



LA VALUTAZIONE DELLE PIENE

RENZO ROSSO
Politecnico di Milano

INDICE

PREMESSA	3
1. METODO DELLA PORTATA INDICE	5
Esempio 1A. Portata di Progetto T-ennale con il metodo della portata indice	6
2. VALUTAZIONE DEL FATTORE DI CRESCITA	8
2.1. FATTORE DI CRESCITA ATTESO	8
Esempio 2A. Fattore di Crescita nel Sito di una Regione Omogenea (Bisagno a La Presa)	12
Esempio 2B. Fattore di Crescita nel Sito di una Regione di Transizione (Tanaro a Nucetto)	13
2.2. ERRORE STANDARD DI STIMA E LIMITI DI CONFIDENZA DEL FATTORE DI CRESCITA	14
Esempio 2C. Limiti di Confidenza del Fattore di Crescita (Bisagno a La Presa)	15
3. METODI DI VALUTAZIONE DELLA PORTATA INDICE	17
3.1. GENERALITÀ	17
3.2. METODI DIRETTI	18
3.2.1. Metodo diretto AFS	18
Esempio 3A. Bisagno a La Presa: metodo diretto AFS	19
3.2.2. Metodo diretto PDS	20
Esempio 3B. Bisagno a La Presa: metodo diretto PDS	21
3.2.3. Traslazione di stime dirette	22
Esempio 3C. Bisagno a Sant'Agata: traslazione scala-invariante monte-valle	22
3.3. METODI INDIRETTI	23
3.3.1. Formule empiriche	23
Esempio 3D. Bisagno a La Presa: applicazione delle formule empiriche	28
3.3.2. Metodo delle tracce storico-documentali	28
Esempio 3E. Bisagno a Sant'Agata: metodo delle tracce storico-documentali	30
3.3.3. Metodo geomorfoclimatico	31
Esempio 3F. Bisagno a La Presa: metodo geomorfoclimatico	32
Esempio 3G. Bisagno a Sant'Agata: metodo della traslazione geomorfoclimatica	36
3.3.4. Metodi di simulazione idrologica	40
Esempio 3H. Bisagno a La Presa: simulazione dell'evento critico	43
Esempio 3I. Bisagno a La Presa e Ponte Sant'Agata: simulazione Monte Carlo	49
3.3.5. Altri metodi tradizionali	57
4. VALUTAZIONI DI PIENA IN CASI SALIENTI	58
4.1. GENERALITÀ	58
4.2. SITI FLUVIALI DOTATI DI STAZIONI IDROMETRICHE	60
4.2.1. Impostazione del problema	60
4.2.2. Stima della CDF locale contro metodo della portata indice	61
Esempio 4A. Bisagno a La Presa: CDF Locale "contro" metodo della portata indice	63
4.2.3. Stima della portata indice	64
4.3. SITI FLUVIALI PROSSIMI A STAZIONI IDROMETRICHE	66
4.4. SITI FLUVIALI DI BACINI DOTATI DI STAZIONI IDROMETRICHE	68
4.5. SITI FLUVIALI DI BACINI PRIVI DI STAZIONI IDROMETRICHE	71
4.6. SITI FLUVIALI IN CORRISPONDENZA O PROSSIMI ALLE DIGHE	72
4.7. SITI FLUVIALI CARATTERIZZATI DA ELEVATA ANTROPIZZAZIONE	74
4.8. CONTROLLO DI AFFIDABILITÀ	76
Esempio 4H. Controllo della portata di progetto della Dora Riparia a Sant'Antonino di Susa	77
5. RISCHIO RESIDUALE E VALUTAZIONI ECONOMICHE	79
5.1. RISCHIO RESIDUALE E PORTATA DI RISCHIO	79
Esempio 5A. Rischio residuale	79
Esempio 5B. Portata di progetto con rischio residuale assegnato	80
5.2. VALUTAZIONI ECONOMICHE	80
RINGRAZIAMENTI	81
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	82
GLOSSARIO MINIMO	86
NOTE	89



PREMESSA

Il materiale qui riportato è tratto dal "Manuale di Valutazione delle Piene nell'Italia Nord Occidentale: Portata al colmo di piena nel Bacino del Fiume Po e nella Liguria Tirrenica", in corso di preparazione. Il manuale illustra la procedura per la valutazione della portata al colmo di piena associata a un prefissato valore di periodo di ritorno, o frequenza di superamento, nei corsi d'acqua dell'Italia Nord Occidentale, ossia per il bacino del fiume Po e il versante tirrenico della Liguria. La procedura è stata sviluppata dall'Unità Operativa 1.8 del Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (GNDCI) del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) nel quadro del Progetto Speciale di Valutazione delle Piene (VAPI) promosso dalla Linea di Ricerca sulla Previsione e prevenzione dagli eventi idrologici estremi (Linea 1). Essa si avvale anche dei risultati del Progetto Speciale sulla Modellazione degli Eventi di Piena (MIEP) promosso nello stesso ambito e scaturisce dagli studi condotti su questo tema presso il Politecnico di Milano da Daniel Adom, Baldassare Bacchi, Gianfranco Becciu, Daniele Bocchiola, Armando Brath, Paolo Burlando, Elpidio Caroni, Carlo De Michele, Nathabandu Kottegoda, Paolo La Barbera, Marco Mancini, Renzo Rosso e Maria Cristina Rulli.

Con questo manuale, rivolto ai tecnici e agli operatori, s'intende fornire un ausilio per la progettazione e la gestione dei sistemi e delle infrastrutture che interagiscono con i corsi d'acqua e, più in generale, per la prevenzione del rischio idrogeologico, anche in relazione all'applicazione di recenti normative in materia, quali, per esempio, la Legge 267/98 in materia di e dei relativi atti di indirizzo e coordinamento (cfr. anche DL 180/98, DPCM 29.9.98, DL 132/99 e Legge 226/99).

