

CORSO DI LAUREA TRIENNALE RTTP
Curriculum in TUTELA e RIASSETTO DEL TERRITORIO

**Corso di Tutela del paesaggio agricolo-forestale e riassetto
idraulico del territorio**

Titolare: Prof. Mario A. Lenzi

Classificazione morfologica dei sistemi fluviali

Classificazioni dei corsi d'acqua

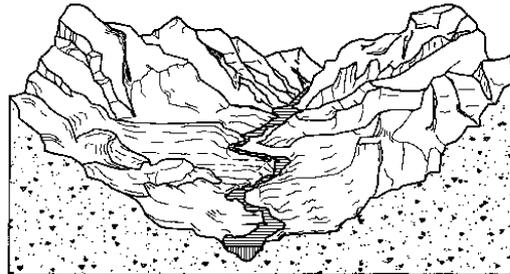
- Numerose, a diversi livelli di dettaglio. Ma non esistono limiti netti tra un tipo morfologico ed un altro.
- Possono essere basate su criteri:
 - di localizzazione all'interno del bacino
(*tratto montano, pedemontano, vallivo*)
 - geometrici, planimetrici
(*canali meandriiformi, a canali intrecciati, rettilinei, ecc...*)
 - sedimentologici
(*corsi d'acqua in roccia, ghiaiosi, sabbiosi, ecc...*)
 - di dinamica evolutiva
(*tratto di scavo, di trasporto, di deposito*)
 - delle forme di fondo
(*tratto a gradinata, a letto piano, a dune, ecc...*)
 - combinati

Uno stesso tratto può essere quindi classificato in modi diversi a seconda del criterio adottato !!

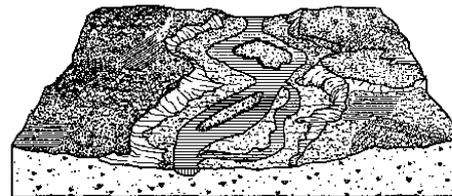
Schematizzazione dei vari tratti di un corso d'acqua



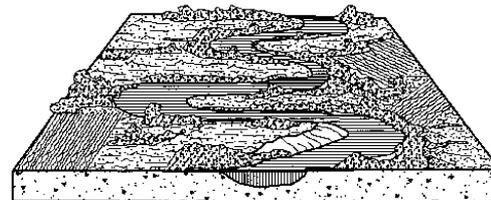
Tratto montano o bacino di raccolta



Tratto pedemontano

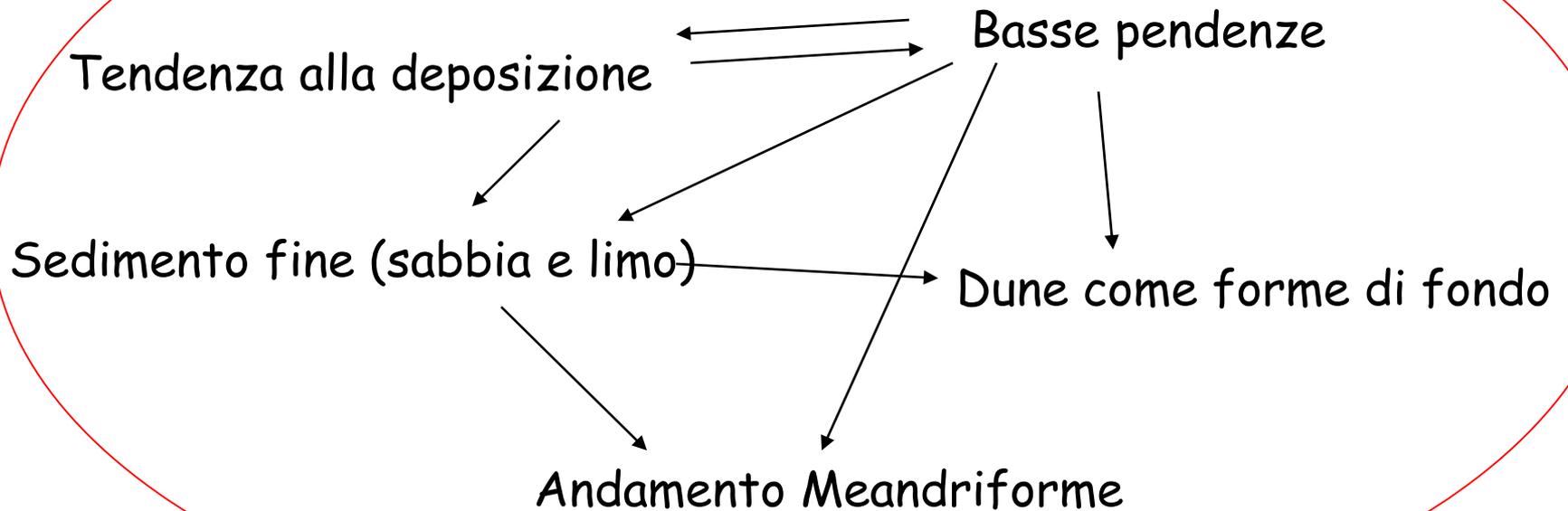


Tratto vallivo

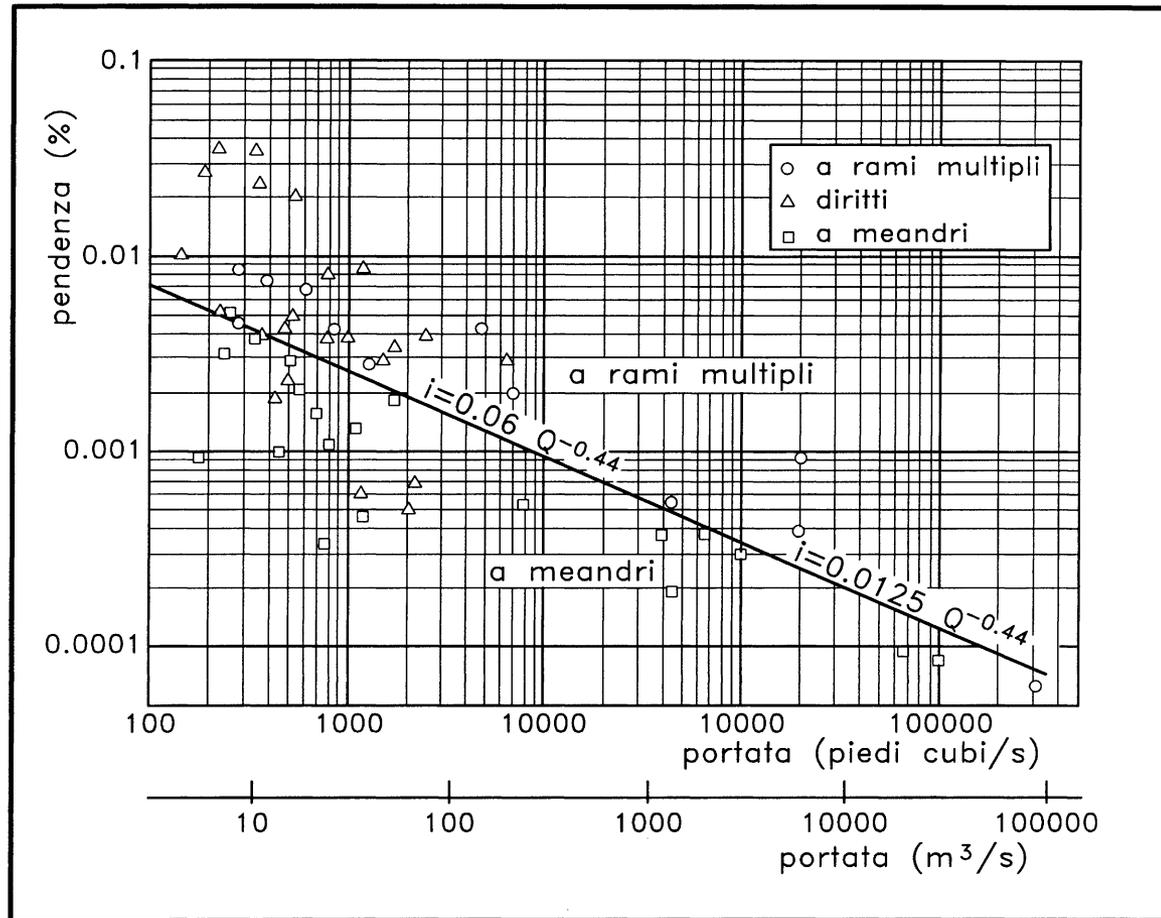


Comunque, i vari criteri sono interconnessi, ad esempio:

tratto vallivo

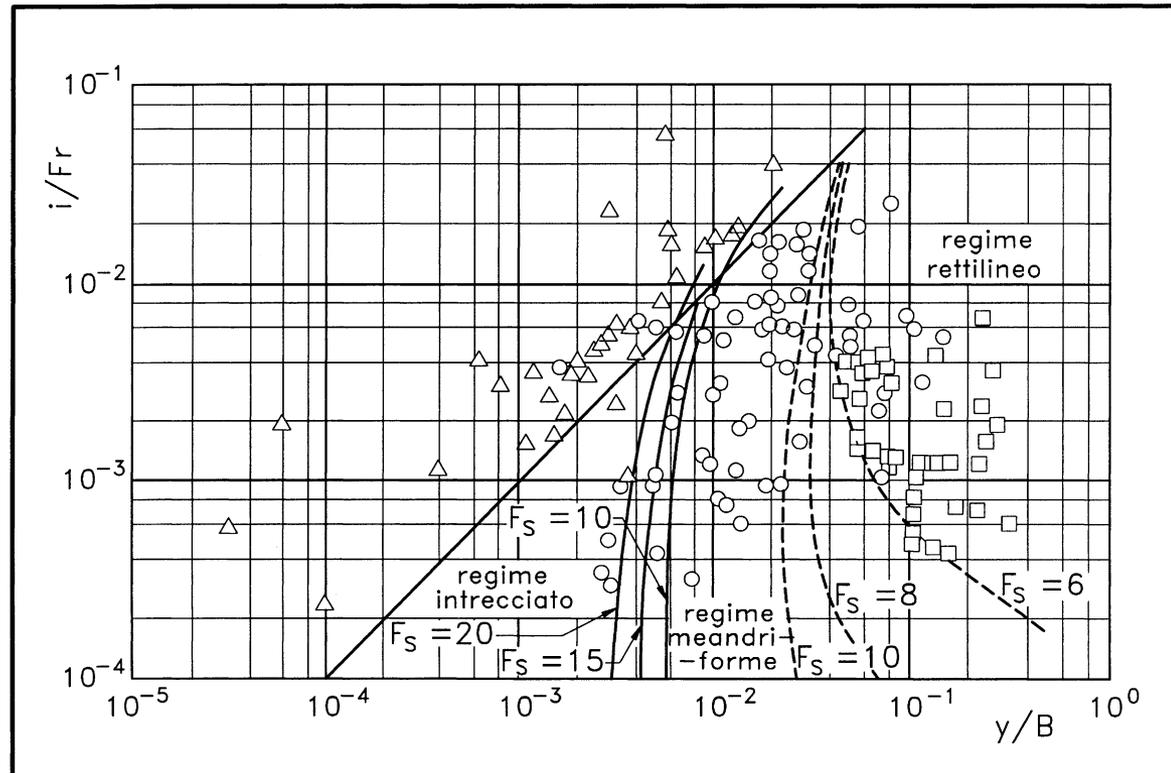


In funzione delle due sole grandezze pendenza e portata a piene rive Leopold e Wolman (1957) stabilirono un criterio di classificazione che distingue i corsi d'acqua a canali rettilinei, a canali intrecciati e meandri.



Più recenti ricerche teoriche e di laboratorio (Blondeaux e Seminara, 1983) hanno individuato un criterio di classificazione basato sui tre parametri adimensionali:

- i / Fr (pendenza/ N° Froude della corrente)
- y / B (rapporto tirante/larghezza del canale)
- F_s (N° di Froude sedimentologico)



Classificazione di Billi (1994)

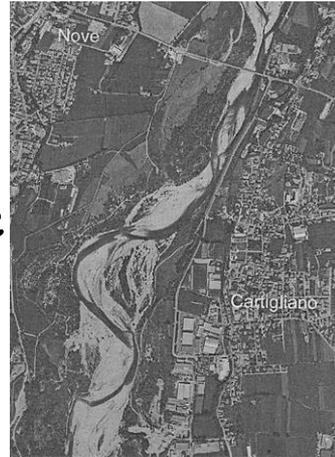
Rettilineo



A canali intrecciati



Pseudomeandriforme
(Wandering)

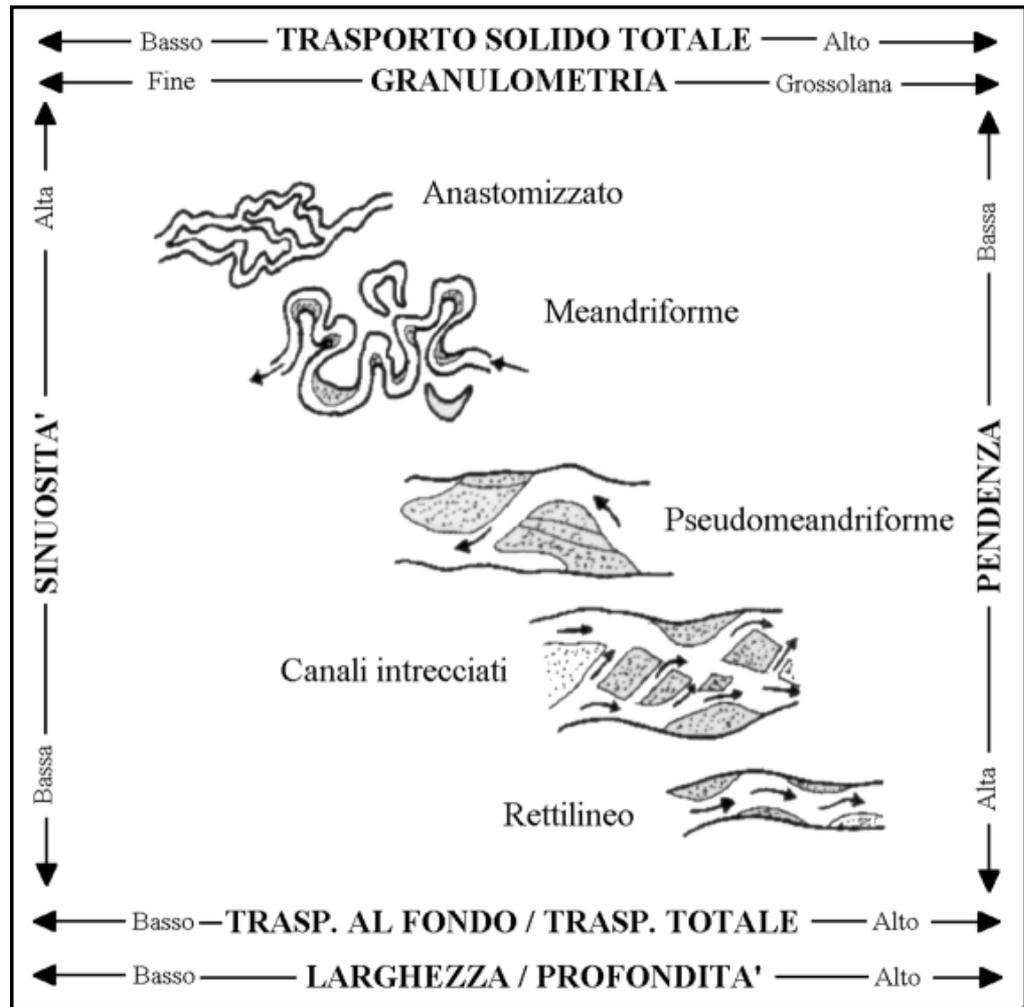


Meandriforme



Anastomizzato





Corsi d'acqua rettilinei

Sono piuttosto rari, in genere non si riscontrano tratti rettilinei di lunghezza superiore a 10 volte la larghezza d'alveo. Anche se le sponde sono rettilinee, il filone principale segue spesso un percorso leggermente sinuoso, legato alla presenza di barre alternate. Il parametro sinuosità assume valori prossimi all'unità, sia per portate di piena che di morbida.

Si formano prevalentemente in zone montane, dove le pendenze sono elevate ($>0.5-1\%$) con forte alimentazione di sedimenti grossolani. Rari esempi su pendenze bassissime in zone costiere. I corsi d'acqua rettilinei di montagna occupano lo stretto fondo di valli a V e possiedono una piana alluvionale poco sviluppata (ad alta energia, vedi "Piane alluvionali").

Sono comuni gli affioramenti rocciosi; se essi predominano allora l'alveo viene definito a fondo fisso e ciò indica una capacità di trasporto nettamente maggiore dell'alimentazione solida. L'evoluzione morfologica degli alvei scavati in roccia è molto più lenta di quelli alluvionali (cioè che scorrono sui propri sedimenti) ed è legata alle caratteristiche litologiche del substrato.



Se è presente sedimento, esso va usualmente a formare barre laterali alternate caratterizzate da larghezze dello stesso ordine di grandezza del canale e da lunghezze più variabili, fra 2 e 7 volte la larghezza del canale. Il sedimento si presenta più grossolano alla testa della barra (parte di monte) perché investito direttamente dalla corrente; la coda della barra presenta materiale più fine (fino a sabbia) deposto in seguito alla separazione del flusso (correnti secondarie a minor velocità)



Le barre sono piuttosto mobili e durante gli eventi di piena tendono a spostarsi sottocorrente rimanendo sempre aderenti alla stessa sponda, per erosione della testa ed accrescimento della coda. Altre volte il loro sedimento viene totalmente mobilizzato e le barre vengono riformate a valle o alla stessa posizione da nuovo materiale proveniente da monte.

