} = 32.7 \cdot 15.50 \cdot 1.18^2 \cdot \sqrt{0.0025} = 28.33 \text{ m}^3/\text{s}$$

5.5 Determinazione della portata generata dall'evento estremo

Dopo aver stimato le portate relative ai dati tempi di ritorno (Tabella 15) sarà necessario caratterizzare il regime idrico conseguente ai massimi precipitativi registrati in data 24/06/13.

A questo fine, verrà adoperata nuovamente la formula per la determinazione di Q_{max} .

$$Q_{max} = \alpha \frac{C_d \cdot h \cdot S}{T_c}$$

Avendo premura di inserire come parametro di altezza massima di pioggia (h), il valore di precipitazione cumulata, indicato da ARPA (Tabella 2) per l'arco temporale fornito dal tempo di corrivazione. A tale valore (T_c) corrispondente a 0.508, circa mezzora, verrà quindi associata un'altezza "h" pari a 92.60 mm, cui fa riferimento l'orario 17.26 – 17.56.

Il risultato di questa elaborazione è il seguente:

$$Q_{evento} = 0.278 \frac{0.248 \cdot 92.60 \cdot 2.414}{0.508} = 30.41 \text{ m}^3/\text{s}$$

5.6 Valutazione e determinazione delle soglie di sicurezza

Dalle analisi idrologiche condotte in precedenza, siamo ora a conoscenza della portata smaltibile, ovvero la portata massima che la sezione in esame può sopportare, pur restando ancora funzionale. Tenendo presente questo valore, corrispondente a $Q_s = 28.33 \text{ m}^3/\text{s}$, si andranno a determinare due altezze di pioggia massima (di attenzione h_a e di pericolo h_p), tali per cui si genererà, in corrispondenza della sezione di chiusura, il 50% ed il 75% della portata smaltibile.

$$Q_a = 50\% \cdot Q_s = 0.50 \cdot 28.33 = 14.17 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_p = 75\% \cdot Q_s = 0.75 \cdot 28.33 = 21.25 \text{ m}^3/\text{s}$$

Gli indici percentuali, sono stati stabiliti arbitrariamente, tenendo presente i valori di piena calcolati per i diversi tempi di ritorno (tabella 15). Sulla base di queste linee guida, abbiamo che la portata corrispondente alla soglia di attenzione, coincide alla piena centenaria (pari a $14.18 \text{ m}^3/\text{s}$); mentre l'indice di attenzione consiste di un'approssimazione della piena dei 500 anni, corrispondente al 127% della stessa.

Applicando ora la formula per il calcolo della portata:

$$Q_{max} = \alpha \frac{C_d \cdot h \cdot S}{T_c}$$

Ed isolando il fattore di interesse (h), si otterranno le due soglie di precipitazione, descritte in precedenza:

$$h = Q_{max} \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{T_c}{C_d \cdot S}$$

$$\text{Soglia di attenzione } h_a = 14.17 \cdot 3.6 \cdot \frac{0.508}{0.248 \cdot 2.414} = 43.29 \text{ mm}$$

$$\text{Soglia di pericolo } h_p = 21.25 \cdot 3.6 \cdot \frac{0.508}{0.248 \cdot 2.414} = 64.91 \text{ mm}$$

Capitolo 6

6 Discussione e conclusioni

Dallo studio eseguito, si è ottenuta una caratterizzazione ed un'analisi del regime idrico del bacino Calastra, una sottosezione del bacino Padulli, a sua volta facente parte del bacino del torrente Ausa; tale caratterizzazione, basata sui dati relativi ai livelli di precipitazione delle stazioni meteorologiche ARPA e conseguenti elaborazioni, ha permesso la determinazione delle curve di possibilità climatica, indicata in precedenza e ripotata di seguito per comodità (Grafico 3).

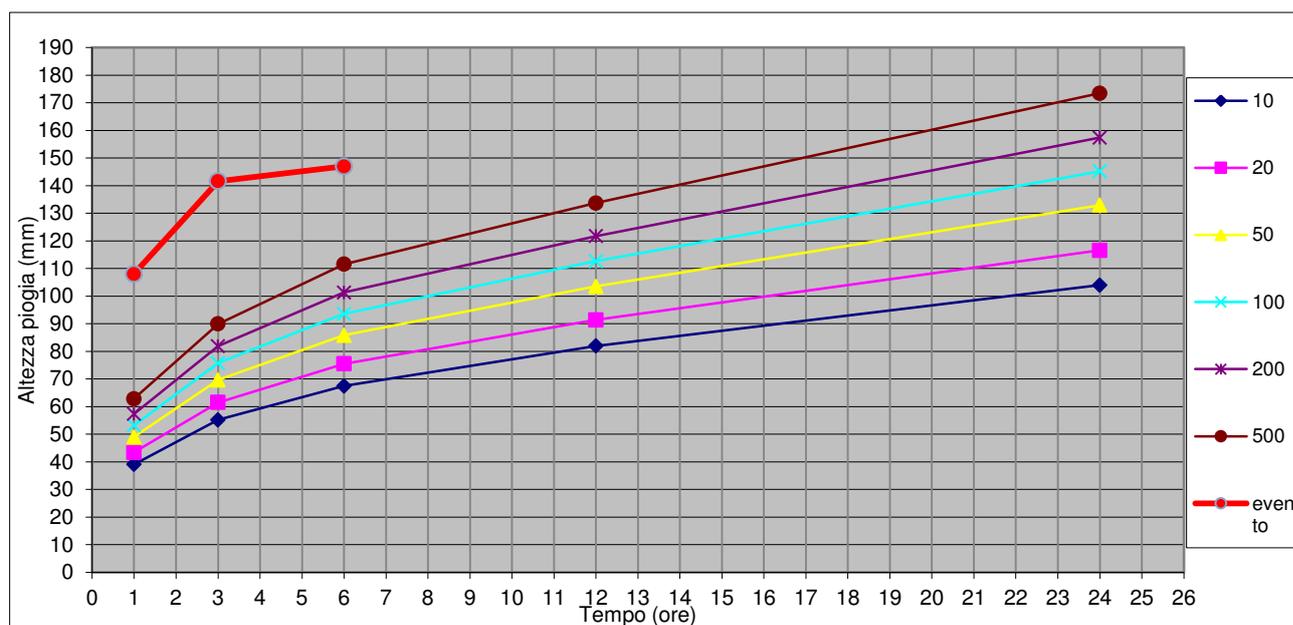


Grafico 3 - Curva di possibilità climatica 1935-2012 ed evento estremo 24 giugno 2013

