



Consorzio di bonifica BRENTA  
via Riva IV Novembre n°15, 35013, Cittadella (PD)  
tel. 049.5970822 - fax 049.5970859  
pec: consorzio Brenta@legalmail.it



Comune di CASTELLO DI GODEGO  
via Marconi n°58, 31030, Castello di Godego (TV)  
tel. 0423-761111 - fax 0423.761139  
pec: protocollo.comune.castellodigodego.tv@pecveneto.it



Consorzio di bonifica PIAVE  
via S.Maria In Colle n°2, 31044, Montebelluna (TV)  
tel. 0423.2917 - fax 0423.601446  
pec: consorzio piave@pec.it

# PIANO COMUNALE DELLE ACQUE

## (CON PROGRAMMAZIONE DEGLI INTERVENTI)

### DI

# CASTELLO DI GODEGO

TITOLO ELABORATO

**RELAZIONE SULLA MODELLISTICA IDRAULICA  
E SULL'ANALISI DEL RISCHIO IDRAULICO**

CODICE  
ELABORATO **A.02**

SCALA

--

REVISIONE	DATA	MOTIVO	
02	04/2022	Emissione Finale	
01	02/2022	Prima Emissione	
ESEGUITO	VERIFICA TECNICA	VERIFICA SICUREZZA	APPROVATO
G.R.	G.R./G.Z.	G.R./G.Z.	G.Z.



PROGETTAZIONE

ST di ing. Giuliano Zen  
sede legale: 31037 Loria TV - via Vignola 2/F  
tel. 0423470477 - fax 0423470477  
e-mail: giuliano.zen@edoval.it  
pec: giuliano.zen@ingpec.eu  
C.F. ZNEGLN59L21C111V - P.I. 01886560265

Riproduzione vietata - Legge n° 633 del  
22/04/1941 e successivi aggiornamenti

Comune di **CASTELLO DI GODEGO** (TV)

PIANO COMUNALE DELLE ACQUE - 2022

**ALLEGATO A2**

Parte 1. Modello Idraulico della corrivazione .....	<b>2</b>
Parte 2. Analisi idraulica delle reti di drenaggio (SWMM) .....	<b>9</b>
Parte 3. Analisi del rischio idraulico .....	<b>29</b>

## PARTE 1

# MODELLO IDRAULICO DELLA CORRIVAZIONE

Si illustra il semplice modello di calcolo utilizzato per determinare i valori di portata e i volumi d'invaso previsti dal Piano Comunale delle Acque di CASTELLO DI GODEGO.

In un bacino idrografico il ritardo con cui una goccia si presenta alla sezione di chiusura dipende dal punto in cui essa è caduta; detto ritardo prende il nome di *tempo di corrivazione del punto*. Il tempo di ritardo massimo prende il nome di *tempo di corrivazione del bacino* e viene qui indicato con  $t_c$ .

I luoghi dei punti caratterizzati da uno stesso valore del tempo di corrivazione vengono detti *linee isocorrive*; la curva che per assegnato valore del tempo di corrivazione fornisce l'area della porzione di bacino i cui punti hanno tempi di corrivazione  $t \leq t_c$  prende il nome di *curva aree-tempi del bacino*.

Supponendo di aver tracciato le linee isocorrive con passo temporale  $Dt$  all'interno del quale l'intensità di precipitazione possa considerarsi costante, linearizzata la *curva aree-tempi* in ciascun intervallo, si ha che l'idrogramma di portata  $q_k(t)$  che attraversa la  $k-1_{ma}$  isocorriva in seguito alla precipitazione di intensità  $i_j$ , caduta nell'intervallo

$$t_{j-1} = (j-1)Dt$$

e

$$t_j = jDt$$

sulla porzione di bacino di area  $DA_k$  compresa tra le isocorrive  $(k-1)Dt$  e  $kDt$  è descritto dalle equazioni:

- se  $t_{j-1} \leq t \leq t_j$  vale  $q_k(t) = (i_j DA_k / Dt)(t - t_{j-1})$ ;
- se  $t_j \leq t \leq t_{j+1}$  vale  $q_k(t) = (i_j DA_k / Dt)(t_j - t)$ ;
- se  $t \geq t_{j+1}$  vale  $q_k(t) = 0$ .

La forma della curva di piena è *triangolare* dove  $q_k(t)$  assume i valori

$$0 \text{ per } t = (j-1)Dt,$$

$$q_k(t) = i_j DA_k \text{ per } t = jDt \text{ e di nuovo}$$

$$q_k(t) = 0 \text{ per } t = (j+1)Dt;$$

il tempo alla base dell'idrogramma di piena è pari a  $2Dt$ .

L'idrogramma di portata che attraversa la sezione di chiusura in seguito alla precipitazione caduta nell'intervallo  $(j-1)Dt$  e  $jDt$  sull'area  $DA_k$  si ottiene trasladando nel tempo l'idrogramma di piena illustrato di un intervallo pari a  $(k-1)Dt$ ; quindi il valore al colmo  $DA_k i_j$  giungerà alla sezione di chiusura al tempo  $(j+k-1)Dt$ .

L'idrogramma di piena complessivo si ottiene sommando i contributi delle varie aree che giungono al medesimo istante alla sezione di chiusura.

Le ipotesi di *linearità* e *stazionarietà* consentono di semplificare la modellazione dei fenomeni di piena; in particolare:

- a) un sistema si dice *stazionario* quando a due ingressi uguali sfasati nel tempo di un certo intervallo di tempo corrispondono due uscite uguali sfasate dello stesso intervallo temporale;
- b) un sistema si dice *lineare* quando ad un ingresso combinazione lineare di due ingressi corrisponde un'uscita combinazione lineare secondo medesimi coefficienti moltiplicativi delle uscite relative agli stessi ingressi.

Con *linearità* e con *stazionarietà* la relazione tra ingresso  $p(t)$  e uscita  $q(t)$  assume la forma di un'equazione lineare differenziale a coefficienti costanti che ha come soluzione l'integrale di convoluzione

$$q(t) = \int_0^t p(\tau) h(t-\tau) d\tau$$

essendo  $h(t)$  l'idrogramma unitario istantaneo ( $h(t)$  dimensionalmente è l'inverso di un tempo).

Il modello cinematico del tempo di corrivazione si configura quindi come un particolare modello *lineare* e *stazionario* schematizzabile come un insieme di infiniti canali lineari in parallelo; a ciascun elemento di area  $S_I$  del bacino si può associare un canale lineare il cui ritardo caratteristico coincide con il tempo di corrivazione del punto.

Con tale modello la portata massima si verifica in corrispondenza ad una durata della precipitazione maggiore o uguale al tempo di corrivazione e viene mantenuta per un tempo  $t_p - t_c$  essendo  $t_p$  la durata della precipitazione.

Per un ipotetico bacino in cui la curva *area-tempi* risulti lineare, ovvero  $S(t) = S_T t / t_c$  (essendo  $S_T$  l'area totale del bacino) e nel caso di una pioggia netta di intensità costante  $i$  e durata  $t_p$  abbiamo il seguente idrogramma di piena:

- a) nel caso  $t_p \leq t_c$ , a<sub>1</sub>) con  $t \leq t_p$  vale  $q(t) = i S_T t / t_c$ ; a<sub>2</sub>) con  $t_p \leq t \leq t_c$  vale  $q(t) = i S_T t_p / t_c$ ; a<sub>3</sub>) con  $t_c \leq t \leq t_c + t_p$  vale  $q(t) = i S_T (1 - ((t - t_p) / t_c))$ ; infine a<sub>4</sub>) con  $t \geq t_c + t_p$  vale  $q(t) = 0$ ;
- b) nel caso  $t_p \geq t_c$ , b<sub>1</sub>) con  $t \leq t_c$  vale  $q(t) = i S_T t / t_c$ ; b<sub>2</sub>) con  $t_c \leq t \leq t_p$  vale  $q(t) = i S_T$ ; b<sub>3</sub>) con  $t_p \leq t \leq t_c + t_p$  vale  $q(t) = i S_T (1 - ((t - t_p) / t_c))$ ; infine b<sub>4</sub>) con  $t \geq t_c + t_p$  vale  $q(t) = 0$ .

La rappresentazione del deflusso sopra descritta indica come il tempo di corrivazione  $t_c$  eserciti, almeno per le piogge di durata inferiore, una sorta di effetto moderatore in confronto alla portata massima che si avrebbe se allo sbocco ci fosse la contribuzione simultanea dell'intero bacino; se la durata della pioggia è pari al tempo di corrivazione c'è un trascurabile effetto di ritardo nella moderazione della portata.

Nel caso di funzione di pioggia a due parametri del tipo  $h = at^n$  la portata media che affluisce sul bacino per unità di superficie è data da  $J = at^{n-1}$  e si può indicare la portata media per unità di superficie che raggiunge la sezione di chiusura il valore  $J_m = at^n / (t + t_c)$ .

Il valore massimo di  $J_m$  al variare della durata della precipitazione è dato dalla equazione differenziale

$$dJ(t)/dt = d(at^n / (t + t_c)) / dt = 0$$

che fornisce  $n$  soluzioni per valori nulli della durata critica  $t_{CRIT}$  e una, ed una sola, soluzione fisicamente accettabile per  $t_{CRIT} = t_c / ((1/n) - 1)$ ; nel momento in cui si verifica la massima portata lorda per

unità di superficie alla sezione di chiusura la relazione  $t_{CRIT} = t_c / ((1/n) - 1)$  correla la durata critica  $t_{CRIT}$  della precipitazione ed il tempo di corrivazione  $t_c$ .

Si definisce *coefficiente di afflusso*  $\Psi$  il rapporto fra portata meteorica affluente alla rete e la portata meteorica affluente al bacino idrografico.

$\Psi$  varia nel tempo fra l'inizio e il termine della pioggia; alla fine della pioggia  $\Psi$  assume un valore finale che qui indichiamo con  $\Psi_F$ .

Il coefficiente di afflusso varia in funzione della evaporazione, della rugosità, della pendenza, della permeabilità del terreno, della copertura vegetale, del tipo di pavimentazioni, ecc... Secondo Fantoli vale una formula di proporzionalità rispetto alla radice cubica dell'altezza di pioggia ragguagliata  $h_p$  alla superficie del bacino, ovvero

$$\Psi = \theta h_p^{1/3}$$

essendo  $\theta$  una costante indicata usualmente come *indice di permeabilità*.

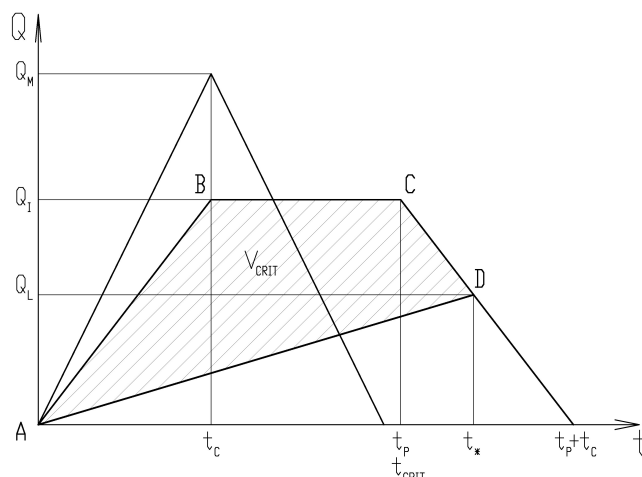
Facendo riferimento alla usuale funzione di possibilità pluviometrica a due parametri  $h = at^n$  possiamo scrivere  $\Psi = \theta a^{1/3} t^{n/3}$  ovvero  $\Psi_1 t^{n/3}$  dove  $\Psi_1$  rappresenta il valore assunto da  $\Psi$  per la durata di una ora. La portata meteorica di afflusso alla rete di drenaggio può essere quindi scritta come  $\Psi_1 t^{n/3} at^{n-1} S$  ovvero

$$\Psi_1 at^{4n/3-1} S;$$

in tal modo la variabilità del coefficiente di afflusso con l'altezza di pioggia può essere presa in considerazione sostituendo l'esponente  $n$  con  $4n/3$  ed utilizzando, a rappresentatività media del rapporto fra portata meteorica affluente alla rete e portata meteorica affluente al bacino, il parametro  $\Psi_1$ .

Il principio di *stabilizzazione idraulica base* (meglio conosciuto con il termine *invarianza idraulica*) prevede che la curva di piena generata da un bacino, dopo modifica urbanistica/edilizia all'uso del suolo, sviluppi una portata massima pari a quella che si sviluppa ante modifica dello stesso uso del suolo.

Nelle problematiche di mitigazione idraulica, a parità di tempo di ritorno dell'evento pluviometrico, è importante determinare la durata di precipitazione critica  $t_{CRIT}$  e il corrispondente massimo valore del volume di detenzione (che qui indicheremo con  $V_{CRIT}$ ); la conoscenza di  $V_{CRIT}$  permette di predisporre le opere di difesa idraulica destinate a far acquisire la stabilizzazione idraulica base dell'intervento.



Indichiamo con  $\Psi_1$  il coefficiente di afflusso orario, con  $S$  l'area del bacino, con  $j$  l'intensità efficace di pioggia, con  $Q_M$  la portata massima in corrispondenza ad un tempo pari al tempo di corrivazione  $t_c$  del bacino con uso futuro del suolo,  $Q_L$  la portata di laminazione (portata massima in condizioni attuali di uso del suolo ovvero portata su cui tarare il processo di mitigazione); indichiamo inoltre al solito con  $a$  ed  $n$  i coefficienti della curva di possibilità pluviometrica monomia a due parametri.

Dai fondamenti del metodo della corrivazione deriva che al variare della durata  $t_p$  della precipitazione varia il volume da invasare per fare in modo che la portata in uscita non sia mai superiore alla portata di laminazione  $Q_L$  (il volume è rappresentato in figura dalla superficie ABCD nella ipotesi che la portata di laminazione abbia andamento lineare dall'inizio del fenomeno con valore 0 sino al punto  $t_*$  con valore  $Q_L$ ).

Si dimostra che

$$V = Q_I t_p - t_p Q_L * 0,5 - t_c Q_L * 0,5$$

essendo

$$Q_I = JS = \Psi_1 S a t_p^{((4n/3)-1)},$$

derivando rispetto a  $t_p$  la relazione precedente e ponendo uguale a zero la stessa derivata si ricava il valore di  $t_p$  critico che massimizza l'invaso.

Indicando con  $t_{CRIT}$  il valore critico di  $t_p$  vale la relazione (G. Zen, 2008):

$$t_{CRIT} = \left( \frac{3Q_L}{8\Psi_1 S a} \right)^{\frac{3}{4n-3}} \quad [A]$$

e il volume critico si può stimare con la relazione (G. Zen, 2008):

$$V_{CRIT} = \Psi_1 S a \left( \frac{3Q_L}{8\Psi_1 S a} \right)^{\frac{4n}{4n-3}} - \frac{Q_L}{2} \left( \frac{3Q_L}{8\Psi_1 S a} \right)^{\frac{3}{4n-3}} - \frac{t_c Q_L}{2} \quad [B]$$

Nelle problematiche di mitigazione idraulica per detenzione andrà applicato il concetto di stabilizzazione idraulica base determinando innanzitutto la portata massima  $Q_{M1}$  nella situazione attuale di uso del suolo, essendo  $t_c = t_{c1}$  (tempo di corrivazione nella situazione ante intervento), ponendo inoltre  $\Psi_1 = \Psi_{10RA}$  ovvero il coefficiente di afflusso medio orario relativo alla situazione attuale; successivamente verrà posto  $Q_L = Q_{M1}$ .

Definite le modalità di acquisizione dell'invaso (tubi interrati, canale, fossato, vasca, cassa di espansione o altro) si tratterà di definire come garantire il controllo della portata allo scarico, da tarare in corrispondenza al tirante massimo sulla portata di laminazione  $Q_L$ , e di dimensionare infine i volumi di detenzione con la relazione [B].

Con l'utilizzo di una curva di pioggia a tre parametri del tipo

$h = at/(b+t)^c$  le relazioni precedenti diventano:

$$a) \text{invaso} = V = Q_I t_p - t_p Q_L * 0,5 - t_c Q_L * 0,5$$

essendo  $Q_I = (aS\Psi_1 t_p^{(1/3)}(b+1)^{(c/3)}) / (b+t_p)^{(4c/3)}$  ;

b) tempo critico dalla relazione:

$$[(((4/3)t_{CRI}^{(1/3)}) / ((b+t_{CRI})^{(4c/3)}))] [1 - (ct_{CRI} / (b+t_{CRI})^c)] = Q_L / (2a\Psi_1 S(b+1)^{(c/3)}) ;$$

c) invaso critico dalla relazione:

$$V_{CRIT} = [(aS\Psi_1(b+1)^{(c/3)}t_{CRI}^{(4/3)}) / ((b+t_{CRI})^{(4c/3)})] - t_{CRI}Q_L/2 - T_C Q_L/2 ;$$

d) portata massima in condizioni critiche dalla relazione:

$$Q_{CRI} = (aS\Psi_1 t_{CRI}^{(1/3)}(b+1)^{(c/3)}) / (b+t_{CRI})^{(4c/3)} .$$

Indicando con  $v_{CRIT}$  il volume specifico (su unità di superficie del bacino) in condizioni di pioggia critica, con  $u_{CRIT}$  il coefficiente udometrico con pioggia critica, con  $u_L$  il coefficiente udometrico di laminazione, vale infine la relazione

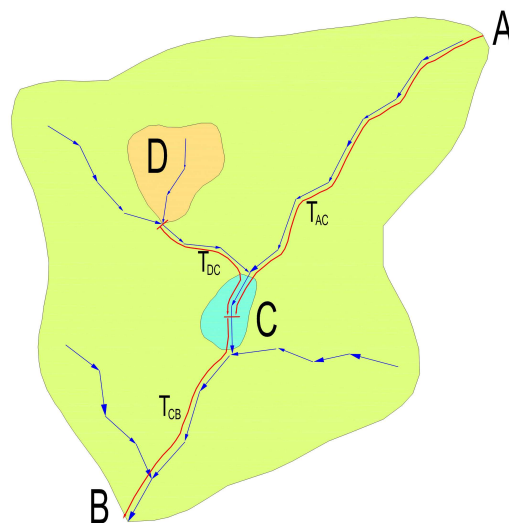
$$v_{CRIT} = u_{CRIT}t_{CRI} - t_{CRI}u_L * 0,5 - t_{CU} * 0,5.$$

Consideriamo ora un bacino idrografico schematizzato nella figura seguente (area verde); entro il bacino principale consideriamo un sottobacino **D** (area arancione) nel quale è previsto un intervento di modificazione idrologica dell'uso del suolo (ad esempio la realizzazione di un piano di lottizzazione o di una strada).