I canali rettilinei montani non presentano le forme di fondo tipiche dei corsi d'acqua sabbiosi descritte in precedenza. Essi, se a fondo mobile, presentano morfologie a rapida, a *step-pool*, a fondo piano ed a *riffle-pool* (si veda in seguito la classificazione di Montgomery e Buffington).

La dinamica dei corsi d'acqua rettilinei è piuttosto limitata date le condizioni al contorno molto vincolanti. Data la ristrettezza della piana alluvionale, sono poco frequenti fenomeni di avulsione (abbandono dell'alveo e formazione di un nuovo canale, vedi "canali meandriformi"). Al contrario, erosioni di sponda e modifiche del profilo longitudinale (incisione-sovralluvionamento) sono processi comuni e fonte di problematiche per la sicurezza idraulica. Fenomeni di avulsione sono invece molto comuni e spesso disastrosi all'uscita delle vallate, sui conoidi alluvionali.



Barra laterale

Erosione di sponda



Torrente Maso di Spinelle (TN):
Durante l'evento del Novembre 1966 (tempo di ritorno > 100 anni) il profilo si è abbassato di 15-25 m.



Fenomeno di avulsione su un conoide alpino, in occasione di una colata detritica.

Corsi d'acqua pluricursali a canali intrecciati (*braided*)

Sono piuttosto comuni, e si sviluppano in una grande varietà di ambienti. Nelle aree periglaciali (clima temperato umido o freddo) complessi sistemi *braided* si formano su ampie pianure alluvionali ghiaiose, mentre negli ambienti semi-aridi si hanno larghi fiumi a canali intrecciati ad alvei sabbiosi. In ambiente alpino, si trovano spesso in zona montana al fondo delle valli glaciali fino alla zona pedemontana, fin dove l'alveo è prevalentemente formato da ghiaia (Tagliamento, Piave, Brenta), con pendenze variabili tra 0.01% a 0,1%.



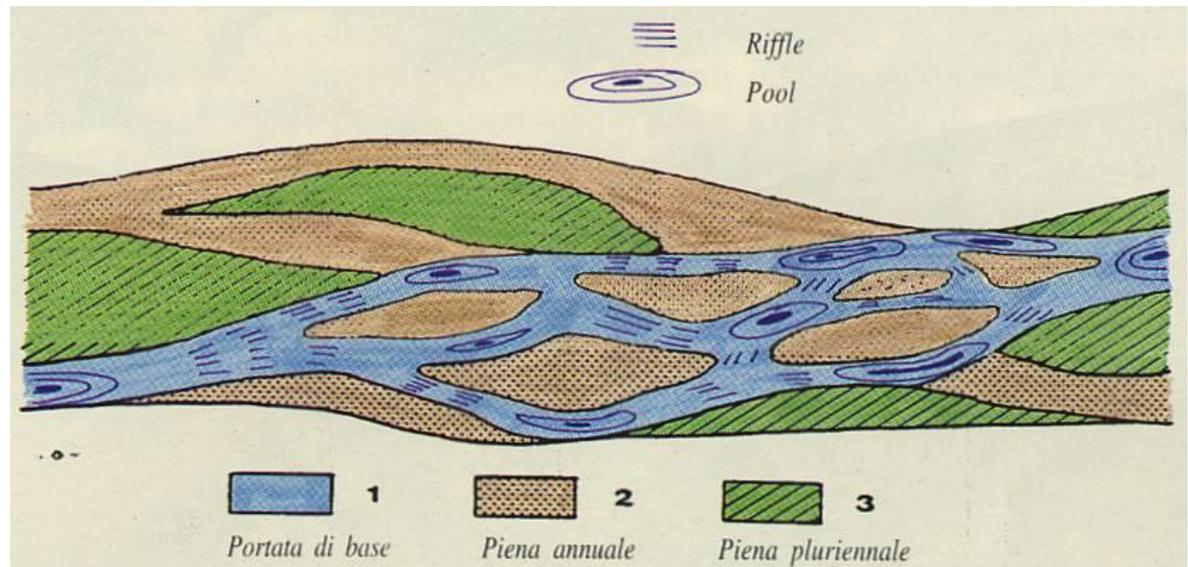
La loro formazione è favorita da condizioni energetiche (pendenza) sostenute, portate molto variabili, elevato trasporto solido di fondo e sponde non coesive.

Presentano alvei molto ampi costituiti da due o più canali - con presenza di *riffle* e *pool* - di simili dimensioni che si intersecano separati da barre longitudinali e isole a forma di losanga. Il rapporto larghezza/profondità è generalmente superiore a 40 ed arriva fino a 300.

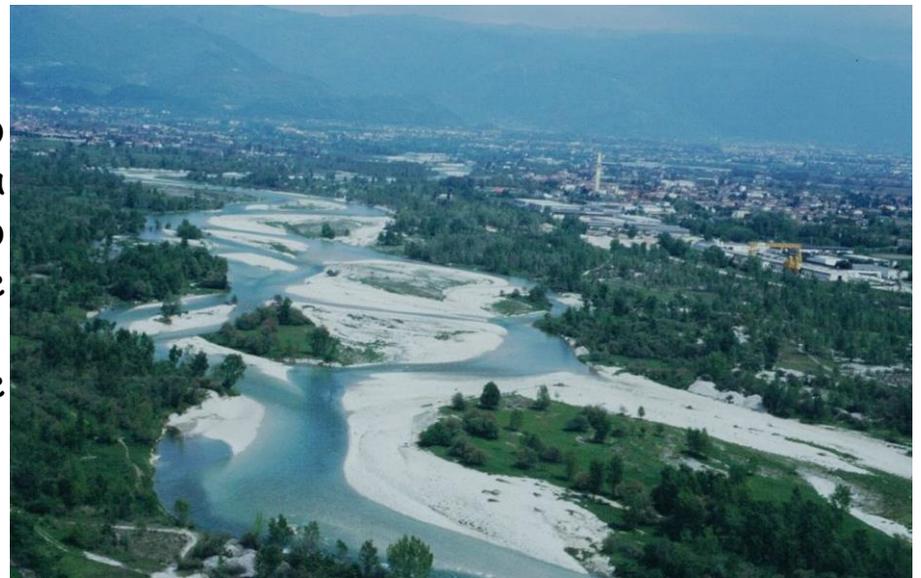
Nei fiumi *braided* si osservano barre poste a diversi livelli topografici. Si possono tuttavia suddividere in due grandi categorie: quelle soggette a modificazioni anche durante piene ordinarie, e quelle invece raggiunte soltanto durante eventi di maggior intensità.

Le barre più frequentemente sommerse sono prive di vegetazione, e presentano segregazione dei sedimenti tra testa e coda come le barre alternate dei canali rettilinei. Nelle barre più stabili, essendo più elevate, prevalgono superficialmente i sedimenti più fini, simili per granulometria a quelli di esondazione, che favoriscono lo sviluppo di una copertura vegetale. A sua volta questa contribuisce fortemente a stabilizzare la barra stessa aumentando la resistenza al moto e quindi diminuendo la velocità del flusso sopra la barra, in tal modo favorendo l'ulteriore deposizione di sedimento fine, secondo un processo di retroazione (*feedback*) positiva.

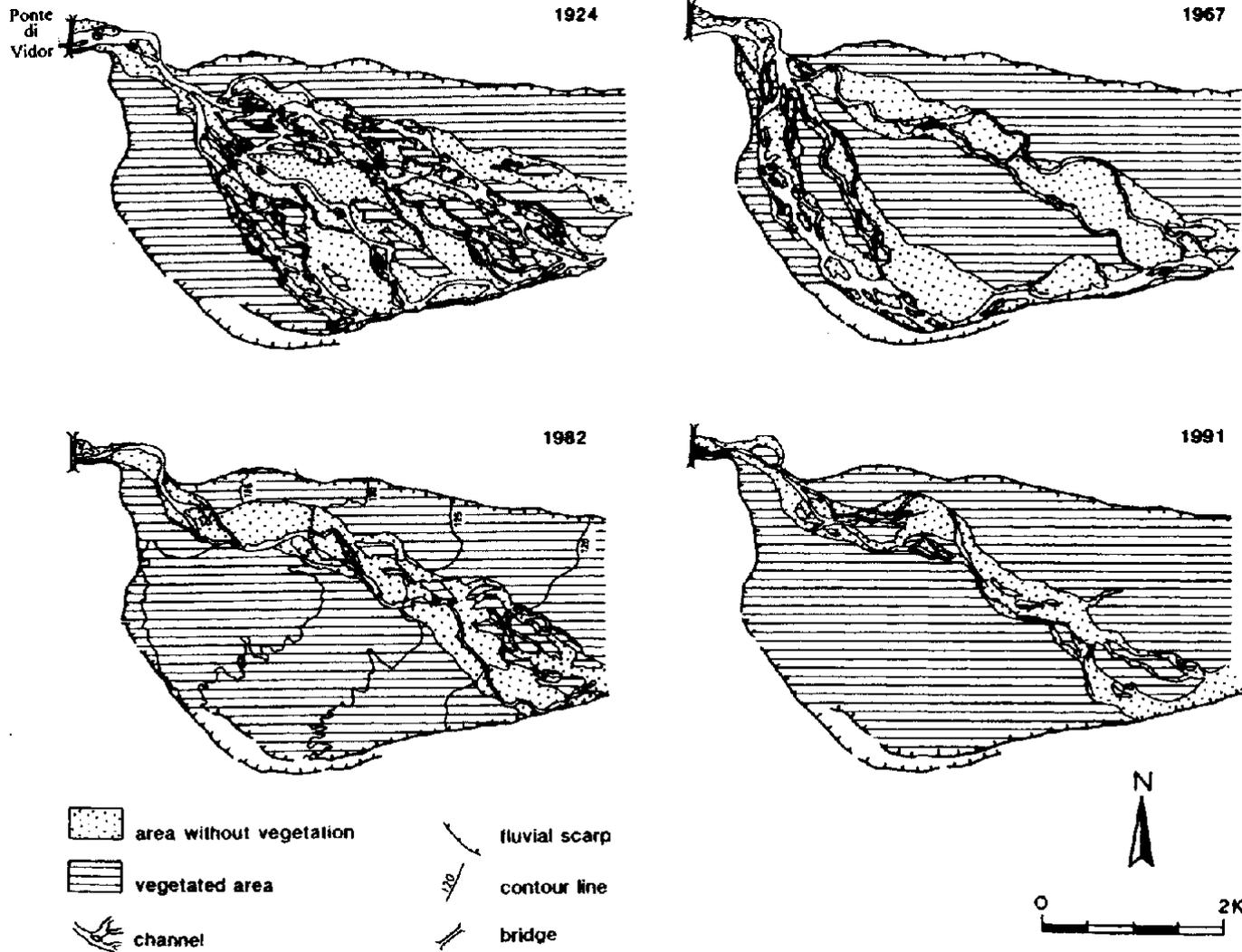
I fiumi a canali intrecciati sono caratterizzati da elevata dinamicità, con spostamento delle barre e dei canali durante eventi di piena. Le migrazioni laterali avvengono per lo più all'interno dell'alveo di piena, e soltanto durante eventi eccezionali si hanno modifiche del suo tracciato planimetrico con anche fenomeni di avulsione, specialmente se il fiume scorre su un conoide alluvionale.



Durante le fasi di magra pochi canali sono occupati dal flusso. Al crescere della portata, sempre più canali si attivano fino a riempire totalmente l'alveo di piena che può essere largo anche vari chilometri. Considerando tale alveo, la sinuosità è prossima all'unità.



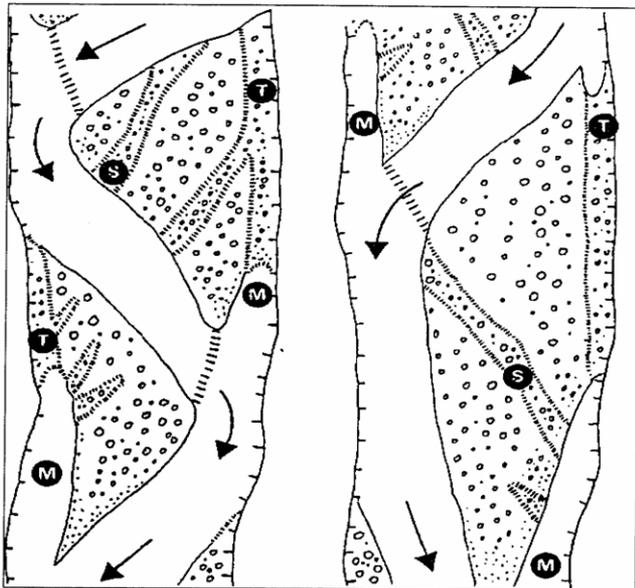
Sembra che nel passato i corsi d'acqua pluricursali fossero più comuni, ad esempio lungo l'Appennino. Del resto, anche fiumi tuttora *braided* come i tratti pedemontani di Piave e Brenta (figura in alto) presentano oggi gradi di intrecciamento nettamente minori rispetto al passato. È ipotizzato che le modificazioni verso un andamento unicursale derivino dall'attività antropica, tramite l'artificializzazione dei regimi delle portate, la riduzione del trasporto solido per intercettazione negli invasi artificiali, il prelievo di inerti in alveo.



Evoluzione del Piave presso le Grave di Ciano (Treviso) dal 1924 ad oggi.

Corsi d'acqua pseudomeandriiformi (*wandering*)

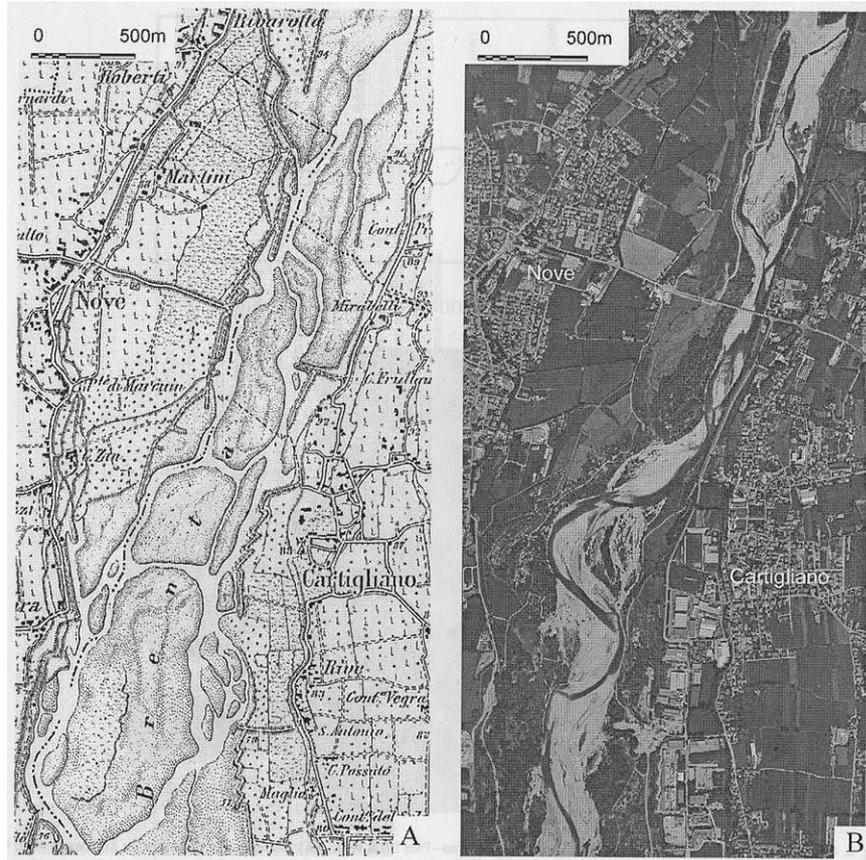
Sono una categoria intermedia tra i fiumi *braided* e quelli meandriiformi. Presentano una sinuosità medio-bassa (1.3-1.5). Sono caratterizzati da barre laterali alternate con spesso forma a mezza luna, e da un solo canale attivo principale. Sono presenti invece canali secondari aderenti ad una delle due sponde, attivi (canale di taglio) o inattivi (canale di morta). Sulle barre si hanno inoltre canali secondari trasversali.



Il primo si forma durante piene di una certa entità per taglio longitudinale della barra laterale, e può successivamente occludersi e venir abbandonato, od al contrario allargarsi e diventare il canale principale. Il canale di morta rappresenta la parte terminale di un canale ormai inattivo, alimentato solo durante le piene con acqua stagnante per portate medio-basse. La barra che lo delimita tende ad allungarsi e a chiuderlo progressivamente, favorendo così la deposizione di sedimento fine (sabbia-limo) durante la fase recessiva delle piene.

Caratteristica principale di questi corsi d'acqua è la variazione di sinuosità al variare della portata: per portate di magra e morbida le barre sono emerse ed il flusso assume un aspetto meandriforme (sinuosità sino a 1.5), che poi va perso quando - durante eventi di piena anche modesti - le barre laterali diventano sommerse e la sinuosità si avvicina all'unità, essendo le sponde generalmente parallele e quasi rettilinee.

