

Capitolo 5

MORFODINAMICA FLUVIALE: EVOLUZIONE

I corsi d'acqua evolvono sia naturalmente sia in risposta ad interventi antropici, sicché la nozione di 'equilibrio' costituisce per i corsi d'acqua un costrutto razionale, metodologicamente utile ma da utilizzare con cautela. Ci proponiamo in questo capitolo di esaminare i problemi di evoluzione morfologica dei corsi d'acqua, distinguendo fra *evoluzione altimetrica*, associata a processi di abbassamento o innalzamento del fondo del corso d'acqua ed *evoluzione planimetrica*, sostanzialmente legata a fenomeni di erosione spondale.

5.1 Evoluzione altimetrica dei corsi d'acqua

5.1.1 fenomeni di evoluzione: processi e meccanismi

I processi che vogliamo esaminare sono quelli che nella letteratura anglosassone sono descritti con la parola *degradation*, cioè abbassamento generalizzato del fondo medio in un tratto del corso d'acqua o *aggradation*, cioè innalzamento generalizzato del fondo medio in un tratto del corso d'acqua (Tali processi vanno distinti dai fenomeni di erosione o deposito localizzati che si manifestano su tratti brevi, spesso temporaneamente).

Esaminiamone le possibili cause con riferimento ad esempi reali riportati da Galay (1983).

Fenomeni di abbassamento del fondo che si propagano verso valle

- *Progressivo abbassamento del fondo indotto dalla costruzione di una diga.*

La realizzazione di una diga dà luogo all'arresto del materiale trasportato dal corso d'acqua ed al progressivo riempimento della diga. L'acqua rilasciata a valle della diga, priva di apporto solido, ma non di capacità di trasporto, asporta quindi sedimenti dal fondo, dando luogo ad un fenomeno di erosione che va propagandosi verso valle. Il processo si esplica su distanze dell'ordine delle decine o talvolta centinaia di chilometri e su intervalli temporali dell'ordine degli anni o decine d'anni, arrestandosi quando il fondo ha ridotto la sua pendenza e ha subito un fenomeno di corazzamento dovuto alla perdita del materiale più fine (fig. 5.1).

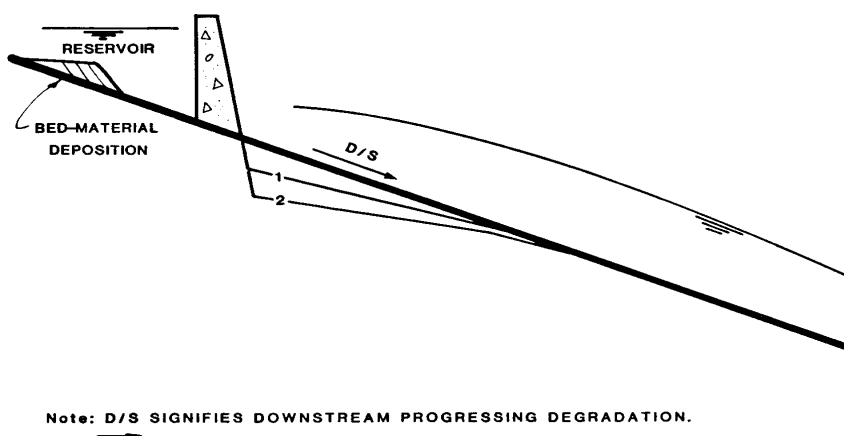


Figura 5.1: Schema del progressivo abbassamento del fondo a valle della costruzione di una diga.

River	Dam	Degradation		Length of Degradation		Time, yr	Bed Material	Source of Data
		m	ft	km	mi			
S. Canadian	Conchos	3.1	10	30	20	10	sand, gravel	Hathaway [1948]
Middle Loup	Milburn	2.3	7.5	8	5	11	sand	USBR [1963]*
Missouri	Fort Peck	1.5	5.0			11	sand, gravel	Hathaway [1948]
Colorado	Hoover	7.1	24	111	68	14	sand, gravel	USBR [1945, 1971a]
Colorado	Davis	6.1	20	52	32	30	sand, gravel	USBR [1945, 1971a]
Colorado	Parker	4.3	14			18	sand, gravel	USBR [1945, 1971a]
Colorado	Imperial	3.1	10			18	sand	USBR [1945, 1971a]
N. Canadian	Fort Supply	2.0	6.5			7	sand	USBR [1947]
Salt Fork	Great Salt Plains	1.0	3.3			9	sand	Coldwell [1947]
Red	Denison	2.0	6.6	2.8	17	3	sand	Hathaway [1948]
Manistee	Junction	3.7	12			12	sand, clay	Lane [1934]
Au Sable	Foote	1.5	5			15	clay	Lane [1934]
	Sariyar (in Turkey)			300				Simons et al. [1977]
Saskatchewan	Squaw Rapids	1.2	4			13	sand	NHC [1976]†
Cheyenne	Angostura	1.5	5	8	5	16		USBR [1967]
Saalach	Reichenhall	3.1	10	9	6	21		Lane [1934]
S. Saskatchewan	Diefenbaker	2.4	8	8	5	12	sand	Galay et al. [1982]
Yellow	Sanmexia	4.0	13	68	41	4	fine sand	Li et al. [1980]

*USBR = U.S. Bureau of Reclamation.

†NHC = Northwest Hydraulic Consultants Ltd.

Tabella 5.1: Dati sull'abbassamento del fondo indotto a valle dalla costruzione di alcune dighe (da Galay, 1983).