Ipotizziamo infine che entro il bacino principale (area verde) esista un'area **C** (a valle di **D**) interessata da esondazioni (area celeste).

Al fine di garantire condizioni di sostenibilità, entro l'area **D**, degli interventi di trasformazione del territorio da realizzare entro la stessa area **D**, si è visto come sia necessario prevedere opere di *stabilizzazione idraulica base*.

In tal modo le curve di piena sviluppate dal sottobacino **D** comporteranno portate al colmo dello stesso ordine di grandezza sia prima che dopo l'intervento di trasformazione del territorio.



Nei calcoli idraulici alcune caratteristiche del bacino chiuso in **B** possono portare ad un diverso approccio idraulico.

Potrebbe risultare troppo oneroso, per risolvere i problemi di esondazione in **C**, intervenire con opere idrauliche fra **D** e **C** o anche fra **C** e **B**: ad esempio la conformazione assunta dal territorio antropizzato potrebbe presentare caratteristiche tali:

1) da non permettere di ricavare con oneri sopportabili volumi con cui laminare le piene e ridurre il rischio idraulico in **C** e

2) da non rendere fattibile la ricalibratura della rete idrografica fra **D** e **B**.

D'altro canto in determinare situazioni può prevalere una strategia di intervento che predilige il controllo alla fonte (al contrario del controllo terminale); le opportunità più economiche e più semplici di gestione dell'acqua di pioggia potrebbero collocarsi infatti alla sorgente del deflusso, cioè dove il deflusso si forma.

Ad esempio l'area chiusa in **D** potrebbe essere già completamente impermeabilizzata e non è detto che non sia conveniente, senza oneri economici elevati, operare con tecniche di mitigazione idraulica in **D** al fine di ridurre le portate alla sezione di chiusura **B** (il discorso è ovviamente indipendente dal fatto che in **D** venga previsto o meno alcun intervento di impermeabilizzazione del suolo); si parla allora di *stabilizzazione idraulica induttiva*.

Ipotizziamo che per il bacino chiuso in **B** valgano le ipotesi di *linearità* e *stazionarietà* e sia applicabile il modello cinematico lineare e stazionario (della corrivazione). La portata massima si verifica quindi in corrispondenza ad una durata della precipitazione uguale al tempo di corrivazione e per durate maggiori rimane su valori massimi per un tempo pari alla differenza fra il tempo di pioggia e il tempo di corrivazione.

Allo stesso modo ipotizziamo che per il bacino chiuso in **B** si abbia:

a) una curva area-tempi lineare,

b) la pioggia netta di intensità costante e infine

c) per l'area **D** valga  $A(t_D) = A_T(t_{DC} + t_{CB}) / (t_{AC} + t_{CB})$ .

Con tali ipotesi consegue il mantenimento del rapporto, fra portata massima e tempo di pioggia corrispondente, sia in **D** che in **B**.

Si può dimostrare che, come nel caso della *stabilizzazione idraulica deduttiva*, anche nel caso della *stabilizzazione idraulica induttiva* possiamo riportarci alle modalità di calcolo idraulico della *stabilizzazione idraulica base*, una volta definita l'aliquota di riduzione del contributo di portata massima del sottobacino **D**, che qui indichiamo con **P**; si dimostra che la portata di laminazione è pari a **(1-P)** moltiplicato la portata massima alla sezione **B** (calcolata nella situazione attuale di uso del suolo con tempo di pioggia pari a  $t_{AC} + t_{CB}$ ) moltiplicato ancora per il rapporto fra il tempo di corrivazione del sottobacino **D** nella situazione attuale di uso del suolo e  $t_{AC} + t_{CB}$ .

Detta portata di laminazione può altresì ottenersi da un coefficiente udometrico massimo il cui significato fisico dovrebbe però essere correlato alla relazione innanzi illustrata.

Nel metodo della corrivazione è fondamentale la stima attendibile del tempo di corrivazione. Il tempo di corrivazione nel Piano Comunale delle Acque di CASTELLO DI GODEGO viene determinato attraverso il normogramma di P.Z. Kirpich.



Il metodo di calcolo illustrato é stato utilizzato nel Piano Comunale delle Acque di CASTELLO DI GODEGO, particolarmente per il predimensionamento dei volumi di invaso.

Tale scelta tiene conto della complessità, eterogeneità e modalità di configurazione delle opere idrauliche di regolazione poste sul territorio (in particolare le opere necessarie di gestione dell'attività di irrigazione) e tiene altresì conto che le vie d'acqua in ingresso al Comune risentono di fenomeni alluvionali e di esondazione che accadono extra ambito comunale (non ha evidentemente senso utilizzare modelli complessi e forse più esaustivi ma dei quali é impossibile definire un quadro attendibile e stabile dei parametri di calcolo).

Premessa alle elaborazioni idrauliche é stata

1) la determinazione delle curve di possibilità pluviometrica al variare del tempo di ritorno (vedi **allegato A1**) e

2) la determinazione, per tutti i tratti delle vie d'acqua più importanti, della portata massima transitabile a moto uniforme in funzione della pendenza media del tratto, della sezione caratteristica nel tratto e della scabrezza del tratto (quest'ultima valutata attraverso il coefficiente di *Strickler-Manning*).

I passaggi ricorrenti per il dimensionamento dei volumi di invaso sono quindi:

a) viene ricavata la portata massima transitabile nella via d'acqua;

b) si determina una stima della superficie afferente di monte, della lunghezza maggiore del percorso della generica particella d'acqua e della corrispondente differenza di quota (con gli ultimi due parametri di determina il tempo di corrivazione);

c) a tentativi si determina il coefficiente di afflusso in grado di dare la portata massima transitabile;

d) in funzione delle condizioni di valle si determina la portata massima transitabile nella via d'acqua. Questo valore diventa la portata di laminazione e la relativa portata di laminazione specifica da inserire nel modello di calcolo accennato in precedenza;

e) nota quindi la superficie del bacino, il tempo di corrivazione (posto uguale sia nelle condizioni a cassa di laminazione realizzata che nella condizione attuale), il coefficiente di afflusso (allo stesso modo uguale in ambedue i casi), l'applicazione del modello accennato in precedenza, imponendo la portata massima in uscita decisa al punto d), fornisce come risultato il volume di laminazione minimo che deve avere la stessa cassa.

Essendo il territorio di CASTELLO DI GODEGO a pendenza relativamente contenuta in genere viene ipotizzata costante la variazione del pelo libero nel fenomeno di laminazione (fascia di lavoro imposta sempre pari a 100 cm per semplicità) mentre la portata in uscita é valutata lineare fra il valore nullo e la portata massima pari alla portata di laminazione prefissata.

Il modello permette di valutare tutti i tipi di precipitazione, per il tempo di ritorno fissato, con durate variabili in genere fra il tempo di corrivazione e 1440 minuti (1 giorno di pioggia).

## PARTE 2

# ANALISI IDRAULICA DELLE RETI DI DRENAGGIO

### 1 - Introduzione

L'analisi idraulica delle reti di drenaggio è stata eseguita da un parte tenendo conto della conoscenza diretta dei fenomeni idraulici che causano le criticità e con calcoli di massima per la verifica dei parametri idraulici, dall'altra parte utilizzando un modello numerico evoluto limitatamente ad alcune zone e sottobacini di CASTELLO DI GODEGO. In quest'ultimo caso, tenuto conto delle caratteristiche peculiari della rete di drenaggio di CASTELLO DI GODEGO e delle condizioni idrografiche al contorno si è reso necessario applicare il modello idraulico **SWMM**.

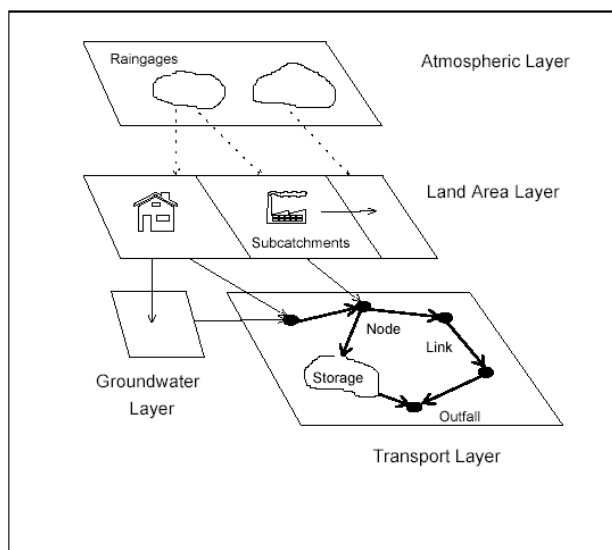
Gli ingressi di precipitazione sono stati ragguagliati come precisato ai paragrafi successivi; i tempi di ritorno normalmente considerati sono quelli di 50 e 100 anni mentre le durate di precipitazione considerate sono 1, 2, 3, 6, 12, 24 ore. Ricordiamo che i valori di quota utilizzati negli elaborati del Piano Comunale delle Acque (**PCA**) di CASTELLO DI GODEGO sono riferiti sul datum ITALGEO90, fuso ovest.

#### 1.1 - Il modello idraulico SWMM

Il software utilizzato per il lavoro è EPA Storm Water Management Model (**SWMM**), prodotto e sviluppato dal Water Supply and Water Resources Division dell'Environmental Protection Agency (US-EPA).

##### 1.1.1 – Descrizione di SWMM

SWMM è in grado di simulare il movimento della precipitazione meteorica e degli inquinanti da essa trasportati dalla superficie del bacino alla rete dei canali e condotte che costituiscono il sistema di drenaggio urbano e agricolo. Tale programma è stato concepito per modellare in termini qualitativi e quantitativi tutti i processi che si innescano nel ciclo idrologico. La risoluzione e l'integrazione numerica delle equazioni di De Saint Venant permette analisi idrologiche complete di reti di canali o condotte sollecitate da fenomeni meteorici o da ingressi di natura diversa. La figura seguente schematizza il bacino idrografico di drenaggio, e i suoi differenti componenti fisici, come vari compartimenti:



Nella componente **ATMOSFERA** di **SWMM** vengono definiti i valori di pioggia che la simulazione utilizza per le precipitazioni sul bacino. E' possibile lanciare simulazioni di eventi critici di pioggia che vanno a sollecitare il bacino di studio di diverso tipo: a) **evento singolo** ovvero simulazioni della durata di poche ore; b) **in continuo**, ovvero simulazioni della durata di diversi giorni o mesi.

Nella componente **TERRITORIO** di **SWMM** l'area di interesse può essere suddivisa in diversi sottobacini, ciascuno caratterizzato in maniera differente; riceve afflussi dal comparto **ATMOSFERA**, come pioggia, o sottoforma di deflusso superficiale proveniente da altre porzioni di territorio.

La componente **GROUNDWATER** di **SWMM** riceve infiltrazione dal **TERRITORIO** e trasferisce gli efflussi al **TRASPORTO**.

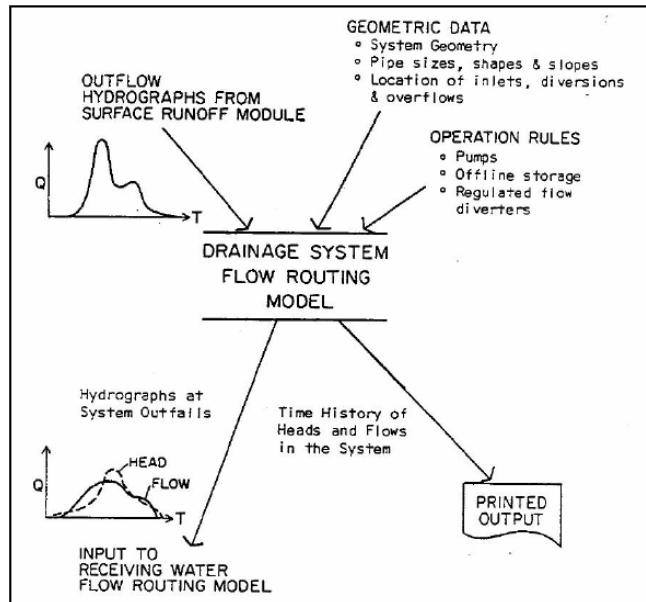
La componente **TRASPORTO** di **SWMM** contiene la rete dei canali, condotte, manufatti (la descrizione topologica della rete si basa sulla suddivisione rami e nodi). In questo comparto si procede al calcolo della propagazione in rete, scegliendo tra diversi moduli: **moto uniforme**, **onda cinematica** e **moto vario**, basato sulla risoluzione completa delle equazioni di De Saint Venant. In quest'ultima opzione vengono modellati anche i fenomeni di rigurgito, moti a pelo libero e in pressione, inversione del flusso nei rami.

SWMM è inoltre suddiviso in due moduli: uno di **SERVIZIO** ed un altro **COMPUTAZIONALE**. Il modulo di SERVIZIO contiene una serie di blocchi che consentono di elaborare i risultati ottenuti; si possono compiere operazioni statistiche (blocco **Statistics**), gestire i dati meteorologici (blocchi **Temperature** e **Rain**), gestire i risultati (blocco **Graph** per grafici e stampe), sistemare i valori calcolati al fine di aggregare i dati utilizzabili così dai blocchi in cascata (blocco **Combine**). Appartiene al modulo SERVIZIO anche il blocco **Executive** che manipola i file di interfaccia tra i vari blocchi e il blocco, o la sequenza di blocchi, da eseguire.

Il modulo COMPUTAZIONALE contiene: 1) un blocco per la modellazione del deflusso superficiale (blocco **Runoff**), 2) uno per il calcolo della propagazione in rete con la schematizzazione dell'onda cinematica (**Transport**), 3) uno per il calcolo dinamico basato sulla risoluzione completa delle equazioni di De Saint Venant all'interno della rete (**Extran**), 4) infine uno che descrive i processi all'interno di un impianto di trattamento reflui (**Storage/Treatment**).

Il blocco **Extran** consente infatti di modellare la propagazione dei deflussi all'interno della rete (vengono modellati anche i fenomeni di rigurgito, le inversioni del flusso nei rami, i moti a pelo libero e in pressione). **Extran** utilizza una descrizione topologica della rete basata su una geometria rami-nodi. I rami sono sostanzialmente i condotti della rete fognaria (i canali nel caso di sezioni aperte) e consentono di

propagare le portate da un nodo all'altro. I nodi rappresentano i pozzetti presenti nel sistema fognario (o i punti di intersezione dei rami, come nel caso dei canali); nei nodi vengono localizzate le portate in ingresso (provenienti dal **Runoff** ed espressi come idrogrammi di piena generati a partire dal modello afflussi-deflussi) e le portate uscenti dalla rete. La figura seguente da una rappresentazione funzionale del blocco Extran.



**SWMM** è in grado di rappresentare i vari processi idrologici: 1) precipitazioni; 2) evaporazione; 3) accumulo/scioglimento neve; 4) infiltrazione di pioggia negli strati insaturi del terreno; 5) percolazione di acqua infiltrata negli strati dell'acqua freatica; 6) interflow fra acqua freatica e la rete di fognatura. La variabilità spaziale di questi processi è realizzata dividendo la zona di studio in sottobacini (**subcatchment**) ognuno dei quali a sua volta è diviso in area permeabile e in area impermeabile. Il deflusso superficiale può essere diretto fra i **subcatchments** o nei punti di entrata di una rete di fognatura.

### 1.1.1.01 – Le precipitazioni

Le precipitazioni in SWMM vengono definite attraverso l'attribuzione dei **Rain Gages** i quali forniscono i dati di pioggia sui bacini. Questi possono essere inseriti manualmente oppure possono essere caricati da un file di testo esterno. Le principali proprietà di input dei **Rain Gages** comprendono informazioni relative all'intensità o al volume della pioggia e l'intervallo di registrazione dei dati (ogni ora, 30 minuti, 15 minuti, ecc.).

Per la determinazione dei carichi idraulici prodotti dai bacini idrografici è necessario determinare le curve di possibilità pluviometrica. Nelle elaborazioni relative al **PCA** di CASTELLO DI GODEGO sono state utilizzate le Curve di Possibilità Pluviometrica a 3 parametri illustrate in allegato **A1**.