La procedura delineata nel manuale rappresenta un ulteriore stato di avanzamento degli studi rispetto alla preliminare sintesi tecnica di Brath & Rosso (1994) e alla più recente revisione di De Michele & Rosso (2000) per la valutazione delle piene nell'Italia Nord Occidentale. Rispetto alla prima, infatti, essa prevede sia uno sviluppo più articolato degli aspetti a scala regionale del regime di piena, sia una più approfondita definizione delle tecniche di stima a scala di bacino. Inoltre, il manuale presenta in modo dettagliato le modalità di applicazione della procedura sinteticamente descritta in sede di Rapporto VAPI nazionale (De Michele & Rosso, 2000a) e di sistema SIVAPI del GNDCI, al fine di guidare i tecnici e gli operatori nella valutazione pratica della portata al colmo di piena.

Il primo capitolo descrive la metodologia proposta, che prevede due fasi di valutazione. La prima fase, a sua volta descritta nel secondo capitolo, viene svolta a livello regionale, mentre la seconda fase, di cui riferisce il terzo capitolo, viene condotta a livello locale ed è legata allo specifico sito fluviale oggetto di valutazione. Il quarto capitolo particolareggia la fase di valutazione a



scala locale per i diversi tipi di situazione da affrontare nelle applicazioni pratiche. Il quinto capitolo associa alle valutazioni di piena a frequenza assegnata i concetti di orizzonte progettuale e rischio residuale, utili a finalizzare le decisioni sulla mitigazione del rischio alluvionale nelle diverse situazioni. In Appendice si riporta un glossario minimo per la comprensione di alcuni termini specialistici usati nel testo.

Poichè ci si rivolge specificamente a tecnici e operatori, sono state ridotte al minimo indispensabile le formulazioni matematiche, presentando soltanto quelle necessarie allo sviluppo pratico della metodologia. Allo stesso modo, la discussione delle questioni scientifiche viene rimandata alle varie pubblicazioni specialistiche. Inoltre, il glossario richiama in modo semplice e sintetico le definizioni di base e le notazioni adottate.

I riquadri mettono in evidenza le diverse fasi della procedura, comprese le varie alternative metodologiche necessarie ad affrontare le diverse situazioni, che si presentano nella pratica. Ogni applicazione va infatti disegnata sia in ragione della tipologia, della qualità e della quantità dei dati disponibili, sia in relazione alle finalità dello studio intrapreso. Seguendo le indicazioni contenute nei riquadri e i percorsi delineati in forma di diagrammi a blocchi, l'operatore sarà in grado di tracciare il proprio percorso per risolvere il problema di valutazione della portata al colmo di piena secondo la procedura più adatta alla specifica applicazione.

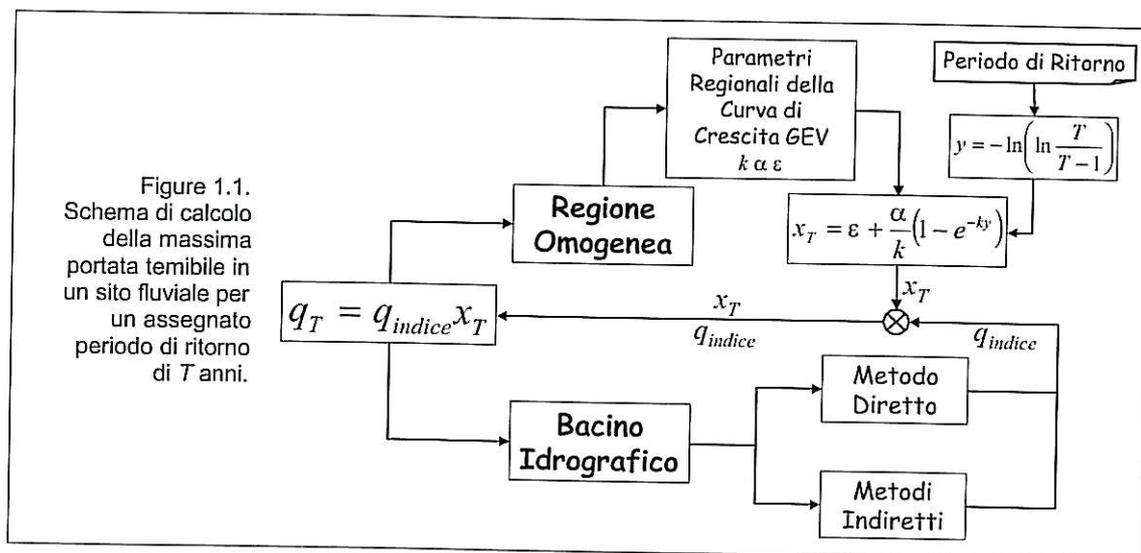
I diversi passi della procedura sono anche illustrati da esemplificazioni. Esse forniscono una traccia di calcolo per l'applicazione dei metodi presentati e sono basate su casi e dati reali. Gli esempi sono disegnati in modo da descrivere una vasta gamma di situazioni, quali si possono presentare nelle diverse condizioni operative a seconda della tipologia, della qualità e della quantità dei dati a disposizione.

1. METODO DELLA PORTATA INDICE

Le procedura di valutazione si basa sul metodo della portata indice (Darlymple, 1960). Esso integra l'informazione idrometrica a scala regionale con l'analisi idrologica di dettaglio dell'assetto del bacino idrografico sotteso dalla sezione fluviale di interesse. In pratica, il metodo porge la portata al colmo temibile sotto forma di prodotto di due fattori: il *fattore di crescita*, x_T , valutato a scala regionale, e la *portata indice*, q_{indice} , valutata a scala di bacino per lo specifico sito fluviale preso in esame. Si ha quindi

$$q_T = q_{indice} x_T, \quad (1)$$

dove q_T indica il valore della portata al colmo che può venire superato con periodo di ritorno T , in anni (vedi Figura 1.1). Per il suo significato probabilistico, il valore di q_T viene anche denominato quantile T -ennale.