Gli esempi di tale fenomeno noti in letteratura sono numerosi. In tab. 5.1 ne sono riportati alcuni, che mostrano abbassamenti variabili da 1 a 7

metri su intervalli temporali da 3 a 30 anni. Il caso più eclatante è quello della diga Hoover sul fiume Colorado, con abbassamenti fino a 7 m ad una distanza di oltre 12 Km a valle della diga. La lunghezza del tratto interessato dall'abbassamento del fondo è stata di oltre 130 Km a valle della diga e si è realizzata nel corso di 9 anni, dal 1935 al 1944. Dopo circa 15 anni il fondo si è stabilizzato attraverso un processo naturale di corazzamento con il fondo ricoperto dalla frazione più grossolana dei sedimenti (Vetter, 1952, 1940; U. S. Bureau of reclamation, 1945, 1971a).

La fig. 5.2 mostra l'abbassamento subito da una sezione localizzata 1.6 Km a valle della diga Gardiner costruita sul fiume Saskatchewan: la figura mostra che l'abbassamento non ha interessato l'intera sezione, bensì solo una porzione di larghezza 200 m (su circa 570), cioè il corso d'acqua si è creato una nuova sezione 'di equilibrio' rispetto allo spettro di nuove portate che la sollecitano a valle della costruzione della diga. Il tronco interessato dal fenomeno è di lunghezza pari ad 8 Km. L'abbassamento del fondo si è sviluppato in un arco temporale di 12 anni. Ecco, quindi, un esempio di interazione fra evoluzione altimetrica ed evoluzione planimetrica.

Fenomeno simile si è verificato sul fiume Giallo a valle della diga Sam-nexia: la fig. 5.3 mostra la rapida trasformazione del corso d'acqua, da intrecciato a monocursale stretto (Li et al., 1980). L'abbassamento ha raggiunto punte di 4 m e si è realizzato in 4 anni su un tronco di 68 Km di lunghezza.

- *Abbassamento del fondo indotto a valle dalla costruzione di traverse.*

Processo simile, anche se di minor entità, si realizza a valle di traverse. In questo caso, tuttavia, l'interruzione dell'alimentazione solida è temporanea poiché riprende non appena si è completato il processo di riempimento a monte della traversa. Sono documentati tuttavia, casi in cui l'erosione al piede della traversa ha raggiunto valori tali da produrne il collasso. È il caso della traversa Islam sul fiume Sutley, documentata da Lane, 1934, in cui il fondo a valle della traversa si è abbassato di 2 m e il livello della superficie libera è sceso 1.2 m al di sotto del piede della traversa.

- *Abbassamento del fondo indotto da eccessiva asportazione di materiale dal corso d'acqua.*

È questa una delle cause più frequenti di abbassamento del fondo nei corsi d'acqua del nostro paese, ma numerosi casi sono stati documentati anche in altri paesi (Kira, 1972, per il Giappone, Lane, 1947, per il Colorado river, Cullen & Humes, 1975, per il Canada).

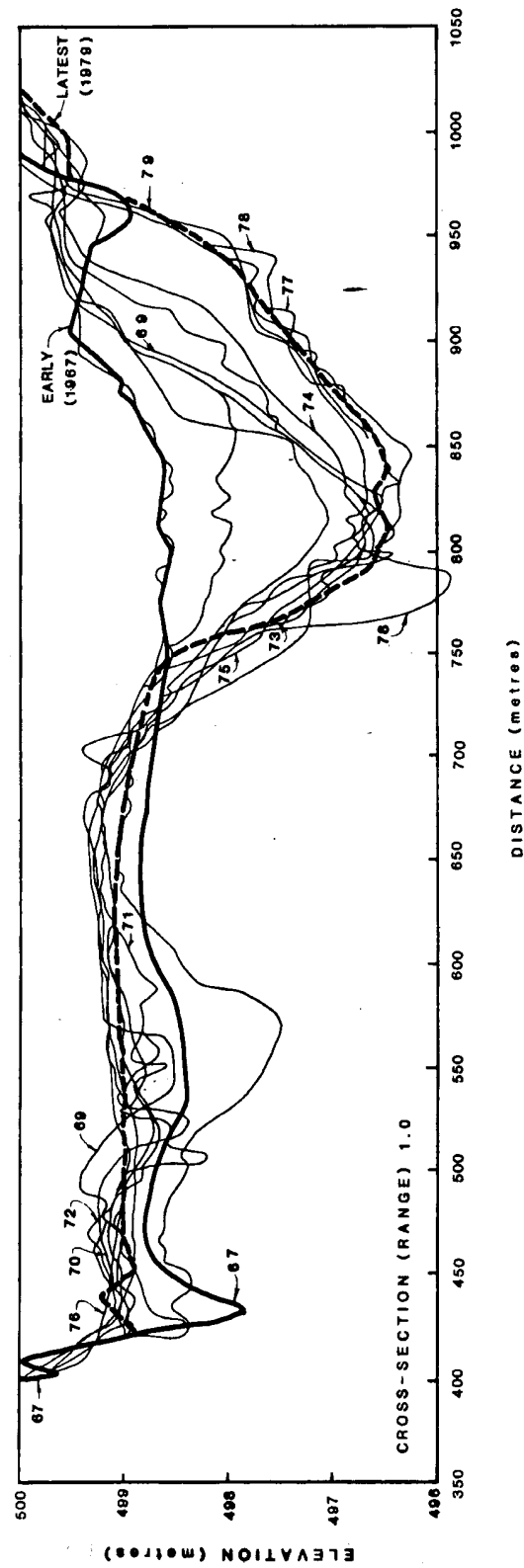


Figura 5.2: L'abbassamento del fondo in una sezione localizzata 1.6 Km a valle della diga Gardiner sul fiume Saskatchewan.

