

CAPITOLO 15 - CHAPTER 15

LE RISPOSTE DEL SISTEMA FLUVIALE ALLE VARIAZIONI AMBIENTALI RESPONSE OF THE FLUVIAL SYSTEM TO ENVIRONMENTAL VARIATIONS

GIOVANNI BATTISTA CASTIGLIONI

con contributi di - *with contributions by* M. BONDESAN, C. ELMI, G. MARCHETTI & L. PELLEGRINI

15.1 Introduzione

Il «sistema fluviale» della Pianura Padana, inclusi i bacini montani dei fiumi, abbraccia uno spazio di circa 115.000 km². Senza tralasciare i riferimenti alla parte montana, il quadro relativo alla pianura, evidenziato nella *Carta Geomorfologica*, permette un approccio a problemi generali, sia sintetici, sia relativi a qualche settore specifico, in tal caso usando l'espressione «sottosistema» in modo non rigido. Nei capitoli 5 e 9, tale «sistema fluviale» è già stato descritto a grandi linee, composto dal suo asse centrale, dai due sottosistemi degli affluenti sui due lati (diversi l'uno dall'altro), e dai sistemi indipendenti veneto e romagnolo. Esso si è costituito e si è modificato nel tempo con l'evolversi delle due catene montuose, dell'erosione su queste e del colmarsì del bacino interposto; esso è primariamente il prodotto della storia geologica del bacino, comprendendovi i rapporti con le variazioni del livello marino del Mediterraneo e con la storia climatica.

Quanto alla durata nel tempo di tale evoluzione, l'ordine di grandezza è delle decine di milioni di anni, anche se non è questa la scala temporale che verrà considerata nel presente capitolo. Solo per un singolo tema ci si riferirà al Miocene superiore (circa 6 milioni di anni fa), a proposito dello sviluppo di una morfologia fluviale da ricondurre ad un'ampia variazione del livello marino (v. oltre); per il resto, gran parte dei problemi di «risposta del sistema fluviale alle variazioni ambientali» che gli autori della *Carta* hanno implicitamente o esplicitamente affrontato, si riferiscono all'arco di tempo che va dal Pleistocene medio-superiore all'Olocene, inclusi i tempi storici e attuali, per i quali si sono inseriti fattori di variazione del tutto nuovi, quelli legati all'antropizzazione. Per tale arco di tempo, tenuto conto del fatto che molte questioni sono state a lungo dibattute, per esempio quelle relative ai ter-

15.1 Introduction

The «fluvial system» of the Po Plain, including the mountain basins of the rivers it contains, embraces an area of about 115,000 km². Without neglecting references to the mountainous part, the entire framework of the Plain, shown in the Geomorphological Map, allows an approach to many problems, both general and as regards specific sectors, in which case the expression «subsystem» is used in an elastic manner. In Chapters 5 and 9, this fluvial system had already been described in overall terms: its main axis; the two subsystems of tributaries (very different from each other) on both sides; and the independent Veneto and Romagna systems. The whole system evolved, was modified in time as the two mountain chains developed and were subsequently eroded as the basin between them was filled in, and is primarily the product of the geological history of the entire basin, including its relationships with sea level changes in the Mediterranean and climatic history.

As regards the duration of this evolution, the time-scale involves tens of millions of years, although this is not the span used in this chapter. Only in a single case can we refer to the Upper Miocene (about 6 million years ago), regarding the development of fluvial morphology linked to considerable variations in sea level (see later). For the rest, most of the problems of the «response of the fluvial system to environmental variations» which the authors of the Map implicitly or explicitly face, refer to the interval from the Middle-Upper Pleistocene to the Holocene, including historical and present-day times, during which completely new factors of variation occurred, linked to anthropization. During this period, bearing in mind the fact that many questions have long been debated, e.g., fluvial terraces variously interpreted as «tectonic», «eustatic» or «climatic», etc., it is useful and possible to focus, albeit briefly, on issues regard-

razzi fluviali interpretabili talora come «terrazzi tettonici», o come «terrazzi eustatici», o come «terrazzi climatici» ecc., appare utile e possibile cercare di focalizzare, sia pure in forma schematica, le questioni relative alle variazioni ambientali distinguendo gli effetti 1) dei movimenti tettonici, 2) delle variazioni del livello marino, 3) delle variazioni climatiche, 4) delle variazioni ambientali indotte (direttamente o indirettamente) da interventi umani.

Questo sforzo incontra due tipi di difficoltà: da un lato, la risposta dei fiumi risulta spesso dal modo con cui interferiscono tra loro più d'uno dei fattori ora detti, i quali, presi insieme, possono essere considerati come costituenti l'«ambiente morfogenetico» con la sua variabilità nel tempo e nello spazio; dall'altro, certi rapporti di causa/effetto si manifestano solo su singoli fiumi o singoli tratti di fiume, mentre altri sono evidenti su interi settori del sistema fluviale. Alcuni «vincoli» di partenza, da definire nell'ambito di ciascun sottosistema, condizionano la risposta fluviale e dipendono da fatti di scala, da fatti orografici, dall'eredità di vicende pregresse.

Si può anche procedere all'inverso, cioè partire dall'evidenza delle modificazioni del comportamento dei fiumi per assumere queste ultime come «indicatori» di variazioni ambientali. Anche questo procedimento logico ha, entro certi limiti, una sua validità, ed è stato seguito in parecchi studi.

Non appare dal titolo di questo capitolo un altro aspetto, che considera i fiumi come componenti essenziali dell'ambiente geografico. Infatti le variazioni del sistema fluviale sono, a loro volta, fattore importante di «variazione ambientale» per lo svolgersi di altri processi geomorfologici e, più in generale, per l'«ambiente» (nella più ampia accezione del termine) dei territori attraversati: guardiamo ad esempio alle variazioni degli ambienti di sponda dei fiumi, agli effetti sulla dinamica costiera dei cambiamenti di posizione delle foci, agli ampi spazi interni dove ciascun fiume ha esteso la propria influenza con le inondazioni, o ramificandosi, o cambiando corso. La vita territoriale, in particolare la vicenda dei gruppi umani in tantissime manifestazioni (v. ad es. Cipriani, 1988; Bondesan & alii, 1995c), ha risentito o ha reagito a condizionamenti di questo genere, che qui non occorre enfatizzare. Può bastare un richiamo ai meccanismi di interazione, sia quando ci si voglia limitare alla fenomenologia geomorfologica, sia, e ancor più, quando il «sistema fluviale» venga considerato come un sottosistema nell'intero «sistema territoriale».

Consideriamo ora l'importanza da attribuire alle «variazioni climatiche». Da un certo punto di vista, se si escludono i movimenti tettonici e certi interventi degli uomini, tutte le altre variazioni ambientali potrebbero essere inquadrate nelle variazioni del clima.

Ad esempio, si può cominciare dai rapporti clima-glacialismo-sistema deposizionale, nell'ambiente geografico-fisico tipicamente asimmetrico della Pianura Padana, alla scala temporale dei 10^4 - 10^5 anni. A questo proposito, le variazioni climatiche a scala globale nel Pleistocene medio-superiore sono state messe a confronto con la risposta della sedimentazione fluviale-fluvioglaciale in un'estesa

ing environmental variations, distinguishing the various effects of: 1) tectonic movements, 2) sea level changes, 3) climatic variations, and 4) environmental variations introduced, directly or indirectly, by human intervention.

There are two types of difficulty encountered here. On one hand, the response of rivers is often influenced by the way in which the above factors interfere with each other and, taken together, may be considered as composing the «morphogenetic environment», with its variability in time and space. On the other hand, certain relations of cause and effect only manifest themselves along single rivers or single stretches of them, whereas others are evident along entire sectors of the fluvial system. Some initial constraints, to be defined within the framework of each subsystem, influence the fluvial response and depend on questions of scale, relief, and the heritage of preceding events.

The reverse procedure may also be followed, i.e., starting from the results of changes in the behaviour of rivers, to assume that such changes are «indicators» of environmental variations. This logical procedure, within certain limits, does have its validity, and has been followed in several studies.

The title of this chapter does not mention another aspect, which considers rivers as essential elements of the geographic environment. This is because variations in the fluvial system represent, in turn, important «environmental variations» due to the occurrence of other geomorphological processes and, more in general, of the environment (in its widest sense) of the territories crossed by rivers. For example, we may examine variations strictly linked to the environments of river banks, or the large-scale effects on coastal dynamics of changes in the position of river mouths, or the large internal spaces in which each river extended its influence, with floods or ramifications or changes in course. Life on land, particularly the events of human groups in very many of their manifestations (see, for example, Cipriani, 1988; Bondesan & alii, 1995c), has been influenced by or has reacted to conditioning of this kind, which need not be emphasized here. It is sufficient to recall interaction mechanisms, both in order to refer solely to geomorphological phenomena and, to an even greater extent, when the «fluvial system» is viewed as a subsystem within the entire «territorial system».

Let us now consider the importance to be attributed to «climatic variations». From one point of view, excluding tectonic movements and certain types of man-induced change, all other environmental variations may be set within the framework of climate.

For example, we may start from the relations between climate, glacialism, and depositional system in the typically asymmetric physical-geographic environment of the Po Plain, on a time scale of 10^4 - 10^5 years. Climatic variations on a global scale in the Middle-Upper Pleistocene have been compared with the response of fluvial-fluvioglaciale sedimentation over a large sample area in the central part of the plain (Vittori & Ventura, 1995), temporal variations in prevailing grain size being hypothesized to reflect climatic variations in the basin. On a sediment thickness of 145 metres, from top to bottom, six sedimentation phases have been

area campione centro-padana (Vittori & Ventura, 1995), in base all'ipotesi che le variazioni nel tempo della granulometria prevalente rispecchino le variazioni climatiche nel bacino. Su uno spessore di sedimenti di 145 metri, dall'alto al basso sono state individuate sei fasi di sedimentazione (fig. 15.1), differenziate non solo per la diversa percentuale di silt-argilla rispetto al totale, ma anche per la diversa caratterizzazione mineralogica delle sabbie: per l'area di Viadana (vicino alla confluenza dell'Enza), ma ancor meglio per l'area di San Benedetto Po (alla confluenza del Mincio), tre corpi alluvionali con percentuali assai basse di componenti fini vengono fatti corrispondere, rispettivamente, alle fasi fredde degli stadi isotopici 2, 4, 6; gli altri, con prevalenza di sedimenti fini, alle fasi «temperate» degli stadi isotopici 1, 3, 5. Le fasi con apporti più grossolani indicano una netta predominanza dell'«effetto glaciazione» legato ai ghiacciai delle Alpi (qui in particolare quello del Garda); le altre corrispondono prevalentemente all'attività alluvionale del Po.

A commento dello studio ora citato, una prima conclusione si può trarre osservando i dati di superficie, leggibili nella Carta: nella bassa Lombardia il «livello fondamentale della pianura», attribuito agli apporti fluvio-glaciali di provenienza alpina nel Pleistocene superiore «freddo», si era esteso in avanti, a Sud, ben oltre l'attuale scarpata che lo delimita verso il Po; la scarpata indica invece la successiva fase (olocenica) che ha visto il Po allargare la propria fascia a meandri riguadagnando una parte dello spazio prima perduto alla sua sinistra. Se si immagina un meccanismo simile anche per le precedenti fasi alternativamente «fredde» e «temperate», si giustifica pienamente la distribuzione nel tempo e nello spazio dei se-

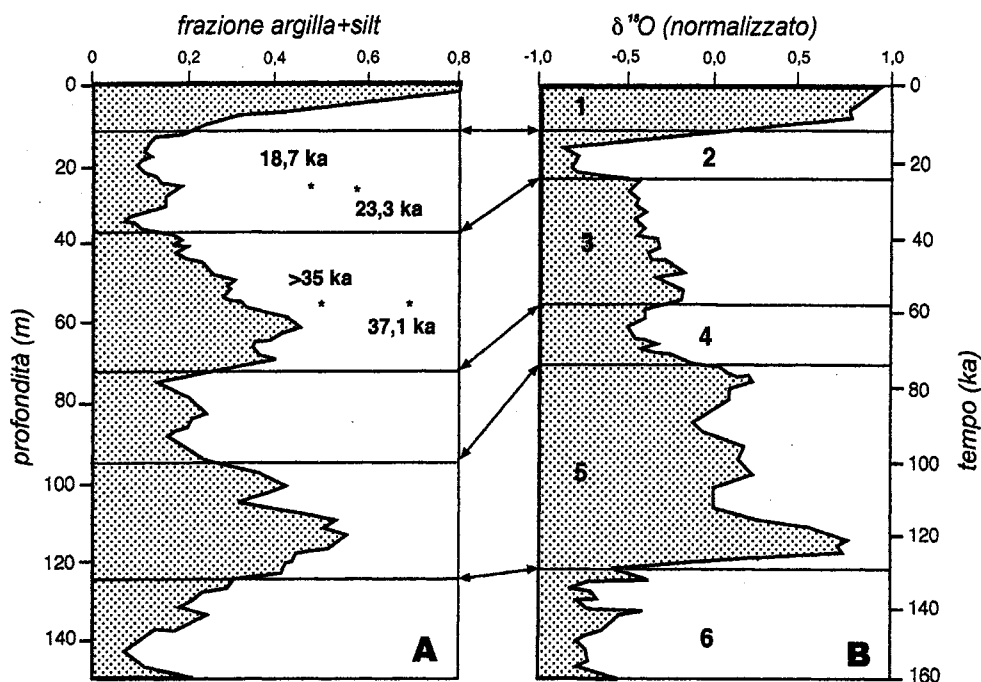
identified (fig. 15.1), differing not only in the percentages of silt-clay with respect to the total, but also in the mineralogical characterization of sands. For the Viadana area (near the confluence of the Po with the Enza) and even more so near San Benedetto Po (at the confluence with the Mincio), three alluvial bodies with very low percentages of fine components are made to correspond, respectively, with the cold phases of isotopic stages 2, 4 and 6, and the others, with mainly fine sediments, with the «temperate» phases of isotopic stages 1, 3 and 5. The phases with coarser supplies indicate the clear-cut predominance of the «glaciation effect» linked to the Alpine glaciers (here, particularly that of Lake Garda); the others mainly correspond to the alluvial activity of the Po.

To comment on the study quoted above, one conclusion may be drawn from the surface data on the Map. In low Lombardia, the «livello fondamentale della pianura», («main surface of the plain»), attributed to fluvio-glacial supplies of Alpine provenance in the «cold» Upper Pleistocene, extended further, to the South, well beyond the present-day scarp which defines it towards the Po. Instead, this scarp indicates the next Holocene phase during which the Po enlarged its meander belt, regaining part of the space previously lost on its left bank. If we imagine a similar mechanism for the preceding phases, alternatively cold and temperate, the temporal and spatial distribution of the buried sediments is fully explained, with extension southwards for those of Alpine provenance or recovery North of the sedimentation belt of the Po.

Terms such as «cold» or «temperate» phases, or expressions of the type «period of climatic deterioration», «humid period», or «arid period» are used here, especially when it is not possible to define precise climatic variations (with de-

FIG. 15.1 - Distribuzione in profondità della frazione argilloso-siltosa nelle alluvioni dell'area centrale della pianura, e confronto con la curva degli stadi isotopici nella cronologia del tardo Quaternario (da Vittori & Ventura, 1995, modif.): A - valori medi, ottenuti da 91 pozzi, della presenza della componente fine nei sedimenti attraversati, con dati geocronometrici ^{14}C ; B - cronologia e curva degli isotopi dell'ossigeno, secondo Martinson & alii, 1987. Le frecce che collegano i due diagrammi propongono la correlazione.

Fig. 15.1 - Depth distribution of clayey-silty fraction in alluvial deposits of central part of plain, and comparison with isotopic stages in Late Quaternary (modified from Vittori & Ventura, 1995): A - mean percentage of fine component in sediments found in 91 wells, with ^{14}C geochronometric data; B - chronology and curves of oxygen isotopes (according to Martinson & alii, 1987). Arrows joining two diagrams: proposed correlation.



dimenti sepolti, con estensione a Sud di quelli di provenienza alpina o, rispettivamente, recupero verso Nord della fascia di sedimentazione del Po.