Poiché le analisi idrauliche sono effettuate in rapporto a bacino di non trascurabile dimensione areale si è deciso di correggere la piovosità inserita nel modello (ipotizzata distribuita costantemente nell'ambito dell'intervallo di calcolo) utilizzando un coefficiente di riduzione delle altezze di pioggia. Sono state considerate generalmente piogge di **1,2; 3,2; 12 e 24** ore. Utilizzando i dati NERC (1975) abbiamo i seguenti coefficienti di riduzione (**T<sub>p</sub>** = tempo di pioggia):

- T<sub>p</sub>**=1,2 → coeff.riduz.=**0,79**;
- T<sub>p</sub>**=3,2 → coeff.riduz.=**0,87**;
- T<sub>p</sub>**=12 → coeff.riduz.= **0,91**;

$T_p=24 \rightarrow \text{coeff.riduz.} = 0,94.$

La riduzione, in via semplificativa, è stata considerata uguale per tutti i corrispondenti tempi di ritorno considerati.

### 1.1.1.02 – Caratteristiche dei sottobacini

Per quanto riguarda i vari sottobacini è necessario immettere i valori delle rispettive aree, le pendenze medie, "width" o larghezza equivalente del bacino, la percentuale delle aree impermeabili, l'altezza delle depressioni superficiali nelle aree permeabili ed impermeabili, il coefficiente di Manning per le superfici permeabili ed impermeabili, ed infine i dati per il calcolo dell'infiltrazione. Le definizioni dei singoli parametri utilizzati sono di seguito riportate:

**Aree** : viene immesso il valore dell'area del sottobacino, espresso in ettari;

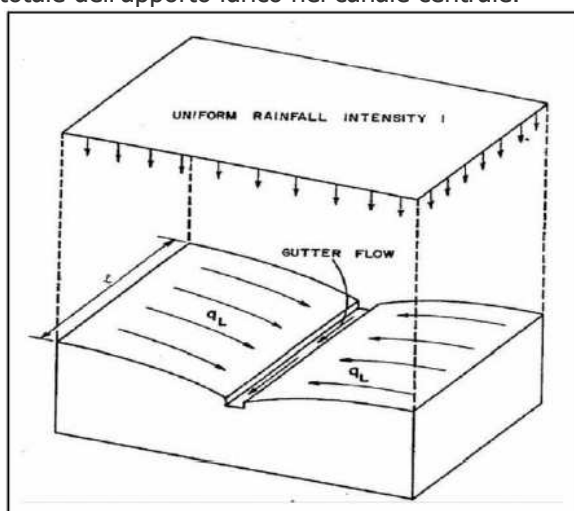
**Pendenze medie** : si tratta della pendenza media del singolo sottobacino;

**Width** o larghezza equivalente del bacino.

Se lo scorrimento superficiale è idealizzato come un deflusso lungo una superficie piana inclinata, nel caso più semplice di forma rettangolare, allora il **width** del bacino di drenaggio è identificabile fisicamente con la larghezza della superficie su cui avviene lo scorrimento superficiale.

Supponendo di avere un bacino semplice di forma rettangolare e percorso da un canale di scolo di lunghezza **L** che lo divida in due aree simmetriche, come nel caso della figura seguente; il calcolo del "width" porterebbe a trovare il valore di **W=2L**.

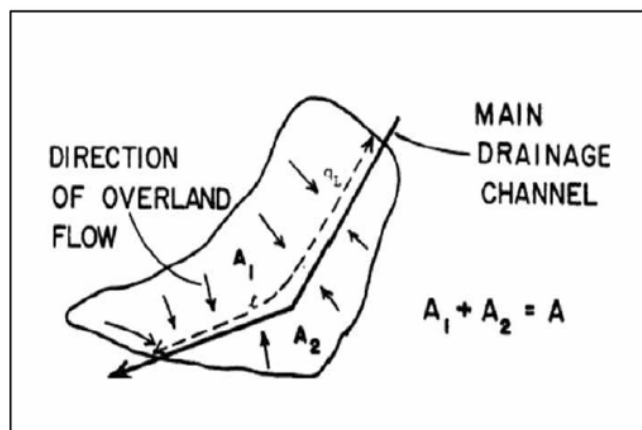
Inoltre moltiplicando il valore del width per il valore di **q<sub>L</sub>**, deflusso laterale per unità di larghezza, si ottiene velocemente il valore totale dell'apporto idrico nel canale centrale.



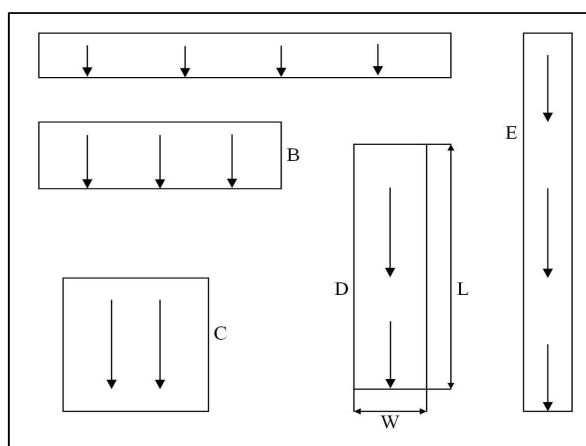
Dal momento che i bacini reali spesso non hanno una semplice forma rettangolare e nemmeno presentano notevoli proprietà di simmetria/uniformità, per ottenere una buona stima del valore di **width** è necessario adottare una procedura per sopperire alle forme generiche che usualmente assumono i sottobacini. Il valore del **width**, infatti, **può influire sulla forma dell'idrogramma** (una volta fissate le pendenze del bacino e la rugosità del terreno il calcolo viene influenzato unicamente dal valore **W**).

Nella realtà, e in special modo in zone rurali, è più facile imbattersi in bacini dalla forma irregolare ed in cui il canale di scolo abbia un andamento non lineare e non centrato rispetto all'area. In questi casi

generici si utilizza la seguente relazione  $W=(2-Sk)L$  dove  $W$  = width o fattore di forma del bacino,  $Sk$ = **skew factor** o fattore di obliquità e  $L$  = lunghezza del canale di drenaggio. Il valore  $Sk$ , compreso fra 0 e 1 si calcola con la relazione  $Sk=(A_2-A_1)/A_{tot}$  essendo  $A_1$ =porzione di area su di un lato del canale;  $A_2$ =porzione di area dall'altro lato del canale e  $A_{tot}$ =area totale. La figura seguente illustra le modalità di calcolo di  $Sk$  utilizzate nel presente lavoro.



Da osservare che il valore di  $W$  e della **pendenza** del bacino **rimane lo stesso sia per le aree impermeabili che per quelle permeabili.**



**Percentuale aree impermeabili:** rapporto tra le superfici impermeabili, quali strade ed aree urbane, e l'area totale del sottobacino.

**Altezza delle depressioni superficiali:** altezza d'acqua considerata come perdita (ristagno delle acque e intercettazione da parte delle asperità del terreno e delle superfici).

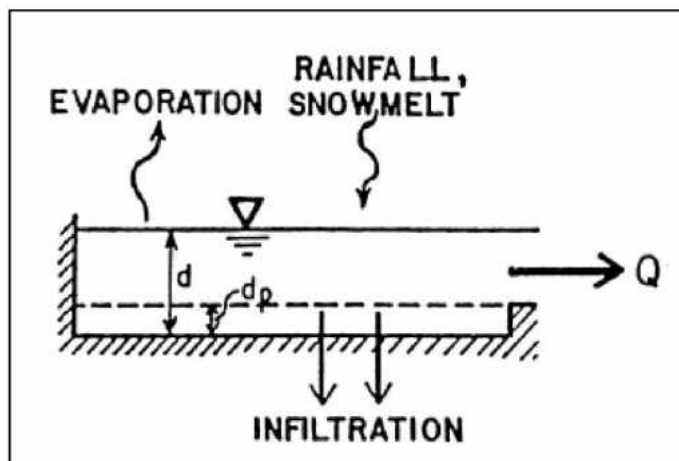
Con superfici permeabili l'acqua immagazzinata è soggetta ad infiltrazione ed evaporazione (quindi viene continuamente e rapidamente rimpiazzata); con superfici impermeabili questa è esauribile solo per evaporazione (quindi rimpiazzata più lentamente).

Nell'immissione dell'**altezza delle depressioni superficiali** risulta quindi necessario utilizzare due valori distinti, uno per le aree permeabili ed uno per quelle impermeabili.

Inoltre per le superfici impermeabili viene indicata una percentuale di area nella quale non si hanno depressioni, e quindi non si ha immagazzinamento di acqua; in tale maniera **si ottiene che una parte delle superfici impermeabili risponde immediatamente alla sollecitazione dovuta alle piogge generando un deflusso superficiale in tempi minori.**

### 1.1.1.03 – Deflusso superficiale

Il deflusso superficiale è la parte di precipitazione che scorre sulla superficie del terreno e si raccoglie successivamente nella rete di scolo; l'infiltrazione, la intercettazione e l'accumulo nelle depressioni superficiali sono delle perdite nelle simulazioni **a evento singolo**. Dalle perdite si ottiene la **pioggia netta**, ossia quella quota di precipitazione che contribuisce al deflusso superficiale. La figura successiva evidenzia come è considerato da SWMM il deflusso superficiale.



Ogni superficie di **sottobacino** è trattata come un serbatoio non-lineare. Gli ingressi derivano dalle precipitazioni, dalle piogge e/o scioglimento delle nevi, le uscite sono diverse e sono rappresentate dall'evaporazione, dall'infiltrazione e dal deflusso superficiale. Il volume di questo serbatoio è rappresentato dalla massima capacità di immagazzinamento delle depressioni, ossia quel volume d'acqua intercettata da avvallamenti, sconnessioni delle superfici e ristagni.

Il deflusso superficiale per unità di area (**Q**) si innesca ogniqualvolta l'altezza d'acqua nel serbatoio supera il valore delle depressioni **dp**, ed in questo caso il flusso che fuoriesce è dato dalla equazione:

$$Q = W(1,49/n)((d-dp)^{(5/3)})(S^{(1/2)})$$

dove **Q**=deflusso superficiale; **W**=larghezza o **width** del sottobacino; **n**=coefficiente di scabrezza di Manning; **d**=altezza d'acqua; **dp**=altezza delle depressioni superficiali; **S**=pendenza del sottobacino.

Ovviamente l'altezza dell'acqua dei sottobacini è continuamente aggiornata risolvendo numericamente il bilancio d'acqua presente sul sottobacino. I sottobacini sono sempre divisi in due porzioni: 1) **impermeabili** (tipo aree urbane, zone industriali e strade) e 2) **permeabili** (es. aree destinate a coltivazioni); infatti il deflusso superficiale può infiltrarsi attraverso la porzione superficiale delle aree permeabili.

### 1.1.1.04 – Infiltrazione

Con l'infiltrazione le acque meteoriche cadute su aree permeabili penetrano attraverso la superficie del terreno per giungere negli strati inferiori del suolo. SWMM offre 3 possibilità di calcolo per l'infiltrazione: **a)** con le equazioni di **Horton**; **b)** con il metodo di **Green-Ampt** e **c)** con il metodo **Curve Number**.

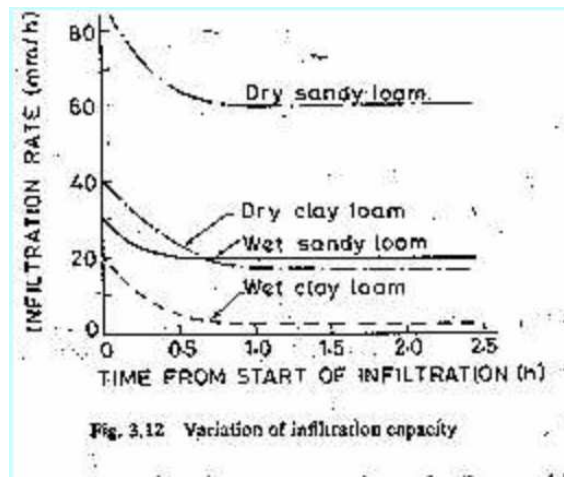
### 1.1.1.04.1 – Modello di Horton

Secondo Horton l'infiltrazione nel caso di una precipitazione sufficientemente prolungata diminuisce esponenzialmente da un tasso iniziale massimo ad un tasso minimo. Vale la legge:

$$f = f_c + (f_0 - f_c)(e^{-kt})$$

essendo **f** la capacità di infiltrazione al tempo **t**; **f<sub>0</sub>** il valore massimo iniziale di **f**; **f<sub>c</sub>** il valore costante finale di **f** (a suolo saturo), **k** una costante dipendente dal tipo di suolo; **t** la durata della pioggia.

Le tabelle successive riassumono alcuni valori caratteristici per i parametri di Horton.



Soil Type	f <sub>0</sub> (in/hr)
Dry sandy soils with little to no vegetation	5
Dry loam soils with little to no vegetation	3
Dry clay soils with little to no vegetation	1
Dry sandy soils with dense vegetation	10
Dry loam soils with dense vegetation	6
Dry clay soils with dense vegetation	2
Moist sandy soils with little to no vegetation	1.7
Moist loam soils with little to no vegetation	1
Moist clay soils with little to no vegetation	0.3
Moist sandy soils with dense vegetation	3.3
Moist loam soils with dense vegetation	2
Moist clay soils with dense vegetation	0.7

Soil Type	f <sub>c</sub> mm/hr (in/hr)	k (1/min)
Clay loam, silty clay loams	0-1.3 (0-0.05)	0.069
Sandy clay loam	1.3-3.8 (0.05-0.15)	0.069
Silt loam, loam	3.8-7.6 (0.15-0.30)	0.069
Sand, loamy sand, sandy loams	7.6-11.4 (0.30-0.45)	0.069

Table 3-1. Observed and published Horton equation parameter values for sandy soils

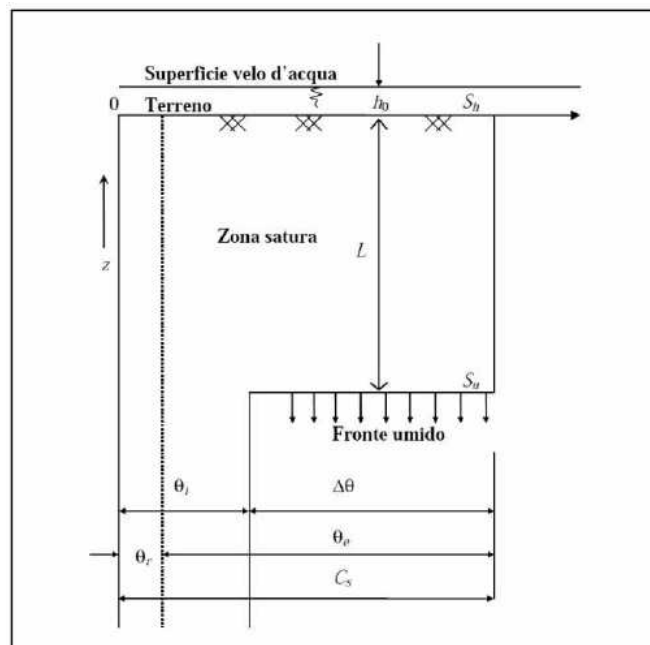
	f <sub>0</sub>		f <sub>c</sub>		k (1/min)	
	mean	range	mean	range	mean	Range
Observed noncompacted-sandy soils	990 (39)	110-3710 (4.2-146)	380 (15)	10-640 (0.4-25)	9.6	1.0-33
Observed compacted-sandy soils	380 (15)	3-2200 (0.1-86)	46 (1.8)	3-240 (0.1-9.5)	11	1.8-37
Published values		43-250 (1.7-10)		7.6-11 (0.30-0.45)		0.069



Classi del suolo	Porosità	Conduttività idraulica a saturazione (cm/h)	Potenziale di suzione (cm) (valori estremi osservati)
	$n$	$K_s$	$\Psi$
sabbioso	0.374 – 0.5	21.00	0.97 – 25.36
franco sabbioso	0.351 – 0.555	2.59	2.67 – 45.47
franco	0.375 – 0.551	0.68	1.33 – 59.38
franco limoso	0.420 – 0.582	1.32	2.92 – 95.39
franco argilloso	0.409 – 0.519	0.23	4.79 – 91.10
argilloso sabbioso	0.370 – 0.490	0.12	4.08 – 140.2
argilloso limoso	0.425 – 0.533	0.09	6.13 – 139.4
argilloso	0.427 – 0.523	0.06	6.39 – 156.5

### 1.1.1.04.2 – Metodo di Green-Ampt

Lo schema concettuale é rappresentato dalla figura seguente:



Il modello suppone che il processo di infiltrazione inizi quando uno strato d'acqua di altezza **h<sub>0</sub>** si sia accumulato sulla superficie del suolo.

Il suolo è caratterizzato da una umidità iniziale che è supposta omogenea con **θ<sub>i</sub>**. Il modello ipotizza che il fronte umido sia rappresentato da una superficie orizzontale **S<sub>u</sub>** che all'istante iniziale del processo di infiltrazione coincide con **S<sub>h</sub>**. Successivamente **S<sub>u</sub>** avanza nel sottosuolo muovendosi lungo la verticale e mantenendo giacitura invariata, poiché si suppone che l'infiltrazione avvenga per traiettorie liquide verticali e con vettore velocità d'infiltrazione in variante nello spazio.

Al passaggio del fronte umido, l'umidità assume il valore della capacità di immagazzinamento idrico del suolo **C<sub>s</sub>**. Con il simbolo **θ<sub>r</sub>** viene indicata l'umidità residua del suolo che permane dopo un prolungato drenaggio per gravità.