Da questo grafico, si desume come la precipitazione accaduta in data 24/06/13, se considerata nell'arco della sua durata (sei ore) ed ancora di più, se teniamo conto solo delle prime ore (ricordiamo che dei 148mm di tutta la giornata, 123mm sono stati misurati nell'arco di una singola ora, Tabella 2), presenta un andamento totalmente anomalo, ma estremamente indicativo di quei fenomeni che sempre più stanno colpendo il nostro territorio. È inoltre opportuno fare un'altra considerazione, la legislazione italiana attuale, col Decreto Legislativo n. 49 del 2010 (attuazione della direttiva 2008/60/CE, la direttiva alluvioni) considerando le alluvioni a 500 anni come

“alluvioni rare di estrema intensità: tempo di ritorno fino a 500 anni dall'evento (bassa probabilità) (art. 6 comma 2 lettera a, D.lgs.49/2010)”

sottostima enormemente il problema, andando ad impostare tutta una serie di indicazioni, che in casi estremi (ma sempre più frequenti) risultano del tutto inadeguate a sostenere il carico dell'ondata di piena.

Per quanto riguarda il tempo di corrivazione (T_c), utilizzato nel metodo razionale per il calcolo dell'altezza di pioggia massima e nella portata massima, sono emerse alcune problematiche. Nonostante la sua importanza predominante nello svolgimento di calcoli

idrologici, esso presenta numerose incertezze, che vanno dalla definizione stessa di “tempo di corrivazione” alla procedura di stima, come possiamo vedere dalla moltitudine (e non sono le sole) di formule illustrate in Tabella 14.

L’enunciato in primis, come detto, presenta un forte carattere controverso, dato dalle definizioni proposte, di carattere operativo e concettuale. Di seguito sono riportate 6 definizioni (McCuen, 2009), applicate quando si dispone di eventi osservati di precipitazione-portata:

- 1) Tempo che intercorre dalla fine del tempo di pioggia netta al tempo in cui si verifica l’inflessione della curva di esaurimento del deflusso totale.
- 2) Tempo che intercorre dal centro di massa della pioggia netta al centro di massa del deflusso superficiale.
- 3) Tempo che intercorre dalla massima intensità di precipitazione al picco del deflusso totale.
- 4) Tempo che intercorre dal centro di massa della pioggia netta al picco del deflusso superficiale.
- 5) Tempo che intercorre dal centro di massa della pioggia netta al picco del deflusso totale.
- 6) Tempo che intercorre dall’inizio del deflusso lordo al tempo di picco dello stesso.

E due definizioni concettuali:

- 1) Il tempo che impiega una goccia d’acqua a raggiungere la sezione di chiusura del bacino dal punto idraulicamente più lontano dallo stesso.
- 2) Il tempo che intercorre dalla fine della pioggia netta alla fine del deflusso netto.

A rendere ancora più complesso l’impiego di questo parametro è il fatto che non esistono misure dirette: sono stati tentati degli approcci con l’ausilio di traccianti radioattivi e chimici, ma con risultati limitati spazialmente e temporalmente, che quindi non hanno potuto dare uno slancio significativo al calcolo del tempo di corrivazione (Holecek & Vocel, 1965; Calkins & Dunne, 1970; Pilgrim, 1975).

Stabilito l’utilizzo della formulazione di Kirpich, un altro problema riscontrato, consiste nel fatto che in letteratura, essa viene indicato secondo il sistema metrico anglosassone:

$$T_c = 0.0078 \cdot \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$$

In cui L, la lunghezza dell’asta fluviale presenta come unità di misura il piede; S invece rappresenta la pendenza media (adimensionale), dalla differenza tra la quota massima del bacino (H_{max}) e la minima (H_0), rapportato alla lunghezza dell’asta (L); infine il coefficiente 0.0078 è necessario per ottenere un tempo di corrivazione in minuti (a partire dalla lunghezza espressa in piedi). Detto questo, è stato quindi necessario eseguire degli “aggiustamenti” per conformare tale formulazione al sistema metrico decimale e per ottenere un valore finale in ore, anziché minuti.

$$\frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} = \frac{L^{0.77}}{S^{\frac{0.77}{2}}} = \frac{L^{0.77}}{\left(\frac{H_{max} - H_0}{L}\right)^{\frac{0.77}{2}}} = \frac{L^{0.77} \cdot L^{\frac{0.77}{2}}}{(H_{max} - H_0)^{\frac{0.77}{2}}} = \left(\frac{L \cdot \sqrt{L}}{\sqrt{H_{max} - H_0}}\right)^{0.77}$$

Il coefficiente 0.0078, necessario ad ottenere il risultato in minuti, ha subito una modifica, poiché 1 ft = 0.3048 m, per ottenere un valore di tempo di corrivazione in ora ed in metri:

$$\begin{aligned} 0.0078 \cdot \frac{L(ft)^{0.77}}{S^{0.385}} &= 0.0078 \cdot \frac{[3.28 \cdot L(m)]^{0.77}}{S^{0.385}} = 0.0078 \cdot 3.28^{0.77} \cdot \frac{L(m)^{0.77}}{S^{0.385}} \\ &= \frac{0.01947}{60} \cdot \frac{L(m)^{0.77}}{S^{0.385}} = 0.0003245 \cdot \frac{L(m)^{0.77}}{S^{0.385}} \end{aligned}$$

Le analisi idrologiche quindi, sono state effettuate partendo da una caratterizzazione in dettaglio del bacino imbrifero, sotteso alla sezione di chiusura, eseguita sfruttando la potenza degli strumenti GIS. L'applicazione di questo metodo, ha permesso di ottenere un valore di coefficiente di deflusso "C_d" estremamente rappresentativo del territorio indagato. Tale valore, ha condotto poi, ad un quadro quanto mai esauriente della valutazione della portata del canale e della capacità di smaltimento della sezione idraulica, in riferimento ad eventi stimati per diversi tempi di ritorno e per l'evento reale, che ha portato al collasso del sistema.