Ci si serve di termini quali «fasi fredde», «temperate» o, altre volte, di espressioni del tipo «periodo di deterioramento climatico», «periodo umido», «periodo arido», specialmente quando manca la possibilità di definire, volta per volta, le variazioni del clima con valori di temperatura, precipitazioni, regimi, frequenze dei valori estremi ecc., e le aree e i periodi di riferimento. Tuttavia conviene considerare separatamente i diversi tempi di risposta dei vari fenomeni che si ritengono dipendenti da fattori climatici.

Tenuto conto del lavoro svolto per la *Carta* e della complessità dei problemi collegati alle variazioni del clima, si metteranno in evidenza nei paragrafi che seguono eventi significativi che interessano i processi di morfogenesi fluviale, facendo riferimento direttamente alle variazioni del livello del mare, del glacialismo, della dinamica dei versanti, ecc.. Si rimanda ad altri studi l'approfondimento delle connessioni con le «cause climatiche» in senso stretto.

15.2 La risposta del sistema fluviale ai movimenti tettonici

15.2.1 Attività tettonica nelle aree montuose e suoi effetti sul sistema fluviale in pianura

È bene tener distinti i fenomeni in grande da quelli che si manifestano in singoli settori più localizzati. Nella prima categoria rientrano gli effetti dell'orogenesi attiva nelle catene alla periferia, che si traduce in variazioni della produzione di detriti che alimentano il trasporto solido lungo le aste fluviali. Da questo punto di vista, appare significativa la presenza di grandi alvei *braided* dei fiumi veneto-friulani, veri «fiumi-torrenti». Tutto lascia pensare che la costruzione dei grandi conoidi di questi corsi d'acqua sia da interpretarsi, senza negare altri fattori, come la risposta all'attività tettonica del fronte montagnoso, con la sua elevata sismicità (cfr. Bull, 1977).

Questo tipo di relazioni tra l'attività tettonica della montagna e il trasporto solido in pianura è da tener presente per tanti altri tratti delle fasce pedemontane; per esempio, per un settore del Piemonte, la questione era già stata messa in luce (Biancotti, 1977). Nelle fasce pedemontane, in studi stratigrafici su sequenze alluvionali, vengono a volte individuati estesi corpi sedimentari grossolani distinguibili da altri più fini, e tali variazioni di granulometria, dipendenti dal tipo di apporti provenienti dalle valli, possono essere spiegati correlando le fasi caratterizzate da sedimentazione di unità stratigrafiche a tessitura grossolana con fasi di tettonica attiva in montagna. Ma questa correlazione non è esente da incertezze, se Orombelli (1979) dopo aver descritto, nella serie dei terreni esposti lungo la forra dell'Adda, il brusco passaggio dalle argille siltose lacustri (villafranchiane?) ai sedimenti grossolani del «Membro del Naviglio di Paderno», conclude che «non vi sono localmente elementi sicuri per dirimere se la causa del mutamento ambientale che ha portato alla sedimentazione del

tails of temperature, precipitation regime, frequency of extreme values, etc.) and the areas and periods of reference. However, it is better to consider separately the different response times of the various phenomena which we believe depend on climatic factors.

Bearing in mind the work undertaken on the Map and the complexity of problems connected with climatic variations, the following sections will highlight significant events which influenced processes of fluvial morphogenesis, referring directly to variations in sea level, glacialism, slope processes, etc. Readers are referred to other works as regards further information on links with the climatic causes, sensu stricto.

15.2 The response of the fluvial system to tectonic movements

15.2.1 Tectonic activity in mountain areas and its effects on the fluvial system in the plain

Large-scale phenomena should be separated from those occurring in single, smaller sectors. The first category contains effects of active orogenesis in peripheral chains which are translated into variations in the production of debris which feeds bed load along rivers. From this viewpoint, the large braided beds of the Veneto and Friuli rivers, true «torrential rivers», are significant. Everything indicates that the construction of the large fans of these watercourses is to be interpreted, without denying other factors, as a response to tectonic activity in the mountain front, with its elevated seismicity (cfr. Bull, 1977).

This type of relation between tectonic activity in the mountains and solid transport in the plain should be borne in mind when examining many other stretches of the piedmont belts; for example, for a sector in Piemonte, the question has already been highlighted (Biancotti, 1977). In stratigraphic studies on alluvial sequences in piedmont belts, extensive coarse-grained sedimentary bodies are sometimes distinguished from other, finer ones; their variations in grain size, depending on the type of supplies from valleys, may be explained by correlating the phases characterized by sedimentation of coarse-grained stratigraphic units with ones of active tectonics in the mountains. However, this correlation is not always certain, in view of the fact that Orombelli (1979), after having described the sudden passage from lacustrine silty clays (Villafranchian?) to coarse sediments in the «Membro del Naviglio di Paderno» in the series of terrains exposed along the gully of the Adda, concluded that «there are no locally well-defined elements to decide clearly whether the cause of environmental change which led to the sedimentation of the Membro del Naviglio di Paderno was tectonic or climatic, or due to interference between the two» (cf. fig. 9.4).

In Piemonte, an example referred to as «unexpected strong geodynamic activity which took place in the mountain area behind the plain» is mentioned in the work of Al-lason & alii (1981) on the Villafranchian sediments in the Canavese area.

Membro del Naviglio di Paderno sia stata di ordine tettonico o climatico o da interferenza tra i due» (cfr. fig. 9.4).

Per il Piemonte, un esempio in cui si fa riferimento «ad un'improvvisa forte attività geodinamica esplicatasi nell'area montuosa alle spalle della pianura» è suggerito dallo studio di sedimenti villafranchiani nel Canavese (Allason & alii, 1981).

Il problema è stato affrontato più ampiamente con lo studio stratigrafico del sottosuolo della pianura del Reno presso Bologna, dove si è cercato di attribuire un peso adeguato al «controllo esterno del rapporto erosione/sedimentazione anche nelle valli intramontane» (Amorosi & alii, 1996): riconoscendo alcune importanti fasi di sollevamento tettonico (di cui una, documentata da rapida incisione lungo la bassa valle del Reno, viene collocata tra 19.500 e 8.500 anni B.P.), si ipotizza che «l'incremento dell'efficienza del sistema fluviale abbia causato il trasporto di sedimenti grossolani verso il sistema dei conoidi alluvionali, determinando la crescita di questi e la brusca sovrapposizione di corpi ghiaiosi estesi lateralmente ... sopra sedimenti di piana alluvionale prevalentemente pelitici». Gli stessi autori ritengono che il controllo climatico abbia avuto effetti aggiuntivi rispetto al controllo tettonico, probabilmente con una ciclicità più breve.

15.2.2 *Aggiustamenti della rete idrografica secondo il variare della subsidenza geologica in pianura*

Tornando ai fenomeni riscontrabili a grande scala, si pone l'ovvia questione della coincidenza o meno dei corsi fluviali di pianura con le fasce di massima subsidenza, e il corrispondente problema di interpretare le variazioni di percorso come indicatori di movimenti differenziali (potendosi molte volte datare le variazioni idrografiche stesse). Un'ampia serie di esempi su questo argomento si ricavano dagli studi realizzati per la *Carta Neotettonica d'Italia* (C.N.R., 1983) di cui si è riferito nel Capitolo 7. In una visione generale, si pone la questione dei rapporti tra due fenomeni antagonisti: l'uno, più vistoso, consiste nel seppellimento (per alluvionamento) delle strutture profonde, l'altro nel manifestarsi di queste ultime in superficie, per tettonica attiva, con nuovi dislivelli tali da condizionare le direzioni di deflusso. Delle due componenti la prima (la sedimentazione alluvionale) è certo un fattore determinante nel creare l'insieme dei sistemi di pendenza, nel colmare le bassure e, inoltre, nel realizzare forme particolari caratterizzate da dislivelli di ordine metrico (inclusendo anche quei dislivelli «locali» che derivano dalla compattazione differenziale dei sedimenti).

Sotto questo duplice punto di vista, analizziamo brevemente il tracciato del Po, e confrontiamolo con la distribuzione dei tassi annui della subsidenza geologica, calcolati in modo approssimato come valore medio per l'intero Quaternario, sulla base dei dati forniti dall'Agip sul sottosuolo padano (elaborati da C. Elmi).

Il Po inizialmente appare attratto dal depocentro secondario di Carmagnola, su cui convergono vari fiumi dai quadranti meridionali; poi si incanala attirato dalle dislocazioni di prima grandezza che aggirano il fronte appenni-

The problem has been faced more extensively in a stratigraphic study of the subsoil of the Reno plain, near Bologna, in which an attempt was made to attribute sufficient significance to «external control of the erosion/sedimentation ratio, also in mountain valleys» (Amorosi & alii, 1996). In recognition of some important phases of tectonic uplift (of which one, documented by the rapid incision of the low valley of the Reno, is dated at 19,500-8,500 years B.P.), it is hypothesized that «subsequent increase in the efficiency of the drainage system led to the transport of coarse-grained sediment downvalley to the alluvial fan system, causing fan growth onto the adjacent plain and the abrupt superposition of laterally persistent gravel bodies ... on mainly pelitic floodplain units». The same authors believe that climatic control had additional effects with respect to tectonic control, probably in shorter cycles.

15.2.2 Adjustments in the drainage network with changing geological subsidence in the plain

Returning to large-scale phenomena, let us now examine the question of the response of plain watercourses to the belts of maximal subsidence, and the corresponding problem of interpreting course variations as indicators of differential movement (since drainage network variations may often be dated). Many examples on this subject are given in studies carried out for the Neotectonic Map of Italy (C.N.R., 1983) (see chapter 7). Generally, the question is one of relations between two antagonistic phenomena: the burial (by sedimentation) of deep structures, and their manifestation on the surface, due to active tectonics, with new changes in level extensive enough to influence flow directions. Of the two components, alluvial sedimentation is certainly a determining factor in creating the set of gradient systems, filling low-lying areas, and generating particular forms characterized by changes in level sometimes of several metres (including local changes due to differential compaction of sediments).

From this double point of view, let us briefly analyse the course of the Po and compare it with the annual rates of geological subsidence, calculated approximately as a mean value for the entire Quaternary, according to data from Agip on the Po Plain subsoil (processed by C. Elmi for this research).

The Po initially appears to be attracted from the secondary depocentre of Carmagnola, into which various rivers from the southern sectors converge. Then it is channelled by first-order dislocations which move round the Apennine front («Arco del Monferrato») and is made to flow to the right against the hills, as a result of strong sediment supplies from Alpine rivers; in some stretches it even flows above the buried, eroded, Apennine front, leaving the area of major subsidence to the North. Further downstream, it flows in the high-subsidence belt between the confluences with the Tànarò and Ticino (subsidence of 0.25-0.75 mm/year). Then, downstream from Piacenza to beyond Ostiglia, it expands over an area with accentuated subsidence (0.75-1.00 mm/year). Similar values are found and exceeded along the Po only in the delta.

nico («Arco del Monferrato»), ma viene sospinto a destra, contro le colline, dagli apporti sedimentari di provenienza alpina; in qualche tratto arriva a scorrere sopra il fronte appenninico sepolto ed eroso, lasciando più a Nord la zona di maggior subsidenza. Più a valle, si porta nella fascia di elevata subsidenza tra le confluenze col Tànaro e col Ticino (subsidenza di 0,25-0,75 mm/anno). Quindi, a valle di Piacenza fin oltre Ostiglia, si distende in uno spazio con subsidenza accentuata (0,75-1 mm/anno); valori che si ritrovano e si superano solo nel delta.

Nei tratti intermedi il corso del Po attraversa zone di subsidenza minore, in particolare sopra le strutture positive sepolte dell'«Arco Pavese» (subsidenza 0,25 mm/anno) e della «Dorsale Ferrarese» (subsidenza 0,25-0,50 mm/anno), quasi a dimostrarsi indifferente, ai nostri giorni, rispetto all'entità complessiva di questi movimenti verticali.

Consideriamo ora il fatto che l'attuale corso del Po è composto di singoli tratti impostatisi in tempi diversi; partiamo ora dalla foce e procediamo verso monte. Nell'estesa «pianura di livello di base», in pratica nella zona di sedimentazione olocenica post-versiliana, molti tracciati di rami del Po sono documentati, e il corso attuale è solo uno dei tanti percorsi di età storica o preistorica. Ciò dimostrerebbe: o un'estrema libertà di spostarsi per ripetuti aggiustamenti legati ai processi della sedimentazione stessa, quindi per una risposta interna al sistema; oppure condizionamenti di variabili esterne al sistema, come sarebbero, per esempio, le deformazioni e i dislivelli in superficie indotti dall'attività di strutture profonde e da subsidenza differenziale, in intervalli di tempo dell'ordine dei 10^2 - 10^3 anni.

La prima ipotesi è senz'altro verosimile. La seconda un po' meno, pur trovandoci in un'area soggetta a deformazioni tettoniche; il vicinissimo livello di base è il regolatore primario di dislivelli possibili negli alvei, e, data la breve durata dei tempi post-versiliani, per giustificare molti tracciati del fiume occorre ogni volta ammettere episodi (brevi) di intensificazione locale della subsidenza di origine tettonica, ovviamente con velocità ben superiori a quella media calcolata per il Quaternario, perché quest'ultima implicherebbe il formarsi di dislivelli quantitativamente minimi.

Si osservi ora il tratto del Po tra Pavia e Piacenza. Qui il tracciato del fiume è (a parte i dettagli) di impostazione più antica, perché esso si trova incassato tra terrazzi appartenenti a unità deposizionali pleistoceniche, prevalentemente dovute ad apporti degli affluenti. Al tempo in cui si formavano tali piani alluvionali ora terrazzati, il grado di libertà del fiume era vincolato da processi deposizionali laterali; solo successivamente, durante e dopo l'incisione, il Po ha avuto buon gioco nel creare a spese dei terrazzi una propria piana alluvionale, una fascia a meandri (Marchetti & Dall'Aglio, 1990), in cui certi spostamenti possono essere stati influenzati da variabili esterne, come la tettonica attiva (Braga & Gervasoni, 1985), ma entro uno spazio ristretto, e in un arco di tempo relativamente lungo.

Non è possibile entrare nei dettagli su altri tratti del Po o di altri singoli fiumi che si ritiene abbiano subito spostamenti di percorso come risposta all'attività recente di particolari strutture tettoniche (positive o negative) sepolte. Ricorderemo qui, per illustrare la *Carta* (cfr. i Capi-

In the intermediate stretches, the Po flows through areas of lesser subsidence, particularly above the positive buried structures of the «Arco Pavese» (subsidence 0.25 mm/year) and the «Dorsale Ferrarese» (0.25-0.50 mm/year), almost as if it were indifferent, nowadays, to the overall extent of vertical movements.

Let us now consider the present-day course of the Po as composed of single stretches which developed at different times, starting from the mouth and proceeding upstream. In the large «pianura di livello di base» (base-level plain), in the area of post-Versilian Holocene sedimentation, many paleo-beds of the Po or its branches are documented, and the current course is only one of the many documented in historic or pre-historic times. This may demonstrate either extreme freedom of movement, due to repeated adjustments resulting from processes of sedimentation and thus to an internal response of the system, or control by external variables, e.g., deformations and surface changes in level caused by activity in deep structures and differential subsidence, in time-spans ranging from 10^2 to 10^3 years.

The first hypotheses is probable. The second one is less so, although the area is subject to tectonic deformations. The very adjacent base-level is the primary regulator of possible changes in level of river beds; and, in view of the short duration of the post-Versilian period, in order to explain many recent changes in the river course, we have to admit each time separate episodes of locally brief intensification of tectonic subsidence, obviously at rates far higher than the mean rate calculated for the Quaternary, because in this case quantitatively minimal changes in level would be involved.

Now let us examine the Po between Pavia and Piacenza. Here (apart from details) the course of river is older, and flows embedded between terraces belonging to Pleistocene depositional layers, mainly the result of supplies from tributaries. At the time when these alluvial plains, now terraces, formed, the extent to which the river was free was constrained by lateral depositional processes; only later, during and after its incision, was the Po able, at the expense of the terraces, to create its own alluvial plain, a meander belt, in which certain displacements may have been influenced by external variables, including those due to active tectonics (Braga & Gervasoni, 1985; Marchetti & Dall'Aglio, 1990), but within a restricted space, and in time-spans which were longer than the cases illustrated above.