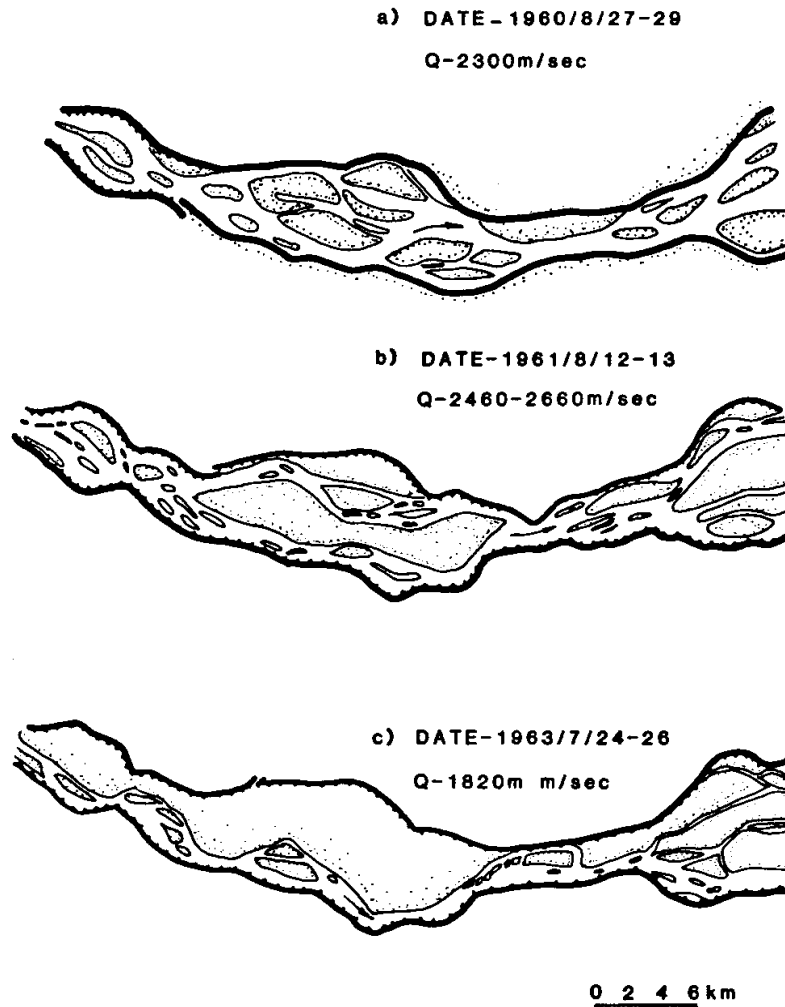


Figura 5.3: Evoluzione morfologica del fiume giallo a valle della costruzione della diga Samnexia.

Il meccanismo che induce il processo di abbassamento del fondo (fig. 5.4) è legato alla riduzione della portata solida a valle del tronco in cui si effettua il prelievamento di inerti: parte dell'apporto solido di monte è infatti utilizzato dal corso d'acqua per ripascere il tronco depauperato dal prelievo di inerti. Ne consegue una tendenza alla riduzione della pendenza del corso d'acqua a valle del prelievo e la successiva propagazione del processo erosivo sia a valle che a monte.

In fig. 5.5 è rappresentata l'evoluzione subita dal fondo di un tronco del fiume Magra nel corso degli ultimi decenni a valle del massiccio prelievo di inerti subito dal corso d'acqua in occasione della costruzione dell'autostrada

Figura 5.4: Schema che illustra il meccanismo di abbassamento del fondo indotto da un massiccio prelievo di inerti da un corso d'acqua.

A1.

- *Diversione di portata solida.*

Concettualmente, questo caso è assai simile al precedente: la riduzione della portata solida è dovuta in questo caso alla presenza di un diversivo.

L'esempio riportato nella fig. 5.6 è quello del torrente Ratmau, che attraversa il Canale Ganga in India ad angolo retto. Quando il torrente va in piena, il diversivo cattura sia la portata liquida che quella solida, mentre la portata che oltrepassa il regolatore e sollecita il tratto di valle del torrente risulta assai meno carica di materiale solido ed è quindi caratterizzata da un'elevata capacità erosiva. Ciò ha dato luogo ad un abbassamento dell'intero tratto di valle del torrente di 15 Km di lunghezza, con un abbassamento

Figura 5.5: Evoluzione del fondo del Magra nel periodo.....

massimo di 9.7 m subito a valle del regolatore (Gupta et al., 1967).

- *Abbassamento del fondo a valle di conoidi.*

Le conoidi ricevono tipicamente acqua e sedimenti da un torrente inciso nei versanti che alimentano la conoide. Il singolo torrente che emerge dal versante si divide in un certo numero di rami sulle conoide dove il corso d'acqua assume un carattere intrecciato. In questa fase la corrente subisce un'improvvisa variazione di pendenza e tende quindi a depositare sedimenti sulla conoide. È stato osservato (Galay, 1983) che la corrente che riemerge dalla conoide con carattere monocursale può essere soggetta a fenomeni di erosione generalizzata nel corso di eventi di piena. Nel caso documentato da Galay, 1983, che si riferisce ad una conoide in Iran, l'abbassamento del fondo si è temporaneamente manifestato su un tratto di diversi chilometri, cioè durante la fase di picco della piena in cui si è anche avuto il crollo di un