Il fattore di crescita misura la variabilità relativa degli eventi estremi alle diverse frequenze; infatti, il rapporto tra due valori di portata con diversi periodi di ritorno $q_T/q_{T'} = x_T/x_{T'}$ risulta una costante caratteristica della regione omogenea per qualsivoglia coppia di valori T' e T'' del periodo di ritorno. La portata indice, invece, è una grandezza locale caratteristica del sito fluviale preso in esame, il cui valore dipende dalle caratteristiche climatiche, geologiche, geomorfologiche, idrografiche e dall'uso del suolo del bacino

idrografico sotteso dal sito stesso.

Il metodo della portata indice, basato sulla regionalizzazione statistica, muove dal presupposto che, per via dell'intrinseca carenza di informazione in una singola serie di osservazioni di piena al fine di estrapolarne le previsioni a bassa frequenza, sia possibile sostituire lo *spazio* al *tempo*. Con questa impostazione, l'insieme delle osservazioni idrometriche di una regione omogenea viene impiegato per esplorare un campo di frequenze osservate di gran lunga superiore a quello coperto da una singola serie di osservazioni. A tale scopo, la metodologia prende in esame una serie indicizzata o *rinormalizzata* di dati di portata al colmo, che presenta una lunghezza sufficiente a stabilire la frequenza degli eventi rari, ossia dei valori di portata indicizzata con elevato periodo di ritorno.

Metodo della portata indice. La portata al colmo di massima piena q_T temibile in un generico sito fluviale è valutabile tramite la relazione

$$q_T = q_{indice} x_T, \quad (1)$$

dove x_T indica un *fattore di crescita*, la cui dipendenza dal prefissato periodo di ritorno T viene fissata da una legge valida a scala regionale, e q_{indice} rappresenta un valore indice della portata al colmo massima annuale, caratteristico del generico sito fluviale.

Per i siti fluviali dove sono localizzate stazioni idrometrografiche dotate di affidabile scala delle portate si pone, in via preliminare, il problema se convenga utilizzare il metodo della portata indice, ovvero eseguire più semplicemente una estrapolazione statistica dei dati osservati nel sito in esame. Questo problema viene diffusamente trattato nel Capitolo 3, laddove viene affrontata la situazione relativa a siti fluviali dotati di stazioni idrometriche (v. §3.5.2). In via affatto indicativa, l'analisi di una singola serie di n' dati di portata al colmo massima annuale, non consente ragionevolmente di prevedere valori di portata temibile con periodo di ritorno superiore a $2n'$ (Benson, 1961; Committee on Techniques for Estimating Probabilities of Extreme Floods, 1988).

Esempio 1A. Portata di Progetto T-ennale con il metodo della portata indice

Si vuole stimare la portata di progetto centennale ($T = 100$ anni) in un sito fluviale per cui sono noti il fattore di crescita $x_{100} = 3.47$, valutato a scala regionale, e la portata indice, $q_{indice} = 100 \text{ m}^3/\text{s}$, valutata in tale sezione fluviale in base alle caratteristiche specifiche del bacino idrografico sotteso. La formula (1) porge

$$q_{100} = x_{100} q_{indice} = 3.47 \times 100 \text{ m}^3/\text{s} = 347 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Se il fattore di crescita è rappresentato dalla relazione

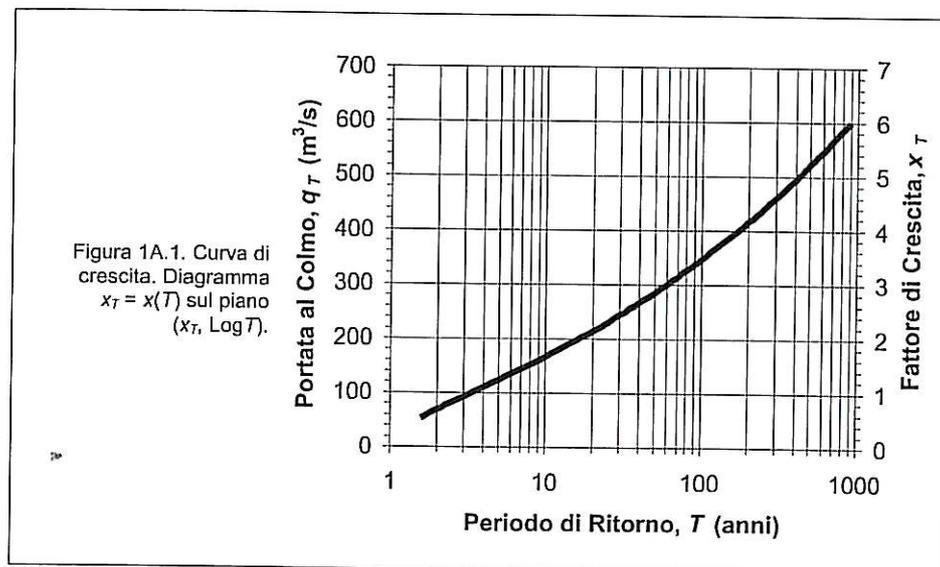


$$x_T = \varepsilon + \frac{\alpha}{k} (1 - e^{-ky_T}) = 0.53 - \frac{0.41}{0.18} (1 - e^{0.18y_T}),$$

dove

$$y_T = -\ln\left(\ln\frac{T}{T-1}\right),$$

la relazione tra la portata al colmo e il periodo di ritorno presenta l'andamento descritto in Figura 1A.1.



2. VALUTAZIONE DEL FATTORE DI CRESCITA

2.1. Fattore di crescita atteso

Il fattore di crescita che compare nella formula (1) viene determinato applicando a scala regionale il modello probabilistico generalizzato del valore estremo, ossia la distribuzione GEV della variabile aleatoria $X = Q/q_{indice}$, dove Q indica il massimo annuale della portata al colmo e la portata indice per il generico sito fluviale corrisponde al valore atteso dei massimi annuali di portata al colmo nel sito stesso. In questo caso, la relazione tra x e T , detta anche *curva di crescita*, risulta espressa dalla relazione

$$x_T = \varepsilon + \frac{\alpha}{k} \left(1 - e^{-ky_T} \right), \quad (2)$$

dove y_T indica la variabile ridotta di Gumbel, funzione del periodo di ritorno T in anni, data da

$$y_T = -\ln \left(\ln \frac{T}{T-1} \right), \quad (3)$$

mentre i parametri k , α ed ε rappresentano, rispettivamente, il parametro di forma, il parametro di scala e il parametro di posizione della distribuzioneⁱ.