It is impossible to enter into detail regarding other stretches of the Po or other single rivers which, it is believed, changed their courses in response to the recent activity of buried tectonic structures (positive or negative). We recall here, to illustrate the Map (cfr. chapters 7 and 9) the Lambro Meridionale in low Lombardy; and even more the case of the Mincio which, upstream from Mantova, abandoned its probably very ancient meandering course directed towards the Po, to flow East, in the first millennium B.C. (Castaldini & Panizza, 1988). Of the major Lombard tributaries, the case of the low Oglio is distinguished because, where it flows almost parallel to the Po, it also flows within a belt having a high mean value of Quaternary subsidence. The same cannot be said of the Ticino and Adda, which

toli 7 e 9) il caso del Lambro Meridionale nella bassa Lombardia; soprattutto il caso del Mincio che, a monte di Mantova, ha abbandonato nel 1° millennio a. C. un suo corso a meandri, probabilmente assai antico, diretto al Po per assumere una direzione verso Est (Castaldini & Panizza, 1988). Tra i maggiori affluenti lombardi, il caso del basso Oglio si distingue perché, dove assume una direzione quasi parallela a quella del Po, scorre anch'esso entro una fascia con elevato tasso medio di subsidenza quaternaria; non altrettanto si può dire del Ticino e dell'Adda, i quali sembrano ubbidire principalmente ad un sistema di pendenze realizzato da essi stessi con la deposizione dei sedimenti di origine alpina.

Per il basso Adige, il grande cambiamento di corso (concluso in tempi storici, cfr. Capitolo 9) che lo ha portato vicino al Po, appare nell'insieme come la risposta ad una subsidenza maggiore nella fascia centrale della pianura rispetto a quella settentrionale prossima ai Colli Euganei, relativamente più stabile; ciò interpretando la configurazione altimetrica attuale, con il settore meridionale più basso in media di 3 m rispetto a quello settentrionale (Castiglioni, 1999).

Un caso singolare, meno vistoso, si è potuto riconoscere nell'entroterra veneziano dal confronto tra idrografia e altimetria attuali, su un lembo di pianura tardo-pleistocenica: le isoipse danno il verso della pendenza attuale, a SE, mentre i corsi d'acqua di risorgiva che drenano l'area si dirigono un po' più ad Est. Si è ipotizzato (Castiglioni, 1997) che questi abbiano conservato (nell'insieme) la direzione che avevano nell'ultima fase di aggradazione della piana, e che questa si sia nel frattempo inclinata verso Sud. Sarebbe un caso di «conservazione» dei tracciati fluviali o, se si vuole, di «non risposta» di piccoli fiumi ad una deformazione tettonica.

15.2.3 Terrazzi deformati e rapporti coi fiumi

Osservando l'altezza di vari terrazzi rispetto all'attuale sistema fluviale ci si può addentrare nella discussione su quanto essa sia legata al sollevamento tettonico in aree marginali della pianura o ad altre cause (la «risposta» dei fiumi consiste comunque nell'attivarsi dell'incisione). L'ambiguità non sussiste se viene dimostrata anche la «deformazione» delle superfici deposizionali originarie, ciò che in qualche misura la *Carta Geomorfologica* ha cercato di rappresentare con appositi segni. Lo studio di terrazzi deformati permette di analizzare il tipo della risposta fluviale.

Per il Piemonte meridionale, in un altro capitolo (paragr. 7.3.2) si è mostrato come il sollevarsi dell'Anticlinale di Fossano si sia accompagnato ad una migrazione laterale del F. Tanaro verso destra, ma anche ad una separazione dei tre terrazzi pleistocenici residui per effetto dell'erosione dei corsi d'acqua che attraversavano l'anticlinale stessa mentre si sollevava (affluenti di sinistra del Tanaro, di cui l'unico ancora veramente attivo è la Stura di Demonte); essi dimostrano un fenomeno di «antecedenza».

Nel Piemonte centrale, come si è visto, i terrazzi che costituiscono l'Altopiano di Poirino, posti sulla blanda Sinclinale di Asti, sono stati sede di un *tilting* verso Ovest,

mainly appear to obey a system of gradients created by the rivers themselves, with sedimentation of Alpine origin.

For the low Adige, the large-scale change in course (which concluded in historical times; cfr. Chapter 9) which brought it near that of the Po, mainly appears to be a response to greater subsidence in the central belt of the plain with respect to that further North, near the Euganean Hills, which is relatively more stable. This interpretation is based on the present-day altimetric configuration, the southern sector being on average 3 m lower than the northern one (Castiglioni, 1999).

A singular, although less obvious case is found in the Venetian hinterland between the present-day drainage network and altimetry, on a tongue of Late Pleistocene plain. The contour lines show the current gradient, SE, while the small rivers which drain the area flow slightly further East. It is hypothesized (Castiglioni, 1997) that they have, overall, preserved the flow direction they had in the last phase of plain aggradation, and that in the meantime the plain tilted to the South. This would be a case of «preservation» of river courses or, alternatively, of the «non-response» of small rivers to tectonic deformation.

15.2.3 Deformed terraces and their relations with rivers

The height of the various terraces with respect to the current fluvial system allows discussion as to what extent it is due to tectonic uplift in marginal parts of the plain or to other causes (the «response» of rivers in any case consists in the onset of downcutting). The ambiguity does not exist if the «deformation» of the original depositional surfaces is also demonstrated, which is what the Map represents by means of special symbols. Study of deformed terraces allows analysis of the type of fluvial response.

For southern Piemonte, in chapter 7 (section 7.3.2.), it was shown how the rise of the Fossano anticline was accompanied by right lateral migration of the Tanaro, but also by separation of the three remaining Pleistocene terraces, due to erosion by watercourses which crossed the anticline while it was rising (left tributaries of the Tanaro, of which the only still truly active one is the Stura di Demonte); they show the phenomenon of «antecedence».

In central Piemonte, as already noted, the terraces making up the Poirino plateau, on the mild Asti syncline, underwent westward tilting during and after extensive sedimentation of alluvia from the Po and the paleo-Tanaro (Carraro & alii, 1995). A good example of how the present-day «consequent» drainage network came into being is the Banna and its tributaries; but the problem of the systematic asymmetry of the small valleys which these watercourses have cut in the Poirino plateau has not yet been completely resolved.

In Emilia, chapter 7 (section 7.3.1.) mentions Pleistocene alluvial surfaces deformed into mild anticlines (running approximately parallel to the Apennine margin). Near Vignola, and also near Reggio Emilia and left of the Enza, various quite small watercourses transversally cut the belt of raised alluvial terraces, sometimes guided by faults and sometimes showing phenomena at least indicative of incipient antecedence.

durante e dopo la sedimentazione su ampio spazio di alluvioni del Po e del paleo-Tanaro (Carraro & alii, 1995). È esemplare come si è venuto a costituire l'attuale drenaggio «conseguente», che converge nel T. Banna diretto ad Ovest. Non del tutto risolto è il problema della dissimmetria delle vallette che i corsi d'acqua hanno inciso nell'Altopiano di Poirino.

Per l'Emilia, nel paragr. 7.3.1. sono state menzionate alluvioni pleistoceniche deformate in blande anticlinali (con direzione circa parallela al margine appenninico); presso Vignola, poi presso Reggio e a sinistra dell'Enza vari corsi d'acqua, sia pur modesti, tagliano trasversalmente le fasce di terrazzi alluvionali sollevati, a volte guidati da faglie, a volte con fenomeni almeno incipienti di antecedenza.

Per il Veneto, il caso del Piave può essere preso come esempio di fiume che ha subito una diversione in seguito al sollevarsi ad anticlinale della struttura del Montello; ma questo appare solo come evento tardivo, dopo una precedente fase in cui il fiume si manteneva sul vecchio tracciato passante per Montebelluna, con direzione trasversale. Si trattava, in quella prima fase, di un fenomeno di «antecedenza», come è dimostrato dalla configurazione dei terrazzi deformati (figg. 7.3 e 15.2).

15.3 La risposta del sistema fluviale alle variazioni del livello del mare

Nella fig. 15.3 viene presentata una ricostruzione ipotetica del sistema fluviale padano in una fase di stazionamento basso (*low-stand*) al tempo dell'ultima glaciazione, nella parte della pianura che ora è sommersa dalle acque dell'Adriatico. È noto che, su superfici a bassa pendenza, le maggiori variazioni eustatiche del livello marino nel Quaternario devono aver provocato soprattutto imponenti variazioni di lunghezza dei fiumi, con il ripetuto avanzare o, rispettivamente, arretrare degli apparati di foce. Dell'evoluzione recente di questi ultimi si è detto nel Capitolo 10. Nel pre-

In the Veneto, the Piave may be exemplified as a river which was diverted following uplift of the Montello relief to an anticline. However, this only appears as a later event, after a phase in which the river kept to its old bed, flowing transversally through Montebelluna. The first phase reveals the phenomenon of «antecedence», as the configuration of the deformed terraces shows (figs. 7.3 and 15.2).

15.3 The response of the fluvial system to changes in sea level

Fig. 15.3 shows a hypothetical reconstruction of the Po Plain fluvial system during a low-stand phase of the last glaciation, in that part of the plain now submerged under the Adriatic. It is known that, on low-gradient surfaces, the greatest eustatic variations in sea level during the Quaternary must have caused considerable variations in the length of rivers, with the repeated advance or retreat of mouth structures. Chapter 10 discusses the recent evolution of the latter. This section presents aspects of fluvial morphogenesis depending on base-level variations, for the land sector. However, before considering the time-span from the last glaciation until the present, it is useful to examine two cases: the first (imaginary) refers to an event, for the time being highly improbable, of sea level lowering; the second (which has already taken place), an event of considerable lowering in a remote period, the latest Miocene. The former case covers only theoretical future lowering of sea level, which would initiate a cutting phase, due to the gradient of the seabed off river mouths; for example, lowering by about 10 m would uncover gradients varying between 6 and 2‰, sufficient to cause rapid retrograde erosion along rivers.

15.3.1 Adaptations to situations of low sea level

On a very different scale, and with definite geomorphological effects, is sea level lowering during drying of the

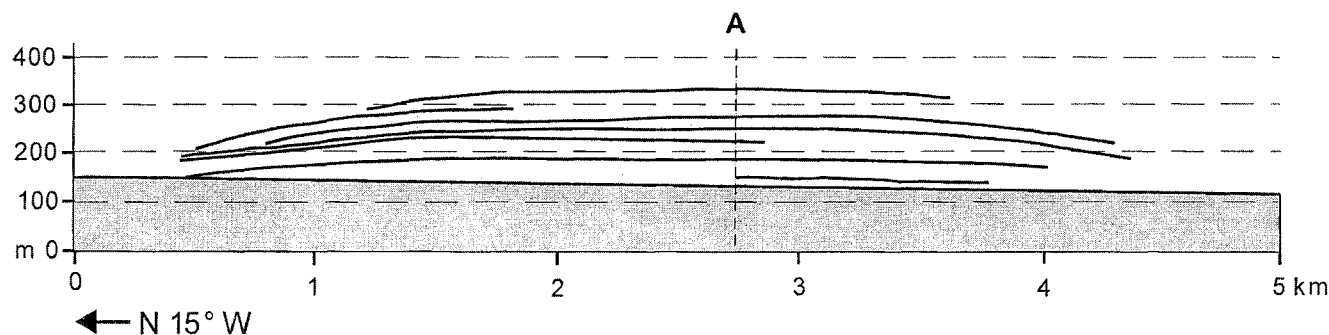


FIG. 15.2 - Profili longitudinali di antichi terrazzi fluviali deformati durante il sollevamento ad anticlinale del colle del Montello (da Ferrarese & alii, 1998, col permesso della Gebrüder Borntraeger, Berlino e Stoccarda). A: asse dell'anticlinale.

FIG. 15.2 - Profiles of old uplifted fluvial terraces, due to active anticline of Colle del Montello. A - anticline axis (from Ferrarese & alii, 1998, copyright of Gebrüder Borntraeger, Berlin-Stuttgart, with permission).

sente paragrafo restano da evidenziare, per il settore a terra, aspetti della morfogenesi fluviale dipendenti dalle variazioni del livello di base. Ma prima di considerare l'arco di tempo che va dall'ultima glaciazione ad oggi, è utile prendere in esame due casi: il primo (immaginario) riferito ad un evento, per ora altamente improbabile, di abbassamento del livello del mare; il secondo (verificatosi) di un abbassamento vistosissimo in un periodo assai antico, il Miocene finale. Nel primo caso si tratta solo di un teorico futuro abbassamento del livello marino, il quale provocherebbe l'avvio di una fase di incisione, dovuta al gradiente dei fondali antistanti alle foci; ad esempio, un abbassamento di una decina di metri metterebbe allo scoperto pendii con gradienti variabili tra il 6 e il 2‰, sufficienti per provocare una rapida erosione retrograda lungo i fiumi.

15.3.1 *Adattamenti a situazioni di livello marino basso*

In un ben diverso ordine di grandezza, e con effettivi risvolti geomorfologici, si colloca l'abbassamento del livello marino durante la fase di disseccamento del bacino mediterraneo riconosciuta nel Messiniano. La configurazione della depressione padano-adriatica durante quella fase era diversa da quella odierna sia al suo interno, sia nelle catene montuose vicine (cfr. Capitolo 6); i corsi d'acqua sfociavano o nel mare a quote molto basse (2-3 km sotto il livello del geoide), o in un lago, depresso oltre un km, nella parte centrale dell'area padana. È opinione generale che il margine montagnoso alpino e gli spazi antistanti occupati da sedimenti neogenici abbiano fortemente risentito, in quella fase, del rapido approfondimento di numerose valli d'erosione da parte dei fiumi, come risposta all'abbassamento del livello di base (Bini & alii, 1978; Cita, 1990; Felber & alii, 1991). Di questo evento si ha la prova in valli ancora presenti, sebbene rimodellate, nelle Prealpi della Lombardia e del Piemonte, ma anche in altre valli incise nel substrato prequaternario, sepolte nel sottosuolo. Meno studiate, ma di interesse geomorfologico evidente (Castiglioni, 1995), sono le numerose valli a fianchi ripidi che intagliano i rilievi marginali dei Lessini e i gruppi di colline isolate dei Berici e degli Euganei; il loro fondo è oggi occupato da depositi alluvionali e/o lacustri.

Passando al Quaternario, e più precisamente all'ultima glaciazione e al corrispondente stazionamento basso del livello marino, nel sottosuolo dell'attuale pianura costiera si hanno prove di importanti fasi di sedimentazione fluviale di bassa energia e fluvio-lacustre (dati riassuntivi in Fontes & Bortolami, 1973; Favero, 1984; Tosi, 1994; Amorosi & alii, 1999), ben spiegabili con la debolissima pendenza complessiva della pianura allora emersa, con la grande distanza delle foci in mare (fig. 15.3) e con l'elevata torbidità dei fiumi. Esistono inoltre orizzonti pedogenetici indicanti fasi di arresto nella sedimentazione prima dell'ultima trasgressione marina. Altri dati si riferiscono alla parte di pianura adiacente ai Colli Euganei (fig. 9.17).

Anche alcuni dati su forme di incisione appaiono collegabili con le fasi di stazionamento basso del Pleistocene superiore: eventi erosivi fluviali (in momenti imprecisati) sembrano documentati da canali sepolti, individuati nel sotto-

Mediterranean basin in the Messinian. The configuration of the Po Plain-Adriatic depression during that phase was unlike its present-day version, both internally and in the nearby mountain chains (cfr. Chapter 6). The watercourses debouched either into the sea at very low altitudes (2-3 km under the geoid level) or into a lake, depressed by more than 1 km, in the central part of the Po Plain area. It is generally believed that, during that phase, the Alpine margin and the plains occupied by Neogene sediments were greatly influenced by the rapid deepening of many valleys eroded by rivers, in response to base-level lowering (Bini & alii, 1978; Cita, 1990; Felber & alii, 1991). Proof of this event is found in still existing although remodelled valleys in the Prealps of Lombardia and Piemonte, and also in others cut in the pre-Quaternary bedrock and buried. Less well studied but still of evident geomorphological interest (Castiglioni, 1995) are the many steep-sided valleys cutting the marginal reliefs of the Lessini Hills and the isolated groups of the Berici and Euganean Hills, the bottom of which appears now occupied by alluvial and/or lacustrine deposits.