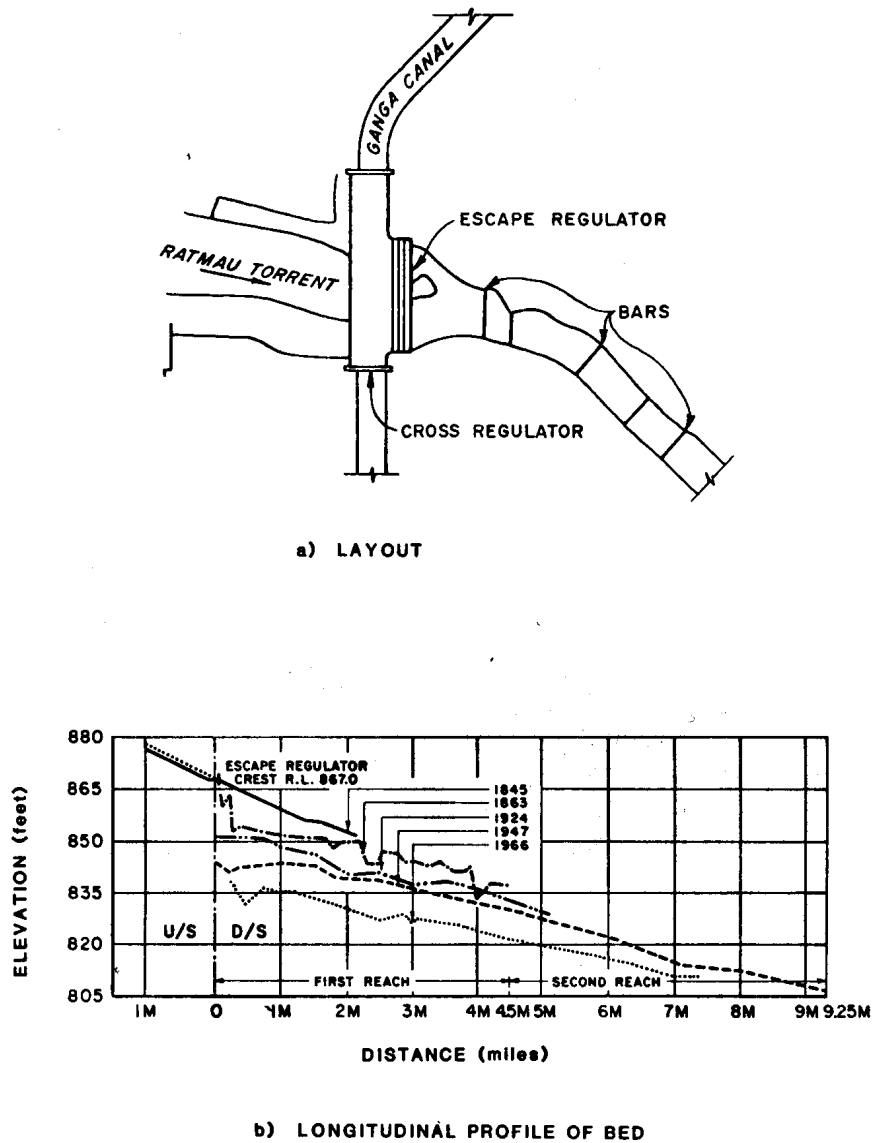


Figura 5.6: L'esempio del torrente Ratmau in India che ha subito un forte abbassamento del fondo a causa della diversione delle portate di piena nel canale Ganga (Gupta et al., 1967).

ponte (fig. 5.7), mentre nella fase di decadimento della piena si è manifestato un fenomeno di deposito.

Osservazioni ricavate da immagini LANDSAT suggeriscono che analogo fenomeno si osserva in corsi d'acqua che defluiscono sul versante occidentale delle Ande Peruviane.

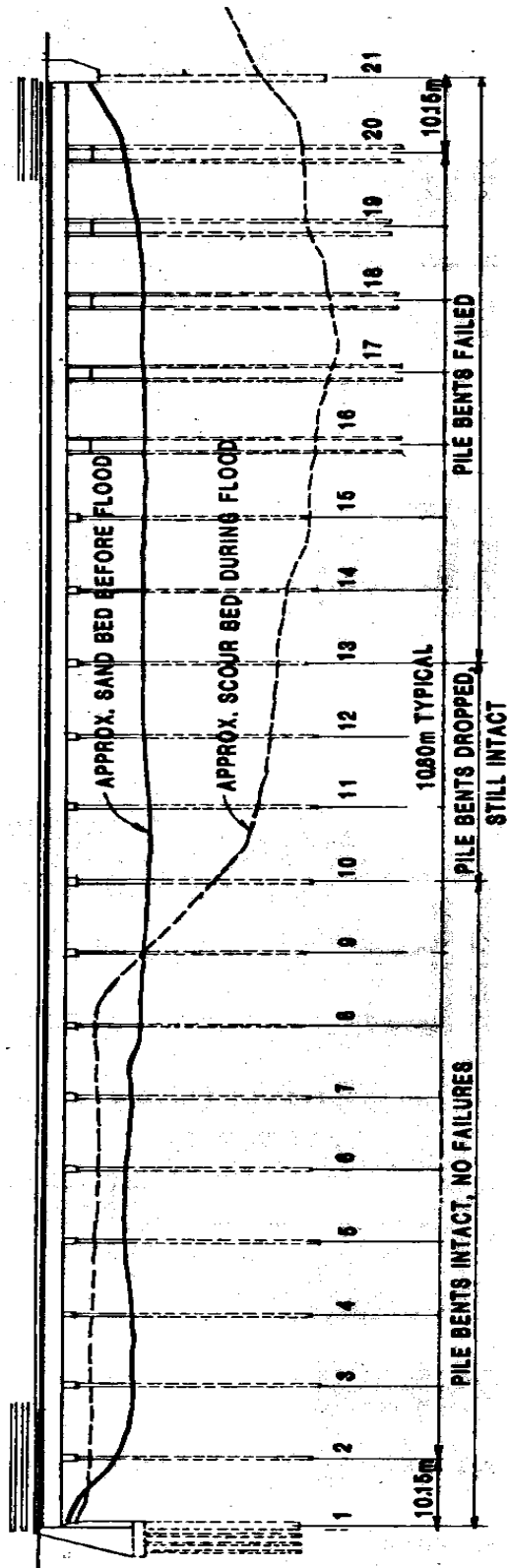


Figura 5.7: Abbassamento del fondo osservato su un corso d'acqua Iraniano a valle di una conoide (Galay, 1983).