Altra differenza rispetto ai fiumi meandriformi è la dinamica delle barre: in questi le barre di meandro tendono a muoversi trasversalmente alla direzione principale a causa delle correnti secondarie, mentre nei *wandering rivers* le barre si spostano verso valle più similmente alle barre laterali dei corsi d'acqua rettilinei. Come queste inoltre, presentano granulometria eterogenea, dalla ghiaia alla sabbia. Sono state rilevate in fiumi appenninici velocità medie di migrazione delle barre dell'ordine dei 20-30 m all'anno, con punte di 60-70. Alla migrazione delle barre sono spesso associati anche fenomeni di erosione spondale.



I fiumi pseudomeandriformi sono ritenuti da molti una forma di "evoluzione" dei corsi *braided* derivante dalle influenze antropiche citate in precedenza. Attualmente i *wandering rivers* sono molto comuni in Italia e in molte aree alpine.

Corsi d'acqua meandriiformi

Il tracciato planimetrico di questa tipologia mostra anse curvilinee (dette appunto meandri) che si susseguono in modo più o meno ripetitivo e regolare. Hanno sinuosità maggiore di 1.5, fino a 3, che non varia con la portata al contrario dei pseudomeandriiformi. Sono i fiumi maggiormente studiati, per la loro presenza nei territori da più tempo antropizzati.

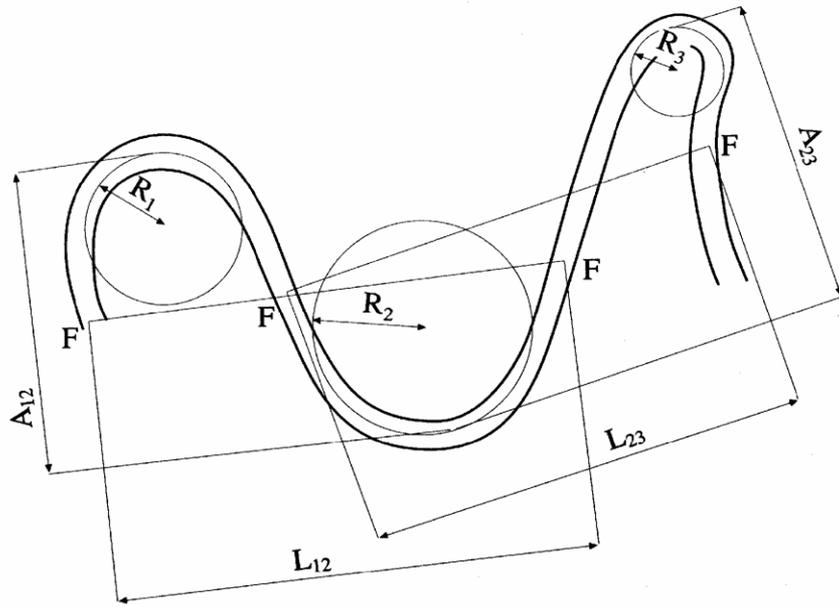
Generalmente presentano una granulometria sabbiosa oppure limo-argillosa, essendo le pendenze molto basse, anche minori del 0.1 %. Si hanno comunque casi di fiumi meandriiformi in ghiaia. Questa tipologia fluviale è quella predominante delle valli a bassa pendenza.



I tratti di *pool* si trovano in corrispondenza dell'apice della curva mentre i *riffle* sono presenti nel punto di inflessione tra due meandri contigui. La parte interna della curva è occupata dalla barra di meandro, che si presenta come un corpo sedimentario semiconico, con una base a forma di mezzaluna, leggermente inclinato verso la sponda esterna che ha invece andamento subverticale. Anche in queste barre si assiste ad una certa segregazione granulometrica da monte a valle.

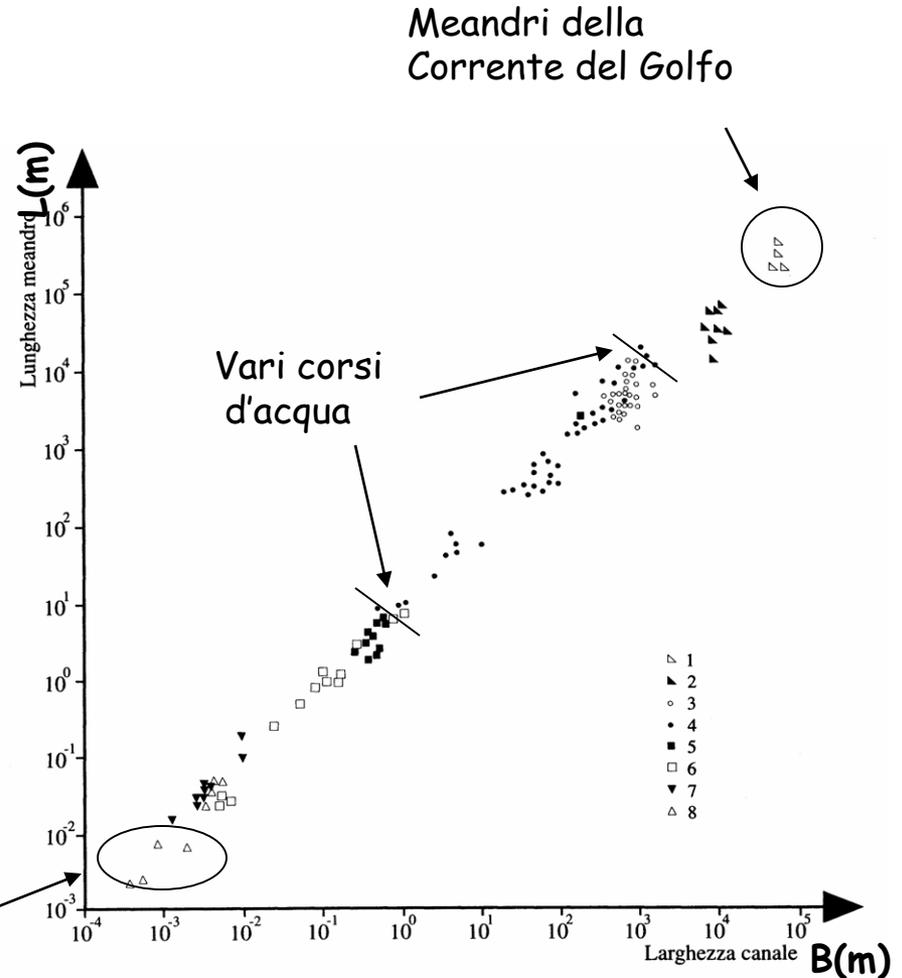
I fiumi meandriiformi possono essere caratterizzati - oltre che dagli usuali parametri - da alcune dimensioni caratteristiche dei meandri quali ampiezza A , lunghezza L e raggio di curvatura R . Varie formulazioni empiriche sono state proposte per legare tali parametri ad altre variabili quali larghezza dell'alveo B ed una portata formativa Q .

La tendenza del flusso a divenire "tortuoso" la si osserva anche in mancanza di un fondo deformabile, ad indicare che si tratta di una condizione di maggiore stabilità della corrente.



Esiste una sorprendente invarianza di scala nel rapporto tra L e B , passando dall'ordine dei millimetri a quello dei chilometri: in media si ha $L=6-10 B$

Esperimenti su superfici di gesso, argilla e sabbia



Per quanto riguarda la relazione con la portata Q , si tratta di curve di potenza dalla forma:

$$L = a Q^b$$

Ad esempio per Dury (1964): $L = 54 Q^{0.5}$, dove la Q è la portata media annua di piena.

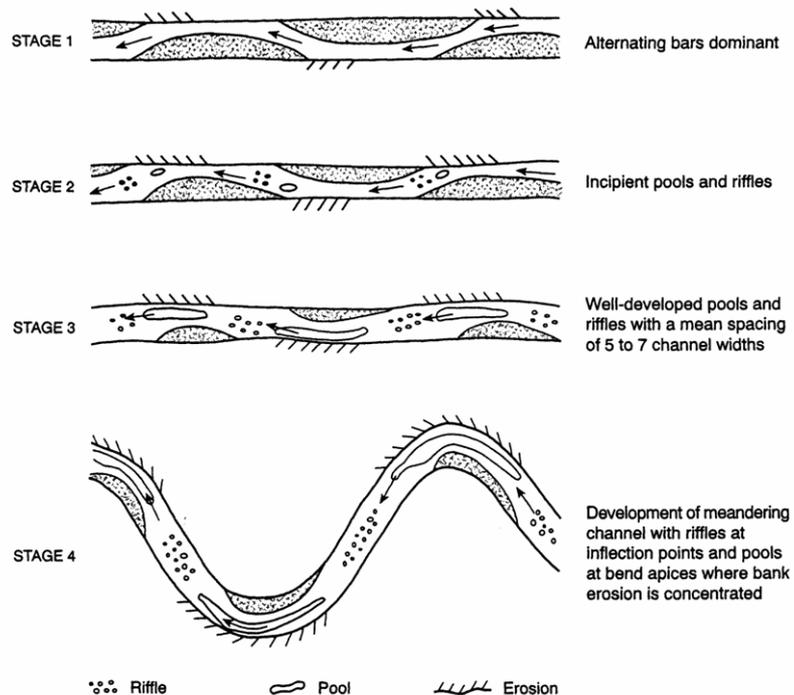
Per Carlston (1965): $L = 166 Q^{0.64}$, con Q portata media annuale.

Schumm (1967) ha successivamente introdotto anche un parametro dipendente dalla coesione delle sponde; si è osservato infatti che all' aumentare di questa la lunghezza d'onda dei meandri diminuisce.

Il meccanismo di formazione dei meandri è tuttora controverso. Alcuni autori vedono nell'instabilità di un flusso lineare - formazioni di correnti secondarie e vortici - la causa primaria, mentre altri pongono l'accento sull'instabilità dell'alveo che determina perturbazioni, come le barre, che tenderebbero ad amplificarsi fino a condurre all'erosione spondale. Condizione necessaria è comunque che le sponde siano erodibili ma non eccessivamente instabili.

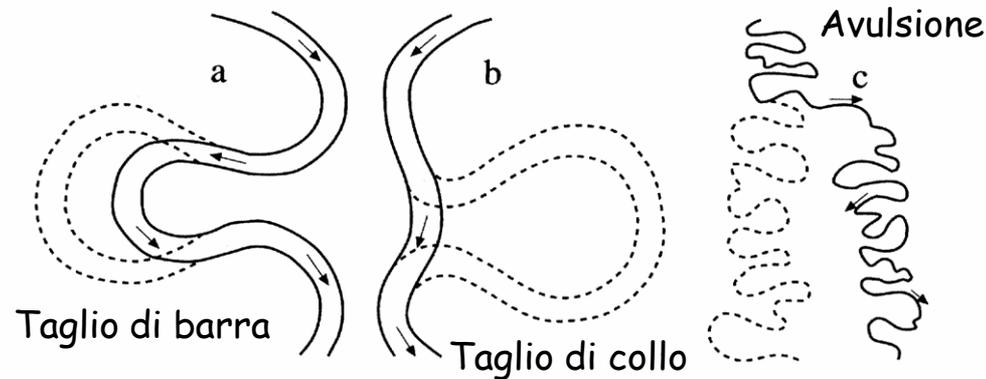
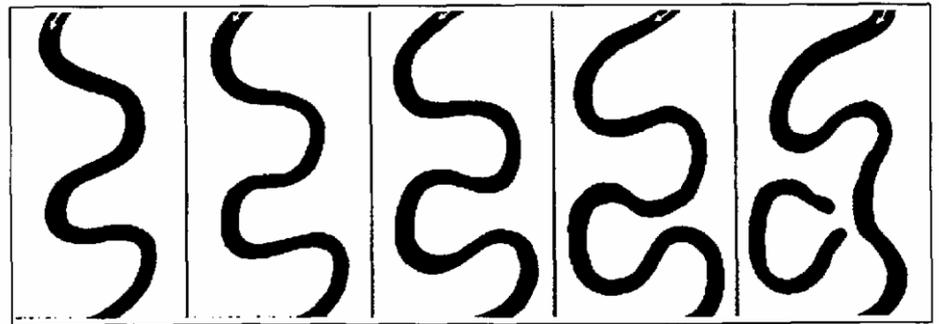
L'andamento meandriforme riduce la pendenza

della valle ed aumenta la resistenza al moto, essendo le curve una fonte aggiuntiva di scabrezza, fino ad un massimo per $R/B=2.5$. La formazione di meandri può quindi venir vista sotto il profilo termodinamico come un meccanismo per ridurre un eccesso di energia cinetica.



La migrazione dei meandri avviene per la concomitanza di erosione della sponda esterna e sedimentazione in quella interna durante gli eventi di piena. Questo meccanismo combinato porta il meandro a spostarsi sia trasversalmente che longitudinalmente, seguito dalla sua barra. La migrazione dei meandri porta ad un aumento di sinuosità che può determinare alla fine il cosiddetto **taglio di collo** del meandro, quando il sottile istmo separante le due sponde esterne di due meandri contigui cede durante una piena.

Il flusso tenderà poi a concentrarsi sul nuovo percorso più diretto, abbandonando progressivamente il meandro tagliato, che diviene un laghetto a forma di mezza luna (lanca), in cui vanno a depositarsi i sedimenti fini di esondazione, fino ad inglobarlo nella pianura alluvionale.



Nei fiumi con minore sinuosità e sedimenti più grossolani, si assiste più frequentemente al **taglio di barra** di meandro, secondo un meccanismo simile a quello descritto per i canali di taglio dei fiumi pseudomeandriiformi.

Frequenti nei fiumi meandriiformi sono infine i casi di **avulsione**, ovvero l'abbandono di un precedente tracciato in seguito ad erosione spondale durante un evento di piena, con la formazione di un nuovo alveo all'interno della pianura alluvionale.

Corsi d'acqua anastomizzati



Sono fiumi pluricursali formati da 2 o più canali relativamente stabili con sinuosità variabile, ma in genere meandriiformi, interconnessi tra loro. Le pendenze dei canali sono bassissime ($<0.01\%$).

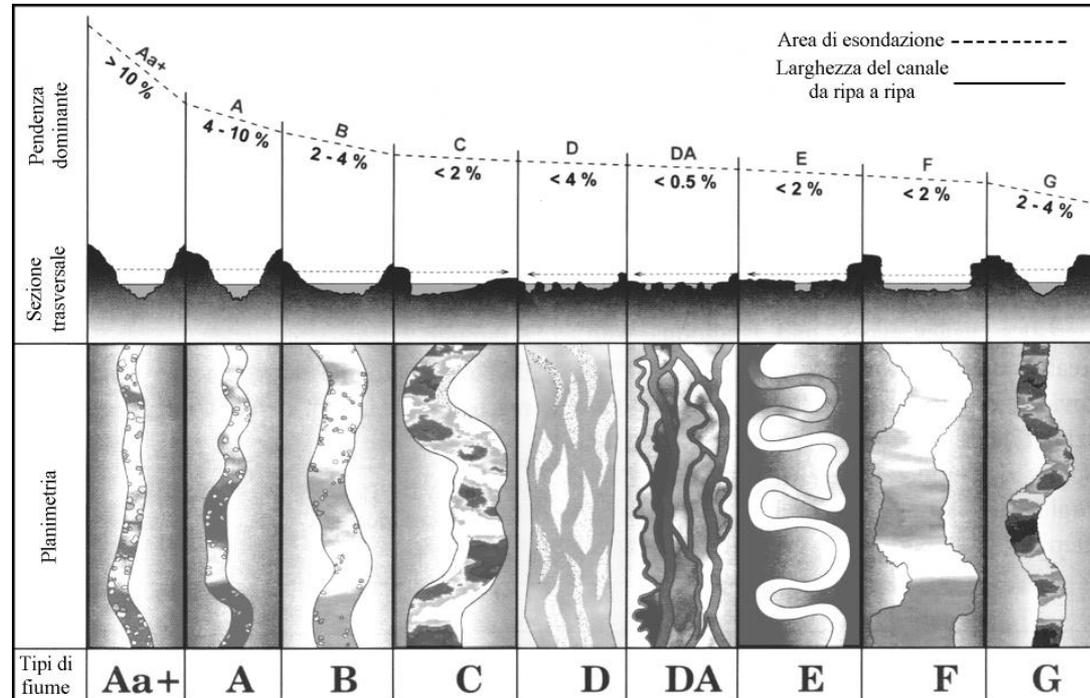
Le zone che dividono i rami non sono barre soggette a migrazione come nei fiumi *braided*, bensì porzioni di piana alluvionale con dimensioni molto maggiori della larghezza del canale.



Sono piuttosto rari, si osservano in aree dove il corso d'acqua tende ad accrescere i processi deposizionali, in seguito a rapida subsidenza o repentino innalzamento del livello di base. I singoli canali morfologicamente sono spesso dei corsi meandriiformi, con una simile evoluzione (tagli e migrazione dei meandri). Tuttavia la dinamica nei fiumi anastomizzati è più lenta in quanto la coesione delle sponde molto elevata comporta una grande stabilità dell'alveo.