Classe di suolo	Porosità	Porosità efficace	Conduttività idraulica satura	Potenziale di suzione al fronte di bagnatura	Potenziale di suzione al fronte di bagnatura
	$\eta$	$\theta_e$	<b>K</b>	<b><math>\Psi</math> - medio</b>	<b><math>\Psi</math> - dev.std.</b>
			cm h <sup>-1</sup>	cm	cm
sabbioso	0.437	0.417	11.78	4.95	0.97-25.36
franco sabbioso	0.453	0.412	1.09	11.01	2.67-15.47
franco	0.463	0.434	0.34	8.89	1.33-59.38
franco limoso	0.501	0.486	0.65	16.68	2.92-95.39
franco argilloso	0.464	0.309	0.10	20.88	4.79-91.10
argilloso sabbioso	0.430	0.321	0.06	23.90	4.08-140.2
argilloso limoso	0.479	0.423	0.05	29.22	6.13-139.4
argilloso	0.475	0.385	0.03	31.63	6.39-156.5

#### 1.1.1.04.3 – Metodo Curve Number

Il metodo SCS (Soil Conservation Service) del Curve Number è una procedura che consente una stima della pioggia netta a partire dalla conoscenza della pioggia totale e dagli usi del suolo. Questo modello presume che la capacità di infiltrazione totale di un terreno può essere trovata tramite un valore tabulato (denominato **Curve Number**) associato alla **tipologia d'uso**; durante un evento di pioggia tale capacità diminuisce in funzione della pioggia cumulata e della capacità rimanente.

Il metodo si basa sull'ipotesi che sia sempre valida la seguente relazione di proporzionalità:

$$V/P_n = W/S$$

essendo **V**=volume di deflusso, **P<sub>n</sub>**=precipitazione netta, **W**=invaso del suolo (volume idrico immagazzinato), **S**=valore massimo immagazzinabile nel terreno in condizioni di saturazione dopo l'inizio della precipitazione.

La precipitazione netta **P<sub>n</sub>** si ottiene sottraendo alla precipitazione totale le perdite iniziali dovute all'immagazzinamento superficiale, imputabile all'intercettazione operata dalla copertura vegetale, dalle asperità del terreno e dalla infiltrazione prima della formazione del deflusso: **P<sub>n</sub>=P-I<sub>a</sub>** essendo **P<sub>n</sub>**=precipitazione netta, **P**=precipitazione totale e **I<sub>a</sub>**=perdite iniziali.

La precipitazione netta **P<sub>n</sub>**, inoltre, si ripartisce completamente tra il volume di deflusso superficiale e l'invaso del suolo e può essere così espressa: **P<sub>n</sub>=V+W**.

Dalle relazioni precedente si ottiene **V=(P<sup>2</sup>)/(P<sub>n</sub>+S)**.

Il termine di accumulo **I<sub>a</sub>**, che rappresenta il volume di pioggia perduto, risulta di difficile calcolo, per ovviare a questo si usa solitamente esprimerlo in una relazione che lo correla alla capacità di infiltrazione a saturazione **S**. Normalmente si pone **I<sub>a</sub>=0,2S** e quindi **P<sub>n</sub>=P-0,2S** da cui sostituendo

$$V=((P-0,2S)^2)/(P+0,8S).$$

L'applicazione dell'ultima formula presuppone la conoscenza, oltre che della precipitazione totale **P**, della stima del massimo invasore del suolo **S**, il cui valore può assumere valori compresi tra 0 (superficie completamente impermeabile) ed infinito (superficie su cui non si ha formazione del deflusso superficiale). La determinazione di **S** viene effettuata per mezzo della relazione:

$$S=254(100/CN-1)$$

essendo **S** il valore massimo immagazzinabile nel terreno espresso in [mm] mentre **CN** è un parametro denominato **Curve Number**. Il parametro **CN** è un numero il cui valore è compreso tra 0 (suolo completamente permeabile) e 100 (superfici totalmente impermeabile). Il **CN** rappresenta l'attitudine del bacino esaminato a produrre deflusso e viene stimato in relazione alle caratteristiche idrologiche dei suoli e di copertura vegetale presenti nel bacino. La determinazione di tale parametro presuppone la conoscenza del gruppo idrologico di ciascun suolo appartenente al bacino in esame.

Come vedremo meglio più avanti tutti i suoli sono riconducibili a quattro categorie idrologiche in base al tasso di infiltrazione ottenuto per il suolo privo di copertura dopo una imbibizione prolungata.

Abbiamo quindi:

**Gruppo A:** basso potenziale di deflusso, alto tasso di infiltrazione quando completamente umidi; suoli sono costituiti da sabbie, ghiaie, sabbie limose e limi sabbiosi; tali terreni hanno una trasmissività maggiore di 0,76 cm/h;

**Gruppo B:** moderato tasso di infiltrazione quando completamente bagnati, terreni da poco profondi a profondi, poco o molto drenati, con tessitura da fine a grossolana; generalmente sono inclusi in questo gruppo i limi e i limi siltosi; tali suoli hanno una trasmissività compresa tra 0,38 e 0,76 cm/h;

**Gruppo C:** basso tasso di infiltrazione quando completamente bagnati; suoli con uno strato che limita il movimento verso il basso dell'acqua e suoli con una tessitura da moderatamente fine a fine; sono normalmente incluse in questo gruppo le argille sabbiose e limose; questi suoli hanno una trasmissività che va da 0,13 a 0,38 cm/h;

**Gruppo D:** elevato potenziale di deflusso; tasso di infiltrazione molto basso e consistono in argille con elevato potere di ritenzione idrica, terreni con una quota della falda freatica prossima a quella della superficie del terreno, suoli con uno strato argilloso vicino alla superficie e suoli poco profondi che poggiano su uno strato impermeabile; sono inclusi in questo gruppo argille limose, argille siltoso-limose, argille siltose, argille ed argille sabbiose; questi suoli hanno una trasmissività molto bassa che va da 0 a 0,13 cm/h. Alcuni suoli vengono classificati in questo gruppo a causa di eventuali problemi di drenaggio, ma qualora tali problemi dovessero sparire questi suoli cambierebbero gruppo.

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

Una volta attribuito il gruppo idrologico si procede alla individuazione di aree omogenee per **destinazione d'uso e sistemazione**; a ciascuna di queste superfici viene in seguito attribuito il corrispettivo e più appropriato valore di **CN**, dedotto dai valori riportati in tabelle. Il valore di **CN** dell'intero bacino si ottiene come media pesata, con peso la superficie, dei valori stimati per le singole aree omogenee:

**CN<sub>tot</sub> = SOMMA((A<sub>i</sub>CN<sub>i</sub>)/A<sub>tot</sub>)** dove:

**CN<sub>tot</sub>** = **CN** dell'intero bacino; **SOMMA** = sommatoria; **CN<sub>i</sub>** = **CN** della i-esima zona omogenea; **A<sub>i</sub>** = area della i-esima zona omogenea; **A<sub>tot</sub>** = area totale del bacino.

Il metodo considera anche le condizioni di umidità iniziali del terreno antecedenti all'inizio dell'evento (**AMC**, Antecedent Moisture Conditions), ed i valori di **CN** riportati nella tabella seguente si riferiscono alla condizione **AMC(II)**, ovvero una condizione di umidità media.

Per condizioni antecedenti l'evento molto umide, **AMC(III)** o molto asciutte, **AMC(I)**, si possono derivare i relativi valori di **CN** usando rispettivamente:

$$\mathbf{CN(III)=(23CN(II))/(10+0,13CN(II))}$$

e

$$\mathbf{CN(I)=(4,2CN(II))/(10-0,058CN(II))}$$

Si considera un terreno in condizioni

A1) **AMC(I)** quando questo si presenta secco pur senza raggiungere il punto di appassimento e in cui le colture o la vegetazione sono ben sviluppate;

A2) una condizione **AMC(III)** con terreno saturo a causa di precipitazioni superiori a 50 mm di pioggia nei cinque giorni precedenti l'evento considerato (per la stagione fredda si considerano precipitazioni superiori a 25 mm di pioggia nei cinque giorni precedenti l'evento).

Uso del suolo	Drenaggio	Condizioni	Gruppo del terreno			
			A	B	C	D
<i>Residenziale</i>						
Zone urbane e commerciali	Area impermeabile: 85%		89	92	94	95
Zone industriali	Area impermeabile: 72%		81	88	91	93
Casa a schiera	Area impermeabile: 65%		77	85	90	92
Ville	Area impermeabile: 25%		54	70	80	85
Parcheggi			98	98	98	98
Parchi	Copertura verde: 75%		39	61	74	80
<i>Strade</i>						
Pavimentate	Cunette e fognatura		98	98	98	98
Sterrate			72	82	87	89
<i>Agricolo</i>						
Maggese			77	86	91	94
Seminativo	Solchi a ritto chino	cattive	65	76	84	88
		buone	63	75	83	87

Di seguito si riporta una tabella contenente i valori del parametro CN nelle diverse condizioni di uso del suolo e gruppi idrologici, nelle condizioni di umidità AMC(II):

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

Per la determinazione della pioggia efficace nel presente **PCA** di CASTELLO DI GODEGO é stato utilizzato il metodo del **Curve Number**. In allegato da **A1** sono riassunti i principali parametri di caratterizzazione dei sottobacini idrografici utilizzati da **SWMM-PCA**.

#### 1.1.1.05 – Routine idraulica

SWMM utilizza una descrizione del tipo "rami-nodi" del sistema di scolo delle acque. La rete di drenaggio è idealizzata come una serie di rami, ciascuno associabile ad una forma geometrica, collegati tra loro in corrispondenza dei nodi. Le proprietà costanti associate ai rami sono il tipo di sezione, la lunghezza, la pendenza e la scabrezza; quelle determinate ad ogni passo di calcolo sono invece la portata, la velocità, l'area bagnata del flusso, il raggio idraulico e la larghezza del pelo libero; le ultime tre sono in funzione del livello idrico istantaneo.

La variabile indipendente fondamentale nei rami è la portata **Q** (si assume costante in ogni ramo durante un passo di calcolo). Velocità ed area bagnata del flusso, o livello, sono invece grandezze variabili nello stesso ramo. **Gli afflussi e deflussi avvengono in corrispondenza dei nodi del sistema**. La variazione di volume nel nodo durante un dato passo di calcolo costituisce la base per i calcoli seguenti di portata e carico idraulico.

### 1.1.1.06 – Equazioni del modello

Le equazioni che il programma gestisce sono le classiche equazioni differenziali alle derivate parziali del primo ordine di De Saint Venant (equazione di continuità in moto vario in assenza di afflussi e deflussi laterali ed equazione del momento della quantità di moto).

La formula adottata per descrivere la perdita di carico (cadente piezometrica **Sf**) é quella definita dall'equazione di Manning:

$$Sf = (kxQx_{MOD}(V)) / (gxAxR^{(4/3)})$$

essendo **k** un parametro dato da  $gn^2$ ; **n** il coefficiente di scabrezza di Manning; **g** costante gravitazionale, **Q** la portata, **V** la velocità media, **R** il raggio idraulico. **V** compare in valore assoluto ( $_{MOD}(V)$ =modulo assoluto di **V**) e quindi **Sf** é una grandezza direzionale e assicura che le forze di attrito si oppongano sempre al moto.

Le equazioni discretizzate vengono risolte sequenzialmente per determinare la portata in ogni ramo e il carico idraulico in ogni nodo ad ogni passo di calcolo.

L'integrazione numerica è effettuata mediante il **metodo di Eulero modificato (MEM)**. MEM fornisce una soluzione esplicita in cui l'equazione del moto è applicata alla portata in ogni ramo e l'equazione di continuità al carico idraulico in ogni nodo. In quanto metodo esplicito è in generale meno stabile e richiede passi di calcolo molto brevi. Il programma è numericamente stabile quando sono soddisfatte le seguenti disuguaglianze:

a) **sui RAMI**  $DT \leq L / ((gD)^{0,5})$  essendo **DT** il passo di calcolo, **L** la lunghezza della condotta, **g** l'accelerazione di gravità e **D** la profondità massima della condotta. Il programma SWMM effettua all'inizio un controllo per verificare che tutti i condotti soddisfino tale condizione;

b) **sui NODI**  $DT \leq (C'xAsxDHmax) / Q$  essendo **C'** una costante adimensionale pari approssimativamente a 0,1; **As** l'area della superficie libera corrispondente del nodo; **DHmax** il massimo sovrizzo della superficie dell'acqua durante il passo di calcolo **Dt**; **Q** l'afflusso netto al nodo.

Dalle due disuguaglianze sopra citate deriva che il passo di calcolo **massimo** ammissibile, **Dt**, è determinato dal **condotto più piccolo e corto con elevati afflussi**.

L'esperienza dice che in genere un passo di calcolo di 5-10 secondi è sufficientemente piccolo da produrre idrogrammi in uscita esenti da oscillazioni irregolari e soddisfa la continuità della massa in assenza di condizioni di allagamento.

Se si rendono necessari passi di calcolo minori si possono **eliminare** o aggregare i tubi e i canali più brevi. Grazie alle elevate prestazioni di calcolo offerte dalle CPU, è possibile compiere nell'arco di minuti delle simulazioni di molte ore per reti complesse adottando **passi di calcolo dell'ordine del secondo**.

Quando un elemento della rete di drenaggio, a causa delle proprie caratteristiche geometriche o di portata, è **soggetto a generare instabilità numerica** può essere sostituito **automaticamente** dal modello da un condotto fittizio, idraulicamente equivalente a quello originario. Ciò significa che le perdite di carico nell'elemento originario e nel suo condotto equivalente sono le stesse.

### 1.1.1.07 – Sovraccarico e allagamento

Un caso particolare é il funzionamento in **pressione** e/o eventuali situazioni di **allagamento**. Il **sovraccarico** avviene quando **tutti** i condotti che convergono in un nodo sono pieni, oppure quando la superficie dell'acqua nel nodo si trova tra la sommità del più alto condotto entrante nel nodo e la superficie

del terreno. L'**allagamento** è un caso particolare di sovraccarico che si verifica quando la piezometrica interseca la superficie del terreno e l'acqua fuoriesce dal nodo disperdendosi nel sistema superficiale sovrastante.

Durante il sovraccarico non è più possibile determinare il carico idraulico poiché la superficie libera del nodo in pressione è troppo piccola per poter comparire a denominatore.

Sfruttando l'equazione di continuità al nodo (la somma di tutti gli afflussi e i deflussi del nodo provenienti dal deflusso superficiale o ad esso destinati, di tutti i condotti, pompe ed organi speciali, è pari a zero) **SWMM** adotta una procedura iterativa nella quale le correzioni del carico ad ogni nodo sono determinate sulla base delle relative variazioni di portata in ogni ramo collegato rispetto a una variazione di carico **dQ/dH**. Il termine **dQ/dH** viene discretizzato in modo diverso a seconda che si considerino condotti o nodi.

### 1.1.1.08 – Sovraccarico di piu' nodi adiacenti

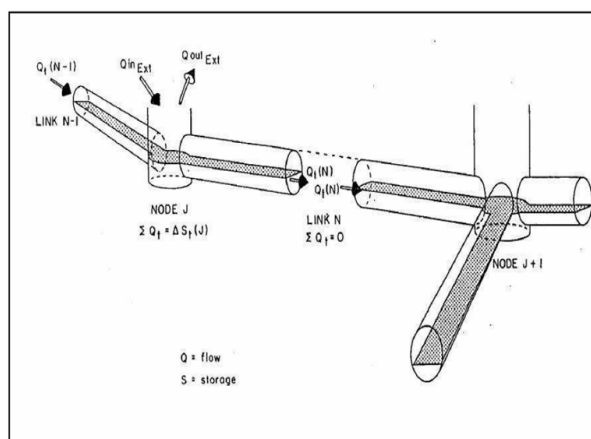
La trattazione presentata ai paragrafi precedenti soddisfa la continuità al singolo nodo, ma può introdurre un piccolo errore di continuità quando vari nodi adiacenti vanno in pressione. I piccoli errori combinandosi tra loro attenuano l'idrogramma nella zona in pressione. Fisicamente gli afflussi ad ogni nodo in pressione devono eguagliare i deflussi nell'arco temporale di un passo di calcolo, dal momento che non esiste variazione di accumulo durante il sovraccarico. Per rimediare a questa attenuazione artificiale i calcoli a passo intero di portata e carico nelle aree in pressione sono ripetuti in un ciclo di iterazioni. Le iterazioni per un particolare passo di calcolo continuano fino a che non si verifichi una delle seguenti condizioni:

1) la differenza tra afflussi e deflussi in un nodo in pressione è minore di una certa tolleranza, calcolata, ad ogni passo di calcolo, come una frazione della portata media attraverso la zona in pressione (il valore della frazione è scelto dall'utente del programma);

2) il numero di iterazioni supera un numero massimo fissato dall'utente.