- *Abbassamento del fondo nei diversivi.*

I diversivi sono canali progettati per scolmare le piene, che si è osservato (Kellerhals et al., 1977) subiscono spesso dirompenti effetti erosivi. Un caso documentato in modo dettagliato (Skinner, 1973) è quello della Mattagami River Floodway (Adam Creek) in Ontario, Canada. In questo caso il diversivo ha raggiunto profondità dell'ordine di 20-30 m, toccando strati coesivi. Si è quindi formato un salto di fondo (knickpoint) di 4 m di altezza che si è quindi propagato verso monte per una lunghezza di 160 m in un anno. Altro caso documentato è quello del diversivo costruito sul Seine River (Manitoba, Canada), che ha subito un abbassamento di circa 3 m subito a valle della realizzazione dell'opera: la fig. 5.8 ne mostra le conseguenze (Galay et al, 1970).

- *Abbassamento del fondo nel caso di eventi eccezionali.*

Corsi d'acqua soggetti a eventi eccezionali possono sperimentare processi di erosione generalizzata molto intensi, causati da un eccesso di capacità di trasporto della corrente rispetto ai pur rilevanti apporti solidi presenti generalmente in questi casi. Un importante esempio, documentato da Todd ed Eliassen (1940) è quello dell'abbassamento medio di circa 5 m di un tratto del Fiume Giallo di lunghezza intorno a 50 Km, con punte di abbassamento di 10 m sviluppatosi su una larghezza di 1000 m. Il volume di sedimenti asportato dal corso d'acqua in un tempo dell'ordine delle 12 ore è stato stimato in 200 milioni di metri cubi!

- *Abbassamento del fondo a valle di affluenti con apporti solidi grossolani.*

Affluenti che forniscono apporti solidi più grossolani dei sedimenti trasportati localmente dalla corrente principale possono indurre localmente un corazzamento del fondo, talvolta con la formazione di 'knickpoints'. A valle, la corrente non è quindi carica di sedimenti e, se la granulometria si affina, la capacità di trasporto della corrente dà luogo a significativi processi erosivi. È il caso dell'esempio riportato in fig. 5.9: il Kootenay River, a valle della sua confluenza con il St. Mary ed il Wild Horse River, ha carattere intrecciato e granulometria grossolana; più a valle, laddove l'alveo diventa sabbioso si ha una distinta transizione da alveo intrecciato ad alveo meandriforme che si rivela profondamente inciso nella piana alluvionale.

- *Corsi d'acqua a valle di laghi.*

A valle di laghi i corsi d'acqua sono tipicamente privi di apporto solido, sicché danno luogo a processi erosivi ed al corazzamento dell'alveo : un esempio è riportato in fig. 5.10 (Glacier Creek, Alaska).

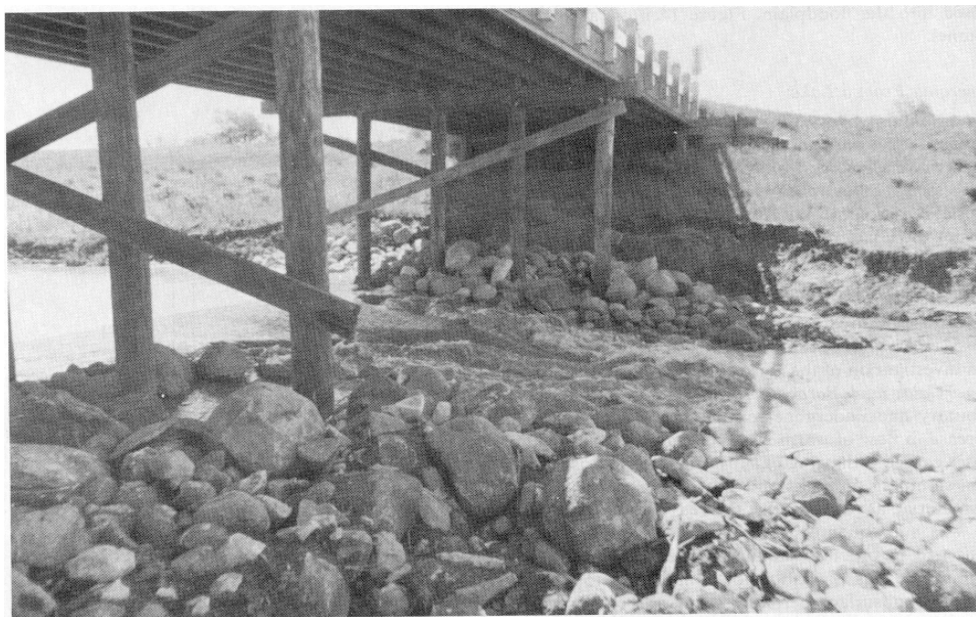


Figura 5.8: Abbassamento del fondo indotto in un diversivo sul Seine River (Canada) (da Galay et al, 1970).