Passing to the Quaternary, and more precisely to the last glaciation and the corresponding low-stand, the subsoil of the present-day coastal plain reveals traces of large-scale low-energy fluvial and fluvio-lacustrine sedimentation (summarized data in Fontes & Bortolami, 1973; Favero, 1984; Tosi, 1994; Amorosi & alii, 1999), explained as due to the overall very weak slope of the emerging plain, the great distance to river mouths (fig. 15.3) and the high turbidity of streams. There are also pedogenetic layers indicating moments of arrest in sedimentation before the last marine transgression. Other data refer to the part of the plain adjacent to the Euganean Hills (fig. 9.17).

However, some data on incised forms appear to be linked with Upper Pleistocene low-stand phases: erosional fluvial events (at undated moments) are shown by buried channels identified in the subsoil of the coastal area. For the time being, they are not sufficient to allow us to identify quite complex drainage networks cut in the old plain, in the submerged part, and now more or less buried under Holocene sediments. One of the most explicit interpretations in this sense refers to the example observed near Venice, where a buried channel, about 100 m wide and 15 m deep, has been attributed to a river which flowed towards the sea during glaciation (Favero, 1984; Tosi, 1994, according to data from A. Stefanon). Other stratigraphic data on the Romagna coastal plain indicate more simply a stratigraphic gap between 25.6 and 8.8 ka B.P. (isotopic stage 2) (Amorosi & alii, 1999).

Possible confirmation of Late Pleistocene erosional phases in coastal areas may come from surface observations. There are such indications for the valleys of the Romagna sub-Apennine (Vai, 1984), but the hypothesis is refuted for those in the Bologna area (Amorosi & alii, 1996), due to distance from the mouths, although low-lying.

Parts of the old Upper Pleistocene alluvial plain contain many forms of fluvial erosion which have cut it (see the Map), and control exerted by the low base-level may be in-

suolo dell'area costiera; non tali, per ora, da far individuare sistemi idrografici d'una certa complessità incisi nell'antica pianura, nella parte sommersa e più o meno sepolta sotto sedimenti olocenici. Una delle interpretazioni più esplicite in questo senso si riferisce all'esempio osservato presso Venezia, dove un canale sepolto, largo centinaia di metri e profondo circa 15 è stato attribuito ad un fiume che scorreva verso l'area emersa durante la glaciazione (Favero, 1984; Tosi, 1994, su dati di A. Stefanon). Altri dati ricavati dalla piana costiera romagnola parlano più semplicemente di una lacuna stratigrafica tra 25.6 e 8.8 ka B.P. (stadio isotopico 2) (Amorosi & alii, 1999).

L'eventuale conferma di fasi erosive tardo-pleistoceniche in aree costiere potrebbe venire da osservazioni in superficie; se ne trova un accenno per le valli del Subappennino romagnolo (Vai, 1984), ma l'ipotesi è sostanzialmente negata per quelle del bolognese (Amorosi & alii, 1996), a motivo della distanza dalle foci in mare, seppur poste a livello basso.

Nelle parti dell'antica pianura alluvionale del Pleistocene superiore ancora conservata sono numerose le forme di erosione fluviale che la incidono (si veda la *Carta*), e può essere invocato un controllo esercitato dal basso livello di base sebbene, proprio nel caso dei fiumi padano-veneti, Trevisan (1949) lo negasse. Le evidenze non permettono una risposta univoca, per qualche contraddizione che esiste tra fiume e fiume, e perché si deve tener conto anche delle diversità di pendenza, di subsidenza e di età tra un settore e l'altro (v. ad es. Castiglioni, 1995).

Un'opinione è stata recentemente espressa per il medio Po, dove è manifesta l'incisione operata dal Po stesso e da suoi affluenti di sinistra nel Tardiglaciale a spese del «livello fondamentale della pianura» pleistocenico; di solito gli autori collegano tale fase di incisione ai grandi mutamenti avvenuti nei bacini glaciali alpini con la deglaciazione (v. paragr.15.4). Però secondo Cremaschi (1997) «la maggiore incisione di alcuni tratti del reticolo idrografico dell'età del Bronzo deve interpretarsi come un residuo della situazione tardiglaciale, quando l'intera rete idrografica padana era fortemente approfondita nella pianura perché si raccordava ancora al livello di base stabilitosi durante il Pleistocene superiore glaciale». Secondo questo autore, non si dovrebbe dunque escludere un ritardo nella propagazione verso monte dell'ipotizzata fase erosiva dovuta all'eustatismo.

Malgrado il probabile sfasamento nell'avvio della risposta fluviale a due ordini di cause diversi, si può ammettere che gli effetti (in entrambi i casi, l'incisione) abbiano potuto sommarsi in un certo intervallo di tempo e per qualche tratto di fiume.

15.3.2 Effetti dell'ultimo innalzamento del livello marino

Uno studio sulla fascia costiera romagnola darebbe per l'Olocene una velocità media di innalzamento relativo di 10-11 mm/anno tra 10.000 e 6.800 anni fa, poi di 1,5 mm/anno (Preti, 1999). Al chiudersi di quella prima fase, nell'area del Po si verificò il massimo dell'ingressione marina, prevalentemente con lagune ad acque salmastre, il cui margine interno è stato identificato (con ricerche nel

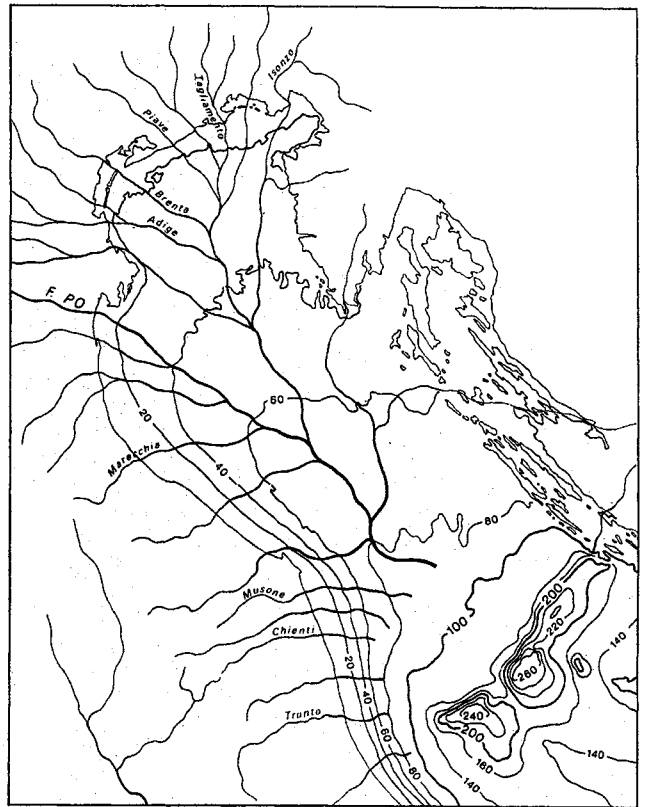


FIG. 15.3 - Adriatico settentrionale: rete fluviale ipotetica sulla pianura che durante i periodi glaciali del Pleistocene era emersa (da Ciabatti, 1990).

FIG. 15.3 - Northern Adriatic: hypothesized river network in plain emerging during glacial periods of Pleistocene (from Ciabatti, 1990).

voiced although, precisely in the case of the Po Plain-Veneto rivers, Trevisan (1949) denied this possibility. Evidence does not enable us to give a definite reply, due to contradictions existing between one river and another, and because differences in slope, subsidence and age between one sector and another must be borne in mind (see, e.g., Castiglioni, 1995).

One opinion has recently been expressed on the middle course of the Po, where the incision made by the river itself and its left tributaries during the Late Glacial at the expense of the Pleistocene «livello fondamentale della pianura» is manifest. Authors usually link this cutting phase with the large-scale changes which took place in Alpine glacial basins during deglaciation (see section 15.4). However, according to Cremaschi (1997), «the greater incision of some stretches of the Bronze Age drainage network must be interpreted as the remains of the Late Glacial situation, when the entire Po Plain network was greatly deepened because it was still linked to the base-level which was established during the Upper Pleistocene glacial epoch». According to

sottosuolo) presso Massa Fiscaglia, 8 km ad Ovest di Codigoro (Bondesan & alii, 1995b; 1999) e presso Conselice (Preti, 1999) (fig. 10.5). Da quel momento ha preso avvio la grande fase di progradazione della attuale pianura deltizia, o «pianura di livello di base».

Di quest'ultima, già ampiamente descritta nei capitoli 9 e 10 in quanto costituisce un settore estremamente caratteristico della Pianura Padana, si richiamano qui alcuni punti soltanto: 1 - al centro, la sua rapida estensione verso Est, con un avanzamento di decine di km in circa 6.000 anni, ciò che si spiega con l'entità dell'apporto di nuovi sedimenti fluviali, non compensato dalla ormai lenta tendenza alla sommersione; 2 - ai lati estremi (lagune friulane, costa di Rimini) la sedimentazione dovuta agli apporti fluviali non ha sempre superato gli effetti dell'innalzamento del livello marino, e ha consentito in tempi recenti l'ingressione del mare fino in vicinanza di lembi della pianura pleistocenica, almeno negli spazi tra foce e foce; 3 - in aree intermedie, ad esempio in quelle venete, netti avanzamenti della costa si sono verificati presso le foci dei fiumi più attivi. Più in generale, ci interessa lo spessore dei sedimenti olocenici della pianura costiera, che comprendono sedimenti fluviali e di palude intercalati tra quelli di laguna o litoranei: spessori ovviamente diversi da luogo a luogo, ma il cui significato rientra nel tema della «risposta fluviale alle variazioni del livello del mare»; queste ultime non solo nella loro componente eustatica ma, trattandosi di «variazioni relative» nel senso di *Relative Sea Level Rise* (RSLR), anche nella componente subsidenza; infatti la compattazione differenziale dei sedimenti di età recente è un processo determinante.

Una risposta tipica del sistema fluviale è legata all'innalzamento del livello del mare e alla progradazione, in questa fase recente: consiste nel propagarsi verso monte del processo di sedimentazione nel letto dei fiumi simultaneamente allo spostamento in avanti della foce. Essa comporta l'aggiustamento del profilo longitudinale, ossia un nuovo sistema di autoregolazione della pendenza, controllato «da valle»: l'aggiustamento risente, in questo caso, soprattutto della perdita di parte dell'energia necessaria al trasporto.

Per il Po, questo processo può essersi trasmesso fin verso il medio corso, a distanza dall'ambiente deltizio, a quote d'alveo quindi sensibilmente superiori al livello del mare. Infatti, a proposito della situazione nell'età del Bronzo Recente, così si esprime Cremaschi (1997): «il punto neutro ... non era giunto fino al meridiano di Brescello, dove il Po era ancora in incisione, ma aveva superato quello di Falconiera dove già si formavano dossi; il sovralluvionamento dei corsi d'acqua padani è tempo-transgressivo, e dovrebbe avvenire, per l'area in studio [centro-padana] tra la fine dell'età romana e il medioevo».

Per concludere, si può dire che progradazione verso mare e aggradazione verso i tratti medi dei fiumi sono due aspetti tra loro collegati di una stessa risposta al lento innalzamento relativo del livello marino nella seconda parte dell'Olocene. Nel dettaglio, ciò si combina con la tendenza a formare fiumi pensili tra aree più depresse, per effetto del confinamento almeno parziale del processo alluvionale, congiunto ad un forte contributo di sedimenti da monte.

the above author, a delay in the upstream propagation of the hypothesized erosional phase due to eustacy cannot be excluded.

In spite of the probable lack of synchronization in the onset of the fluvial response to two different types of cause, their effects (cutting, in both cases) may have overlapped for a certain period of time and for some stretches of rivers.

15.3.2 Effects of the last rise in sea level

A study of the Romagna coastal belt indicates as probable a mean rate of sea level rise of 10-11 mm/year between 10,000 and 6,800 years ago, and thereafter 1.5 mm/year (Preti, 1999). The peak of marine invasion in the Po area occurred at the end of the first phase, mainly with brackish-water lagoons, the inner margins of which have been identified by subsoil research near Massa Fiscaglia, 8 km West of Codigoro (Bondesan & alii, 1995b, 1999) and near Conselice (Preti, 1999) (fig. 10.5). The large-scale phase of progradation of the present-day deltaic plain, or «pianura di livello di base» («base level plain»), began thereafter.

Of this phase, extensively described in Chapters 9 and 10, since it is an extremely characteristic sector of the Po Plain, only brief mention will be made here. 1) in the centre, rapid advance eastwards of 20-40 km in about 6,000 years, explained by the great extent of new fluvial progradation, not compensated by the slow tendency to submersion; 2) at the sides (Friuli lagoons, Rimini coastline), sedimentation due to fluvial supplies did not always exceed the effects of sea level rise and, in recent times, allowed marine invasion as far as the Pleistocene plain, at least in the spaces between one mouth and another; 3) in intermediate areas, e.g., in the Veneto, clearcut advance of the coastline occurred near the mouths of the most active rivers. More in general, this is shown by the thickness of Holocene (fluvial, lagoonal, littoral) sediments. This thickness obviously differs from one point to another, but its significance does form part of the topic «fluvial response to variations in sea level», not only as regards their eustatic component but, as they are «relative variations» in the sense of «Relative Sea Level Rise» (RSLR), also in the subsidence component; the differential compaction of recent sediments is a determining process.

One typical response of the fluvial system is linked with sea level rise and progradation during this recent phase. It consists of riverbed sedimentation advancing upstream simultaneously with mouth advance, and involves adjustments to the longitudinal profile, i.e., a new system of self-regulation of gradient, controlled «from downstream». In this case, adjustments were influenced mainly by the loss of some of the energy necessary for transport.

This process may have been transmitted as far as the middle course of the Po, far from the delta environment, and thus at riverbed altitudes which were definitely higher than sea level. Discussing the situation in the Recent Bronze Age, Cremaschi (1997) observes: «the neutral point ... did not reach the Brescello meridian, where the Po was still cutting its course, but exceeded the Falconiera meridian where ridges had been forming; aggradation in watercourses was time-transgressive and probably took place between

15.4 La grande transizione climatica alla fine del Pleistocene e la risposta del sistema fluvio-glaciale-fluviale

15.4.1 Durante le ultime espansioni glaciali: il sistema fluvio-glaciale-fluviale «composito» della pianura.

Nell'ultimo Pleniglaciale, così come in quelli precedenti, l'insieme del sistema drenante della pianura aveva carattere composito in quanto comprendeva: *a*) veri e propri complessi proglaciali sotto forma di *sandur*; strettamente legati ai grandi ghiacciai pedemontani del lato alpino, *b*) sottosistemi proglaciali, anche questi con caratteri di *sandur*, legati a valli alpine con grandi ghiacciai non affacciati direttamente alla pianura; *c*) sottosistemi fluviali legati a valli alpine con ghiacciai di montagna; *d*) sottosistemi fluviali legati a valli appenniniche con ghiacciai di montagna; *e*) sottosistemi fluviali alimentati da bacini montani senza ghiacciai; *f*) sottosistemi fluviali alimentati da sorgenti carsiche e da risorgive in pianura. I sottosistemi da *b*) ad *e*) sottostavano alle condizioni generali del clima freddo nei bacini montani, ciò che implicava caratteri glaciali e nivali nei regimi idrologici e intensa produzione di detriti legata a processi di degradazione dei versanti di tipo periglaciale; la sedimentazione in pianura ne risentiva con un'intensificata aggradazione sui conoidi ghiaiosi e sugli altri settori della pianura stessa. Tutte le variabili in gioco si componevano lungo l'asse fluviale principale, quello rappresentato dal Po, in una risposta complessa di cui sono rimaste tracce nella storia sedimentaria e dell'evoluzione morfologica (v. paragr. 15.1).