Classificazione di Rosgen (1994)

Distingue 41 tipi morfologici suddivisi in 8 categorie principali (A-G)

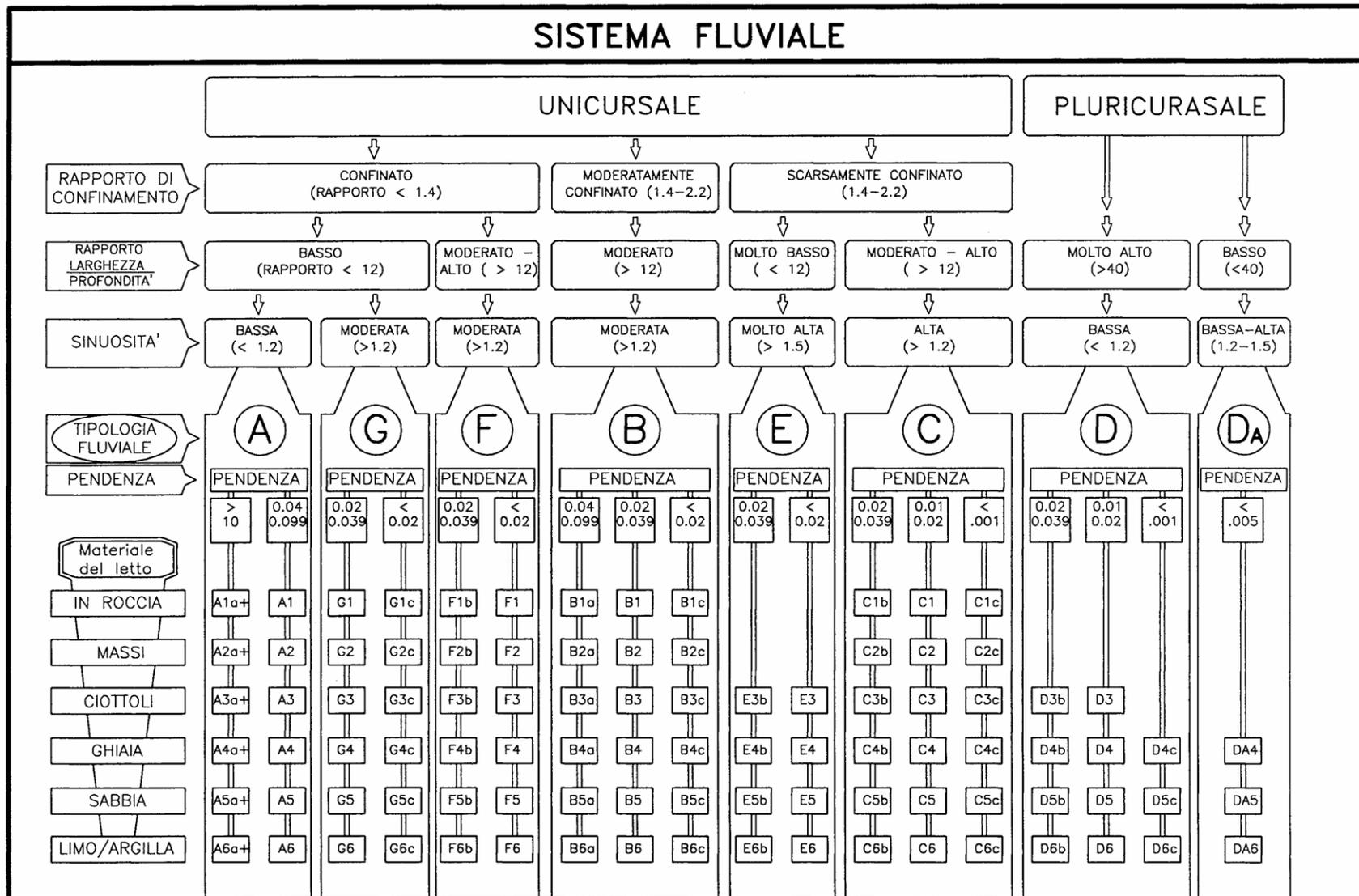


Suddivisione in base alle seguenti variabili:

- Rapporto larghezza/profondità media
- Granulometria
- Sinuosità
- Grado di confinamento
- Pendenza

Rosgen (continua)

Chiave di classificazione per le 41 tipologie



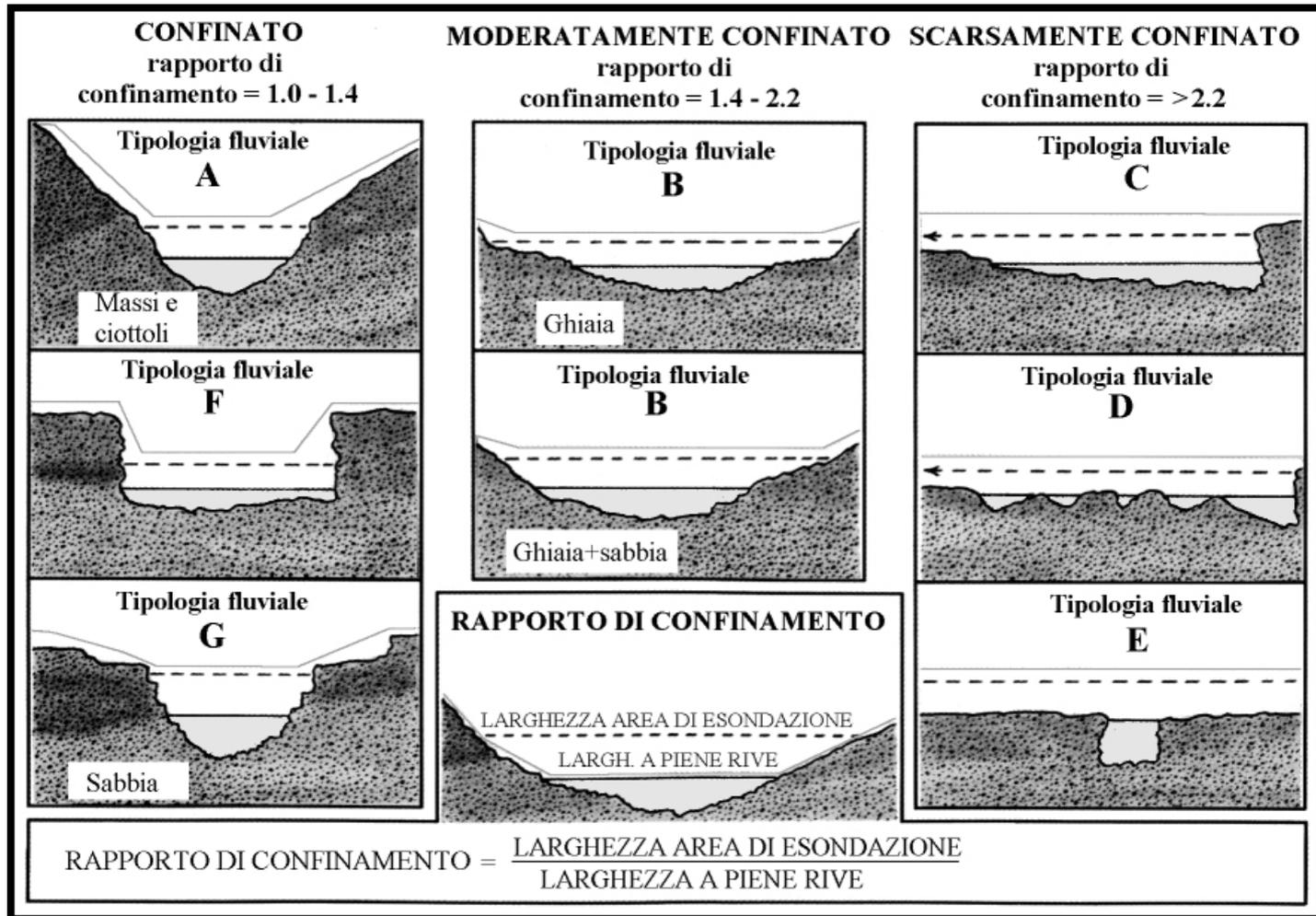
Rosgen (continua)

Descrizione delle categorie principali

Tipologia di sistema fluviale	Descrizione generale	Confinamento	B/H	Sinuosità	Pendenza	Rilievo morfologia / suoli-granulometria / morfologia dell'alveo
Aa +	Torrenti ad elevata pendenza, confinamento verticale e grado di incisione nella valle elevato, tracce di colate detritiche e di movimenti di massa.	< 1.4	< 12	1.0 - 1.1	> 0.10	Versanti molto accidentati, rilievi acclivi. Alvei scavati in roccia; torrenti di scavo e di trasporto; elevata potenzialità di colate detritiche. Accumuli di massi e blocchi, e roccia affiorante formano step-pool, boulder-step.
A	Torrenti ad elevata pendenza, confinati ed incisi nella valle. Elevata energia e capacità di trasporto solido. Alvei stabili (in roccia) o accumuli di grossi massi.	< 1.4	< 12	1.0 - 1.2	0.04 - 0.10	Versanti acclivi. Forme di erosione e di deposito ed alvei che scorrono su roccia. Alvei molto confinati ed incisi. Tratti a gradinata (step-pool), i salti sono separati da pozze meno profonde che nella tipologia precedente.
B	Confinamento verticale e gradiente moderato, prevalenza di sequenze a riffle-pool. Stabilità planialtimetrica elevata, sponde scarsamente erodibili.	1.4 - 2.2	> 12	> 1.2	0.02 - 0.039	Morfologia e rilievi moderati, depositi colluviali o suoli residuali. Moderato rapporto larghezza/profondità. Valli strette con pendenze non elevate. Prevalenza di rapide e di riffle con associati pool.
C	Pendenza dell'alveo ridotta, riffle-pool, meandri e barre laterali alternate. Corso d'acqua alluvionale con una larga e ben definita zona di espansione laterale durante le piene.	> 2.2	> 12	> 1.4	< 0.02	Valle molto larga e terrazzata, in associazione con suoli alluvionali e pianure alluvionali. Confinamento scarso con un canale meandriforme ben definito. Morfologia dell'alveo a riffle-pool.
D	Canali multipli intrecciati con barre longitudinali e trasversali. Alveo molto largo con sponde altamente erodibili.	n/a	> 40	n/a	< 0.04	Valle molto allargata con depositi alluvionali o colluviali. Modifiche e cambiamenti laterali evidenti (allargamenti ed erosione di sponda). Riformimento di sedimento abbondante.
DA	Tracciato multialveo con canali relativamente stabili, assimilabili a canali meandriformi, a bassissima pendenza. I canali singoli presentano una sinuosità variabile. Pianura alluvionale molto larga. Buona coesione delle sponde.	> 2.2	molto variabile	molto variabile	< 0.005	Pianura alluvionale o lacustre molto larga e di bassissima pendenza. Si formano in aree dove esistono condizioni di subsidenza o di innalzamento del livello di base, prevalgono i processi deposizionali, scarso trasporto solido in sospensione.
E	Fiume a bassa pendenza, meandriformi con riffle-pool, basso valore del rapporto B/H e scarsa deposizione. Molto stabili.	> 2.2	< 12	> 1.5	< 0.02	Vallate molto ampie con una pianura alluvionale molto estesa. Sinuosità elevata e sponde stabili con abbondante vegetazione. Morfologia a riffle-pool.
F	Fiume meandriforme molto largo, gradiente basso ed elevato valore del rapporto B/H.	< 1.4	> 12	> 1.4	< 0.02	Fiumi meandriformi lateralmente molto instabili con elevata erodibilità delle sponde. Morfologia a riffle-pool.
G	Burroni, erosione del canale di solito retrograda, pendenze moderate, basso valore del rapporto B/H.	< 1.4	< 12	> 1.2	0.02 - 0.039	Valle stretta, profondamente incisa nel materiale alluvionale o colluviale. Instabili, con elevati problemi di controllo del profilo e alta erodibilità delle sponde.

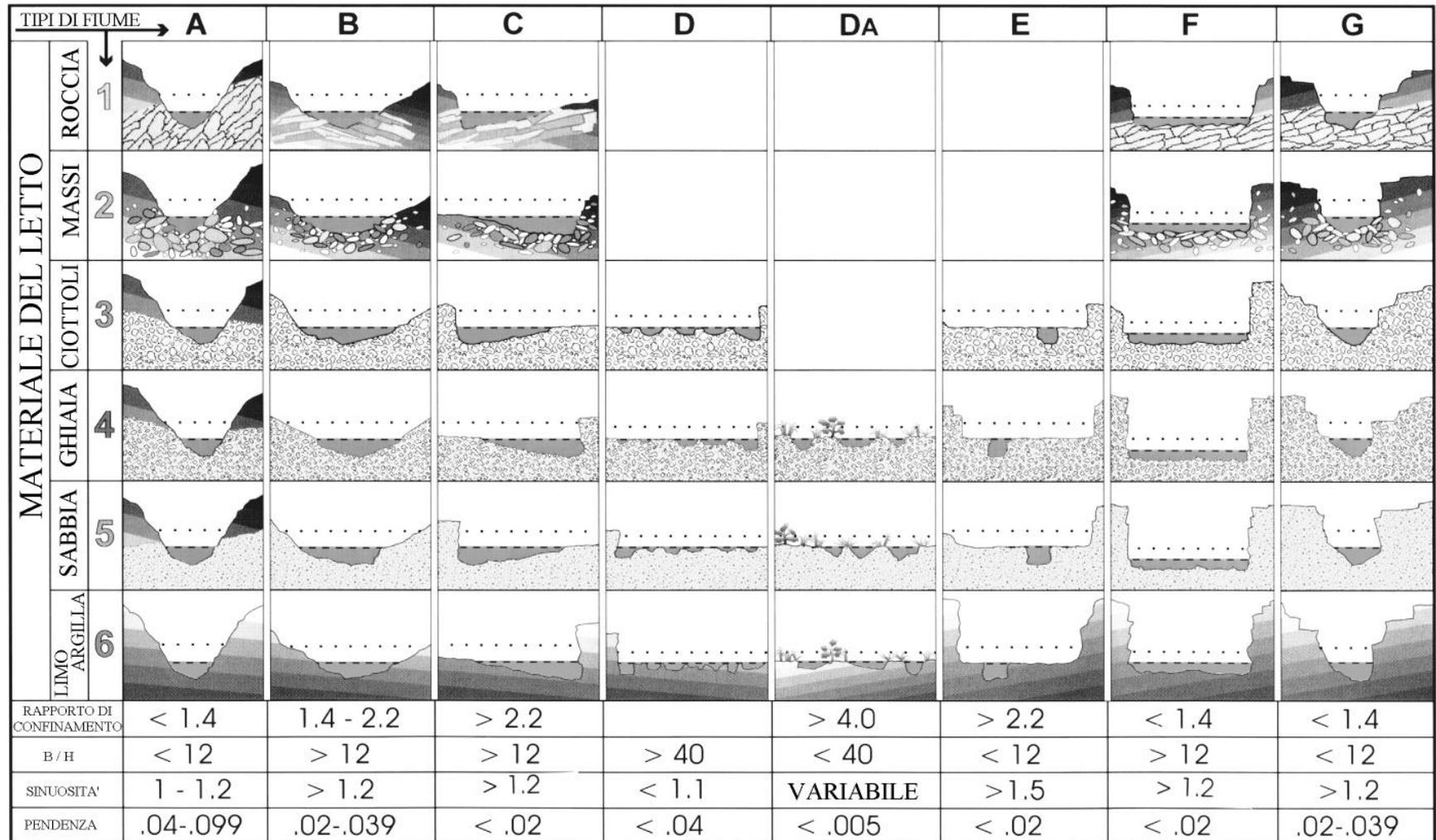
Rosgen (continua)

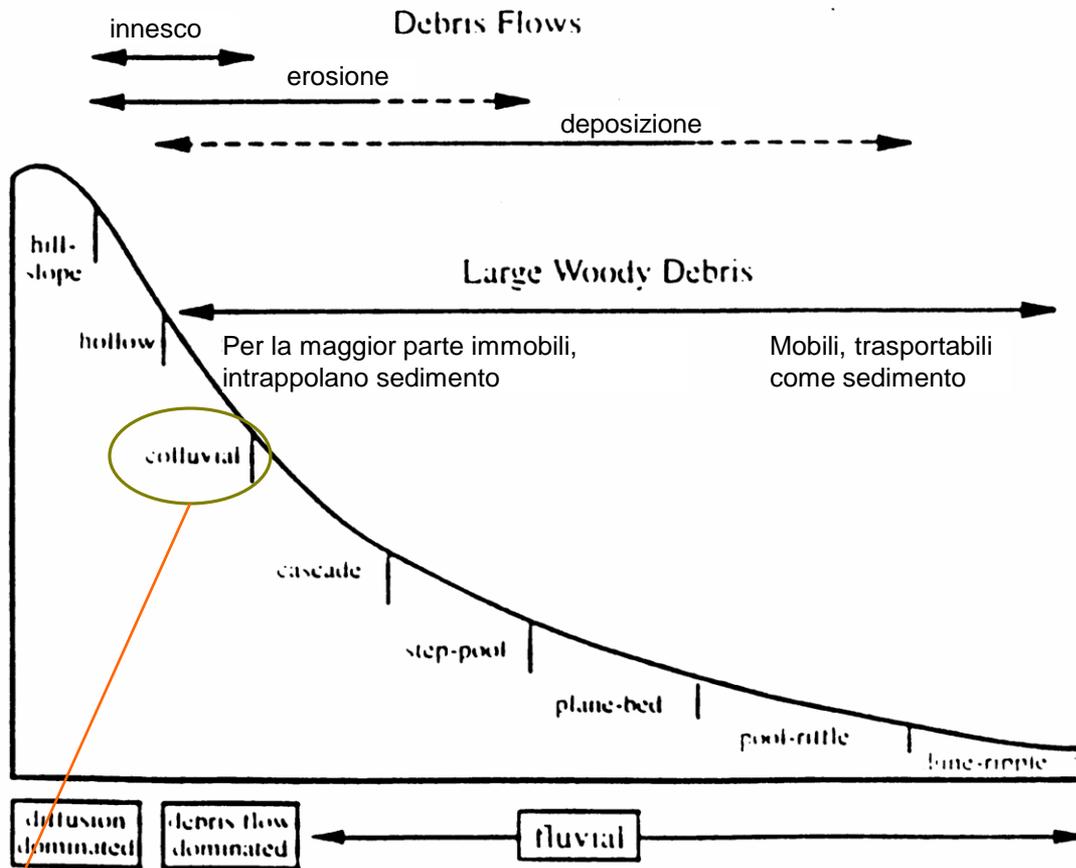
Le categorie principali classificate secondo il grado di confinamento