- *Erosioni indotte da disgelo.*

Sono stati anche osservati (Galay & Baracos, 1973) fenomeni di abbassamento del fondo associati ad erosione spondale, indotti dall'improvviso disgelo dello strato di fondo superficiale ghiacciato, per effetto di un piccolo aumento della portata d'acqua associata ad un affluente a temperatura più elevata del corso d'acqua principale.

Fenomeni di abbassamento del fondo che si propagano verso monte.

- *L'effetto dell'abbassamento del livello della superficie libera di un lago o di un mare.*

Un abbassamento del livello della superficie libera in un corpo idrico ricevente induce un aumento di pendenza motrice e, quindi, un'aumento della capacità di trasporto della corrente che dà luogo ad un processo erosivo che, muovendo da valle si propaga verso monte (fig. 5.11). Un fenomeno di questo genere si è diffusamente verificato, ad esempio, sui corsi d'acqua che sfociano nel Mar Caspio per effetto del progressivo abbassamento di livello di quest'ultimo, presumibilmente dovuto ad un massiccio incremento delle derivazioni di acqua per irrigazione (Ananian, 1961). Ciò ha avuto catastrofici effetti sulle fondazioni dei ponti dell'autostrada del Mar Caspio in Iran.

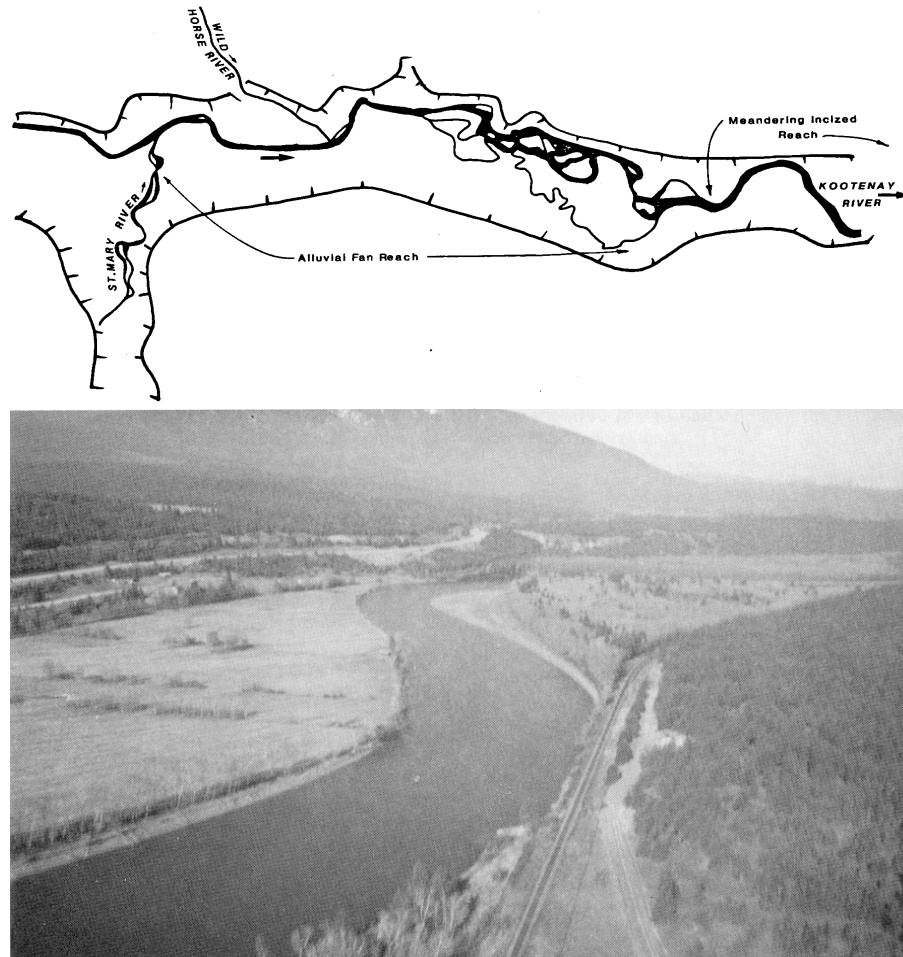


Figura 5.9: Modificazioni morfologiche a valle della confluenza fra Kootenay river e St. Mary e Wild Horse River.

- *L'effetto di un abbassamento di livello del corso d'acqua principale sull'assetto altimetrico degli affluenti.*

Se il corso d'acqua principale viene regolato da un invaso, il regime delle portate a valle della regolazione può cambiare drasticamente, mentre analoghi mutamenti non si verificano sul regime delle portate degli affluenti di valle. Il livello della superficie libera del corpo idrico ricevente, qui il corso d'acqua principale, si abbassa quindi rispetto agli affluenti e ciò può dar luogo a processi erosivi analoghi a quelli discussi nel caso precedente, che si propagano verso monte negli affluenti. Un fenomeno di questo tipo è stato documentato da Anderson (1966): il Big Sioux River, affluente del Missouri confluisce in quest'ultimo vicino a Sioux City (Iowa), a valle di significativi



Figura 5.10: Incisione e corazzamento del Glacier Creek (Alaska), corso d'acqua che emerge a valle di un lago glaciale (Galay, 1981).