Sebbene la *Carta Geomorfologica* non delimiti l'area interessata dalla morfogenesi al tempo dell'ultimo massimo glaciale (L.G.M.) né quella delle fasi fredde precedenti, tuttavia sembrano esservi dati sufficienti per presentare l'argomento a grandi linee. A parte l'implicito riferimento a situazioni ambientali di clima freddo, più in particolare la lettura della *Carta* permette di individuare alcune significative diversità tra i vari *sandur* e la presenza, in alcuni di questi, di notevoli diversità tra le parti prossimali, le parti mediane o di transizione, e le parti distali. Nelle parti prossimali, tipicamente ghiaiose (talora con blocchi), si formarono sia conoidi ripidi e poco estesi, a diretto contatto con le morene frontali e legati agli «scaricatori» minori, sia conoidi a bassa pendenza ma molto estesi verso la media pianura, attribuibili questi ultimi all'azione dei maggiori fiumi-torrenti d'ablazione con elevate portate liquide a lunga persistenza. Invece nelle parti distali dei conoidi (non necessariamente «fluvio-glaciali», e con pendenze anche di 1,5-1‰) si sedimentarono, con spessori elevati, i materiali trasportati in sospensione come le sabbie e i limi, oppure si formavano ristagni d'acqua con torbiere. Le forme sono molto varie e infatti, dove arrivavano le correnti torrentizie si diramavano canali di tipo *braided* a bassa profondità, «dossi» quasi rettilinei o ampiamente incurvati, alvei meandriiformi ad ampio raggio di curvatura (Capitolo 9).

Il quadro qui sommariamente tratteggiato, vuole essere la premessa per analizzare i modi con cui si è esplicata la «transizione» successiva. Si dovranno trascurare gli aspetti, pur importanti, concernenti l'evolversi della copertura vege-

the end of the Roman period and Medieval times in the central Po Plain area».

In conclusion, progradation seawards and aggradation towards the middle stretches of rivers may be said to represent two aspects of the same response to the slow RSLR in the second part of the Holocene. The tendency of rivers to become suspended may be added, at least when partial confinement of the alluvial process co-existed with the arrival of considerable quantities of sediments from upstream.

15.4 The great climatic transition at the end of the Pleistocene and the response of the fluvio-glacial-fluvial system

15.4.1 The last glaciations: the «composite» fluvio-glacial-fluvial system of the Po Plain

In the last Pleniglacial, as in the similar preceding periods, the whole drainage system of the Po Plain was composite in character and included: a) true proglacial complexes, in the form of sandurs, closely linked to the large piedmont glaciers of the Alpine side; b) proglacial subsystems, also with sandur features, linked to Alpine valleys with large glaciers not directly facing the plain; c) fluvial subsystems linked to Alpine valleys with mountain glaciers; d) fluvial subsystems linked to Apennine valleys with mountain glaciers; e) fluvial subsystems fed by mountain basins without glaciers; f) fluvial subsystems fed by karstic and plain springs. Subsystems of types b), c), d) and e) were subjected to the generally cold climate prevailing in mountain basins, which involved glacial and nival influence in hydrological regimes and intense production of debris resulting from degradation of valley slopes in periglacial environment. Sedimentation in the plain was also influenced, with intensified aggradation on the gravelly fans and other sectors in the plain itself. All these variables focused along the main river axis, that of the Po, in a complex response of which traces remain in its sedimentary history and morphological evolution (see section 15.1).

Although the Geomorphological Map does not define the area involved by morphogenesis during the Last Glacial Maximum (L.G.M.) nor that of the preceding cold phases, there do appear to be enough data to present the subject. Apart from implicit reference to the environmental situations of a cold climate, the Map identifies in greater detail some important differences among the various sandurs and the presence in some of them of considerable differences between proximal, median or transition parts, and distal portions. In the proximal parts, typically gravelly, steep, short fans formed (sometimes with boulders), in direct contact with frontal moraines and linked to minor melt-out channels, together with other fans with low gradients but extending considerably towards the mid-plain, attributable to the action of the major streams with high, long-lasting water discharge. Instead, in the distal parts of the fans (not necessarily «fluvio-glacial», and with gradients sometimes reaching 1.5-1‰), thick deposits of suspended materials like fine sand and silt were laid down, or else ponds with

tale in pianura, in particolare della vegetazione riparia che interessa direttamente la morfodinamica dei letti fluviali.

Varie datazioni radiometriche, utili per conoscere le fasi di costruzione e l'ambiente della pianura nei periodi di clima freddo del Pleistocene superiore, sono state possibili per la presenza, tra i sedimenti fluvioglaciali-fluviali, di intercalazioni di torbe nei sedimenti fini, ma talora anche di resti arborei radicati *in situ*. Qui ci si limita a riferire brevemente su dati relativi alla parte della pianura maggiormente influenzata dall'ultima espansione glaciale. Per il Piemonte, Tropeano (1993) ha segnalato date tra 35.000 e 25.000 anni B.P. oltre ad una data sui 18.000 presso il Sesia; per l'alta pianura veronese Sorbini & alii (1984) avevano documentato età non dissimili da queste.

Per il Veneto centrale Pellegrini & alii (1984), Pagnelli & alii (1988), Castiglioni (1989), Mozzi (1995) riportano date per lo più comprese fra 20.000 e 15.000 B.P., e in molti casi si tratta di campioni raccolti molto vicino alla superficie, riconducibili al *top* deposizionale.

15.4.2 La transizione del Tardiglaciale

È noto che la deglaciazione fu conseguenza di un cambiamento climatico di grande rilevanza, sviluppatosi in tempi relativamente brevi (Orombelli & Ravazzi, 1996). Nel nostro caso, per le fasce di pianura pedemontane, il passaggio dall'ultimo Pleniglaciale al Postglaciale appare caratterizzato sia dall'incisione dei corsi d'acqua entro i precedenti depositi, sia da una generale, complessa «metamorfosi fluviale» (nel senso di Schumm, 1972, 1977). Quanto all'incisione, e alla formazione dei «terrazzi climatici», vi è una generale concordanza tra gli Autori, con vari casi già ricordati nel Capitolo 9. Tenendo conto anche di un'impostazione generale del problema già presentata per l'area dell'Adige da Meneghel (1992) e per la Pianura Padana centrale da M. Marchetti (1996), qui si cercano di analizzare alcune situazioni specifiche.

Nelle prime fasi della deglaciazione, l'arretramento delle fronti glaciali ha provocato la disattivazione di molti «scaricatori» di acque di ablazione, e il forte incremento delle portate solo per alcuni di essi. La successiva riduzione di volume dei corpi glaciali maggiori vide il formarsi, alle spalle delle morene frontali, di bacini lacustri a contatto con masse di ghiaccio più o meno stagnante, con modalità diverse secondo l'ampiezza e la profondità degli spazi che si rendevano via via disponibili. Alla conclusione di questo processo, si sono formati i grandi laghi prealpini o, in altri casi, la sedimentazione ha prevalso creando le piane alluvionali nelle vallate e all'interno degli anfiteatri, preservando eventualmente bacini lacustri minori in posizioni appartate rispetto ai grandi corsi d'acqua.

Ciascuno di questi casi ha avuto effetti differenti in pianura, perché le variazioni nel tempo dei deflussi liquidi e delle portate solide nei fiumi risentivano delle diverse condizioni di partenza tra bacino e bacino, schematizzate nell'elenco proposto nel paragrafo 15.4.1 (lettere da *a* ad *f*). Ad esempio nei sottosistemi di tipo *f* (i meno studiati da questo punto di vista), la risposta fluviale dovette riguardare essenzialmente le portate liquide, dipendenti dal cam-

peat beds were created. The forms were very varied and, when torrential currents reached them, shallow braided channels branched off, almost rectilinear or widely curving «ridges», meandering riverbeds with high curvature radii (Chapter 9).

This brief picture introduces analysis of the ways in which the later transition took place. Admittedly important aspects concerning the vegetal cover in the plain, particularly riverbank vegetation which directly influences the morphodynamics of riverbeds, must be neglected here.

Various radiometric dating, yielding information on construction phases and plain environment during the cold period of the Upper Pleistocene, have been made possible thanks to the presence among the fluvioglacial-fluvial sediments of intercalations of peat in fine sediments, and even of tree remains in situ. We limit ourselves here to reporting brief data regarding that part of the plain most influenced by the last glacial expansion. For Piemonte, Tropeano (1993) gives dates between 35,000 and 25,000 years B.P., as well as a date around 18,000 years B.P. near the river Sesia; and Sorbini & alii (1984) demonstrated similar ages for the high Veronese plain.

In the central Veneto, Pellegrini & alii (1984), Pagnelli & alii (1988), Castiglioni (1989) and Mozzi (1995) report dates ranging between 20,000 and 15,000 years B.P. In many cases, samples were collected very close to the surface, attributable to the depositional top.

15.4.2 The Late-Glacial transition

Deglaciation is known to be the consequence of a large-scale change in climate which took place relatively quickly (Orombelli & Ravazzi, 1996). In our case, for the pedemontane plain belts, the passage from the Last Pleniglacial to the Postglacial is characterized both by the cutting of watercourses in the preceding deposits, and by a general, complex «fluvial metamorphosis» (sensu Schumm, 1972, 1977). As regards downcutting and the formation of «climatic terraces», there is general agreement among authors, various cases being mentioned in Chapter 9. Bearing in mind the general approach to the problem already proposed for the Adige area by Meneghel (1992) and the central Po Plain by M. Marchetti (1996), some specific situations will be examined here.

In the early phases of deglaciation, snout retreat disactivated many melt-out channels; large increases in capacity only occurred in some of them. Later reduction in the volume of the major glaciers gave rise, behind the frontal moraines, to lakes in contact with more or less stagnant masses of ice, according to the size and depth of the spaces which gradually became available. The end of this process saw the creation of the large Prealpine lakes; in other cases, sedimentation prevailed, creating alluvial plains in valleys and inside amphitheatres, and sometimes preserving minor lakes in positions at some distance from the large watercourses.

Each of these cases had different effects in the plain, because the temporal variations of liquid and solid discharge in the rivers were influenced by the various starting condi-

biamento dei bilanci idrologici nelle aree di alimentazione e le conseguenze per i deflussi sotterranei. Per gli altri sottosistemi, a parte le portate liquide, va considerato soprattutto il variare del carico solido.

Nei bacini fluviali non occupati nei periodi freddi da grandi ghiacciai fino alla pianura, e in misura proporzionale all'estensione delle superfici esposte, non glacializzate, si risentì delle mutate condizioni ambientali che hanno effetti sulla dinamica dei versanti, sulla vegetazione e sull'apporto detritico alle aste fluviali, ma con ritardo rispetto al mutamento climatico: ritardo nella ripresa della vegetazione forestale, e ritardo nella degradazione del *permafrost*. Dove invece fu soverchiante il fenomeno «deglaciazione» in senso stretto, la transizione fu condizionata, in più, dal formarsi e dalla durata di laghi (ove presenti) capaci di fungere da «trappola» per i sedimenti. Quest'ultimo fattore si può ritenere che sia stato di efficacia immediata nel determinare l'avvio dell'incisione entro i *sandur* per i corsi d'acqua maggiori. In altri casi, in assenza di laghi intravallivi, l'aggradazione sui *sandur* può essersi prolungata fino all'inizio del Tardiglaciale, con forme deposizionali analoghe a quelle precedenti: fino a circa 14.000 anni B.P., secondo Mozzi (1995) sul tratto distale del conoide del F. Brenta. Ciò può far pensare a processi di tipo «paraglaciale» (nel senso di Church & Ryder, 1972) nei bacini montani dove era presente ed esposto ad intensa erosione l'abbondante materiale lasciato dai ghiacciai. Queste situazioni (prolungate fino all'inizio dell'Olocene) sono ben documentate in un bacino intermontano, quello del F. Piave (Surian & Pellegrini, 2000), ma per ora non così ampiamente confermate da studi sulla pianura.

Alcuni terrazzi attribuibili a particolari intervalli di transizione tra il Pleniglaciale e l'Olocene si riconoscono nella *Carta*: lungo l'Adige, per una decina di chilometri a valle della città di Verona, esistono lembi di un conoide incastrato, con tracce di canali intrecciati di piccole dimensioni (Sorbini & alii, 1984); lungo l'Oglio e il Serio, M. Marchetti (1992) ha individuato un «livello intermedio» di terrazzi disposti tra il «livello fondamentale della pianura» e le piane oloceniche incassate.

La vera, grande «metamorfosi» per i sistemi fluviali della pianura pedealpina si è realizzata, oltre che con l'approfondimento, anche col formarsi delle piane di divagazione oloceniche in cui il *pattern* a meandri è spesso prevalente (v. paragr. 9.6).

15.5 Dall'inizio dell'Olocene ai nostri giorni: ancora variazioni climatiche?

L'interrogativo riguarda la possibilità di individuare correttamente le risposte dei fiumi all'instabilità del clima, tenuto conto di tre fatti: 1) le variazioni climatiche nell'Olocene sono state di ampiezza minore rispetto a quelle del Pleistocene (ad es. in Orombelli, 1997); 2) sono importanti specialmente gli eventi d'ordine ambientale nei bacini montani, con effetti sui fiumi di pianura da esaminare volta per volta; 3) da tempo, tra gli studiosi si fa riferimento a modificazioni ambientali dovute all'attività delle popolazioni uma-

tions between one basin and another (see proposed list in section 15.4.1, letters a-f). For example, in subsystems of type f (the least studied from this point of view), the fluvial response mainly involved water discharge, depending on changes in hydrological balances in feed areas and consequent subterranean flows. In the other subsystems, apart from water discharge, variations in bedload were the main factor involved.

In fluvial basins not occupied in this cold period by large glaciers descending as far as the plain, and in proportion to the extent of the exposed, unglacialized surfaces, changing environmental conditions affected slope processes, vegetation, and debris supplies to rivers, but with delays with respect to climatic changes: delays in renewed forest vegetation and in the melting of permafrost. Instead, where the phenomenon of deglaciation sensu stricto dominated, transition was also influenced by the formation and duration of lakes (where present) which acted as sediment traps. This last factor was probably immediately effective in causing the major watercourses to begin cutting the sandurs. In other cases, in the absence of valley lakes, aggradation on the sandurs may have continued until the beginning of the Late Glacial, with depositional forms similar to the previous ones: until about 14,000 years B.P. according to Mozzi (1995) on the distal stretch of the river Brenta fan. This may indicate processes of «paraglacial» type (in the sense of Church & Ryder, 1972) in mountain basins where abundant material left by glaciers had accumulated and was exposed to intense erosion. These situations (which lasted until the early Holocene) are well documented in one intermontane basin, that of the Piave (Surian & Pellegrini, 2000), although they have not yet been so fully confirmed by studies on the plain.

Some terraces attributable to special transitional intervals between the Pleniglacial and the Holocene may be seen on the Map. Along the Adige, for about 10 km downstream from Verona, there are tongues of an entrenched fan, with traces of small braided channels (Sorbini & alii, 1984) and, along the Oglio and Serio, Marchetti (1992) identified an «intermediate level» of terraces between the «livello fondamentale della pianura» («main surface of the plain») and the embedded Holocene flood plains.

The true, great metamorphosis of the fluvial systems of the pede-Alpine plain consisted not only of deepening, but also of the formation of Holocene flood plains in which the meandering pattern often prevails (see Chapter 9, section 6).

15.5 From the early Holocene to the Present: more climatic variations?

This question regards the possibility of correctly identifying the responses of rivers to climatic instability, bearing in mind three facts: 1) climatic variations in the Holocene were not as great as those in the Pleistocene (e.g., Orombelli, 1997); 2) environmental events in mountain basins, with effects on plain rivers, are of especial importance, and must be examined case by case; 3) for some time now, researchers have referred to environmental changes due to human ac-

ne, fin dal Neolitico (ad esempio in Frenzel, 1979) e alle relative conseguenze sui sistemi fluviali (v. paragrafo 15.6).

Agli intervalli temporali normalmente usati per l'Olocene (definiti sulla base degli spettri pollinici a Nord delle Alpi), corrispondono caratterizzazioni paleoclimatiche significative ma limiti cronologici non abbastanza precisi. Nel nostro caso l'interesse va spostato sui maggiori eventi documentati nella morfogenesi fluviale in pianura legati a periodi di particolare significato paleoidrologico, cioè eventi, datati, che indichino elevata frequenza delle piene disastrose, ed elevato trasporto solido.