Rosgen (continua)

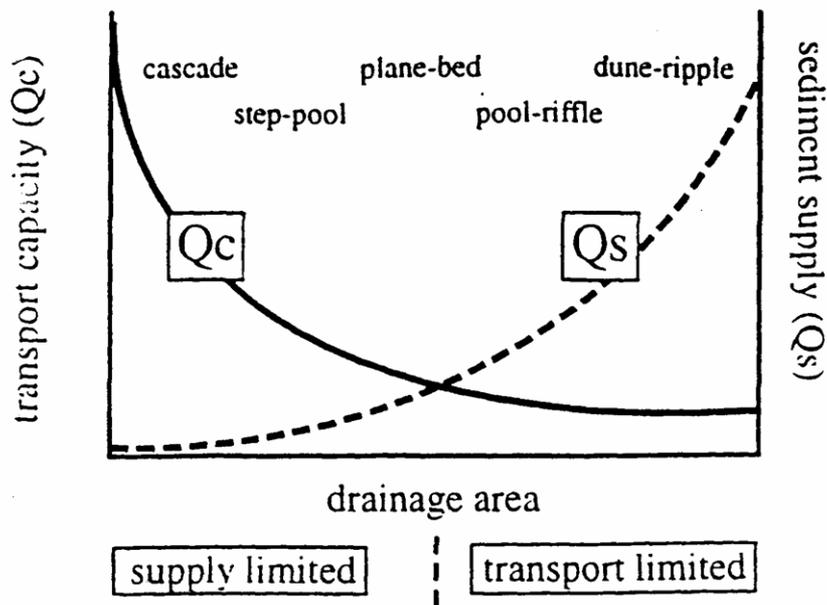
Sezioni trasversali tipiche delle 41 tipologie morfologiche





Tale profilo è ideale, in quanto la pendenza non sempre decresce da monte verso valle lungo un collettore per cause tettoniche, litologiche o derivanti dall'azione glaciale. Tipiche in ambiente alpino sono ad esempio le piane determinate da antiche morene, sulle quali il corso d'acqua a bassissima pendenza forma meandri e si presenta a *dune-ripple*. Più a valle il torrente torna ripido lungo il corpo morenico, spesso esibendo morfologia a *cascade* o a *step pool*.

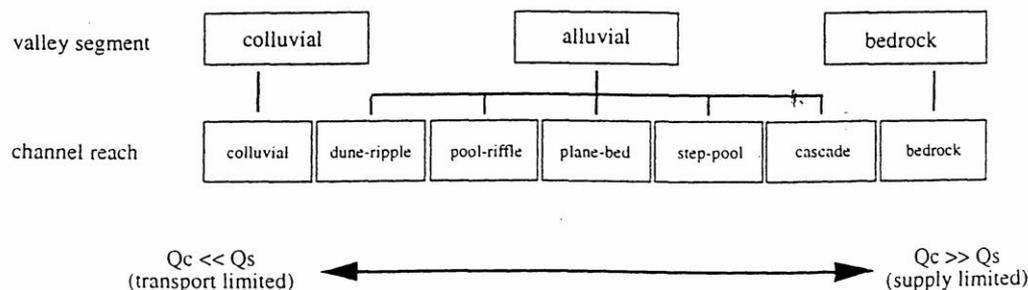
I collettori colluviali sono quelli in cui predominano i fenomeni gravitativi, data la pendenza e la ridotta portata idrica, spesso presente soltanto per brevi periodi dell'anno. Di conseguenza i processi fluviali sono secondari. Esempi sono i ripidi canali da colata detritica.



La capacità di trasporto di sedimento al fondo da parte di un corso d'acqua (Q_c) è in ultima analisi funzione della pendenza. Si osserva per ciò un decremento della capacità di trasporto muovendosi verso tipologie morfologiche tipiche delle parti basse di un bacino idrografico (maggiore area drenata, minor pendenza del collettore)

Al contrario, la quantità di alimentazione solida (Q_s) aumenta all'aumentare dell'area drenata, per l'inclusione progressiva di aree sorgenti di sedimento dai vari sottobacini.

Le morfologie a *cascade* e *step pool* sono tipiche di tratti *supply-limited*, ovvero dove il trasporto solido è limitato dalla poca disponibilità di sedimento, mentre l'energia della corrente è alta. Il torrente tende quindi a erodere il proprio letto. Al contrario, nei *pool-riffle* e *dune-ripple* il sistema è *transport-limited* per via della pendenza ridotta, prevale la deposizione con la formazione di corpi sedimentari all'interno dell'alveo. La morfologia a *plane-bed* rappresenta il punto di equilibrio tra la limitazione idraulica e quella di disponibilità di sedimenti.



Cascade (rapida)

Tratto caratterizzato da una corrente a velocità sostenuta in cui il flusso presenta un'alternanza di getti in caduta e risalti idraulici (*tumbling flow*) e separazione della corrente sopra o attorno ai grossi clasti. Il fenomeno del *tumbling flow*, determinato dalla presenza di grossi elementi lapidei, e la forte turbolenza ad esso associata dissipa la maggior parte dell'energia meccanica posseduta dalla corrente, favorendo in tal modo la stabilità del tratto.



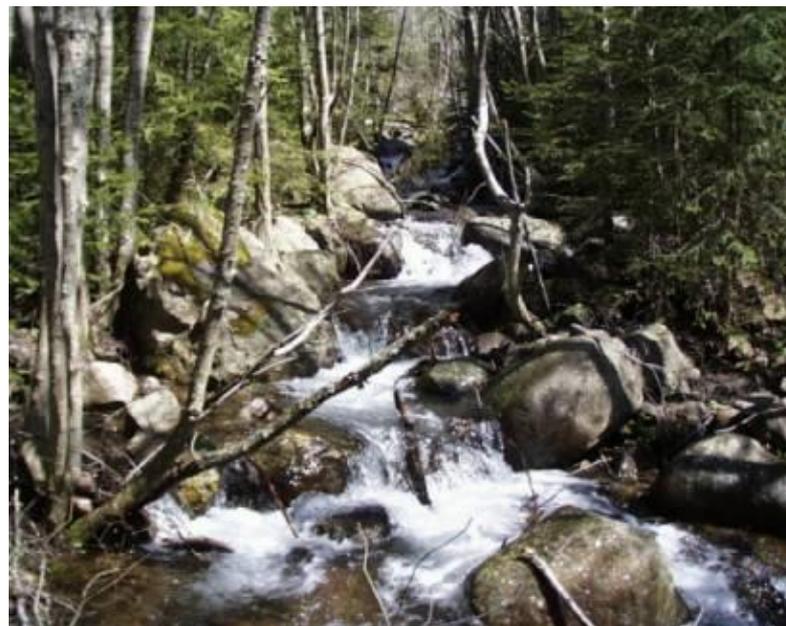
Le rapide sono presenti, generalmente, in quei corsi d'acqua, che defluiscono su pendenze accentuate (7-20%) con un alveo confinato e con una certa disorganizzazione trasversale e longitudinale del materiale lapideo, tipicamente costituito da massi e ciottoli. La disposizione caotica dei grossi massi favorisce la formazione di una serie di gradini (*step*) e di *pool*, piuttosto frequenti, di dimensioni **inferiori** alla larghezza del canale.

Gli elementi più grossolani presenti all'interno dei tratti individuati come rapide sono tipicamente immobili durante i deflussi ordinari, mentre possono diventare parzialmente o totalmente mobili durante gli eventi idrologici meno frequenti, ossia per tempi di ritorno superiori ai 50-100 anni. La mobilitazione di questi grossi massi è accompagnata da un elevato tasso di trasporto di sedimento dovuto al rilascio di materiale fine intrappolato sotto o attorno ai grossi massi



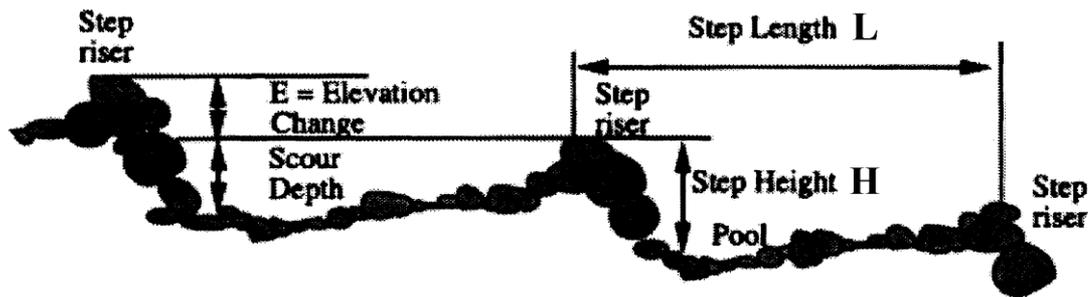
Step-pool

Come descritto in precedenza, gli *step* sono costituiti da un gruppo di massi fortemente incastrati fra loro e posti di traverso rispetto alla corrente, lungo una linea retta o curva, in modo tale da costituire una sorta di gradino. Lo spazio fra uno *step* ed il successivo è occupato dai *pool*. Il tirante d'acqua all'interno dei *pool* varia, anche in modo cospicuo, da monte verso valle. La maggiore profondità è localizzata generalmente in prossimità del piede dello *step* di monte, mentre nella porzione terminale del *pool* il tirante d'acqua si riduce.



Gli *step-pool* sono forme di fondo che caratterizzano in modo evidente la morfologia di molti torrenti montani con pendenza comprese tra 5-15%. Il profilo longitudinale del corso d'acqua assume un aspetto a gradinata (sequenze a *step-pool*), molto simile a quello che si ottiene con una serie di briglie di consolidamento.

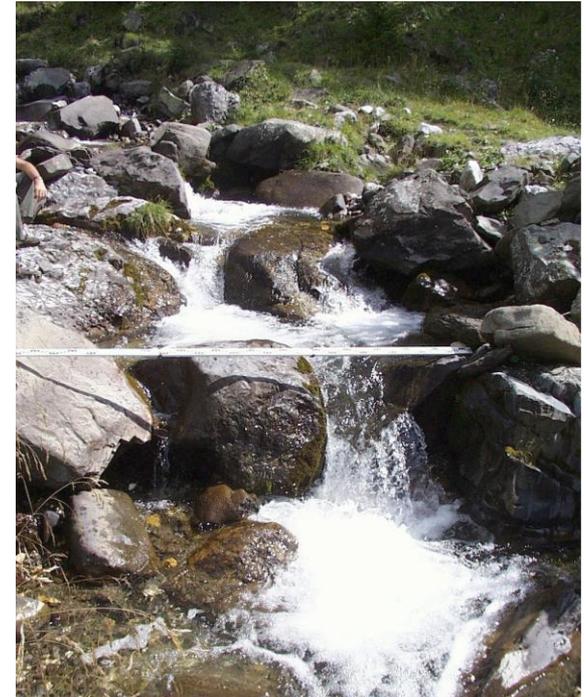
L'eterogeneità granulometrica del sedimento e la pendenza sono i fattori che condizionano in modo prioritario lo sviluppo della morfologia a gradinata. Infatti, le sequenze a *step-pool* sono frequenti in quelle situazioni dove il materiale d'alveo grossolano, compreso il materiale vegetale (ramaglia e tronchi) è dello stesso ordine della larghezza del canale e la pendenze del fondo è superiori al 3-5%.



Nei corsi d'acqua in cui sono presenti dei grossi blocchi lapidei d'origine glaciale oppure in condizioni di elevato trasporto solido difficilmente si possono osservare delle sequenze a gradinata, in quanto gli *step-pool* tendono a formarsi in situazioni intermedie, ossia in condizioni in cui la corrente è appena in grado di trasportare gli elementi di maggiori dimensioni.

La formazione delle sequenze a gradinata avviene con portate notevoli, mentre in condizioni ordinarie essi si presentano molto stabili. Proprio nelle condizioni di basso deflusso si possono osservare, con maggiore nitidezza, la lunghezza d'onda, ossia la distanza da *step* a *step*, e la variazione di quota fra lo *step* di monte e quello di valle.

In genere la morfologia a *step pool* è associata ad alvei con un forte confinamento laterale dovuto ai versanti, ed un rapporto contenuto fra larghezza e tirante. Le dimensioni dei massi che formano gli *step* sono dello stesso ordine di grandezza della profondità della corrente registrata con piene a frequenza annuale.



Dal punto di vista idraulico, l'acqua defluisce in condizioni critiche sopra lo *step* (numero di Froude della corrente prossimo all'unità) ed in regime subcritico nel *pool*, con la perdita di una buona parte dell'energia cinetica nel moto vorticoso che si genera all'interno del *pool* (risalto idraulico). La vicinanza con lo *step* successivo determina il ripetersi ciclico di accelerazione e decelerazione, tipico del sopraccitato *tumbling flow*. Sotto questo aspetto le sequenze a gradinata possiedono la capacità di dissipare molto efficacemente energia, rendendo meno gravose sotto l'aspetto erosivo le forti pendenze. Studi condotti su quest'argomento hanno stimato come il 95% circa dell'energia potenziale posseduta sopra uno *step* sia dissipata nel *pool* sottostante all'interno di vortici turbolenti.

Per questo motivo, le sequenze a gradinata sono di fondamentale importanza nelle zone montane, dove la limitata ampiezza delle valli inibisce un aggiustamento del letto ed una dissipazione dell'energia della corrente in senso laterale. Nei corsi d'acqua interessati da queste unità morfologiche la resistenza al flusso offerta dalla granulometria dell'alveo ("*grain resistance*") assume un'importanza secondaria rispetto alle situazioni dissipative più macroscopiche precedentemente descritte.

Sebbene i corsi d'acqua caratterizzati da una morfologia a *step-pool* e rapide riflettano entrambi una condizione di limitata disponibilità di sedimento, essi sono distinti da una differente densità ed organizzazione spaziale dei grossi massi. La spaziatura regolare degli *step pool* rappresenta la comparsa di un'organizzazione morfologica fluviale nei corsi d'acqua alluvionali, mentre la disorganizzazione dei grossi clasti nei tratti definiti come rapide può includere dei depositi da processi di tipo non fluviale (per esempio colate detritiche, glaciazioni, frane per crollo, ecc.).

Plane-bed (letto piano)

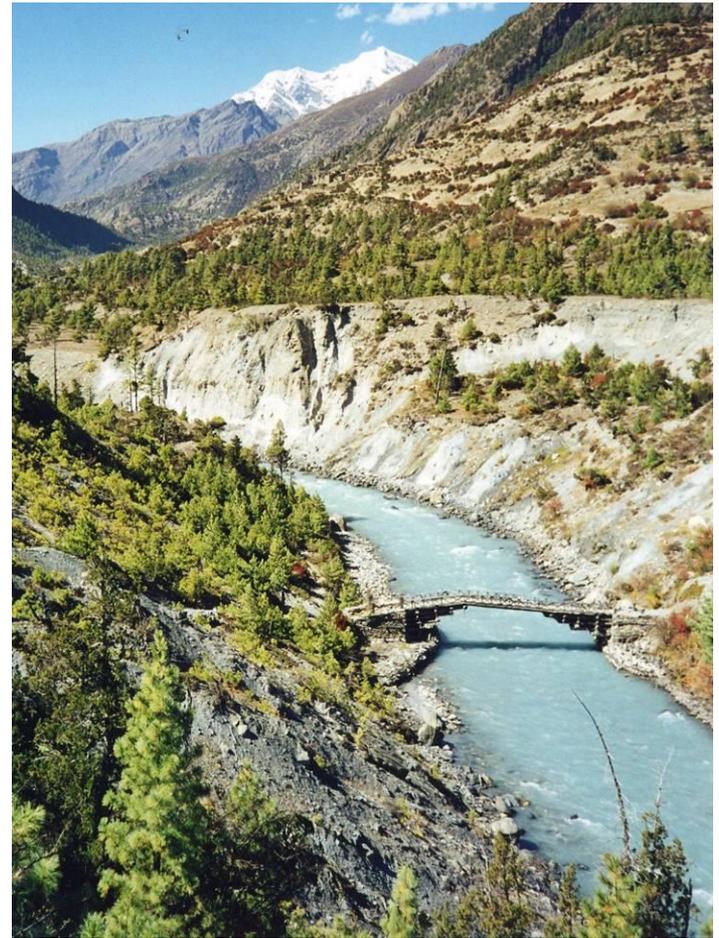
Il termine letto piano è utilizzato per indicare dei tratti d'alveo con un profilo longitudinale regolare e senza brusche variazioni altimetriche. Quest'unità morfologica può essere osservata sia nei corsi d'acqua di pianura sia nei torrenti montani. Infatti, con il termine "piano" non deve intendersi un corso d'acqua pianeggiante o a scarsa pendenza, ma piuttosto avente un profilo di fondo a gradiente uniforme.