I confini delle regioni omogenee di piena dell'Italia Nord Occidentale sono delineati in Figura 2.1 e in Tabella 2.1. In Tabella 2.2 sono riportati i relativi valori dei parametri k , α ed ε stimati con il metodo *L-moments*. Le relative curve di crescita sono tracciate nell'abaco di Figura 2.2, mentre la Tabella 2.3 riporta i valori del fattore di crescita per alcuni valori salienti del periodo di ritorno.

L'identificazione delle regioni omogeneeⁱⁱ dell'Italia Nord Occidentale è stata condotta sviluppando l'impostazione multi-livello di De Michele & Rosso (2001b). Il criterio guida è costituito dal metodo della omogeneità stagionale (Pardè, 1947; Burn, 1997) applicato alle piene massime annuali, i cui risultati sono stati poi sottoposti a verifica utilizzando un ventaglio di criteri, che comprende

- sia il controllo della proprietà di invarianza di scala in senso statistico della portata al colmo di piena (Rosso et al., 1996);
- sia il controllo di omogeneità statistica con i metodi di Wiltshire (1986) e di Hosking & Wallis (1993);
- sia il controllo di bontà dell'adattamento con metodi inferenziali specifici

per la distribuzione GEV, quali il test di Anderson-Darling modificato (Ahmad et al., 1988) e il test di Kolgomorov-Smirnov modificato (Chowdhury, 1991).

Ai fini della regionalizzazione sono stati presi in considerazione sia i dati disponibili per il bacino del fiume Po e la Liguria tirrenica, sia quelli relativi all'Emilia Romagna, alle Marche e al Trentino Alto Adige, previo controllo statistico di qualità (Adom et al., 1988). In Tabella 2.4 sono anche riportati gli esponenti caratteristici della proprietà di invarianza di scala della portata al colmo massima annuale Q al variare della superficie A del bacino sotteso.

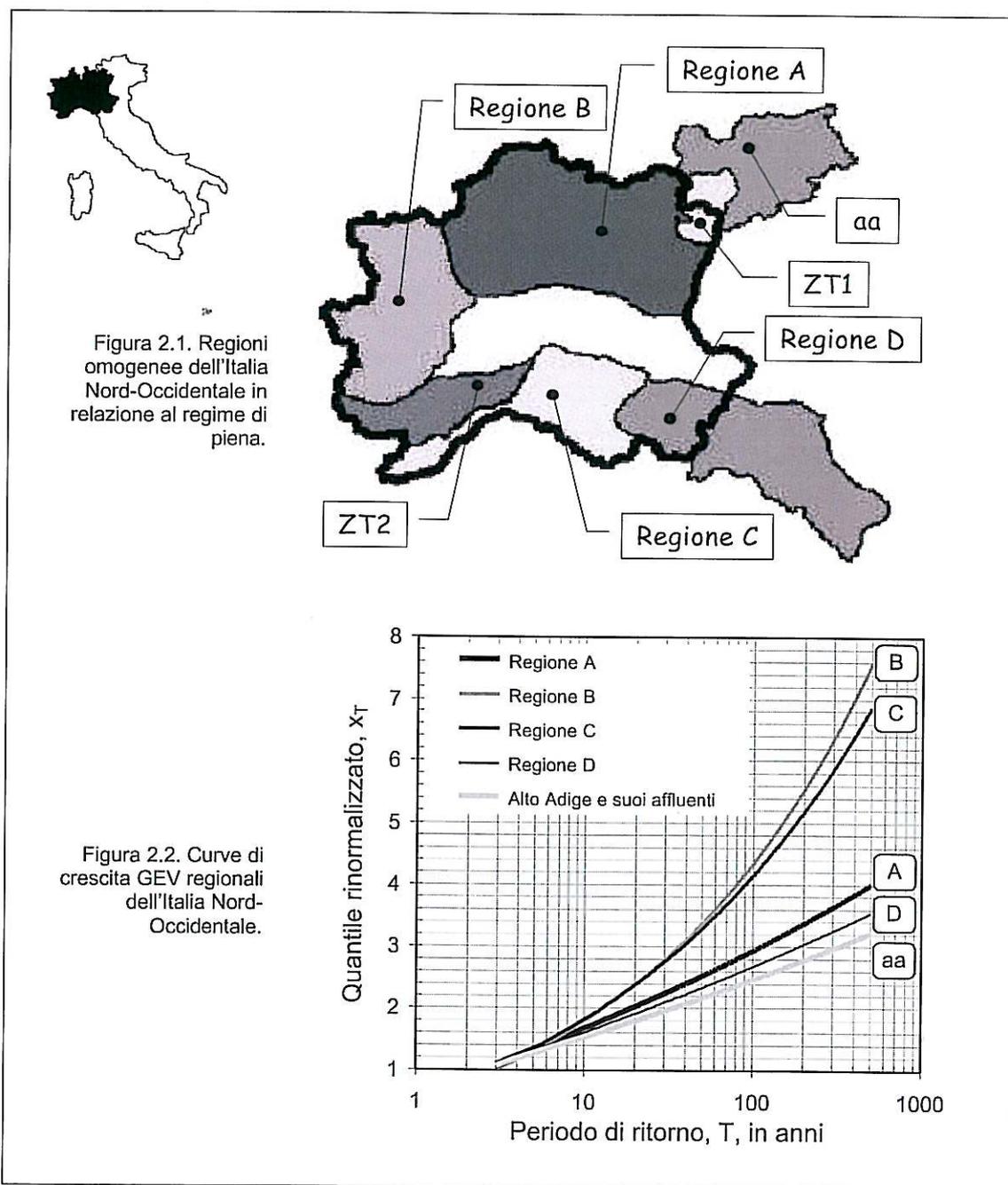


Tabella 2.1. Regioni omogenee di piena dell'Italia Nord Occidentale e loro campo di validità in funzione dell'area A del bacino idrografico sotteso.