Nella montagna alpina, i fenomeni di degradazione e quelli di erosione torrentizia legati alle precipitazioni erano tutt'altro che trascurabili già nella prima parte dell'Olocene; ad esempio, nella Valle dell'Adige le pareti calcaree scaricavano ancora detriti durante il periodo «Atlantico», stabilizzandosi, per l'affermarsi della foresta, solo al passaggio verso l'età del Bronzo (Bartolomei, 1984; Chardon & Castiglioni, 1984). L'avvento di periodi con piene disastrose (collegati o no con «crisi climatiche») si può cogliere sia nella deposizione di sedimenti alluvionali, con spessore considerevole, in aree precedentemente «stabili», sia nell'evidenza di frequenti cambiamenti di percorso dei fiumi, tanto più se questi eventi si manifestano in più fiumi contemporaneamente. I documenti più validi sono di carattere stratigrafico oltre che geomorfologico e storico, specialmente se riferibili ad un'area di una certa estensione geografica, insieme con le testimonianze archeologiche, che offrono altri termini di riferimento cronologico e ambientale-territoriale.

Per l'Olocene della Pianura Padana un dato significativo è l'evidenza di fasi di colmamento alluvionale, entro quelle incisioni fluviali che si erano realizzate alla fine del Pleistocene (ad esempio, fig. 15.4); così pure la possibilità

activities, from the Neolithic onwards (e.g., Frenzel, 1979), with consequences on fluvial systems (see in this Chapter, section 15.6).

The time intervals normally used for the Holocene (defined on the basis of pollen spectra North of the Alps) correspond to important paleoclimatic characterizations, but chronological limits are not sufficiently clearcut. In our case, interest moves to major events in fluvial morphogenesis in the plain, linked to periods of particular significance from the paleo-hydrological viewpoint, i.e., dated events indicating frequent disastrous floods, and high bedload.

In Alpine mountains, phenomena of degradation and torrential erosion linked to precipitation were already extensive in the first part of the Holocene. For example, in the Adige valley, the limestone walls were still discharging debris during the «Atlantic» period, and were only stabilized during the passage towards the Bronze Age, with the advance of thick forests (Bartolomei, 1984; Chardon & Castiglioni, 1984). The advent of periods of disastrous flooding (linked or otherwise with «climatic crises») may be seen both in the sometimes extremely thick deposits of alluvial sediments in previously «stable» areas, and in the evidence of frequent changes in the courses of rivers, particularly when these events took place in several watercourses at the same time. The most valid demonstration here is stratigraphic as well as geomorphological and historical, especially in an area of a certain geographic size, together with archeological findings, which offer other chronological and environmental-territorial terms of reference.

For the Holocene in the Po Plain, one significant fact is the evidence of alluvial aggradation phases in those valleys which came into being at the end of the Pleistocene (e.g., fig. 15.4); another is the possibility of determining the arrest of a depositional cycle (fig. 9.5, B). The occurrence of a

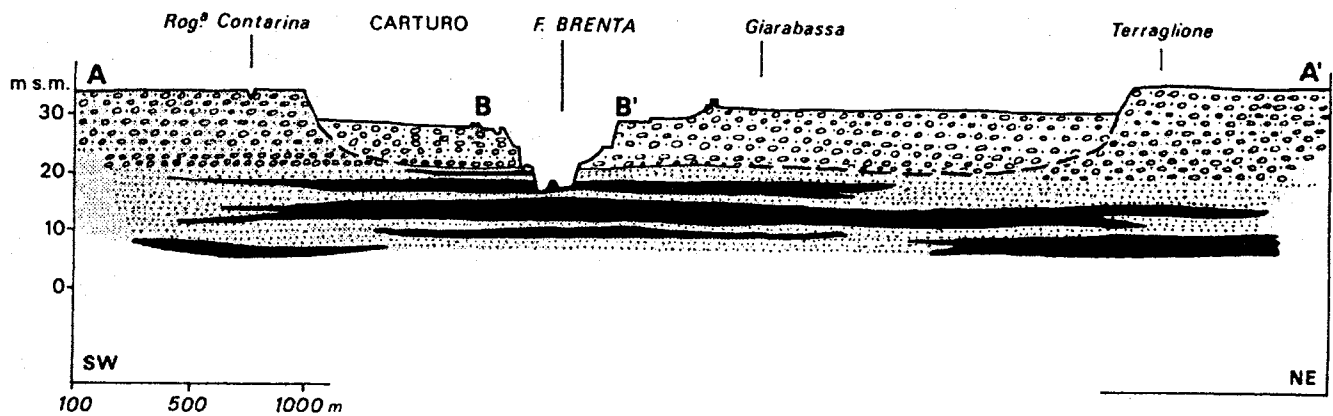


FIG. 15.4 - Sezione trasversale dei terrazzi del Fiume Brenta a Carturo presso Padova (da Pellegrini & alii, 1984, modif.). L'ultima incisione di oltre 15 m al di sotto del livello B-B' è la risposta agli interventi antropici sul sistema fluviale, nel secolo 20°. Livello A-A': pianura ghiaiosa del Pleistocene finale; alla base, sabbie ed argille (lenti nere nel disegno), datate a circa 19.000 anni B.P. Livello B-B': piana di divagazione fluviale olocenica, su sedimenti ghiaiosi chiaramente posteriori ad una fase erosiva postglaciale.

FIG. 15.4 - Transversal section of terraces of river Brenta at Carturo, near Padova (modified from Pellegrini & alii, 1984). Last cut, more than 15 m under level B-B', represents response of fluvial system to 20th-century anthropic intervention. Level A-A': gravelly plain of uppermost Pleistocene; at the base: sand and clay (black lenses) dated to approx. 19,000 years B.P. Level B-B': Holocene fluvial flood plain, on gravelly sediments clearly younger than a post-glacial erosional phase.

di determinare la fase di arresto di un ciclo deposizionale (fig. 9.5, B). L'instaurarsi di un *pattern* fluviale con meandri a piccolo raggio di curvatura entro una piana sovradimensionata (Cremaschi & Marchetti, 1995) è indicatore di un periodo di stabilità morfoclimatica.

Depositi alluvionali sabbioso-ghiaiosi contenenti in gran numero tronchi subfossili, per lo più fluitati, attestano il ripetersi di piene distruttive, in particolare per erosione laterale (Becker, 1982; Frenzel, 1979). Sotto questo aspetto sono da segnalare le osservazioni effettuate a piccola profondità nella piana del Po a Sud di Torino, dove depositi prevalentemente ghiaiosi, di un periodo compreso tra circa 6.000 anni e alcune centinaia di anni dal presente, contengono in abbondanza tronchi arborei oltre che resti di laterizi; da ciò si ricava «un quadro di significative variazioni d'alveo durante tutto l'intervallo e distruzioni ripetute» (Tropeano & Cerchio, 1984). La pianura del Brenta ha offerto l'opportunità di avviare un'indagine quantitativa di questo tipo, tuttavia non esaustiva e rimasta inedita (elaborazioni di E. Corona e di M. Cucato); essa ha indicato un'elevata mortalità di alberi ripari in vari momenti dell'Olocene, fino ad inondazioni che distrussero insediamenti dell'età del Bronzo e romani.

La documentazione stratigrafica che accompagna gli studi di archeologia attesta i rapporti tra insediamenti legati all'idrografia minore in periodi di relativa stabilità geomorfologica, o anche eventi sedimentari e rotte lungo grossi fiumi, come i rami del Po. Il Veggiani (1994) riassumendo vari studi precedenti, mette in evidenza una crisi climatica acuta verso il 9° secolo a.C. (inizio dell'età del Ferro), e le attribuisce gli eventi che hanno provocato la disattivazione di rami a decorso settentrionale (come il «Po di Adria») a vantaggio di rami deltizi più meridionali (cfr. paragrafo 10.6). Per l'Adige, gli studi sugli insediamenti collocati presso l'antico corso nell'area di Montagnana-Este, con dati di grande dettaglio, attesterebbero l'inizio di un decisivo deterioramento del regime fluviale tra il 6° e il 5° secolo a.C. (Balista, 1998); ma la prima messa in posto di robusti argini lungo questo fiume, con scogliere in trachite, apparterebbe all'inizio della romanizzazione (inizio 2° secolo a.C.); e infine sarebbe stato raggiunto «uno stato di disequilibrio morfodinamico in un momento poco precedente la definitiva avulsione» verso Legnago (sec. 6° d.C.).

Per l'età storica, sono importanti due periodi, comunemente ritenuti di «deterioramento climatico» con disastrosi effetti di inondazioni nella Pianura Padana: quello alto-medievale, e quello moderno corrispondente alla «piccola età glaciale».

Per il primo si ha tanto la documentazione scritta nella *Historia Langobardorum* di Paolo Diacono, quanto quella derivante da studi di terreno e di paleoidrografia. Lo scrittore annotava la grande estensione territoriale di un evento alluvionale di due secoli prima (forse del 589 d.C.); in verità non forniva notizie concrete di cambiamenti di corso di fiumi, ma è opinione generale che le deviazioni dell'Adige (qui sopra menzionata), del Brenta, del Piave, del Tagliamento, l'inondazione e il seppellimento delle strutture urbane di Modena, di Concordia Sagittaria

fluvial pattern with small-curvature meanders in an oversized meanderbelt (Cremaschi & Marchetti, 1995) also indicates a period of morphoclimatic stability.

Sandy-gravelly alluvial deposits containing large numbers of subfossil tree trunks, mainly subjected to floating downstream, demonstrate repeated destructive floods, particularly by lateral erosion (Frenzel, 1979; Becker, 1982). *From this viewpoint, mention must be made of observations in the subsurface sediments of the Po Plain South of Torino, where mainly gravelly deposits ranging in age between about 6,000 years and a few hundred years B.P., contain abundant tree trunks and the remains of bricks, revealing «a picture of significant riverbed variations throughout the interval and repeated destructive episodes»* (Tropeano & Cerchio, 1984). *The Brenta plain is suitable for a quantitative investigation of this type, although data are not exhaustive and have not been published* (processing by E. Corona and M. Cucato); *the high mortality of riverbank trees at various moments in the Holocene is revealed, together with evidence of floods which destroyed Bronze Age and Roman settlements.*

Stratigraphic documentation flanking archeological studies confirm the relations between settlements linked to minor streams during periods of relative geomorphological stability, but also sedimentary events and breaches along large rivers, such as the branches of the Po. Summarizing several preceding studies, Veggiani (1994) reports an acute climatic crisis round the 9th century B.C. (early Iron Age) and attributes to it the events which caused the disactivation of northern branches (like the Po di Adria), to the advantage of more southerly deltaic branches (see Chapter 10, section 6). *Studies on settlements near the ancient course of the Adige in the Montagnana-Este area have revealed a wealth of detail on the onset of definite deterioration in fluvial regime between the 6th and 5th centuries B.C. (Balista, 1998), although the first construction of robust banks with trachyte blocks along this river appears to belong to the early Roman period (early 2nd century B.C.). Lastly, «a state of morphodynamic disequilibrium at a moment slightly preceding definitive avulsion» towards Legnago was reached in the 6th century A.D.*

As regards historical epochs, two periods commonly believed to be of «climatic deterioration» are important, with disastrous flooding effects in the Po Plain. One occurred in early Medieval times; the other corresponds to the «Little Ice Age».

In the former case, we have both the written documentation of Paolo Diacono's Historia Langobardorum, and other information deriving from field studies and of paleohydrography. The writer noted the enormous extent of land covered by a flood two centuries before (perhaps in 589 A.D.): he did not in fact supply definite information regarding changes in the courses of rivers, but it is the general opinion that the diversions of the Adige (noted above), Brenta, Piave and Tagliamento, the flooding and burial of buildings in Modena, Concordia Sagittaria and other places were to be ascribed to that event or to a time-span (post-

ed altre siano da riferire a quell' evento o ad un arco di tempo (post-romano e alto-medievale) che lo comprende. Riserve circa il legame causale col clima sono però state espresse, in quanto si fa notare che al «disordine idraulico» deve aver contribuito anche il degrado delle sistemazioni fluviali precedentemente realizzate nel periodo romano (Marchetti & Dall'Aglio, 1990, 1998).

La questione viene qui ripresa in modo riassuntivo, con particolare riferimento alle vicende del territorio della pianura subappenninica che era stata colonizzata mediante le centuriazioni romane (Giorgi, 2000) (fig. 15.5). Senza prendere nettamente posizione sulla prevalenza dell'uno o dell'altro fattore tra quelli responsabili dell'importante ripresa di aggradazione da parte dei fiumi appenninici nei tempi post-romani, anche questo autore ricorda in modo esplicito l'«abbandono delle terre», che ha «probabilmente accelerato un dissesto generalizzato che era in ogni modo già in atto». Su questo stesso tema una ricerca ben documentata dal punto di vista stratigrafico e cronologico si riferisce all'alluvione che seppellì Modena, dovuta prevalentemente all'azione di un corso d'acqua minore, tra la seconda metà del 6° secolo e la prima metà del 7° (Cremaschi & Gasperi, 1989); ecco alcune considerazioni conclusive: «la ragione della singolarità dell'episodio tardo antico qui esaminato risiede probabilmente nel fatto che si è verificata una sinergia fra una situazione d'uso del suolo già degradato per ragioni storiche (abbandono delle campagne in conseguenza delle vicende legate alla crisi dell'Impero Romano) ed un evento climatico che in altri momenti non avrebbe avuto conseguenze così importanti sull'assetto territoriale».

Il secondo periodo (quello moderno, secoli 16°-19°), fu caratterizzato dall'abbassamento della temperatura (Pinna, 1984). Per le precipitazioni, qualche indicazione di aumenti emerge dalle analisi storiche (Camuffo, 1984). Molti eventi alluvionali in pianura si concentrano nei secoli 15°-19°, anche con notevoli concordanze tra diversi fiumi, quali il Po, il Tanaro, l'Adige (Camuffo & Enzi 1996); i dati storici sulla frequenza di questi eventi non appaiono però veramente confrontabili con quelli dei secoli precedenti, per i quali il *record* fornito dalle cronache è lacunoso. Il prolungamento delle foci a delta verso il mare divenne particolarmente celere all'incirca in questo

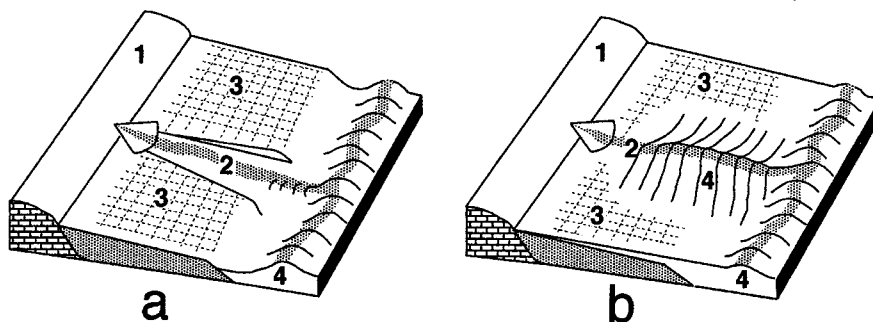
Roman or early Medieval) which included it. However, reservations regarding the causal link with climate are expressed, since authors note that the degradation of river works going back to the Roman period must partly have contributed to «hydraulic disorder» (Marchetti & Dall'Aglio, 1990, 1998).

This question is now briefly discussed, with particular reference to events in the territory of the sub-Appennine plain which had been colonized by means of Roman centuriations (Giorgi, 2000) (fig. 15.5). Without assuming a clear position regarding the prevalence of one or the other factor among those responsible for the large-scale aggradation which began again in the Appennine rivers in post-Roman times, the above author also explicitly mentions the «abandon of lands», which «probably accelerated generalized disorder, which was in any case already occurring». On this topic, research, well-documented from the stratigraphic and chronological viewpoints, refers to the flood which buried Modena, due mainly to the action of a minor river, between the second half of the 6th and the first half of the 7th centuries A.D. (Cremaschi & Gasperi, 1989). Here are some of its conclusive considerations: «the reason for the singularity of this Late Ancient episode was probably synergy between a situation of excessive use of land already degraded for historical reasons (abandon of fields, as a consequence of events linked to the decay of the Roman Empire) and a climatic event which, at another moment in time, would not have affected the territory to such an extent».