Le fotografie riportate in seguito, rappresentano l'andamento idrologico tipico del canale Calastra (Figura 26) e la situazione documentata dal Consorzio di Bonifica della Romagna, la sera del 24/06/13 (Figura 27), dopo la "bomba d'acqua" quindi.



Figura 26 - Canale calastra a regime idrico normale



Figura 27 - Canale Calastra a seguito dell'evento estremo del 24/06/13

L'intensità di questo evento estremo, come detto, è avvalorata dalla determinazione delle portate, che hanno permesso di ottenere le seguenti informazioni (Tabella 18)

Tabella 18 - Confronto valori di pioggia massima e portata

Tempo di ritorno (anni)	h (mm)	Q _{max} (m ³ /s)
10	31.85	10.46
20	35.33	11.6
50	39.82	13.08
100	43.19	14.18
200	46.54	15.29
500	50.97	16.74
Evento	h (mm)	Q _{evento} (m ³ /s)
24/06/2013	92.60	30.41

A fronte di una portata smaltibile dalla sezione, corrispondente a $Q_{\text{smaltibile}} = 28.33 \text{ m}^3/\text{s}$.

Il canale in esame quindi, sebbene realizzato tenendo conto dell'ipotetico valore di piena per T=500 anni e quindi perfettamente in grado di mantenersi efficiente, per eventi di questa intensità (con un margine di quasi $12 \text{ m}^3/\text{s}$), risulta inadeguato ad eventi di carattere

eccezionale, come è stato quello in oggetto. Situazioni analoghe a quella indicata, cui le opere realizzate falliscono nel loro intento, pongono l'accento sul problema indiretto dei cambiamenti climatici. Infatti, tutta la modellazione impiegata finora, utilizzata per la realizzazione di infrastrutture, come anche per la gestione e la programmazione, affonda le sue fondamenta in *database* climatici, che non sono più rappresentativi degli andamenti attuali, sottostimando, come visto, l'intensità dei fenomeni di interesse.

Molto importanti, per ipotetici fini gestionali, sono le soglie di precipitazione stimate, grazie alla soglia di attenzione $h_a = 43.29$ mm, ed alla soglia di pericolo $h_p = 64.91$ mm infatti, sarebbe possibile monitorare lo stato idrologico del bacino, prestando particolare attenzione agli eventi meteorologici, che come abbiamo ampiamente visto, posso tramutarsi in veri e propri eventi estremi, in grado di causare ingenti danni alle zone colpite. I due valori proposti, come detto in precedenza, sono stati formulati tenendo presente le portate stimate per diversi tempi di ritorno, nello specifico la portata dei 100 anni, per la soglia di attenzione e la portata dei 500, maggiorata di circa il 25% per la soglia di pericolo. Questi valori quindi, tengono conto dell'andamento reale delle piene inerenti al bacino Calastra e questo è un fattore di primaria importanza.

Nonostante la dimensione spaziale piuttosto limitata, 2.414 km^2 del bacino Calastra, l'applicazione di questo metodo su vasta scala, ovvero sulla totalità dei bacini idrografici di un territorio, potrebbe garantire un monitoraggio estremamente significativo del comparto idrologico. Tale significatività come visto, è insita nel modello: esso tiene in considerazione le caratteristiche morfo-fisiografiche del bacino d'interesse, andando a soppesare attentamente i suoi caratteri e valutando quindi un valore di portata, che può essere definito quanto mai rappresentativo.

Si preme specificare inoltre, che il metodo Kennessey, per la stima del coefficiente di deflusso, pur rimanendo abbastanza datato (1930), è stato aggiornato alle più moderne tecniche informatiche, che hanno permesso uno svolgimento preciso ed economico, dove invece sarebbe stato necessario effettuare molteplici rilevazioni sul campo. Fermo restando, l'ottimo risultato ottenuto, le incognite riguardanti l'onda di piena ed il suo movimento, restano tali. Sarebbe necessario effettuare delle simulazioni più approfondite, tramite appositi programmi di modellazione spaziale, come ad esempio HEC-HMS dell'*US Army Corps of Engineers*, progettato per simulare la totalità dei processi idrologici di un bacino, includendo numerose analisi tradizionali (infiltrazione, idrogrammi unitari, routing idrologico) e procedure più complesse, come la determinazione dell'evapotraspirazione, i processi di scioglimento delle nevi, ma anche simulazioni di deflusso e fenomeni erosivi/trasporto di sedimenti.

Capitolo 7

7 Allegati: Dati Pluviometrici

Stazione: San Marino Latitudine: 43,93753 Longitudine: 12,446493 Quota m.s.l.m.: 680					
Anno	h (mm)				
	t = 1 ora	t = 3 ore	t = 6 ore	t = 12 ore	t = 24 ore
1935	36.40	37.80	37.80	37.80	37.80
1936	52.00	70.00	77.80	77.80	78.00
1937	40.80	43.20	62.60	76.80	77.20
1938	21.60	27.00	30.20	30.20	45.80
1939	28.00	65.40	67.00	80.40	141.60
1940	38.60	53.20	63.80	66.00	69.20
1941	22.60	30.40	32.80	38.60	53.00
1942	33.00	45.60	67.00	71.40	86.00
1943	27.00	52.60	68.60	99.00	116.00
1944					
1945					
1946	10.00	23.00	31.60	45.00	58.00
1947	23.04	29.87	31.56	53.26	72.82
1948	29.20	43.20	55.40	60.00	94.20
1949	28.61	34.76	50.35	59.48	62.14
1950	25.85	32.61	33.29	35.68	42.67
1951	34.16	42.94	48.48	56.13	73.10
1952	22.82	30.49	38.39	46.88	55.23
1953	22.51	30.22	31.99	51.10	72.01
1954					
1955	27.26	40.05	68.43	86.22	106.80
1956	25.24	43.36	69.05	83.13	123.40
1957	25.85	32.95	32.95	38.34	90.00
1958	25.27	28.67	29.86	36.66	43.50
1959	40.00	63.00	86.20	102.40	121.60
1960	19.60	24.20	24.20	42.00	53.00
1961	33.20	42.20	56.20	56.20	64.00
1962	23.00	27.00	50.80	83.00	107.40
1963	26.62	37.90	39.42	49.78	57.97
1964	29.11	39.07	50.41	53.60	69.56
1965	19.80	29.60	29.60	34.60	46.40
1966	22.60	23.80	29.40	32.40	59.20
1967	28.40	37.60	37.80	46.80	62.20
1968	32.00	34.40	46.20	60.00	60.00