Regione	Area idrografica	A , Km ²
A Alpi e Prealpi Centrali	Bacini padani dal Chiese al Sesia	40÷2500
B Alpi e Prealpi Occidentali	Bacini padani dalla Dora Baltea al torrente Grana	40÷1900
C Appennino Nord Occidentale e Bacini Tirrenici	Bacini liguri con foce al litorale tirrenico e bacini padani dallo Scrivia al Taro	15÷1500
D Appennino Nord Orientale	Bacini padani dal torrente Parma al Panaro, compresi i bacini adriatici dal Reno al Conca	6÷1300
aa Alto Adige e suoi Affluenti	Bacini in sponda destra dal Rienza all'Avisio, in sponda sinistra dal Rio Riva al Rio Valsura	90÷2700
ZT1 Zona disomogenea dell'Alto Garda: transizione tra Regione A e Alto Adige	Bacini tributari del lago di Garda e bacino del Noce	20÷1100
ZT2 Zona disomogenea delle Alpi Marittime: transizione tra Regione B e Regione C	Bacino del Tanaro e suoi affluenti	50÷1500

Tabella 2.2 – Parametri della distribuzione GEV del fattore di crescita X per le regioni omogenee di piena dell'Italia Nord Occidentale (n indica la numerosità del campione utilizzato).

Regione	n	α	ε	k
A Alpi e Prealpi Centrali	316	0.365	0.745	-0.110
B Alpi e Prealpi Occidentali	347	0.352	0.635	-0.320
C Appennino NO & Bacini Tirrenici	753	0.377	0.643	-0.276
D Appennino Nord Orientale	439	0.334	0.775	-0.089
aa Alto Adige e suoi affluenti	467	0.292	0.804	-0.088

Tabella 2.3 – Valori del fattore di crescita x_T per alcuni valori salienti del periodo di ritorno T .

Regione	Periodo di Ritorno, anni (Variabile ridotta, y_T)					
	10 (2.250)	20 (2.970)	50 (3.902)	100 (4.600)	200 (5.296)	500 (6.214)
A Alpi e Prealpi Centrali	1.68	2.03	2.52	2.93	3.37	4.00
B Alpi e Prealpi Occidentali	1.80	2.38	3.37	4.33	5.52	7.57
C Appennino NO & B. Tirrenici	1.82	2.38	3.29	4.14	5.17	6.87
D Appennino Nord Orientale	1.61	1.91	2.33	2.67	3.03	3.55
aa Alto Adige e suoi affluenti	1.53	1.80	2.16	2.46	2.77	3.22

Tabella 2.4 – Esponente caratteristico m della relazione di potenza tra la media osservata del massimo annuale di portata al colmo di piena e la superficie del bacino sotteso, $\bar{q} = \bar{q}(1)A^m$, a meno dell'errore standard di stima (in parentesi). Sono anche riportati i valori del contributo unitario caratteristico e del coefficiente di determinazione R^2 relativo alla regressione logaritmica.

	Regione	m	$\bar{q}(1)$ $\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{Km}^{-2m}$	R^2_{\ln}
A	Alpi e Prealpi Centrali	0.799 (± 0.183)	2.098	0.61
B	Alpi e Prealpi Occidentali	0.901 (± 0.148)	0.525	0.76
C	Appennino Nord Occidentale e Bacini Tirrenici	0.750 (± 0.080)	5.200	0.78
D	Appennino Nord Orientale	0.772 (± 0.062)	2.487	0.89
Aa	Alto Adige e suoi affluenti	0.638 (± 0.089)	1.586	0.69

La stima dei parametri della legge GEV regionale è stata condotta in base ai dati di portata al colmo di piena massima annuale (serie AFS) riportati fino all'anno 1970 dalla Pubblicazione n°17 del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (SIMN) per le aree di competenza dell'Ufficio Po-Parma e della Sezione di Genova, rispettivamente il bacino del fiume Po e la Liguria Tirrenica. Grazie alla collaborazione della Sezione di Genova del SIMN è stato altresì possibile integrare il campione della Liguria Tirrenica con i dati relativi al periodo 1970-1993 desunti dalle registrazioni idrometrografiche disponibili. I dati relativi al Trentino Alto Adige sono stati invece forniti dal CNR IRPI di Padova, che ne ha condotto la ricostruzione storica in base alle misure idrometriche disponibili nei corsi d'acqua di quell'area. Per la stima dei parametri è stato utilizzato il metodo "L-moments", che, tra i diversi procedimenti inferenziali, fornisce le prestazioni più robuste in caso di distribuzione GEV (Hosking, 1990; Stedinger et al., 1992).

Fattore di crescita atteso. Una volta individuata l'appartenenza del sito fluviale di interesse a una data regione omogenea in base ai confini di Tabella 2.1, il fattore di crescita viene dedotto dalla Tabella 2.3 ovvero determinato, per l'assegnato periodo di ritorno di T anni, tramite la relazione

$$x_T = \varepsilon + \frac{\alpha}{k} \left(1 - e^{-ky_T} \right), \quad (2)$$

dove la variabile ridotta y_T va calcolata con la formula

$$y_T = -\ln \left(\ln \frac{T}{T-1} \right), \quad (3)$$

e i valori dei parametri k , α ed ε sono dedotti dalla Tabella 2.2.