I corsi d'acqua caratterizzati da un letto piano mancano di barre laterali distinte, una condizione che è associata con un ridotto rapporto fra larghezza e profondità. I tratti a letto piano si instaurano in corsi d'acqua con un valore di pendenza da moderato ad alto (1-3%), manifestandosi in tratti relativamente rettilinei che possono essere confinati o non confinati dalle pareti della valle. Essi tipicamente sono composti da una granulometria che va dalla sabbia fino ai piccoli massi, con una predominanza di ghiaie e sassi.

I letti piani differiscono morfologicamente sia dagli *step pool*, sia dai *riffle-pool* (vedi seguito) per la mancanza di una successione ritmica delle forme di fondo e sono caratterizzati da lunghi tratti d'alveo relativamente piani e di lunghezza pari anche ad oltre 10 volte la larghezza al *bankfull*.

L'assenza di un regime di *tumbling flow* (flusso con alternanza con di getti e risalti idraulici) e una bassa scabrezza relativa distinguono i tratti a letto piano dai tratti a rapida e dai tratti a step pool. Nei tratti a letto piano manca una sufficiente energia convergente laterale per sviluppare una morfologia a *riffle pool* (dovuta al basso rapporto larghezza e tirante) e non vi è una scabrezza sufficiente a decomporre il flusso laterale in piccole celle di circolazione secondaria. In qualche caso l'introduzione di un'ostruzione al flusso può forzare la formazione locale di *pool* e barre laterali.



I letti piani che possiedono una corazzatura del fondo indicano una capacità di trasporto superiore alla "fornitura" di sedimento da monte, mentre quelli non corazzati mostrano un bilancio tendenzialmente in pareggio tra il trasporto di sedimento e la disponibilità di sedimento. I corsi d'acqua caratterizzati da alvei piani rappresentano una condizione di passaggio fra una morfologia limitata dalla alimentazione solida e dalla limitata capacità di trasporto.

Riffle-pool

Un aspetto morfologico di molti corsi d'acqua è rappresentato dalla successione di tratti a pendenza più sostenuta e profondità di flusso modeste (*riffle*), con tratti a profilo più piatto e tiranti d'acqua più elevati (*pool*). L'alternanza di questi due elementi caratterizza, seppure in condizioni diverse, la maggior parte dei corsi d'acqua naturali di fondovalle e pedemontani ed è accompagnata dal susseguirsi ritmico di barre longitudinali alternate.



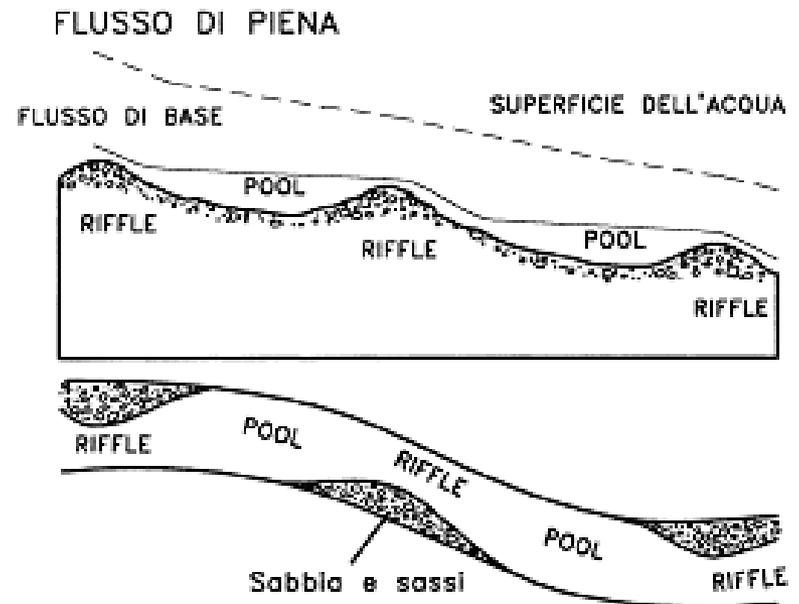
I *pool* sono ritmicamente alternati, distanziandosi mediamente di una lunghezza d'onda pari a 5-7 volte la larghezza del canale (perciò molto simile alla lunghezza d'onda caratteristica dei meandri), mentre nei corsi d'acqua con un alto trasporto di detrito legnoso i *riffle pool* evidenziano una spaziatura anche inferiore.

Tratti a *riffle pool* si hanno in corsi d'acqua con pendenze da moderate a basse (0.1-2%) e con sezioni trasversali d'alveo poco confinate e delimitate da una discreta pianura alluvionale. Le dimensioni del substrato nei corsi d'acqua a *riffle pool* varia dalla sabbia ai sassi, anche se predomina la presenza di ghiaia.

La topografia delle barre e dei *pool*, generata dalla convergenza e divergenza locale della corrente, può essere indotta dalla sezione trasversale del canale, dal trasporto di sedimento, imposta da un andamento curvilineo del canale o da ostruzioni occasionali.

Nei *riffle* si concentrano le granulometrie più grossolane dell'alveo ma, nonostante siano presenti ciottoli o grappoli di ciottoli, questi non sono organizzati in allineamenti trasversali ("*transverse rib*"). I *riffle* sono zone in regime subcritico-critico con locali instabilità della superficie dell'acqua e piccoli risalti idraulici lungo il tratto attraversato. In condizioni di basso deflusso il pelo libero presenta una superficie increspata con un tirante d'acqua ridotto e una velocità superiore rispetto a quella delle *pool*. In condizioni di magra o morbida solo il 5-10% dell'area occupata dal *riffle* evidenzia un regime supercritico per la presenza di risalti idraulici od onde stazionarie. Nei *riffle*, come nei *pool*, il deflusso avviene quindi, nel complesso, in corrente lenta.

La formazione naturale di sequenze a *riffle pool* si origina inizialmente da una perturbazione della corrente, che causa una convergenza del flusso ed un'escavazione alternata delle sponde del canale. A valle di ciascuna convergenza si crea una divergenza del flusso che è favorita dalla formazione di accumuli localizzati, ossia dalle barre. Topograficamente l'accelerazione guidata della corrente rinforza la convergenza e la divergenza del modello di deflusso e quindi la morfogenesi dei *riffle pool*. Lo sviluppo di barre alluvionali richiede un rapporto fra larghezza e tirante sufficientemente ampio e materiale d'alveo di piccole dimensioni, tale da essere facilmente mobilizzato e ridepositato dalla corrente.



I corsi d'acqua a *riffle pool*, come i tratti a letto piano, mostrano una disponibilità di sedimenti abbastanza limitata e dipendente dal grado di corazzamento dell'alveo e dal conseguente valore soglia di mobilità. Quando la corazzatura dell'alveo viene rotta, i valori di trasporto al fondo sono generalmente correlati con la portata liquida, dimostrando che il trasporto solido non è più limitato dalla disponibilità di sedimento in alveo.

Sebbene i tratti a *riffle pool* ed a letto piano mostrino entrambi un certo equilibrio fra la disponibilità e il trasporto di sedimento, la presenza di forme di deposito (barre) nei primi suggerisce una capacità di trasporto più limitata rispetto ai secondi.



Dune-ripple

I corsi d'acqua aventi una pendenza modesta ($<0.5\%$) e con materiale d'alveo costituito prevalentemente da sabbia possono sviluppare una morfologia a *dune-ripple*, ossia delle piccole dune o increspature al fondo. Anche un canale con un fondo in ghiaia, durante un evento di portata estremo, può sviluppare delle forme di fondo riconducibili alla morfologia a *dune-ripple*.



La configurazione del letto dei tratti a *dune-ripple* dipende dalla profondità e velocità della corrente, dalle dimensioni del materiale dello strato superficiale e dal tasso di trasporto, dalla planimetria del corso d'acqua (rettilineo o meandriforme). Una vasta gamma di forme di fondo possono coesistere in un corso d'acqua con morfologia a *dune-ripple*: Ad esempio increspature e piccole dune possono formarsi sopra delle dune mobili di grosse dimensioni.

Nei corsi d'acqua con *dune-ripple* sono anche presenti delle barre laterali o altre forme d'alveo imposte dalla geometria del canale. In contrasto con i corsi d'acqua a letto piano e quelli a *riffle pool*, i tratti a *dune ripple* mostrano chiaramente un "alveo vivo" (*live-bed*) per il trasporto, nel quale un trasporto significativo avviene molto frequentemente anche con portate liquide basse. In effetti, i corsi d'acqua a *dune-ripple* possono considerarsi "limitati" dalla capacità di trasporto nel senso che quest'ultima, essendo largamente inferiore all'alimentazione solida ne condiziona la dinamica evolutiva.



Le tipologie morfologiche alluvionali appena descritte sono associate - ma con notevoli sovrapposizioni - a valori di pendenza longitudinale che coprono nel complesso un intervallo di variazione compreso approssimativamente tra 0.001 (0.1%) e 0.20 (20%), escludendo i *dune-ripple* che arrivano fino a pendenza praticamente nulle.

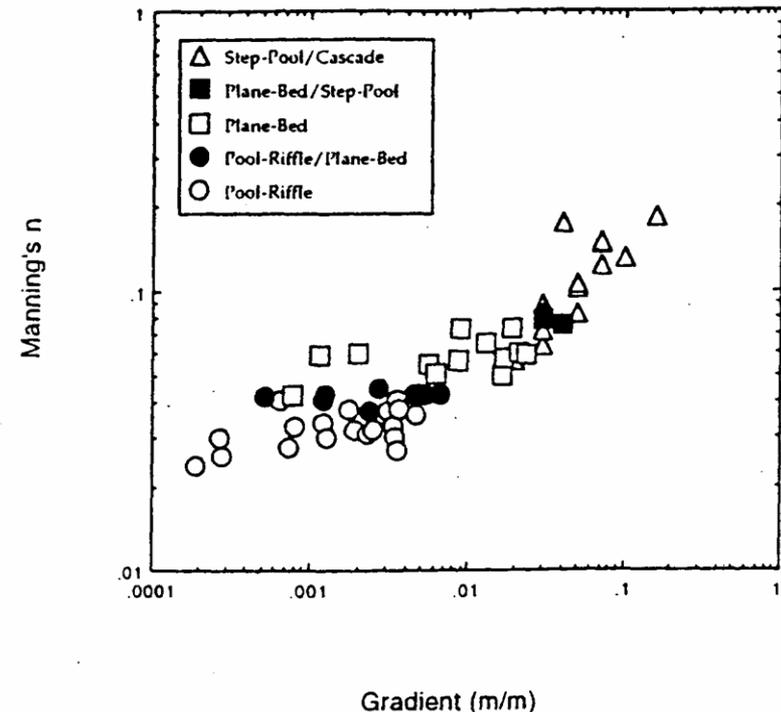
Alla pendenza media è strettamente correlata positivamente la granulometria di un corso d'acqua, e di conseguenza la scabrezza che è funzione di un diametro caratteristico.

Come già detto in precedenza, la resistenza totale al flusso è influenzata dalle forme di fondo, in quanto soltanto la componente di scabrezza detta "di grano" deriva dalla granulometria. La tipologia morfologica influenza quindi la resistenza al moto, e diventa importante sapere assegnare valori corretti ai coefficienti di scabrezza per non sbagliare la relazione portata-livello idrometrico di un corso d'acqua.

Usando per la velocità media la relazione di Manning:

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} i^{1/2}$$

Montgomery e Buffington (1997) hanno determinato la variazione del coefficiente n al variare della pendenza (*gradient*) e per diverse morfologie. Si vede come per valori simili di pendenza, si possa stabilire che la resistenza decresca secondo lo schema *step pool*-letto piano-*riffle pool*. All'estremo inferiore di pendenza, si arriva a circa $n=0.02-0.03$, valore proposto per canali in terra o muratura in cattive condizioni.



Oltre alle precedenti tipologie morfologiche, Montgomery e Buffington (1997) hanno descritto per torrenti montani i tratti colluviali, in roccia ed a morfologia imposta.

Tratti colluviali

I tratti così detti colluviali appartengono ad alvei d'ordine gerarchicamente inferiore (aste di primo ordine) e rappresentano i tratti di testata del reticolo idrografico. Hanno generalmente dimensioni molto ridotte e si formano su depositi colluviali (di versante) in generale. La loro attività in termini di trasporto solido è tipicamente intermittente ed impulsiva. Del resto, i collettori di primo ordine costituiscono approssimativamente metà del totale della lunghezza dell'intera rete idrografica.



I bassi ed effimeri deflussi nei corsi d'acqua colluviali appaiono pertanto insufficienti a mobilizzare il sedimento che è introdotto nel canale, favorendo un processo di immagazzinamento. La presenza di grossi massi, detriti vegetali, gradini in roccia e vegetazione in alveo contribuisce ulteriormente a ridurre l'energia disponibile per il trasporto di sedimento. Deflussi intermittenti possono rimaneggiare alcune porzioni della superficie del materiale accumulato, ma esse non governano il processo di sedimentazione, selezione o trasporto del materiale di riempimento della valle.



Nei corsi d'acqua di tipo colluviale si possono osservare degli episodici fenomeni di massa, quali le colate detritiche. Un bilancio del sedimento, eseguito per un piccolo bacino della California, ha indicato che i *debris flow* (colate detritiche) possono contribuire a più della metà del sedimento prodotto nel lungo termine.

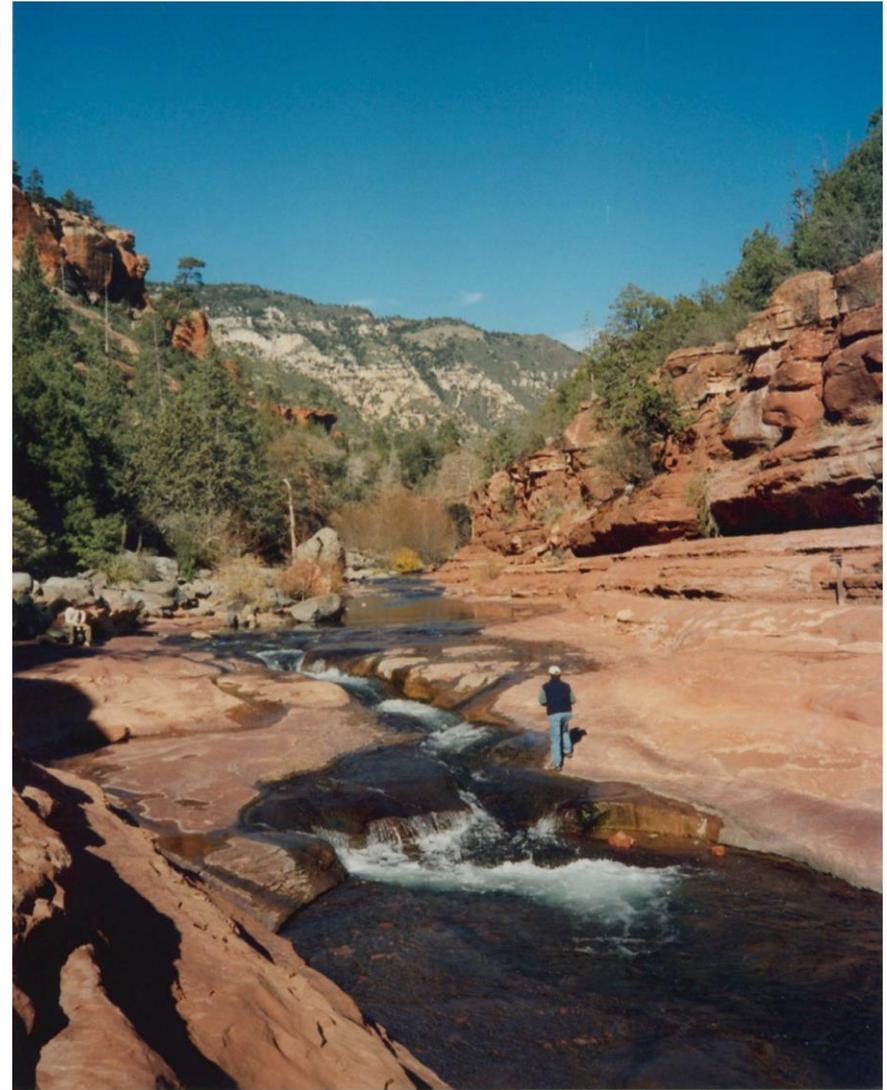
E' stato stimato che solo il 20% del totale del sedimento prodotto da un canale di primo ordine nella regione del Cascade Range (Oregon) alimenta il trasporto fluviale, mentre la porzione non mobilizzata tende ad accumularsi nel tempo lungo la rete colluviale, fino a quando non è trasportata a valle da fenomeni quali le colate detritiche od il trasporto iperconcentrato.

Alcuni autori hanno trovato che il tempo di permanenza del sedimento nei corsi d'acqua ripidi localizzati alle testate dei bacini è dell'ordine di un centinaio di anni, mentre altri hanno stabilito che l'accumulo di sedimento nei corsi d'acqua di primo e secondo ordine è asportato da colate detritiche, in media, ogni 300-500 anni.

Tratti in roccia

I tratti in roccia sono contraddistinti dall'assenza, in modo continuo, di un letto alluvionale. Sebbene un po' di materiale possa essere momentaneamente accumulato nelle occasionali buche o a tergo delle ostruzioni del flusso, le vallecole riempite di sedimento sono assenti o piuttosto limitate. I canali in roccia sono spesso confinati dalle pareti della valle e subiscono difficilmente significative modificazioni di tipo planimetrico. Diverse indagini in campo indicano che, a parità di area drenata, i canali in roccia sono più ripidi dei colluviali. La mancanza di depositi alluvionali in alveo è da attribuire all'elevata capacità di trasporto associata ad una forte pendenza del canale e/o ad un elevato tirante.