1969	23.60	27.60	39.80	48.60	54.40
1970	31.00	38.60	38.60	49.20	53.60
1971	26.40	33.80	35.40	42.20	51.00
1972	16.00	20.60	31.60	45.60	65.00
1973	25.58	37.62	50.73	54.56	64.49
1974	29.49	35.21	37.08	48.83	51.42
1975	25.34	30.68	40.15	51.08	74.00
1976	28.59	40.46	56.13	72.79	93.65
1977	32.35	44.30	51.83	55.80	62.02
1978	25.79	30.07	37.28	45.69	68.50
1979	25.92	33.40	38.23	58.42	75.00
1980	25.29	33.55	38.08	49.11	64.00
1981	28.72	43.75	71.27	95.34	196.60
1982	26.89	50.86	72.12	84.77	87.72
1983	23.24	35.51	46.14	50.88	50.88
1984	23.33	28.14	28.14	32.07	44.32
1985	23.07	30.11	38.18	45.60	45.60
1986	26.26	41.11	50.92	53.75	66.35
1987	24.85	31.41	31.41	30.69	44.60
1988	23.29	22.65	22.65	30.14	36.60
1989	29.99	41.13	52.48	55.87	66.31
1990	19.20	25.60	29.00	47.80	59.20
1991	49.80	71.00	73.40	74.60	74.80
1992	19.60	28.00	43.20	63.20	84.00
1993	15.00	32.80	42.40	46.00	58.40
1994	34.80	48.80	54.60	60.00	60.00
1995	17.60	32.80	56.00	64.80	80.20
1996	40.80	47.40	56.00	95.80	143.20
1997	34.40	48.40	48.40	51.20	68.00
1998	24.80	25.00	25.60	26.60	32.80
1999	14.60	25.20	36.00	52.40	73.20
2000	35.40	40.80	40.80	40.80	53.40
2001	16.20	35.00	45.40	51.80	58.40
2002	23.40	54.00	61.60	61.60	65.00
2003	5.20	12.80	22.40	37.20	39.80
2004	20.60	36.60	48.60	51.20	51.20
2005	29.20	38.00	42.00	63.00	93.60
2006	22.20	38.20	38.20	42.80	50.40
2007	11.40	19.00	26.20	34.40	40.20
2008	16.60	24.60	29.00	35.00	40.00
2009	19.40	27.60	48.60	73.00	86.20
2010	21.00	27.00	34.40	45.20	56.20

2011	22.60	26.20	39.00	43.00	48.00
2012	18.40	33.60	37.20	52.00	91.80
Stazione: Rimini Urbana					
Latitudine: 44,059194					
Longitudine: 12,573538					
Quota m.s.l.m.: 16					
Anno	h (mm)				
	t = 1 ora	t = 3 ore	t = 6 ore	t = 12 ore	t = 24 ore
1935	12.80	17.60	23.00	41.00	63.60
1936	16.00	22.00	27.40	41.40	59.40
1937	30.80	34.20	42.20	63.60	63.40
1938	42.40	44.60	47.40	52.00	52.80
1939	25.00	36.20	53.00	79.40	101.00
1940	14.00	26.00	42.80	59.60	74.00
1941	24.20	34.80	45.80	57.60	63.80
1942	27.20	60.00	67.80	71.20	90.00
1943	16.60	19.20	25.60	32.40	34.00
1944					
1945					
1946	39.40	42.00	42.60	57.30	75.60
1947	20.00	26.40	30.60	33.80	54.00
1948	19.00	19.00	22.00	22.00	35.60
1949	42.80	49.60	50.00	58.20	62.40
1950	15.00	24.60	25.60	33.00	38.80
1951	23.20	38.80	39.00	43.00	55.40
1952	52.00	53.20	53.20	54.60	58.40
1953	19.60	32.20	33.40	40.80	42.40
1954					
1955	33.00	44.40	53.00	65.40	67.60
1956	13.00	28.60	39.00	59.20	76.20
1957	22.80	32.20	37.60	42.20	42.20
1958	15.00	28.00	30.80	37.40	44.40
1959	33.20	39.40	40.80	47.60	52.80
1960	32.00	44.20	45.60	45.60	45.60
1961	75.00	85.60	98.80	98.80	98.80
1962	21.00	29.00	47.20	73.20	87.60
1963	31.40	34.80	37.20	58.00	58.40
1964	30.00	43.00	52.20	57.00	83.00
1965	22.80	32.80	34.20	36.40	56.40
1966	19.40	33.60	50.00	66.60	87.20
1967	18.00	21.20	22.20	34.80	65.00
1968	30.60	35.00	36.80	42.00	49.40
1969	35.80	57.40	57.40	77.20	83.00
1970	27.00	59.00	70.00	74.20	84.00