Esempio 2A. Fattore di Crescita nel Sito di una Regione Omogenea (Bisagno a La Presa)

Si vuole valutare il fattore di crescita del torrente Bisagno alla sezione di La Presa, laddove il Bisagno drena una superficie di circa 34.2 Km². Poichè il corso d'acqua è compreso nella Regione omogenea C, i parametri della curva GEV regionale valgono $\alpha = 0.377$, $\varepsilon = 0.643$, e $k = -0.276$ (vedi Tabella 2.2). La formula (2) porge quindi la seguente curva di crescita:

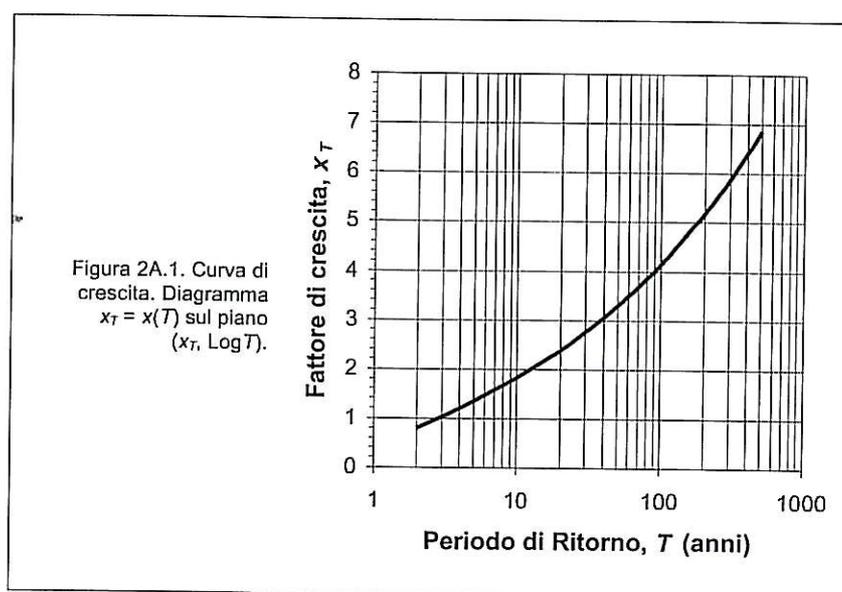
$$x_T = \varepsilon + \frac{\alpha}{k} \left(1 - e^{-ky_T} \right) = 0.643 - \frac{0.377}{0.276} \left(1 - e^{0.276y_T} \right).$$

Volendo valutare il fattore di crescita per $T = 100$, si calcola y_{100} dalla formula (3)

$$y_{100} = -\ln \left(\ln \frac{100}{100-1} \right) = 4.600,$$

che sostituita nella equazione della curva di crescita porge

$$x_{100} = 0.643 - \frac{0.377}{0.276} \left(1 - e^{0.276 \times 4.600} \right) = 4.14.$$



Il valore della portata al colmo 100-ennale sarà quindi pari a 4.14 volte quello della portata indice. In Figura 2A.1 si riporta l'andamento del fattore di crescita al variare del periodo di ritorno.

Per le caratteristiche delle serie AFS osservate in sei stazioni idrometriche, il bacino del fiume Tanaro non è raggruppabile tra i bacini della Regione B, nè tra quelli della Regione C. Poichè le massime piene osservate descrivono un regime tipicamente di transizione tra queste due regioni, tale bacino viene considerato come una zona di transizione (ZT2) tra le stesse regioni B e C. Per valutare le piene nei corsi d'acqua della ZT2 si consiglia quindi la parametrizzazione della curva di crescita GEV sito per sito, pesando i parametri della legge GEV in base alle distanze minime del sito stesso dai confini delle limitrofe regioni B e C. Le stesse considerazioni si applicano alla zona disomogenea dell'Alto Garda, indicata come ZT1, che rappresenta la transizione tra Regione A e Alto Adige (aa). Ai fini pratici, l'interpolazione pesata con la distanza dalle regioni limitrofe si può condurre direttamente sui

valori del fattore di crescita (p.es., sui valori di Tabella 2.3 per i periodi di ritorno salienti ivi riportati).

Esempio 2B. Fattore di Crescita nel Sito di una Regione di Transizione (Tanaro a Nucetto)

Si vuole valutare il fattore di crescita del fiume Tanaro a Nucetto, laddove il corso d'acqua drena una superficie di circa 375 Km², per un periodo di ritorno duecentennale. Poichè il corso d'acqua è compreso nella regione di transizione ZT2, i valori della relativa curva di crescita vengono calcolati in base alla distanza dalle regioni omogenee adiacenti, la Regione B e la Regione C, dalle quali il sito dista 36.7 e 18.3 Km, rispettivamente. I relativi pesi sono quindi

$$w_B = \frac{1/d_B}{1/d_B + 1/d_C} = \frac{1/36.7}{1/36.7 + 1/18.3} = 0.333,$$

$$w_C = \frac{1/d_C}{1/d_B + 1/d_C} = \frac{1/18.3}{1/36.7 + 1/18.3} = 0.667.$$

I parametri della curva GEV assumono i valori $\alpha_B = 0.352$, $\varepsilon_B = 0.635$ e $k_B = -0.320$ nella Regione B; mentre per la Regione C valgono: $\alpha_C = 0.377$, $\varepsilon_C = 0.643$ e $k_C = -0.276$ (vedi Tabella 2.2). I parametri del sito in esame vengono quindi valutati pesando tali parametri con i pesi w_B e w_C , ottenendo

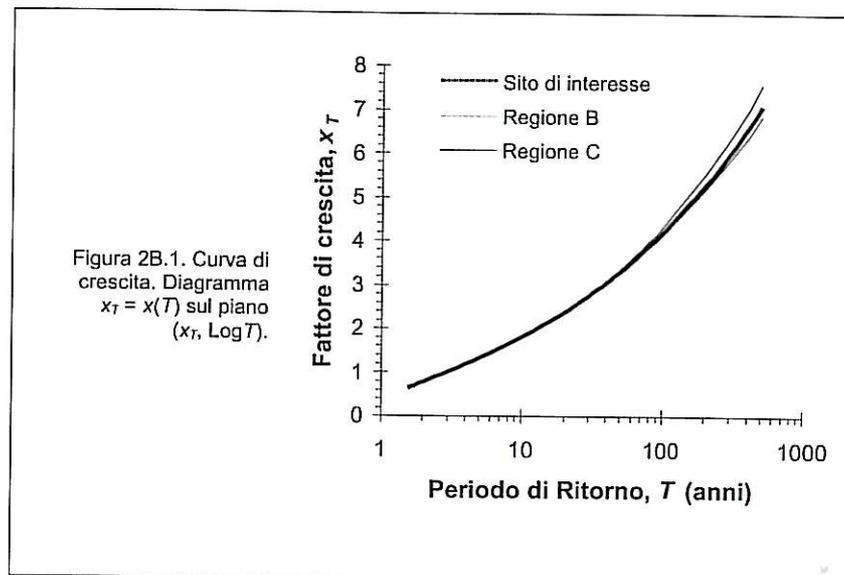
$$\alpha = w_B \alpha_B + w_C \alpha_C = 0.369,$$