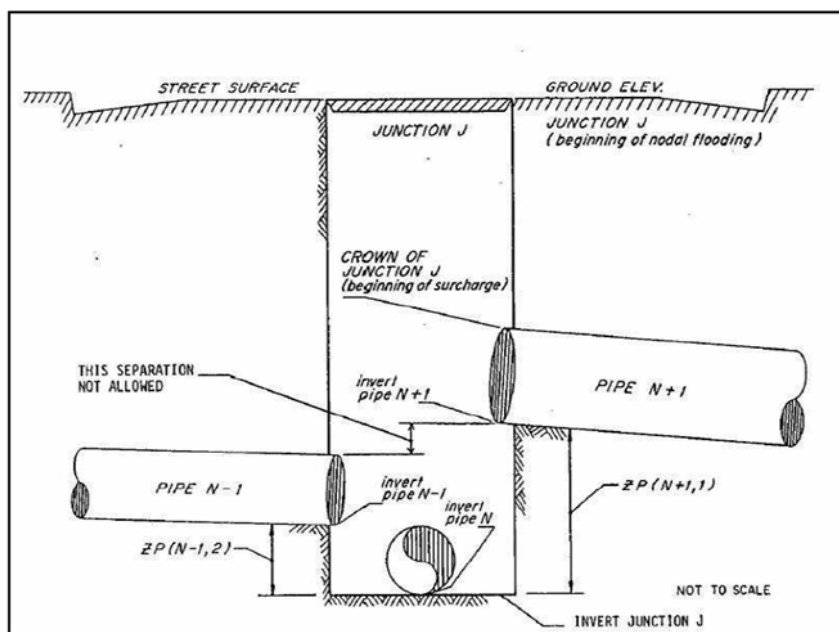
### 1.1.1.09 – Gli elementi della rete

Una rete di drenaggio deve essere schematizzata come un insieme di **L** lati e **N** nodi, ciascuno con le proprie caratteristiche.



**NODI.** I nodi rappresentano i punti dove il sistema di trasporto interseca i vari rami. Fisicamente rappresentano la confluenza dei canali superficiali o, nei sistemi di fognature, i pozzetti. Alcuni nodi ricoprono un ruolo importante: rappresentano infatti il luogo di **immissione dei deflussi superficiali**; tutto il deflusso del sottobacino di calcolo viene schematizzato in modo tale da convergere in un unico

punto, rappresentato dal nodo di inizio del canale di scolo. I principali parametri di input per un nodo sono la **quota di fondo/scorrimento** (invert junction/invert pipe) , la **quota del terreno (ground elev.)** e gli eventuali **afflussi in ingresso**.



**RAMI.** I rami sono canali o condotte che permettono il transito dell'acqua da un nodo all'altro. Ogni singolo canale deve essere suddiviso in più rami e nei corrispettivi nodi. Ogni ramo è schematizzato come un condotto con caratteristiche costanti di forma, pendenza, scabrezza, ecc. e pertanto ogni variazione di pendenza del canale, confluenza di più collettori, salti di fondo, variazioni di profondità o di sezione **devono essere rappresentati con rami differenti**.

La forma del canale va scelta utilizzando un menu grazie al quale é possibile selezionare una serie di sezioni di formati standard, tutte opportunamente configurabili nelle dimensioni a seconda delle esigenze di rappresentazione. Come si può osservare dalla figura precedente in uno stesso nodo possono convergere più rami, ognuno ad una altezza differente rispetto il fondo.

E' importante l'altezza massima raggiungibile dal nodo; questa, nel caso di canali e nodi aperti, rappresenta la quota **oltre la quale si ha una fuoriuscita dell'acqua** e viene calcolata tenendo conto delle altezze dei canali convergenti nel nodo, in particolar modo viene fissata al valore minimo del tirante, addizionato dell'eventuale salto di fondo del canale.

In allegato **A1** sono riassunti i principali parametri di caratterizzazione dei **nodi** in **SWMM-PCA**. In allegato **A1** sono riassunti i principali parametri di caratterizzazione dei **tratti** in **SWMM-PCA**.

### 1.1.1.10 – Altri elementi di SWMM

#### CONDOTTI EQUIVALENTI

Quando un tratto della rete é soggetto a generare instabilità numerica é sostituito in SWMM da un condotto fittizio, idraulicamente equivalente a quello originario (le perdite di carico nell'elemento originario e nel suo condotto equivalente sono le stesse).



## OUTFALL NODES

Sono i **nodi terminali** della rete. Con SWMM é possibile definire diversi tipi di condizioni: ad esempio fissare il livello che l'acqua deve avere nell'**outfall** (es. con battente legato all'andamento della marea) oppure definire delle serie temporali dei livelli.

## POMPE

Con SWMM é possibile implementare le pompe. Il funzionamento di queste deve essere definito da una specifica relazione tra la portata sollevata ed una condizione dei nodi ai quali è collegata. E' possibile, ad esempio definire delle curve del tipo "Portata sollevata-Differenza del livello dei due nodi ai quali è collegata la pompa", oppure "Portata sollevata-Livello dell'acqua del nodo di monte".

## SCARICATORI (WEIR)

SWMM permette la schematizzazione di organi regolatori, come ad esempio gli scaricatori (laterale, frontale, trapezoidale, ecc.). Lo scaricatore laterale viene schematizzato come un collegamento, ad esempio, tra un nodo ed un outfall. I parametri di input per questo dispositivo sono l'altezza della soglia (**h**), la lunghezza del manufatto (**L**) ed un coefficiente d'efflusso (**C<sub>w</sub>**). La portata che fuoriesce viene calcolata mediante la seguente formula

$$Q = C_w x L x h^{(5/2)}.$$

## ORIFICES

Attraverso gli **orifices** è possibile schematizzare manufatti quali paratoie o diaframmi. Sono rappresentati come un collegamento tra due nodi. Possono essere di sezioni circolare o rettangolare e situati alla base del nodo d'ingresso o ad una determinata quota rispetto alla base. E' possibile dotarli di una valvola di ritegno. Le portate che transitano attraverso quest'organo sono definite dalla seguente espressione

$$Q = C_x A_x (2 x g x h)^{0,5}$$

dove **C** rappresenta un coefficiente d'efflusso, **A** la sezione del manufatto, **h** la differenza di quota del pelo libero tra nodo d'ingresso e d'uscita, **g** l'accelerazione di gravità.

### 1.1.1.11 – Altri parametri di SWMM

Valori ricorrenti per canali a cielo aperto.

Scabrezza collettori di bonifica: coefficiente di Manning pari a 0,023-0,026 s/m<sup>(-1/3)</sup>. Altro valore ricorrente 0,033 s/m<sup>(1/3)</sup>. La scabrezza degli alvei può essere espressa attraverso il coefficiente di Gauckler-Strickler (trattasi più propriamente di una misura di "liscezza" delle sponde e del fondo) adottando valori compresi tra 20 e 35 m<sup>(1/3)</sup>/s. Il valore utilizzato va mutuato dall'esperienza, dalla letteratura e dai rilievi effettuati in loco.

Coefficienti di perdita sbocco/imbocco.

Coefficienti di perdita concentrata all'imbocco e allo sbocco: 0,2.  
Coefficiente di perdita carico imbocco tombinamenti: 0,5  
Coefficiente di perdita di carico sbocco tombinamenti: 1,0

Valori ricorrenti per condotte interrante.

Scabrezza tubazioni: 0,015-0,017 s/m<sup>(1/3)</sup>.

Invaso di detenzione.

Lama d'acqua di detenzione superficiale su suolo **impermeabile** (mm): 2.5-3;

lama d'acqua di detenzione superficiale aree **permeabili** (mm): 15.

Lama d'acqua di detenzione superficiale su suolo **permeabile** (mm): 5.1.

Scabrezza secondo Manning su suolo **impermeabile** (m<sup>(-0.33)</sup> s): 0.011.

Surface	n
Smooth asphalt	0.011
Smooth concrete	0.012
Ordinary concrete lining	0.013
Good wood	0.014
Brick with cement mortar	0.014
Vitrified clay	0.015
Cast iron	0.015
Corrugated metal pipes	0.024
Cement rubble surface	0.024
Fallow soils (no residue)	0.05
Cultivated soils	
Residue cover < 20%	0.06
Residue cover > 20%	0.17
Range (natural)	0.13
Grass	
Short, prairie	0.15
Dense	0.24
Bermuda grass	0.41
Woods	
Light underbrush	0.40
Dense underbrush	0.80

Valori tipici infiltrazione di Horton.

Massima infiltrazione Horton: 100 mm/h;

minima infiltrazione Horton: 15 mm/h.

Costante di decadimento di Horton.

Generalmente 4.

Stato del suolo iniziale utilizzato in SWMM-PCA.

Parzialmente saturo.

Metodo di calcolo utilizzato in SWMM-PCA.

In SWMM-PCA é stato utilizzato il metodo **Dynamic Wave** (definizione dei parametri idraulici della rete a moto vario per tener conto sia degli effetti di laminazione che delle condizioni dinamiche di monte e valle in ogni nodo della rete).

### **1.1.2 – Ietogramma Chicago**

Nello ietogramma di progetto denominato "Chicago"[Kiefer e Chu, 1957] l'intensità di pioggia non é costante nel tempo. Lo ietogramma presenta un picco in una posizione da stabilire a priori e si ricava dalla

CSPP per fissato tempo di ritorno  $T_r$  imponendo la durata della pioggia  $tp$  e la posizione del picco  $ta$ . Se ad esempio la posizione del picco é a metà avremo quindi  $r=0,5$  con  $ta=tpxr$ .

Lo ietogramma "Chicago" restituisce per una durata qualsiasi dell'evento (purché inferiore a  $tp$ ) un massimo dell'intensità di pioggia uguale a quella fornita dalla CSPP. Se indichiamo con  $h(t)=at/(b+t)^2$  la CSPP e con  $i(t)=a/(b+t)^c$  la curva intensità-tempo, con  $rxtp=ta$  l'intervallo che intercorre tra l'inizio dell'evento e il picco dell'intensità (quindi con  $r$  compreso fra 0 e 1) e con  $ts$  l'intervallo di tempo che intercorre tra il picco dell'intensità l'inizio dell'evento e la fine dell'evento (ovvero  $ta+ts=tp$ ) si possono introdurre le due variabili temporali:

$$Aa) t1=(rxtp-t)/r$$

e

$$Ab) t2=(t-rxtp)/(1-r).$$

Con queste nuove variabili abbiamo due ietogrammi:

B1) se  $t$  é compreso fra 0 e  $rxtp$  vale  $i1(t)=a/(b+t1)^c$ ;

B2) se  $t$  é compreso fra  $rxtp$  e  $tp$  vale  $i2(t)=a/(b+t2)^c$ .

Lo ietogramma di progetto totale é dato dalla somma di  $i1(t)$  e di  $i2(t)$ . Se  $r=0,5$  lo ietogramma risulta simmetrico rispetto all'istante di picco.

Da quanto esposto deriva che:

Ca) lo ietogramma "Chicago" rappresenta una pioggia critica per tutte le durate in quanto **a tutte le durate corrisponde la stessa probabilità cumulata**. Nelle varie sezioni di una opera idraulica é quindi possibile utilizzarlo prescindendo dalla durata critica associata ad ogni sezione (con altri idrogrammi di progetto gli stessi andrebbero modificati in funzione della durata critica del bacino associato alla sezione). Una pioggia che é critica per una durata  $tx$  non é necessariamente critica per tutte le altre durate, ma l'altezza complessiva dello ietogramma "Chicago" é superiore a quella di ciascuno degli eventi reali che risultano critici per le diverse durate. Considerando la pioggia in termine di quantità lo ietogramma Chicago risulta quindi più gravoso di ciascuno degli eventi che costituiscono il caso critico (ciò implica inoltre che allo ietogramma Chicago corrisponde un  $T_r$  maggiore di quello nominale della CSPP dalla quale é stato ricavato);

Cb) poiché interessano gli ietogrammi in forma discreta (suddividere la durata complessiva  $tp$  in tempi finiti  $dt$ ) occorrerà calcolare l'intensità media di ciascun intervallo  $dt$  che in forma approssimata andrà considerata come semisomma dei due valori discreti calcolati all'estremità dell'intervallo.

In **SWMM-PCA**, modello idraulico con finalità di "indirizzo", si é preferito ipotizzare andamenti delle piogge omogenee per durata ed intervallo. Non é stata quindi utilizzata la metodologia di individuazione della pioggia "più pericolosa" che caratterizza lo ietogramma tipo "Chicago".

### 1.1.3 – Gruppi idrologici di suolo

Come precisato nei paragrafi precedenti nel metodo **Curve Number** si classificano i suoli dal punto di vista della "possibilità di infiltrazione" nei gruppi **A, B, C e D**; in dettaglio le caratteristiche salienti dei vari gruppi sono:

#### Gruppo A

→ *scorrimento superficiale* potenzialmente **basso** o **nullo**;

→ *tasso di infiltrazione* **alto** anche se bagnati;

- costituiti da **sabbie** e/o **ghiaie** di notevole spessore;
- *allontanamento nel sottosuolo* da **elevatissimo** a **buono**.
- *conducibilità idraulica* del terreno **notevole**.

#### Gruppo B

- *scorrimento superficiale* potenzialmente **buono** o **basso**;
- *tasso di infiltrazione* **medio-alto** anche quando bagnati;
- costituiti da suoli con tessitura **medio-grossolana**;
- *allontanamento nel sottosuolo* da **buono** a **moderatamente buono**;
- *conducibilità idraulica* del terreno **media**.

#### Gruppo C

- *scorrimento superficiale* potenzialmente **elevato** o **buono**;
- *tasso di infiltrazione* **medio-basso** quando bagnati;
- costituiti da suoli con tessitura da **moderatamente fine** a **fine**;
- *allontanamento nel sottosuolo* da **moderatamente buono** a **scarso**;
- *conducibilità idraulica* del terreno **bassa**.

#### Gruppo D

- *scorrimento superficiale* potenzialmente **elevatissimo** o **elevato**;
- *tasso di infiltrazione* **bassissimo** quando bagnati;
- costituiti da suoli **argillosi** ad **elevato rigonfiamento**, suolo **poco profondi con substrato impermeabile**;
- *allontanamento nel sottosuolo* da **scarso** a **nullo**;
- *conducibilità idraulica* del terreno **bassissima**.

Nell'applicazione del metodo SCS-CN alla determinazione della pioggia efficace i valori **CN** stimati sono correlabili a quelli presenti nella tabella seguente, valida per diverse combinazioni di suolo e di copertura:

TIPO DI COPERTURA			CLASSE DI SUOLO			
USO DEL SUOLO	TRATTAMENTO/PRATICA	CONDIZIONE IDROLOGICA	A	B	C	D
Terreno agricolo tenuto a riposo	A solchi diritti		77	86	91	94
Colture a solchi	A solchi diritti	cattiva	72	81	88	91
Colture a solchi	A solchi diritti	buona	67	78	85	89
Colture a solchi	A reggi poggio	cattiva	70	79	84	88
Colture a solchi	A reggi poggio	buona	65	75	82	86
Colture a solchi	A reggi poggio e terrazze	cattiva	66	74	80	82
Colture a solchi	A reggi poggio e terrazze	buona	62	71	78	81
Grani piccoli	A solchi diritti	cattiva	65	76	84	88
Grani piccoli	A solchi diritti	buona	63	75	83	87
Grani piccoli	A reggi poggio	cattiva	63	74	82	85
Grani piccoli	A reggi poggio	buona	61	73	81	84
Grani piccoli	A reggi poggio e terrazze	cattiva	61	72	79	82
Grani piccoli	A reggi poggio e terrazze	buona	59	70	78	81
Legumi, seminati folti, prati in rotazione	A solchi diritti	cattiva	66	77	85	89
Legumi, seminati folti, prati in rotazione	A solchi diritti	buona	58	72	81	85
Legumi, seminati folti, prati in rotazione	A reggi poggio	cattiva	64	75	83	85
Legumi, seminati folti, prati in rotazione	A reggi poggio	buona	55	69	78	83
Legumi, seminati folti, prati in rotazione	A reggi poggio e terrazze	cattiva	63	73	80	83
Legumi, seminati folti, prati in rotazione	A reggi poggio e terrazze	buona	51	67	76	80
Pascoli		cattiva	68	79	86	89
Pascoli		discreta	49	69	79	84
Pascoli		buona	39	61	74	80
Pascoli	A reggi poggio	cattiva	47	67	81	88
Pascoli	A reggi poggio	discreta	25	59	75	83
Pascoli	A reggi poggio	buona	6	35	70	79
Prati		buona	30	58	71	78
Boschi		cattiva	45	66	77	83

Boschi		discreta	<b>36</b>	<b>60</b>	<b>73</b>	<b>79</b>
Boschi		buona	<b>25</b>	<b>55</b>	<b>70</b>	<b>77</b>
Aziende agricole			<b>59</b>	<b>74</b>	<b>82</b>	<b>86</b>
Aree urbanizzate, impermeabile >80%			<b>89</b>	<b>92</b>	<b>94</b>	<b>95</b>
Aree residenziali, 500 mq, impermeabile 65%			<b>77</b>	<b>85</b>	<b>90</b>	<b>92</b>
Aree residenziali, 1000 mq, impermeabile 38%			<b>61</b>	<b>75</b>	<b>83</b>	<b>87</b>
Aree residenziali, 1300 mq, impermeabile 30%			<b>57</b>	<b>72</b>	<b>81</b>	<b>86</b>
Aree residenziali, 2000 mq, impermeabile 25%			<b>54</b>	<b>70</b>	<b>80</b>	<b>85</b>
Aree residenziali, 4000 mq, impermeabile 20%			<b>51</b>	<b>68</b>	<b>79</b>	<b>84</b>
Parcheggi asfaltati, tetti, viali accesso			<b>98</b>	<b>98</b>	<b>98</b>	<b>98</b>
Strade asfaltate con rete fognaria			<b>98</b>	<b>98</b>	<b>98</b>	<b>98</b>
Strade in ghiaia			<b>76</b>	<b>85</b>	<b>89</b>	<b>91</b>
Strade sterrate			<b>72</b>	<b>82</b>	<b>87</b>	<b>89</b>
Ferrovie			<b>72</b>	<b>82</b>	<b>87</b>	<b>89</b>
Aree commerciali, impermeabili 85%			<b>89</b>	<b>92</b>	<b>94</b>	<b>95</b>
Aree industriali, impermeabili 72%			<b>81</b>	<b>88</b>	<b>91</b>	<b>93</b>
Spazi aperti, prati, parchi, campi da golf, cimiteri, aree verdi urbane... in buone condizioni con copertura erbosa di almeno il 75%			<b>39</b>	<b>61</b>	<b>74</b>	<b>80</b>
Spazi aperti, prati, parchi, campi da golf, cimiteri, aree verdi urbane... in discrete condizioni con copertura erbosa fra 50 e 75%			<b>49</b>	<b>69</b>	<b>79</b>	<b>84</b>
Superfici d'acqua			<b>99</b>	<b>99</b>	<b>99</b>	<b>99</b>

## **PARTE 3**

# **ANALISI DEL RISCHIO IDRAULICO**

## 1 - ANALISI DEL RISCHIO IDRAULICO

Quanto riassunto di seguito è stato in gran parte derivato da:

→ Barbano A., Braca G., Bussetini M., Dessì B., Inghilesi R., Lastoria B., Monacelli G., Morucci S., Piva F., Sinapi L., Spizzichino D. (2012): Proposta metodologica per l'aggiornamento delle mappe di pericolosità e di rischio - Attuazione della Direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi da alluvioni (Decreto Legislativo n.49/2010). – ISPRA, Roma novembre 2012, rev. luglio 2013;

→ Allegato I al P.G.R.A., Distretto Alpi Orientali di Venezia, 2021-2027.