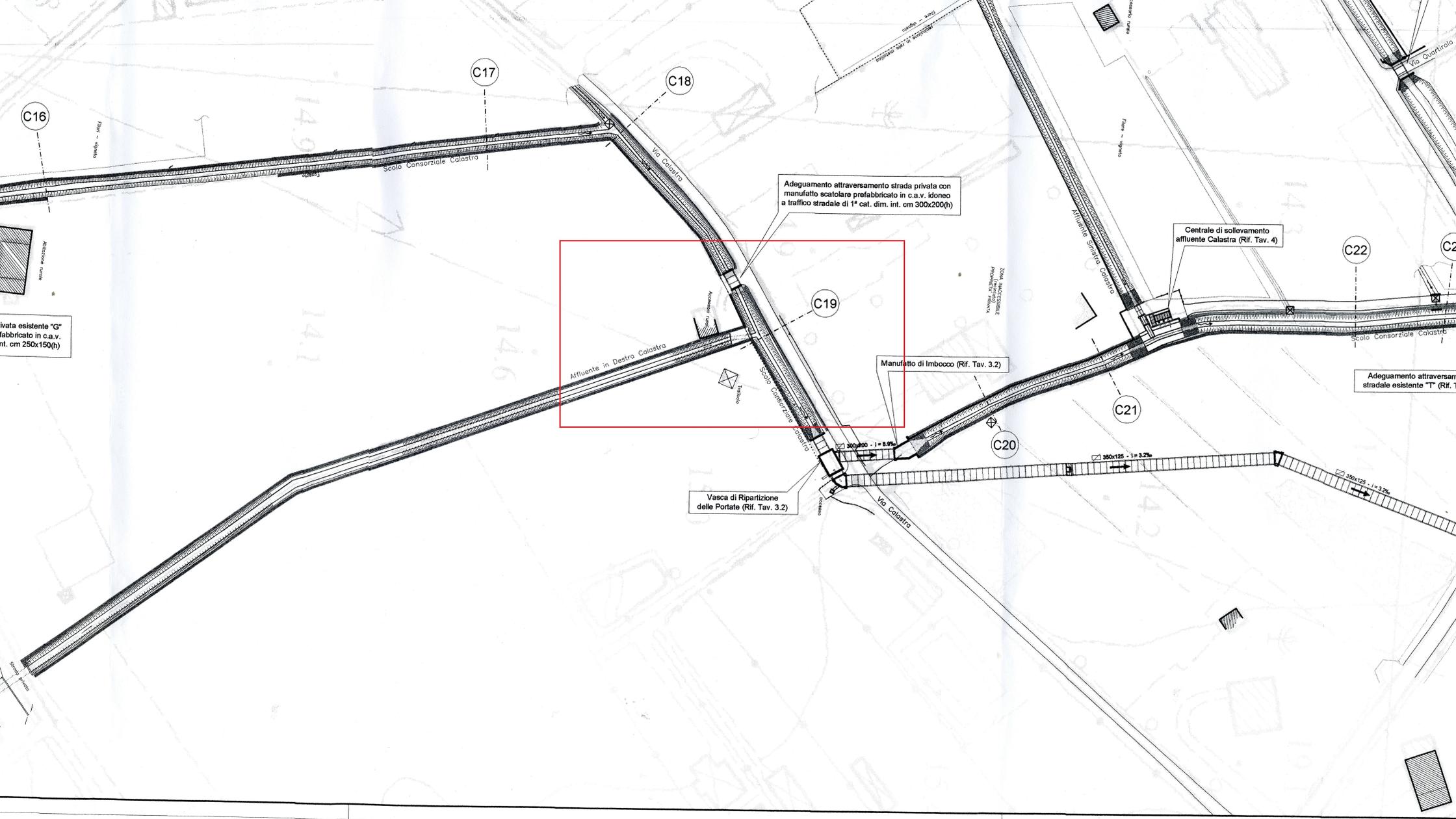
1971	17.40	22.60	27.20	32.00	38.80
1972	48.20	59.20	60.00	60.00	60.00
1973	24.00	36.20	37.20	53.40	76.60
1974	30.40	31.60	31.60	36.40	48.60
1975	26.40	33.00	34.00	34.60	40.00
1976	47.80	52.80	57.00	77.80	105.40
1977	22.00	37.40	50.00	68.20	68.20
1978	60.00	111.20	114.40	115.20	128.00
1979	20.80	32.60	42.40	76.40	95.60
1980	14.20	22.60	25.60	40.60	51.00
1981	24.80	34.80	42.00	52.40	66.60
1982	28.00	53.00	63.40	63.40	67.00
1983	13.60	19.80	25.80	27.80	28.40
1984	21.00	28.00	28.60	30.60	40.40
1985	19.60	22.60	24.80	45.60	69.40
1986	26.80	27.20	29.80	36.00	38.20
1987	16.00	28.00	31.20	33.60	39.20
1988	17.20	20.80	25.40	25.60	40.40
1989	41.00	70.00	80.60	92.40	107.20
1990					
1991					
1992					
1993					
1994					
1995					
1996					
1997					
1998	22.40	22.40	24.60	33.00	38.60
1999	28.60	31.00	41.60	59.80	74.20
2000	24.00	26.60	27.00	32.60	39.40
2001	19.60	39.80	48.20	88.40	126.20
2002	30.60	45.00	56.40	72.60	78.80
2003	12.40	15.40	22.20	35.40	37.00
2004	18.60	34.00	43.60	43.60	48.00
2005	31.00	55.20	82.20	111.00	125.60
2006	25.00	53.40	74.80	87.20	94.20
2007					
2008	18.40	21.40	30.80	48.20	65.60
2009	19.80	26.00	44.20	53.40	58.00
2010	21.20	34.40	41.80	60.40	75.40
2011	21.60	22.60	25.60	43.80	56.20
2012	29.40	50.60	53.80	57.00	86.60

Composizione dei dati pluviometrici delle precedenti due stazioni, operata dallo Studio Geologico ITS