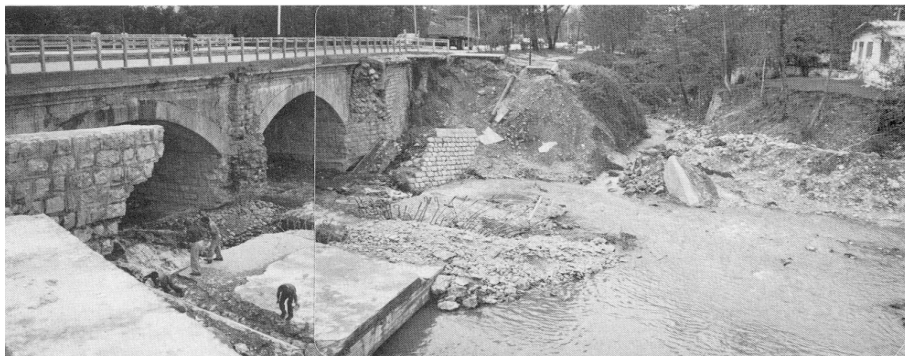


Figura 5.11: Schema della propagazione a monte del processo erosivo indotto da un abbassamento di livello della superficie libera di un corpo idrico ricevente.

interventi di regolazione effettuati sul Missouri River attraverso la realizzazione di numerosi grandi invasi. Nel corso di una piena, nel Marzo 1962, si è verificato, a causa del meccanismo appena discusso, un esteso processo di abbassamento del fondo nel Big Sioux River, a partire dalla confluenza col Missouri, che ha portato al crollo di alcuni ponti sull'importante Autostrada I-29 che collega Iowa e South Dakota.

- *L'effetto di un cutoff naturale o artificiale in un alveo meandriforme.*

La creazione di un cutoff, naturale o artificiale, dà luogo ad un aumento locale di pendenza. Ne consegue la formazione di un'onda erosiva che si propaga verso monte ed un'onda di deposito che si propaga verso valle fino al ripristino di una pendenza prossima a quella iniziale (fig. 5.12). Si noti, tuttavia, che tale fenomeno può non verificarsi se il fondo è molto resistente all'erosione: è quanto accade ad esempio in alvei rocciosi, in cui un cutoff dà luogo alla formazione di un knickpoint, cioè un salto, che migra verso monte molto lentamente (si veda la descrizione di Crickmay, 1960, delle conseguenze di un cutoff naturale nel Pembina River in Canada).

La creazione artificiale di una serie di cutoffs in un corso d'acqua è usualmente denominata canalizzazione del corso d'acqua, una tipologia di intervento largamente praticata su molti corsi d'acqua Europei ed Americani, al fine di controllare le piene e agevolare la navigazione. Un esempio molto significativo è quello del Mississippi che (Winkley, 1977) ha subito un esteso fenomeno di abbassamento del fondo a monte e deposito a valle in un tronco lungo 480 Km in cui sono stati praticati 16 cutoffs (fig. 5.13).

Talvolta il fenomeno di abbassamento del fondo può dar luogo ad effetti catastrofici, come nel caso dell'Homochitto River (Mississippi, U.S.A.), documentato da Wilson (1979) (fig. 5.14), in cui si è manifestato un fenomeno di abbassamento del fondo su un tronco di 40 Km, che ha dato luogo al collasso di numerosi ponti stradali e ferroviari, con un danno quantificato fra il 1945 ed il 1970, in 1.9 ML \$, a cui va aggiunto il danno indotto dal collasso di un nuovo ponte realizzato nel 1974 sull'Autostrada I-33, stimato in 8ML \$!!

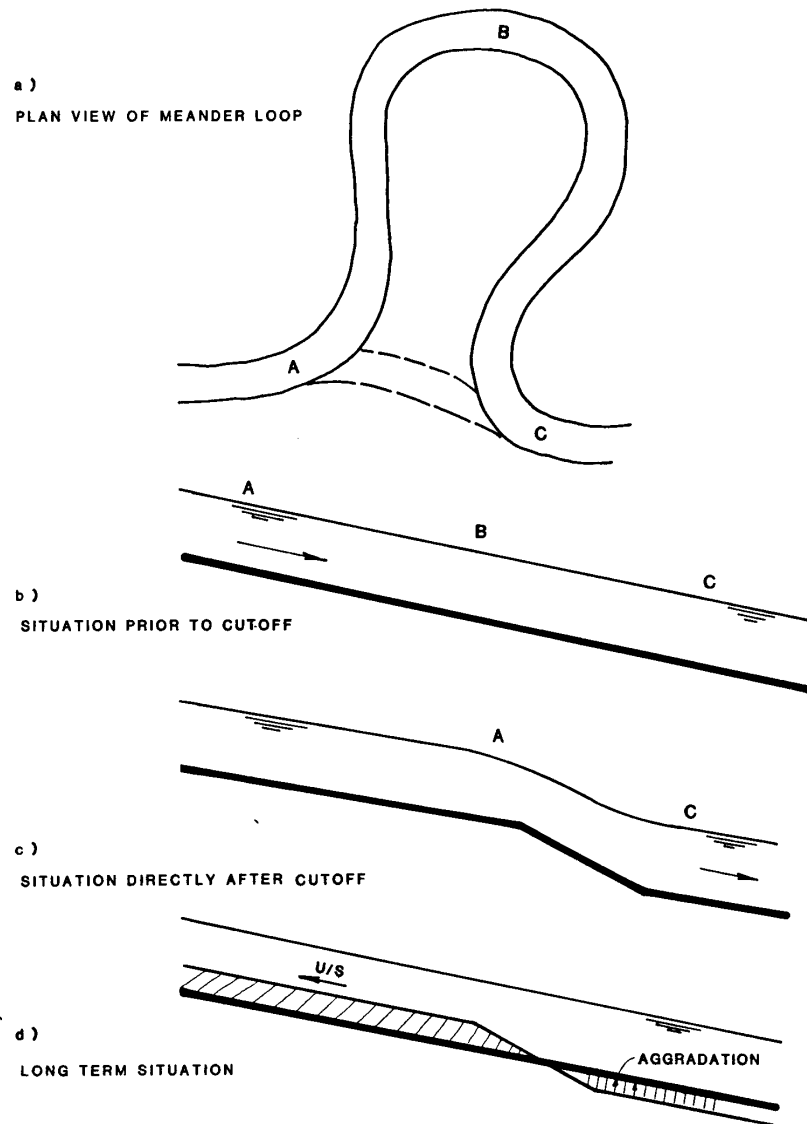


Figura 5.12: Schema del processo di evoluzione altimetrica del fondo indotta da un cutoff naturale in un alveo erodibile.