Pericolosità idraulica è la pericolosità associata ad alluvioni e colate detritiche. A tali fenomeni si riferisce anche il rischio idraulico (rischio da alluvioni) ovvero la combinazione della probabilità di un evento alluvionale e delle potenziali conseguenze negative per la salute umana, l'ambiente, il patrimonio culturale e l'attività economica derivanti da tale evento.

Utilizzando la formulazione di Rischio R in termini di rischio totale si ha:

$$R=PxEV$$

essendo P al pericolosità o probabilità di accadimento di un evento alluvionale di data intensità in un intervallo temporale prefissato e su una determinata area; E il valore degli elementi a rischio (elementi intesi come persone, beni, patrimonio culturale ed ambientale, ecc.) presenti nell'area inondabile; V la vulnerabilità degli elementi a rischio (grado di perdita o danno associato a un elemento o a un gruppo di elementi a rischio risultante dal verificarsi di un fenomeno naturale di una data magnitudo). La vulnerabilità è predisposizione di elementi a rischio (edifici, infrastrutture, persone, servizi, processi, organizzazioni, ecc.) ad essere affetti, danneggiati o distrutti da un evento; quindi la vulnerabilità è dipendente sia dalla capacità degli elementi a rischio di sopportare le sollecitazioni esercitate dall'evento, che dall'intensità dell'evento stesso. La vulnerabilità si esprime secondo una scala di valori compresi fra 0 (nessun danno/perdita) e 1 (danno/perdita totale). La combinazione di E e V rappresenta il danno potenziale D quindi  $R=PxD$ .

Si definisce rischio residuo il rischio che si prevede rimanga anche dopo che è stata realizzata la misura di mitigazione pianificata, o quello che può essere deliberatamente accettato. La realizzazione di interventi strutturali non va assunta come una condizione di sicurezza assoluta. Il concetto di rischio residuo deve quindi essere sempre compreso nelle valutazioni di sviluppo del territorio.

Per la redazione delle mappe del rischio inondazioni e in genere nell'analisi del rischio le categorie di elementi esposti possono essere ricomprese in 4 macrocategorie:

- 1) popolazione,
- 2) attività economiche,
- 3) beni culturali-archeologici e
- 4) beni ambientali.

Per descrivere tali categorie si caratterizza il territorio attraverso una classificazione in termini di uso del suolo. Nella tabella successiva si riporta una lista di possibili classi di uso del suolo.

ID	NOME
1	<b>Residenziale</b> (comprende tutti gli elementi afferenti al tessuto urbano ad eccezione di quelli di cui al punto 3,4,8,9)
2	<b>Commerciale</b> (comprese quelle artigianali) non ricadenti nella categoria 1 e industriale (comprese aree estrattive)
3	<b>Strutture ospedaliere, sanitarie, assistenza sociale</b> (ospedali, case di cura, case di accoglienza per anziani, disabili, portatori di handicap, ecc.), <b>scuole e università</b>
4	<b>Edifici sede di servizi pubblici essenziali</b> (municipi, carceri, caserme, prefetture, ecc., non ricadenti nelle categorie 1 e 3)
5	<b>Agricolo specializzato</b> (superfici agricole seminate, permanenti ed eterogenee)
6	<b>Agricolo non specializzato</b> (aree boscate, prati, pascoli)
7	<b>Turistico-Ricreativo</b> (campeggi, stabilimenti balneari, piste da sci, cinema, teatri, centri polifunzionali, pesca sportiva, ecc., non ricadenti nella categoria 1)
8	<b>Reti di comunicazione e trasporto primarie</b> (aeroporti, porti, autostrade, superstrade, strade regionali, ferrovie)
9	<b>Reti di comunicazione e trasporto secondarie</b> (strade provinciali e comunali)
10	<b>Reti tecnologiche e di servizio</b> (fornitura gas, elettricità, acqua, fognature, linee telefoniche, ecc., non ricadenti nella categoria 1)
11	<b>Strutture e impianti a supporto delle reti di comunicazione e trasporto, tecnologiche e di servizio</b> (edifici e strutture aeroportuali e portuali, stazioni ferroviarie, aree di servizio, parcheggi, centrali, cabine elettriche, serbatoi, potabilizzatori, ecc., non ricadenti nella categoria 1)
12	<b>Discariche, impianti di trattamento dei rifiuti, depuratori, impianti che possono costituire importanti fonti di inquinamento in caso di inondazione</b> (non ricadenti in quelli di cui al punto 13)
13	<b>Impianti</b> di cui all'allegato I del decreto legislativo n. 59 del 18 febbraio 2005 (impianti sottoposti a procedura di AIA di competenza statale)
14	<b>Aree protette</b> individuate all'allegato 9 alla parte III del decreto legislativo n. 152 del 2006
15	<b>Beni di rilievo storico-culturale e archeologico</b>

L'Allegato I al P.G.R.A. Distretto Alpi Orientali propone la seguente lista delle classi di uso del suolo:

COD	DESCRIZIONE
1	Residenziale
2	Strutture ospedaliere, sanitarie, assistenza sociale
3	Edifici sede di servizi pubblici
4	Commerciale e artigianale
5	Industriale
6	Agricolo specializzato
7	Agricolo non specializzato, boschi, prati, pascoli, aree cimiteriali, parchi urbani
8	Turistico-Ricreativo
9	Improduttivo
10	Aree sciabili, Campo da golf, Maneggio
11	Campeggi
12	Reti di comunicazione e trasporto: strade di importanza primaria
13	Reti di comunicazione e trasporto: strade di importanza secondaria
14	Zona ferroviaria
15	Zona per impianti turistici, Zona per attrezzature collettive, Zona per attrezzature collettive sovracomunali, Attrezzature collettive nel sottosuolo
16	Reti tecnologiche e di servizio
17	Strutture a supporto delle reti di comunicazione e trasporto (aeroporti, porti, aree di servizio, parcheggi)
18	Zona per la produzione di energia
19	Discariche, Impianti di trattamento dei rifiuti, Aree estrattive, Depuratori
20	Aree su cui insistono impianti di cui all'allegato I del decreto legislativo 18 febbraio 2005, n. 59
21	Aree di rilievo storico-culturale e archeologico; beni culturali
22	Beni ambientali
23	Zona militare



Le classi di uso del suolo della tabella precedente costituiscono i descrittori delle 3 macro-categorie di elementi esposti previste dall'allegato I del P.G.R.A., ovvero popolazione, attività economiche (edifici, agricoltura, ambiente naturale e semi-naturale, infrastrutture e strutture strategiche) e beni ambientali e culturali-archeologici (impianti allegato I d.lvo 59 18/02/2005 e aree protette allegato 9 D.L.vo 152/2006).

Per la determinazione del rischio e l'esigenza di una sua rappresentazione in termini relativi nell'intervallo compreso tra 0 e 1, è necessario associare ai 3 gradi di pericolosità normalmente prevista nel P.G.R.A. (pericolosità bassa P1, pericolosità media P2 e pericolosità alta P3) un valore numerico. Normalmente si assume per **P1, P2, P3** rispettivamente il valore di **0.4, 0.8 e 1**.

## 2 - DETERMINAZIONE DEL DANNO

Il danno è la combinazione del valore dell'elemento esposto con la vulnerabilità di tale elemento rispetto ad un evento di data intensità. Un evento di data intensità può provocare, nei confronti di un elemento esposto, un danno/perdita totale (1), un danno/perdita parziale (0-1) o nessun danno (0).

L'analisi del danno D viene effettuata secondo le 4 macro categorie: popolazione (DP), attività economiche (DE), beni culturali-archeologici (DC), beni ambientali (DA). Ciascuna componente di danno viene valutata nelle singole classi di uso del suolo.

L'unità di calcolo del danno in genere è la cella o area utilizzata per descrivere le quote del terreno. Ad ogni cella o area è associato un valore di velocità V, di altezza idrica H (dipendenti dallo scenario di pericolosità che si sta considerando) e di uso del suolo. Per ogni scenario di pericolosità verranno quindi generate normalmente 4 matrici corrispondenti alle 4 tipologie di danno derivanti dalle corrispondenti macrocategorie di elementi a rischio.

Nella metodologia di seguito illustrata per ciascuna macro categoria di elementi esposti sono definite le modalità di valutazione della vulnerabilità e del valore sociale ed economico espresso in termini relativi.

La valutazione della vulnerabilità richiede la conoscenza dei valori di altezza idrica H e di velocità del flusso V. Qualora i valori di velocità V non siano disponibili, la procedura fornisce indicazioni che consentono di valutare la vulnerabilità anche in funzione della sola altezza d'acqua H.

### 2.1 - Danno associato alla presenza di persone

Per determinare il danno sulla popolazione (presenza umana) si analizzano due componenti:

- 1) vulnerabilità persone **VP** rispetto all'intensità dell'inondazione e
- 2) valore esposto relativo alle persone **EP** espresso in termini relativi.

#### 2.1.1 - Vulnerabilità VP associata alla presenza di persone

Per caratterizzare la vulnerabilità **VP** associata alla presenza umana si fa riferimento a valori di velocità V e profondità H che determinano "instabilità" rispetto alla posizione di equilibrio (eretta). Gli studiosi che si occupano della instabilità delle persone in acqua fluente propongono di far riferimento a valori critici del prodotto HxV tra altezza H d'acqua e velocità V del flusso.

Il prodotto HxV si ritrova analogamente nell'analisi del collasso di edifici in caso di inondazione. Abt et al. (vedi Abt, S.R, R.J. , Wittler A. Taylor, and D.J. Love, 1989. Human Stability in a High Flood Hazard Zone. Water Resources Bulletin 25(4):881-890) hanno testato le condizioni di instabilità per soggetti umani. Dai dati empirici derivanti da tali test è derivata una curva che in funzione di altezza L e massa corporea M identifica i valori critici di HxV per la stabilità di un individuo:

$$(HxV)_c = 0,0929(e^{0,001906LM+1,09})^2 \quad \text{con L in (m) e M in (kg).}$$

Analoghi esperimenti condotti nell'ambito del progetto RESCDAM (vedi Karvonen, R.A., A. Hepojoki, H.K. Huhta, and A. Louhio, 2000, The Use of Physical Models in Dam-Break Analysis. RESCDAM Final Report. Helsinki University of Technology, Helsinki, Finland) hanno mostrato che i valori critici per il prodotto HxV variano tra 0,64 m<sup>2</sup>/s e 1,29 m<sup>2</sup>/s in funzione di altezza e massa corporea. Gli Autori hanno proposto la seguente curva:

$$(HxV)_c = 0,004xLxM + 0,2$$

Secondo la Federal Emergency Management Agency (vedi *Federal Emergency Management Agency, 1979, The floodway: a guide for community permit officials. US Federal Insurance Administration, Community Assistance Series, No.4*), una persona di corporatura media comincia a perdere l'equilibrio in acqua profonda 0,91 m che scorre ad una velocità di 0,61 m/s corrispondentemente cioè ad un prodotto HxV pari a 0,56 m<sup>2</sup>/s.

La maggior parte degli studi mostrano la perdita dell'equilibrio in acqua all'interno di un range di valori piuttosto basso del prodotto HxV, contenuto tra 0,6 e 2 m<sup>2</sup>/s (vedi *Jonkman, S.N. and E. Penning-RowSELL, 2008, Human Instability in Flood Flows. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA) 44(4):1-11*). Ramsbottom et al. (vedi *Ramsbottom, D., S. Wade, V. Bain, M. Hassan, E. Penning-RowSELL, T. Wilson, A. Fernandez, M. House, and P. Floyd, 2004, R&D Outputs: Flood Risks to People. Phase 2. FD2321 / IR2.Department for the Environment, Food and Rural Affairs / Environment Agency, London, United Kingdom*) e Penning-RowSELL et al. (vedi *Penning-RowSELL, E.C., P. Floyd, D. Ramsbottom, and S. Surendran, 2005. Estimating Injury and Loss of Life in Floods: A Deterministic Framework. Natural Hazards 36:43-64*) hanno proposto per le persone un'equazione che lega un indice di pericolo da inondazione (*Flood Hazard Rating=FHR*) con l'altezza e la velocità dell'acqua oltre che con un fattore connesso alla quantità di sedimento trasportato (*Debris Factor = DF*):

$$FHR = Hx(V+0,5)+DF .$$

Nel "*Flood Risks to People, Phase 2, Guidance Document*" del 2006 (secondo rapporto tecnico del progetto "*Risks to People*" del Department for Environment, Food and Rural Affairs, DEFRA), l'ente governativo del Regno Unito riporta 1 tabella con FHR in funzione di H e V e una tabella con DF in funzione di H, V e uso del suolo prevalente. La seguente tabella rapporta FHR ad H e V:

Hx(V+0,5)	Grado di pericolo da inondazione	Descrizione
<0,75	Basso	Cautela: "Zone inondate da acque fluenti con basso tirante o da acque ferme ma profonde"
da 0,75 a 1,25	Moderato	Pericoloso per qualcuno (bambini): "Zone inondate da acque profonde o ad elevata velocità di deflusso"
da 1,25 a 2,5	Significativo	Pericoloso per la maggior parte delle persone: "Zone inondate da acque profonde o ad elevata velocità di deflusso"
> 2,5	Estremo	Pericoloso per chiunque: "Zone inondate da acque profonde o ad elevata velocità di deflusso"

La seguente tabella evidenzia DF per diversi valori di H, V e uso del suolo prevalente:

H	Pascolo/Agricolo	Bosco	Urbano
da 0 a 0,25 m	0	0	0
da 0,25 a 0,75 m	0	0,5	1
h>0,75 m e/o V>2 m/s	0,5	1	1

Nello stesso rapporto tecnico si sottolinea come in acque ferme una persona adulta difficilmente resta in piedi per altezze d'acqua maggiori o uguali a 1,5 m. Ma in realtà la maggior parte degli studi sperimentali sono stati condotti con altezze d'acqua massime di 1,2 m per gli adulti e di 0,5 m per i bambini e con velocità di poco superiori ai 3 m/s. Ciò premesso si propone che la vulnerabilità VP delle persone sia in generale:

$$\begin{aligned} \mathbf{VP}(H,V) &= 0 && \text{per } H \leq 0,25 \text{ m} \\ \mathbf{VP}(H,V) &= [H \times (V + 0,5)] + 0,25 && \text{per } H > 0,25 \text{ m} \end{aligned}$$

imponendo  $\mathbf{VP}=1$  nel caso in cui il valore calcolato superi tale limite superiore. Nel caso in cui si disponga dei soli valori di altezza d'acqua si può utilizzare la seguente relazione:

$$\begin{aligned} \mathbf{VP}(H) &= 0 && \text{per } H \leq 0,25 \text{ m} , \\ \mathbf{VP}(H) &= H - 0,25 && \text{per } H > 0,25 \text{ m} . \end{aligned}$$

Si impone  $\mathbf{VP}=1$  nel caso in cui il valore calcolato superi tale limite superiore.

Come si può osservare l'ipotesi base assunta è che le persone risultano vulnerabili per tiranti superiori a 0,25 m. L'allegato I del P.G.R.A. riassume la questione con la seguente tabella

DESCRIZIONE	CAMPI di FHR	V <sub>p</sub>
Cautela: "Zone inondate da acque fluenti con basso tirante o da acque ferme ma profonde"	FHR < 0.75	0.25
Pericolo per qualcuno (bambini): "Zone inondate da acque profonde o ad elevata velocità di deflusso"	0.75 ≤ FHR < 1.25	0.75
Pericolo per chiunque: "Zone inondate da acque profonde o ad elevata velocità di deflusso"	FHR ≥ 1.25	1

Fanno eccezione le persone ospitate in "strutture ospedaliere, sanitarie, assistenza sociale" in cui la vulnerabilità  $\mathbf{VP}$  è posta pari a 1 già nei casi in cui FHR > 0,75 in quanto si può ritenere che in media il loro stato fisico le renda maggiormente vulnerabili.