Sebbene i corsi d'acqua in roccia nella parte a minore gradiente del bacino idrografico riflettano la capacità di trasferire notevoli quantità di sedimento, questi nella porzione più pendente possono anche indicare processi d'escavazione avvenuti di recente.

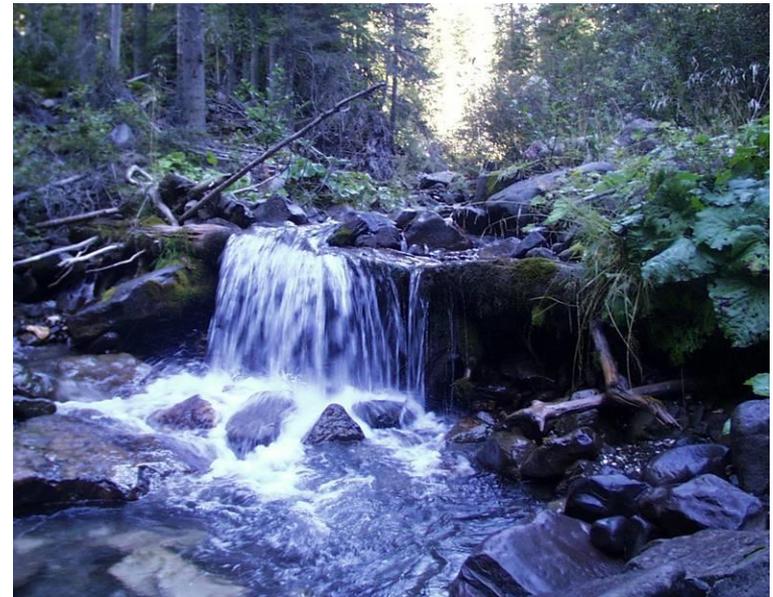


Tratti a morfologia imposta

Le ostruzioni del flusso possono forzare la morfologia di un tratto di canale, in modo tale da differenziarla da quella formatasi naturalmente in una condizione analoga di rifornimento di sedimento e di capacità di trasporto. Nelle regioni boscate, per esempio, i bacini idrografici dispongono di una larga quantità di materiale vegetale; questo può forzare la formazione di locali escavazioni, divergenze del flusso ed accumuli di detrito che rispettivamente danno luogo a *pool*, *barre* e *step*.

Il materiale vegetale può creare delle ostruzioni, favorendo a tal punto il deposito di materiale alluvionale verso monte che l'originale alveo in roccia viene ad assumere la configurazione tipica di un alveo alluvionale.

I *riffle pool* e gli *step pool* sono le più frequenti morfologie imposte da ostruzioni nei bacini montani forestati. Una morfologia a *riffle pool*, in luogo di un'altra unità morfologica, può formarsi in seguito all'ostruzione prodotta da materiale vegetale, mentre una sequenza a *step pool* può essere generata da detriti vegetali di grosse dimensioni (tronchi) posti trasversalmente al corso d'acqua (*log step*). Le morfologie imposte si possono estendere anche oltre il range delle condizioni geometriche e di alimentazione solida che solitamente caratterizza le corrispondenti morfologie formatasi liberamente.



Classificazione di Lenzi, D'Agostino e Sonda (2000) per i corsi d'acqua montani

A giudizio di Montgomery e Buffington (1997) le tipologie proposte sono abbastanza rappresentative delle morfologie che si possono osservare soprattutto in ambiente montano. Gli autori, tuttavia, non escludono la necessità di individuare altre configurazioni morfologiche intermedie, le quali si possono rivelare utili per la comprensione e l'interpretazione di alcune situazioni particolari.

Esempi di morfologie intermedie sono:

- tratti a *riffle pool* e letto piano;
- tratti a *step pool* e letto piano;
- tratti a *step pool* e cascate;
- tratti a *step pool* e rapide.

A partire dalla classificazione proposta da Montgomery e Buffington (1997), si è ritenuto opportuno introdurre una serie di integrazioni in modo da prevedere una gamma più articolata di tipologie morfologiche che si possono riscontrare nei torrenti alpini e tenere conto, al contempo, dei condizionamenti più frequenti. Questi si sovrappongono talora alla morfologia di base e possono dare luogo a delle morfologie imposte. A tal fine è stata messa appunto da Lenzi, D'Agostino e Sonda (2000) una scheda di rilevamento (vedi diapositiva seguente) che deve essere compilata per ogni tipologia morfologica.

TIPOLOGIA DEI TRATTI

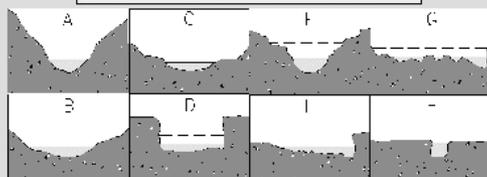
Numero tratto

- a gradini sequenza **STEP ISOLATO** sequenza
RAPIDA a scivolo **STEP POOL** isolato **POOL ISOLATA** isolato **LOG STEP** **RIFFLE-STEP POOL**
RIFFLE POOL sequenza **TRANSVERSE RIB** **CASCATE/A** **LETTO PIANO** **TRATTO SISTEMATO**
 isolato
TRATTO DEPOSIZIONALE **TRATTO A BARRE E RAGGRUPPAMENTI** laterali **DUNE RIPPLE**
TRATTO NON STRUTTURATO **COLLUVIALE** mediani **MEANDRIFORME**

CONDIZIONAMENTI

- in alveo in alveo in alveo in alveo
Massi sulle sponde **Affioramenti rocciosi** sulle sponde **Vegetazione arborea** **Legname** sulle sponde
Isola **Frane di versante prospicienti l'alveo** **Immissione collettori** **Sistemazioni**
 (frana di sponda, materiale a grana fine) trasversali (briglie o soglie)
Depositi di colata **Incisione-erosione** spondale **longitudinali**
 al fondo

FORMA DELLA VALLE



GRANULOMETRIA DOMINANTE

argilla-limo
 sabbie
 ghiaie
 ciottoli
 massi

alveo sponde

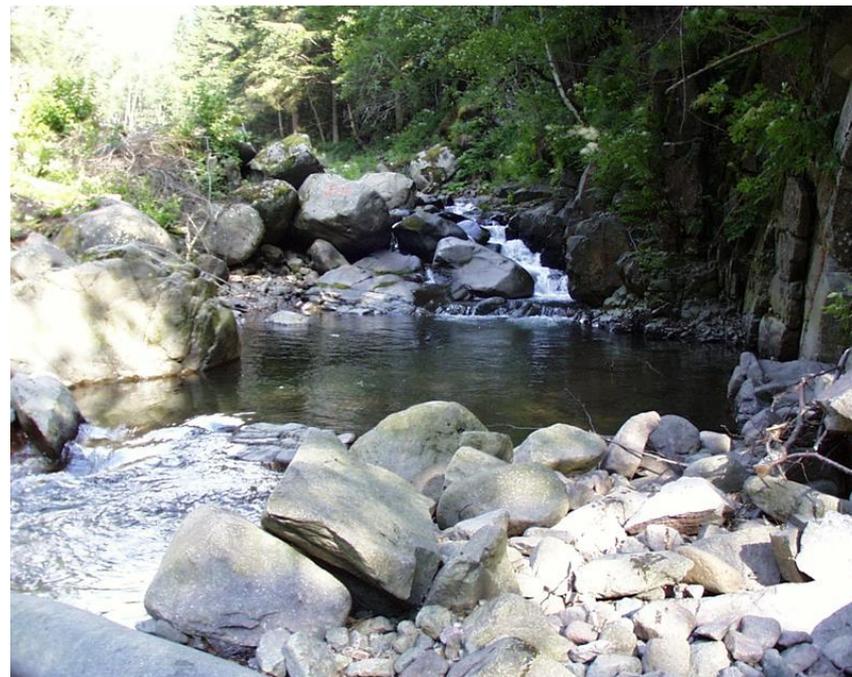
Note

In essa trovano spazio, oltre alle indicazioni sul tipo di unità morfologica anche le informazioni concernenti gli eventuali condizionamenti, la forma della sezione trasversale della valle e la granulometria dominante del letto. La lunghezza dei singoli tratti non può essere, ovviamente, definita a priori in quanto varia in funzione della morfologia osservata in campo. Nelle situazioni di maggiore uniformità tipologica i tratti possono essere anche piuttosto lunghi (fino a qualche centinaio di metri), mentre per contesti morfologicamente più tormentati possono ridursi anche ad una decina di metri.

In quest'ottica le **rapide** (*cascade*) sono state suddivise in *rapide a scivolo* e *rapide a gradino*. Le prime sono caratterizzate da macroscabrezze ben distribuite all'interno del canale, mentre le seconde presentano al loro interno un parziale grado di organizzazione trasversale degli elementi lapidei. Il flusso, su di una rampa a gradini in condizioni di bassa sommergezza, è condizionato dagli allineamenti trasversali delle macroscabrezze presenti all'interno dell'unità morfologica; queste macroscabrezze non occupano necessariamente tutta la larghezza del canale, assumendo lunghezze d'onda talora regolari e talora irregolari.

Gli **step pool** che si osservano nei corsi d'acqua alpini possono essere isolati oppure "concatenati" che danno luogo ad una sequenza regolare. Altro particolare interessante è la tipologia di *step* rilevabili: *step* in massi, in roccia o formati da legname (*log step*). Un discorso analogo agli *step pool* vale anche per i *riffle pool*. Essi si possono presentare come unità isolate oppure in sequenza. Pure in questo caso vi può essere l'interazione con affioramenti rocciosi e/o materiale vegetale nella definizione dell'unità morfologica.

In molti corsi d'acqua alpini non è rara la presenza di *pool* di grandi dimensioni, localizzate, ad esempio, a valle di un tratto a rapida. Viste le dimensioni di queste unità morfologiche si è ritenuto conveniente tenerle distinte dalle altre tipologie. La terminologia utilizzata per individuare queste singole *pool* è quella di ***pool isolata***.



Nel caso dei letti piani si ritengono molto appropriate, anche per i torrenti alpini, le osservazioni di Montgomery e Buffington (1997). Sulla base delle esperienze di campo si è osservato tuttavia che, accanto a tratti a "letto piano" di una certa lunghezza e che si presentano come unità morfologiche autonome e ben evidenti, si possono riscontrare, su di uno stesso torrente, anche tratti a letto piano di lunghezza più limitata (anche solo 1.5-3 volte la larghezza della *bankfull*) e che fungono da brevi tratti di collegamento di unità morfologiche dello stesso tipo o di tipo diverso.

Rispetto alla classificazione di Montgomery e Buffington (1997) sono state previste delle ulteriori tipologie come i *riffle-step pool*, i *transverse rib*, le cascate, i tratti a barre e raggruppamenti (o "*cluster*"), i tratti deposizionali e i tratti meandriiformi.

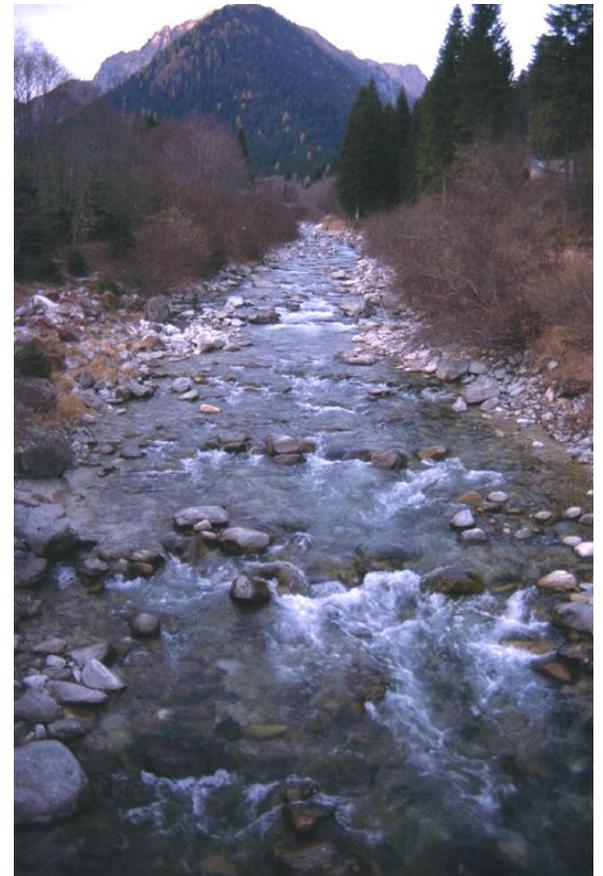
I ***riffle-step pool*** sono delle unità morfologiche composte da un gradino edificato da un insieme di sedimenti di larghezza superiore alla media e con un profilo disteso verso valle. Un *riffle-step* si configura, quindi, come una corta rampa a forte pendenza alla quale segue una *pool*. Queste unità si possono presentare isolate oppure in sequenza, alla stregua degli *step pool* classici. Se confrontati con le rapide o con gli *step pool* si tratta di unità meno regolari.



Alcuni autori hanno definito come *step* i "**transverse rib**". In realtà questi ultimi sono costituiti dall'allineamento di ciottoli disposti in modo trasversale rispetto alla direzione della corrente ed elevati verticalmente rispetto alla quota di base del letto. L'elemento diagnostico che permette la distinzione fra i *transverse rib* e gli *step* è la mancanza di interrimento a monte del gradino; in altre parole, supponendo di essere in condizioni di assenza di flusso e osservando la struttura da monte, sarà possibile apprezzare l'elevazione dei massi che costituiscono il *transverse rib*, cosa non riscontrabile per un *boulder step* al quale il profilo di fondo si raccorda con continuità a partire dal piede dello *step* di monte.

La somiglianza fra *step* e *transverse rib* è allora apparente, in quanto i *boulder step* evidenziano una struttura saldamente concatenata intorno ad alcune particelle chiave, particolarità questa non comune ai *transverse rib*. La formazione di queste strutture è stata osservata durante prove di laboratorio in canali artificiali, tentando di simulare e riprodurre le condizioni idrauliche e morfologiche predisponenti la costituzione delle unità a gradinata.

I *transverse rib* si presentano nei torrenti alpini caratterizzati da pendenze variabili tra l'1.5% e il 7%, diametri caratteristici D_{84} e D_{max} del materiale dell'alveo compresi rispettivamente tra i 0.2-0.6 m e tra 0.4-0.9 m. La presenza di sequenze a "transverse rib" in un alveo torrentizio è un buon indicatore, come nel caso degli *step*, di un assetto morfologico tendenzialmente stabile.



Le **cascate** sono dei salti più o meno verticali, in genere isolati e di altezza superiore ai 3 metri. Le cascate si formano frequentemente per cause litologiche e sono il risultato di una forma di erosione del letto che, manifestandosi nel tempo su di uno strato alluvionale o di roccia poco compatta, mette a nudo una massa rocciosa resistente il cui approfondimento è molto più lento rispetto al tratto di corso d'acqua di valle. Le cascate, pur potendo evolvere in una forra d'incisione attraverso un processo guidato da diaclasi e fratture, rappresentano per il collettore una soglia morfologica a trasformazione molto lenta.

I **tratti a barre e raggruppamenti** si distinguono dai tratti a *riffle pool* per una maggiore irregolarità delle barre e dalle rapide per una minore pendenza ed una ridotta presenza di fenomeni di flusso a getto. Le barre possono essere mediane o laterali, ma non risultano così pronunciate come quelle che si riscontrano nei tratti deposizionali. La capacità di trasporto nei tratti a barre è appena inferiore all'alimentazione solida proveniente da monte. Per questo motivo i tratti a barre possono evolvere verso tratti deposizionali se intervengono erosioni di sponda o condizionamenti esterni che tendono ad allargare la sezione di deflusso. I tratti a barre possono anche ripulirsi dai sedimenti e trasformarsi in tratti a *riffle-pool* o *step-pool* se, per effetto di un aumento di pendenza (per esempio erosione regressiva) vedono accresciuta la loro capacità di trasporto.

I **tratti deposizionali** si localizzano generalmente in corrispondenza di allargamenti dell'alveo, dove la pendenza di fondo del corso d'acqua è nettamente inferiore rispetto ai contigui tratti di monte e di valle. Morfologicamente questi tratti possono avere una struttura caotica, con depositi di materiale anche consistenti e talora consolidati dalla vegetazione.

In corrispondenza dei tratti in cui si può osservare questa morfologia si assiste ad un confinamento laterale molto ridotto ed ad una pianura alluvionale ben sviluppata. I filoni di magra, ramificati, che si sviluppano all'interno dei depositi, evidenziano una certa tortuosità dando origine ad una serie di piccole isole. In condizioni di forte alimentazione solida da monte, accompagnata da una larga piana alluvionale edificata su granulometrie medio fini, i tratti deposizionali possono dar luogo ad una morfologia a rami intrecciati del tutto simile a quella che si riscontra nei tratti pedemontani.



Nell'ambito di questa tipologia si possono far rientrare anche molti tratti di torrente che si sviluppano su conoide. In quest'ultimo caso alle isole si sostituiscono le testimonianze silenziose (paleo-alvei, depositi, relitti di colate detritiche, massi ciclopici) delle divagazioni subite dal torrente sul conoide nel corso dei secoli.