The second period (modern, 16th-19th centuries, A.D.) was characterized by lowering of the temperature (Pinna, 1984). As regards precipitation, some indication of increases emerges from historical analyses (Camuffo, 1984). There were many floods in the plain during the 15th-19th centuries, very often involving various rivers with the same or very similar trend (e.g., Po, Tanaro, Adige; see Camuffo & Enzi, 1996). However, historical data of the frequency of these events do not appear to be truly comparable with those of the preceding centuries, because the chronicled record is often incomplete. The lengthening of river mouths seawards in the form of deltas became particularly rapid in this period (Chapter 10, tab. 10.1). River activity was al-

FIG. 15.5 - Pianura pede-appenninica, presso Bologna: evoluzione territoriale dall'epoca romana (a) ad oggi (b), per effetto della tendenza all'aggradazione dei corsi d'acqua nel periodo post-romano, probabilmente a partire dal 3° secolo d.C. (da Giorgi, 2000): 1 - Appennini; 2 - corsi d'acqua; 3 - centuriazioni; 4 - dossi fluviali.

FIG. 15.5 - Pede-Appennine plain near Bologna: territorial evolution from Roman times (a) until present (b), due to aggradation of rivers in post-Roman period, probably from 3rd century A.D. onwards (from Giorgi, 2000): 1 - Appennines; 2 - rivers; 3 - Roman plain; 4 fluvial ridges.



intervallo di tempo (cfr. Capitolo 10, tab. 10.1); l'attività fluviale era già in parte regolata artificialmente, in modo probabilmente squilibrato (la questione verrà ridiscussa nel paragr. 15.6). Va inoltre ricordato che un autore solitamente incline a sottolineare l'incidenza dei fattori climatici non mancò di riportare, a proposito dei disastri avvenuti in Romagna, anche le opinioni espresse da Leandro Alberti a metà del secolo 16° in cui si affermava l'incidenza dei disboscamenti in montagna (Veggiani, 1984, 1985b).

In sintesi, riconsiderando ciò che risulta da questo paragrafo, per un verso si evidenziano possibilità interessanti di studio, potendosi prendere in esame intervalli di tempo più brevi in confronto con quelli del periodo precedente; tuttavia non si è sempre in grado, per ora, di correlare in modo preciso «eventi», o successioni di eventi ravvicinati, con la storia del clima per gli aspetti direttamente legati ai fiumi. Nella discussione relativa al peso da attribuire ai fattori climatici, per gli eventi disastrosi del periodo post-romano la loro prevalenza appare innegabile; assai meno chiara invece essa appare per l'epoca moderna, in cui il peso degli interventi antropici è ormai manifesto e, si auspica, ben documentabile, specialmente se si analizzano singoli sottosistemi secondo un'ottica già proposta, per esempio, da Delano Smith (1981) per bacini dell'area mediterranea. L'area padana, per la sua collocazione geografica a metà tra l'Europa alpina e mediterranea, per ora non si presta a confronti precisi.

15.6 La risposta del sistema fluviale agli interventi antropici

Quanto già è scritto nel Capitolo 12 consente di riprendere qui solo alcuni punti essenziali (anche se ampi e complessi) del problema.

Un primo punto riguarda la risposta dei processi fluviali alla costruzione degli argini. In generale, con tali interventi si è avuta la riduzione dei territori inondata durante le piene, si è modificata la velocità di propagazione delle onde di piena e si sono accentuati i livelli idrometrici al colmo; in particolare, l'arginatura del Po ha causato anche effetti di rigurgito nei tratti degli affluenti prossimi alla confluenza e, per questo aspetto, basterà ricordare le situazioni di rischio in cui si era trovata la città di Mantova, e la necessità di costruire uno sbarramento di difesa a partire dall'inizio del secolo 17° (Datei, 1990). Un altro effetto della costruzione degli argini riguarda il trasporto e la deposizione dei sedimenti da parte della corrente fluviale perché si è artificialmente ristretta o talora annullata la piana inondabile che, in assenza di argini, era un ampio spazio naturalmente predisposto ad accogliere i sedimenti. Come risultato, si è accentuato il trasporto fino alla foce (con accelerato avanzamento delle cuspidi deltizie) e, lungo l'asta, la sedimentazione si è concentrata nelle gole, con formazione dei fiumi pensili (paragr. 12.5).

Sui maggiori fiumi pensili si sono dovuti ripetutamente rialzare gli argini, per recuperare capacità all'alveo, man mano che questo si intasava di sedimenti; alla fine, gli eccessivi dislivelli fra quote d'acqua nei fiumi durante le pie-

ready partly regulated artificially, in a probably harmful way (this question will be discussed further in next section 15.6). It should also be recalled that one author who was generally inclined to emphasize the incidence of climatic factors did not neglect, when referring to disastrous flooding in Romagna, to report the opinions expressed by Leandro Alberti in the mid-16th century, confirming the frequency of deforestation in the mountains (Veggiani, 1984, 1985b).

Briefly, this section reveals on one hand interesting possibilities for further detailed study, since shorter intervals of time may be analysed. However, for the time being, as regards aspects directly linked with rivers, it is not always possible to correlate «events» or close successions of events, precisely with climatic history. In discussions on the influence to be attached to climatic factors, their prevalence in the disastrous events of the post-Roman period appears to be undeniable, but they are less clear in modern times, when the influence of anthropic intervention is manifest and, it is to be hoped, capable of good documentation. This is especially true if we analyse single subsystems according to a viewpoint already proposed, e.g., by Delano Smith (1981) for basins in the Mediterranean area. Due to its transitional position between Alpine Europe and the Mediterranean, the Po Plain cannot, at the present time, be subjected to precise comparisons.

15.6 The response of the fluvial system to anthropic intervention

Some essential points (although in themselves ample and complex: see Chapter 12) of the problem may be briefly mentioned here.

First, the response of fluvial processes to levee construction. *This kind of operation generally led to reduction of flooded areas during periods of high water, changes in the speed of propagation of floods, and accentuation of maximum hydrometric levels. In particular, the process of constructing levees on the Po also caused backflow effects in stretches of tributaries near the point of confluence. From this point of view, it is sufficient to recall the situations of risk in which the city of Mantova found itself and the need to build a dam to protect it in the early 17th century (Datei, 1990). Another effect of levee building was the transport and deposition of sediment by rivers, since the flood plain was artificially restricted: previously, in the absence of levees, there had always been ample natural space for sediment deposition. The result was accentuated transport to the river mouth (with accelerated advance of deltaic cusps) and, along the main axis of the river, sedimentation concentrated in high water beds, with the formation of hanging rivers (Chapter 12, section 5).*

The major hanging rivers repeatedly required their banks to be raised, in order to make the riverbed, gradually silting up with sediments, to become sufficiently capacious. In the end, the excessive changes in level between water heights in rivers during floods and the altitude of adjacent land had serious consequences as regarded the hydraulic

ne e quote dei territori adiacenti hanno determinato serie conseguenze anche a proposito del rischio idraulico: le rotte, divenute più rare, sono però divenute più pericolose, si è avuto un aumento delle superfici inondate e sono relativamente più frequenti le rotte per sifonamento (Marchetti, 1990; Amministrazione Provinciale di Ferrara, 1995).

Il secondo punto riguarda la risposta dei processi fluviali agli interventi antropici nei bacini. Le risposte ora menzionate dei fiumi in pianura per effetto delle arginature non vanno, infatti, interpretati isolatamente, ma piuttosto vanno inquadrati tenendo conto dell'evoluzione complessiva dell'occupazione del suolo, sia in pianura sia nei bacini imbriferi montani. In pratica, ci si trova di fronte a due aspetti complementari della pressione antropica sul territorio, sia che si tratti dell'occupazione umana stabile nelle piane di pertinenza fluviale, oppure degli sforzi per trarre il massimo delle risorse dal suolo in montagna; infatti i periodi di forte aggradazione entro gli argini in pianura (con i conseguenti rischi di rotte fluviali) sono legati all'intensità e all'estensione dei fenomeni erosivi a monte. È cognizione generale che l'erosione accelerata del suolo sia effetto della distruzione della copertura vegetale spontanea e dell'eccessiva diffusione delle colture arative sui pendii.

Il secondo punto è dunque correlato al primo e può essere espresso nel modo seguente: dai dati storici occorrerebbe conoscere le fasi di accentuato dissesto del suolo per interventi antropici almeno in alcuni bacini montani per i quali si possa stabilire direttamente una correlazione con l'accresciuto trasporto solido e la sedimentazione in pianura; oppure, rispettivamente, conoscere i periodi di prolungata stabilità dei versanti nei bacini montani ed identificare le conseguenze sui processi fluviali a valle. In entrambi i casi, può non esservi immediatezza temporale di causa / effetto nelle «risposte» dei processi fluviali. Ancora, in relazione al rapporto montagna-pianura vanno considerati interventi antropici d'altro tipo, quali la costruzione di dighe di ritenuta per la creazione di laghi-serbatoio, che hanno determinato cambiamenti nel regime delle portate liquide e solide nei fiumi.

La *Carta Geomorfologica* richiama l'attenzione su un gran numero di interventi realizzati nella pianura stessa: *il terzo punto* di questa breve rassegna riguarda infatti alcuni effetti delle deviazioni artificiali dei fiumi oppure delle opere di canalizzazione destinate soprattutto a creare nuove vie navigabili. Molti interventi risalgono all'epoca pre-industriale, e determinarono non poche anomalie nei processi di sedimentazione negli alvei: ad esempio, effetti di accresciuta, rapida sedimentazione si segnalano nel tronco inferiore dell'Adige, quando ebbe ridotte la portata e la velocità della corrente dopo la derivazione dell'acqua verso il canale Castagnaro (Tchaprassian, 1994); e nel Brenta che, deviato verso la sua destra lungo la «Brenta Nova», divenne pensile nell'arco di qualche decennio (Vallerani, 1995).

Il quarto punto riguarda il recente fenomeno di approfondimento degli alvei fluviali, indicato anche nella *Carta* e ricordato nei Capitoli 5, 12 e 14. Esso era presente in misura limitata, lungo qualche corso d'acqua, già nella prima metà del secolo 20°, ma acquistò grande evidenza

risk: although breaches became rarer, they were more dangerous: inundated surfaces became larger, and breaches due to siphoning became relatively more frequent (Marchetti, 1990; Amministrazione Provinciale di Ferrara, 1995).

The second point deals with the response of fluvial processes to anthropic operations in catchment areas. *The response by plain rivers to levee building cannot be interpreted in isolation, but must be framed bearing in mind the overall evolution of occupation of land, both in the plain and in mountain catchment areas. In practice, there are two complementary aspects of anthropic pressure on the land, whether we consider stable human occupation in plains, or efforts made to maximize resources from land use in the mountains. In plains, the periods of great aggradation inside levees (with the consequent risk of breaching) are linked to the intensity and extent of erosional phenomena upstream. It is generally recognized that accelerated soil erosion is due to destruction of the spontaneous vegetal cover, excessive spread of grazing areas, and cultivation and ploughing on slopes.*

This second point is thus linked to the first, and may be expressed as follows: historical data should furnish information on phases of accentuated soil «disorder» due to anthropic operations, at least in some mountain basins for which it is possible to establish a direct correlation with increased solid transport and sedimentation in the plain. Alternatively, they should furnish information on periods of prolonged slope stability in mountain valleys and identify consequences on fluvial processes downstream. In both cases, there may not be any immediate cause/effect relationship in the «responses» of fluvial processes. Again, in the mountain/plain relationship, other types of anthropic intervention should be considered, e.g., construction of dams to create reservoirs, changing the regime of discharge and bedload in rivers.

The Geomorphological Map focuses on a large number of works carried out in the plain itself: the third point of this brief review deals with some effects of artificial diversions or canalization works, mainly aiming at creating new navigable waterways. Many such operations go back to pre-industrial times and caused many anomalies in sedimentation processes: e.g., effects due to increased, rapid sedimentation were reported in the lower part of the Adige when its water discharge and speed of flow were reduced after deviation of river waters towards the Castagnaro canal (Tchaprassian, 1994), and in the Brenta which, diverted right along the «Brenta Nova», became suspended after a few decades (Vallerani, 1995).

The fourth point deals with the recent downcutting of river beds, also shown on the Map and discussed in Chapters 5, 12, and 14. This phenomenon had in fact taken place along some rivers during the first half of the 20th century, but became very obvious in the 1960s, to an alarming and widespread extent, causing road bridges to collapse and necessitating immediate maintenance of all works along rivers. Some experts believed that this tendency of riverbeds to deepen might have positive aspects, in that it reduced the dangers of flooding, especially in the case of hanging rivers.

verso gli anni Sessanta, come fenomeno veramente allarmante e diffuso, tale da determinare il crollo di ponti stradali e rendere indispensabili provvedimenti per il mantenimento di tutte le opere esistenti lungo i fiumi. Ad alcuni parve che questa tendenza degli alvei ad infossarsi potesse essere anche positiva, perché avrebbe ridotto i pericoli di esondazione, specie per i fiumi pensili. In realtà si verificarono insieme restringimenti degli alvei ed erosioni laterali, e il fenomeno, troppo rapido e disordinato, richiese interventi d'urgenza contro i nuovi pericoli per la stabilità delle sponde e delle strutture esistenti.

Restando nel tema generale di questo capitolo, questo fenomeno può essere considerato come la dimostrazione di una rapida inversione di tendenza, rispetto al tradizionale fenomeno della sedimentazione e del veloce innalzamento delle golene tra gli argini. In altri termini, l'evoluzione indicata qui ai punti primo, secondo e quarto rientra complessivamente in repentine alterazioni quantitative dei rapporti fra erosione e deposizione, variazioni che si trasmettono da un tratto all'altro dello stesso corso d'acqua in modo diseguale, ma con analogie significative nei vari settori della Pianura Padana.

Oggi, dopo vari decenni, l'approfondimento degli alvei è più controllato, e presenta qualche segno di stabilizzazione. A parte le discussioni accese, nel periodo iniziale, per individuare le cause del fenomeno (qualcuno pensava anche a cause naturali), è evidente che si è trattato di una crisi generalizzata nel bilancio del trasporto solido dei fiumi, dovuta in primo luogo alle escavazioni in alveo di ghiaia e sabbia, non controllate, in secondo luogo ad una sensibile riduzione del trasporto sul fondo, dovuta alle modificazioni che si andavano manifestando nei bacini imbriferi, sia lungo gli alvei dei torrenti, sia sui versanti.

Gli effetti furono esaltati dal sommarsi di più fattori, in quanto il periodo di super-sfruttamento dei materiali ricavabili negli alvei cadde in un arco di tempo in cui già si manifestavano gli effetti della costruzione delle dighe di ritenuta (specialmente per scopi idroelettrici, nei primi sessant'anni del secolo 20°), e inoltre gli effetti della crisi delle attività agricole presso quasi tutte le comunità umane di montagna, in fase di abbandono nel secolo 20° (ma con differenze di vari decenni tra un settore e l'altro del versante italiano delle Alpi e del versante appenninico). La ripresa della copertura boschiva, talora quasi spontanea, ma certo attivamente incrementata per l'impegno degli Enti Forestali di Stato e delle Regioni, si è realizzata nel corso di vari decenni ed ha avuto effetti positivi nella stabilizzazione dei versanti, contemporaneamente ai lavori effettuati per la sistemazione dei torrenti.

Il quinto punto riguarda le trasformazioni visibili negli alvei dei fiumi della pianura, considerandoli anche sotto l'aspetto planimetrico. Per il loro studio, si dispone di una ricca documentazione di carte topografiche prodotte dall'I.G.M. dopo l'unificazione dello Stato italiano, oltre che delle carte realizzate in modo meno omogeneo, ma con grande dettaglio, prima dell'unificazione, a partire dal 18° secolo; si sono aggiunte le levate aerofotografiche, dalla metà del secolo 20°. Questo materiale ha consentito di ottenere analisi storiche precise sull'evoluzione dell'alveo

In reality, what happened was that riverbeds also became narrower and subjected to lateral erosion as they deepened, and the phenomenon, too rapid and disordered, required urgent intervention against new dangers threatening the stability of both banks and existing structures.

Remaining within the general framework of this chapter, the phenomenon may be considered as the demonstration of a rapid inversion of trend with respect to traditional sedimentation and the rapid rise of golene (high water beds) between levees. In other words, the evolution mentioned under the first, second and fourth points above, overall gave rise to sudden quantitative alterations in relations between erosion and deposition: variations which are transmitted from one stretch to another of the same river in different ways, but with significant analogies in the various sectors of the Po Plain.