### 2.1.2 - Valore esposto EP associato alla presenza di persone

Il maggiore o minore valore sociale viene diversificato in base alla densità abitativa e alla durata della presenza umana nell'arco delle 24 ore. Normalmente si individuano 5 classi di densità di popolazione secondo la tabella seguente e a ciascuna di esse è attribuito un fattore peso (fattore di densità FD).

Limiti classe (abitanti/km2)	Fattore di densità FD
1 - 40	0,9
40 - 80	0,93
80 - 140	0,95
140 - 320	0,98
> 320	1

L'allegato I del P.G.R.A. propone la seguente tabella per fissare FD:

NUMERO DI PERSONE	F <sub>d</sub>
1 ÷ 50	0.90
51 ÷ 100	0.95
101 ÷ 500	0.98
> 500	1

Inoltre per ciascuna classe di uso del suolo viene fatta un'ipotesi riguardo la durata plausibile della presenza umana nell'elemento di territorio considerato. Il fattore peso, in questo caso indicato come "fattore di durata" FT, non è altro che il rapporto della durata ipotizzata nell'ambito delle 24 ore giornaliere e le 24 ore stesse. Nella tabella seguente è riportato un esempio di attribuzione di FT formulato facendo riferimento, per le classi d'uso del suolo sovrapponibili.

ID classe uso del suolo	Nome classe uso del suolo	Stima durata (ore)	Fattore di durata FT
1	Residenziale	24	1
2	Commerciale e industriale	12	0,5
3	Strutture ospedaliere, sanitarie, assistenza sociale, scuole e università	24	1
4	Edifici sede di servizi pubblici essenziali	24	1
5	Agricolo specializzato	4	0,2
6	Agricolo non specializzato	2	0,1
7	Turistico-Ricreativo	10	0,4
8	Reti di comunicazione e trasporto primarie	24	1
9	Reti di comunicazione e trasporto secondarie	12	0,5
10	Reti tecnologiche e di servizio	-	-
11	Strutture e impianti a supporto delle reti di comunicazione e trasporto, tecnologiche e di servizio	8	0,3

Il valore esposto nel suo complesso sarà quindi dato dal prodotto dei due fattori di densità e di durata ovvero **EP** = FD x FT.

## 2.2 - Danno associato alle attività economiche

Per determinare il danno associato alle attività economiche si analizzano due componenti:

- 1) vulnerabilità attività economica **VE** rispetto all'intensità dell'inondazione e
- 2) valore esposto relativo alle attività economiche **EE** espresso in termini relativi.

La discretizzazione in classi d'uso del suolo ha già in sé una caratterizzazione delle attività economiche che si intendono analizzare (commerciale, industriale turistico-ricreativa, agricola, ecc.). La metodologia seguente si basa sulla definizione, per ciascuna categoria di uso del suolo, di 3 classi di vulnerabilità. Tali classi esprimono il grado di perdita che si viene a determinare in corrispondenza di determinati valori di H, V, o del loro prodotto HxV.

Per la valutazione della vulnerabilità delle attività economiche sono assunte le seguenti ipotesi:

→ per tutte le classi di uso del suolo caratterizzate dalla presenza di edifici, il danno viene valutato con riferimento agli edifici e ai beni in essi contenuti;

→ per le aree agricole il danno, in prima istanza, è legato alla perdita del raccolto e, per valori di altezza e velocità più alti, agli edifici e ai beni in essi contenuti;

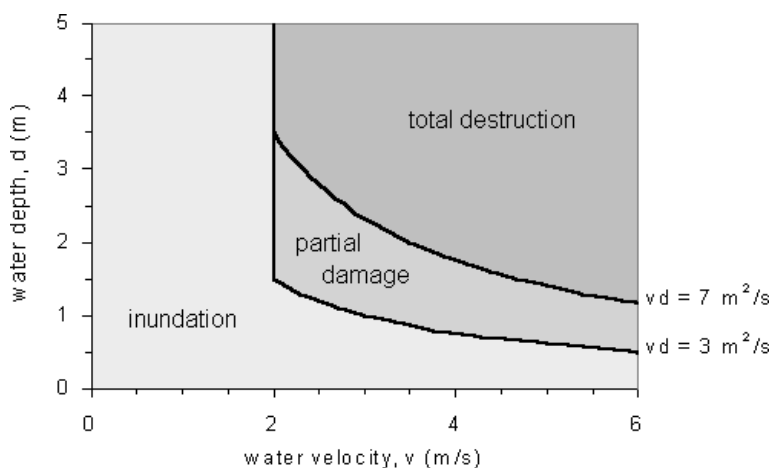
→ per le classi d'uso del suolo corrispondenti alle infrastrutture di collegamento il danno è legato alla impossibilità di utilizzare le infrastrutture e quindi all'interruzione del servizio. Ciò può verificarsi sia con che senza danni strutturali alle infrastrutture stesse (semplice allagamento o anche distruzione del bene).

Nell'attribuzione del valore relativo ai beni esposti si tiene conto del fatto che deve essere possibile discriminare la rilevanza che una certa tipologia di attività (agricola piuttosto che industriale) ha in un determinato contesto territoriale rispetto alle altre presenti.

### 2.2.1 - Vulnerabilità VE associata alle attività economiche

Nel caso degli edifici, essi possono collassare a causa della pressione dell'acqua, dello scalzamento delle fondazioni, o di una combinazione di tali cause. Inoltre il materiale solido trasportato da una piena può provocare danni alle strutture. Secondo quanto riportato nel citato report tecnico del DEFRA danni parziali possono interessare gli edifici se la differenza in livello idrico fra esterno ed interno supera 0,5 m. Danni consistenti possono verificarsi se tale differenza raggiunge 1 m o se la differenza di 0,5 m si verifica in concomitanza con deflussi idrici ad alta velocità ( $V$  maggiore di circa 3 m/s). Condizioni molto severe sono, per esempio, una differenza di 2 m anche in presenza di velocità basse, una differenza di 1 m e una velocità di 6 m/s, o una differenza di 2 m e una velocità di 3 m/s, che si possono tradurre in danni irreparabili.

Clausen e Clark (vedi *Clausen, L. & Clark, P.B. 1990. The development of criteria for predicting dambreak flood damages using modelling of historical dam failures. In: International Conference on River Flood Hydraulics, edited by W. R. White. 17. - 20. September, 1990. John Wiley & Sons Ltd. Hydraulics Research Limited, 1990. pp. 369-380*) utilizzano tre categorie di danno (vedi figura seguente) definite in termini qualitativi, per descrivere il livello di danno strutturale per edifici in mattoni e muratura associato al verificarsi di un'inondazione con determinate caratteristiche di velocità e altezza.



Per  $V < 2$  m/s o  $H \cdot V < 3$  m<sup>2</sup>/s danno da semplice allagamento;  
per  $V > 2$  m/s e  $3 \text{ m}^2/\text{s} < H \cdot V < 7 \text{ m}^2/\text{s}$  danno strutturale parziale;  
infine per  $V > 2$  m/s e  $H \cdot V > 7$  m<sup>2</sup>/s distruzione totale.

Le 3 citate categorie di danno corrispondono rispettivamente a:

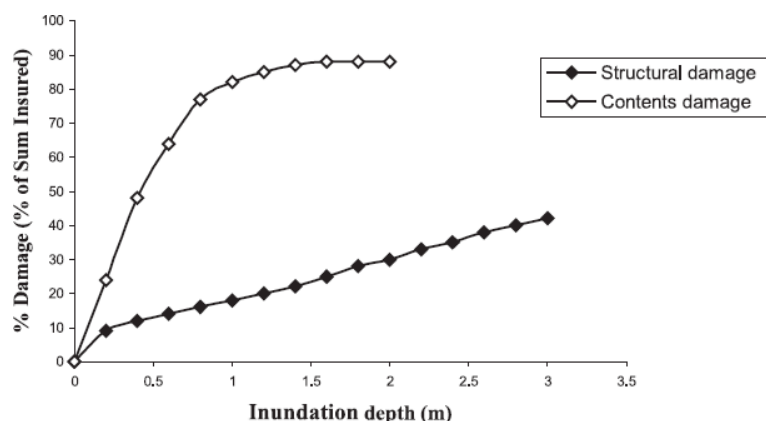
- 1) danno da semplice allagamento: danni simili a quelli causati da un'inondazione naturale a bassa velocità, con nessun immediato danno strutturale;
- 2) danno strutturale parziale: danni moderati, come finestre e porte buttate a terra e piccoli danni ai principali elementi strutturali degli edifici;
- 3) distruzione totale: collasso totale o danni gravi alle strutture che necessitano demolizione e ricostruzione.

Roos (vedi *Roos, I.W., 2003, Damages to buildings, Delft Cluster, Report number DC1-233-9*) ha studiato il collasso degli edifici causato dalla velocità di deflusso analizzando diverse tipologie di struttura, materiali ed età di costruzione degli edifici stessi. Le sue analisi hanno mostrato che una velocità maggiore di 2 m/s accoppiata ad un tirante idrico di 0,5 m determina danni parziali agli edifici.

Nell'ambito del progetto RESCDAM sono stati forniti i risultati di un'analisi di vulnerabilità condotta su diverse tipologie di case finlandesi (vedi *Majjala, T., 2001, Rescdam: Development of rescue actions based on dam-break flood analysis, Final Report, Grant agreement no. Subv 99/52623 Community Action Programme in the field of civil protection, Helsinki: Finnish Environment Institute*) in termini di stima delle velocità e altezze d'acqua per cui si sviluppano danni. Vedi tabella seguente:

Tipo di edificio	Danno parziale	Danno totale
Edifici lignei non ancorati	$HxV \geq 2 \text{ m}^2/\text{s}$	$HxV \geq 3 \text{ m}^2/\text{s}$
Edifici lignei ancorati	$HxV \geq 3 \text{ m}^2/\text{s}$	$HxV \geq 7 \text{ m}^2/\text{s}$
Edifici in muratura, cemento e mattoni	$V \geq 2 \text{ m/s}$ e $HxV \geq 3 \text{ m}^2/\text{s}$	$V \geq 2 \text{ m/s}$ e $HxV \geq 7 \text{ m}^2/\text{s}$

Per quanto concerne, la valutazione delle perdite potenziali dovute ai danni da inondazione ai beni contenuti negli edifici, un esempio è riportato nella figura successiva, che rappresenta la curva altezza-danno per Risk-Frontiers (fonte: *Natural Hazards Research Centre*) da cui si nota come già ad altezze d'acqua di 0,5 m le perdite in termini di "beni interni" si aggirano intorno al 50%.



Sempre nell'ambito del progetto RESCDAM, Reiter (vedi *Reiter P., 2000, International methods of Risk Analysis, Damage evaluation and social impact studies concerning Dam-Break accidents. EU-Project RESCDAM. Helsinki PR Water Consulting*) ha presentato le stime di altezza d'acqua H e velocità V a cui gli autoveicoli diventano instabili in presenza di inondazione. Vedi tabella seguente:

Danni ridotti, basso pericolo	Danni medi, pericolo medio	Danno totale, pericolo molto elevato
$HxV < 0,3 \text{ m}^2/\text{s}$	$0,5 \text{ m}^2/\text{s} \leq HxV \leq 0,6 \text{ m}^2/\text{s}$	$HxV > 0,6 \text{ m}^2/\text{s}$

Moore and Power (vedi *Moore K A and Power R K, 2002, Safe buffer distances for offstream earth dams. Aust J of Water Resources, IEAust, 6(1):1-16*) indicano come limiti di stabilità dei veicoli

$$H \leq (0,4 - 0,0376V) \text{ per } V \leq 1,81 \text{ e}$$

$$HxV \leq 0,6 \text{ per } v > 1,81.$$

Nel rapporto finale di Australian Rainfall and Runoff (AR&R) Project n. 10 "Appropriate Safety Criteria for Vehicles – Literature Review", rel. Febbraio 2011, viene riportata una tabella contenente i valori di riferimento limite per 3 diverse classi di veicoli:

1) piccole vetture:  $H=0,3 \text{ m}$  in acqua ferma ( $V=0$ );  $H=0,1 \text{ m}$  per  $V=3 \text{ m/s}$ ;  $HxV \leq 0,3 \text{ m}^2/\text{s}$ ;

2) veicoli di medie dimensioni:  $H=0,4$  m in acqua ferma ( $V=0$ );  $H=0,15$  m per  $V=3$  m/s;  $H \cdot V \leq 0,45$  m<sup>2</sup>/s;

3) veicoli di dimensioni maggiori:  $H=0,5$  m in acqua ferma ( $V=0$ );  $H=0,2$  m per  $V=3$  m/s;  $H \cdot V \leq 0,6$  m<sup>2</sup>/s.

Per il calcolo della vulnerabilità **VE** delle attività economiche l'allegato I del P.G.R.A. dell'Autorità di Distretto Alpi Orientali presenta il seguente approccio.

Per quanto concerne gli edifici (categorie 1, 2, 3, 4, 5, 14, 15, 17, 18, 19, 23 della tabella riproposta a seguire)

COD	DESCRIZIONE
1	Residenziale
2	Strutture ospedaliere, sanitarie, assistenza sociale
3	Edifici sede di servizi pubblici
4	Commerciale e artigianale
5	Industriale
6	Agricolo specializzato
7	Agricolo non specializzato, boschi, prati, pascoli, aree cimiteriali, parchi urbani
8	Turistico-Ricreativo
9	Improduttivo
10	Aree sciabili, Campo da golf, Maneggio
11	Campeggi
12	Reti di comunicazione e trasporto: strade di importanza primaria
13	Reti di comunicazione e trasporto: strade di importanza secondaria
14	Zona ferroviaria
15	Zona per impianti turistici, Zona per attrezzature collettive, Zona per attrezzature collettive sovracomunali, Attrezzature collettive nel sottosuolo
16	Reti tecnologiche e di servizio
17	Strutture a supporto delle reti di comunicazione e trasporto (aeroporti, porti, aree di servizio, parcheggi)
18	Zona per la produzione di energia
19	Discariche, Impianti di trattamento dei rifiuti, Aree estrattive, Depuratori
20	Aree su cui insistono impianti di cui all'allegato I del decreto legislativo 18 febbraio 2005, n. 59
21	Aree di rilievo storico-culturale e archeologico; beni culturali
22	Beni ambientali
23	Zona militare

si prende atto come essi possono collassare a causa della pressione dell'acqua, dello scalzamento delle fondazioni, o di una combinazione di tali cause. La formulazione proposta da Clausen e Clark (1990) per edifici in mattoni e muratura viene modificata nell'allegato I del P.G.R.A. per tenere in conto le sperimentazioni condotte da Risk-Frontiers citate in precedenza sulle perdite potenziali dovute ai danni da inondazione ai beni contenuti negli edifici: i risultati di laboratorio evidenziano che già per altezze d'acqua di 0.5 m le perdite in termini di "beni interni" si aggirano intorno al 50%. La vulnerabilità strutturale **VE** per attività economiche degli edifici e dei beni in essi contenuti è sintetizzata secondo la tabella seguente

DESCRIZIONE	LOGICHE di $h \cdot v$	$V_E$
Danni simili a quelli causati da un'inondazione naturale a basso tirante	$se h < 0.5$	0.25
Danni moderati, come finestre e porte buttate a terra, danni parziali ai "beni interni" e piccoli danni ai principali elementi strutturali degli edifici	con $v < 2$ m/s se $0.5 \leq h < 2$ m; con $v \geq 2$ m/s se $(h \cdot v) \leq 4$ m <sup>2</sup> /s e $h \geq 0.5$	0.75
Collasso totale o danni gravi alle strutture che necessitano demolizione e ricostruzione	con $v < 2$ m/s se $h \geq 2$ m; con $v \geq 2$ m/s se $(h \cdot v) > 4$ m <sup>2</sup> /s	1

Nel caso di campeggi (categoria 11, tabella P.G.R.A.) tali valori limite sono modificati secondo alcuni risultati delle analisi condotte dal citato lavoro di Majjala (2001), come da tabella seguente

DESCRIZIONE	LOGICHE di h e v	V <sub>E</sub>
Danni simili a quelli causati da un'inondazione naturale a basso tirante	se $h < 0.2$	0.25
Danni parziali ai "beni interni" e alla struttura stessa	con $v < 2 \text{ m/s}$ se $0.2 \leq h < 0.8 \text{ m}$ ; con $v \geq 2 \text{ m/s}$ se $(h \cdot v) \leq 1.6 \text{ m}^2/\text{s}$ e $h \geq 0.2$	0.75
Collasso totale o danni gravi alla struttura	con $v < 2 \text{ m/s}$ se $h \geq 0.8 \text{ m}$ ; con $v \geq 2 \text{ m/s}$ se $(h \cdot v) > 1.6 \text{ m}^2/\text{s}$	1

Per le classi d'uso del suolo corrispondenti alle infrastrutture di collegamento (categorie 12 e 13, tabella P.G.R.A.) la vulnerabilità è legata all'impossibilità di utilizzare le infrastrutture e quindi all'interruzione del servizio. Ciò può verificarsi sia con che senza danni strutturali alle infrastrutture stesse (semplice allagamento o anche distruzione del bene). Sulla base delle stime di altezza d'acqua H e velocità a cui gli autoveicoli diventano instabili in presenza di inondazione vengono adottate la funzione di vulnerabilità **VE** come da tabella seguente

DESCRIZIONE	LOGICHE di h e v	V <sub>E</sub>
La stabilità del veicolo non è compromessa con eventuali danni ridotti; limitati disagi nell'utilizzo dell'infrastruttura	con $v < 1 \text{ m/s}$ se $h < 0.3 \text{ m}$ ; con $v \geq 1 \text{ m/s}$ se $h \cdot v < 0.3 \text{ m}^2/\text{s}$	0.25
Il veicolo si trova in condizioni di stabilità critica con eventuali danni parziali; si possono manifestare disagi nell'utilizzo dell'infrastruttura	con $v < 1 \text{ m/s}$ se $0.3 \leq h < 0.5 \text{ m}$ ; con $v \geq 1 \text{ m/s}$ se $0.3 \leq h \cdot v < 0.5 \text{ m}^2/\text{s}$	0.75
Il veicolo ha perso le condizioni di stabilità e si verificano danni significativi che ne compromettono il futuro; l'infrastruttura non è agibile	con $v < 1 \text{ m/s}$ se $h \geq 0.5 \text{ m}$ ; con $v \geq 2 \text{ m/s}$ se $h \cdot v \geq 4 \text{ m}^2/\text{s}$	1

I valori di H e V derivano da osservazioni condotte durante sperimentazione in laboratorio da Reiter (vedi citazione precedente) e dei valori di riferimento limite riportati nel rapporto finale di AR&R (vedi citazione precedente).