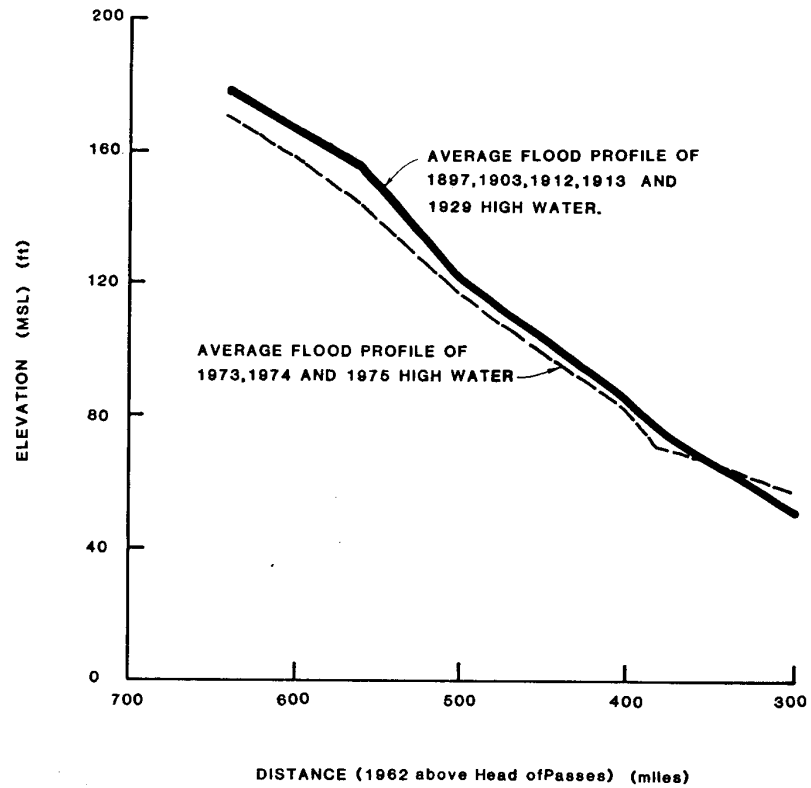


Figura 5.13: Variazione del profilo di piena del Mississippi in un tronco di 480 Km di lunghezza per effetto della realizzazione di 16 cutoffs (da Winkley, 1977).

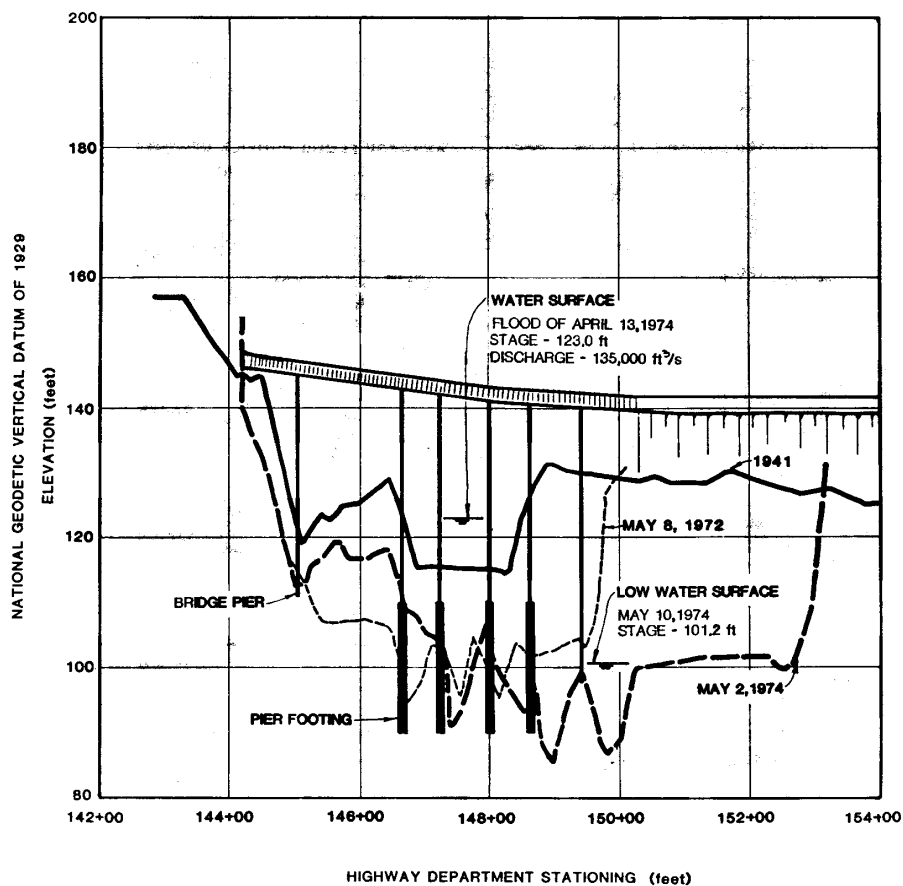


Figura 5.14: La sezione del ponte sul Fiume Homochitto nel Mississippi crollato nell'aprile del 1974 in conseguenza del processo di abbassamento del fondo indotto dagli interventi di canalizzazione praticati sul corso d'acqua (da Wilson, 1979).