In ambiente alpino i **tratti meandriiformi** si sviluppano prevalentemente alla testata dei bacini, in aree in cui la valle si presenta molto larga e con pendenze molto basse, condizioni determinate o da erosione glaciale o da fattori tettonici. Il torrente forma una pianura alluvionale morfologicamente evoluta. Il tracciato planimetrico mostra delle anse curvilinee, che si susseguono in modo discontinuo ed irregolare. A differenza dei tratti meandriiformi caratteristici dei corsi d'acqua di pianura, la sinuosità di quelli montani è generalmente bassa (compresa tra 1.5 e 2.0). I loro sedimenti sono generalmente fini, ma possono anche riscontrarsi tratti ghiaiosi.

La dinamica di questi alvei in occasione delle piene straordinarie, ha come effetto più immediato l'esondazione delle acque nella pianura alluvionale. Essi rimangono comunque meandriiformi al variare della portata, ma non è escluso che spostino il loro tracciato all'interno della valle. Essendo caratterizzati da pendenze molto modeste (da 0.01 a 0.001) i corsi d'acqua montani ad andamento meandriiforme sono piuttosto rari. Ciò dipende probabilmente dalla difficoltà con cui si verifica un'ampia concomitanza di situazioni morfometriche e di fattori geomorfologici, sedimentologici e tettonici.

E' parso opportuno inserire nella scheda di rilevamento anche la denominazione di "**tratto non strutturato**", in quanto non è detto che per ogni tratto di un torrente alpino si possa sempre e comunque riconoscere una precisa strutturazione morfologica. Si pensi, ad esempio, a torrenti frequentemente percorsi da colate detritiche oppure che scorrono al piede di versanti o pareti che riversano frequentemente in alveo quantità di materiale solido così ingenti da impedire il riconoscimento di un qualsivoglia modello morfologico. Lo stesso dicasi per le erosioni d'alveo molto accelerate che non consentono, se non in forma embrionale, alcun grado di organizzazione dell'alveo

Infine, nell'ottica di una classificazione più esaustiva dei torrenti è opportuno anche rilevare quei tratti in cui sono stati compiuti degli interventi di sistemazione più o meno intensi. Questi tratti possono indicarsi in modo del tutto generico come "**tratti sistemati**". Anche se questi tratti rappresentano una alterazione della morfologia originaria, tuttavia la loro identificazione risulta fondamentale sia per valutare a distanza di tempo l'efficacia dell'intervento sia per tenere conto dell'influenza che un tratto sistemato può esplicare su tratti limitrofi non sistemati.



Rapida ("Cascade")

- Pendenza: $> 3 - 4 \%$;
- Granulometria dominante: sassi e ciottoli ($> 6.4 \text{ cm}$) e massi;
- Organizzazione elementi lapidei: molti massi disordinati ed indipendenti; disorganizzazione longitudinale e trasversale;
- Regime idraulico: tumbling e jet-and-wake flow sopra e attorno ai grossi massi;
- Morfologia valle: tratti a maggiore pendenza con confinamento laterale;
- Aspetto: si presenta come una "ideale" lunga rampa con accentuata macroscabrezza:

Rapida a scivolo: pur essendoci grosse macroscabrezze queste sono ben distribuite;

Rapida a gradini: i gradini lungo la rapida non sono regolari e non occupano, necessariamente, tutta la larghezza trasversale del canale.

Altre caratteristiche: presenza di piccole pool di dimensioni inferiori alla larghezza del canale.

Step-Pool

- Pendenza: > 3 - 5 %;
- Granulometria dominante: elementi lapidei di maggiori dimensioni in corrispondenza degli step e materiale fine all'interno delle pool;
- Organizzazione elementi lapidei: negli step i grossi massi sono organizzati in modo trasversale su tutta la lunghezza dell'alveo, mentre nelle pool i massi sporgenti sono limitati o assenti, prevalendo la granulometria più fine;
- Regime idraulico: alternanza fra regime critico o supercritico (sopra gli step) e subcritico (nelle pool);
- Morfologia valle: tratti pendenti; confinamento laterale dei versanti;
- Aspetto: sequenza di gradini seguiti da pozze;
- Altre caratteristiche: sono necessari almeno tre step in successione per dare luogo ad una sequenza a step pool morfologicamente ben definita.

Riffle-Pool

- Pendenza: da moderata a bassa (< 2 %);
- Granulometria dominante: variabile dalle sabbie ai sassi, più frequentemente ghiaie (da 0.2 a 6.4 cm);
- Organizzazione elementi lapidei: elementi di maggiori dimensioni in superficie e più fini nel sottostrato; concentrazione delle granulometrie più grossolane lungo i riffle;
- Regime idraulico: solo il 5-10 % dell'area occupata dal riffle evidenzia un regime supercritico;
- Morfologia valle: generalmente non confinati con una ben sviluppata pianura alluvionale;

Aspetto: letto ondulato che definisce una sequenza di barre (spesso alternate), pool e riffle;

Altre caratteristiche: tipica presenza di barre laterali. Nonostante siano presenti dei ciottoli o grappoli di ciottoli questi non sono organizzati in "transverse rib".

Letto piano

- Pendenza: uniforme (frequentemente $< 4 - 5 \%$);
- Granulometria dominante: ghiaia, sassi (da piccoli, 3-4 cm, a medi, 10-15 cm), localmente e più raramente sabbia; pochi ciottoli;
- Organizzazione elementi lapidei: fondo dell'alveo tipicamente corazzato;
- Regime idraulico: assenza del *tumbling flow* e di *jet-and-wake flow*;
- Morfologia valle: confinato o non confinato dai versanti della valle;
- Aspetto: assenza di barre laterali discrete;

Altre caratteristiche: pelo libero molto regolare; assenza di barre laterali: la presenza di ostruzioni al flusso può indurre solo occasionalmente la formazione di locali pool e barre; è spesso, non sempre, una "unità di collegamento" fra due pool o altre unità morfologiche.

Riffle-step pool

- Pendenza: da moderata ad alta (fra 2 % e 15 %);
- Granulometria dominante ed organizzazione elementi lapidei: elementi di maggiori dimensioni in corrispondenza dei riffle step; nelle pool elementi di minore dimensione e più fini nel sottostrato;
- Regime idraulico: regime critico o supercritico, sopra i riffle-step e subcritico (nelle pool);
- Aspetto: i riffle-step presentano, rispetto agli step, con un gradino disteso verso valle, che li rende simili a delle corte rampe;

Altre caratteristiche: isolati o organizzati in sequenze contenenti riffle-step e step.

Transverse rib

- Pendenza: 1.5 - 7 %;
- Granulometria dominante: il D_{84} e il D_{max} del materiale superficiale d'alveo sono compresi, rispettivamente, tra i 0.2 - 0.6 e 0.3 - 0.9 m;
- Organizzazione elementi lapidei: massi, anche di medie dimensioni, disposti in modo trasversale sull'intera larghezza ed elevati rispetto alla quota di base del letto; assenza di interrimento a monte;
- Regime idraulico: da subcritico a supercritico;
- Morfologia valle: confinamento laterale limitato;
- Aspetto: sequenze di allineamenti trasversali di massi di altezza più ridotta rispetto agli step;

Altre caratteristiche: la presenza è un buon indicatore di un assetto morfologico stabile.

Cascata

- Pendenza: fino alla verticale;
- Granulometria dominante: roccia affiorante;
- Morfologia valle: il confinamento può essere da debole ad accentuato e dipende dalle caratteristiche litologiche della roccia;

Altre caratteristiche: altezza del salto superiore a 3 metri; soglia morfologica ad evoluzione molto lenta.

Tratti a barre e raggruppamenti

- Pendenza: raramente oltre il 10%;
- Granulometria dominante: sassi, ciottoli e qualche masso;
- Organizzazione elementi lapidei: presenza di barre piuttosto disorganizzate e di dimensioni tali da essere abbastanza facilmente rimaneggiate in caso di piena;
- Regime idraulico: fortemente condizionato dalla geometria delle barre;
- Aspetto: si distinguono dai riffle pool per una maggiore irregolarità delle barre e dalle rapide per minori fenomeni di getto e separazione della corrente;
- Altre caratteristiche: possono facilmente evolvere verso altre tipologie;

Tratto deposizionale

- Pendenza: < 3-4%;
- Granulometria dominante: sabbia, ciottoli;
- Organizzazione elementi lapidei: le barre deposizionali possono assumere uno sviluppo longitudinale molto accentuato e possono essere in parte consolidate dalla vegetazione;
- Regime idraulico: subcritico;
- Morfologia valle: piana alluvionale molto sviluppata e tale da minimizzare da un punto di vista idraulico il confinamento laterale;
- Aspetto: in condizioni di magra si formano tipicamente dei filoni di magra che si ramificano intorno ai depositi (rami intrecciati);

Altre caratteristiche: la morfologia deposizionale può aver luogo anche su conoide: in questo caso la ramificazione è più rara ed è sostituita dalla possibile divagazione del letto.

Dune ripple

- Pendenza: $< 0.5\%$;
- Granulometria dominante: sabbia, ghiaia fine;
- Regime idraulico: da critico a subcritico;
- Morfologia valle: l'alveo può essere anche confinato, ma presenta una larghezza un può superiore alla media;
- Aspetto: ondulazioni regolari del fondo, che si localizzano solitamente a valle di zone di separazione della corrente;

Altre caratteristiche: nei torrenti alpini è molto raro che questa morfologia si presenti con continuità su di un tratto di larghezza apprezzabile. Sono invece più frequenti aree a dune-ripple di estensione ridotta e che interessano solo una parte della larghezza del letto.

Pool isolata

- Pendenza: negativa (innalzamento del profilo di fondo della pool verso valle);
- Granulometria dominante: sabbia, ghiaia, ciottoli;
- Organizzazione elementi lapidei: se sono presenti molti ciottoli può aver luogo una sorta di pavimentazione della pool; in caso di granulometrie assortite queste tendono a divenire più grossolane spostandosi dal punto più profondo della pool verso valle;
- Regime idraulico: globalmente subcritico con presenza di vortici ad asse orizzontale e verticale;
- Aspetto: pozza di notevole estensione, specie in senso longitudinale; il tirante varia anche di un ordine di grandezza rispetto al punto più profondo;

Altre caratteristiche: in genere si localizza a valle di una cascata, di un tratto a rapida o al termine di una sequenza a step-pool piuttosto pendente;

Tratti meandriiformi

- Pendenza: le pendenze sono modeste, solitamente 1% - 1‰;
- Granulometria dominante: sedimenti piuttosto fini ed in genere compresi nel campo dei limi e delle sabbie; sono anche frequenti alvei meandriiformi ghiaiosi;
- Regime idraulico: subcritico;
- Morfologia valle: piana alluvionale;

Altre caratteristiche: sinuosità compresa tra 1.5 e 3; il tratto tende a rimanere meandriiforme anche in condizioni di piena eccezionale, mutando solo parzialmente il tracciato planimetrico;

Tratti colluviali

- Pendenza: sostenuta (> 15-20%);
- Granulometria dominante: sedimenti a grana fine;
- Organizzazione elementi lapidei: assenza di unità morfologiche ben definite;
- Regime idraulico: da debolmente rapido a rapido;
- Morfologia valle: confinamento laterale accompagnato, in genere, ad una incisione poco pronunciata del talweg;
- Aspetto: spesso congestinato da depositi di materiale vegetale vivo e/o morto; possibile la presenza di qualche masso e di affioramenti rocciosi;

Altre caratteristiche: localizzato nei tratti di testata del bacino

Tratti sistemati

Aspetto: in questi tratti si è intervenuti artificialmente per regimare il trasporto solido, consolidare il fondo e/o evitare erosioni di sponda (sistemazioni trasversali e longitudinali);

Altre caratteristiche: le briglie di trattenuta di tipo non filtrante inducono a monte tratti di tipo deposizionale intrinsecamente stabili e dove prevale la sedimentazione del materiale medio-fine costituente il letto; gli effetti di tutti gli interventi devono essere valutati caso per caso nel medio e lungo periodo.

Scheda Lenzi-D'Agostini-Sonda (continua):

CONDIZIONAMENTI E FORMA DELLA VALLE

Nella preparazione di una scheda riassuntiva che inquadri per tratti la morfologia di un torrente, le unità fisiografiche descritte al precedente paragrafo possono risultare non sempre sufficienti a rappresentare in modo adeguato la dinamica torrentizia del corso d'acqua.

Talora, infatti, i **condizionamenti esterni** possono dimostrarsi così influenti sulla morfologia del collettore, da far passare quest'ultima in secondo piano nella descrizione delle peculiarità del tratto. Si pensi ad esempio ad un torrente profondamente inciso nella valle e percorso quasi ogni anno da colate detritiche.

La morfologia potrà comprendere molti tratti non strutturati frammentati a tratti a letto piano, a *step pool* isolati e a depositi disordinati di materiale. In ogni caso la morfologia è sempre precaria e pesantemente condizionata dal passaggio dell'ultima colata detritica.

Per questa ragione si ritiene di primaria importanza, specie se la classificazione del collettore ha come obiettivo la valutazione delle ipotesi di un intervento sistematorio, affiancare l'identificazione morfologica delle unità al riconoscimento dei condizionamenti più significativi che a questa si accompagnano.

Nella scheda di campo dopo la parte dedicata alla tipologia dei tratti dei tratti, è pertanto riportata la voce condizionamenti con la quale si è cercato di tenere conto dei fattori di condizionamento più ricorrenti in ambiente alpino: massi, affioramenti rocciosi, vegetazione, legname, isole, frane, erosioni, confluenze, depositi di colate, sistemazioni idrauliche. Molti di questi fattori possono coesistere all'interno di una stessa unità combinandosi con modi e pesi differenti. Alcune osservazioni puntuali sulla loro influenza possono essere riportate nelle "Note", definendo ancor più esaurientemente il tratto in esame.

Nella scheda di campo sono state, inoltre, introdotte **otto tipologie di sezione trasversale** (da A ad H), le quali, seppure in modo schematico, esprimono la forma della valle intesa come grado di incisione e confinamento laterale del torrente. In particolare sono evidenziate la larghezza del pelo libero, corrispondente al valore della portata a piene rive ("bankfull discharge"), e la larghezza dell'area di esondazione. Le principali caratteristiche di tali sezioni sono di seguito riportate.

Tipo A: indica la dominanza di una forma a V, con un grado elevato di confinamento laterale della sezione accompagnato dalla possibilità che eventuali frane prospicienti l'alveo possano direttamente contribuire alla alimentazione solida del collettore;

Tipo B: indica come la precedente la dominanza di una forma a V, ma con un fondo più piatto ed una minore acclività dei versanti prospicienti il collettore;

Tipo C: indica una sezione che dà luogo ad una forte variazione del suo grado di confinamento passando da un deflusso di piena di tipo ordinario ad uno di carattere straordinario (tempo di ritorno superiore ai 10 anni). L'estensione e la pendenza delle piene di inondazione che delimitano l'alveo di piena ordinaria può indurre, in occasione delle piene eccezionali, diverse potenzialità e modalità di immissione dei sedimenti provenienti dai versanti instabili;

Tipo D: tipica sezione ad U con fondo piatto; può essere determinata da erosione glaciale od anche da erosione idrica di tipo regressivo in terreni pseudo-coerenti (gullies); non si escludono sezioni di questo tipo anche in corsi d'acqua che scorrono su piane alluvionali a debole pendenza e sono caratterizzate da terreni a grana fine (anche altamente organici). Il grado di confinamento del flusso non varia con l'entità delle piene;

Tipo E: valgono considerazioni analoghe a quelle espresse per la sezione A, con la sola differenza che le sponde ed i versanti prospicienti l'alveo di piena ordinaria risultano terrazzati. Questa tipologia si sviluppa in genere quando delle sponde in roccia mediamente degradabili danno luogo, disfacendosi, ad un alveo di magra di tipo alluvionale.

Tipo F: si verifica per lo più in alvei di tipo alluvionale contenenti, in una certa percentuale, terre coesive. Il perdurare nel tempo di uno sbandamento del filone principale della corrente (ad esempio una brusca curva) induce una forte asimmetria della sezione.

Tipo G: è tipica delle situazioni a basso grado di confinamento del flusso anche per tiranti modesti. In condizioni di piena ordinaria il flusso, per la presenza di barre longitudinali, dà luogo ad uno o a due filoni principali e più filoni secondari; tali ramificazioni vanno progressivamente scomparendo per deflussi via più elevati; questo tipo di sezione è caratteristico dei corsi d'acqua montani a canali intrecciati.

Tipo H: sezione ad U a fondo piatto di dimensioni contenute; a differenza della sezione di tipo D le pendenze in gioco non sono in grado di incidere profondamente la piana alluvionale; il grado di confinamento varia quindi in modo notevole passando da deflussi modesti (con tempi di ritorno anche inferiori ad un anno) alle portate di piena; in quest'ultimo caso la sezione di deflusso può risultare anche una piana di inondazione di dimensioni molto estese; questa sezione è caratteristica dei corsi montani di tipo meandriforme.

A completamento della compilazione della scheda di campo si è infine prevista un'analisi di tipo qualitativo della granulometria dominante sull'alveo e sulle sponde.

Anche se dietro questa scelta può talora celarsi un certo margine di soggettività dell'operatore, essa può rivelarsi estremamente utile per verificare se vi sia una buona corrispondenza fra la tipologia del tratto ed i sedimenti costituenti l'alveo (cosa che non sempre avviene nelle morfologie imposte dai condizionamenti esterni) e per valutare, a distanza di tempo, le sue variazioni.