Per le reti tecnologiche e di servizio, l'Allegato I al P.G.R.A. assume che ci possa essere vulnerabilità sono in caso di tiranti e velocità maggiori rispettivamente a 2 m e 2 m/s. Nel qual caso **VE** assume valore pari a 1.

Le perdite attese nelle aree rurali sono in genere molto più basse di quelle che si possono avere in ambito urbano a causa di inondazioni. Per questo, in molti casi, la valutazione del danno in ambito rurale non viene effettuata o vengono utilizzati approcci semplificati.

È bene, innanzitutto, delineare quali sono le variabili da cui dipende il danno da inondazione nei terreni agricoli: il periodo dell'anno in cui l'inondazione si verifica, il battente idrico, la durata, la velocità di deflusso, la deposizione di inquinanti o sostanze nocive.

La massima altezza d'acqua tollerabile che può sommergere un terreno agricolo dipende dal tipo di coltivazione e dall'altezza della vegetazione. Citeau (vedi *Citeau, J.M., 2003, A New Control Concept in the Oise Catchment Area. Definition and Assessment of Flood Compatible Agricultural Activities, FIG working week, Paris, France*) fornisce alcuni esempi in proposito tenendo conto anche della velocità del flusso: 1 m per frutteti e 0,5 m per i vigneti; velocità massime variano tra 0,25 m/s per i vegetali da campo e 0,5 m/s per i frutteti.

Per le colture in serra i massimi danni da inondazione si verificano per altezze d'acqua pari a 1 m.

Alte velocità possono non solo causare danni diretti alle coltivazioni ma determinare degradazione dei suoli a causa dell'erosione.

Normalmente viene proposto lo schema seguente per la valutazione della vulnerabilità per le varie classi di uso del suolo in funzione dell'altezza e della velocità.



Nella tabella è indicata con **VE(H)** la vulnerabilità determinata nel caso in cui si disponga dei soli valori di altezza idrica, con **VE(H,V)** la vulnerabilità determinata nel caso in cui si disponga anche dei valori di velocità.

Si impone per **VE** il valore 1 per tutti i valori di H e/o V che comportano un valore calcolato **VE** maggiore di tale limite superiore. I valori riportati nella seguente tabella sono indicativi e valori diversi vanno adottati nel caso si disponga di studi che ne avvalorino l'impiego.

ID classe uso suolo	Nome classe uso suolo	Vulnerabilità VE, H in (m), V in (m/s)		
1	Residenziale	<b>VE(H) = 0,5xH</b>		
2	Commerciale e industriale			
3	Strutture ospedaliere, sanitarie, assistenza sociale, scuole e università			
4	Edifici sede di servizi pubblici essenziali	<b>VE(H,V) =</b>	0,5xH	per V<2
7	Turistico-Ricreativo			
10	Reti tecnologiche e di servizio			
11	Strutture e impianti a supporto delle reti di comunicazione e trasporto, tecnologiche e di servizio		0,35xHx(1+0,25V)	per V≥2
5	Agricolo specializzato	<b>VE(H)=H</b>		
		<b>VE(H,V) =</b>	H per V<0,25	
			Hx(1+V) per V≥ 0,25	
6	Agricolo non specializzato	<b>VE(H) = 0,5H</b>		
		<b>VE(H,V) =</b>	0,25xH	per V<0,25
			0,25xHx(1+V)	per V≥0,25
8	Reti di comunicazione e trasporto primarie	<b>VE(H) = 1,25xH</b>		
9	Reti di comunicazione e trasporto secondarie	<b>VE(H,V) =</b>	1,25xH	per V<3
			1.25xHx(1+V)	per V≥3

Nel caso di categoria 6 secondo tabella P.G.R.A. (attribuzione vulnerabilità **VE** per vigneti) per l'allegato I del P.G.R.A. vale:

DESCRIZIONE	LOGICHE di h e v	VE
Altezze d'acqua e velocità tollerabili per lo specifico terreno agricolo	se v ≤ 0.25 m/s e h ≤ 0.5 m	0.5
Altezze d'acqua e velocità tollerabili per lo specifico terreno agricolo	altrimenti	1

Nel caso di categoria 6 secondo tabella P.G.R.A. (attribuzione vulnerabilità **VE** per frutteti e olivi) per l'allegato I del P.G.R.A. vale:

DESCRIZIONE	LOGICHE di h e v	VE
Altezze d'acqua e velocità tollerabili per lo specifico terreno agricolo	se v ≤ 0.5 m/s e h ≤ 1 m	0.5
Altezze d'acqua e velocità tollerabili per lo specifico terreno agricolo	altrimenti	1

Nel caso di categoria 7 secondo tabella P.G.R.A. (attribuzione vulnerabilità **VE** per vegetali da campo) per l'allegato I del P.G.R.A. vale la tabella:

DESCRIZIONE	LOGICHE di h e v	VE
Altezze d'acqua e velocità tollerabili per lo specifico terreno agricolo	se v ≤ 0.5 m/s e h ≤ 1 m	0.5
Altezze d'acqua e velocità tollerabili per lo specifico terreno agricolo	altrimenti	1

Infine nel caso di categoria 7 e 10 secondo tabella P.G.R.A. (attribuzione vulnerabilità **VE** per ambienti naturali e semi-naturali) per l'allegato I del P.G.R.A. vale la tabella:

DESCRIZIONE	LOGICHE di h e v	V <sub>E</sub>
Altezze d'acqua e velocità tollerabili per lo specifico ambiente	se $v \leq 0.25$ m/s	0.25
Altezze d'acqua e velocità tollerabili per lo specifico ambiente	altrimenti	0.5

## 2.2.2 - Calcolo valore esposto EE associato alle attività economiche

Occorre definire una scala di valori relativi che tenga conto dei costi di ripristino, di mancata produzione, di mancata fruizione del servizio, ecc. Inoltre, va tenuto conto della rilevanza locale delle specifiche attività economiche, nel senso di attribuire ai settori agricolo, industriale-commerciale e turistico-ricreativo valori relativi commisurati. La tabella seguente attribuisce il valore economico relativamente ad alcune classi di uso del suolo:

ID classe uso suolo	CLASSI d'uso del suolo	Valore relativo
1	Residenziale	1
2	Commerciale e industriale	0,7
3	Strutture ospedaliere, sanitarie, assistenza sociale, scuole e università	1
4	Edifici sede di servizi pubblici essenziali	1
5	Agricolo specializzato	1
6	Agricolo non specializzato	0,3
7	Turistico-Ricreativo	0,4
8	Reti di comunicazione e trasporto primarie	1
9	Reti di comunicazione e trasporto secondarie	0,5
10	Reti tecnologiche e di servizio	1
11	Strutture e impianti a supporto delle reti di comunicazione e trasporto, tecnologiche e di servizio	1

L'esposizione **EE** relativa alle attività economiche viene quindi espressa attraverso i costi di ripristino, di mancata produzione e di mancata fruizione del servizio. I valori adottati per esprimere detta valenza economica nell'Allegato I del P.G.R.A. sono riassunti nella tabella seguente:

COD	DESCRIZIONE	E <sub>E</sub>
1	Residenziale	1
2	Strutture ospedaliere, sanitarie, assistenza sociale	1
3	Edifici sede di servizi pubblici	1
4	Commerciale e artigianale	1
5	Industriale	1
6	Agricolo specializzato	0.3 ÷ 1
7	Agricolo non specializzato, boschi, prati, pascoli, aree cimiteriali, parchi urbani	0.3
8	Turistico-Ricreativo	0.5
9	Improduttivo	0.1
10	Aree sciabili, Campo da golf, Maneggio	0.3 ÷ 1
11	Campeggi	0.5
12	Reti di comunicazione e trasporto: strade di importanza primaria	1
13	Reti di comunicazione e trasporto: strade di importanza secondaria	0.5 ÷ 1
14	Zona ferroviaria	1
15	Zona per impianti turistici, Zona per attrezzature collettive, Zona per attrezzature collettive sovracomunali, Attrezzature collettive nel sottosuolo	0.3
16	Infrastruttura a rete, Infrastruttura per le comunicazioni	1
17	Strutture a supporto delle reti di comunicazione e trasporto (aeroporti, porti, aree di servizio, parcheggi)	1
18	Zona per la produzione di energia	1
19	Discariche, Impianti di trattamento dei rifiuti, Aree estrattive, Depuratori	0.5
20	Aree su cui insistono impianti di cui all'allegato I del decreto legislativo 18 febbraio 2005, n. 59	1
21	Aree di rilievo storico-culturale e archeologico; e culturali	1
22	Beni ambientali	1
23	Zona militare	0.1 ÷ 1

## **2.3 - Danno associato a ambiente e beni culturali**

### **2.3.1 - Danno associato a beni culturali**

Allo stato attuale non si dispone di elementi conoscitivi o informativi tali da stabilire una vulnerabilità specifica dei singoli beni in funzione delle caratteristiche dell'inondazione, né si ritiene possibile stabilire una scala di valori circa l'importanza relativa dei beni stessi. Per intanto si ritiene cautelativo associare, in fase di sovrapposizione delle aree inondabili con "Beni di rilievo storico-culturale e archeologico", danno = 1, a prescindere dai valori di H e V.

### **2.3.2 - Danno associato a componente ambientale**

Gli eventi di piena giocano un ruolo chiave per il mantenimento dell'integrità ecologica dei sistemi idrografici. Tuttavia, le attività antropiche hanno spesso introdotto alterazioni nei regimi idrici, modifiche significative all'assetto paesaggistico e, in generale, potenziali fonti di rischio che incidono sulla suscettibilità ambientale.

Evers (vedi Evers M., 2006, *The complexity of integrated flood management: decision support Systems. In: Tchiguirinskaia I, Thein KNN, Hubert P (eds) Frontiers in flood research, vol 305. International Association of Hydrological Science (IAHS), Red Book Series.*) descrive la suscettibilità ambientale rispetto alle inondazioni mediante 3 indicatori:

- 1) contaminazione/inquinamento,
- 2) erosione,
- 3) spazi aperti.

1) è causata essenzialmente da tre sorgenti: industrie, rifiuti umani/animali, stagnazione delle acque esondate.

2) può causare disturbi alla superficie del terreno e alla copertura vegetale oltre che compromettere eventuali infrastrutture.

3) si riferisce alle aree con ambiente naturale usate per le attività ricreative all'esterno, quali attrazioni turistiche e riserve naturali.

Un possibile approccio è utilizzare il "layer" delle Aree Protette:

- a) aree designate per l'estrazione di acque destinate al consumo umano a norma dell'articolo 7 (art.7 - Acque utilizzate per l'estrazione di acqua potabile);
- b) aree designate per la protezione di specie acquatiche significative dal punto di vista economico;
- c) corpi idrici intesi a scopo ricreativo, comprese le aree designate come acque di balneazione a norma della direttiva 76/160/CEE;
- d) aree sensibili rispetto ai nutrienti, comprese quelle designate come zone vulnerabili a norma della direttiva 91/676/CEE (Nitrati) e le zone designate come aree sensibili a norma della direttiva 91/271/CEE (Reflui urbani);
- e) aree designate per la protezione degli habitat e delle specie, nelle quali mantenere o migliorare lo stato delle acque è importante per la loro protezione, compresi i siti pertinenti della rete Natura 2000 istituiti a norma della direttiva 92/43/CEE (Direttiva Habitat) e della direttiva 79/409/CEE (Direttiva Uccelli).

I layer da utilizzare per la valutazione del danno in termini di componente ambientale sono:

ID	NOME
12	Discariche, impianti di trattamento dei rifiuti, depuratori, impianti che possono costituire importanti fonti di inquinamento in caso di inondazione (non ricadenti in quelli di cui al punto 13)
13	Impianti di cui all'allegato I del decreto legislativo n. 59 del 18 febbraio 2005

Nel caso in cui l'area protetta sia di tipo d) si pone il danno pari a 1. Negli altri casi occorre valutare la presenza di impianti IED, discariche, impianti di trattamento dei rifiuti, depuratori, impianti che possono costituire importanti fonti di inquinamento in caso di inondazione nel bacino a monte dell'area. In caso affermativo si pone il danno pari a 1. In caso negativo il calcolo del danno può considerarsi ricompreso nella "macrocategoria attività economiche".

L'allegato I del P.G.R.A. Per definire il valore esposto **EA** in relazione alla componente ambientale, analogamente a quanto sopra svolto, si procede in termini relativi tra le diverse classi di uso del territorio avendo in questo caso a riferimento le modifiche che possono essere indotte dall'evento calamitoso sull'assetto ambientale degli elementi coinvolti. I valori **EA** proposti nel P.G.R.A. sono riportati nella tabella seguente.

COD	DESCRIZIONE	EA
1	Residenziale	1
2	Strutture ospedaliere, sanitarie, assistenza sociale	1
3	Edifici sede di servizi pubblici	1
4	Commerciale e artigianale	0.8
5	Industriale	0.3 ÷ 1
6	Agricolo specializzato	0.7
7	Agricolo non specializzato, boschi, prati, pascoli, aree cimiteriali, parchi urbani	0.7
8	Turistico-Ricreativo	0.1
9	Improduttivo	0.3
10	Aree sciabili, Campo da golf, Maneggio	0.3
11	Campeggi	0.1
12	Reti di comunicazione e trasporto: strade di importanza primaria	0.2
13	Reti di comunicazione e trasporto: strade di importanza secondaria	0.1
14	Zona ferroviaria	0.7
15	Zona per impianti turistici, Zona per attrezzature collettive, Zona per attrezzature collettive sovracomunali, Attrezzature collettive nel sottosuolo	0.3
16	Infrastruttura a rete, Infrastruttura per le comunicazioni	0.1
17	Strutture a supporto delle reti di comunicazione e trasporto (aeroporti, porti, aree di servizio, parcheggi)	1
18	Zona per la produzione di energia	1
19	Discariche, Impianti di trattamento dei rifiuti, Aree estrattive, Depuratori	1
20	Aree su cui insistono impianti di cui all'allegato I del decreto legislativo 18 febbraio 2005, n. 59	1
21	Aree di rilievo storico-culturale e archeologico	1
22	Beni ambientali e culturali	1
23	Zona militare	0.1 ÷ 1

### 3 - DETERMINAZIONE DEL RISCHIO

La relazione  $R = P \times V \times E$  è rappresentata per ogni macrocategoria (rischio specifico):

$$RP = P \times VP \times EP = P \times DP$$

$$RE = P \times VE \times EE = P \times DE$$

$$RA = P \times VA \times EA = P \times DA ,$$

essendo **RP**, **RE**, **RA**, **VP**, **VE**, **VA**, **EP**, **EE**, **EA**, **DP**, **DE**, **DA** rispettivamente il rischio, la vulnerabilità, l'esposizione e il danno riferiti alla componente popolazione (**P**), economica (**E**) e ambientale (**A**).

Determinato il rischio specifico al fine di formulare un giudizio complessivo in termini di "rischio totale" R si procede ad una rideterminazione dello stesso per ricondurlo ad un unico valore.

Stabiliti i pesi **PP**, **PE**, **PA** da assegnare alle 3 componenti di rischio il rischio totale viene determinato, per ogni tempo di ritorno, dalla seguente espressione:

$$R = (PP \times RP + PE \times RE + PA \times RA) / (PP + PE + PA).$$

Il rischio finale in ciascun punto del territorio è dato dal massimo rischio che può verificarsi. Al fine di stabilire la classe di rischio (moderato, medio, elevato, molto elevato) vengono introdotti gli intervalli di appartenenza numerica delle classi di rischio, come illustrato nella seguente tabella:

INTERVALLI DI R	DESCRIZIONE	CATEGORIA DI RISCHIO
$0 < R \leq 0.2$	Rischio moderato per il quale i danni sociali, economici ed al patrimonio ambientale sono trascurabili o nulli	R1
$0.2 < R \leq 0.5$	Rischio medio per il quale sono possibili danni minori agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale che non pregiudicano l'incolumità delle persone, l'agibilità degli edifici e la funzionalità delle attività economiche	R2
$0.5 < R \leq 0.9$	Rischio elevato per il quale sono possibili problemi per l'incolumità delle persone, danni funzionali agli edifici e alle infrastrutture con conseguente inagibilità degli stessi, la interruzione di funzionalità delle attività socio-economiche e danni relativi al patrimonio ambientale	R3
$0.9 < R \leq 1$	Rischio molto elevato per il quale sono possibili perdita di vite umane e lesioni gravi alle persone, danni gravi agli edifici, alle infrastrutture ed al patrimonio ambientale, la distruzione di attività socio-economiche	R4