Anno	h (mm)				
	t = 1 ora	t = 3 ore	t = 6 ore	t = 12 ore	t = 24 ore
1935	27.30	30.74	33.74	43.72	56.26
1936	37.73	51.05	58.37	66.14	76.24
1937	39.73	42.95	58.15	77.90	78.02
1938	35.51	39.73	43.06	45.61	54.71
1939	29.41	56.38	66.59	88.67	134.61
1940	29.19	43.95	59.15	69.69	79.46
1941	25.97	36.18	43.61	53.38	64.81
1942	33.40	58.60	74.80	79.13	97.66
1943	24.19	39.84	52.27	72.91	83.23
1944					
1945					
1946	27.41	36.07	41.17	56.76	74.13
1947	23.88	31.22	34.49	48.31	70.37
1948	26.75	34.51	42.95	45.50	72.02
1949	39.62	46.81	55.68	65.30	69.10
1950	22.67	31.74	32.68	38.11	45.21
1951	31.83	45.36	48.54	55.00	71.30
1952	41.52	46.44	50.82	56.31	63.05
1953	23.36	34.63	36.28	50.99	63.49
1954					
1955	33.43	46.86	67.38	84.13	96.77
1956	21.22	39.93	59.96	78.98	110.75
1957	26.99	36.15	39.15	44.69	73.35
1958	22.35	31.45	33.66	41.09	48.77
1959	40.62	56.82	70.47	83.23	96.77
1960	28.63	37.95	38.73	48.61	54.71
1961	60.04	70.91	86.01	86.01	90.33
1962	24.41	31.07	54.38	86.67	108.20
1963	32.19	40.34	42.51	59.80	64.57
1964	32.80	45.54	56.93	61.37	84.65
1965	23.64	34.62	35.40	39.40	57.04
1966	23.30	31.85	44.06	54.93	81.23
1967	25.75	32.63	33.29	45.28	70.58
1968	34.74	38.51	46.05	56.60	60.70
1969	32.96	47.16	53.93	69.80	76.24
1970	32.18	54.16	60.26	68.47	76.35
1971	24.30	31.30	34.74	41.17	49.83
1972	35.62	44.28	50.83	58.60	69.36
1973	27.51	40.96	48.79	59.90	78.29

1974	33.23	37.07	38.11	47.29	55.50
1975	28.71	35.33	41.15	47.54	63.26
1976	42.38	51.75	62.78	83.56	110.45
1977	30.16	45.34	56.50	68.80	72.26
1978	47.60	78.39	84.16	89.27	109.03
1979	25.92	36.62	44.74	74.81	94.66
1980	21.91	31.16	35.33	49.78	63.81
1981	29.70	43.59	62.85	81.98	146.04
1982	30.46	57.63	75.20	82.21	85.85
1983	20.44	30.69	39.92	43.66	43.99
1984	24.60	31.15	31.48	34.77	47.01
1985	23.68	29.25	34.94	50.60	63.81
1986	29.44	37.90	44.79	49.80	58.01
1987	22.67	32.96	34.74	35.67	46.50
1988	22.47	24.11	26.66	30.93	42.73
1989	39.39	61.66	73.85	82.27	96.27
1990					
1991					
1992					
1993					
1994					
1995					
1996					
1997					
1998	26.19	26.30	27.85	33.07	39.62
1999	23.97	31.18	43.06	62.26	81.79
2000	32.96	37.40	37.62	40.73	51.49
2001	19.86	41.50	51.94	77.79	102.43
2002	29.96	54.93	65.48	74.46	79.79
2003	9.77	15.65	24.75	40.28	42.61
2004	21.75	39.17	51.16	52.60	55.04
2005	33.40	51.71	68.92	96.55	121.63
2006	26.19	50.83	62.70	72.13	80.24
2007					
2008	19.42	25.52	33.18	46.17	58.60
2009	21.75	29.74	51.49	70.14	80.01
2010	23.42	34.07	42.28	58.60	73.02
2011	24.53	27.08	35.85	48.16	57.82
2012	26.52	46.72	50.49	60.48	98.99

7.1 Allegati: planimetria e sezione del canale Calastra



C16

C17

C18

C19

C20

C21

C22

Adeguamento attraversamento strada privata con manufatto scatolare prefabbricato in c.a.v. idoneo a traffico stradale di 1° cat. dim. int. cm 300x200(h)

Centrale di sollevamento affluente Calastro (Rif. Tav. 4)

Manufatto di Imbocco (Rif. Tav. 3.2)

Adeguamento attraversamento stradale esistente "T" (Rif. 1)

Vasca di Ripartizione delle Portate (Rif. Tav. 3.2)

Manufatto esistente "G" fabbricato in c.a.v. int. cm 250x150(h)

Affluente in Destra Calastro

$300 \times 100 - i = 0.9\%$

$300 \times 125 - i = 3.2\%$

$300 \times 125 - i = 3.2\%$

Via Calastro

Via Calastro

Via Quattroiro

Viale Strada Calastro

Scolo Consorziale Calastro

Scolo Consorziale Calastro

Zona di Protezione

14.6

14.7

14.6

14.2

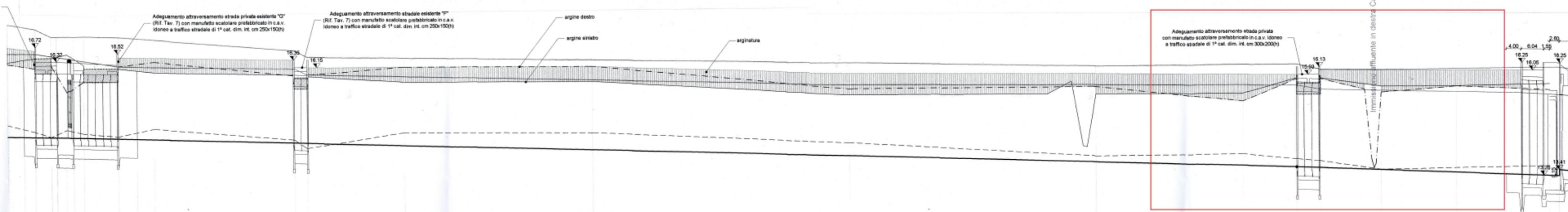
Adeguamento attraversamento stradale esistente "H"
(Rif. Tav. 7) con manufatto scolare prefabbricato in c.a.v.
idoneo a traffico stradale di 1° cat. dim. int. cm 250x150(h)

Adeguamento attraversamento strada privata esistente "G"
(Rif. Tav. 7) con manufatto scolare prefabbricato in c.a.v.
idoneo a traffico stradale di 1° cat. dim. int. cm 250x150(h)

Adeguamento attraversamento stradale esistente "F"
(Rif. Tav. 7) con manufatto scolare prefabbricato in c.a.v.
idoneo a traffico stradale di 1° cat. dim. int. cm 250x150(h)