$$\varepsilon = w_B \varepsilon_B + w_C \varepsilon_C = 0.640,$$

$$k = w_B k_B + w_C k_C = -0.291.$$

La formula (2) si particolarizza quindi come

$$x_T = \varepsilon + \frac{\alpha}{k} (1 - e^{-ky_T}) = 0.640 - \frac{0.369}{0.291} (1 - e^{0.291y_T}).$$



Volendo valutare il fattore di crescita per $T = 200$, si calcola y_{200} dalla formula (3)

$$y_{200} = -\ln \left(\ln \frac{200}{200-1} \right) = 5.296,$$

che sostituita nella (2) porge

$$x_{200} = 0.640 - \frac{0.369}{0.291} (1 - e^{0.291 \times 5.296}) = 5.28.$$

Il valore della portata al colmo 200-ennale sarà quindi pari a circa 5.3 volte quello della portata indice. In Figura 2B.1 si riporta l'andamento del fattore di crescita al variare del periodo di ritorno.

2.2. Errore standard di stima e limiti di confidenza del fattore di crescita

Le valutazioni di piena comportano anche una valutazione dell'incertezza con cui le previsioni statistiche vengono calcolate. In generale, l'incertezza delle previsioni statistiche viene misurata dagli intervalli di confidenza dei quantili stimati della variabile aleatoria in esame. Fissato un livello di significatività α , cui corrisponde una confidenza pari a $100(1-\alpha/2)\%$, l'intervallo di confidenza del quantile rinormalizzato con assegnato periodo di ritorno è dato dai limiti

$$\hat{x}_T^- = x_T - \zeta_{\alpha/2} \sqrt{\text{Var}(\hat{x}_T)}, \text{ e } \hat{x}_T^+ = x_T + \zeta_{\alpha/2} \sqrt{\text{Var}(\hat{x}_T)} \quad (4)$$

dove il simbolo $\hat{\cdot}$ indica la stima del quantile x_T , e $\zeta_{\alpha/2} = \Phi^{-1}(1-\alpha/2)$ l'inversa della funzione di distribuzione di probabilità della variabile normale standard, $\Phi(\zeta) = \text{Pr}[Z \leq \zeta]$, superato con una probabilità pari a $\alpha/2$. Occorre quindi determinare la varianza di stima $\text{Var}[\hat{x}_T]$, che dipende sia dalla distribuzione di probabilità, sia dal metodo di stima dei parametri.

In letteratura sono disponibili diverse formule per la valutazione di $\text{Var}[\hat{x}_T]$. La formulazione approssimata della varianza asintotica di stima del quantile x_T , ottenuta da Hosking et al. (1985) per la distribuzione GEV/PWM, dove i parametri della distribuzione sono stimati attraverso i momenti pesati in probabilità, può comportare imprecisioni per campioni di dimensioni esigue e, soprattutto, risulta di difficile impiego pratico per la sua complessità. Sulla base di simulazioni Montecarlo, Lu & Stedinger (1992) hanno ricavato una formula per la misura dell'errore di stima del quantile *GEV* nel caso di campioni di numerosità limitata, $40 \leq n \leq 70$, che in virtù della sua iperparametrizzazione presenta anch'essa una limitata applicabilità. La formula approssimata proposta da De Michele & Rosso (2001a) per la valutazione della varianza di stima del quantile adimensionale della GEV/PWM,

$$\text{Var}[\hat{x}_T] = \frac{\alpha^2}{n} \exp\{y_T \exp[-1.823k - 0.165]\}, \text{ per } k \leq 0, \quad (5)$$

dove y_T è la variabile ridotta di Gumbel, n è la numerosità del campione regionale rinormalizzato, α e k sono i parametri della distribuzione regionale *GEV*, fornisce buoni risultati sia per lunghe serie di dati, sia per campioni di numerosità limitata e si raccomanda nelle applicazioni pratiche per la sua semplicità. In Tabella 2.5 sono riportati, per alcuni valori salienti di T , i limiti di confidenza calcolati con $\zeta_{\alpha/2} = 1$. Tali limiti, talora denominati *limiti sigma*, sono i valori di $x_T \pm \sigma_{\hat{x}_T}$, che si ottengono appunto per il valore di $\zeta = 1$, cui



corrisponde un livello di significatività $\alpha \cong 0.32$, ossia una confidenza 84%.

Errore standard di stima e limiti di confidenza del fattore di crescita. Noti i valori di n , α e k in base alle procedure del paragrafo precedente, si calcola $Var[\hat{x}_T]$ con la formula

$$Var[\hat{x}_T] = \frac{\alpha^2}{n} \exp\{y_T \exp[-1.823k - 0.165]\}, \quad (5)$$

per il prefissato periodo di ritorno T , dove il valore di y_T viene ottenuto dalla formula (3). Fissato un livello di significatività α e un corrispondente livello di confidenza di $100(1-\alpha/2)\%$, va calcolato il relativo valore di $\zeta_{\alpha/2} = \Phi^{-1}(1-\alpha/2)$. I risultati vanno sostituiti nella formula

$$\hat{x}_T^{+,-} = \hat{x}_T \pm \zeta_{\alpha/2} \sqrt{Var(\hat{x}_T)}, \quad (4)$$

che porge la coppia dei valori dell'intervallo di confidenza del quantile rinormalizzato per l'assegnato periodo di ritorno. In Tabella 2.5 sono riportati i valori dei limiti sigma ($\zeta_{\alpha/2} = 1$) per alcuni valori salienti di T .