Today, after several decades, riverbed deepening is more carefully controlled, and some signs of stabilization are appearing. Apart from hotly debated discussions, in the initial period, to identify the causes of the phenomenon (there were even some who thought they were natural), it is clear that a general crisis had struck the balance of solid transport in rivers, due first to uncontrolled riverbed quarrying of gravel and sand, and second to a definite reduction in bedload, resulting from modifications which were taking place in catchment areas, both along mountain riverbeds and on slopes.

The effects were exacerbated by a combination of several factors: the period of super-exploitation of materials quarried from riverbeds occurred in a time-span in which the effects of dam construction (especially for power stations in the first 60 years of the 20th century) were already becoming apparent; in addition, there were the effects of the agricultural crisis which struck almost all mountain communities, with widespread abandon in the 20th century (but with differences of several decades between one sector and the other of the Italian Alps and the Apennine). The sometimes almost spontaneous recovery of woodland, certainly actively enhanced thanks to the commitment of governmental and regional forestry organizations, took place in time and has had positive effects on slope stabilization. Works aimed at better maintenance of mountain streams were also carried out.

The fifth point concerns visible transformations in the beds of plain rivers, considered also from the planimetric viewpoint. *Much documentation is available in the official topographic maps published by the Istituto Geografico Militare after the unification of the Italian state, and in topographic maps prepared in a less homogeneous way, but in great detail, before that unification, starting from the 18th century; aerial photographic surveys became available from the mid-20th century onwards. All this material allows precise historical analyses to be conducted on the evolution of the bed of the Po and of many other rivers, together with the identification of evolutionary trends directly or indirectly linked to artificial operations.*

Examples of detailed studies on the tributaries of the Po and on Veneto rivers are not lacking. Here, in documenting

del Po e di molti altri fiumi. Spesso si è resa possibile così l'identificazione di tendenze evolutive collegate direttamente, ma anche indirettamente, ad interventi artificiali.

Esempi di studi di dettaglio sugli affluenti del Po o sui fiumi veneti non mancano. Qui, nel documentare le variazioni subite dagli alvei fluviali nel corso del tempo, trattandosi di bacini fluviali con superficie dell'ordine dei 10^2 - 10^3 km², è spesso possibile anche un'analisi almeno preliminare dei fattori antropici che rientrano tra le cause delle variazioni stesse: ad esempio, per la Dora Riparia, in Franceschetti & alii (1990); per altri fiumi piemontesi, in Maraga (1989); per il Taro e l'Enza, in Perego (1988, 1994); per il Secchia e il Panaro, in Castaldini & Piacente (1999) e in Castaldini & alii (1999); per il Brenta, in Autori Vari (1981); per il Piave, in Surian (1999).

Secondo quest'ultima ricerca, che appare la più completa per i problemi qui considerati e si riferisce ad un bacino di complessivi 3.900 km², l'alveo del Piave si manteneva, tra il secolo 14° e il 1920, in condizioni prossime a quelle naturali, mentre poi, con un'evidente accentuazione dopo il 1950, l'antropizzazione ha preso il sopravvento con imponenti impianti idroelettrici, con derivazioni a scopi misti (idroelettrici e irrigui), con difese di sponda e con l'estendersi dell'estrazione di materiali dall'alveo. Come risposta, l'alveo (nel lungo tratto che era di tipo *braided*) negli ultimi 90-100 anni ha mostrato mediamente una riduzione di larghezza del 35% e un infossamento di 1-3 m; negli ultimi 30-40 anni si è ridotto della metà il *braiding index*, e in vari segmenti si sta modificando verso il tipo *wandering* («divagante», sinuoso, o «di transizione»). Complessivamente, il tempo di risposta appare breve, ma l'alveo non sembra aver raggiunto un nuovo equilibrio: nel senso che il «tempo di rilassamento» non è ancora completato.

La concatenazione tra cause ed effetti è meno semplice per il Po, sia per la grande estensione del bacino (75.000 km²), sia perché il sistema fluviale è composito e, a tratti, tendenzialmente instabile. Nella fig. 15.6 viene messo in evidenza come nell'arco di pochi decenni il fiume si sia sostanzialmente adattato alle opere di sponda artificiali tendenti ad assecondare la sua sinuosità ma anche a stabilizzare il letto principale (cosa che non si è ottenuta subito, come indica ad esempio la rotta del 1951 in sponda sinistra, poco dopo la confluenza dell'Adda, leggibile in fig. 12.3).

In base ad un lavoro di sintesi prevalentemente morfometrica sulla recente evoluzione del corso del Po (Tacconi & Billi, 1990), risulta che «dal secolo scorso, pur essendo stati eseguiti imponenti lavori di sistemazione alle sponde, non sono cambiati sostanzialmente i parametri morfometrici dell'alveo» ... «la sinuosità è rimasta pressoché invariata; l'unico elemento importante che in media è diminuito è la larghezza dell'alveo pieno, in particolare nei tratti d'alveo 'fissati'. Il lavoro di fissazione dell'alveo secondo un tracciato meandriforme ha portato come conseguenza un aumento della profondità minima in corrispondenza dei *riffle*».

In un secondo lavoro di sintesi, che ha preso in considerazione un tratto del fiume più lungo che nel caso precedente, e attento soprattutto ai processi (Govi & Turitto, 1993), si è riconosciuto che «per un periodo di 150 anni

the variations undergone by riverbeds over time, as we are dealing with fluvial basins with surface areas of 10^2 - 10^3 km², it is sometimes possible to make an at least preliminary analysis of the anthropic factors which are among the causes of the variations themselves: examples may be found in Franceschetti & alii (1990) for the Dora Riparia, Maraga (1989) for other rivers of Piemonte, Perego (1988, 1994) for the Taro and Enza, Castaldini & Piacente (1999) and Castaldini & alii (1999) for the Secchia and Panaro, Autori Vari (1981) for the Brenta, and Surian (1999) for the Piave.

According to the last work mentioned above, which appears to be the most complete as regards the problems considered here and refers to a basin covering a total of 3,900 km², the bed of the Piave remained in almost natural conditions between the 14th century and 1920; evident accentuation of changes began after 1950, when anthropization involved the construction of large hydro-electric power stations having more than one function (production of power and storage of water for irrigation), bank defence works, and riverbed quarrying. The response of the riverbed in the last 90-100 years has shown an average reduction in width of 35% and deepening of 1-3 m; in the last 30-40 years the braiding index has been halved, and in some segments the riverbed is evolving towards the wandering type. Overall, the response time is short, but the riverbed does not seem to have reached a new equilibrium, in the sense that the relaxation time is still not complete.

The chain of events between causes and effects is less simple for the Po, both because of its large basin (75,000 km²) and because the fluvial system is composite and, in parts, tendentially unstable. Fig. 15.6 shows how, over the space of a few decades, the river has substantially fitted itself to artificial embankment works which tend to emphasize its sinuosity but also to stabilize its main bed. However, this did not happen immediately, as shown, for example, by the 1951 breach of the left bank shortly after confluence with the Adda; see fig. 12.3.

According to a mainly morphometric work on the recent evolution of the course of the Po (Tacconi & Billi, 1990), «from the last century, although several large-scale works on the banks have been carried out, the morphometric parameters of the riverbed have not substantially changed» ... «sinuosity is practically the same; the only important point is that, on average, the width of the full bed has become smaller, particularly in the fixed stretches. Riverbed fixing according to a meandering course led to an increase in minimum depth near riffles».

Another work, which examined a longer stretch of the river than the first and focused mainly on processes (Govi & Turitto, 1993), states: «the Po River channel patterns and evolutionary trend remained practically unchanged for a period of 150 years until the 1960s, with a progressive increase of channel length.» ... «Between 1801 and 1951, the Po alluvial plain was flooded once every 10-12 years, with flood levels progressively rising (the highest having been recorded in 1951), as a result of the existing embankment system being continuously extended and strengthened. Starting from 1960, this trend appears to have been reversed, es-

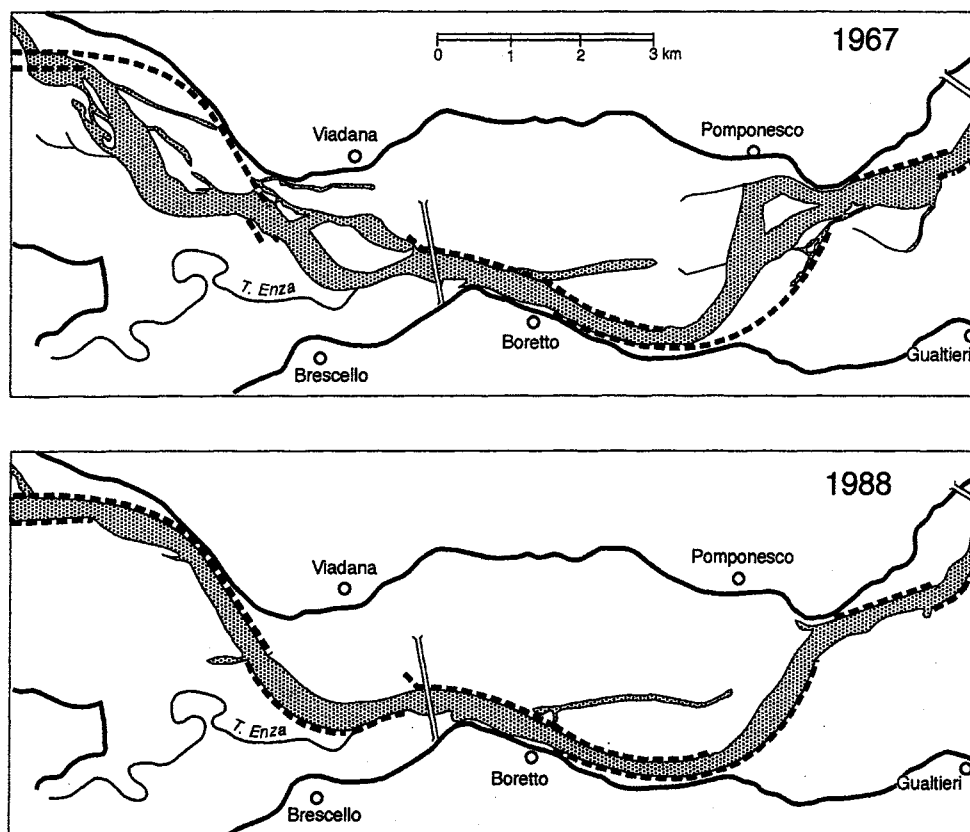


FIG. 15.6 - La regolarizzazione ottenuta artificialmente nel letto del Po: un esempio tra Casalmaggiore e Guastalla (confronto 1967-1988). Tratti grossi continui: argini maestri; tratti interrotti: opere di stabilizzazione dell'alveo ordinario (fonte: rilievi aerofotogrammetrici del Magistrato per il Po, con sede a Parma).

FIG. 15.6 - Artificial regulation of bed of Po: an example between Casalmaggiore and Guastalla (comparison 1967-1988). Bold lines: master levees; dotted lines: embankments on ordinary riverbed (source: aerial photographs of Magistrato per il Po, Parma).

fino al 1960 circa, il Po ha mantenuto pressoché invariate forme d'alveo e tendenza evolutiva, con propensione ad incrementare nel tempo la sua lunghezza»; ... mediamente, tra il 1801 e il 1951, «la piana alluvionale è stata inondata ogni 10-12 anni, con graduale innalzamento delle altezze idrometriche (massima nel 1951), favorito dal continuo prolungamento e rinforzo del sistema arginale preesistente. A partire dal 1960 tale tendenza si è drasticamente modificata, soprattutto per interventi antropici, con effetti di approfondimento d'alveo, sua canalizzazione e riduzione di lunghezza, diminuzione del trasporto solido».

Ricerche di dettaglio si riferiscono a tratti singoli ben precisi. Dutto e Maraga (1994) hanno analizzato il tratto a meandri a monte di Torino, riscontrandovi accorciamenti dovuti a tagli naturali per tracimazione e tagli artificiali del 19° secolo; in precedenza, su questo stesso tratto del Po, un'importante opera di rettifica realizzata nel secolo 18° era stata smantellata dal fiume già dopo 40 anni (Maraga, 1999). Ancora Dutto & Maraga (1994), a valle della confluenza con la Scrivia, riscontrano un'evoluzione capricciosa delle forme a meandri, tendente al raccorciamento e alla trasformazione verso il tipo di transizione o *wandering*, che si accompagna ad un infossamento di 3-4 m dopo il 1951; qui viene ricordato anche il fatto che le piene, specialmente nell'ultimo decennio del secolo 19°,

essentially by human activities; the river bed was deepened by dredging, channelized, and its length reduced, with a decrease in sediment supply ...».

Detailed researches refer to single, well-defined stretches. Dutto & Maraga (1994) analysed the meandering stretch upstream from Torino, finding shortenings due to natural chute cut-off and artificial cuts going back to the 19th century. In the past, along the same stretch of the Po, large-scale straightening operations carried out in the 18th century had been dismantled by the river only 40 years later (Maraga, 1999). Again, downstream from the confluence with the Scrivia, Dutto & Maraga (1994) found random evolution of meandering forms, tending towards shortening and transformation towards the «transitional» or «wandering» type, accompanied by deepening of 3-4 m after 1951. It should be recalled here that floods, especially in the last decade of the 19th century, were very frequent and catastrophic damage was caused to nearby areas.

For a sector downstream from Piacenza, where the meanders of the Po are best expressed, Braga and Gervasoni (1985) examined evolutionary trends considering sediment supplies from the Trebbia, embankment operations tending to constrain the riverbed, and active tectonics. For the stretch between the confluences of the Enza and Panaro, Castaldini & Piacente (1995) reported ancient changes in

erano state molto frequenti e catastrofiche per i danni recati alle fasce rivierasche.

Braga & Gervasoni (1985), per un settore a valle di Piacenza dove i meandri del Po hanno ancor oggi la loro massima espressione, ne hanno seguito l'evoluzione in funzione degli apporti di sedimenti del F. Trebbia, delle opere di arginatura tendenti a vincolare il letto, e della tettonica attiva. Castaldini & Piacente (1995) per il tratto compreso tra le confluenze dell'Enza e del Panaro hanno indicato i mutamenti antichi del corso del Po legati a cause naturali, comprese le cause tettoniche; tra il 19° e il 20° secolo risulta invece un progressivo restringimento dell'alveo di magra ed una riduzione della sinuosità e della lunghezza. Le opere realizzate hanno conferito al letto fluviale un aspetto nettamente «ingegneristico».

L'ultimo punto riguarda la rete scolante secondaria. Essa deriva, in diverse aree di pianura, dal sovrapporsi di interventi svariati dei secoli passati che l'hanno talora eccessivamente complicata (Rusconi, 1991); la sua manutenzione è spesso insufficiente anche perché non supportata da adeguati finanziamenti. Presenta analoghi problemi la rete di irrigazione. Trasformazioni artificiali hanno subito le risorgive, e variazioni assai sensibili subisce la falda freatica, a seconda dell'intensità dei prelievi dai pozzi e delle perdite dei canali irrigui per infiltrazione.

La situazione che si presenta di fronte alla invadente urbanizzazione (che rappresenta una profonda «variazione ambientale», comprendente l'impermeabilizzazione dei terreni e il tombinamento dei canali) mostra un'insufficiente consapevolezza per i seri, nuovi pericoli di allagamenti che si ripetono in occasione di eventi piovosi consistenti, anche quando arealmente limitati (paragr. 12.8).

the course of the Po linked to natural causes, including tectonics. Instead, between the 19th and 20th centuries, progressive narrowing of the low-water river channel and a reduction in the winding course and overall length of the river became apparent. The works carried out have given the riverbed a definitely «engineered» aspect.

The last point concerns the secondary drainage network. In several plain areas, it develops from the complicated overlap of various types of intervention carried out over the past centuries which have sometimes made it excessively complicated (Rusconi, 1991). Its maintenance is often poor, partly because sufficient funds are not available. The irrigation network faces similar problems. Plain springs have been transformed artificially, and the watertable is subjected to sometimes considerable variations, according to the intensity of pumping and losses from irrigation canals due to infiltration.

The present-day situation conditioned by invasive urbanization (which represents a profound «environmental variation», including soil impermeabilization and the covering over of canals, causing them to run through tunnels) demonstrates insufficient awareness of the new and serious dangers of repeated floods after prolonged periods of rain, even though they may be sometimes limited in extent (see Chapter 12, section 8).