Adeguamento attraversamento strada privata
con manufatto scolare prefabbricato in c.a.v. idoneo
a traffico stradale di 1° cat. dim. int. cm 300x200(h)

1:50
1:500
Rif.: 11.00



NUMERO PICCHETTI	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62
SEZIONI	C14												C15		C16												
DISTANZE PARZIALI	4.48	3.00	4.30	1.48	2.49	1.52	9.20	5.00	4.55	37.51	3.42	26.00	50.54	69.05	65.96	39.48	14.35	6.35	16.26	20.15	13.40	4.00	6.04	1.95	2.00		
DISTANZE PROGRESSIVE	4.48	7.48	11.78	13.26	15.75	17.27	26.47	31.47	36.02	73.53	76.95	102.95	153.49	222.54	288.50	327.98	342.33	348.68	364.94	381.20	401.36	414.76	420.80	426.84	432.88	434.88	
ARGINE DESTRO (dx)	16.72	16.37	16.52	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32
ARGINE SINISTRO (sx)	16.72	16.37	16.52	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32	16.32
SOMMITA' ARGINANALE	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34
QUOTE DI FONDO STATO DI FATTO	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34
QUOTE LIVELLO ACQUA STATO DI FATTO (lr 50)	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34
QUOTE LIVELLO ACQUA DI PROGETTO (lr 50)	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34
QUOTE FONDO DI PROGETTO	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34
PENDENZE DI SCORRIMENTO	i = 2.5%												i = 3.2%														

Bibliografia

AIPO (2014), *Relazione preliminare sugli eventi di Parma e Baganza del 13-14 ottobre 2014*, Ing G. Zanichelli e S. Pavan, Dott. S. Campanini, Parma 2014.

AMS Glossary of Meteorology (2012), <http://glossary.ametsoc.org/wiki/Rain>.

AMS, Glossary of Meteorology, (2012 a) , http://glossary.ametsoc.org/wiki/Flash_flood.

APAT (2007), *Cambiamenti climatici ed eventi estremi, Rischi per la salute in Italia*. Agenzia per la Protezione dell'Ambiente ed i servizi Tecnici (ora ISPRA), 2007.

ARPA (2013), *Rapporto dell'evento meteorologico del 24 giugno 2013*, Unità Radarmetrica, Radarpluviometrica, Nowcastin e Reti non convenzionali, Unità Sala Operativa Precisioni Meteorologiche, Area Centro Funzionale e Reti di monitoraggio Area Idrografia e Idrologia, Bologna 2013.

ARPA a (2014), *Rapporto dell'evento idro-meteorologico del 17-19 gennaio 2014*, Unità Radarmetrica, Radarpluviometrica, Nowcastin e Reti non convenzionali, Unità Sala Operativa Precisioni Meteorologiche, Area Centro Funzionale e Reti di monitoraggio Area Idrografia e Idrologia, Bologna 2014.

ARPA b (2014), *Rapporto dell'evento meteorologico del 30-31 maggio 2014*, , Unità Radarmetrica, Radarpluviometrica, Nowcastin e Reti non convenzionali, Unità Sala Operativa Precisioni Meteorologiche, Area Centro Funzionale e Reti di monitoraggio Area Idrografia e Idrologia, Bologna 2014.

ARPA c (2014), *Rapporto sull'evento meteo idrogeologico e idraulico del 20 settembre 2014*, Centro Funzionale Regione Emilia-Romagna, Unità Radarmeteorologica, Radarpluviometrica, Nowcasting e Reti non convenzionali, Bologna 2014.

ARPA d (2014), *Radar meteo: stima della pioggia*, ARPA IdroMeteoClima 2014.

Barazzuoli et al. (1986), *Valutazione delle risorse idriche nella Toscana meridionale. Applicazione del "metodo Kennessey" al bilancio del Torrente Farma (province di Siena e Grosseto) e sua verifica con i calcoli di bilancio*, Barazzuoli P., Micheluccini M., Salleolini M., Salvadori L., Bollettino della società geologica italiana vol. 105, 1986.

Burke et al. (2010), *Journal of hydrology* 388, *An extreme value analysis of UK drought and projections of change in the future*, Burke, E.J., Perry R.H.J., Brown S.J., 2010.

Cacciamani e Tibaldi (2008), *Quando il clima pesa sul bacino del Po*, Cacciamani C., Tibaldi S., Pecora S., Servizio IdroMeteoClima, Arpa Emilia-Romagna 2008.

Cacciamani et al. (2010), *Cambiamenti climatici, impatti e adattamento*, Cacciamani C., Tomozeiu R., Pavan V., Servizio IdroMeteoClima, Arpa Emilia-Romagna 2010.

Calkins & Dunne (1970), *A salt tracing method for measuring channel velocities in small mountain streams*, Calkins D., Dunne T., *Journal of Hydrology*, 1970.

CMT (2012), *Centro Meteo Italiano, Il clima dell'Emilia Romagna*, 2012.

Colombetti & Mattioli (1991), *Metodi indiretti di valutazione del deflusso e delle risorse idriche nel bacino superiore del F. Panaro (Modena)*, Quaderni di Geologia applicata, vol. 1, 1994.

Cornelini et al. (2006), *Manuale di Ingegneria Naturalistica applicabile al settore idraulico*, CAP 15, Cornelini P., Sauli G., Preti F., Regione Lazio, Assessorato per l'Ambiente Dipartimento Ambiente e Protezione Civile, 2006.

De Martonne (1926), *Une nouvelle fonction climatologique: L'indice d'aridité*, La Météorologie, Parigi, 1926.

Ecoscienza (2013), *Rischio alluvioni, le nuove mappe dell'Emilia-Romagna*, ARPA Ecoscienza volume 6 2013.

EEA (2012), *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012*. European Environmental Agency, 2012.

Encyclopaedia Britannica, *Climate meteorology page 16*, written by Sir Basil John Mason, 2014.

FAO (1985), *Irrigation Water Management: Training Manual No.1 – Introduction to irrigation*, Food and Agriculture Organization of the United States, Land and Water Development Division, C. Brouwer, A. Goffeau, M. Heinloem, 1985.