Tabella 2.5 – Valori dei limiti di confidenza del fattore di crescita x_T per alcuni valori salienti del periodo di ritorno T , avendo fissato un livello di confidenza corrispondente a $\zeta_{\alpha/2} = 1$ (limiti sigma).

Regione	Periodo di Ritorno, anni					
	10	20	50	100	200	500
A Alpi e Prealpi Centrali	1.61÷1.74	1.93÷2.12	2.37÷2.68	2.71÷3.15	3.05÷3.69	3.49÷4.51
B Alpi e Prealpi Occidentali	1.69÷1.90	2.20÷2.56	3.00÷3.74	3.71÷4.95	4.47÷6.58	5.45÷9.69
C Appennino NO & B. Tirrenici	1.75÷1.89	2.27÷2.49	3.07÷3.50	3.79÷4.49	4.60÷5.74	5.78÷7.95
D Appennino Nord Orientale	1.56÷1.66	1.84÷1.98	2.22÷2.44	2.52÷2.83	2.81÷3.26	3.19÷3.90
aa Alto Adige e suoi affluenti	1.49÷1.57	1.74÷1.85	2.07÷2.26	2.33÷2.59	2.59÷2.96	2.92÷3.52

Esempio 2C. Limiti di Confidenza del Fattore di Crescita (Bisagno a La Presa)

Per la curva di crescita del torrente Bisagno alla sezione di La Presa, valutata nell'Esempio 2A, si vuole conoscere l'errore standard di stima del fattore di crescita per un periodo di ritorno $T = 80$ anni. I parametri della curva GEV regionale (Regione C) valgono $\alpha = 0.377$, $\varepsilon = 0.643$, e $k = -0.276$ e sono stati stimati sulla base di $n = 753$ dati AFS (vedi Tabella 2.2). Sostituendo nella formula (5) il valore di y_{80} ottenuto dalla formula (3), ovvero $y_{80} = -\ln\{-\ln[80/(80-1)]\} = 4.376$, si ricava:



$$\text{Var}[\hat{x}_{80}] = \left(\frac{\alpha^2}{n}\right) \exp\{y_{80} \exp[-1.823k - 0.165]\} = \left(\frac{0.377^2}{753}\right) e^{4.376 \exp(1.823 \times 0.276 - 0.165)} = 0.08727,$$

da cui si calcola il seguente errore standard di stima: $ess = \sqrt{\text{Var}(\hat{x}_T)} = 0.295$.

Volendo determinare i limiti di confidenza per un livello di significatività α del 5%, si calcola (v. Tabella 2C.1)

$$\zeta_{0.05/2} = F^{-1}(1 - 0.05/2) = F^{-1}(0.975) = 1.960,$$

nonchè, dalla formula (2),

$$\hat{x}_{80} = 0.643 - \frac{0.377}{0.276} \left(1 - e^{0.276 \times 4.376}\right) = 3.85.$$

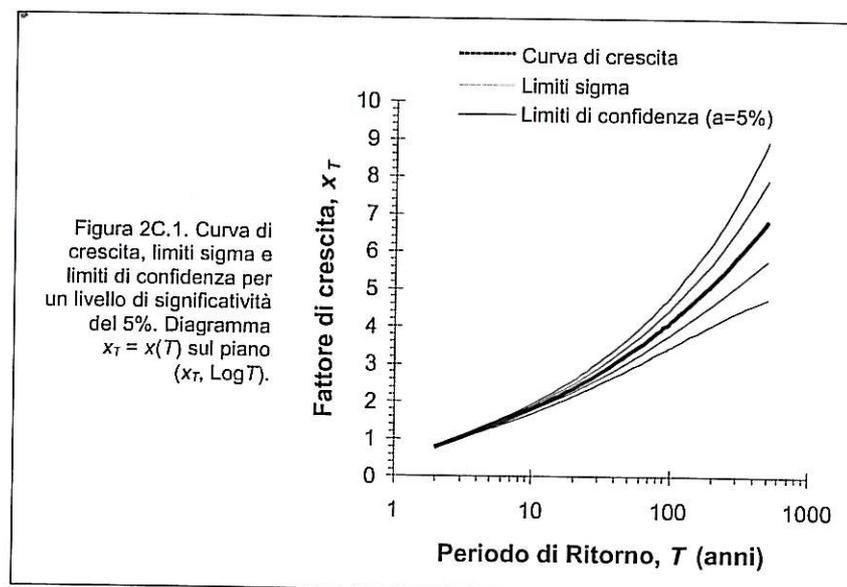
che sostituiti nella formula (4) porgono

$$\hat{x}_{80}^+ = \hat{x}_{80} + \zeta_{0.05/2} \sqrt{\text{Var}(\hat{x}_{80})} = 3.85 + 1.960 \times 0.295 = 4.43,$$

$$\hat{x}_{80}^- = \hat{x}_{80} - \zeta_{0.05/2} \sqrt{\text{Var}(\hat{x}_{80})} = 3.85 - 1.960 \times 0.295 = 3.27.$$

Tabella 2C.1. Valori della variabile normale standard per alcuni valori salienti della probabilità di non superamento.

$\Phi(\zeta) = \text{Pr}[Z \leq \zeta] =$	0.5	0.6	0.7	0.8	0.84	0.90	0.95	0.975	0.99
$\zeta =$	0.00000	0.253	0.524	0.842	1.000	1.282	1.645	1.960	2.326



Potremo quindi affermare con una confidenza del 95% che il valore della portata al colmo 80-ennale sia compreso tra le 3.3 e le 4.4 volte quello della portata indice. I corrispondenti limiti sigma, valutati per $\zeta_{\alpha/2} = 1$, sono invece 3.55 e 4.14. In Figura 2C.1 sono riportati la curva di crescita, i relativi limiti sigma e i relativi limiti di confidenza, per un livello di significatività α del 5%, al variare del periodo di ritorno di progetto.