Fleisher (2010), *Vapor, rain and snow the science of cloud and precipitation*, Paul Flesier, Lerner Publications (1 Agosto 2010).

Furcolo et al. (1998), *Regionale geostatistics analysis of very extreme rainfall and floods*, Furcolo P., Rossi F., Villani P., Annales of Geophysicae v.16, 1998.

Gauckler (1867), *Etudes Théoriques et Pratiques sur l'Écoulement et le Mouvement des Eaux*, Gauckler P., Comptes Rendues de l'Académie des Sciences, Parigi, 1867.

Giandotti (1934), *Previsione delle piene e delle magre dei corsi d'acqua*, Giandotti M., Istituto Poligrafico dello Stato, 1934.

Gioia et al. (2004), *Una rassegna sulle piene indice su base geomorfoclimatica*, Gioia A., Iacobellis V., Margotta M.R., atti del workshop "Modelli Matematici per la simulazione di catastrofi idrogeologiche", 2004.

Giuliaci et al. (2009), *La meteorologia in mare*, Raffaello Bellofiore, Paolo Corazzon e Andrea Giuliaci, Alpha Test 2012.

Glossario (2011), *Cartografia del dissesto idrogeologico*, RER Geologia, sismica e suoli, 2011.

Grimaldi et al. (2010), *Analisi critica dei metodi di stima del tempo di corrivazione*, Grimaldi S., Petroselli A., Nardi F., Tauro F., XXXII Convegno nazionale di idraulica e costruzioni idrauliche, 2010.

Gumbel (1954), *Statistical theory of extreme values and some practical applicaions*, Gumbel E. J., US Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1954.

Harper (2007), *Weather and Climate: Decade by Decade*, Harper Kristine, 2007.

Holecek & Vocel (1965), *Measurement of time of travel in the volynka experimental basin*. Holecek J., Vocel J., Symposium of 7de Budapest, 1965.

Imdabullah (2013), *Time Series Analysis and Forecasting*, Muhammand Imdabullah, *Basic Statistics and Data Anayls*, 2013.

IPCC (2007), *Climage Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P Palutikof, P.J. van der Lindern and C.E. Hanson. Cambridge University Press, Cambridge, 2007.

IPCC (2014), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group, Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014.

ISPRA (2011). *Tematiche 2011, Capitolo 9: Pericolosità Ambientale*. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, 2011.

ISPRA (2014), *Rapporto di sintesi sul dissesto idrogeologico in Italia 2014*, Dipartimento di Difesa del suolo, Servizio geologico d'Italia, Alessandro Trigila, Carla Iadanza, ISPRA 2014.

ISPRA Quaderno 7, *Argille Azzurre*, ISPRA e CNR, Paola Farloni, Fabio Massimo Petti, Chiara D'Ambrogi.

Kennessey (1930), *Lefolyasi tènyszok és retencick*. Vizugy, Kuziemények, 1930.

Kirpich (1940), *Time of concentration of small Agricultural Watersheds*, Kirpich Z.P., Civil Engineering v.10, 1940.

Legambiente (2012), *I costi del rischio idrogeologico*, Dossier Legambiente, Zampetti G, Ottaviani F, Minutolo A, 2012.

Lionello (2012), *The climate of the Mediterranean region, From the past to the Future*, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Biologiche e Ambientali, University of Salento, Lecce 2012.

McCuen (2009), *Uncertainty analyses of watershed time parameters*, McCuen R.H., Journal of Hydrologyc Engineering vol 14, 2009.

NIMA (2000), *Department o Defense World Geodetic System 1984, Its Definition and Relationships with Local Geodetic System*, National Imagery and Mapping Agency, Technical Reporto third edition, 2000.

- NOAA (2005), *WSR -88D Radar FAQ's*, National Weather Service Radar Image, 2005.
- NOAA (2010), *Definition of Flood and Flash flood*, National Weather Service Weather Forecasting Office, 2010.
- NOAA (2012), *Trends in Carbon Dioxide*, Dr. Pieter Tans, National Oceanic & Atmospheric Administration, NOAA/ESRL, 2012.
- Oosterbaan (1994), *Drainage Principles and Applications, Publication 16, Frequency and regression analysis of hydrologic data*, Oosterbaan R.J., 1994.
- Peel M.C. et al. (2007), *Update world map of the Köppen-Geiger climate classification*, Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A., Hydrology and Earth System Science vol 11, 2007.
- Pilgrim (1975), *Travel times and nonlinearity of flood runoff from tracer measurement on a small watershed*, Pilgrim D.H., Water Resources Research, 1975.
- PSC Rimini (2011), *Sistema ambientale e naturale, relazione di microzonazione sismica*, Piano Strutturale Comunale Rimini 2011.
- RER (2005), *Note illustrative della Carta Geologica alla scala 1:50.000, foglio 256 Rimini*, L. Martelli, S. Quagliere, U. Cibin, P. Severi, A. Correggiari, M. Roveri, L. Martelli, P. Severi, Dipartimento Difesa del Suolo 2005.
- RER (2014), *Accordo rischio idrogeologico, 64 milioni per ultimare 46 interventi*, Portale della Regione Emilia-Romagna, Notizie agosto 2014.
- SMAM (2000), *Tabelle climatiche 19271-2000 dall'Atlante Climatico 1971-2000 del Servizio Meteorologico dell'Aeronautica militare*, Aeronautica Militare – Servizio Meteorologico, 2000.
- Tardi & Vittorini (1977), *Il calcolo del coefficiente di deflusso su basi fisiografiche*, Bollettino degli Ingegneri, Firenze, 1977.
- Testik (2010), *Rainfall: state of the science*, Firat Y. Testik, Mekonnen Gebrimichael, American Geophysical Union 2010.
- UNDHA (1992), *Comprehensive Risk Assessment for Natural Hazard*. United Nations Department of Humanitarian Affairs, 1992.
- USGS (2007), *Global Geographic Information System*, U.S. Geological Survey, 2007.
- Woodward (1997), *Tropical broadleaf evergreen forest: the rainforest*, Radford University 1997.